

86
24



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN

**DESARROLLO DEL LASER Y SU
APLICACION MULTIDISCIPLINARIA**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A .
NOVA JUAREZ, FRANCISCO JAVIER

DIRECTOR DE TESIS:

IME JUAN MANUEL TORRES MERINO



CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEXICO

1996

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLAN

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JAIME KELLER TORRES
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLAN
P R E S E N T E .

AT'N: Ing. Rafael Rodríguez Ceballos
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la F.E.S. - C.

Con base en el art. 26 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el trabajo "Desarrollo del LASER y su aplicación multidisciplinaria".

que presenta el pasante: Francisco Javier Nova Juárez
con número de cuenta: 8706693-5 para obtener el TITULO de:
Ingeniero Mecánico Electricista .

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T I M E N T E .
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 1 de diciembre de 1995

PRESIDENTE	<u>Fis. Jesús Cruz Guzman</u>	
VOCAL	<u>Ing. Francisco Rodríguez López</u>	
SECRETARIO	<u>Ing. Juan Manuel Torres Merino</u>	
1er. SUPLENTE	<u>Ing. Ramón Osorio Galicia</u>	
2do. SUPLENTE	<u>Ing. Jaime Rodríguez Martínez</u>	

Mamá

No creas que me he olvidado de ti, siempre tengo presente lo difícil que ha sido para ti alejarte de nosotros y no haber compartido con tus hijos todos los momentos que hemos vivido. Quiero que sepas, que de igual manera para mis hermanas y yo, nos ha sido muy difícil vivir sin tu presencia cercana y que siempre te seguiremos queriendo.

Francisco Javier

Este trabajo quiero dedicarlo a mi padre quien me ha brindado todo el amor y apoyo que de él pudo nacer. Asimismo, espero que la culminación de mis estudios profesionales sea la realización de todos sus esfuerzos y sacrificios que hizo durante toda una vida para poder brindar, a mis hermanas y a mí, la oportunidad de estudiar una licenciatura. Quiero creer que todos los problemas que se han presentado entre los dos, se deben a que tú siempre quisiste lo mejor para mí y espero que no te sientas decepcionado por cómo soy, ya que tú eres un ejemplo de tenacidad y siempre tendrás mi respeto y amor.

Le agradezco a mis hermanas Maritza y Coco toda la comprensión, ayuda y amor que me brindaron en los momentos difíciles que vivimos y que sin su ayuda nunca hubiera podido resolver.

El haber concluido este trabajo me permitió valorar todos los momentos que como familia vivimos y creo que éstos nos hicieron madurar de manera brusca, pero lo importante es que cada uno de nosotros vimos lo bueno, o nos hicimos a la idea de, y procuramos siempre crecer como familia, que a fin de cuentas es la base de nuestro desarrollo como individuos.

Por otro lado, aprovecho la oportunidad para agradecer el apoyo académico que me brindaron los ingenieros Ubaldo Ramirez Urizar y Bianca de la Peña Valencia. También agradezco los comentarios y sugerencias que el Físico Jesús Cruz Guzmán realizó sobre este trabajo.

Por último, agradezco a Juan Manuel haberme permitido pertenecer a su Cátedra Programación y Electrónica Aplicada en la Multidisciplina, haber incluido este trabajo como un proyecto de ésta y ayudarme a realizar una de mis metas más anheladas en mi vida.

ÍNDICE

PRÓLOGO	iii
Capítulo 1 Desarrollo del LASER	
1.1 Presentación	1
1.2 Radiación Térmica	2
1.3 Modelo Atómico de Bohr	4
1.4 Emisión Espontánea y Estimulada	6
1.5 El MASER	8
1.6 El Origen de la Teoría LASER	11
1.7 La Gran Contienda del LASER	14
1.8 El LASER de Rubí	14
1.9 El Primer LASER de GAS	16
1.10 Desarrollos Relacionados con el LASER	17
1.11 El LASER de Semiconductor	18
1.12 Otros LASER's de Gas	21
1.13 LASER's Químicos	23
1.14 El LASER de Colorante	24
1.15 El LASER de Excímero	25
1.16 El LASER de Electrón Libre	27
1.17 El LASER de Rayos-X	28
1.18 El Futuro del LASER	29
Capítulo 2 Física del LASER	
2.1 Introducción	32
2.2 Coeficientes de Einstein	32
2.3 Amplificación de la Luz	37
2.4 La Condición de Umbral	39
2.5 Ecuaciones de los Niveles de Energía del Medio Amplificador	42
2.5.1 El sistema LASER de dos niveles	42
2.5.2 El sistema LASER de tres niveles	44
2.5.3 El sistema LASER de cuatro niveles	49
2.6 Mecanismos de Ensanchamiento del Espectro de Emisión	52
2.7 El Resonador Óptico	54
2.8 Modos de una Cavidad Rectangular y de un Resonador Abierto	55
2.9 El Factor de Calidad (Q)	59
2.10 Selección del Modo Oscilante	60
2.11 Variación de Q (Q-switching)	64
2.12 La Operación en Modelocking del LASER	67

2.13 Métodos de Excitación	68
----------------------------	----

Capítulo 3 Algunos Sistemas LASER

3.1 LASER's de Gas	71
3.1.1 LASER's de Helio-Neón (He-Ne)	71
3.1.2 LASER's de Gases Nobles Ionizados	75
3.1.3 LASER's de Bióxido de Carbono (CO ₂)	78
3.2 LASER's de Estado Sólido	85
3.2.1 LASER's de Rubí	85
3.2.2 LASER's de Neodimio (Nd)	89
3.3 LASER's Líquidos	94
3.3.1 El LASER de Colorante	94
3.4 LASER's de Excímero	99
3.5 LASER's de Semiconductor	103

Capítulo 4 Aplicaciones Multidisciplinarias del LASER

4.1 Aplicaciones Industriales	110
4.1.1 Modo de Operación de los LASER's Industriales	110
4.1.2 Corte de Materiales	115
4.1.3 Soldadura de Materiales	123
4.1.4 Perforado de Materiales	127
4.1.5 Consideraciones para el Uso de LASER's Industriales	131
4.2 Otras Posibles Aplicaciones	
4.2.1 Comunicaciones por Fibra Óptica	133
4.2.2 Almacenamiento Óptico de la Información	137
4.2.3 Holografía	139
4.2.4 Aplicaciones Médicas	141
4.2.5 Aplicaciones Biológicas	149
4.2.6 Aplicaciones Químicas	149
4.2.7 Aplicaciones Odontológicas	152

CONCLUSIONES	154
---------------------	-----

APÉNDICE El Espectro Electromagnético	156
--	-----

BIBLIOGRAFÍA	157
---------------------	-----

PRÓLOGO

El objetivo de este trabajo es introducir al estudiante que en su formación profesional requiera de conocimientos sobre el LASER, así como el de mostrar que el LASER es una herramienta, que debido a sus propiedades particulares tiene un gran número de aplicaciones y grandes ventajas sobre las fuentes comunes de radiación. Esto significa que el LASER no sólo es una fuente de luz para usos de investigación sobre óptica, espectroscopia, etc., sino que por el contrario, el LASER ha dejado de ser una simple curiosidad de laboratorio y que gracias a los investigadores que se han interesado en el desarrollo de nuevos Sistemas LASER y en el estudio de sus posibles aplicaciones, el LASER se ha convertido en una fuente de luz y calor de gran utilidad en la industria, en el tratamiento de materiales, en la medicina, en aparatos electrónicos, comunicaciones por fibra óptica, diferentes ramas de la ciencia y en algunos otros casos concretos.

El *Desarrollo del LASER*, como el de cualquier otro descubrimiento importante, fue posible gracias a los avances previamente logrados en otras disciplinas científicas. En el caso del LASER, estas disciplinas se encuentran fundamentalmente en la física moderna y, en particular en la parte de ésta llamada mecánica cuántica. A su vez el origen de la mecánica cuántica se encuentra en el S. XIX, cuando los científicos de la época, en especial Max Planck, trataron de encontrar la distribución del espectro emitido por un cuerpo caliente. Por tanto una breve Historia del LASER, que parte desde los orígenes de la Teoría LASER y muestre un especial interés en los pioneros del descubrimiento del LASER, es importante hacer para poder apreciar y comprender como se han desarrollado los diferentes tipos de LASER's y como el LASER ha evolucionado hasta llegar a ser una fuente de luz y calor de gran utilidad en la actualidad.

Para poder entender las grandes ventajas que presenta el LASER, debido a las propiedades particulares de su haz -gran intensidad, monocromaticidad, coherencia espacial, directividad o colimación- en el Capítulo 2 se describe el funcionamiento de un LASER y se analiza por separado cada uno de sus tres principales componentes, a saber: medio activo, cavidad resonante y fuente excitadora.

En la actualidad hay una gran variedad de Sistemas LASER que se ocupan en diferentes disciplinas, unos para usos generalizados y otros en menor grado de utilización, pero todos al fin y al cabo importantes. Describir cada uno de estos Sistemas LASER sería una labor muy grande y rebasa el objetivo de este trabajo. De esta manera, se han seleccionado para ser descritos en el Capítulo 3, algunos Sistemas LASER en base a su potencial aplicación en la ciencia, medicina, industria, etc.

El LASER en la actualidad tiene una vasta aplicación multidisciplinaria, por lo que analizar cada una de sus aplicaciones sería casi interminable y con seguridad se presentarían omisiones importantes, en cuanto a las aplicaciones de vanguardia. Por lo tanto, en el Capítulo 4 se analiza un caso específico, que es la *Aplicación Industrial del LASER* y sólo algunas otras aplicaciones, donde el LASER comienza a ser de gran importancia, se mencionan.

Capítulo 1 Desarrollo del LASER

1.1 Presentación

Un LASER es una fuente de radiación en la parte visible, infrarroja o ultravioleta del espectro electromagnético, y su nombre es el acrónimo de Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation -Luz Amplificada por Emisión Estimulada de Radiación. El LASER alcanza muchos campos de operación en la vida cotidiana; las comunicaciones por fibra óptica, aplicaciones médicas en terapia y cirugía, en el campo de la electrónica de consumo, en usos industriales, en diferentes ramas de la ciencia y en algunos otros casos concretos. Esto se debe a que la luz LASER ofrece grandes ventajas, que las fuentes comunes de luz no tienen; como por ejemplo, es coherente (que viaja en la misma dirección y con la misma fase), así como su gran potencia y direccionalidad o colimación.

Los tres principales componentes de cualquier LASER son el medio amplificador, la fuente excitadora y el resonador óptico. El medio amplificador consiste de un conjunto de átomos, moléculas o iones los cuales actúan como un amplificador para ondas de luz. Bajo condiciones normales, el número de átomos que se encuentran en el estado fundamental de energía es siempre más grande que el número de átomos en el estado excitado de energía, como tal, una onda de luz que pasa a través de este conjunto de átomos causará más absorciones que emisiones y por lo tanto la onda será atenuada. De esta manera para obtener una amplificación, es necesario tener una *inversión de población* (entre dos estados atómicos) en la que haya un gran número de átomos en el estado excitado de energía comparado con el número de átomos que están en el estado fundamental de energía. Cuando una onda pasa a través de un conjunto de átomos que está en un estado de inversión de población, la onda inducirá más emisiones y será amplificada. La fuente excitadora es la fuente de energía que mantiene a el medio amplificador en su estado de población invertida. El resonador óptico, que consiste de un par de espejos perfectamente alineados uno frente a otro, proporciona la retroalimentación óptica a el LASER de manera que éste pueda actuar como una fuente de radiación.

La base física del funcionamiento del LASER es el fenómeno de amplificación de ondas electromagnéticas por emisión estimulada de radiación. Fue Albert Einstein, en 1917, quien llegó a la conclusión de su existencia cuando, al abordar el problema del espectro de radiación del cuerpo negro desde un punto de vista termodinámico, se le hizo imprescindible la introducción de un coeficiente que diera cuenta de tal fenómeno para llegar a la fórmula correcta dada por Max Planck en 1900.

Problemas tecnológicos retrasaron medio siglo la obtención de dispositivos basados en estas teorías. Históricamente la primera aplicación de la emisión

estimulada fue en el campo de las microondas, con la obtención del primer MASER de amoníaco (MASER es el acrónimo de Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) en 1953 por parte de Charles H. Townes junto con J.P. Gordon y H. Zeiger, en la Universidad de Columbia.

Siete años más tarde, en junio de 1960, se consigue ampliar el campo de aplicación de estos dispositivos hasta la zona visible del espectro con la obtención de la primera emisión LASER. Fue T. H. Maiman, en los laboratorios de la Hughes Aircraft Co. quien, con un dispositivo de rubí, consiguió la primera emisión de luz coherente pulsada obtenida por un LASER, su longitud de onda era de 694 nm.

A partir de ese momento se probaron gran cantidad de materiales, obteniéndose acción LASER de diversas longitudes de onda en muchos de ellos.

En diciembre de 1960 se consiguió el primer LASER gaseoso. A. Javan y sus colaboradores, Bennett y Harriot, investigando en los laboratorios de la Bell Telephone AT&T lograron con un LASER de Helio-Neón una emisión continua de 1152 nm.

En 1962 se obtuvo el LASER de semiconductor de GaAs (arseniuro de galio) en tres laboratorios independientes, General Electric, IBM y Lincoln Laboratory del M.I.T (Instituto Tecnológico de Massachusetts).

En 1964 Bridges y Bennett obtuvieron el LASER de argón. Asimismo, Patel desarrolló el LASER de CO₂, que ha evolucionado hasta convertirse en nuestros días en el LASER más utilizado en la industria.

El campo de investigación parece interminable e incluso a la fecha muchos otros tipos de LASER's están en proceso de investigación, aunque la mayoría de éstos se basan en pequeñas variaciones de los existentes hasta mediados de la década de 1970(2). De la misma forma que el campo de investigación se ha desarrollado, el campo de aplicaciones sin duda ha crecido y se utilizan en diferentes ramas de la industria, investigación, ingeniería, medicina, etc.

1.2 Radiación Térmica

El desarrollo del LASER, fue posible gracias a los avances logrados en otras disciplinas científicas. Estas disciplinas científicas se encuentran básicamente en la física moderna y muy en especial, en la parte de ésta llamada mecánica cuántica. A su vez el origen de la mecánica cuántica lo encontramos a finales del siglo XIX, cuando los científicos de esa época trataron de encontrar la distribución del espectro emitido por un cuerpo caliente.

El problema de la "radiación térmica", se basaba en simples observaciones hechas por los científicos de finales del siglo anterior que notaron que al calentar un objeto a cierta temperatura, por ejemplo, a 200°C emite cierta radiación invisible llamada calor o radiación infrarroja. Si se aumentaba la temperatura del objeto hasta 600°C notaron que una tenue luz roja empezaba a ser emitida. Si se continuaba aumentando la temperatura del objeto hasta alrededor de los 2000°C (que es por ejemplo la temperatura del filamento interno de un foco eléctrico común) emitirá radiación visible de luz amarilla y si se seguía aumentando continuamente la temperatura el color observado progresivamente era el azul, violeta, etc. Este es un resultado que de simple análisis resulta lógico.

La figura 1.1 muestra el tipo de gráfica obtenida de los resultados experimentales observados en la realización de un experimento como el descrito en el párrafo anterior. En la curva se gráfica la intensidad de radiación emitida contra longitud de onda.

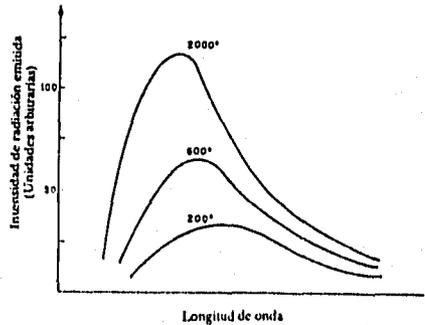


Figura 1.1 Intensidad de radiación emitida por un cuerpo caliente vs longitud de onda

Analizando la gráfica se puede observar que, a medida que aumenta la temperatura del cuerpo, el punto máximo de intensidad de radiación emitida se desplaza hacia longitudes de onda cada vez menores. A este hecho se le conoce como *ley de desplazamiento de Wien*. De igual forma, de la figura 1.1, se puede notar que la energía total emitida por un cuerpo caliente a una temperatura T es proporcional al área contenida bajo la curva de esa temperatura. Entre más caliente esté el cuerpo, más energía en forma de radiación emite. Este resultado es la *ley de Stefan-Boltzmann*, que expresa que la energía total irradiada por un cuerpo con una temperatura T aumenta en forma proporcional a la cuarta potencia de la temperatura a que se encuentra.

Uno de los resultados más sorprendentes a los que se enfrentaron estos científicos, radicaba en que los resultados experimentales graficados en la figura 1.1 no dependen de la naturaleza o forma del objeto en cuestión. Esto es, si se tienen dos trozos de cualquier material y de cualquier forma, por ejemplo uno de platino y otro de acero, al calentarse y al graficar los resultados de intensidad de

radiación contra longitud de onda para varias temperaturas se obtuvieron las mismas características generales en ambos casos(1).

En concreto, el problema al que se enfrentaron los científicos de fines del S. XIX fue el de tratar de explicar teóricamente los resultados experimentales descritos con anterioridad, y mostrados en la figura 1.1. El problema era construir un modelo teórico-matemático capaz de representar las observaciones experimentales. Claro está, inicialmente la herramienta de que ellos se valieron fue la física y la matemática entonces conocidas(1).

El problema de la *radiación térmica* también conocido como el problema del *cuerpo negro*, fue resuelto por *Max Planck* en el año de 1900. Así se inició una de las más importantes ramas de lo que ahora llamamos física moderna. Planck halló la solución al postular que la energía de una onda electromagnética (o cualquier otro sistema oscilante) no es emitida en forma continua, sino discontinuamente, en forma de impulsos o paquetes de energía llamados "*cuantos*". La energía E de cada "*cuanto*" es directamente proporcional a la frecuencia de oscilación. Esto es:

$$E = h \cdot \nu \quad (1.1)$$

donde h es una constante universal, hoy conocida como la *constante de Planck* y que vale $h = 6.6256 \times 10^{-34}$ J/s, y ν es la frecuencia de oscilación.

Con esta suposición y haciendo uso de la física estadística se pudo calcular la distribución de energía emitida por longitud de onda para un cuerpo a la temperatura T . El resultado fue una expresión matemática que concuerda con los resultados experimentales mostrados en la figura 1.1. La evidencia experimental mostró, en efecto, que un sistema físico no puede intercambiar cantidades arbitrarias de energía sino sólo cantidades "*cuantizadas*". Asimismo, dicha evidencia experimental mostró que los "*cuantos*" se comportan como partículas. Es decir, los "*cuantos*" no eran sólo un recurso matemático que permitió resolver un problema, sino entes físicos reales(3).

1.3 Modelo Atómico de Bohr

El primer modelo "*moderno*" del átomo fue proporcionado por *Ernest Rutherford*. El modelo estaba basado en sus resultados experimentales que mostraban conclusivamente que el átomo está formado por un núcleo muy masivo con carga positiva, alrededor del cual giraban los electrones con carga negativa, formando un sistema similar a un pequeño sistema planetario. El problema fundamental de este modelo radicaba en que, de acuerdo a la teoría electromagnética clásica una partícula con carga negativa como el electrón, girando en una órbita, debería radiar ondas electromagnéticas y de esta manera el electrón perdería rápidamente toda su energía. Es decir, un átomo sería un sistema inestable en el

cual los electrones se colapsarían siguiendo trayectorias de órbitas espirales en su recorrido hacia el núcleo atómico, debido a la atracción entre partículas de cargas opuestas, emitiendo en el proceso un breve destello de radiación electromagnética. Nuevamente, como en el problema de la radiación térmica, la física clásica era incapaz de proporcionar una respuesta congruente con la observación experimental.

El físico *Niels Bohr* en 1913, solucionó este problema al proponer un modelo atómico en el cual los electrones únicamente pueden encontrarse en un número discreto de órbitas alrededor del núcleo; para que un electrón pase de una órbita a otra debe emitir o absorber, según sea el caso, un cuanto de energía. De esta manera Bohr sintetizó con su modelo los resultados experimentales de Rutherford y las proposiciones teóricas de Planck.

En la figura 1.2 se muestra la estructura de un átomo de acuerdo con la teoría de Bohr. En este caso tenemos que un electrón puede encontrarse solamente en una de las cinco órbitas mostradas. Para que el electrón realice una transición de la primera a la segunda órbita necesita recibir un cuanto con energía exactamente igual a la diferencia de energía entre la primera y la segunda órbita. De forma análoga, el paso de un electrón de una órbita superior a una inferior sólo será posible si éste emite un cuanto con energía igual a la diferencia entre dichas órbitas.

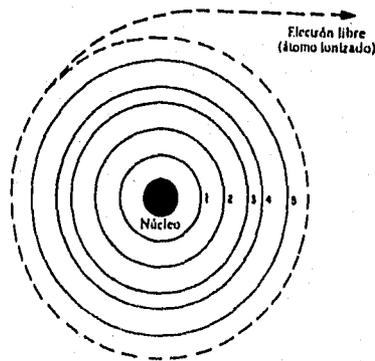


Figura 1.2 Modelo Atómico de Bohr

Hay que notar que si el electrón se encontrase en la primera órbita no podrá emitir ningún "cuanto" de energía porque no existe una órbita de menor energía a la cual pueda descender. Por el contrario, también hay que observar que si el electrón se encuentra en la última órbita (en nuestro ejemplo de la figura 1.2, en la quinta órbita) y además el electrón recibe otro cuanto de energía éste pasará a ser *electrón libre* y se separará del átomo, puesto que ya no hay órbitas de nivel superior a las cuales pueda ascender el electrón. Entonces se dice que el átomo

está ionizado, esto es, se ha convertido en un átomo que ha perdido uno o varios de sus electrones.

El modelo atómico de Bohr pudo explicar espectros de emisión de átomos simples como el del hidrógeno (H) y el del helio (He)(3), y proporcionó las bases para comprender el espectro de átomos más complejos. A medida de que se fue profundizando en el estudio de la estructura atómica, el modelo de Bohr fue incapaz de explicar nuevas observaciones experimentales y como consecuencia tuvo que ser mejorado. No obstante, las ideas esenciales del modelo atómico que Bohr postuló son suficientes para comprender y cumplir con los objetivos de este trabajo.

1.4 Emisión Espontánea y Emisión Estimulada

El primer paso en el camino del LASER fue la publicación de un estudio de *Albert Einstein* (1916) describiendo como los átomos pueden interactuar con la luz. Él consideró un fotón, que es un cuanto de energía de luz, el cual tiene la cantidad exacta de energía requerida para mover un átomo entre dos niveles de energía. Los físicos anteriormente tenían únicamente el concepto de dos casos posibles. El primer caso era si el átomo se encontraba en su estado más bajo de energía, éste podría absorber un fotón y trasladarse a el más alto nivel de energía, incrementando su energía interna. El segundo es cuando el átomo se encuentra en el más alto nivel de energía, éste puede liberar energía en forma de fotón, y cae a el nivel más bajo de energía, a este proceso Einstein lo llamó *emisión espontánea*, puesto que ésta aparece por sí misma. Einstein asimismo propuso una tercera alternativa: si un fotón arriba cuando el átomo se encuentra en el más alto nivel de energía, el fotón puede estimular al átomo para emitir otro fotón de igual energía, y cae a el más bajo nivel de energía.

Ahora podemos pasar a conocer los procesos básicos de interacción entre la materia y la radiación electromagnética que en su más pequeña escala se reducen a los procesos de interacción entre átomos y cuantos de energía de radiación electromagnética (*fotones*). Las ondas electromagnéticas pueden interactuar con otras partículas elementales, como es el átomo, en virtud de cambios en la energía interna de los átomos. Estos pueden adoptar sólo movimientos y orientaciones que difieran en una serie discontinua de energías: esto es, estados de energía o niveles, en oposición a una idea de energía continua. *La energía interna del sistema, según la teoría de Planck, está cuantizada*(3).

Un átomo puede interactuar con la radiación electromagnética haciendo una transición desde un nivel de energía a otro. El cambio será desde un valor de energía interna, que corresponde a movimientos y orientaciones particulares de los electrones y del núcleo, a otro valor de energía, dando lugar a una diferencia

bien en los movimientos, bien en las orientaciones o en ambos. Si la energía interna final del átomo excede de la inicial, la diferencia de energía puede ser suministrada por el campo de radiación electromagnético, y el proceso es de absorción de la radiación. Inversamente, cuando la energía se cede al campo de radiación, el proceso es de emisión de radiación, y el estado final de energía del átomo puede tener menos que el estado inicial.

El campo de radiación está también cuantizado en la energía, de modo que sólo puede intercambiar cantidades discontinuas de energía con los átomos que interactúa. Si la energía de un átomo en un nivel de energía superior, m , es E_m y en un nivel de energía inferior, n , es E_n , tal que $E_m > E_n$, la frecuencia f_{mn} de la radiación producida en una transición creciente ($n \rightarrow m$) o decreciente ($m \rightarrow n$) del átomo entre los estados m y n , está dada por la condición de frecuencia de Bohr,

$$E_m - E_n = h \cdot f_{mn} \quad (1.2)$$

Esta expresión es igual a la postulada por Planck (ecuación 1.1), pero para un caso particular, en que según la teoría atómica de Bohr, este sistema atómico sólo podrá interactuar con fotones que tengan una energía E igual a la diferencia de energía entre los niveles atómicos relacionados en la interacción ($E_m - E_n$). Donde h sigue siendo la constante de Planck. La radiación de frecuencia f_{mn} , está cuantizada en "paquetes" o fotones de energía de valor $h \cdot f_{mn}$, y la energía de radiación de frecuencia f_{mn} sólo puede cambiar en esta cantidad cuando interactúa con un átomo aislado. El átomo absorbe un fotón y aumenta su energía interna, o disminuye su energía interna al emitir un fotón.

No todas las transiciones entre los estados de un átomo son posibles. La teoría predice y los experimentos lo confirman, que sólo pueden ocurrir ciertas transiciones, y se pueden formular reglas de selección que facilitan la determinación de las transiciones permitidas entre varios niveles de energía, teoría de Bohr(3).

Sigamos consideremos un átomo que tiene un estado de energía superior y un estado inferior entre los cuales se permiten transiciones. Se encuentra que, cuando el átomo está en el estado superior, hay una probabilidad definida de que después de un período de tiempo el átomo vuelva al estado inferior con emisión de radiación. Esta probabilidad tiene dos componentes, una de las cuales es constante y la otra variable. La componente constante puede estar ligada a la probabilidad de desintegración de una sustancia radiactiva que depende del átomo y de la transición particular que tiene lugar. La componente variable de la probabilidad para que ocurra la transición descendente (emisiva), depende linealmente de la densidad de energía (J/m^3 o fotones/ m^3) de la radiación a la frecuencia de transición atómica que incide sobre el átomo. La presencia de radiación externa a la frecuencia de transición aumenta la probabilidad de emisión de radiación por el átomo que está en su estado superior.

El proceso por el cual los átomos excitados pueden volver al estado básico emitiendo radiación, aun cuando no haya radiación presente, y que origina la componente constante de la probabilidad de transición, se conoce como *emisión espontánea de radiación*. En presencia de radiación incidente, que no sea a la frecuencia de transición atómica (f_{mn}), los átomos pueden volver espontáneamente al estado base; la radiación emitida entonces no mantiene una relación de fase definida con la radiación incidente. Sin embargo, la radiación incidente en la frecuencia de transición (f_{mn}) aumenta la probabilidad de transición, esto es, se induce a los átomos a emitir radiación que mantenga una relación definida de fase con la radiación incidente. Este proceso se conoce como *emisión de radiación inducida o estimulada*.

Así un conjunto de átomos en el nivel superior de energía, es una fuente potencial de ganancia de energía electromagnética. El asunto se complica por el hecho de que los átomos en el inferior de dos estados de energía, absorben radiación a la frecuencia de transición atómica con una igual probabilidad a la de emisión estimulada por los átomos que están en el nivel de energía superior. De aquí, que para obtener una ganancia de energía de un conjunto de átomos, debemos asegurarnos de que haya un gran exceso de átomos en el estado superior de energía, y mantener este exceso de algún modo, o sea mantener una *inversión de población*. No es necesario que los átomos absorban primero radiación con la frecuencia de transición para alcanzar el estado superior; esto es, la energía requerida se puede obtener por bombardeo electrónico o iluminación óptica, si se comprenden más de dos niveles; y son posibles otros métodos de excitación. De la emisión estimulada en el Capítulo 2 se hará una presentación más concreta.

1.5 EL MASER

La Segunda Guerra Mundial disparó el desarrollo de la tecnología del radar, lo cual ayudó a abrir el estudio de la parte de las microondas del espectro electromagnético. Durante la Guerra muchos científicos desarrollaron un especial interés en las microondas a la vez que trabajaban en el radar. Después de la Guerra, fueron capaces de conseguir equipo militar de microondas excedente para continuar con sus investigaciones(2). Este trabajo condujo directamente a la construcción del primer dispositivo de emisión estimulada, el MASER, la palabra fue dictada por Charles H. Townes, en la Universidad de Columbia, como un acrónimo de *Microwave Amplification by the Stimulated Emission of Radiation* (Amplificación de Microondas por la Emisión Estimulada de Radiación).

La idea del MASER fue concebida independientemente al mismo tiempo por tres grupos: por Townes en la Universidad de Columbia, por Joseph Weber en la Universidad de Maryland, y por Alexander M. Prokhorov y Nicolai G. Basov en el Instituto de Física Lebedev en Moscú. Fue Townes, junto con un compañero de

postdoctorado y un estudiante de doctorado, quienes construyeron el primer MASER.

Townes ingresó a la Facultad de Física de la Universidad de Columbia en 1948, después trabajó varios años en los Laboratorios Bell, y se inició en el estudio de la espectroscopia de las microondas. Sus investigaciones en el Laboratorio de Radiación de Columbia comprendieron la generación de ondas con longitudes de onda milimétricas, más cortas que los centímetros de las longitudes de onda de las microondas. Ese proyecto avanzó lentamente y en 1951 dio un gran brinco en su desarrollo. Townes concibió la idea del MASER mientras asistía a una conferencia científica en la ciudad de Washington D.C.

Townes retomó la idea del MASER a su regreso a Columbia, donde recibió la ayuda de su compañero de postdoctorado Herbert J. Zeiger y del estudiante de doctorado James P. Gordon. Trabajaron con un haz de moléculas de amoníaco, buscando producir una inversión de población por aislamiento de moléculas excitadas(3). Ellos guiaron el haz de moléculas excitadas dentro de una cavidad resonante a la frecuencia de 24 GHz, que es la frecuencia de transición del amoníaco. Pensaron que la emisión espontánea de algunas moléculas excitadas de amoníaco estimularían a otras a emitir en la misma longitud de onda. Ellos prefirieron una cavidad resonante para ayudar a acoplar la radiación emitida a las moléculas excitadas de amoníaco, y alcanzar los más altos niveles de amplificación.

De esta manera el primer oscilador y amplificador de emisión estimulada que funcionó fue gaseoso, utilizando amoníaco; también se utilizó éste como espectrómetro para investigar la estructura del espectro del amoníaco en la región de la longitud de onda de 1.25 cm. Se utilizó un focalizador electrostático y un separador de estado para proporcionar un haz de moléculas excitadas, el cual atravesaba una cavidad cilíndrica que operaba en modo TE_{011} (en el Capítulo 2 se discutirá los modos de guías de onda). La potencia de salida de la cavidad dependía de la sincronización de la cavidad, los estados excitados de las moléculas actualmente presentes y de la frecuencia de ensayo. Relacionando estos tres factores fue posible determinar la estructura fina e hiperfina de varias líneas del amoníaco. La resolución espectrométrica alcanzada estaba en la región de 7 kc/s, mucho mejor que la previamente obtenida de 64 kc/s, utilizando técnicas de células de absorción. Cuando una frecuencia de una línea de emisión coincide con la frecuencia resonante de la cavidad y la frecuencia de ensayo, el dispositivo actuaba como amplificador, desde luego con una anchura de banda considerable, pero menor que la de la línea de emisión. De aquí, que el MASER de amoníaco tenga una alta sensibilidad cuando se utiliza como espectrómetro.

Townes no fue el único en pensar la emisión estimulada de microondas. Weber analizaba una perspectiva para obtener emisión estimulada de una inversión de población después de ingresado a la Universidad de Maryland en 1951. No fue el

primero en producir una inversión de población constante por el camino que él indicó, pero reconoció que la emisión estimulada sería coherente, con las ondas en fase. Sin embargo, a diferencia de Townes, Weber no consideró la posibilidad de hacer un oscilador, el cual generara su propia salida. En cambio, Weber ambicionó un dispositivo que pudiera amplificar radiación de algún otra fuente. El trabajo de Weber fue presentado en una conferencia en 1952 y publicado el siguiente año.

Mientras tanto, Prokhorov encabezó a un grupo de jóvenes físicos en Lebedev quienes estudiaban espectroscopia molecular. Él y Basov buscaron el control de las poblaciones de varios niveles de energía para mejorar la sensibilidad. Esto llevó a un detallado estudio, publicado en 1954, de cómo separar moléculas con diferente energía en un sistema de haz molecular, y como la amplificación podía ocurrir en un grupo de moléculas excitadas. Para su tesis doctoral Basov construyó el primer MASER soviético, unos cuantos meses después de operado el MASER de Townes en Columbia. Las dos contribuciones de los investigadores soviéticos fueron notables, y ellos y Townes compartieron el Premio Nóbel de Física en 1964 por desarrollar el "principio MASER-LASER".

El campo de investigación del MASER creció rápidamente y un gran número de investigadores se involucraron en su estudio para más tarde abrir el camino de el *Desarrollo del LASER*. Un primer avance de estos investigadores fue trasladarse más allá del simple esquema usado por Townes en su MASER de amoníaco de haz molecular. Este sistema comprendía únicamente dos niveles de energía y requería de la separación física de las moléculas excitadas de aquellas con baja energía. La inversión de población ocurría en una cavidad donde solamente las moléculas excitadas estaban presentes; después de finalizada la emisión estimulada las moléculas caen a el nivel más bajo.

Para mantener la acción MASER se requiere de un muy complejo esquema comprendido por lo menos de tres niveles de energía(2). El nivel más bajo es el estado fundamental, normalmente ocupado por las moléculas, las cuales son excitadas a el nivel más alto para producir una inversión de población. Basov y Prokhorov (1955) propusieron los primeros dos esquemas para MASER's de gas de tres niveles. Una propuesta fue excitar moléculas de un estado base a el nivel más alto de energía con una fuente de radiación externa. Esto colocaría más moléculas en el nivel más alto que en el nivel intermedio, generando una inversión entre esos dos niveles superiores, sin necesitar excitar la mayor parte de las moléculas más allá de el estado más bajo de energía. La otra propuesta fue eliminar moléculas de el nivel de energía más bajo, reduciendo su población abajo de el nivel de la población del nivel intermedio. Esto produciría una inversión de población entre aquellos estados escondidos, encabezando la acción MASER.

Pronto después, Nicolas Bloembergen, trabajando en la Universidad de Harvard, publicó la primer propuesta para un MASER de estado sólido de tres niveles

(1956). Su propuesta fue muy detallada e indicaba algunos materiales específicos. Como los soviéticos, deseaba producir una inversión de población por la excitación del medio activo a un nivel de energía alto. La idea de Bloembergen relacionada con los niveles de Zeeman, estados con energía proporcional a un campo magnético externo, el cual podía ser variado para cambiar el nivel de energía y por lo tanto la longitud de onda de salida. Ese fue un avance práctico importante, puesto que los primeros MASER's fueron limitados a unos muy estrechos rangos de longitud de onda, correspondientes a la energía exacta de una transición molecular. El MASER de Bloembergen además mantenía los niveles de ruido extremadamente más bajos que otros MASER's. Otro pionero del LASER, Ali Javan, también trabajó en MASER's de tres niveles. Este concepto fue un aporte importante a la base teórica del LASER.

Si bien los MASER's pronto fueron opacados por los LASER's, se le encontraron algunas aplicaciones importantes en investigaciones físicas, particularmente en la espectroscopia de precisión. En la Universidad de Harvard, Norman F. Ramsey, H.M. Goldenberg, y Daniel Kleppner usando una técnica de haz atómico hicieron el primer MASER de hidrógeno en 1960. Partiendo de hidrógeno molecular, generaron un haz de átomos de hidrógeno, después dirigieron los átomos excitados dentro de una cavidad resonante de microondas. El MASER de hidrógeno puede hacerse extremadamente estable, haciéndolo extremadamente valioso para mediciones de precisión (Ramsey, 1990). El MASER de hidrógeno fue uno de los logros por los cuales Ramsey obtuvo el premio Nóbel de Física en 1989.

1.6 El Origen de la Teoría LASER

Justo antes de que los MASER's empezaran a proliferar en la última mitad de la década de 1950, unos cuantos científicos vieron la posibilidad de amplificar emisión estimulada en longitudes de onda más cortas que las de las microondas. En la Unión Soviética, V.A. Fabrikant y sus discípulos registraron una patente el 18 de junio de 1951, intitulada "Un método para la amplificación de radiación electromagnética (ultravioleta, visible, infrarroja y longitudes de radio), diferente por el hecho de que la radiación amplificada está pasando a través de un medio el cual, por medio de radiación auxiliar u otros medios, genera una concentración excesiva, en comparación con la concentración de equilibrio de los átomos, otras partículas, o sistemas en niveles de energía superiores correspondiente a estados excitados"(2). Sin embargo, esta aplicación inicialmente no tuvo la aceptación de la Oficina Soviética de Patentes y no fue publicada hasta 1959. Ésta apareció para tener un pequeño efecto en la investigación del LASER, incluso en la Unión Soviética.

En los Estados Unidos, Robert H. Dicke desarrolló el concepto de superresplandor al que llamó "bomba óptica". Su modelo usaba un pequeño pulso

de excitación para producir una inversión de población, el cual generaría una intensa precipitación de emisión espontánea. Dicke independientemente indicó que un par de espejos paralelos, formando un interferómetro de Fabry-Perot, podía servir como una cavidad óptica resonante lo cual registró como una patente, intitulada "Amplificación molecular, sistemas de generación y métodos", en el año de 1956 la cual le fue otorgada hasta dos años después.

La primer propuesta detallada para construir un LASER -el cual en aquel tiempo era llamado "MASER ÓPTICO"- fue publicada por Townes y Arthur L. Schawlow. Schawlow estudió un postdoctorado bajo las órdenes de Townes en la Universidad de Columbia hasta que se marchó para después ingresar a los Laboratorios Bell en 1951. Sin embargo continuaron trabajando juntos en un libro sobre espectroscopia de microondas, aunque no en MASER's. En 1957 ambos empezaron a pensar en la posibilidad de 'MASER's infrarrojos y ópticos', idea discutida en los Laboratorios Bell y decidieron llevarla a la práctica. Trabajaron varios meses en el problema, como lo narran en sus memorias, lo que los condujo a la publicación de su famoso artículo "Infrared and Optical MASERS" (MASER's Infrarrojos y Ópticos) en diciembre de 1958 en la revista *Physical Interview*.

El artículo tuvo un profundo impacto en el desarrollo del LASER en los Estados Unidos. Éste antes de ser impreso y aparecer en revistas ya circulaba en los Laboratorios Bell (de la AT&T Co.) y en la Universidad de Columbia, y su publicación formal marcó el inicio de la gran contienda en busca del LASER que culminaría en la construcción del primero. Sin embargo, no todo el mundo reconoció su importancia en aquel tiempo y de hecho los abogados de los Laboratorios Bell no creían que valiera la pena patentar estas investigaciones, y sólo con la insistencia de Townes se registró después la patente. En los Estados Unidos quedó registrada en el año de 1960.

Mientras tanto, ideas similares corrieron a través de la mente de un egresado doctoral de la Universidad de Columbia, Gordon Gould. Gould escribió sus ideas del LASER; incluyendo la definición de LASER como tal, "Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation"; entrado el año de 1957, con lo cual había dado un paso para lograr la patente.

El paso de MASER a LASER no fue tan obvio como aparenta, puesto que existen grandes diferencias físicas entre las microondas y la luz visible. La energía de un fotón óptico es miles de veces más grande que la energía de los fotones de las microondas, y las longitudes de onda de la luz visible son miles de veces más cortas que la de las microondas. Además los niveles de energía son muy diferentes, así como los materiales empleados. Una de las más importantes diferencias es el tipo de cavidad resonante que se emplea, y el desarrollo de las cavidades necesarias para la acción LASER fue uno de los más grandes retos en su desarrollo(2).

Las ondas electromagnéticas tienen resonancia en cavidades si la distancia recorrida a través de la cavidad es un número entero de longitudes de onda. La resonancia más simple está en una cavidad de un ancho de media longitud de onda, en la cual un recorrido completo es igual a una longitud de onda como se muestra en la figura 1.3. Las microondas son medidas en centímetros, y las cavidades para microondas típicamente son del orden de una longitud de onda transversal, además de ser cerradas por todos lados. La luz visible tiene longitudes de onda abajo de un micrómetro, por lo tanto el uso análogo entre los dos tipos de cavidades es obviamente inoperante.

La solución a este problema, ya reconocido por Townes, Schawlow y Gould, fue un dispositivo óptico conocido como un interferómetro de Fabry-Perot. El Interferómetro es simplemente dos espejos montados paralelamente uno frente a otro, separados por varios miles de longitudes de onda de la luz visible. La luz rebota de atrás hacia adelante entre los espejos, a través del medio activo, estimulando la emisión de más luz. En la práctica, un espejo refleja toda la luz incidente, mientras que el otro espejo transmite algo de luz en forma de haz coherente (haz de LASER).

La adjudicación del crédito por "inventar" el LASER fue controversial. Schawlow y Townes tenían honores ampliamente otorgados por la comunidad científica. Su artículo de la *Physical Review* tuvo un profundo impacto, y fue el suceso más importante para iniciar los esfuerzos de investigación que condujeron a la construcción de los primeros LASER's. Las notas de Gould y descendientes -sus patentes y propuestas para consolidar su investigación- tuvieron únicamente una mínima circulación, y esencialmente no impactaron a muchos científicos del mundo.

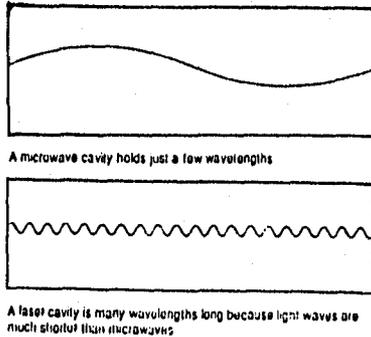


Figura 1.3 Comparación entre la cavidad resonante para microondas y para la luz visible

Irónicamente, la controversia Townes vs Gould fue de sobra, porque Theodore Maiman construyó el primer LASER llevándose todo el crédito.

Otros científicos también investigaron prospectos para longitudes de onda más cortas en contraparte de las del MASER, incluyendo a Basov y Prokhorov en la Unión Soviética (Hoy República Rusa). El interesante desarrollo de la teoría del LASER culminó en una competencia para trasladar los conceptos teóricos a la práctica y construir el primer LASER.

1.7 La Gran Contienda del LASER

La publicación del artículo de Townes-Schawlow fue el inicio de la contienda por la construcción de lo que entonces era llamado MASER ÓPTICO. Algunos investigadores, como Townes, Theodore Maiman y Nicolás Bloembergen, trabajaron en MASER's de microondas. Otros, como Peter P. Sorokin, Robert Hall y C. Kuman N. Patel, llegaron de otros campos de la física después de interesarse en el concepto del LASER.

Primeramente los esfuerzos se concentraron en materiales cuyas estructuras de niveles de energía fueran bien conocidos con anterioridad por estudios de espectroscopia. Allí Javan empezó a trabajar en el LASER de gas de helio-neón en los Laboratorios Bell justo antes que el artículo de Schawlow-Townes fuera publicado. En la Unión Soviética, Basov estudiaba semiconductores. Con unas cuantas excepciones, como la de los Laboratorios Bell, la mayor parte de las investigaciones fueron de fondos modestos.

El más grande programa de investigación fue patrocinado por la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada (Advanced Research Projects Agency, ARPA) del Departamento de Defensa de los Estados Unidos, la agencia incorporó investigaciones arriesgadas con alto potencial de remuneración.

Gould, como Townes, inicialmente se concentraron en vapores de metal-álcali(11), pero los vapores de metal-álcali probaron ser muy difíciles para la construcción de LASER's.

1.8 El LASER de Rubí

Entre los materiales MASER considerados para usarse en LASER's fueron el rubí sintético y el óxido de aluminio dopado con átomos de cromo. Las líneas del cromo fueron útiles en MASER's, y su espectroscopia era bien conocida. En los Laboratorios Bell, Schawlow consideró al rubí como un material LASER, pero en 1959 públicamente descartó al rubí por ser inadecuado. Esta opinión fue basada sobre datos insuficientes, y pronto probaron que Schawlow estaba equivocado.

Mientras tanto, Theodore Maiman intentó usar sus conocimientos en MASER's de rubí para construir un LASER en los Laboratorios Hughes Aircraft Research de

Malibu, California. Empezó a trabajar con rubí puesto que éste era un material bien conocido; en principio pensó que se podía cambiar más tarde a un mejor material, cuando comprendiera completamente los requerimientos para la acción LASER. Sin embargo, eventualmente se convenció él mismo de que Shawlow estaba equivocado, y que el rubí haría un buen LASER. Pronto después triunfó Maiman en hacer el LASER de rubí, el 16 de mayo de 1960.

El LASER de Maiman fue pequeño y elegante: una vara de rubí, con sus extremidades plateadas para reflejar la luz, la cual colocó dentro de una lámpara de destello-flash. La administración Hughes Research reaccionó entusiasmadamente una vez que vio al LASER trabajando, y patrocinó una completa e insistente campaña publicitaria, en julio de 1960.

Un problema más serio llegó cuando Maiman remitió su artículo para su publicación. La entonces nueva *Physical Review Letters*, descartó su publicación del artículo al que llamó "sólo otro artículo de MASER". Maiman apresuradamente preparó un reporte breve pero conciso, el cual inmediatamente fue aceptado por el semanario británico *Nature*. El artículo de *Nature*, se publicó el 6 de agosto de 1960, convirtiéndose en el primer reporte de un trabajo sobre LASER, Maiman más tarde publicó un análisis más detallado en *Physical Review Letters*.

Sin embargo algunos ya habían usado las lámparas de destello-flash mostradas en la primera publicación de *Nature*, antes que el mismo Maiman realmente las usara. El grupo de Schawlow en los Laboratorios Bell fue de los primeros en lograr un trabajo de LASER. Su LASER, fue considerablemente más grande que el de Maiman. Poco después, la acción LASER sobre líneas ligeramente diferentes en rubí "oscuro" o "rojo", las cuales tenían una concentración más alta de iones de cromo que el rubí "rosa" usado por Maiman, fue reportada por los Laboratorios Bell y otros grupos en la *Physical Review Letters*.

La secuencia inusual de publicación confundió a unos cuantos lectores, especialmente a aquellos que únicamente leían publicaciones norteamericanas. Maiman publicó un artículo de emisión óptica del rubí en *Physical Review Letters*, pero no escribió sobre la acción LASER. El grupo de Schawlow fue el primero en reportar un LASER de rubí en *Physical Review Letters*, pero únicamente repitieron las demostraciones de Maiman. Algunas declaraciones demasiado entusiastas de los Laboratorios Bell AT&T, y la creencia de merecer los créditos de la invención del LASER, confundieron más a los lectores. Sin embargo, es evidente que Maiman, no los Laboratorios Bell AT&T, merece todos los créditos de haber hecho el primer LASER.

Virtualmente todos los científicos lucharon en la gran contienda del LASER, pero Maiman se concentró en esquemas complejos para generar una inversión de población y fortalecer lo que los científicos suponían una señal débil. El LASER de Maiman fue también elegante, en simplicidad, y produjo inesperadamente

pulsos de gran potencia, que hizo que muchos investigadores repensaran en sus estudios.

A temperatura ambiente, el rubí es un LASER de tres niveles (aunque para bajas temperaturas se convierte en un LASER de cuatro niveles). La luz de una lámpara de destello-flash excita los átomos de cromo en el rubí a un nivel de energía alto, del cual rápidamente caen a el nivel más alto de la transición LASER. Ese nivel LASER superior es llamado *metaestable* puesto que tiene un tiempo de vida grande, así varios átomos de rubí acumulados en ese nivel, producirán una inversión de población. Al caer emiten luz LASER regresando a el estado base. El problema con un sistema de tres niveles es que la inversión de población requerida para la acción LASER es posible únicamente si la mayor parte de los átomos de cromo pueden ser excitados afuera del nivel base. En apariencia esto era un problema para varios investigadores, pero Maiman lo resolvió usando cortos e intensos pulsos de una lámpara de destallo-flash.

La diferencia entre LASER's de tres y cuatro niveles es tan importante como la diferencia entre MASER's de dos y tres niveles de energía(3). Mientras que los LASER's de tres niveles funcionan bien, los LASER's de cuatro niveles son más potentes y son sistemas más versátiles. Los LASER's de cuatro niveles pueden generar haces estables, mientras que sistemas de tres niveles son limitados para operación pulsada (sin embargo, no todos los LASER's de cuatro niveles trabajan de manera continua). En resumen, los LASER's de cuatro niveles trabajan mejor.

Los investigadores Peter P. Sorokin y Mirek Stevenson del Centro de Investigación IBM T.J. Watson en Yorktown, Nueva York, produjeron un LASER de uranio que emitió a 2.5 μm de longitud de onda que fue el primer LASER que incluía transiciones entre cuatro niveles. Sin embargo, porque dentro de otros factores necesita de enfriamiento criogénico nunca se le encontraron aplicaciones prácticas.

1.9 El Primer LASER de Gas

La proliferación de LASER's de estado sólido fue un poco inesperado, porque la mayor parte de las primeras propuestas fueron para LASER's de gas, incluyendo a los de vapores de metales alcali del Grupo 1a de la tabla periódica: sodio, potasio y cesio. Sin embargo, justo antes de finalizar 1960 el programa bien fundado de LASER's de gas de los Laboratorios Bell AT&T finalmente reportó un triunfo. Ali Javan, William R. Bennet y Donald R. Herriot hicieron el primer LASER de Helio-Neón.

Javan estudió bajo las ordenes de Townes en Columbia, y se empezó a interesar en MASER's ópticos aproximadamente por el tiempo en que ingresó a los Laboratorios Bell. Determinó que una descarga de gas en una mezcla de helio

(He) y neón (Ne) sería un sistema particularmente puro. Primero demostró la amplificación; pero construyó un LASER capaz de oscilar lo cual no fue una tarea fácil puesto que carecía de las herramientas disponibles hoy en día. Los espejos tenían que estar alineados exactamente en forma paralela uno frente al otro para lograr que el LASER de He-Ne oscilara, pero esta alineación fue difícil de realizar sin un LASER de salida continua. Después de esfuerzos esmerados, Javan, Bennett y Herriot finalmente lograron el LASER el 12 de diciembre de 1960.

Su LASER de He-Ne no fue del tipo rojo extensamente usado en nuestros días. Su LASER emitía cerca del infrarrojo en una transición de $1.15 \mu\text{m}$ de longitud de onda, la cual Javan calculó que era más fuerte que la ahora familiar línea roja. Javan dijo después que no pudo hacer en aquel entonces el LASER rojo, porque su ganancia es alta únicamente en tubos con diámetros interiores tan pequeños que la alineación de los espejos, en aquel entonces, resultaría ser muy difícil(2).

La primera operación de un LASER de He-Ne en la línea roja de 632.8 nm no llegó sino hasta un año después, cuando A.D. White y J. Dane Rigden (1962) probaron el LASER rojo de He-Ne en los Laboratorios Bell. Por ese tiempo Javan se trasladó al Instituto Tecnológico de Massachusetts (M.I.T), donde también desarrolló investigación.

Por más de veinte años, el LASER rojo de He-Ne fue el tipo más común de LASER. En cantidad, los LASER's baratos de semiconductor tomaron el primer lugar en ventas a mediados de la década de 1980. Sin embargo, cientos de miles de LASER's de He-Ne están siempre cada año a la venta y sus fabricantes desarrollan LASER's comerciales de He-Ne que emiten en líneas débiles visibles. El LASER de He-Ne permanece como el LASER de gas más común.

La llegada del LASER de He-Ne marcó dos cruciales acontecimientos. Fue el primer LASER que emitió un haz continuo, preferible para varias aplicaciones que los pulsos del LASER de rubí. Esto fue posible porque el neón, el medio emisor de luz, es un sistema de cuatro niveles. El LASER de He-Ne, también fue el primer LASER de gas. No solamente mostró que la acción LASER era posible en un gas, también mostró que podía ser excitado por una descarga eléctrica y que podía transferirse energía entre dos elementos diferentes -los átomos de helio absorben energía de los electrones y la transfieren a los átomos de neón. De esta manera, es más fácil poner nuevos gases en un tubo LASER que desarrollar nuevos cristales, así los LASER's de gas superaron en número a los LASER's de estado sólido.

1.10 Desarrollos Relacionados con el LASER

Como los LASER's se hicieron disponibles en más laboratorios, nuevos descubrimientos se realizaron alrededor de sus propiedades y sus aplicaciones

potenciales. Teóricos como A.G. Fox y Tingye Li de los Laboratorios Bell aportaron valiosos fundamentos al publicar un análisis teórico extenso de formas de oscilación dentro de resonadores LASER's. Aunque sus estudios fueron terminados antes de que cualquiera hubiera operado un LASER continuo, permanecen como un análisis definitivo de la oscilación LASER.

Aproximadamente por el mismo tiempo Peter A. Franken, A.E. Hill, C.W. Peters, y G. Weinreich de la Universidad de Michigan descubrieron que los potentes pulsos de un LASER de rubí cambiaban al pasar a través de un cristal de cuarzo. Alguna luz fue convertida de 693 nm, que es la longitud de onda del rubí rojo, a 347 nm en el ultravioleta. La frecuencia de esa luz ultravioleta es dos veces más grande que la frecuencia del LASER de rubí. Tal generación de la segunda armónica es uno de los muchos fenómenos ópticos no lineales, los cuales pueden cambiar la longitud de onda o la frecuencia de la luz. Sus descubrimientos estimularon el desarrollo de la espectroscopia y la óptica no lineales, investigación por la cual Nicolas Bloembergen y Arthur Schawlow compartieron el Premio Nóbel de Física de 1981.

Otro importante desarrollo fue una técnica para cambiar las características de una cavidad LASER resonante para generar cortos y pequeños pulsos. El concepto, llamado *Q-switching* porque cambia el "factor de calidad" de la cavidad (el factor de calidad se abordará en el Capítulo 2), suprimieron ganancia en el resonador, así la potencia puede ser acumulada en el medio activo, entonces rápidamente se incrementa el factor de calidad de la cavidad, de esta manera el LASER emite la acumulación de energía en un pulso continuo con duración de cerca de 10 ns. El Q-switching primero fue demostrado por Robert W. Hellwarth y R.J. McClung en los Laboratorios Hughes Research.

Estos desarrollos en su oportunidad ayudaron a mejorar la utilidad de los LASER'S. El estudio de la oscilación LASER condujo a un mejoramiento de la estructura del resonador, particularmente importante para LASER's continuos con baja ganancia, tales como el de He-Ne. La óptica no lineal y la generación de la segunda armónica hicieron posible la nueva longitud de onda. El Q-switching hizo posible potencias pico más altas y pulsos más cortos -desarrollos que abrieron nuevas áreas para la investigación y condujeron a aplicaciones prácticas, tales como la de taladrar.

1.11 El LASER de Semiconductor

El siguiente mayor desarrollo en la física del LASER fue el LASER de semiconductor. La invención del transistor hizo de la física del semiconductor un tema interesante en la década de 1950 y probablemente ayudó al rápido desarrollo del LASER de semiconductor. Sin embargo, la emisión de luz en semiconductores era conocida con medio siglo de anterioridad. En 1907 H.J.

Round en Inglaterra encontró que la aplicación de un campo eléctrico incidente estimula en el carburo de silicio (un semiconductor) la emisión de luz. Esta emisión "electroluminiscente" proviene de la unión entre las partes del semiconductor con diferentes concentraciones de las impurezas que transportan la corriente eléctrica.

En términos de electrónica moderna, esta zona de emisión es la unión $p-n$, la frontera entre las regiones donde la corriente es transportada por los huecos (semiconductor tipo p) y por los electrones (semiconductor tipo n). Si un voltaje es aplicado haciendo que ambos portadores fluyan hacia la unión, los dos se recombinarán en la frontera y liberarán energía. Ciertos semiconductores liberan algo de esa energía en forma de luz. Este fenómeno es la base del diodo emisor de luz o LED.

Dado el amplio interés en semiconductores y LASER's, no es sorprendente que un gran número de investigadores haya considerado producir una inversión de población y una acción MASER o LASER en semiconductores.

Dos investigadores japoneses, Yasushi Wetanabe y Jun-ichi Nishizawa, independientemente pensaron en la generación de la emisión estimulada a través de una unión de semiconductor. En 1957 solicitaron una patente para un "MASER de semiconductor", y el 20 de septiembre de 1960 recibieron la patente japonesa 273217. Ellos proponían cerrar completamente la cavidad resonante, como en los osciladores de microondas, e indicaron que sería posible obtener del telurio emisión a $4 \mu\text{m}$ de longitud de onda. Sin embargo, aparentemente su patente tuvo poco impacto en otras partes del mundo.

El grupo de Basov en Moscú realizó el trabajo teórico más extenso e hizo un número de propuestas, incluyendo la aproximación que exitosamente probaron: usaron uniones $p-n$ en semiconductores altamente dopados. Otros quienes analizaron prospectos para emisión estimulada de semiconductores fueron Maurice G.A. Bernard y G. Duraffourg (1961), y C. Benoit a la Guillaume (1961) en Francia. Sin embargo, a estos estudios teóricos les faltó identificar características claves de los LASER's de semiconductor.

Los artículos teóricos estimularon experimentos que redituaron en resultados favorables. Un grupo de Leningrado reportó un incremento insignificante del ancho de banda de la emisión de diodos de arseniuro de galio enfriado criogenicamente a altas corrientes de polarización, un síntoma de que la emisión estimulada podía ocurrir. En la Conferencia de Investigación de Dispositivos de Estado Sólido en julio de 1962, R.J. Keyes y T.M. Quist de los Laboratorios Lincoln del Instituto Tecnológico de Massachusetts (M.I.T.) reportaron la fabricación de diodos de arseniuro de galio (GaAs), los cuales emitan luz incoherente con eficiencia estimada en 85%.

En apariencia la mayor parte del fundamento estuvo disponible con anterioridad para la fabricación del LASER de semiconductor, y la conferencia de julio de 1962 marcó el inicio de una contienda para construir el primero(2). Hall asistió al encuentro de julio y tomó ideas para hacer su LASER de semiconductor en los Laboratorios Research and Development de la General Electric en Schenectady, New York. El grupo de Marshall I. Nathan en el Centro de Investigación IBM Watson en Yorktown Heights, New York, continuó dentro de la investigación de LASER's de semiconductor, y publicó un artículo el 4 de octubre de 1962 en la revista *Applied Physics Letters*. Después de ese mes investigadores en los Laboratorios Bell AT&T y Nick Holonyak en el Laboratorio de la General Electric de Syracuse también informaron de la construcción de LASER's de semiconductor.

Los cuatro grupos independientes propusieron dispositivos notablemente similares. Los tres primeros usaron uniones $p-n$ en arseniuro de galio (GaAs), las cuales fueron enfriadas a 77 K, la temperatura del nitrógeno líquido, y que estimularon con pulsos de alta corriente de duración aproximada de 1 μs . Su salida fue a 840 nm de longitud de onda cerca del infrarrojo. El diodo de Holonyak fue hecho de arseniuro-fosfuro de galio, de este modo emitía en más cortas longitudes de onda de 600 a 700 nm. El grupo de IBM pulió las extremidades del cristal de semiconductor para que sirvieran como espejos que proporcionarían una retroalimentación para la oscilación LASER, como en una cavidad resonante.

Irónicamente, los laboratorios GTE pudieron haber sido los primeros en proponer las ideas necesarias para trabajar en un LASER de semiconductor a principios de 1961, pero les faltó actuar tan rápidamente como los otros grupos. Los investigadores de la GTE aparentemente documentaron el concepto del LASER de semiconductor en diciembre de 1961 pero nunca publicaron su propuesta, y no operaron un LASER de semiconductor hasta noviembre de 1962.

Estos primeros LASER's de semiconductor fueron únicamente el principio, y tomaría años para que tecnología más práctica evolucionara. Los primeros experimentos muestran que la recombinación de portadores en una unión produce estados excitados que pueden generar emisión estimulada así como la emisión espontánea de los LED's. Sin embargo, los primeros dispositivos operaban como LASER's únicamente para densidades de corrientes extremadamente altas: por el orden de 10,000 A/cm² del área de la unión. Podían operar solamente en el modo pulsado, y únicamente a muy baja temperatura ambiente, o las altas corrientes de polarización quemarían los exteriores.

Estas altas corrientes reflejan una limitación inherente de los primeros diseños de LASER de semiconductor: mala limitación de la corriente de polarización y de la emisión LASER. Los primeros LASER's fueron del tipo *homounión*, en los cuales la luz emitida por la capa activa brincaba de arriba hacia abajo por el mismo material. Estas limitaciones fueron superadas -y la corriente de umbral reducida -

cuando los investigadores empezaron a usar estructuras más complejas. El desarrollo clave que permitió la operación de un LASER de semiconductor a temperatura ambiente fue la *doble heterounión* o *doble heteroestructura* LASER, en la cual la capa activa es insertada entre dos capas de un material escasamente diferente. Ambas luz y corriente están confinadas en la capa activa por medio del uso de un material en el cual el *intervalo de banda* -la diferencia de energía entre la corriente conductora y los electrones que forman las uniones cristalinas- es más grande que la de la capa activa. El primer dispositivo de este tipo fue hecho en 1968. Después grupos en los Laboratorios Bell AT&T y en la Unión Soviética hicieron los primeros LASER's de semiconductor capaces de una operación continua a temperatura ambiente.

Los primeros dispositivos de los Laboratorios Bell estaban hechos para funcionar únicamente unas cuantas horas a temperatura ambiente, pero con tiempos de vida notablemente mejorados. Para 1975, LASER's de semiconductor capaces para emitir continuamente llegaron a el mercado, inicialmente en unos cuantos miles de dólares cada uno. Avances técnicos firmes ayudaron a la tremenda expansión del mercado del LASER de semiconductor que continua hasta nuestros días. Nuevas estructuras confinaron a la capa activa no solamente dentro de una capa delgada, posteriormente redujeron las corrientes de umbral, se mejoró la calidad de salida y el tiempo de vida del dispositivo. Nuevos sistemas de materiales se desarrollaron para que LASER's de semiconductor emitieran en más cortas o más grandes longitudes de onda que los 750 a 900 nm, rango del GaAlAs. Técnicas de producción en masa permitieron una alta calidad del diodo LASER para poder ser vendido en grandes cantidades a precios reducidos cada uno, para aplicaciones tales como reproductores de compact disc e impresoras. Las ventas mundiales de diodo LASER pasaron de el millón de unidades en 1985, y para 1988 pasaron los 20 millones de unidades por año.

1.12 Otros LASER's de Gas

Los primeros LASER's de gas tenían potencias de salida limitadas. Los Laboratorios Bell construyeron un enorme LASER de He-Ne, que sin embargo generaba únicamente salidas de potencia de 150 mW. C. Kumar N. Patel, en aquel entonces un físico joven de los Laboratorios Bell, comprendió que la acción LASER de gases atómicos era limitada en potencia y decidió intentar con un diferente experimento: gases moleculares.

El Bióxido de Carbono (CO_2) fue su primera elección, y cálculos posteriores indicaron que trabajaría bien(2), e intentó excitar el gas puro con una descarga eléctrica. De esta manera a principios de 1963, obtuvo decenas de milliwatts a $10.6 \mu\text{m}$ de longitud de onda en el espectro infrarrojo. Su LASER de CO_2 fue el primer LASER de gas de alta potencia. Patel gradualmente mejoró el LASER de CO_2 , primero agregando nitrógeno para transferir la descarga de excitación más

eficientemente a las moléculas del CO₂, también agregó helio o agua para desexcitar el nivel LASER más bajo del CO₂, y de este modo incrementar la potencia de salida del LASER. Este trabajo condujo a otros LASER's Infrarrojos de gas molecular que operaron bajo similares principios.

El siguiente mayor tipo de LASER de gas en descubrirse fue el LASER ionizado, en el cual el medio activo fue un ion que perdía uno o más electrones. El primero de éstos fue un LASER ionizado de mercurio descubierto en 1963 por Earl Bell y Arnold Bloom en Spectra Physics Inc. Observaron cuatro líneas, dos en la región visible y dos en la región infrarroja del espectro, con una descarga pulsada de gas en un tubo que contenía una mezcla de 500:1 de helio y mercurio, con potencia pico de 40 watts.

El LASER de helio-mercurio nunca se convirtió en un importante LASER comercial, pero esfuerzos por duplicarlo y entender su funcionamiento condujeron a William Bridges a descubrir el LASER de argón ionizado, el cual llegó a ser importante. Como Bridges explica, el descubrimiento fue un accidente que llegó gracias a sus esfuerzos por entender como el gas amortiguador afecta la operación del LASER de mercurio. Construyó un LASER de mercurio, pero tuvo problemas con una versión de argón-mercurio. Revisó la alineación de los espejos y saco del tubo la mezcla de argón-mercurio, el cual relleno después con una de helio-mercurio. Con estos cambios asimismo produjo una línea azul-verde a 488 nm antes desapercibida. Revisiones cuidadosas mostraron que la emisión de 488 nm provenía del argón dejado en el tubo. Bridges entonces intentó con argón puro en un tubo limpio, y observó la acción LASER en líneas visibles de argón ionizado(2).

El trabajo de Bridges provocó una corriente de investigación sobre la acción LASER en gases ionizados poco comunes, llegando a las demostraciones de LASER's de criptón, xenón y neón ionizados. Todos estos primeros LASER's fueron pulsados, aunque sus comportamientos indicaban la posibilidad de una acción LASER continua.

El LASER ionizado de mercurio además condujo al desarrollo de LASER's de vapor-metal, en medios neutros e ionizados separadamente. Esto inspiró a Grant Fowles, un profesor de la Universidad de Utah, a iniciar una investigación sistemática de LASER's de vapor-metal junto con William Silfvast. Su primer éxito fue a principios de 1965 con zinc y cadmio. Ellos se enfocaron a los metales, e inicialmente no se dieron cuenta que el gas amortiguador de helio que usaron para transportar la descarga a través del tubo era esencial para la acción LASER en algunas transiciones, incluida la línea azul de 441.6 nm usada en LASER's comerciales de helio-cadmio(2). Silfvast fabricó el primer LASER continuo de helio-cadmio en 1967.

Mientras que buscaban un LASER ionizado de plomo en la Universidad de Utah, Silfvast y Fowles inesperadamente encontraron una fuerte línea roja. Ellos estaban sorprendidos porque sus espejos tenían muy altas pérdidas en longitudes de onda del rojo, las cuales su LASER tuvo que superar para operar. Esa línea roja del plomo fue la primera de una serie de líneas de LASER's de vapor-metal de átomos neutros. Todos estos LASER's de vapor-metal neutros pueden operar únicamente en modo pulsado porque el nivel LASER más bajo se satura, terminando con la inversión de población y el pulso LASER en menos de 100 nanosegundos. La desaparición de los átomos del nivel LASER más bajo es aproximadamente en 100 μ s, después de lo cual el LASER puede disparar otro pulso. Los LASER's de vapor de cobre son eficientes productores de luz verde, por lo que han encontrado en recientes años aplicaciones comerciales. Otros miembros de la familia, el LASER de vapor de oro que emite luz roja, también se ofrece comercialmente.

1.13 LASER's Químicos

Todos los primeros LASER's de gas -He-Ne, gases raros ionizados, CO₂ y vapor de metal- eran accionados por medio de una descarga eléctrica a través del gas. Descargas eléctricas de excitación aún son comunes en los LASER's de gas, pero existen otras alternativas. Una atractiva propuesta para LASER's de alto poder es el uso de una reacción química. Esta idea primero fue propuesta por John C. Polanyi, un químico de la Universidad de Toronto, el 8 de junio de 1960, en un encuentro de la Royal Society de Canadá.

Polanyi es mejor conocido por su trabajo en la física de reacciones químicas, por el cual obtuvo el Premio Nóbel de Química en 1986. En 1958 descubrió que moléculas recientemente formadas emiten luz infrarroja. La medición de su radiación infrarroja le ayudó a entender el proceso de las reacciones químicas. Asimismo esto lo llevó a predecir que una reacción química podía producir la inversión de población necesaria para la acción LASER.

Mucha investigación se enfocó a LASER's químicos durante los años siguientes, y conferencias sobre el tema especialmente en Moscú y San Diego ayudaron a la investigación. Sin embargo, no fue hasta 1965 que J.V.V. Kasper y George C. Pimentel construyeron el primer LASER químico, un LASER de cloruro de hidrógeno que emitía a 3.7 μ m de longitud de onda, en la Universidad de California en Berkley. Otras investigaciones continuaron, las cuales eventualmente condujeron a LASER's químicos de salida continua, que podían operar completamente con la energía producida en la reacción química sin fuentes externas de energía.

Unos cuantos LASER's químicos se usan en investigación hoy en día. Sin embargo, su principal atracción, es su potencial para producir altos niveles de potencia para usarse en armas LASER.

1.14 El LASER de Colorante

El uso de colorantes orgánicos como el medio activo de LASER's fue propuesto en el año de 1961. Los colorantes disueltos en líquidos parecían atractivos como medio activo, porque mostraban fuerte fluorescencia, pero había muy pocos esfuerzos para proseguir con la idea. Los investigadores quizás se desanimaron por los infructuosos resultados obtenidos por D.L. Stockman de la General Electric(2). La oportunidad para los LASER's colorantes finalmente llegó a mediados de la década de 1960, cuando Peter Sorokin de IBM construyó el primero de estos, seguido inmediatamente por los grupos independientes de los Laboratorios Hughes Research y del Instituto Max Planck de la otrora Alemania Occidental.

Sorokin empezó a interesarse en las propiedades espectrales de los colorantes orgánicos cuando junto con John Lankard probaron como variaciones del factor de calidad Q o *Q-switching* -más adelante se discutirá el *Q-switching*- en los LASER's de rubí generaban pulsos cortos y de alta potencia. Primero observó una fuerte emisión cuando iluminaba una materia colorante orgánica de cloro-aluminio en alcohol etílico con un LASER de rubí. Cuando él y Lankard alinearon los espejos con la cavidad colorante, observaron una acción LASER infrarroja en el colorante tan intensa que quemaba su emulsión fotográfica. Los primeros resultados de Sorokin en 1966 no recibieron entera atención, y posteriormente estos fueron homologados por el grupo de Fritz P. Schaefer del Instituto Max Planck. Mary Spaeth y D.P. Borfield de Hughes Research escucharon acerca del trabajo de Sorokin y posteriormente construyeron un LASER de colorante similar, y demostraron la acción LASER empleando un colorante con propiedades totalmente diferentes. Sorokin después intentó excitar el medio colorante con una lámpara de destello-flash y no con un LASER de rubí, y esta experimentación también funcionó.

El valor principal del LASER de colorante hoy en día es su capacidad de sintonización a través de un rango de longitudes de onda, pero los primeros LASER's colorantes emitían en una longitud de onda determinada, donde el colorante fluorecía más fuertemente. Los primeros LASER's de colorante emitían en el infrarrojo, pero para 1967 también se construyeron para longitudes de onda visibles. Asimismo en ese año se vio la primera operación de un LASER colorante de longitud de onda sintonizable, por Bernard H. Soffer y B.B. McFarland de la empresa Korad. Como otros LASER's, los primeros LASER's de colorante tenían espejos en cada extremo del resonador LASER, uno de los cuales transmitía algo de la luz en forma de haz LASER. Soffer y McFarland reemplazaron el espejo

totalmente reflejante por una rejilla de difracción, la cual podía sintonizar diferentes ángulos. Cambiando el ángulo de la rejilla cambia la longitud de onda de la luz que la rejilla a su vez regresa por lo largo del eje axial del LASER al espejo de salida. Esta sintonizabilidad probó la propiedad más importante de los LASER's colorantes, lo que los condujo a su amplio uso en laboratorios de investigación. Schawlow los empleo ampliamente para estudios de espectroscopia en la Universidad de Stanford, trabajo por el cual recibió el Premio Nóbel de Física en 1981.

Todos los primeros LASER's colorantes fueron pulsados y no fue hasta 1970 que el grupo de Benjamin Snavely de Eastman Kodak operaron el primer LASER continuo de colorante, el cual era excitado por un LASER ionizado continuo de argón. Este tipo de LASER colorante se hizo importante en varios experimentos de espectroscopia de alta precisión. Asimismo puede usarse para generar pulsos extremadamente cortos, de duración tan corta como 6×10^{-15} segundos.

1.15 El LASER de Excímero

Para 1970, la mayoría de los LASER's de uso comercial hoy en día ya habían sido construidos, aunque importantes perfeccionamientos faltaban por hacerse, especialmente para LASER's de semiconductor. Una excepción fue el LASER de excímero, construido a mediados de 1970 para ocupar un importante vacío dentro del espectro de emisión del LASER, hasta ese año proporcionado por fuentes potentes pulsadas de luz ultravioleta.

El término excímero actualmente es un nombre inapropiado, proveniente de los orígenes del dispositivo. Estrictamente hablando, un excímero es un compuesto de dos átomos idénticos, el cual es estable únicamente en un estado excitado electrónicamente, tal como una molécula que contiene dos átomos de xenón, Xe_2^* (el asterisco indica que la molécula está en un estado excitado). Si la molécula libera su energía de excitación, los dos átomos no están más tiempo juntos a la vez, y la molécula cae a su estado fundamental separadamente. Un compuesto similar se hizo de dos diferentes átomos, como el cloruro de xenón (XeCl), el cual se llamaría *excíplex*.

Las fronteras terminológicas se eliminaron en el mundo del LASER porque los LASER's de excímero que tropezaron con la estricta definición del término fueron desarrollados antes de que existiera el mismo término. Los LASER's en los cuales las moléculas estaban compuestas de dos diferentes átomos, uno gas raro como el xenón, el otro un halógeno como el cloro, llegaron más tarde. Estos eran suficientemente similares a los LASER's de excímero originales para que sus inventores se apropiaran de la etiqueta de *excímero*, y se les quedó. Las moléculas que existen únicamente en estado excitado son buenas candidatas

para construir un LASER, puesto que su nivel LASER más bajo es un estado que esencialmente no existe -las moléculas caen separadamente tan pronto como pierden su energía de excitación. Esto trae como consecuencia una inversión de población comparativamente fácil de producir, puesto que el nivel más bajo esencialmente es inhabitable.

La primera propuesta para usar excímeros como medio activo en un LASER fue en 1960, justo antes de que Maiman construyera su LASER, pero no fue hasta 1970 que un grupo del Instituto de Física Lebedev -Basov, V.A. Danielychev, Yu. M. Popov, y D.D. Khodkevich- construyó el primer LASER de excímero de moléculas de Xe_2 , que emitía a 176 nm de longitud de onda en el ultravioleta. Produjeron la excitación molecular mediante el choque de un haz de electrones contra el líquido de xenón. Dos años después otro grupo construyó el primer LASER molecular de xenón a la misma longitud de onda y basado en la excitación con un haz-electrón en un gas de xenón.

El interés en LASER's de gases raros de halogenuro fue iniciado cuando Don Setser de la Universidad Estatal de Kansas reportó una emisión cercana a los 300 nm de longitud de onda de un LASER de fluoruro de xenón en 1971. Una gran cantidad de laboratorios mezclaron gases raros y halogenuros, excitaron la mezcla con haces de electrones, y observaron que sucedía. El resultado inicial fue la observación de líneas amplias de emisión, la mayor parte de éstas en el ultravioleta.

La primera acción LASER fue observada por el grupo de Stuart Searles del Laboratorio de Investigación Naval en Washington a principios de 1975. Irónicamente, este primer sistema fue de bromuro de xenón, el cual ha encontrado pocos usos porque su eficiencia es baja. Un par de semanas después, J.J Ewing y Charles Brau en el Laboratorio Avco Everett Research en Massachusetts obtuvieron fluoruro de xenón para construir un LASER que emitía en 354 nm. Pronto después construyeron LASER's de cloruro de xenón y de fluoruro de kriptón. Ellos obtuvieron la salida más potente de un LASER de fluoruro de kriptón a 249 nm, por lo cual aún es considerado el LASER de excímero más eficiente.

Todos los primeros LASER's eran accionados por medio de la descarga de un haz de electrones dentro de una mezcla de gas. Este procedimiento ha sido el más usado para fabricar LASER's de alta potencia, pero requiere de un generador de haz de electrón grande y caro. En la actualidad, los haces de electrón ya no son necesarios. En 1975 Ralph Burnham y Nick Djeu en el Laboratorio de Investigación Naval modificaron un pequeño LASER comercial de CO_2 pulsado del tipo TEA, llenándolo de gases de excímero. El dispositivo trabajó como un LASER de excímero mostrando que descargas eléctricas eran suficientes. Este desarrollo condujo a la presente generación de LASER's de excímero comerciales.

1.16 El LASER de Electrón Libre

El otro importante tipo de LASER construido por primera vez a mediados de 1970 es el LASER de electrón libre. Sus orígenes pueden estar en la propuesta de Hans Motz (1951), en aquel entonces investigador en la Universidad de Stanford, para producir ondas milimétricas mediante el paso de un haz de electrones a través de un arreglo de imanes con polaridad alternante(8).

El campo de estudio estuvo por varios años olvidado hasta que John M.J. Madey se empezó a interesar en la idea en la década de 1960. Su primer propuesta para un LASER de electrón libre fue publicada en 1971, y no tardó mucho en iniciar su trabajo en la Universidad de Stanford sobre la demostración del concepto. Concentró su trabajo en longitudes de onda más cortas que las de los primeros investigadores, quienes las trabajaron en milímetros o longitudes de onda más largas. Después de varios años, el grupo de Madey demostró emisiones estimuladas en un LASER de electrón libre, por medio de la amplificación del haz de un LASER externo de CO₂ que pasaba a través de la longitud de un arreglo de un imán ondulator con un haz de electrón. Ellos construyeron el primer oscilador LASER de electrón libre al año siguiente (1972), obteniendo una potencia pico de 7 kilowatts a 3.4 μm en la región infrarroja.

Sin embargo, Madey no fue el único en el campo. Independientemente de su trabajo de LASER's Infrarrojos y visibles de electrón libre, un grupo del Laboratorio de Investigación Naval y de la Universidad de Columbia trabajaron sobre un concepto similar para generar longitudes de onda milimétricas y submilimétricas. Sus contribuciones algunas veces son olvidadas porque no usaron la etiqueta de "LASER de electrón libre", la cual Madey había utilizado en Stanford(8).

Una calma experimental siguió después de estos acontecimientos y varios teóricos analizaron nuevamente el concepto de LASER de electrón libre. Un gran esfuerzo se encaminó hacia la planeación de experimentos para pretender que el LASER de electrón libre fuera capaz de generar una salida de alta potencia eficiente, y ser sintonizable en longitud de onda. La siguiente ronda de experimentos incluye la operación de un LASER de electrón libre de caja resonante de longitud de onda visible en la Universidad del Sur de París en Orsay; la demostración de niveles de potencia de kilowatts en el Laboratorio Nacional Los Alamos; y varias pruebas de predicciones físicas por parte de otros grupos.

Otros investigadores han cambiado a LASER's de electrón libre de menor escala para aplicaciones clasificadas de investigación científica médica. Aunque los LASER's de electrón libre son caros, son capaces de generar niveles de potencia que de otra manera serían inalcanzables en algunas longitudes de onda infrarrojas, valiosas para ciertas aplicaciones.

1.17 El LASER de Rayos-X

Los LASER's de semiconductor y de estado-sólido avanzaron dramáticamente durante la década de 1980, pero el único tipo de LASER nuevo en emerger fue el LASER de rayos-x

Propuestas para la construcción de LASER's de rayos-x aparecieron pronto después de aquellas para los LASER's visibles, pero la construcción de lo que es actualmente un LASER de rayos-x resultó excepcionalmente difícil(2). El problema fundamental es inherente en la física. Las Inversiones de población en transiciones de rayos-x tienen tiempos de vida extremadamente cortos. El único camino para producir una inversión de población de rayos-x es concentrar un nivel tremendo de potencia sobre el medio activo. Grupos diferentes han encontrado soluciones distintas a el problema.

Durante años de experimentación se produjeron unos cuantos resultados favorables y muchas evidencias de que dificultades formidables aguardarían a los investigadores del LASER de rayos-x(2). Algunos progresos surgieron en la otrora Unión Soviética entrada la década de 1970, pero los observadores norteamericanos dudaron que ellos hubieran construido un LASER de rayos-x.

Irónicamente, por el mismo tiempo se dieron las primeras señales reales de algún progreso. En 1980 el grupo de George Pert de la Universidad de Hull en Inglaterra reportaron una ganancia LASER de 18.2 nm de longitud de onda en un plasma de carbón altamente ionizado hecho por la vaporización de fibras delgadas de carbón con intensos pulsos de LASER infrarrojo. La recombinación de electrones con los iones de carbón produjeron la emisión de 18.2 nm, la cual un análisis detallado concluye que representa la ganancia de la emisión estimulada(2). El grupo de Hull cautelosamente clasificó la longitud de onda dentro del ultravioleta extremo. Sin embargo, la frontera entre el ultravioleta extremo y los rayos-x no es muy clara, y otros usaron la etiqueta de rayos-x porque la longitud de onda era mucho más corta que la de los LASER's previos.

Si los resultados de Hull fueron alentadores, éstos estaban lejos de ser definitivos. La ganancia calculada fue baja, y escepticismos incitaron a pensar en otras causas del por qué de esta ganancia. En suma, los experimentos no demostraron oscilación, porque los espejos de la cavidad no eran apropiados para tan cortas longitudes de onda.

Los experimentos de procesos de excitación mostraron que las densidades de potencia de excitación requeridas para producir un LASER de rayos-x podían ser producidas por pura fuerza bruta. El grupo del investigador Matthews, en el Laboratorio Nacional Livermore del Departamento de Defensa de los Estados Unidos, tomó una más elegante aproximación para generar densidades extremadamente de alta potencia. Ellos enfocaron pulsos cortos de un LASER

masivo construido en Livermore para experimentos de fusión sobre áreas pequeñas de papel metálico, produciendo plasmas e inversiones de población.

En octubre de 1984, el Laboratorio Nacional Livermore anunció los éxitos del grupo de Matthews. Matthews, Mordecai Rosen, el teórico Peter Hagelstein, Weaver, y otros usaron intensos pulsos de un LASER de cristal Novette para generar emisión estimulada de un papel metálico delgado de selenio e itrio. El espectro de emisión del selenio fue de 20.6 y 20.9 nm de longitud de onda; el espectro de itrio fue a 15.5 nm de longitud de onda. La amplificación fue mucho más alta que en Hull, y especialistas consideraron al trabajo de Livermore la primera demostración definitiva de la acción LASER de rayos.x.

Investigadores de LASER's de rayos-x de laboratorio realizaron progresos continuos para emitir longitudes de onda más cortas y una operación más eficiente desde los años de su primera demostración. Las longitudes de onda han alcanzado el rango de 4 nanómetros, deseable para holografía de rayos-x de cuerpos vivientes, como mencionó Matthews(2).

1.18 El Futuro del LASER

La tecnología LASER se ha extendido mucho más allá del pequeño grupo de investigadores quienes desarrollaron los nuevos LASER's. Durante las pasadas tres décadas, la tecnología LASER ha encontrado un sin fin de aplicaciones. Los LASER's son usados en investigación científica para mediciones ultraprecisas de tiempo y de niveles de energía para llevar a cabo reacciones de fusión nuclear. En la industria, los LASER's cortan plásticos y metales, taladran hoyos microscópicos en papel y metales y ayudan a la alineación de máquinas-herramienta. En medicina, los LASER's tratan enfermedades de la vista en general y las causadas por la diabetes, fragmentan y eliminan las piedras del riñón, y se llevan al cabo con él varias cirugías. En la oficina, impresoras LASER's han alcanzado una gran fidelidad y varios tonos, y las computadoras LASER's pueden leer y escribir información en discos ópticos. En almacenes, los LASER's leen el código de barras de el Código Universal del Producto. En constructoras, los LASER's definen la superficie que los trabajadores habrán de nivelar ya sea con tierra o con tabla de yeso. Bajo el mar, los LASER's retransmiten las señales a través de cables de fibra óptica para conectar la red de telecomunicaciones con diferentes continentes. En el hogar, los LASER's reproducen música de discos compactos.

Una industria próspera ha crecido para fabricar LASER's para varios usos. Las compañías más antiguas datan de la década de 1960. Algunas compañías han llegado y fracasaron, y otras permanecen a la fecha desde su creación. Tres pioneros del LASER Maiman, Gould, y Javan, han ayudado a iniciar compañías dentro del campo. Las ventas de LASER's por sí solos, no incluyendo accesorios

tales como los de óptica externa y partes del equipo manual, se acercan a los mil millones de dólares anuales en todo el mundo(2). El valor total de productos que contienen LASER's, desde sistemas de soldadura hasta reproductores de discos compactos, son de miles de millones de dólares anuales.

Gobiernos y laboratorios industriales de todo el mundo continúan realizando una amplia investigación en LASER's. La AT&T, Bell Communications Research, y varias compañías japonesas tienen amplios programas para el desarrollo de LASER's de semiconductor, y de LASER's de separación de isótopos de plutonio y uranio. Además, el Departamento de Defensa norteamericano continúa estudios sobre armas LASER de alta energía como parte de la Iniciativa de Defensa Estratégica, aunque el énfasis de ésta es transferir estos estudios a términos tecnológicos antes de terminar la década de los 90. Las fuerzas armadas norteamericanas usan ampliamente los LASER's para medir los rangos de blancos potenciales para ser bombardeados; las bombas-guiadas por LASER fueron ampliamente usadas en la Guerra del Golfo Pérsico de 1991.

Después de treinta años, el mundo del LASER todavía tiene límites, pero éstas van evolucionando con el tiempo. El ritmo de los descubrimientos de nuevos tipos de LASER's fue lento en cada década. Los nuevos LASER's todavía están surgiendo de los laboratorios(8), pero tienden a ser de variaciones menores de los ya existentes, mas que basarse en nuevos fundamentos.

Los avances más dramáticos de la década de 1980 fueron en los LASER's de semiconductor. Las longitudes de onda fueron ampliadas dentro del espectro visible, los anchos de banda de emisión fueron reducidos, la calidad de salida mejorada, y la potencia del haz grandemente incrementada. Sin embargo estos cambios se dieron por la estructura de fina sintonización y composición, y no por encontrar un principio radicalmente nuevo de la acción LASER. Las fuentes cuánticas -capas delgadas con intervalos de energía entre las bandas de conducción y de valencia más grandes que aquellos de las capas circundantes- pueden ser la partida más importante de la previa tecnología del semiconductor. Éstas permitieron a los investigadores diseñar las características de semiconductores para satisfacer los requisitos específicos por medio de la adaptación del espesor y la composición de la capa.

Los amplificadores de fibra óptica, los cuales pudieron cambiar las reglas para el diseño de sistemas de comunicación de fibra óptica, del mismo modo están firmemente basados en la previa tecnología LASER de estado sólido. Estos son simplemente fibras de vidrio con corazones dopados con un raro elemento de tierra -típicamente erbio- el cual, excepto por las guías de onda proporcionadas por el corazón interno de la fibra, funcionan como LASER's de estado sólido sin espejos en forma de cavidad resonante. Similarmente, nuevos LASER's de estado sólido, tales como los de alejandrita y titanio dopados con zafiro, ofrecen importantes nuevas características, como una salida que es notablemente

sintonizable en longitud de onda. No obstante estos LASER's se fundamentan en diversas variaciones de los antiguos LASER's de semiconductor.

Con estos sucesos de ninguna manera la innovación es reemplazada, o hay menos campo para explorar en el mundo de los LASER's. Muestran en cambio que los investigadores dominan los principios básicos de la tecnología LASER, y que pueden deducir sobre estos principios para diseñar nuevos LASER's para satisfacer los sistemas requeridos.

Investigadores en otras áreas de la física, química, biología, y medicina están usando LASER's como experimentos sofisticados para controlar varios procesos. Investigadores en el campo han encontrado maneras para acortar los pulsos de LASER de manera que tengan una duración tan pequeña como 6×10^{-16} segundos así éstos pueden aplicarse en procesos químicos y biológicos ultrarápidos(18,19). Los haces de LASER pueden medir precisamente la frecuencia de las vibraciones atómicas y moleculares. Asimismo investigadores aprendieron como atrapar átomos individuales con luz LASER, y como enfriarlos a temperaturas cercanas al cero absoluto.

Capítulo 2 Física del LASER

2.1 Introducción

Los tres principales componentes de cualquier LASER son el medio amplificador, la fuente excitadora y el resonador óptico. El medio amplificador consiste de un conjunto de átomos, moléculas o iones los cuales actúan como un amplificador para ondas de luz. Bajo condiciones normales, el número de átomos que se encuentran en el estado base de energía es siempre más grande que el número de átomos en el estado excitado de energía, como tal, una onda de luz que pasa a través de este conjunto de átomos causará más absorciones que emisiones y por lo tanto la onda será atenuada. De esta manera para obtener una amplificación, es necesario tener una *inversión de población* (entre dos estados atómicos) en la que haya un gran número de átomos en el estado de energía más alto comparado con el número de átomos que están en el estado de energía más bajo. Cuando una onda pasa a través de un conjunto de átomos que está en un estado de Inversión de población, la onda inducirá más emisiones y será amplificada. La fuente excitadora es la fuente de energía que mantiene a el medio amplificador en su estado de población invertida. El resonador óptico, que consiste de un par de espejos perfectamente alineados uno frente a otro, proporciona la retroalimentación óptica a el LASER, de manera que éste pueda actuar como una fuente de radiación.

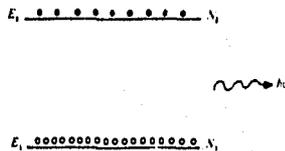


Figura 2.1 Dos estados de un átomo con energías E_1 y E_2 ; sus correspondientes densidades de población son N_1 y N_2 respectivamente. En equilibrio térmico $N_2 < N_1$ y $N_1/N_2 = e^{(E_2 - E_1)/kT}$.

2.2 Coeficientes de Einstein

Consideremos por simplicidad de análisis un sistema atómico de dos niveles de energía, como se muestra en la Fig.2.1, donde N_2 y N_1 representan el número de átomos por unidad de volumen que se encuentran en su estado de energía superior E_2 e inferior E_1 respectivamente. Si una radiación con una frecuencia igual a la diferencia de energía $(E_2 - E_1)/h$ (donde h es la Constante de Planck) incide sobre el sistema atómico, ésta puede interactuar con el sistema de tres maneras distintas:

a) Un átomo en el nivel de energía E_1 puede absorber la radiación incidente y puede excitarse a el nivel de energía E_2 . Este proceso de excitación requiere de la presencia de radiación incidente. La razón a la cual ocurre la absorción del nivel E_1 a el nivel E_2 será proporcional a el número de átomos presentes en el nivel E_1 y también a la densidad de energía de la radiación de frecuencia $\omega = (E_2 - E_1)/h$. De este manera si $u(\omega)d\omega$ representa la energía de la radiación por unidad de volumen en el intervalo de frecuencia ω y $\omega + d\omega$ entonces podemos escribir que el número de átomos que sufren absorciones por unidad de tiempo por unidad de volumen del nivel E_1 a el nivel E_2 es

$$\Gamma_{12} = B_{12}u(\omega)N_1 \quad (2.1)$$

donde B_{12} es una constante de proporcionalidad (Coeficiente de Absorción) que depende de los niveles de energía E_1 y E_2 . Hay que notar aquí que $u(\omega)$ tiene unidades de densidad de energía por intervalo de frecuencia.

(b) Para el proceso inverso, es decir la desexcitación del átomo del nivel E_2 a el E_1 , Einstein postuló que un átomo puede realizar una transición del nivel E_2 a el E_1 , a través de dos procesos distintos, estos son, el de *emisión estimulada* y el de *emisión espontánea*. En el caso de la emisión estimulada, la radiación que incide sobre el átomo lo estimula a emitir radiación y la razón de transición a el nivel de energía más bajo es proporcional a la densidad de energía de la radiación incidente de frecuencia ω . De este modo, el número de emisiones estimuladas por unidad de tiempo por unidad de volumen será

$$\Gamma_{21} = B_{21}u(\omega)N_2 \quad (2.2)$$

donde B_{21} es el coeficiente de proporcionalidad (Coeficiente de emisión estimulada) que depende de los niveles de energía.

(c) Un átomo que está en su nivel más alto de energía además realiza una emisión espontánea; esta razón será proporcional únicamente a N_2 y de esta manera para el número de átomos que realizan emisiones espontáneas por unidad de tiempo por unidad de volumen tenemos

$$U_{21} = A_{21}N_2 \quad (2.3)$$

Donde A_{21} es el coeficiente de emisión espontánea. En equilibrio térmico entre el sistema atómico y el campo de radiación incidente, el número de transiciones ascendentes necesita ser igual a el número de transiciones descendentes. Por lo tanto, en equilibrio térmico tenemos

$$\Gamma_{12} = \Gamma_{21} + U_{21}$$

$$N_1 B_{12} u(\omega) = N_2 A_{21} + N_2 B_{21} u(\omega)$$

o se puede expresar de la siguiente manera

$$u(\omega) = [A_{21}] / [(N_1/N_2)B_{12} - B_{21}] \quad (2.4)$$

Usando la ley de Boltzmann, la razón de equilibrio de población de los niveles E_1 y E_2 , a la temperatura T , es

$$N_1/N_2 = e^{(E_2 - E_1)/k_B T} = e^{h\nu/k_B T} \quad (2.5)$$

donde k_B ($= 1.38 \times 10^{-23}$ J/K) es la constante de Boltzmann. Por lo tanto

$$u(\omega) = [A_{21}] / [B_{12}e^{h\nu/k_B T} - B_{21}] \quad (2.6)$$

Ahora de acuerdo a la ley de Planck(3), la densidad de energía de radiación por unidad de intervalo de frecuencia está dado por

$$u(\omega) = [(h\omega^3 n_0^3) / (\pi^2 c^3)] / [e^{h\nu/k_B T} - 1] \quad (2.7)$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío ($c = 3 \times 10^8$ m/s) y n_0 es el índice refractivo del medio.

Comparando las ecuaciones (2.6) y (2.7), observamos que para que se cumpla la ecuación anterior debemos tener que

$$B_{12} = B_{21} = B \quad (2.8)$$

y que

$$A_{21}/B = (h\omega^3 n_0^3) / (\pi^2 c^3) \quad (2.9)$$

De esta manera la razón de emisión estimulada por átomo es igual a la razón de absorción por átomo y la relación entre los coeficientes de emisión estimulada y el de emisión espontánea está dada por la ecuación (2.9). Los coeficientes A y B son considerados como los coeficientes A y B de Einstein.

En equilibrio térmico, la relación entre el número de emisiones espontáneas y de emisiones estimuladas está dado por:

$$R = (A_{21}N_2) / (B_{21}N_2 u(\omega)) = e^{h\nu/k_B T} - 1 \quad (2.10)$$

Así en equilibrio térmico a la temperatura T , para frecuencias $\omega \gg k_B T/h$, el número de emisiones espontáneas excede por mucho a el número de emisiones estimuladas.

Ahora obtendremos la relación entre el coeficiente A de Einstein y el tiempo de vida espontáneo del nivel E_2 . Asumamos que un átomo en el nivel E_2 puede realizar una transición espontánea únicamente a el nivel E_1 . Entonces como el

número de átomos que realizan transiciones espontáneas por unidad de tiempo por unidad de volumen es $A_{21}N_2$, podemos escribir la razón de cambio de población del nivel 2 con respecto al tiempo debido a la emisión espontánea como

$$dN_2/dt = -A_{21}N_2 \quad (2.11)$$

y la solución de la ecuación es

$$N_2(t) = N_2(0)e^{-A_{21}t} \quad (2.12)$$

De esta forma la población de el nivel E_2 se reduce por una razón de $1/e$ en un tiempo $t_{sp} = 1/A_{21}$, el cual es llamado el *tiempo de vida espontáneo* asociado con la transición $2 \rightarrow 1$.

En el espectro de la radiación de un conjunto de átomos debido a la emisión espontánea, uno encuentra que la radiación no es estrictamente monocromática, pero se extiende sobre cierto rango de frecuencias. Similarmente, si uno mide la absorción de un conjunto de átomos en función de la frecuencia, nuevamente encontramos que los átomos son capaces de absorber radiación no solamente en una frecuencia única, sino que también absorben radiación sobre una banda de frecuencia. Esto implica que los niveles de energía no tienen frecuencias de transición perfectamente definidas sino que tienen ciertos anchos ($\Delta E = \Delta\omega$) y los átomos pueden interactuar con radiación de cierto rango de frecuencias ($\Delta\omega$), pero la fuerza de interacción del sistema atómico con la radiación incidente está en función de la frecuencia (ver figura 2.2). Esta función es llamada la función de forma lineal (o Gaussiana) y es representada por $g(\omega)$. Esta función usualmente es normalizada de acuerdo a

$$\int g(\omega)d\omega = 1 \quad (2.13)$$

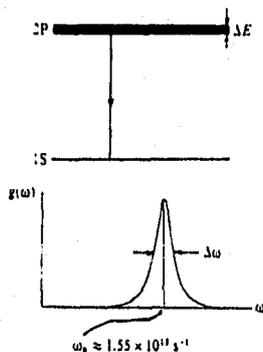


Fig. 2.2. Puesto que el tiempo de vida de un estado es limitado, cada estado de energía tiene un cierto ancho $\Delta E (= \hbar\Delta\omega)$ de manera que el átomo puede absorber/emitir radiación sobre un rango de frecuencias $\Delta\omega$ el cual usualmente es mucho menor que ω . Nótese que la mayor fuerza de interacción es en ω_0 .

De lo anterior podemos decir que del total de átomos N_1 y N_2 por unidad de volumen, únicamente los átomos $N_2 g(\omega) d\omega$ y $N_1 g(\omega) d\omega$ por unidad de volumen serán capaces de interactuar con radiación de frecuencia situada entre ω y $\omega+d\omega$. Por lo tanto el número de emisiones estimuladas por unidad de tiempo por unidad de volumen ahora está dada por

$$\begin{aligned} \Gamma_{21} &= \int B_{21} u(\omega) N_2 g(\omega) d\omega \\ &= N_2 [(\pi^2 c^3) / (h \nu_0^3 n_0^3 \epsilon_{sp})] \int [u(\omega) g(\omega) / \omega^3] d\omega \end{aligned} \quad (2.14)$$

Donde hemos usado la ecuación (2.9) y $A_{21} = 1/\tau_{sp}$.

Ahora consideremos dos casos específicos.

1) Si los átomos están actuando con radiación cuyo espectro es muy ancho comparado con el de $g(\omega)$ (ver fig. 2.3a), entonces uno esencialmente puede asumir que sobre la región de integración donde $g(\omega)$ es considerable $u(\omega)/\omega^3$ esencialmente es constante y de esta manera se puede tomar fuera de la integral en la ecuación (2.14). Usando la integral de normalización, la ecuación (2.14) se hace

$$\Gamma_{21} = N_2 [(\pi^2 c^3) / (h \omega^3 n_0^3 \epsilon_{sp})] u(\omega) \quad (2.15)$$

donde ω ahora representa la frecuencia de transición. La ecuación (2.15) es consistente con la ecuación (2.2) si usamos la ecuación (2.9) en lugar de B_{21} , y $A_{21} = 1/\tau_{sp}$. De esta forma la ecuación (2.15) representa la razón de emisión estimulada por unidad de volumen cuando los átomos interactúan con radiación de banda ancha o de espectro ancho.

2) Ahora consideremos el otro caso extremo en el cual el átomo está interactuando con radiación cercana a la monocromática. Si la frecuencia de la radiación incidente es ω' , entonces la curva $u(\omega)$ será extremadamente puntiaguda en $\omega = \omega'$, comparada con la de $g(\omega)$ (ver fig. 2.3b) y de esta manera $g(\omega)/\omega^3$ puede tomarse fuera de la integral para obtener

$$\begin{aligned} \Gamma_{21} &= N_2 [(\pi^2 c^3) / (h \omega'^3 n_0^3 \epsilon_{sp})] g(\omega') \int u(\omega) d\omega \\ &= N_2 [(\pi^2 c^3) / (h \omega'^3 n_0^3 \epsilon_{sp})] g(\omega') u \end{aligned} \quad (2.16)$$

donde

$$u = \int u(\omega) d\omega \quad (2.17)$$

es la densidad de energía de la radiación incidente cuasi-monocromática. Podemos notar que u tiene dimensiones de energía por unidad de volumen a diferencia de $u(\omega)$ que tiene dimensiones de energía por unidad de volumen por unidad de intervalo de frecuencia. Así cuando el átomo descrito por la función lineal $g(\omega)$ interactúa con radiación cuasi-monocromática de frecuencia ω' , la

razón de emisión estimulada por unidad de volumen está dada por la ecuación (2.16).

De manera similar, el número de absorciones estimuladas por unidad de volumen será

$$\Gamma_{12} = N_1 [(\pi^2 c^3) / (\hbar \omega^3 n_0^3 \epsilon_0)] g(\omega') u \quad (2.18)$$

Usaremos estas ecuaciones en los temas siguientes

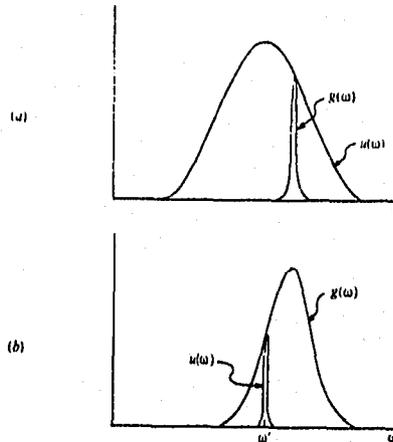


Figura 2.3 (a) Átomos caracterizados por la función lineal $g(\omega)$ interactuando con radiación de banda ancha. (b) Átomos interactuando con radiación cuasi-monocromática en $\omega = \omega'$.

2.3 Amplificación de la Luz

Consideremos un conjunto de átomos y una radiación cuasi-monocromática de densidad de energía u a la frecuencia ω que pasa a través de éste. Ahora obtendremos la razón de cambio de intensidad de la radiación como ésta pase a través del medio activo.

Si consideramos dos planos P_1 y P_2 de área S situados en z y $z + dz$ respectivamente sobre el mismo eje z , el cual es la dirección de propagación de la radiación (ver figura 2.4). Si $I(z)$ e $I(z+dz)$ representan la intensidad de la radiación en las posiciones z y $z+dz$ respectivamente, entonces la cantidad neta de energía entrante a el volumen Sdz entre P_1 y P_2 será:

$$[I(z) - I(z+dz)]S = [I(z) - I(z) - (dI/dz)dz]S$$

$$= -(dI/dz)S \cdot dz \quad (2.19)$$

Esta necesita ser igual a la energía neta absorbida por los átomos en el volumen Sdz . La energía neta absorbida por los átomos en su recorrido de el nivel E_1 a el nivel E_2 será $\Gamma_{12}Sdz\hbar\omega$ donde $\hbar\omega$ es la energía absorbida cuando un átomo va del nivel E_1 a el nivel E_2 . Similarmente la energía liberada a través de las emisiones estimuladas de el nivel E_2 a el nivel E_1 será $\Gamma_{21}Sdz\hbar\omega$. Olvidemos la energía que surge de la emisión espontánea porque ésta aparece sobre un amplio rango de frecuencia y es asimismo emitida en todas direcciones, por lo que la fracción de emisión espontánea que es emitida en la dirección del eje z a la frecuencia ω es muy pequeña. Así la energía neta absorbida por unidad de tiempo en el volumen Sdz (usando las Ecs. (2.16), (2.18) y considerando que la frecuencia de radiación cuasi-monocromática, ω' , ahora es representada simplemente por ω será

$$\begin{aligned} (\Gamma_{12} - \Gamma_{21})\hbar\omega Sdz &= \{(\pi^2 c^3)/(\hbar\omega^3 n_0^3)\} \cdot (1/t_{sp}) \cdot u \cdot g(\omega) \cdot (N_1 - N_2) \cdot \hbar\omega \cdot Sdz \\ &= \{(\pi^2 c^3)/(\omega^2 n_0^3 t_{sp})\} \cdot u \cdot g(\omega) \cdot (N_1 - N_2) \cdot Sdz \end{aligned} \quad (2.20)$$

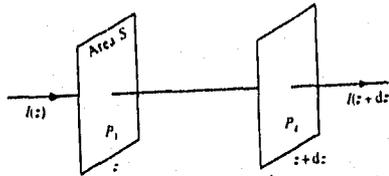


Fig. 2.4 Propagación de la radiación a la frecuencia ω a través del medio activo; las intensidades en z y $z+dz$ son $I(z)$ y $I(z+dz)$ respectivamente.

Ahora, la densidad de energía u y la intensidad de radiación I están relacionadas a través de la siguiente ecuación(4)

$$I = v u = (c/n_0)u \quad (2.21)$$

donde $v (= c/n_0)$ es la velocidad de la radiación en el medio de índice refractivo n_0 .

De esta manera, empleando de la Ec. (2.19) a la Ec. (2.21) e igualando la energía entrante al volumen con la energía absorbida por unidad de tiempo en el volumen obtenemos

$$dI/dz = -\alpha I \quad (2.22)$$

donde

$$\alpha = [(\pi^2 c^2) / (\omega^2 n_0^2 \tau_{sp})] \cdot g(\omega) \cdot (N_1 - N_2) \quad (2.23)$$

Por lo tanto si $N_1 > N_2$, que son las densidades de población del nivel inferior E_1 y superior E_2 , respectivamente, α es positivo y la intensidad decrece conforme recorra el eje z conduciendo a una atenuación del haz. Por el otro lado, si $N_2 > N_1$, entonces α es negativo y el haz es amplificado conforme recorra la dirección z . La condición $N_2 > N_1$ es llamada *inversión de población* y es bajo esta condición que uno puede obtener *amplificación óptica*.

En la Ec.(2.23) si $(N_1 - N_2)$ es independiente de la intensidad I , entonces encontrando la solución de la ecuación (2.22) obtenemos:

$$I(z) = I(0) e^{-\alpha z} \quad (2.24)$$

por lo tanto, una atenuación exponencial se presenta cuando $N_1 > N_2$ y una amplificación exponencial cuando $N_2 > N_1$. Este decremento o incremento exponenciales de la intensidad, se obtiene para bajas intensidades; para grandes intensidades la saturación se presenta y $(N_1 - N_2)$ ya no es independiente de la intensidad, I .

2.4 La Condición de Umbral

En el tema anterior vimos que para que un medio activo sea capaz de amplificar una radiación incidente, es necesario crear un estado de inversión de población en el medio. Tal medio tendrá que comportarse como un amplificador para aquellas frecuencias que calgen dentro del ancho de banda. Para generar radiación, este medio amplificador es colocado dentro de un resonador óptico que consiste de un par de espejos colocados frente a frente cada uno de forma muy parecida al etajón de Fabry-Perot (ver figura 2.5). La radiación que es rebotada de atrás hacia adelante es amplificada por el medio activo y además sufre pérdidas debido a la reflectividad limitada de los espejos, a otras dispersiones y a pérdidas de difracción. Si las oscilaciones son mantenidas dentro de la cavidad entonces las pérdidas necesitan ser exactamente compensadas por la ganancia. De esta manera una densidad de inversión de población mínima es requerida para sobreponerse a las pérdidas y éste es llamada la *inversión de población de umbral*.

Para obtener una expresión para la inversión de población de umbral, consideremos que d representa la longitud del resonador, y que R_1 y R_2 representan las reflectividades de los espejos (ver figura 2.5). Además α_1 representa la pérdida promedio por unidad de longitud debido a todos los mecanismos de pérdidas (otros que no sean la reflectividad limitada) tales como pérdidas de dispersión, pérdidas de difracción debido a las dimensiones limitadas

de los espejos, etc. Consideremos una radiación con intensidad I saliendo del espejo 1. Como se propague a través del medio y alcance al segundo espejo, la intensidad es amplificada por el factor $e^{-\alpha d}$ y asimismo sufre una pérdida de $e^{-\alpha d}$; para un medio amplificador, α es negativo y $e^{-\alpha d} > 1$. La intensidad de el haz reflejado en el segundo espejo será $IR_2 e^{-2(\alpha_1 + \alpha)d}$. Un segundo paso a través del resonador y una reflexión en el primer espejo nos conducirá a una intensidad de radiación después de un recorrido completo de ida y vuelta de $IR_1 R_2 e^{-2(\alpha_1 + \alpha)d}$. Por lo tanto para que la oscilación LASER inicie se necesita que

$$R_1 R_2 e^{-2(\alpha_1 + \alpha)d} \geq 1 \quad (2.26)$$

el signo de igualdad da el valor de umbral para el coeficiente de ganancia α (por lo tanto, para la inversión de población). Desde luego, cuando el LASER está oscilando en un estado estable con una oscilación de onda continua, entonces el signo de igualdad en la Ec. (2.26) necesita ser satisfecho. Si la inversión es incrementada entonces el término de la izquierda se hace más grande que la unidad; esto implica que la ganancia de recorrido completo es más grande que la pérdida de recorrido completo. Esto resultará en un incremento de la intensidad del LASER hasta que los efectos de saturación se presenten (más adelante se profundizará en los efectos de saturación). De esta manera la ganancia se regresa a su valor de umbral.

La ecuación (2.26) puede escribirse como:

$$-\alpha \geq \alpha_1 - (1/2d) \ln R_1 R_2 \quad (2.27)$$

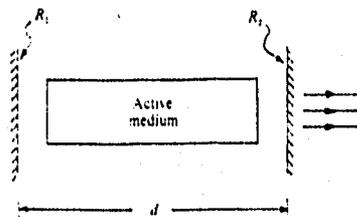


Figura 2.5 Un resonador óptico típico consistente de un par de espejos planos colocados uno frente a otro. El medio activo es colocado dentro de la cavidad. Uno de los espejos es hecho parcialmente reflectante para obtener la salida del haz LASER.

El término de la derecha de la Ec.(2.27) depende de los parámetros de la cavidad pasiva únicamente. Estos pueden relacionarse a el tiempo de vida de la cavidad pasiva t_c que es el tiempo en el cual la energía dentro de la cavidad se reduce por un factor de $1/e$. En ausencia de un medio amplificador, la intensidad en un punto se reduce por un factor de $R_1 R_2 e^{-2\alpha_1 d} = e^{-(2\alpha_1 d \ln R_1 R_2)}$ en un tiempo correspondiente al tiempo de un recorrido completo. Un tiempo de un recorrido completo corresponde a $t = 2d/(c/n_0) = 2dn_0/c$. Por lo tanto si la intensidad se reduce en e^{-1}

entonces en un tiempo $t = 2d/v$, el factor por el cual la intensidad será reducida es $e^{-2\alpha d/v}$. De esta manera

$$e^{-2\alpha(d - \ln R_1 R_2)} = e^{-2\alpha d/v}$$

o

$$1/t_c = [c(2d/v)](2\alpha_d - \ln R_1 R_2) \quad (2.28)$$

Usando las Ecs. (2.23) y (2.28), la Ec. (2.27) se hace

$$(N_2 - N_1) \geq [(\omega^2 n_0^3) / \pi^2 c^3] (t_{sp} / t_c) (1/g(\omega)) \quad (2.29)$$

El signo de igualdad corresponde a la densidad de inversión de población de umbral requerida para la oscilación del LASER.

De acuerdo con la ecuación (2.29), para tener un bajo valor de umbral de inversión de población, las siguientes condiciones se necesitan cumplir:

(a) El valor de t_c (tiempo de vida de la cavidad pasiva) deberá de ser grande, por lo tanto, las pérdidas de la cavidad necesitan ser pequeñas.

(b) Puesto que $g(\omega)$ es normalizada de acuerdo con la ecuación (2.13), el valor pico de $g(\omega)$ será inversamente proporcional a el ancho $\Delta\omega$ de la función $g(\omega)$ ($g(\omega) \approx 1/\Delta\omega$). Así anchos de banda más pequeños dan valores más grandes de $g(\omega)$ lo que implica valores de umbral más pequeños de $(N_2 - N_1)$. Además puesto que la $g(\omega)$ más grande aparece en el centro de su curva, el modo del resonador que se encuentra más cercano a el centro de la curva alcanzará primero al valor del umbral y empezará a oscilar.

(c) Pequeños valores de t_{sp} (por lo tanto, transiciones fuertemente permitidas) también conducen a valores más pequeños de inversión de población de umbral. A la vez, para tiempos de relajación más pequeños (t_{sp}), se requieren potencias de excitación más grandes para mantener una inversión de población. En general, la inversión de población es obtenida más fácilmente en transiciones que tengan tiempos de relajación más grandes.

(d) El valor de $g(\omega)$ en el centro de la curva es inversamente proporcional a el ancho de banda $\Delta\omega$, por ejemplo, en el caso del ensanchamiento Doppler es proporcional a ω (como se verá más adelante). De esta manera la inversión de población de umbral se incrementa aproximadamente en una proporción de ω^3 . Así es mucho más fácil obtener acción LASER en longitudes de onda infrarrojas que en la región ultravioleta del espectro.

2.5 Ecuaciones de los Niveles de Energía del Medio Amplificador

En este tema desarrollaremos las ecuaciones que describen la razón en la que las poblaciones de varios niveles atómicos cambian ante la presencia de excitación externa y de transiciones espontáneas y estimuladas. Estas ecuaciones proporcionan un conveniente acercamiento en el estudio de la variación de las poblaciones atómicas, de las poblaciones de estado estable de varios niveles ante la presencia de radiación, etc.

2.5.1 El sistema LASER de dos niveles

Consideremos primero un sistema de dos niveles consistente de los niveles de energía inferior E_1 y superior E_2 con N_1 y N_2 átomos por unidad de volumen respectivamente (ver figura 2.1). Además consideremos una radiación a la frecuencia ω con densidad de energía u incidiendo sobre el sistema. El número de átomos por unidad que absorben la radiación y son excitados a el nivel superior de energía es (ver la ecuación 2.18)

$$\Gamma_{12} = [(\pi^2 c^3)/(h\omega^3 n_0^3 \epsilon_{sp})] u \cdot g(\omega) N_1 = W_{12} N_1 \quad (2.30)$$

donde

$$W_{12} = [(\pi^2 c^3)/(h\omega^3 n_0^3 \epsilon_{sp})] u \cdot g(\omega) \quad (2.31)$$

De manera similar el número de átomos que sufren emisiones estimuladas del nivel E_2 al E_1 , por unidad de volumen será (ver las Ecs. (2.16) y (2.18))

$$\Gamma_{21} = W_{21} N_2 = W_{12} N_2 \quad (2.32)$$

donde usamos el hecho de que la probabilidad de absorción es igual a la probabilidad de emisión estimulada. Además de las dos transiciones anteriores, los átomos en el nivel E_2 también sufrirán transiciones espontáneas de E_2 a E_1 . Si A_{21} y S_{21} representan la razón de transición radiactiva y no radiactiva respectivamente de E_2 a E_1 , entonces el número de átomos que sufren transiciones espontáneas de E_2 a E_1 será

$$U_{21} = (A_{21} + S_{21}) N_2 = T_{21} N_2$$

donde

$$T_{21} = A_{21} + S_{21} \quad (2.33)$$

[†] En una transición no radiactiva, cuando los átomos se desexcitan, la energía es transferida a las energías translacional, vibracional o rotacional de los átomos o moléculas circundantes.

De esta forma podemos escribir la razón de cambio de población de los niveles de energía E_2 y E_1 como

$$dN_2/dt = W_{12}(N_1 - N_2) - T_{21}N_2 \quad (2.34)$$

$$dN_1/dt = -W_{12}(N_1 - N_2) + T_{21}N_2 \quad (2.35)$$

donde podemos ver que $N_1 + N_2 = N =$ una cte. Esto nada más significa que el número total de átomos N por unidad de volumen es constante(4). En estado estable tenemos

$$dN_1/dt = dN_2/dt = 0 \quad (2.36)$$

lo que igualando las Ecs. (2.34) y (2.35) nos da

$$N_2/N_1 = W_{12}/(W_{12} + T_{21}) \quad (2.37)$$

Puesto que W_{12} y T_{21} son cantidades positivas, la ecuación (2.37) nos muestra que nunca podemos obtener una inversión de población de estado estable por excitación óptica entre sólo dos niveles(4).

Ahora se analizará la diferencia de población entre los dos niveles. La Ec. (2.37) se puede expresar, aplicando algunos pasos de álgebra, de la siguiente forma

$$(N_2 - N_1)/(N_2 + N_1) = -T_{21}/(2W_{12} + T_{21})$$

o se puede escribir que $\Delta N = N_2 - N_1$, y por lo tanto tenemos

$$\Delta N/N = -1/(1 + 2W_{12}/T_{21}) \quad (2.38)$$

Ahora si asumimos que la transición del nivel E_2 al E_1 es mayormente radiactiva, por lo tanto, $A_{21} \gg S_{21}$ y $T_{21} \approx A_{21}$ ($A_{21} = 1/\tau_{21}$). Además introduciremos una función gaussiana $g^*(\omega)$ que es normalizada para tener valor de unidad en $\omega = \omega_0$, el centro de la curva, por lo tanto,

$$g^*(\omega) = g(\omega)/g(\omega_0) \quad (2.39)$$

Puesto que la fuerza de interacción en la transición está en función de la frecuencia, de la fig. 2.2 vemos que, $g(\omega) \leq g(\omega_0)$ para toda ω , $0 < g^*(\omega) < 1$. Sustituyendo el valor de W_{12} de la Ec. (2.31) y el valor de $u = n_0/c$ donde l es la intensidad de la radiación incidente de frecuencia ω , en el término $2W_{12}/T_{21}$ de la Ec. (2.38) tenemos

$$\begin{aligned} 2W_{12}/T_{21} &= [2 \cdot (\pi^2 c^3) / (h \omega^3 n_0^3 \tau_{21})] \cdot l \cdot (n_0/c) \cdot g^*(\omega) \cdot g(\omega_0) \cdot (1/A_{21}) \\ &= [(\pi^2 c^2) / (h \omega^3 n_0^2)] \cdot g^*(\omega) \cdot g(\omega_0) \cdot l \end{aligned} \quad (2.40)$$

Por lo tanto la ecuación (2.38) se hace

$$\Delta N/N = -1/[1+(I/I_s)g^*(\omega)] \quad (2.41)$$

donde

$$I_s = (h\omega^3 n_0^2)/(2\pi^2 c^2 g(\omega_0)) \quad (2.42)$$

es llamada *la intensidad de radiación de saturación*. Para ver lo que I_s representa consideremos una onda monocromática a la frecuencia ω_0 interactuando con un sistema de dos niveles. De esta manera $g^*(\omega_0) = 1$, veremos de la ecuación (8.41) que para $I_s \gg I$, la densidad de diferencia de población entre los dos niveles, ΔN , es casi independiente de la intensidad de la radiación incidente. Por el otro lado para $I \geq I_s$, la densidad de diferencia de población ΔN se hace una función de la radiación incidente I . Por lo tanto cuando I_s se presenta, también se presenta un decremento en la densidad de inversión de población.

Para relacionar el coeficiente de ganancia/pérdida, α , (ver Ec. 2.23) con la intensidad de radiación de saturación realizamos

$$\alpha = -[(\pi^2 c^2)/(\omega^2 n_0^2 t_{sp})]g(\omega)\Delta N$$

sustituyendo el valor de ΔN , despejándolo de la Ec. (2.41), tenemos

$$\alpha = -[(\pi^2 c^2)/(\omega^2 n_0^2 t_{sp})]g(\omega)[-N/(1+(I/I_s)g^*(\omega))]$$

$$\alpha = \alpha_0/[1+(I/I_s)g^*(\omega)] \quad (2.43)$$

donde

$$\alpha_0 = [(\pi^2 c^2)/(\omega^2 n_0^2 t_{sp})]g(\omega)N \quad (2.44)$$

es el coeficiente de pérdida cuando $I_s \gg I$. Así vemos de la Ec. (2.43) que la pérdida es exponencial para $I \ll I_s$, mientras que se hace lineal para $I \gg I_s$. De esta manera vemos que la atenuación causada por un medio decrece como la intensidad incidente se incrementa a valores semejantes (pero no \geq) a la intensidad de saturación.

2.5.2 El sistema LASER de tres niveles

En la sección anterior vimos que uno no puede crear una inversión de población de estado estable entre dos niveles solamente por el uso de excitación entre esos niveles. De esta manera para producir una inversión de población de estado

estable, uno necesita usar cualquiera de los dos sistemas, de tres o cuatro niveles. En este tema discutiremos un sistema de tres niveles de energía.

Consideremos un sistema de tres niveles que consiste de los niveles de energía E_1 , E_2 y E_3 con una densidad de población de cada nivel representadas por N_1 , N_2 y N_3 respectivamente (ver figura 2.7). La fuente excitadora levanta a los átomos del nivel E_1 al nivel E_3 del cual ellos caen rápidamente a el nivel E_2 a través de algunos procesos no radiactivos. De esta manera la fuente excitadora efectivamente transfiere los átomos del nivel base E_1 al nivel excitado E_2 que es ahora el nivel LASER superior y el nivel LASER más bajo viene siendo el nivel base E_1 . Si la relajación del nivel E_3 al nivel E_2 es muy rápida, entonces los átomos se relajarán al nivel E_2 antes que al nivel E_1 . Puesto que el nivel superior E_3 no es un nivel LASER, puede ser un nivel ancho (o un grupo de niveles anchos), de manera que una fuente de luz de banda ancha puede ser eficientemente usada como una fuente de excitación.

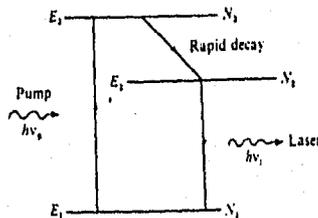


Fig. 2.6 El sistema LASER de tres niveles: la fuente de radiación excita a los átomos del nivel E_1 al E_3 , y la acción LASER ocurre entre los niveles E_3 y E_1 .

Si asumimos que las transiciones únicamente se realizan entre estos tres niveles entonces podemos escribir

$$N = N_1 + N_2 + N_3 \quad (2.45)$$

donde N representa el número total de átomos por unidad de volumen del sistema.

Podemos ahora escribir las ecuaciones que describen la razón de cambio de N_1 , N_2 y N_3 . De esta manera podemos escribir la razón de cambio de N_3 como

$$dN_3/dt = W_p(N_1 - N_3) - T_{32}N_3 \quad (2.46)$$

donde W_p es la razón de excitación por átomo del nivel E_1 al nivel E_3 la cual depende de la intensidad de la fuente excitadora. El primer término de la derecha en la ecuación (2.46) representa las transiciones estimuladas entre los niveles E_3

y E_3 y el término $T_{32}N_3$ representa las transiciones espontáneas del nivel E_3 a el nivel E_2 y

$$T_{32} = A_{32} + S_{32} \quad (2.47)$$

A_{32} y S_{32} corresponden a la razón de transición radiactiva y no radiactiva entre los niveles E_3 y E_2 respectivamente. En la ecuación (2.46) no aparece el término $T_{31}N_3$ que corresponde a las transiciones espontáneas entre los niveles E_3 y E_1 , porque la mayoría de los átomos realizan transiciones del nivel E_3 al E_2 antes que al nivel E_1 .

De una manera similar podemos escribir

$$dN_2/dt = W_1(N_1 - N_2) + N_3T_{32} - N_2T_{21} \quad (2.48)$$

y

$$dN_1/dt = W_p(N_3 - N_1) + W_1(N_2 - N_1) + N_2T_{21} \quad (2.49)$$

donde

$$W_1 = [(\pi^2 c^2)/(h\omega^3 n_0^2)] A_{21} g_1(\omega) I_1 \quad (2.50)$$

representa la razón de transición estimulada por átomo entre los niveles E_1 y E_2 , I_1 es la intensidad de la radiación en la transición $2 \rightarrow 1$ y $g_1(\omega)$ representa la función lineal que describe las transiciones entre los niveles E_1 y E_2 . En la Ec. (2.50) usamos las ecuaciones (2.16) y (2.21) así como el hecho de que $T_{21} = A_{21} + S_{21}$ y que para una buena acción LASER la transición espontánea tiene que ser mayormente radiactiva, por lo que asumimos que $A_{21} \gg S_{21}$ y por lo tanto $T_{21} \approx A_{21}$, que es la razón de relajación.

En estado estable se debe cumplir que

$$dN_1/dt = 0 = dN_2/dt = dN_3/dt \quad (2.51)$$

E igualando la Ec. (2.46) a cero obtenemos

$$N_3 = [W_p/(W_p + T_{32})] N_1 \quad (2.52)$$

Usando las ecuaciones (2.48), y (2.52) obtenemos

$$N_2 = \{ [W_1(T_{32} + W_p) + W_p T_{32}] / [(W_p + T_{32})(W_1 + T_{21})] \} N_1 \quad (2.53)$$

De esta forma de las ecuaciones (2.45), (2.52) y (2.53), obtendremos

$$(N_2 - N_1)/N = [W_p(T_{32} - T_{21}) - T_{32}T_{21}] / [3W_pW_1 + 2W_pT_{21} + 2T_{32}W_1 + T_{32}W_p + T_{32}T_{21}] \quad (2.54)$$

De la ecuación anterior vemos que para que se lleve a cabo una inversión de población entre los niveles E_1 y E_2 , esto es, que $N_2 - N_1$ sea positiva, una condición necesaria, mas no suficiente, es que $T_{32} > T_{21}$. De esta manera como los tiempos de vida espontáneos son inversamente proporcionales a las razones de relajación, el tiempo de vida del nivel E_3 necesita ser mucho muy pequeño comparado con el del nivel E_2 para que se obtenga la inversión de población entre los niveles E_1 y E_2 . Si se satisface esta condición, de acuerdo con el miembro superior de la derecha de la Ec. (2.54), existe una excitación mínima requerida para lograr la inversión de población, la cual está dada por

$$W_{\mu} = (T_{32}T_{21})/(T_{32}-T_{21}) \quad (2.55)$$

De esta manera si $T_{32} \gg T_{21}$, como ya se ha mencionado, tenemos que

$$W_{\mu} \approx T_{21} \quad (2.55a)$$

y bajo este mismo concepto la ecuación (2.54) se hace

$$(N_2 - N_1)/N = [(W_p - T_{21})/(W_p + T_{21})] / \{1 + [(3W_p + 2T_{32})/(T_{32}(W_p + T_{21}))]W_1\} \quad (2.56)$$

Debajo del valor de umbral para la oscilación LASER, la razón de transición estimulada entre los niveles E_2 y E_1 (W_1), es muy pequeña y por lo tanto podemos escribir

$$(N_2 - N_1)/N = (W_p - T_{21})/(W_p + T_{21}) \quad (2.56a)$$

De esta manera cuando W_1 es pequeña, esto es, cuando la intensidad de la radiación correspondiente a la transición LASER es pequeña (ver Ec.(2.50)), entonces la inversión de población es independiente de I_1 y de esta manera de acuerdo con la ecuación (2.22) hay una amplificación exponencial del haz. Como el LASER empiece a oscilar, W_1 se hace grande y de la ecuación (2.56) vemos que se reduce la inversión de población ($N_2 - N_1$) lo que a su vez reduce la amplificación. Cuando el LASER oscila bajo condiciones de estado estable, la intensidad de la radiación en la transición LASER (I_1) se incrementa a tal valor que el valor de $N_2 - N_1$ es el mismo que el valor de umbral (ver Ec.(2.29)).

Recordando la Ec.(2.23), vemos que para una inversión de población $N_2 - N_1$, el coeficiente de ganancia del medio activo es (sustituyendo la Ec.(2.56) en la Ec.(2.23))

$$\begin{aligned} \alpha &= -\{(\pi^2 c^2)/(\omega^2 n_0^2 \epsilon_0)\}g(\omega)(N_2 - N_1) \\ &= \alpha_0 / \{1 + [(3W_p + 2T_{32})/(T_{32}(W_p + T_{21}))]W_1\} \end{aligned} \quad (2.57)$$

donde

$$\alpha_0 = -[(\pi^2 c^2)/(\omega^2 n_0^2 t_{sp})] g(\omega) \cdot N \cdot [(W_p - T_{21})/(W_p + T_{21})] \quad (2.57a)$$

es el coeficiente de ganancia de señal pequeña. Si ahora realizamos un análisis similar como el del sistema de dos niveles y empleamos el valor de W_1 de la Ec.(2.50), podemos escribir

$$\alpha = \alpha_0 / [1 + (I/I_s) g^*(\omega)] \quad (2.58)$$

donde, $g^*(\omega) = g(\omega)/g(\omega_0)$

$$I_s = [(h\omega^3 n_0^2)/(\pi^2 c^2 A_{21} g(\omega_0))] \cdot [(T_{32}(W_p + T_{21}))/(3W_p + 2T_{32})] \quad (2.59)$$

o I_s sigue siendo la intensidad de radiación de saturación.

Ahora calcularemos la potencia de excitación de umbral requerida para iniciar la oscilación LASER. Para hacerlo, primero observemos que la inversión de población de umbral requerida, usualmente es muy pequeña comparada con N ($N_2 - N_1 \ll N$). De esta manera, si W_p es el valor de la razón de excitación de umbral requerida para iniciar la oscilación LASER, tenemos ahora que el número de átomos que son excitados por unidad de tiempo por unidad de volumen desde el nivel E_1 al E_2 es $W_p N_1$. Si ν_p representa la frecuencia de excitación promedio correspondiente a la transición de E_1 a E_2 , entonces la potencia requerida por unidad de volumen será

$$P = W_p N_1 h \nu_p \quad (2.60)$$

De esta manera la potencia de excitación de umbral para la oscilación LASER, asumiendo que $W_p \approx T_{21}$ (ver Ec.(2.55a)) está dada por

$$P_{um} = T_{21} N_1 h \nu_p \quad (2.61)$$

Puesto que $N_2 - N_1 \ll N$ y $N_3 \approx 0$, $N_1 \approx N_2 \approx N/2$. Además asumiendo que la transición del nivel E_2 a el nivel E_1 es principalmente radiactiva (esto es, $A_{21} \gg S_{21}$, por lo tanto $T_{21} \approx A_{21} = 1/t_{sp}$), tenemos

$$P_{um} = (N h \nu_p) / (2 t_{sp}) \quad (2.62)$$

De esta manera vemos que para lograr una inversión de población de umbral, para que el LASER empiece a oscilar, se necesita excitar más del 50% ($N/2$) del total de átomos contenidos en el medio activo.

2.5.3 El sistema LASER de cuatro niveles

En el tema anterior se observó que como el nivel LASER más bajo fue el nivel base, uno tiene que excitar más del 50% de los átomos que se encuentran en su nivel base para obtener una inversión de población. Este problema puede superarse usando otro nivel del sistema atómico y además teniendo a el nivel LASER más bajo con un estado excitado. El sistema LASER de cuatro niveles es mostrado en la fig. (2.7). El nivel E_1 es el estado base y los niveles E_2 , E_3 y E_4 son los niveles excitados del sistema. Los átomos que se encuentran en su nivel de energía E_4 del cual realizan una rápida relajación no-radiativa al nivel E_3 . El nivel E_3 que corresponde a el nivel LASER superior es usualmente un nivel metaestable que tiene un tiempo de vida grande. La transición del nivel E_3 al nivel E_2 forma la transición LASER. Para que los átomos no se acumulen en el nivel E_2 y por lo tanto que destruyan la inversión de población entre los niveles E_3 y E_2 , el nivel E_2 necesita tener un tiempo de vida muy pequeño para que los átomos desde el nivel E_2 sean rápidamente trasladados al nivel E_1 , dispuestos par ser excitados nuevamente al nivel E_4 . Si la razón de relajación de los átomos desde el nivel E_2 al nivel E_1 es más rápida que la razón de arribo de los átomos al nivel E_2 uno puede obtener una inversión de población entre los niveles E_3 y E_2 aún para muy pequeñas potencias de excitación. El nivel E_4 puede ser un conjunto de un gran número de niveles o un nivel ancho. De modo que una fuente de excitación óptica, que emite sobre un amplio rango de frecuencias, puede usarse para excitar efectivamente los átomos desde el nivel E_1 a el nivel E_4 . Además, el nivel E_2 necesita estar lo suficientemente retirado del nivel base E_1 , de modo que, a temperaturas ordinarias, el nivel E_2 sea casi inhabitable. La población del nivel E_2 además puede reducirse disminuyendo la temperatura del sistema.

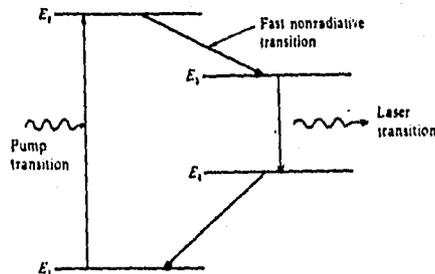


Fig. 2.7 El sistema LASER de cuatro niveles: la fuente excitadora trasiada a los átomos desde el nivel E_1 al E_4 y la acción LASER se lleva a cabo entre los niveles E_3 y E_2 .

A continuación se escriben las Ecs. correspondientes a la razón de cambio de las poblaciones de los cuatro niveles. Consideremos que N_1 , N_2 , N_3 y N_4 representan las densidades de población de los niveles E_1 , E_2 , E_3 y E_4 respectivamente y

llevando a cabo un análisis como el que realizó con los dos sistemas anteriores, podemos escribir las razones de cambio de población de cada nivel de energía como

$$dN_4/dt = W_p(N_1 - N_4) - T_{43}N_4 \quad (2.63)$$

$$dN_3/dt = W_1(N_2 - N_3) + T_{43}N_4 - T_{32}N_3 \quad (2.64)$$

$$dN_2/dt = -W_1(N_2 - N_3) + T_{32}N_3 - T_{21}N_2 \quad (2.65)$$

$$dN_1/dt = -W_p(N_1 - N_4) + T_{21}N_2 \quad (2.66)$$

donde $W_p N_1$ es el número de átomos que son excitados por unidad de tiempo por unidad de volumen al nivel E_4 , $W_p N_4$ es la razón de emisión estimulada por unidad de volumen. Además se asume que las razones de relajación espontánea asociadas en cada transición (T_{43} , T_{32} y T_{21}) tienen sus respectivas componentes radiactiva (A) y no radiactiva (S), y que domina la componente radiactiva. Además los términos T_{42} y T_{41} son omitidos porque se asume que los átomos se relajan al nivel E_3 antes que a los niveles E_2 y $E_1(4)$. Por último, tenemos que

$$W_1 = [(\pi^2 c^2)/(h\omega^3 n_0^2)] A_{32} g_1(\omega) I_1 \quad (2.67)$$

representa la razón de transición estimulada por átomo entre los niveles E_3 y E_2 y el subíndice 1 denota la transición LASER; $g_1(\omega)$ es la función lineal que describe la transición $E_3 \rightarrow E_2$ e I_1 es la intensidad de la radiación a la frecuencia $\omega = (E_3 - E_2)/h$.

Bajo condiciones de estado estable

$$dN_1/dt = dN_2/dt = dN_3/dt = dN_4/dt = 0 \quad (2.68)$$

De esta manera si igualamos a cero cada una de las Ecs. (2.63) a la (2.66) y además consideramos que $N = N_1 + N_2 + N_3 + N_4$, donde N es el número total de átomos por unidad de volumen en el sistema. Así de la Ec.(2.63) obtenemos

$$N_4/N_1 = W_p/(W_p + T_{43}) \quad (2.69)$$

Si la relajación desde el nivel E_4 al nivel E_3 es muy rápida entonces $T_{43} \gg W_p$ y por lo tanto $N_1 \gg N_4$. Usando esta aproximación en las restantes tres ecuaciones, podemos obtener para la diferencia de población entre los niveles de emisión LASER la siguiente expresión

$$(N_3 - N_2)/N \approx [W_p(T_{21} - T_{32})] / [W_p(T_{21} + T_{32}) + T_{32}T_{21} + W_1(2W_p + T_{21})] \quad (2.70)$$

De esta manera vemos que para obtener una inversión de población entre los niveles E_3 y E_2 , necesitamos tener $T_{21} > T_{32}$, esto es, la razón espontánea de desexcitación del nivel E_2 a el nivel E_1 , necesita ser más grande que la asociada con la transición $E_3 \rightarrow E_2$. Si ahora asumimos que $T_{21} \gg T_{32}$ la Ec.(2.70) se hace

$$(N_3 - N_2)/N \approx [W_p/(T_{21} - T_{32})] \cdot \{1/[1 + W_1(T_{21} + 2W_p) / T_{21}(W_p + T_{32})]\} \quad (2.71)$$

De la ecuación anterior vemos que precisamente con razones de excitación muy pequeñas uno puede obtener una inversión de población entre los niveles E_3 y E_2 . Esto es contrario a lo que encontramos en un sistema de tres niveles, donde había una razón mínima de excitación, w_{th} , requerida para obtener la inversión de población. El término $W_p/(W_p + T_{21})$ de la ecuación anterior que es independiente de W_1 (por lo tanto, independiente de la intensidad de la radiación correspondiente a la transición LASER, ver Ec.2.67) nos da el coeficiente de ganancia de señal pequeña, mientras que el término siguiente de la misma ecuación nos da el comportamiento de saturación.

Justo debajo del valor de umbral para la oscilación LASER, la razón de emisión estimulada es $W_1 \approx 0$ (2), y por lo tanto la ecuación (2.71) se hace

$$\Delta N/N \approx W_p/(W_p + T_{32}) \quad (2.72)$$

donde $\Delta N = N_3 - N_2$ es la densidad de inversión de población. Puesto que la densidad de inversión de población de umbral, ΔN_{um} , es mucho menor que la densidad de población total, $\Delta N_{um} \ll N$, de la Ec.(2.72) podemos asumir que $T_{32} \gg W_p$ y por lo tanto podemos obtener la razón de excitación de umbral requerida para iniciar la oscilación LASER

$$W_{um} = (\Delta N_{um}/N)T_{32} = (\Delta N_{um}/N)(1/\tau_{sp}) \quad (2.73)$$

donde, de la Ec.(2.29)

$$\Delta N_{um} = [(\omega^2 n_0^3)/(\pi^2 c^3)] \cdot [\tau_{sp}/\tau_c] \cdot [1/g(\omega)] \quad (2.74)$$

donde $\omega = (E_3 - E_2)/\hbar$ y además asumimos nuevamente que para una buena acción LASER se necesita que la razón de relajación espontánea en la transición LASER ($E_3 \rightarrow E_2$) sea mayoritariamente, $T_{32} \approx A_{32} = 1/\tau_{sp}$.

Puesto que $N_3 - N_2 \ll N$ y la razón de relajación del nivel E_1 es muy rápida la densidad de población de N_1 es casi cero y por lo tanto $N_1 \approx N$. Cada átomo que se excita del nivel E_1 al nivel E_4 tiene una energía $\hbar\omega_p$, donde ω_p es la frecuencia promedio correspondiente a la transición $E_1 \rightarrow E_4$, así podemos obtener la potencia de excitación de umbral requerida por unidad de volumen para lograr una inversión de población entre los niveles de la transición LASER del medio activo (E_3 y E_2)

$$P_{\text{out}} = W_{\text{in}} N_1 h \omega_p \approx W_{\text{in}} N h \omega_p \quad (2.75)$$

Además podemos estimar la potencia de salida del LASER. Puesto que cada fotón transporta una energía $h\omega$, donde $\omega = (E_2 - E_1)/h$, el número de fotones n asociado con la transición LASER en un modo de oscilación específico de la cavidad (en secciones posteriores se explicará lo que es y como se selecciona un modo único de oscilación de la cavidad) está dado por

$$n = uV/h\omega \quad (2.76)$$

donde u es la densidad de energía de radiación incidente, V representa el volumen del medio activo. De esta manera, si el mecanismo de pérdida único es debido a la reflectividad limitada de uno de los espejos, entonces la potencia de salida será

$$P_{\text{out}} = (n/t_c) \cdot h\omega \quad (2.77)$$

donde n es el número de fotones que salen de la cavidad por unidad de tiempo, t_c es el tiempo de la cavidad pasiva, que es el tiempo de vida en que la energía en la cavidad se reduce por un factor de $1/e$ y está dado por la Ec.(2.28) y $h\omega$ es la energía de cada fotón.

2.6 Mecanismos de Ensanchamiento del Espectro de Emisión

Como se mencionó al principio de este capítulo, la radiación emitida en las transiciones LASER entre dos niveles de energía de un conjunto de átomos nunca es perfectamente monocromática. Esto se debe a varios mecanismos de ensanchamiento que son inherentes a la estructura atómica o a factores externos. Este ensanchamiento del espectro de emisión es descrito en términos de la función lineal $g(\omega)$ introducida al principio del capítulo. En este tema se mencionan algunos mecanismos de ensanchamiento del espectro de emisión. Un estudio del ensanchamiento de línea es muy importante puesto que determina las características de operación del LASER como, la inversión de población de umbral, el número de modos oscilantes, etc. Estos varios mecanismos de ensanchamiento pueden clasificarse ampliamente en homogéneos (natural, colisión) y heterogéneos (Efecto Doppler). A continuación se explican los mecanismos de ensanchamiento natural, por colisión y por Efecto Doppler.

Ensanchamiento Natural

Si los niveles de energía relacionados en una transición LASER, por ejemplo, los niveles E_2 y E_1 fueran perfectamente definidos, la radiación emitida tendría una frecuencia de transición exactamente de ω_0 . Sin embargo, los niveles de energía nunca están perfectamente definidos, de modo que la radiación emitida se

extiende en frecuencias alrededor de ω_0 ; la energía máxima de radiación tendrá lugar en ω_0 y la energía caerá en ambos lados de la frecuencia, esto es, la energía de la radiación emitida está en función de la frecuencia de transición(3). Como ya se dijo, esta función es llamada la función lineal y es representada por $g(\omega)$. El intervalo de frecuencia $\Delta\omega$ en que se contiene la energía emitida es la anchura de la línea espectral emitida.

Ensanchamiento por Colisión

En un gas pueden ocurrir colisiones entre los átomos y entre las paredes que los contienen. Un átomo excitado (en su estado superior de energía) puede verse obligado a volver a su estado fundamental debido a tales colisiones. Así, efectivamente, las colisiones acortan la vida del estado excitado y deben por tanto ensanchar la respuesta de frecuencia atómica. Además, la fase de onda emitida después de la colisión es arbitraria con respecto a la fase antes de la colisión.

Si τ_c representa el tiempo libre entre cada colisión y $\Delta\tau_c$ el tiempo que dura la colisión, entonces podemos obtener las expresiones siguientes

$$\tau_c = \text{Trayectoria libre promedio} / \text{velocidad térmica promedio} \quad (2.78)$$

$$\Delta\tau_c = \text{distancia interatómica} / \text{velocidad térmica promedio} \quad (2.79)$$

Como la distancia interatómica es \ll que la trayectoria libre promedio, el tiempo que dura la colisión es muy pequeño comparado con el tiempo entre cada colisión y puede considerarse la colisión casi instantánea.

Como la frecuencia de colisión atómica depende de la presión del gas, la anchura de la línea emitida dependerá también de esa presión (τ_c depende inversamente de la frecuencia de colisión). De aquí que este tipo de ensanchamiento de la respuesta de frecuencia atómica se llame *ensanchamiento de presión*.

Ensanchamiento Doppler

En la práctica, otros procesos aumentan considerablemente la anchura de la línea hasta varias veces la anchura natural. Primeramente, el movimiento relativo entre el observador y los átomos radiantes produce un ensanchamiento debido al Efecto Doppler. En un gas los átomos se mueven al azar y cuando un átomo en movimiento interactúa con radiación electromagnética, la frecuencia aparente de la onda es diferente de la que se ve desde un átomo estacionario; esto es llamado el Efecto Doppler.

Para analizar la importancia del ensanchamiento Doppler, se da el siguiente ejemplo. Se tiene una radiación de frecuencia ω pasando a través de un conjunto de átomos, el cual tiene una frecuencia de resonancia ω_0 , donde los átomos se

mueven al azar. (Olvidemos el ensanchamiento natural y por colisión en este ejemplo.) Para que un átomo pueda interactuar con la radiación incidente, es necesario que la frecuencia aparente vista por el átomo en su marco de referencia sea ω_0 . Si la velocidad atómica a lo largo de la dirección de propagación y de observación es v_z , la frecuencia observada está dada por

$$\omega = \omega_0(1 \pm v_z/c), \quad \text{donde } v_z \ll c \quad (2.80)$$

(c es la velocidad de la luz), donde el signo \pm depende de v_z , según se dirija hacia el observador o se aleje de él. De esta manera el efecto del movimiento es cambiar la frecuencia resonante del átomo.

2.7 El Resonador Óptico

Hasta donde se va del capítulo, se ha dedicado al análisis del medio activo, desde como obtener una inversión de población, para que éste se comporte como un medio amplificador, hasta los mecanismos de pérdida, de ensanchamiento y de saturación que afectan el comportamiento amplificador del medio activo. Ahora, para convertir este medio amplificador en un oscilador, esto es, en una fuente de radiación, se necesita proporcionar una realimentación óptica a el medio amplificador. Ésta es realizada por un par de espejos entre los cuales es encerrado el medio amplificador. Este par de espejos forman lo que es conocido como el resonador óptico. La fig.2.8 muestra un resonador óptico simple formado por un par de espejos planos. Puesto que los lados de la cavidad del resonador óptico son abiertos, tales resonadores son también conocidos como resonadores abiertos. Los resonadores solamente interactúan con ciertas configuraciones específicas de campo y ciertas frecuencias de oscilación específicas. Éstas son conocidas como los modos de oscilación del resonador.

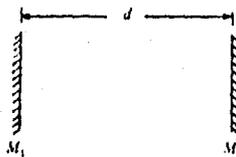


Fig. 2.8 Un resonador óptico simple formado por un par de espejos planos alineados frente a frente.

La necesidad de un resonador abierto en lugar de un resonador cerrado (como en el MASER) radica en el hecho de, que como el número de modos que en un resonador cerrado pueden interactuar dentro del ancho de banda en el que el

medio amplificador puede proporcionar ganancia es tan grande que la salida de semejante sistema estará muy lejos de ser monocromática. En cambio, en la cavidad abierta, que no tiene paredes laterales, se incrementan las pérdidas de la mayoría de los modos, a tal nivel que los modos de oscilación no pueden mantenerse en la cavidad. De esta manera se obtiene una oscilación a una frecuencia única o de muy estrecho ancho de banda. En estos últimos temas se analizan las características principales del resonador óptico, tales como, el factor de calidad (Q), técnicas de selección del modo oscilante, variación de Q (Q-switching) y el funcionamiento en *modelocking* de los LASER's.

2.8 Modos de una cavidad rectangular y de un resonador planar abierto

A continuación se considera una cavidad rectangular de dimensiones $2a \times 2b \times d$ con paredes de perfecta conductibilidad (ver fig.2.9). El campo eléctrico dentro de la cavidad necesita satisfacer la ecuación de onda dada por

$$\nabla^2 E = (1/c^2) \cdot \partial^2 E / \partial t^2 \quad (2.81)$$

donde c representa la velocidad de la luz en el medio, que se encuentra entre la cavidad. Puesto que se asume que las paredes son de perfecta conductibilidad, la componente tangencial del campo eléctrico debe disiparse en las paredes. Si \hat{n} representa la normal unitaria a la superficie de la pared tenemos que

$$E \times \hat{n} = 0 \quad (2.82)$$

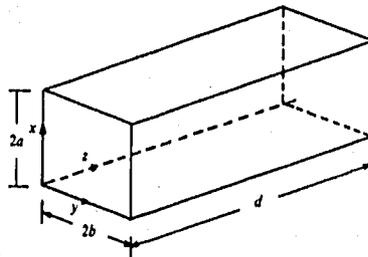


Fig. 2.9 Una cavidad rectangular cerrada circundada por paredes de perfecta conductibilidad.

La dependencia en el tiempo de la Ec.(2.81) es de la forma $e^{i\omega t}$ donde ω es la frecuencia angular de la onda. Se considera cada componente cartesiana de la Ec.(2.81) y como las dependencias de x, y y z son combinaciones lineales de funciones seno y coseno, podemos escribir

$$E_x = (A_1 \text{sen} k_x x + B_1 \text{cos} k_x x)(A_2 \text{sen} k_y y + B_2 \text{cos} k_y y)(A_3 \text{sen} k_z z + B_3 \text{cos} k_z z) e^{i\omega t} \quad (2.83)$$

donde k_x , k_y y k_z son las componentes del vector de propagación K y

$$K^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \omega^2/c^2 \quad (2.84)$$

Ahora, puesto que E_x es una componente tangencial sobre los planos $y = 0$, $y = 2b$, $z = 0$ y $z = d$, se disipa esta componente. De esta manera de la Ec.(2.83) tenemos

$$B_2 = 0, \quad B_3 = 0 \quad (2.85)$$

$$\text{sen}(k_y 2b) = 0 \quad (2.86)$$

$$\text{sen}(k_z d) = 0 \quad (2.87)$$

En una manera similar podemos mostrar que las dependencias de x y z de E_y serán $\text{sen}k_x x$ y $\text{sen}k_z z$. Similarmente las dependencias de x y y de E_z serán $\text{sen}k_x x$ y $\text{sen}k_y y$, esto implica que para todos los casos

$$k_x = m\pi/2a, \quad k_y = n\pi/2b, \quad k_z = q\pi/d, \quad m, n, q = 0, 1, 2, \dots \quad (2.88)$$

Ahora debido a las formas anteriores de las dependencias de x de E_y y E_z , $\partial E_y/\partial y$ y $\partial E_z/\partial z$ se disparan sobre la superficie $x = 0$ y $x = 2a$. Por lo tanto sobre los planos $x = 0$ y $x = 2a$, la condición $\nabla \cdot E = 0$ (Ley de Gauss) conduce a $\partial E_x/\partial x = 0$. Por lo tanto la dependencia de x de E_x necesita ser de la forma $\text{cos}k_x x$, con k_x dada por la Ec.(2.88). Nótese que en el caso $m = 0$ ahora corresponde a una solución no trivial.

De manera análoga, uno puede obtener las soluciones para E_y y E_z . La solución completa dentro de la cavidad puede escribirse como

$$E_x = E_{0x} \text{cos}k_x x \text{sen}k_y y \text{sen}k_z z \quad (2.89)$$

$$E_y = E_{0y} \text{sen}k_x x \text{cos}k_y y \text{sen}k_z z \quad (2.90)$$

$$E_z = E_{0z} \text{sen}k_x x \text{sen}k_y y \text{cos}k_z z \quad (2.91)$$

donde E_{0x} , E_{0y} y E_{0z} son los valores pico de la onda y son constantes. Puesto que k_x , k_y y k_z están dadas por la (2.88), las frecuencias permitidas de oscilación en la cavidad son (de la Ec.2.84)

$$\omega = ck = \pi c [m^2/(4a^2) + n^2/(4b^2) + q^2/d^2]^{1/2} \quad (2.92)$$

Las configuraciones de campo dadas por las Ecs.(2.89)-(2.91) son llamadas los *modos de la cavidad* y corresponden a la distribución de onda establecida en la cavidad.

Si usamos las Ecs. (2.89)-(2.91) junto con la ecuación $\nabla E = 0$, tendremos

$$E_x \cdot K = 0 \quad (2.93)$$

donde $K = k_x + k_y + k_z$ y $E_0 = E_{0x} + E_{0y} + E_{0z}$. Puesto que los coeficientes E_{0x} , E_{0y} y E_{0z} tienen que satisfacer la Ec.(2.93), entendemos que para un modo dado, esto es, para valores dados de m, n y q , solamente dos de las componentes de E_0 pueden elegirse independientemente. De esta manera un modo dado puede tener dos estados independientes de polarización.

Como los valores permitidos de k_x , k_y y k_z (dentro de una cavidad rectangular cerrada de dimensiones $2ax2bx2d$) son dados por la Ec.(2.88), el número de modos para el cual la componente k_x cae entre k_x y k_x+dk_x es igual al número entero que cae entre $2ak_x/\pi$ y $2a(k_x+dk_x)/\pi$; este número es aproximadamente igual a $(2a/\pi)dk_x$ y similamente se puede obtener para k_y y k_z . De esta manera el número de modos en el elemento de volumen $dk_x dk_y dk_z$ (del espacio K) está dado por

$$(2a \cdot dk_x/\pi)(2b \cdot dk_y/\pi)(2d \cdot dk_z/\pi) = (V/\pi^3) \cdot dk_x \cdot dk_y \cdot dk_z \quad (2.94)$$

donde $V = 4abd$ representa el volumen de la cavidad. De esta manera el número de modos por unidad de volumen en el espacio K es

$$2V/\pi^3 \quad (2.95)$$

donde el factor de 2 es debido a los dos estados independientes de polarización. Si $P(K)dK$ representa los modos para los cuales la magnitud del vector de propagación K cae entre K y $K+dK$, entonces

$$P(K)dK = (2V/\pi^3) \cdot 4\pi \cdot K^2 dK \quad (2.96)$$

Puesto que $K = \omega/c = (2\pi \cdot \nu/c)n_0$, podemos escribir el número de modos de la cavidad por unidad de volumen en función del intervalo de frecuencia ν y $\nu+d\nu$ como

$$P(\nu)d\nu = (8\pi \nu^2 n_0^3 / c^3) \cdot d\nu \quad (2.97)$$

donde n_0 es el índice refractivo del medio que se encuentra entre la cavidad.

Así para un valor típico del ancho de línea de un sistema atómico, como por ejemplo $d\nu = 3 \times 10^9$ Hz en $\nu = 3 \times 10^{14}$ Hz, si $n_0 = 1$, entonces el número de modos por unidad de volumen será

$$P(\nu)d\nu = \{ [8\pi (3 \times 10^{14})^3] / [(3 \times 10^8)^3] \} \cdot (3 \times 10^9) \approx 2.51 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

De esta manera para cavidades de dimensiones practicas, el número de modos oscilantes que caen dentro del ancho de línea atómico será extremadamente grande. Por lo tanto todos estos modos oscilantes disiparán energía del sistema atómico y la emisión resultante estará muy lejos de ser monocromática. Para tener

muy pocos modos de oscilación dentro de la cavidad, las dimensiones de la cavidad elegida deben ser del tamaño de la longitud de onda de la radiación. Esto es, por supuesto, imposible para longitudes de onda visibles e infrarrojas.

El problema del número extremadamente grande de modos de oscilación puede superarse con el uso de cavidades abiertas que consisten solamente de dos espejos planos o curvados alineados frente a frente. Un modo de oscilación puede considerarse que es una distribución establecida de onda formada por las ondas que se propagan dentro de la cavidad con el vector K , dado por $\pm k_x, \pm k_y, \pm k_z$ que representan respectivamente las componentes x, y y z de los vectores de propagación de las ondas de componente plana. Así los ángulos hechos por las ondas de componente plana con las direcciones x, y y z serán respectivamente $\cos^{-1}(m\lambda / 2a)$, $\cos^{-1}(n\lambda / 2b)$ y $\cos^{-1}(q\lambda / d)$. Puesto que se eliminaron las paredes laterales de la cavidad, aquellos modos que están propagándose casi a lo largo de la dirección z (esto es, valores grandes de q y valores pequeños de m y n) tendrán una pérdida mucho menor que la de aquellos modos que hacen un ángulo grande con el eje z (esto es, para valores grandes de m y/o n). De esta manera, al eliminar las paredes de la cavidad solamente los modos que tengan valores grandes de q y pequeños de m, n ($\sim 0, 1, 2, \dots$) tendrán una pérdida pequeña y de esta manera cuando el medio activo situado dentro de la cavidad es excitado, únicamente los modos que cumplan con estas características serán capaces de oscilar y los demás modos, es decir los que tengan $m, n \gg q$ sufrarán muy grandes pérdidas y no oscilarán. Puesto que m y n especifican la distribución de campo eléctrico a lo largo de las direcciones transversales x y y , los modos que tienen varios valores de m y n son llamados *modos transversales*. Por el otro lado, q especifica la distribución de campo a lo largo de la dirección longitudinal z , así los modos que tengan diferentes valores de q son conocidos como los *modos longitudinales*.

Las frecuencias de oscilación de los varios modos de la cavidad cerrada están dadas por la Ec.(2.92). Para obtener un valor aproximado para las frecuencias de oscilación de una cavidad abierta la Ec.(2.92) puede servir, considerando que $m, n \ll q$ y desarrollándola en una expansión binomial(4), obtenemos (donde $\omega = 2\pi \cdot \nu$)

$$\nu_{mq} = [c/2] \{ q/d + (m^2/a^2 + n^2/b^2)(d/8q) \} \quad (2.98)$$

La diferencia en frecuencia entre dos modos adyacentes, uno transversal y otro longitudinal, que tienen los mismos valores de m, n y diferentes en q será muy aproximado a

$$\Delta \nu_q = c/(2d) \quad (2.99)$$

que corresponde a el *espaciamiento del modo longitudinal*.

Es interesante mencionar que en un resonador abierto, que consiste de dos espejos planos colocados uno frente a otro, en su principio es el mismo que el de un etalón o interferómetro de Fabry-Perot(4). La diferencia esencial es respecto a las dimensiones físicas, que en un interferómetro de Fabry-Perot el espaciado entre los espejos es muy pequeño comparado con las dimensiones de los espejos, mientras que en un resonador óptico, es todo lo contrario.

2.9 El Factor de Calidad (Q)

Puesto que un resonador abierto es una cavidad abierta, todos los modos sufren pérdidas. Estas pérdidas surgen de las dimensiones limitadas de los espejos, debido a lo cual hay sobreesparcimientos de difracción, además, las pérdidas surgen por las reflectividades limitadas de los espejos y por la absorción y dispersión presentadas en el medio activo, que ocupa la cavidad del resonador. De esta manera uno puede describir las pérdidas en la cavidad (además de las descritas por t_c) por medio de lo que es conocido como el *factor de calidad*, o *factor Q*. Esta cantidad se define como el cociente de la energía almacenada por el modo oscilante entre la rapidez con que dicha energía es perdida por el sistema, esto es

$$Q = \omega_0(\text{energía almacenada en el modo} / \text{energía perdida por unidad de tiempo}) \quad (2.100)$$

donde ω_0 es la frecuencia de oscilación del modo. Si $W(t)$ representa la energía en el modo en el tiempo t . Entonces de la Ec.(2.100), obtenemos

$$Q = \omega_0[W(t) / (-dW/dt)]$$

o

$$dW/dt = -(\omega_0/Q)W(t) \quad (2.101)$$

cuya solución es

$$W(t) = W(0) \cdot e^{-\omega_0 t/Q} \quad (1.102)$$

De esta manera, si t_c representa el tiempo de vida de la cavidad, esto es, el tiempo en el que la energía en el modo decrece por un factor de $1/e$, entonces

$$t_c = Q/\omega_0 = Q/(2\pi \cdot \nu_0) \quad (2.103)$$

Podemos escribir para el campo eléctrico asociado con el modo

$$E(t) = E_0 \cdot e^{i\omega_0 t} \cdot e^{-\omega_0 t/(2Q)} \quad (2.104)$$

Así, podemos estimar el FWHM (Full Width Half Medium, Máximo Ancho de la Mitad de la Línea) del espectro de frecuencia como

$$\Delta\nu_p = \nu_0/Q \quad (2.105)$$

De esta manera el ancho de línea del modo pasivo de la cavidad depende inversamente del factor de calidad. Para más altos factores de calidad, esto es, para tiempos de vida más grandes, más pequeño será el ancho de línea del modo pasivo.

Si ocupamos la expresión t_c dada por la Ec.(2.28) en términos de la longitud del resonador y la reflectividad de los espejos, y empleamos las Ecs. (2.103) y (2.105), tenemos

$$Q = [(4\pi\nu_0 n_0 d) / c] \cdot [1 / (2\alpha_1 d - \ln R_1 R_2)] \quad (2.106)$$

y

$$\Delta\nu_p = [c / (4\pi n_0 d)] [2\alpha_1 d - \ln R_1 R_2] \quad (2.107)$$

Además, se puede obtener una expresión más completa para el *factor de calidad* que contemple el ancho de línea final del LASER, debido a la siempre presente emisión espontánea en la cavidad. Puesto que la energía contenida en el modo es $nh\nu_0$, donde ν_0 es la frecuencia de transición atómica, y como la potencia de salida está dada por $P_{sal} = nh\nu_0 / t_c$ la energía contenida en el modo es igual a $P_{sal}t_c$.

Ahora, si se usa nuevamente la Ec.(2.28) y denotamos el ancho de línea de oscilación del LASER causada por la emisión espontánea por $\delta\nu_{sp}$ se obtiene, de la Ec. (2.100)

$$Q_0 = \nu_0 / \delta\nu_{sp} = [2\pi\nu_0] \cdot [(P_{sal}t_c) / (h\nu_0 t_c)] = 2\pi P_{sal}t_c^2 / h \quad (2.108)$$

2.10 Selección del Modo Oscilante

Puesto que los resonadores ópticos tienen dimensiones muy grandes comparadas con la longitud de onda óptica, en general hay un número grande de modos que caen dentro del ancho de línea atómico y los cuales pueden oscilar. Por lo tanto la salida puede consistir de varios modos longitudinales y transversales(5). A continuación se describen algunas técnicas que se usan para seleccionar un modo único transversal y un modo único longitudinal para oscilar en el LASER.

Selección del Modo Transversal

Los diferentes modos transversales se caracterizan por diferentes distribuciones transversales de amplitud. Para un resonador de espejos cóncavos, las distribuciones transversales del campo eléctrico en la "cintura" de los varios modos son funciones de Hermite-Gauss dadas por

$$E_{mn}(x,y) = E_0 H_m(\sqrt{2}x/w_0) \cdot H_n(\sqrt{2}y/w_0) \cdot \exp[-(x^2+y^2)/w_0^2] \quad (2.110)$$

donde m, n representan los números de los modos transversales, $H_m(\sqrt{2}x/w_0)$ y $H_n(\sqrt{2}y/w_0)$ representan los polinomios de Hermite y w_0 es el ancho característico del modo, el cual depende de la longitud de onda de operación y de las dimensiones del resonador, tales como el radio de curvatura de los espejos y la distancia entre ellos.

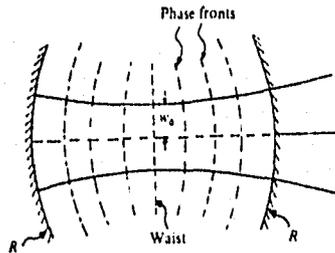


Fig. 2.10 Variación de $w(z)$ y del frente de fase de un modo Gaussiano en un resonador de espejos cóncavos.

El modo transversal fundamental (TEM_{00}) (ver figura 2.11a) corresponde a $m = 0$ y $n = 0$ (4), por lo se obtiene

$$E_{00}(x,y) = E_0 \cdot \exp[-(x^2+y^2)/w_0^2] \quad (2.111)$$

De esta manera, el modo fundamental de los resonadores de espejos curvados es Gaussiano con un amplitud y radio w_0 en la "cintura" del haz (ver fig.2.10)(4). La mayor parte de las aplicaciones del LASER, tales como holografía, medicina, telémetro, óptica no lineal, etc., requieren la oscilación del LASER en su modo transversal fundamental, el cual es una distribución Gaussiana de campo. Esto se debe a que el modo fundamental transversal produce la mínima divergencia, la densidad de potencia más alta y además es de fase única a través de su frente de onda. Además el modo transversal fundamental produce la potencia más grande por unidad de área en un punto dado muy reducido. En vista de lo anterior usualmente es necesario restringir la oscilación del LASER únicamente a su modo transversal fundamental(8).

Puesto que el modo fundamental Gaussiano es el modo con las dimensiones transversales más estrechas, si una abertura circular es introducida dentro del resonador de modo que la pérdida sufrida por todos los modos de más alto orden sea más grande que la ganancia, entonces uno tendrá una oscilación del modo transversal únicamente(4) (ver fig.2.11b).

Es interesante notar que los modos transversales específicos de más alto orden también pueden seleccionarse eligiendo complejas aberturas, que introducirán una pérdida más alta para todos los modos excepto para el modo deseado. También se pueden seleccionar perfilando la reflectividad de uno de los espejos, adaptándola para el modo deseado. De esta manera un alambre delgado colocado normalmente al eje de propagación (eje z) seleccionará el modo TEM₀₁ (Figura 2.11a)

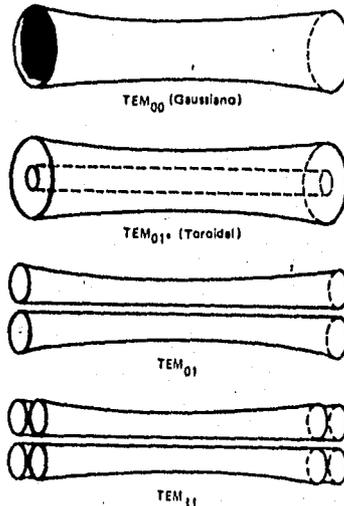


Figura 11.a Algunos Modos Transversales del HAZ

Selección del modo longitudinal

Como se mencionó en la sección 2.8, los varios modos longitudinales correspondientes a un modo transversal están separados aproximadamente por $c/(2d)$, donde d es la separación entre los espejos de la cavidad. De esta manera, por ejemplo, si se considera una longitud de 50 cm de un resonador LASER de He-Ne que opera con una longitud de onda de $\lambda=6328 \text{ \AA}$, y tiene un ancho de banda de 1500 MHz (el cual es la máxima amplitud del ancho de línea del perfil de ganancia) entonces el espaciamiento del modo longitudinal será

$$\Delta\nu = c/(2d) = 300 \text{ MHz}$$

De esta manera si el LASER está oscilando únicamente en su modo fundamental transversal, habrá cinco modos longitudinales que podrán oscilar en el LASER (ver fig. 2.12). Por lo tanto la salida consistirá de cinco frecuencias adyacentes y tendrá una corta longitud de coherencia. De esta manera en aplicaciones donde

una longitud grande de coherencia sea necesaria (como holografía, interferometría, telecomunicaciones, etc) o donde una frecuencia bien definida es requerida (como espectroscopia) se necesitará la operación de un modo longitudinal único del LASER, además de su oscilación en su modo transversal único(8).

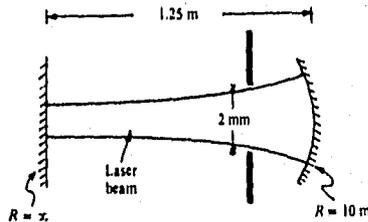


Fig. 2.11b Una configuración típica para producir únicamente la operación del modo transversal fundamental del LASER (TEM_{00}).

Refiriéndome a la Fig. 2.12, se puede tener un método simple para obtener la oscilación de un modo longitudinal único, esto es, reduciendo la longitud de la cavidad a un valor de manera que el espaciado intermodal sea más grande que el ancho espectral sobre el cual la oscilación puede ocurrir. De esta manera, si el ancho de banda es $\delta\nu$ (ver fig. 2.12), entonces para la oscilación de un modo único longitudinal, la longitud de la cavidad necesita cumplir

$$c/(2d) > \delta\nu \quad (2.112)$$

Regresando al ejemplo de un LASER de He-Ne, $\delta\nu \approx 1500\text{ MHz}$ y para una oscilación de un modo longitudinal únicamente necesitamos tener

$$d < c/(2\delta\nu) \approx 10\text{ cm}$$

Hay que notar que si se puede asegurar que un modo resonante exista en el centro del perfil de ganancia, una oscilación de modo único puede obtenerse precisamente con una longitud de la cavidad de $d \sim c/\delta\nu(4)$ (ver fig. 2.12b).

Una de las mayores desventajas del método anterior, es que al reducir la longitud de la cavidad se reduce también el volumen, por lo que la potencia de salida es pequeña. Además, en los LASER's de estado de sólido, donde el ancho de banda es grande, la técnica anterior se hace inservible. De esta manera otras técnicas se han desarrollado para producir oscilaciones de frecuencia única sin restringir la longitud de la cavidad y por lo tanto obtener potencias altas(8).

La oscilación del LASER en un modo resonante dado, puede conseguirse con la introducción de elementos selectivos de frecuencia en la cavidad del LASER,

tales como los etalones de Fabry-Perot (ver fig. 2.13). El etalón introduce pérdidas en todos los modos con un valor por encima de la ganancia, excepto para el modo resonante deseado. El etalón consiste de un par de superficies paralelas altamente reflectantes.

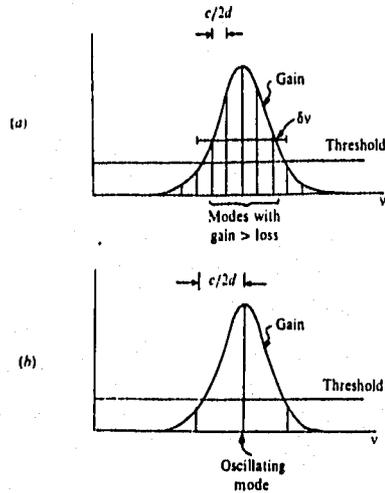


Fig. 2.12 (a) El espaciado del modo longitudinal de un resonador de longitud d es $c/2d$. Para un ancho de banda oscilante de 1500 MHz y un espaciado intermodal de 300 MHz, cinco modos longitudinales diferentes pueden oscilar. (b) Si $d < c/\delta\nu$ y hay un modo en el centro de la curva, entonces uno puede tener una frecuencia de oscilación única del LASER.



Fig. 2.13 Un resonador LASER con un etalón de Fabry-Perot colocado dentro de la cavidad para la selección de una oscilación en un modo longitudinal único.

2.11 Variación de Q (Q-switching)

Como ya se mencionó el factor de calidad (o *factor Q*) de una cavidad está determinado por las pérdidas dentro de la cavidad; a pérdidas más pequeñas, más grande será el valor de *Q*. Si se considera una cavidad LASER, en la cual se introduce un obturador en frente de uno de los espejos, interrumpiendo así la retroalimentación óptica, como se muestra en la Fig. 2.14. Además, si el medio

activo continuamente es excitado (hasta donde lo permita la corriente de saturación), la inversión de población en la cavidad se incrementará y alcanzará un muy alto valor. Este valor, es mucho más grande que la inversión de población de umbral requerida por el mismo LASER en la ausencia del obturador.

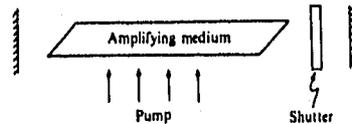


Fig. 2.14 Un resonador LASER con un obturador colocado en frente de uno de los espejos para obtener una variación de Q (Q -switching).

Si el obturador, de repente se abre entonces, la inversión de población existente corresponderá a un valor mucho mayor que el valor de umbral para la oscilación. De esta manera, la ganancia por recorrido completo y la intensidad de radiación en el modo de la cavidad aumentará muy rápidamente. Este rápido incremento en la intensidad disminuirá la inversión de población, la cual alcanzará un valor debajo del umbral. Esto resultará en la generación de un intenso pulso de luz de la cavidad. Puesto que el valor de Q de la cavidad, está cambiando de un valor pequeño a un gran valor, la técnica anterior es conocida como Q -switching (variación de Q). La Fig. 2.15 muestra gráficamente la variación en el tiempo de la pérdida de la cavidad, el factor Q de la cavidad, la inversión de población y la potencia de salida. Como se muestra en la figura, un intenso pulso es generado con la aparición de la intensidad pico, esto ocurre cuando la inversión de población es igual a la inversión de población de umbral.

Para realizar el Q -switching, varios dispositivos están disponibles, los cuales mueven mecánicamente los espejos o los obturadores, los cuales pueden estar controlados electrónicamente. El dispositivo mecánico puede simplemente girar uno de los espejos, para alinearlos en forma perpendicular y después en forma paralela, con respecto del eje de propagación LASER. Restableciendo o interrumpiendo la realimentación óptica una vez en cada rotación. Puesto que la velocidad de rotación no puede ser muy grande (casi es de 24,000 RPM), la variación de Q , de un valor bajo a un valor alto, usando un método mecánico es muy lenta y en los LASER's sofisticados, donde se requieren pulsos ultracortos, este método es inoperante.

En comparación con la rotación mecánica, los obturados controlados electrónicamente que utilizan los efectos electroóptico o acustoóptico son extremadamente más rápidos. Un arreglo de Q -switching usando el efecto electroóptico se muestra en la figura 2.16. De manera muy superficial, el efecto electroóptico es el cambio de las propiedades ópticas de un material expuesto

ante un campo eléctrico externo. De esta manera, el modulador electroóptico, mostrado en la figura 2.16, puede ser un cristal fotosensible y si se utiliza un polarizador se puede variar la polarización de la luz, con esto variando la retroalimentación y por ende el factor Q.

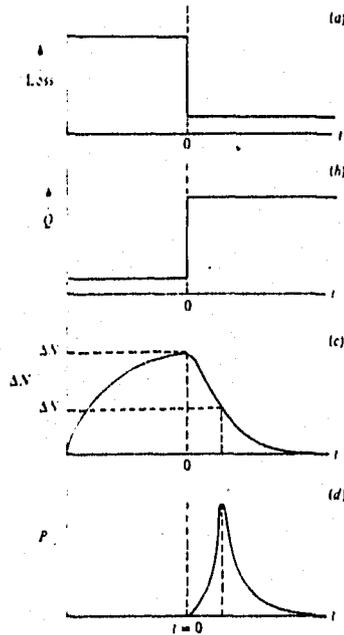


Fig. 2.15 Representación esquemática de como las cantidades a saber (a) pérdidas, (b) Q, c) inversión de población ΔN y (d) potencia de salida LASER, varían con respecto al tiempo cuando un LASER se hace operar en Q-switching.

La variación de Q electroóptica se basa en el efecto electroóptico, el cual se puede definir superficialmente, como la difracción de una onda de luz incidente por medio de una onda acústica que se propaga en el medio activo. La onda acústica genera una rejilla de fase en el medio activo, la cual es responsable de la difracción. De esta manera si una celda electroóptica se coloca dentro del resonador, ésta puede deflectar el haz de luz fuera de cavidad, de esta manera conduciendo a un estado bajo de Q. El factor Q puede variarse a un valor alto pulsando la onda acústica.

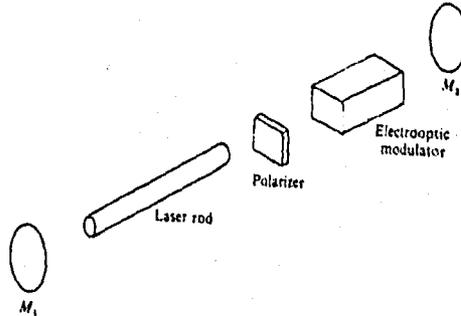


Figura 2.16 Un arreglo típico para lograr un Q-switching usando un obturador electroóptico. Cuando cierto voltaje se aplica a través del EOM, el modulador actúa como una placa de $\frac{1}{4}$ espesor de la longitud de onda. De esta manera la combinación de polarizador-EOM suprime la reflexión del espejo M_2 . Cuando el voltaje es eliminado, el EOM no cambia el estado de polarización y de esta manera el Factor Q se hace muy alto.

2.12 La Operación en Modelocking del LASER

Pulsos con duración del orden de pico segundos (ps) pueden generarse mediante el modelocking. La manera más simple de imaginar los pulsos de modelocking es como un grupo de fotones que viajan juntos y en fase como oscilen estos a través de la cavidad LASER. Cada vez que los fotones choquen con el espejo de salida parcialmente transparente, parte de la luz será emitida como un pulso ultrarrápido. Nuevamente los fotones hacen otro recorrido completo a través de la cavidad LASER antes de que otro pulso sea emitido. De esta manera los pulsos están separados por el tiempo de recorrido completo de la cavidad $t = 2dn_0/c$, donde c es la velocidad de la luz, n_0 es el índice refractivo del medio activo y d es la longitud de la cavidad(4).

La física del modelocking actualmente es mucho más compleja y entrar en detalles sería una labor muy larga y complicada. La idea básica es que la modulación de la fase por un elemento óptico en la cavidad LASER causa varios diferentes modos longitudinales para oscilar juntos en fase. El modelocking ocurre cuando la frecuencia de modulación corresponde al tiempo de recorrido completo de la cavidad. La modulación puede ser pasiva, cambiando la transmisión por un modulador, o pasiva, por efectos de saturación(11). En cada caso la interferencia entre los modos produce una serie de pulsos ultracortos.

Para obtener pulsos de modelocking se requiere de un LASER que oscile en varios modos longitudinales. De esta manera, el modelocking no funciona para varios LASER's de gas con líneas de emisión estrechas. Sin embargo, pueden producirse los pulsos con LASER's ionizados de criptón (los cuales tienen un

ancho de banda de ganancia excepcionalmente amplio). La duración del pulso es inversamente proporcional al ancho de banda de oscilación del LASER, de manera que los LASER's de colorante pueden generar los pulsos más cortos a causa de sus anchos de banda de ganancia excepcionalmente amplios (ver el Capítulo 3 en LASER's colorantes).

Ambos LASER's pulsados y continuos pueden operarse en modelocking. En cada caso, el modelocking produce un tren de pulsos separados por el tiempo de recorrido completo de la cavidad. Para los LASER's pulsados, el resultado es una serie de pulsos de duración normal (de 0.3 ms a unos cuantos milisegundos). Los pulsos de modelocking pueden seleccionarse, pasando el tren de pulsos a través de moduladores que permitan el paso de sólo un pulso.

2.13 Métodos de Excitación

Por último, solamente mencionaremos los principales tipos de excitación. Como ya se ha dicho durante todo este capítulo, para que un medio activo sea capaz de emitir radiación coherente y poder ser amplificada por el resonador óptico, es requisito que el medio activo se encuentre en su estado invertido de población. La parte del LASER que se encarga de llevar a cabo esta inversión de población del medio es el sistema de bombeo o sistema de excitación y puede ser de varios tipos, aunque los más usuales son los de descarga, óptico, químico, etc.

Excitación de Descarga. En la excitación de descarga, una corriente fluye a través del medio activo. Hay dos variaciones fundamentales, mostradas en la Fig. 2.17. En la excitación longitudinal, un voltaje es aplicado mediante dos electrodos en cada extremo de la cavidad de manera que la corriente fluye a lo largo del eje de propagación del medio activo (Fig. 2.17a). En la excitación transversal, la descarga es aplicada perpendicularmente al eje de propagación del LASER (ver Fig. 2.17b). Como los electrones pasan a través del medio activo y chocan con los átomos, éstos excitarán a los átomos del medio.

Las descargas pueden ser *continuas* o *pulsadas*, ambas de las cuales requieren de un colapso eléctrico inicial del gas. En un LASER continuo, el colapso es iniciado por un resalto de voltaje varias veces mayor que el valor normal continuo de voltaje. Después de que la corriente emplece a fluir, el voltaje será rápidamente reducido a un nivel más bajo, típicamente esta fluctuación es de 1 KV a 10 KV. Excepto para LASER's que operan a altas potencias, las corrientes de descarga normalmente son pequeñas. En la descarga pulsada, el resalto de voltaje inicial típicamente es de decenas de kilovolts y los tiempos de duración del pulso son del orden de decenas, o quizás de cientos de nanosegundos (ns).

Este método de excitación esencialmente es usado en sistemas LASER's de mezclas gaseosas atómicas o moleculares, así como en LASER's de plasma caliente rarificado.

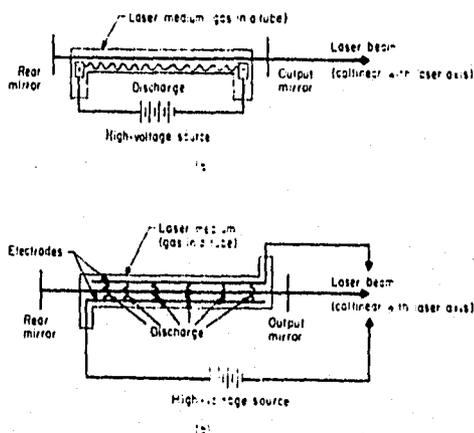


Fig. 2.17 Una descarga eléctrica excitando un LASER de gas puede ser aplicada (a) longitudinalmente, a lo largo del eje del LASER, o (b) transversalmente, perpendicular a el eje del LASER.

Excitación con Haz de Electrones y Haz de Iones. La excitación con un haz de electrones esencialmente es una variación de la descarga pulsada. Los electrones son depositados en el medio activo no por una descarga entre un par de electrodos, sino por un pulso de electrones de un acelerador (un generador de Haz de Electrón). La excitación con un haz de electrones tiene la ventaja de transferir rápidamente bastante de la energía de los electrones a los átomos o moléculas del medio activo. Sin embargo, la necesidad de un voluminoso y costoso acelerador limita su uso a LASER's grandes y del tipo de laboratorio de investigación. Se usa en sistemas LASER's de mezclas moleculares y atómicas y en los de plasma caliente rarificado(11).

Los haces pulsados de ion pueden usarse para excitar mezclas de gas en muchas ocasiones en lugar de los haces de electrón. La excitación con haces de protón ha sido probada en laboratorios, pero tal excitación con haz de ion siempre es más fastidiosa que la excitación de haz de electrón y además no es de uso común(11).

Excitación Óptica. Un método conceptualmente simple para excitar un LASER es el bombeo óptico. En este método los fotones pasan a través del medio activo,

excitando a los átomos o moléculas a sus niveles más altos de energía, conduciendo a una inversión de población y así a una acción LASER. Aunque es un método muy común, las aplicaciones prácticas de la técnica son limitadas por su baja eficiencia total. Sólo en algunos casos el bombeo óptico es muy práctico. Esto es, para sistemas LASER's que requieran de una excitación a niveles de energía muy específicos, debido a que se requiere que el LASER emita a una longitud de onda específica, el bombeo óptico resulta una herramienta muy importante. Esto se debe a que la excitación óptica es fuertemente selectiva.

En este caso lo que tenemos es la cavidad resonante rodeada por varias lámparas, o una en forma de espiral, de destello-flash muy potentes. Algunos sistemas LASER's que ocupan la excitación óptica son los de colorante líquido orgánico, cristales dieléctricos y vidrios, y los de mezclas gaseosas atómicas.

Excitación Química. La energía de una reacción química exotérmica puede excitar a un LASER. En el ejemplo más común, dos especies reaccionan entre sí para producir una tercera especie y parte de esa energía exotérmica de la radiación es transformada a energía vibracional. Si la reacción es rápida, el resultado puede ser una inversión de población de la especie excitada producida por la reacción. Un LASER químico es un dispositivo desacostumbrado por los estándares LASER's. Aunque los LASER's químicos nominalmente obtienen su energía de excitación de una reacción química, un "destello" eléctrico puede ser requerido para iniciar la reacción química o para preparar una o ambas de las especies para que se lleve a cabo la reacción. Este sistema de excitación se ocupa en algunos LASER's de mezclas gaseosas moleculares.

Capítulo 3 Algunos Sistemas LASER

En este capítulo se discuten algunos sistemas LASER específicos y sus características más importantes del haz y de operación. Los sistemas que se discuten son algunos de los más importantes que están en uso generalizado hoy en día para diferentes aplicaciones. Los LASER's considerados son:

- LASER's de Gas: el de Helio-Neón, Gases Raros Ionizados y Bióxido de Carbono
- LASER's de Estado Sólido: el de Rubí y los de Neodimio
- LASER's Líquidos: el de Colorante
- LASER's de Excímero
- LASER's de Semiconductor

3.1 LASER's de Gas

3.1.1 LASER's de Helio-Neón (He-Ne)

El primer LASER de gas en ser operado con buen éxito fue el LASER de He-Ne. Además, el LASER de He-Ne es el LASER visible más común y más económico, y el LASER de gas menos costoso. Ha alcanzado aplicaciones desde la industria de la construcción a la investigación de laboratorio por su capacidad para producir de una fracción de 1 mW a unas cuantas decenas de mW a 632.8 nm de longitud de onda en el rojo. El bajo costo y la salida visible del LASER rojo de He-Ne son los motivos principales de su elección para demostraciones escolares y de museo. Menos conocidas son otras líneas del LASER de He-Ne, que sirven como base de LASER's comerciales infrarrojos, también ya está disponible en el mercado un LASER de He-Ne de una débil línea verde.

El LASER de He-Ne inicialmente operó a 1153 nm en el infrarrojo. Otros investigadores pronto encontraron que la misma mezcla de gas podía trabajar en el rojo, y puesto que la línea visible generalmente es de mayor utilidad, los investigadores se concentraron en desarrollar sistemas comerciales sobre la línea roja(8). La línea roja no es ideal para todas las aplicaciones, pero el LASER de He-Ne se ha convertido en uno de los más populares, porque es más fácil y menos costoso de construir que otros LASER's visibles. La producción anual de LASER's de He-Ne, en cantidad, excede a la de otros tipos excepto a los LASER's de diodo semiconductor. Los LASER's de diodo han desplazado a los de He-Ne en varias aplicaciones donde la salida visible no es importante, pero el LASER de He-Ne parece tener un lugar seguro en el mundo LASER, a no ser que el bajo precio y la larga vida del diodo LASER lleguen al mercado acompañado de una salida visible y de una buena calidad del haz.

Funcionamiento Interno El medio activo en un LASER de He-Ne es una mezcla de helio y neón a presiones típicas que van de una fracción de un torr a varios torr (1 torr = 1 mmHg = 0.75 bares), con mejores presiones de trabajo dependiendo del diámetro del tubo de descarga -el tubo de descarga es donde se contiene el medio activo- (~2 a 8 mm). La potencia es más alta cuando la presión del gas (en torr) es varias veces el diámetro del tubo de descarga (en mm), esto es de 3.6 a 4 veces. Típicamente la mezcla de gas contiene cerca de cinco veces más de helio que de neón, para el funcionamiento a 632.8 nm de longitud de onda, con algunas proporciones diferentes usadas para el funcionamiento infrarrojo(10).

La energía de excitación en un LASER de He-Ne proviene de una descarga eléctrica, la cual proporciona unos cuantos miliamperes a través del tubo de descarga, con un par de cientos de volts cuando el LASER está en operación estable. Un voltaje de arranque de cerca de 10 kilovolts se requiere para iniciar la operación del LASER. Los electrones pasan a través del medio activo y colisionan con los átomos de helio y de neón, elevándolos a sus niveles excitados. La mayor abundancia de átomos de helio absorben la mayoría de la energía, entonces éstos transfieren rápidamente la energía absorbida a los átomos de neón, los cuales tienen estados excitados con aproximadamente la misma energía que sus o fundamentales. Los átomos de neón entonces pierden su energía de excitación y caen a sus niveles más bajos, vía varias transiciones como la de 3391 nm, 543 nm, 832.8 nm (que es la transición roja), 1523 nm y 652 nm. Por lo tanto, los átomos de helio se encargan de absorber la energía externa y llevar al medio activo a la condición de población invertida y los átomos de neón se encargan de llevar a cabo la emisión LASER. La longitud de onda que un sólo LASER emite depende de la elección de accesorios ópticos de selección adicionales(11) a el LASER y de las condiciones de operación del tubo de descarga.

Estructura Interna Un LASER de He-Ne es un tubo relleno de gas, con electrodos internos que se encargan de excitar a el gas para que pueda emitir luz. Los espejos sobre cada extremo del tubo definen la cavidad LASER. Los primeros LASER's de He-Ne eran completamente simples, pero sobre los años los fabricantes han incorporado un número de refinamientos para mejorar el funcionamiento(11).

Ahora virtualmente todos los LASER's de He-Ne están hechos con sellos fuertes, en los que el vidrio está unido directamente a el metal a altas temperaturas. Típicamente los espejos de la cavidad LASER están unidos a las placas finales de metal, las cuales a su vez están unidas a el tubo LASER de vidrio sin el uso de epóxicos. Los selladores fuertes reducen el escape de helio por debajo de 0.01 torr (1.33 Pa) por año, y provocan una contaminación insignificante del vapor de agua y de otros materiales. Así, la vida de operación de los tubos de He-Ne puede extenderse a 20,000 hrs. o más.

En los LASER's de He-Ne de la actualidad, los espejos de la cavidad típicamente están unidos directamente a el tubo, o través de las placas terminales de metal, una estructura más simple, dentro de lo posible, si los espejos estuviesen separados de las ventanas de salida del tubo LASER(8). Este hecho pone en riesgo al espejo que cubre directamente a la descarga dentro del tubo LASER, pero los recubrimientos duros para corriente pueden resistir tales condiciones.

En los LASER's de He-Ne estándar, un espejo es reflectivo totalmente, mientras que el otro en el extremo opuesto de la cavidad transmite la fracción de luz que se convierte en el haz LASER. El rango de las longitudes de la cavidad son de alrededor de 10 cm para modelos de baja potencia y para modelos del rango de 50 mW de potencia la longitud puede ser de un par de metros. Una desventaja del LASER de He-Ne es el incremento en dimensiones y precio para altas potencias, esto es porque la estructura interna hace mucho más difícil producir altas potencias.

Disyuntivas Inherentes

La disyuntiva más obvia con los LASER's de He-Ne está en el incremento de las dimensiones y precio del LASER para potencias más altas. Mientras que el LASER de He-Ne puede producir fácilmente unos cuantos miliwatts, la estructura interna se hace mucho más difícil para producir potencias más altas. La salida de cerca de 60 mW ha sido demostrada en el laboratorio, pero ésta no es práctica y no está disponible en LASER's comerciales.

En general, los LASER's de He-Ne de emisión verde e infrarroja son más caros por miliwatt de salida que en los modelos de emisión roja. Esta es la razón principal por lo que la producción de los dos primeros sea mucho menor.

Características del Haz

Potencia de Salida y Longitud de Onda La longitud de onda estándar de los LASER's de He-Ne es de 632.8 nm en el rojo. Los modelos comerciales emiten haces continuos de unos cuantos décimos de mW a 50 mW, con la mayoría en el rango de 0.5 a 7 mW. También hay de otras líneas visibles más débiles, los cuales proporcionan salida de onda continua de 0.5 mW a 543 nm, 0.2 mW a 594 nm y 1 mW a 612 nm.

Tres líneas de He-Ne infrarrojas están disponibles en LASER's comerciales: 1.15, 1.523 y 3.39 μm (11), los haces son continuos con potencias típicamente en el rango de 1 a 10 mW. Unos cuantos modelos se han diseñado para emitir sobre más de una línea, con la selección de cada línea realizada por accesorios ópticos selectores, estos LASER's generalmente emiten potencias más bajas en el infrarrojo que en el rojo.

Puesto que los LASER's visibles e infrarrojos son raros, las siguientes características se concentrarán sobre el LASER rojo de He-Ne. Generalmente, las características de las otras versiones visibles e infrarrojas son similares excepto para potencia y longitud de onda.

Longitud de Coherencia Los LASER's de He-Ne de producción en serie son dispositivos que tienen longitudes de coherencia de alrededor de 20 a 30 cm. Los LASER's de He-Ne de frecuencia única, como tienen anchos de banda espectrales mucho más estrechos, tienen longitudes de coherencia mucho más grandes, pero son considerablemente más caros.

Diámetro del Haz y Divergencia Los diámetros del haz de los LASER's de He-Ne de producción en masa con salida en el modo TEM₀₀ en el rango de los mW son de alrededor de 1 a 10 mm, incrementándose con la potencia de salida. La divergencia está sobre el orden de 1 milliradián (mrad). Los modelos cortos de baja potencia pueden tener haces de diámetro pequeño y divergencias más grandes -cerca de 0.34 mm y 2.4 mrad. Para modelos más grandes y de alta potencia, los diámetros del haz pueden alcanzar un par de mm, con una divergencia cercana a 0.5 mrad. Además un LASER multimodo(3), por ejemplo de 5 mW, puede tener un diámetro del haz de 2 mm y divergencia de 8 mrad.

Requerimientos de Operación

Potencia de Entrada La mayoría de los LASER's de He-Ne comerciales operan desde con 115V, con una opción estándar de 230V(8). El consumo de potencia es de alrededor de 20 W para un LASER de 1 mW a 400 W para una versión de 50 mW. Las versiones de baja potencia están también disponibles para operación con batería.

Los extremos del LASER y los tubos requieren de unos cuantos mA de c.d. a 1,500 o 2,000V. Los tubos requieren tener una impedancia de entrada de 45 a 75 k Ω para una operación apropiada y controlar los altos voltajes. Voltajes pico de alrededor de 10 kV se requieren para iniciar la descarga sobre el tubo LASER.

Condiciones de Operación Aunque la mayoría de los LASER's de He-Ne son para un laboratorio normal o para un ambiente industrial, éstos generalmente pueden soportar un rango más amplio de condiciones. Los LASER's de He-Ne estándar producidos en masa están estimados para temperaturas ambientes de operación de 0 a 40°C, o de -20°C a +50°C. Además están estimados para operar a altitudes de cerca de 3,000 m como máximo, y en humedades de 0 al 100%. Puesto que los LASER's de He-Ne son producidos en masa y usados bajo un amplio rango de condiciones, las hojas de datos de los LASER's de He-Ne proporcionan muchos más detalles de los rangos de operación que las hojas de datos de los otros tipos de LASER.

Algunos LASER's de He-Ne son robustecidos para su uso en condiciones hostiles, tales como en minas, campos de agricultura, y en la construcción. Estos LASER's generalmente son sellados para cubrir el polvo fuera de las extremidades y para minimizar el contacto con los altos voltajes.

Típicamente un LASER de He-Ne inicia a emitir luz en unos cuantos segundos después de que es encendido. Sin embargo puede tomar de 15 a 60 minutos para calentarse lo suficiente para dar el funcionamiento estimado. Los tiempos de calentamiento adecuados son particularmente críticos para los LASER's de frecuencia única(11), los cuales requieren de temperatura estable para una operación estable.

Seguridad Las reglas básicas para el uso de los LASER's de He-Ne son, evitar mirar fijamente el haz LASER aun con lentes de protección, así como evitar el contacto con los altos voltajes de excitación, que llegan a ser hasta de 10 kV en el arranque.

Las potencias LASER de unos cuantos milliwatts o menos están lejos de ser peligrosas. Sin embargo, la intensidad del haz LASER de He-Ne es comparable a la de la luz solar (aunque se extiende sobre un área mucho más pequeña). Puesto que la luz solar y un haz LASER están constituidos por rayos paralelos, éstos pueden lastimar la retina y de aquí el uso de lentes polarizadores para protección.

3.1.2 LASER's de Gases Nobles Ionizados

La etiqueta de LASER ionizado es uno de los nombres indefinidos que en el mundo del LASER se aplica específicamente a los LASER's en los que su medio activo es un gas raro ionizado. El argón, con fuertes líneas en el azul-verde y líneas más débiles en el ultravioleta y cercano infrarrojo, es el tipo comercialmente más importante. Los LASER's ionizados de criptón también se encuentran en el mercado, a pesar de su salida más débil, porque ellos ofrecen un rango más amplio de longitudes de onda visibles.

La principal atracción de los LASER's de argón y de criptón es su capacidad para producir una salida de onda continua de unos cuantos mW; a decenas de watts en el visible, y de unos cuantos watts en el ultravioleta. Los LASER's ionizados son muy caros, tienen tubos con tiempos de vida de operación limitados a el rango de 1,000 a 10,000 hrs., y son delicados.

El Medio Activo En un LASER ionizado, el medio activo es un gas raro del cual uno o más electrones han sido desalojados para formar un ion positivo. En los LASER's de argón y criptón, el gas puro es usado, con presiones normales de operación ligeramente abajo de 1 torr (133 Pa). Las transiciones LASER son entre

los niveles superiores de energía de los iones, con átomos ionizados simplemente emitiendo en el visible e infrarrojo, y átomos ionizados doblemente emitiendo en el cercano ultravioleta(12).

El miembro más común de los LASER's ionizados es el argón, el cual emite su línea más fuerte a 514.5 nm, que es la del argón ionizado simplemente (Ar II en la notación espectroscópica), siguiendo la de 488.0 nm. Otras varias líneas más débiles aparecen en la emisión no sintonizada de la emisión verde-azul del argón, o cuando el LASER es sintonizado específicamente para éstas longitudes de onda. Además hay líneas cercanas al ultravioleta del Ar III (Ar²⁺) y una línea cercana al infrarrojo de Ar⁺ (Ar II).

El criptón es un gas LASER menos eficiente y por lo tanto es usado con menor frecuencia. Sin embargo, tiene líneas en partes del espectro donde el argón no emite. Su línea más fuerte es la de 647.1 nm de Kr⁺ (ion individual) en el rojo, pero además hay líneas importantes en el verde y en el amarillo, inalcanzables por otras fuentes, así como en el rojo y el azul. El Kr⁺ también tiene dos líneas en la región de 800 nm, que propiamente se consideran del cercano infrarrojo, aunque son débilmente visibles por el ojo humano, el Kr²⁺ (ion doble) tiene dos líneas en el cercano ultravioleta.

Transferencia de Energía Los LASER's ionizados son excitados por una descarga de alta corriente que pasa a lo largo de la longitud del tubo LASER y es concentrada en el diámetro interior o en el centro del tubo. Un resalto inicial de unos cuantos miles de volts separa a el gas (ioniza), entonces el voltaje baja entre cerca de 90 y 400 V y la corriente de descarga salta de 10 a 70 A. Las densidades de alta corriente en el centro del tubo ionizan al gas y también proporciona la energía que excita a los iones a sus niveles superiores de energía. La emisión estimulada lleva a los iones excitados a el nivel LASER más bajo (ésta es la transición LASER), del cual caen rápidamente a el estado base o fundamental, en esta operación se emite luz en el extremo violeta.

Configuración y Longitud de la Cavity Los LASER's ionizados compactos enfriados por aire pueden tener cavidades tan cortas como unos 25 cm, los modelos de alta potencia tienen cavidades de cerca de 2 m de longitud. Los modelos para uso industrial generalmente tienen una pequeña cámara extra dentro de la cavity, pero aquellos para aplicaciones de laboratorio típicamente dejan algún espacio entre el tubo LASER y los componentes ópticos de la cavity para la inserción de un etalón selector de modo(11). Los selectores de modelocking sustituyen a el juego de prismas sintonizadores.

Disyuntivas Inherentes Los LASER's ionizados confrontan a usuarios y diseñadores con varias disyuntivas inherentes:

- Pureza espectral de la oscilación de longitud de onda única contra potencias más altas de una operación multilinea.
- Un rango más grande de longitudes de onda visibles del criptón contra una potencia más alta y un tiempo de vida más grande del argón.
- Un incremento en la potencia de salida generalmente es acompañado por un incremento en el precio, así como en la complejidad del LASER y un decremento en el tiempo de vida del tubo.
- La salida ultravioleta, más efectiva para algunas aplicaciones, aparecen solamente a costos más altos, una vida del tubo más corta, y una potencia de salida y eficiencia del tubo más bajas que las de la longitud de onda visibles.

Características del Haz

Potencia de Salida y Longitud de Onda La salida visible multilinea de los LASER's comerciales de argón está en el rango de algunos cuantos mW a cerca de 20 W. La baja eficiencia de los LASER's de criptón lo limita a bajas potencias, versiones comerciales pueden producir varios watts de salida visible multilinea, con la mayoría de la potencia sobre la línea roja de 647 nm. Las especificaciones están dadas para la salida TEM₀₀, la cual es estándar en los LASER's ionizados de alta potencia.

Ambos, argón y criptón pueden emitir en líneas individuales o grupos de líneas cerradamente espaciadas, así como en una oscilación simultánea en varias líneas. Las longitudes de onda disponibles de cualquier LASER en particular depende de los componentes ópticos de la cavidad, del diseño del tubo y del ajuste de cualquier elemento sintonizador de la longitud de onda usada en la cavidad LASER(4).

Longitud de Coherencia La longitud de coherencia de un LASER ionizado que emite sobre líneas múltiples es muy pequeña. Para la oscilación de línea única con un ancho de banda típico de 6 GHz, la longitud de coherencia es cerca de 50 mm. El uso de un etalón, que limite la oscilación a un modo único longitudinal, puede extender la longitud de coherencia a decenas de metros o más.

Diámetro del Haz y Divergencia Valores típicos del diámetro del haz y de la divergencia de los LASER's ionizados son de 0.6 a 2 mm y de 0.4 a 1.2 mrad, respectivamente, variando un poco entre los modelos. Ambos diámetros del haz y divergencia son ligeramente más grandes para los LASER's de criptón que emiten en el rojo que para los LASER's de argón de azul-verde.

Requerimientos de Operación

Potencia de Entrada Los requerimientos eléctricos de entrada para los LASER's ionizados son del rango de corriente unifásica de 10 a 15 A, a 120 V, y de 60 a 70 A de corriente trifásica, a 460 V, con los requerimientos de entrada

incrementándose con la potencia de salida. Un LASER de argón con salida multimodo de 3 a 5 W típicamente necesitará una potencia de entrada de 8 a 26 kW. Una potencia de entrada similar generará cerca de 0.75 W de salida multilinea de criptón. Hasta 26 kW de potencia de entrada se requiere para generar 0.4 W en el ultravioleta del argón o para generar 0.15 W de ultravioleta del criptón(11).

La descarga es disparada por un voltaje pico de unos cuantos miles de volts. La corriente entonces se incrementa rápidamente de 10 a 70 A, concentrada en el diámetro interno del tubo, mientras que el voltaje cae a un valor estable de 90 a 400 V, dependiendo de la longitud del tubo. La emisión de luz es aproximadamente proporcional a el cuadrado de la densidad de corriente, y por lo tanto se incrementa más rápido que la potencia eléctrica de entrada.

Condiciones de Operación y de Temperatura El calentamiento de los LASER's ionizados se requiere para establecer una descarga estable de corriente dentro del tubo y alcanzar temperaturas propias para una potencia de salida estable, una longitud de onda adecuada y mejor direccionabilidad del haz(11). Los modelos para aplicaciones científicas necesitan de una estabilidad de operación después de cerca de 2 horas de tiempo de calentamiento, aunque otros modelos destinados para los mismos usos funcionan en intervalos de calentamiento más cortos. Sin embargo, los modelos destinados para aplicaciones industriales tienen tiempos de calentamiento de segundos o minutos.

Seguridad Los usuarios deben tener cuidado de no exponerse directamente a el haz, particularmente el ojo. Hay lentes de seguridad disponibles en el mercado, los cuales atenúan fuertemente las líneas azul-verde del argón, así como las líneas visibles multilinea del criptón. Sin embargo, el haz de divergencia estrecha del argón y las varias líneas del criptón no son atenuadas del todo y pueden penetrar en el globo del ojo y si se mira fijamente el haz se puede afectar la retina.

Como otros LASER's de excitación de descarga, los LASER's ionizados requieren de altos voltajes, pero sólo para iniciar el accionamiento del LASER. Después la descarga es estable, el voltaje cae al nivel de entre 400 y 90 volts, con corrientes de 10 amperes o más, fluyendo a través del tubo. Los peligros presentados por tales niveles de corriente tienen que ser controlados al máximo, mediante un gabinete protector que reduzca el contacto con el usuario.

3.1.3 LASER's de Bióxido de Carbono (CO₂)

El LASER de CO₂ es uno de los LASER's más versátiles existentes en el mercado hoy en día. Emite radiación infrarroja entre 9 y 11 μ m, cada uno en una línea única seleccionada por el usuario o sobre las líneas más fuertes en cavidades

insintonizables. Pueden producir potencias de salida desde abajo de 1 W para aplicaciones científicas a centenas de kW para usos industriales, por esto último es el LASER más común para usos industriales(7). Pueden generar pulsos con duración de nanosegundos a milisegundos.

La versatilidad se debe a que el usuario puede encontrar distintos tipos, tales como los LASER's de CO₂, de tubo sellado, de flujo axial, de flujo transversal, de gas dinámico, de guía de onda y TEA.

Funcionamiento Interno El medio activo en un LASER de CO₂ es una mezcla de bióxido de carbono, nitrógeno y (generalmente) helio. Cada gas realiza una función distinta.

El CO₂ es el emisor de luz. Las moléculas de CO₂ primero son excitadas. Las moléculas después pierden parte de la energía de excitación por medio de la caída a uno de los otros dos estados vibracionales de más baja energía. Estas dos trayectorias de caída son las dos transiciones LASER principales: una transición con la emisión de un fotón de 10.6 μm -la cual es la más usada en aplicaciones industriales-, o una transición con la emisión de un fotón de 9.6 μm . Una vez que las moléculas hayan emitido sus fotones LASER, continúan con su trayectoria descendente de niveles de energía hasta que alcanzan su estado fundamental o base.

Las moléculas de nitrógeno (N₂) ayudan a excitar a las de CO₂ a su nivel superior. Las moléculas de N₂ absorben energía y la transfieren a las moléculas de CO₂, de este modo se excitan estas últimas a su nivel LASER superior.

Las moléculas de CO₂ también pueden alcanzar el nivel LASER superior mediante otros caminos. Éstas directamente pueden absorber energía de electrones que se insertan dentro del gas mediante una descarga de un haz de electrones. Una manera alternativa para producir la inversión de población requerida para la operación LASER, es expandir el gas LASER caliente y de alta presión dentro de un cuasi-vacío frío; éste es el principio básico primitivo del LASER de CO₂ de gas dinámico. En la práctica, la presencia de moléculas de N₂ mejoran significativamente la operación LASER, y por lo tanto el nitrógeno está casi siempre presente en los LASER's de CO₂.

La presión y composición óptimas para el gas en un LASER de CO₂ varía mucho con el diseño del LASER. En un LASER típico de CO₂ de flujo de gas, la presión total es de cerca de 15 torr (2,000 Pa), con 10% del gas de CO₂, 10% de N₂, y al resto de helio. En general, las concentraciones de N₂ y de CO₂ son semejantes, pero mucho más bajas que las concentraciones de helio. Las presiones bajas se necesitan para la operación continua, pero los LASER's de CO₂ pulsados pueden operarse a presiones muy cercanas a 1 atm.

En algunos casos, otros gases pueden agregarse a la mezcla LASER. Por ejemplo, el hidrógeno o el agua pueden agregarse a el gas en un tubo sellado para adelantar la regeneración de las moléculas de CO_2 durante la operación LASER, y algunas veces monóxido de carbono es agregado por razones similares(11). Es posible operar LASER's pulsados con una mezcla de 50:50 de aire y CO_2 , a pesar de una potencia reducida de salida.

Estructura Interna La clasificación de los LASER's de CO_2 en varios tipos se basa en su estructura interna. Hay varios parámetros claves involucrados, incluyendo la presión del gas, el flujo del gas, tipo de la cavidad LASER y método de excitación. Varias combinaciones diferentes se han investigado en el laboratorio(11), pero sólo unas cuantas han encontrado usos prácticos, a saber:

LASER's de tubo sellado Un LASER de gas sellado parece simple de operar: sólo es rellenar el tubo con la mezcla apropiada de gas, sellarlo y encenderlo. En la práctica, no es tan fácil, puesto que la descarga eléctrica que excita al gas separa a la molécula de CO_2 . Por lo tanto, un LASER de CO_2 sellado con una mezcla ordinaria de gas dejaría de operar en unos cuantos minutos, después de que el CO_2 se haya convertido a monóxido de carbono.

Una solución a esta problema es agregar hidrógeno o agua a la mezcla de gas, de manera que puedan reaccionar con el monóxido de carbono, producido por la descarga de excitación, y se pueda regenerar el CO_2 . Alternativamente, un cátodo de níquel a 300°C puede actuar como un catalizador para estimular la recombinación. Tales medidas hacen posible producir LASER's sellados de CO_2 que puedan operar por miles de horas, antes de que se degrade seriamente su rendimiento.

Las potencias de salida de los LASER's sellados de CO_2 están limitadas a cientos de watts por un par de problemas. Una es que la potencia de salida inherentemente está limitada a sólo 50 W por metro de longitud de tubo. La otra es la dificultad de enfriar propiamente al tubo LASER sin flujo de gas.

LASER's de flujo longitudinal (o axial) de gas La manera obvia de solucionar los problemas del LASER sellado de CO_2 es hacer fluir el gas a través del tubo LASER, como se muestra en la figura 3.1. La manera más antigua es hacer pasar al gas a través de la longitud del tubo LASER, de aquí el origen del nombre. Generalmente la descarga que excita el gas, también se aplica a lo largo del eje axial del tubo. La presión del gas es baja, y el consumo de gas puede reducirse por las opciones de reciclaje.

Los LASER's de flujo axial de CO_2 producen salidas de onda continua, que son proporcionales a la longitud del tubo. Generalmente la salida está limitada de 40 a 80 W/m. El haz LASER puede plegarse o doblarse con espejos a través de múltiples segmentos de tubo, evitando el requerimiento de dispositivos de

grandes dimensiones, y el diseño es lo suficientemente fácil y práctico que aun se ocupa en los LASER's de CO₂ de potencias menores a un par de kilowatts. Las potencias más altas no se pueden obtener con los dos LASER's anteriores, ya que para una salida de 8.8 kW se requiere de un tubo de 250 m de longitud.

LASER's de flujo transversal Potencias mucho más altas, del orden de 10 kW por metro de longitud de tubo de medio activo, se pueden obtener si el gas fluye en una dirección perpendicular a el eje axial de la cavidad LASER, como se muestra en la figura 3.1. La descarga eléctrica que active el LASER también se aplica transversalmente al eje axial del LASER y es perpendicular a el flujo de gas. El gas fluye mucho más rápido que en un LASER de flujo axial, eliminando rápidamente excesos de calor y productos de la disociación. El gas generalmente es reciclado cuando pasa a través de un sistema de regeneración de CO₂ y agrega algo de gas nuevo a la mezcla. La longitud de la cavidad de los LASER's de flujo transversal, es comparativamente corta y puede traer problemas en la calidad del haz.

El diseño de flujo transversal es estándar en la mayoría de los LASER's comerciales de CO₂ multikilowatts. La aerodinámica juega un papel importante en el funcionamiento. Los LASER's de flujo transversal de CO₂ se ofrecen comercialmente hasta de 15 kW.

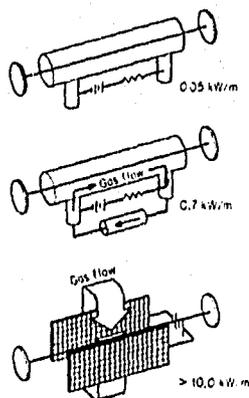


Figura 3.1. Estructuras de (a) LASER de CO₂ de descarga-sellada, (b) LASER de flujo axial y (c) LASER de flujo transversal. Los números son potencia de salida por metro de longitud de tubo.

LASER's de gas dinámico El flujo transversal también se usa en otro tipo de LASER de CO₂ de alta potencia, el LASER de gas dinámico. En el LASER de gas dinámico, la energía de excitación proviene del calor aplicado a el gas LASER, el cual inicialmente está a una presión de varias atmósferas. El calor y algunos de los componentes del gas LASER pueden provenir de la combustión de combustibles de hidrocarburo. El gas caliente después se expande a través de una boquilla dentro de una cámara de baja presión. El rápido enfriamiento del gas

en libre movimiento, produce una inversión de población. Un haz LASER se extrae del gas colocando un par de espejos en lados opuestos de la cámara de expansión.

Los LASER's de gas dinámico pueden alcanzar niveles de potencia de 100 kW o más. Por lo que básicamente tienen aplicaciones militares. Debido a su alta potencia y estructura compleja, este tipo de LASER de CO₂ no es de uso comercial.

LASER's de guía de onda Si el diámetro interno de un tubo LASER de CO₂ se disminuye a un par de milímetros y además el tubo es construido en la forma de una guía de onda dieléctrica, el resultado es un LASER de *guía de onda*. El diseño de guía de onda limita las pérdidas de difracción que de otra manera dañarían la operación del LASER de tubo estrecho. El gas puede excitarse por una descarga eléctrica o por un intenso campo de radio-frecuencia que pueda pasar a través del material dieléctrico de guía de onda y por lo tanto elimina la necesidad de introducir un metal en la estructura de guía de onda. El LASER de guía de onda es muy atractivo para potencias del más bajo rango de los LASER's de CO₂, que va desde 1 W a cerca de 50 W. Proporciona una buena calidad de haz, un haz de onda continua y una gran rapidez de sintonización de varias líneas discretas del espectro del CO₂. La ventaja más sobresaliente es su pequeño tamaño, si se compara con el de He-Ne.

LASER's TEA La inestabilidad de descarga hace de la operación de onda continua de un LASER de CO₂ transversalmente excitado algo no práctico, cuando el gas está a presiones de cerca de 100 torr (13.3 MPa). Sin embargo, a esta presión es posible producir pulsos de duración de nanosegundos a microsegundos. Tales LASER's son llamados *transversely excited atmospheric (TEA)*, puesto que operan en o cerca de la presión atmosférica, aunque algunas veces el término es aplicado a LASER's de CO₂ transversalmente excitados a presiones más altas o más bajas de la atmosférica.

Las principales atracciones de los LASER's TEA son la generación de pulsos intensos y cortos, y la extracción de alta potencia por unidad de volumen de gas LASER. La operación con alta presión además ensancha las líneas de emisión LASER, permitiendo el uso de técnicas de *modelocked* para generar pulsos con duración de hasta 1 nanosegundo. A presiones de cerca de 10 atm, el ensanchamiento es lo suficiente para permitir una sintonización casi continua sobre la mayoría del rango de las longitudes de onda de emisión del CO₂.

Disyuntivas Inherentes Además de las disyuntivas usuales encontradas en la mayoría de los LASER's, hay unas cuantas especificaciones para los LASER's de CO₂.

- Las altas potencias están disponibles solamente sólo en ciertas longitudes de onda, donde las transiciones LASER son más fuertes. Otras transiciones en la región de emisión LASER tienen una potencia más baja. Generalmente las potencias más altas se obtienen de cavidades que no procuran seleccionar una longitud de onda específica; la emisión de tales LASER's normalmente es dominada por las longitudes de onda de transiciones más fuertes.
- En LASER's TEA, generalmente lo más rápido de la repetición de pulsos, lo más bajo de la energía y la potencia pico por pulso, se presentan cuando se opera casi en su valor máximo. La potencia promedio usualmente decrece por encima de cierta razón de repetición.
- En varios LASER's de CO₂, la longitud de la cavidad se incrementa con la potencia pico.

Características del Haz

Longitud de Onda y Potencia de Salida La longitud de onda nominal de operación del LASER de CO₂ usualmente son las de 10 μm , 10.6 μm , o de 9 a 11 μm . El espectro de emisión actual es complejo(4). El LASER de CO₂ tiene dos transiciones vibracionales principales, a 9.6 y 10.6 μm . Varias transiciones rotacionales cerradamente espaciadas están superpuestas sobre las transiciones vibracionales, produciendo un total de 100 líneas posibles de emisión distinta(11).

Una rejilla de difracción u otros elementos de sintonización pueden ponerse dentro de la cavidad LASER para seleccionar una línea única del espectro del CO₂, o el LASER puede operar no sintonizado, emitiendo una potencia total más alta sobre líneas múltiples. La salida de línea única no está disponible o no es requerida por los LASER's de uso industrial, pero está disponible para LASER's de onda continua de más baja potencia y para modelos TEA.

La máxima salida (típicamente medida en operación multilínea) depende del tipo de LASER de CO₂. Los modelos de guía de onda pueden producir una salida de onda continua hasta cerca de 50 W, mientras que los LASER's comerciales de CO₂ de tubo sellado pueden alcanzar cerca de 100 W. Los LASER's de flujo axial de CO₂ pueden alcanzar el rango de los kW, mientras que los de flujo transversal también pueden producir varios kW. (Los LASER's de gas dinámico también operan en el rango de los kW, pero no están disponibles comercialmente.) Las potencias promedio de los LASER's TEA alcanzan hasta unos cuantos cientos de watts.

Longitud de Coherencia La longitud de coherencia generalmente no importa para la mayoría de las aplicaciones de los LASER's de CO₂. El ancho de banda de la amplia emisión de los LASER's multilínea traen como consecuencia una longitud de coherencia muy corta. Los LASER's de CO₂ de línea única tienen longitudes de coherencia del orden de 1 m, o más grandes si se usan accesorios de estrechamiento.

Diámetro del Haz y Divergencia La forma y la longitud de la cavidad LASER, y la naturaleza de los accesorios ópticos del resonador determinan el diámetro del haz y divergencia. De esta manera estas cantidades difieren entre los tipos de LASER's de CO₂. Típicamente los rangos son:

- Flujo de gas axial: 5 a 7 mm de diámetro, 1 a 3 mrad de divergencia
- Tubo sellado: 3 a 4 mm de diámetro, 1 a 2 mrad de divergencia
- TEA: 5 a 10 mm de diámetro, 0.5 a 10 mrad de divergencia
- Guía de onda: 1 a 2 mm de diámetro, 8 a 10 mrad de divergencia

En general, excepto para los LASER's de guía de onda, el diámetro del haz y divergencia en la operación de modo único son de 20 a 50% de los valores de salida multimodo. Algunos tubos LASER con diámetro grande producen haces con secciones transversales ovaladas.

Requerimientos de Operación

Potencia de Entrada Los LASER's de CO₂ pueden conectarse al enchufe ordinario de energía eléctrica; los más grandes consumen inmensas cantidades de potencia. Todos los LASER's de CO₂ requieren de altos voltajes -de c.d. o de c.a.- los cuales necesitan ser generados por suministros normales de corriente y aplicados al gas LASER. Los requerimientos típicos dependen del tipo de LASER de CO₂.

Los LASER's de guía de onda generalmente absorben de 2 a 3 A de una fuente de 110 V_{ac}. En los LASER's de guía de onda accionados con descargas eléctricas, la energía de entrada llega a ser de una corriente de unos cuantos mA con cerca de 15kV. Los LASER's de CO₂ de sellado externo de diseño convencional requieren de un poco de potencia más alta para producir una salida similar. Algunos modelos requieren de corrientes de c.d. de 6 a 10 mA y voltajes de 8 a 20 kV para producir salidas de 1 a 18 W.

Los LASER's de flujo de gas de onda continua requieren de un suministro de energía eléctrica de 10 a 20 veces más que su potencia de salida óptica, y pueden requerir de potencia extra de arranque. Algunos modelos pueden operar con suministros de 110 V trifásicos, pero las versiones grandes requieren de 440 V trifásicos(7). Un LASER de 1.2 W, por ejemplo, requiere de una potencia de 22 kVA de un suministro de 440 V, la cual se reduce a 15 kVA después del arranque.

Los LASER's TEA tienen requerimientos de potencia moderadamente complejos por la naturaleza de su operación pulsada. Generalmente, algo de energía en forma de electrones o fotones ultravioleta se descarga dentro del gas LASER, ligeramente antes del pulso principal para obtener una potencia de salida más alta. Los requerimientos de corriente de umbral para el suministro de potencia son del rango de un par de amperes con 110 V, a 50 A con 220 V trifásicos.

Condiciones de Operación Los LASER's de CO₂ están diseñados para operar a temperatura ambiente y pueden funcionar bien en ambientes normalmente limpios. Varios modelos son exclusivos de uso industrial. La suciedad y vibraciones extremas de las fábricas han causado problemas en algunos casos, y medidas de protección como filtros de aire pueden necesitarse para tales ambientes de trabajo.

Enfriamiento El enfriamiento de aire forzado se usa en algunos pequeños LASER's de CO₂. Los LASER's de potencia más alta requieren de enfriamiento con agua y los dispositivos más grandes tienen sofisticados sistemas de enfriamiento multiciclo(11). Los requerimientos de flujo de agua son de 2 L/min para un LASER de flujo axial de 150 W y superior a 40 L/min para un modelo de 1.2 kW

Seguridad Hay dos peligros importantes con los LASER's de CO₂: los altos voltajes de excitación y el haz LASER.

Las decenas de kilovolts requeridas para operar el LASER de CO₂ son por mucho el peligro más mortal. En sistemas LASER completos, estos voltajes generalmente están accesibles solamente dentro del gabinete del dispositivo LASER, pero en otros casos (como cuando una fuente de alto voltaje extra se requiere) puede haber conexiones externas.

El haz de salida de las versiones de alta potencia -del rango de watts a kilowatts puede, en el mejor de los casos, lastimar la piel y los ojos, pero casi siempre es mortal, por lo que su manejo es exclusivo para personas autorizadas en el uso de LASER's de CO₂.

3.2 LASER's de Estado Sólido

3.2.1 LASER's de Rubí

El rubí emite a 694.3 nm en el rojo profundo cuando la vara del material es excitada ópticamente por una lámpara incoherente. Los modelos comerciales operan en modo pulsado con excitación de lámpara de destello-flash, a causa del alto valor de umbral LASER y de las características térmicas del material. La operación de onda continua ha sido demostrada en el laboratorio, pero esencialmente no hay demanda práctica de LASER's continuos de rubí.

El rubí fue el primer LASER usado en trabajos prácticos, excepto para ciertas aplicaciones especiales donde ha sido ampliamente reemplazado por otros tipos. Sin embargo, el rubí permanece como una fuente valiosa de pulsos de alto poder

de luz visible coherente y es ampliamente usado en holografía pulsada, interferometría, pruebas no destructivas y mediciones de plasma(2).

El Medio Activo El medio activo en un LASER de rubí es una vara de rubí sintético, un cristal de zafiro en el cual una cantidad pequeña de cromo ha sido agregada durante el desarrollo de una disolución de óxido de aluminio (Al_2O_3). El cromo, con la misma valencia +3 como la del aluminio, toma el lugar de algo del aluminio en el cristal. La concentración de cromo generalmente está en el rango de 0.01 a 0.5%, lo cual corresponde al orden de 10^{19} átomos por cm^3 , suficiente para colorear de rojo o rosa la vara(11). Las varas de rubí están disponibles en diámetros de 3 a 25 mm y longitudes de cerca de 20 cm. El rubí es resistente a el daño óptico a niveles de potencia normales si la superficie se mantiene limpia.

La luz en la longitud de onda LASER es fuertemente absorbida por si misma en los sistemas de rubí de tres niveles. Este efecto ocurre en partes inexcitadas de la vara de rubí, por lo que es importante iluminar tanto de la vara como sea posible con la luz de excitación(5).

Transferencia de Energía Los fotones de longitud de onda visible de la lámpara de excitación elevan a los iones de cromo a uno de sus dos niveles excitados. Los iones caen con un tiempo de cerca de 10 ns a un par de niveles metaestables, cada uno con tiempo de vida a temperatura ambiente de milisegundos. Ambos niveles metaestables pueden servir como el nivel superior de una transición LASER, pero si la emisión es permitida en ambas líneas, la transición del nivel metaestable inferior, que es la de 694.3 nm de más baja energía, dominará. Esto ocurre porque el nivel metaestable superior, de más alta energía, está unido a el nivel metaestable inferior por una caída no radiactiva de tiempo de vida de 1 ns. Las altas energías de excitación óptica se necesitan para invertir la población de los iones de cromo porque el estado fundamental es el nivel LASER más bajo en el sistema de tres niveles. Esto trae como consecuencia un valor de umbral LASER alto y una eficiencia limitada, porque el número de iones de cromo en el estado metaestable necesita exceder a el número de iones en el estado fundamental para que la acción LASER pueda ocurrir. La ganancia y la eficiencia, por ejemplo, pueden ser más bajas en el rubí que en el LASER de cuatro niveles de neodimio, pero la energía almacenada en el rubí es más alta, permitiendo la producción de pulsos de Q-switching de más alta energía.

El exceso de energía de excitación permanece en la vara como calor, el cual necesita ser eliminado, porque la ganancia LASER disminuye con la temperatura, y porque el calor puede causar cristalización en la vara LASER, lo que degrada la calidad del haz.

Estructura y Longitud de la Cavity Como en otros LASER's de estado sólido, un LASER de rubí tiene dos clases de cavidades: la cavity de bombeo, la cual

transmita la luz de excitación de una lámpara a la vara, y la cavidad resonante, en la cual la oscilación LASER ocurre.

Las cavidades de bombeo usadas por el rubí son del mismo tipo de las usadas por los LASER's de neodimio(11). A causa de los requerimientos de alta potencia de excitación, el acoplamiento de eficiencia y reflexión es más importante que en los LASER's de neodimio. De esta manera, algunas cavidades usan revestimientos de plata, porque estos ofrecen alta reflectividad a pesar de la necesidad de recubrimientos periódicos. Otros diseños pueden usar superficies cerámicas vidriadas con alta reflectividad difusiva y proporcionan más iluminación difusiva. A causa de la crucial importancia del enfriamiento, en varios casos el agua enfriadora puede fluir a través de la cavidad de acoplamiento, o fluye anularmente alrededor de la vara y de las lámparas lineales de destello-flash. Las lámparas helicoidales de destello-flash se usan en algunos modelos(4).

Los dos espejos en los extremos de la vara LASER usualmente forman un resonador estable. Las longitudes de la cavidad son del rango de la longitud de la vara o un poco más grandes, si los accesorios intracavitacionales(11), como los selectores de Q-switching, son usados. Varios LASER's comerciales de rubí están ensamblados sobre rieles ópticos o estructuras similares que permiten al usuario ajustar las posiciones de los elementos ópticos de la cavidad, estas estructuras generalmente son de 1 a 2.5 m de longitud(11).

El LASER de rubí puede operar en una configuración de oscilador-amplificador, en la cual un pulso de un oscilador de rubí pasa a través de una segunda vara de rubí que lo amplifica. Las versiones comerciales pueden incluir una o cuatro etapas de amplificación. Esta configuración de oscilador-amplificador generalmente es la mejor vía para producir pulsos de alta energía y buena calidad del haz.

Características del Haz

Longitud de Onda y Potencia de Salida La longitud de onda del LASER de rubí es de 694.3 nm. Los osciladores pueden producir pulsos de Q-switching fijos con duración de ms con energía de 50 a 100 J por pulso, mientras que las configuraciones de oscilador-amplificador pueden generar muy bien los 100 J. Estas altas energías son para salidas en modos transversales múltiples; si la emisión es de Q-switched o limitada al modo TEM₀₀, la energía es mucho más baja. Las potencias promedio están limitadas por la baja repetición de los pulsos - no más que 1 Hz, excepto para las varas muy pequeñas, y a menudo sólo unos disparos por minuto. El máximo nivel de potencia promedio es de alrededor de 100 W para un oscilador de vara única, y requiere de enfriamiento con agua de flujo rápido.

Los LASER's de rubí normalmente operan en uno de los tres modos de pulso: pulso largo (frecuentemente llamado "normal" o "convencional"), Q-switched, o modelocking.

En el pulso normal, el pulso dura de 0.3 segundos a unos cuantos milisegundos, con potencias promedio no más de unas cuantas decenas de kW. En el Q-switched, el pulso dura de 10 a 35 ns y puede alcanzar hasta 100 MW de potencia pico. Por último en el modelocked, los LASER's de rubí pueden producir un tren de 20 a 30 pulsos, cada uno tan corto como de 3 a 4 picosegundos. Cada pulso tiene una energía de alrededor de 1 mJ, pero la potencia pico durante su breve duración puede alcanzar cientos de megawatts.

Longitud de Coherencia Los LASER's de rubí holográficos pueden tener longitudes de coherencia de 10 cm a 10 m. Los modelos de alta energía diseñados para otras aplicaciones tienen longitudes de coherencia más cortas.

Diámetro del Haz y Divergencia Los LASER's comerciales de rubí tienen diámetros de haz de 1 a 25 mm, y divergencias de 0.25 a 7 mrad.

Requerimientos de Operación

Potencia de Entrada Los LASER's de rubí generalmente operan con 110 V_{ac} unifásicos, pero algunos trabajan con suministros de 220 V_{ac}. Las corrientes de línea pico de 10 a 20 A pueden conseguir que se inicie a cargar el banco de capacitores, el cual descarga de 5 a 10 kilovolts a través de las lámparas de destello-flash. Una vez que el banco de capacitores es cargado, corrientes de línea mucho más bajas pueden mantener la carga.

Si una unidad de refrigeración separada es usada para enfriar el LASER, sus requerimientos de operación son similares a aquellos de un LASER de rubí de potencia moderada de alrededor de una docena de amperes con 110 V.

Condiciones de Operación Los LASER's de rubí están contruidos para funcionar en laboratorio o en ambientes industriales. La estabilidad es importante en la operación de LASER's holográficos, por la buena calidad del haz requerida para producir hologramas de alta resolución(8). La limpieza es importante en aplicaciones donde los haces se encuentren enfocados para densidades de alta potencia sobre superficies ópticas, porque la absorción de energía a causa de la suciedad puede causar el daño de la superficie. El buen control de la temperatura de la vara LASER es importante por la disminución de la ganancia del rubí con el incremento de la temperatura.

Seguridad Los LASER's de rubí son un serio peligro a el ojo, porque sus pulsos de alta potencia pueden penetrar el ojo y causar daños permanentes en la retina. Un sólo pulso puede dañar permanentemente el ojo(11).

Los voltajes de 5 a 10 kV aplicados a través de las lámparas de destello-flash están acompañados de corrientes lo suficientemente grandes para electrocutar a una persona. Las lámparas de destello-flash pueden estallar si la excitación va mas allá de su potencia estimada de entrada, pero una cavidad sellada de bombeo contendrá cualquier explosión.

3.2.2 LASER's de Neodimio (Nd)

El LASER de neodimio (Nd) es el miembro más común de una familia generalmente agrupada como LASER's de estado sólido, un término que en el mundo del LASER no incluye a los dispositivos semiconductores(4). Cualitativamente, los LASER's de Nd operan muy parecido a los de rubí y otros tipos de estado sólido. Los átomos presentes en concentraciones de impurezas - aproximadamente 1% - en un material *anfitrión* cristalino o de vidrio son excitados ópticamente por luz de una fuente externa, produciendo una inversión de población en el material de la vara LASER. La vara está montada en una cavidad óptica la cual proporciona la realimentación óptica requerida para la acción LASER.

Los LASER's de Nd realmente son una familia mas que un tipo único de dispositivo. El Nd puede incorporarse dentro de varios materiales anfitriones, éstos pueden ser cristales sintéticos o vidrios de diferentes composiciones. Los accesorios ópticos pueden cambiar la longitud de onda de salida desde el cercano infrarrojo, dentro del visible o el ultravioleta(11).

El Medio Activo Estrictamente hablando, el medio activo en un LASER de Nd, es neodimio triplemente ionizado, el cual es incorporado dentro de una estructura cristalina o de vidrio. En un cristal, el Nd esencialmente es una impureza, que toma el lugar de otro elemento con aproximadamente el mismo tamaño de ion (con frecuencia el del itrio, otro elemento raro de tierra). En vidrios y los anfitriones cristalinos comunes, el dopaje típico de Nd es de cerca de 1% por peso, dando una concentración de 10^{20} átomos por cm^3 , que es generalmente lo mejor para la acción LASER.

Por mucho, el anfitrión más común para los LASER's de Nd, es el granate de itrio aluminio, un cristal sintético con una estructura parecida al granate y por la fórmula química, $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, es conocido en el mundo LASER por el acrónimo YAG. El YAG es un material duro y quebradizo, pero tiene propiedades ópticas, mecánicas y térmicas deseables. Aunque no es un medio activo ideal, es el de mejor disposición para varios LASER's prácticos de Nd. Sus ventajas más importantes son sus características térmicas, las cuales permiten a un LASER de Nd-YAG producir un haz continuo de buena calidad.

Los problemas en el desarrollo del cristal limitan la longitud máxima de la vara de YAG sobre el orden de 10 cm para la mayoría de las aplicaciones prácticas. Las varas de YAG generalmente son de 6 a 9 mm de diámetro.

El vidrio puede estar hecho en bloques mucho más grandes y es lo mejor para discos, placas o varas de material LASER que necesiten ser más grandes que las varas de YAG estándar para proporcionar una potencia de salida y energía más altas(11). Las varas de vidrio tan largas como 46 cm se usan en algunos LASER's comerciales para el tratamiento de materiales. El tamaño más grande y el área de la superficie de algunos diseños pueden compensar algunos problemas térmicos, pero la repetición de los pulsos de los LASER's grandes de vidrio necesitan permanecer más abajo de los niveles del YAG para prevenir efectos nocivos, frecuentemente manifestados en una degradación del haz a causa de las pendientes térmicas en el material LASER(12).

Transferencia de Energía En los LASER's comerciales de Nd, la fuente de luz es una lámpara de tungsteno o de arco resplandeciente continuamente, o una lámpara de destello-flash que produce pulsos de luz. Las lámparas helicoidales usadas en los primeros LASER's han sido reemplazadas ampliamente por las lámparas lineales. Una o más de tales lámparas de excitación están alojadas en una cavidad reflectiva hueca diseñada para transferir la luz de excitación a la vara LASER. Varias configuraciones de cavidades son posibles. Una forma es colocar la lámpara lineal junto a la vara LASER en una configuración de "acoplamiento cerrado". Otra forma es colocar la lámpara y la vara LASER en dos focos de una elipse y dejar que las propiedades geométricas de la cavidad elíptica transmitan eficientemente la luz de excitación de la lámpara a la vara. Dos lámparas y una vara pueden colocarse dentro de una cavidad elíptica dual, la cual en sección transversal se ve como dos elipses cubiertas parcialmente con la vara distribuida en el foco de éstas.

Las lámparas continuas se usan para excitar LASER's de salida continua y varios LASER's de Nd pulsados con baja o moderada potencia de salida. Donde potencias pico más altas se requieran, la excitación es con lámparas de destello-flash, las cuales pueden generar luz más intensa, pero requieren de suministros pulsados de potencia eléctrica más complejos. Algunas ineficiencias son inherentes a la energía almacenada y equipo de transmisión requeridos para generar pulsos de alto voltaje de las lámparas de destello-flash.

Las lámparas de excitación emiten un espectro amplio de luz, pero los iones de Nd -ya sea en YAG, vidrios u otros anfitriones- se inclinan a absorber más fuerte en un rango limitado de longitudes de onda de excitación de alrededor de 0.7 a 0.8 μm . Los fotones de esta longitud de onda elevan los iones de Nd desde el estado base a el nivel más alto de energía, del cual caen a un nivel metaestable, produciendo una inversión de población. De este nivel caen por un proceso no radiactivo rápido a el estado base. De esta manera el Nd es un sistema LASER de

cuatro niveles y es, como la teoría predice(Capítulo 2), un material LASER más eficiente que el sistema de rubí de tres niveles. La emisión más fuerte es a 1.06 μm , aunque las divisiones entre los niveles de energía permiten emisiones más débiles de otras líneas. La actual cinética de los niveles de energía es compleja(3).

Estructura Interna Con frecuencia un espacio es dejado entre la vara LASER y los espejos de la cavidad para permitir que los accesorios se inserten en la cavidad LASER, para utilizar las altas potencias disponibles de éstos. La cavidad que contiene las lámparas de excitación está diseñada para transmitir eficientemente la luz de las lámparas de excitación a la vara LASER. Las varas de YAG son bastante pequeñas, usualmente de 6 a 9 mm de diámetro y de cerca de 10 cm de longitud, de manera que la cavidad puede ser considerablemente pequeña en sistemas portátiles.

Disyuntivas Inherentes La mayor de las disyuntivas inherentes con los LASER's de Nd se trata de la potencia de salida. La potencia pico en un pulso emitido tiende a decrecer como la repetición de éste se incrementa más allá de ciertas repeticiones. En general, cuanto más alta sea la potencia pico, cuanto más grande sea el intervalo requerido entre pulsos, disipará exceso de calor, que causa entre otras cosas, distorsión de la vara y degrada la calidad del haz de salida.

La calidad del haz puede degradarse si el LASER opera a altos niveles de potencia o repeticiones grandes de pulso, también si los esfuerzos térmicos dentro de la vara LASER se disipan entre los pulsos. Los gradientes térmicos(11) pueden causar interrupciones en el haz.

Los efectos de saturación limitan la cantidad de energía que puede ser almacenada en y extraída de las varas LASER de Nd. Un resonador limitado a oscilar en sólo un único modo transversal extrae solamente una pequeña fracción de la energía de una vara normal, porque produce un haz de diámetro estrecho. Más potencia puede ser extraída en un haz multimodo(4), pero la calidad del haz es pobre.

Características del Haz

Potencia de Salida y Longitud de Onda La longitud de onda de los LASER's de Nd normalmente es de 1.06 μm . Éste es un buen valor de funcionamiento, pero hay tres factores que pueden causar diferencias, fluctuando de una longitud menor a mayor(11).

- Las interacciones entre el ion de Nd y el material anfitrión tienen un pequeño efecto sobre los niveles de energía y puede cambiar la longitud de onda por cerca de 1%.

- El Ion de Nd puede operar sobre transiciones débiles cercanas a la de $1.06 \mu\text{m}$, que normalmente son reprimidas por la emisión de la línea principal.
- La generación de armónicas puede multiplicar la frecuencia por un factor de 2, 3 o 4, así se divide la longitud de onda por el mismo factor, recorriendo la emisión dentro del visible o ultravioleta.

La longitud de onda de salida de los mayores materiales anfitriones de Nd son:

- Nd-YAG: $1.064 \mu\text{m}$
- Nd-YLF (fluoruro de litio): $1.053 \mu\text{m}$ polarizado, $1.047 \mu\text{m}$ no polarizado
- Nd-Vidrio de Silicato: $1.062 \mu\text{m}$
- Nd-Vidrio de Fosfato: $1.054 \mu\text{m}$

Un amplio rango de potencias de salida está disponible en los LASER's de YAG y de vidrio, dependiendo de la longitud de onda y configuración. Las potencias de salida de los LASER's continuos de YAG de $1.06 \mu\text{m}$ fluctúan de un décimo de watt a cientos de watts. Similares potencias promedio pueden obtenerse de los LASER's pulsados. La potencia pico durante un pulso puede ser mucho más alta, de decenas o cientos de kW, en un pulso "normal" que dura sobre 1 ms; hasta de cientos de miles de MW en un pulso Q-switched que tiene de 10 a 20 ns de duración.

Puesto que el vidrio puede hacerse en tamaños más grandes y tiene ganancias más bajas, los LASER's de vidrio pueden almacenar más energía que los de YAG y producir pulsos con más energía. De esta manera la potencia pico y la energía de los LASER's de vidrio pueden ser más altas que aquéllas del YAG.

Longitud de Coherencia La longitud de coherencia de los LASER's de Nd generalmente no es especificada en las hojas de datos. En la práctica, la salida de los LASER's de Nd:YAG es suficientemente coherente para aquellas aplicaciones donde se requiera luz coherente(4). Basados en su ancho de línea normal, en los LASER's de Nd:YAG puede estimarse que tienen longitud de coherencia alrededor de 1 cm, mientras que los LASER's de Nd:Vidrio tienen una longitud de coherencia estimada de 0.2 mm. Los componentes de estrechamiento de línea pueden extender grandemente la longitud de coherencia, una compañía ha especificado una longitud de coherencia de 4 m para un LASER científico que opera en un modo longitudinal único con un ancho espectral de sólo 33 MHz(4).

Diámetro del Haz y Divergencia La divergencia del haz de los LASER's de Nd puede alcanzar de una fracción de un mrad a cerca de 10 mrad. El diámetro del haz de los LASER's de YAG generalmente es de 1 a 10 mm. Los LASER's de vidrio, que pueden ser hechos con áreas de sección transversal más grandes, pueden producir haces con diámetros más grandes, particularmente de amplificadores de alta potencia. Los haces usualmente son circulares, aunque

algunos LASER's de vidrio tienen varas rectangulares, las cuales producen haces rectangulares(11).

Requerimientos de Operación

Potencia de Entrada Los LASER's pequeños de Nd pueden conectarse en un ordinario enchufe de energía eléctrica y absorber cerca de 500 W de un suministro de 117 V_{ac}. Los grandes modelos comerciales absorben decenas de kW trifásicos, de 220 V. Enfocadores milimétricos de baja potencia(4) basados en LASER's de YAG están diseñados para operar con una batería de 24 a 28 V.

Condiciones de Operación y Temperatura La mayoría de los LASER's de YAG y de vidrio están diseñados para la operación en condiciones normales de un laboratorio o de una fábrica. En todas estas aplicaciones la principal atención de cuidado, como evitar sobrecalentamientos, se concentra sobre las lámparas de excitación.

Seguridad Varios LASER's industriales diseñados para tratamientos de materiales están empaquetados de manera que separan cuidadosamente el haz LASER del operador. Aunque el ojo humano no puede ver la emisión de 1.06 μm del LASER de Nd:YAG, esta longitud de onda puede penetrar hasta el extremo del globo del ojo y causar daños en el ojo en la misma forma que la luz visible. Así, el usuario debe ocupar lentes de protección que puedan bloquear parte del espectro visible(11).

Las armónicas de los LASER's de Neodimio son cortas, intensos pulsos y también presentan serios problemas al ojo. La segunda armónica de 532 nm está en la región visible verde del espectro y puede penetrar el ojo de la misma manera que la longitud de onda fundamental. Aunque este haz visible le permite al usuario prevenir el contacto con él, también se requiere de lentes de seguridad que puedan bloquear parte del espectro visible. Los peligros de la tercera armónica de 355 nm y la cuarta armónica de 256 nm presentan diferentes peligros. Estas dos longitudes de onda ultravioleta pueden causar una quemadura sobre la piel como la del Sol, además de tener el riesgo de causar una ceguera temporal o definitiva.

Las lámparas de destello-flash usadas para excitar los LASER's de Nd tienen dos distintos peligros: altos voltajes en el suministro de potencia y las explosiones de las lámparas, si son pulsadas a niveles excesivos de potencia. Los LASER's son diseñados para minimizar los peligros de alto voltaje, pero la precaución siempre es necesaria.

3.3 LASER's Líquidos

3.3.1 El LASER de Colorante

Los LASER's de colorante orgánico han encontrado varias aplicaciones en la investigación científica a causa de su flexibilidad inusual. Su longitud de onda de salida puede sintonizarse desde el cercano ultravioleta a el cercano infrarrojo, el uso de cristales dobladores de frecuencia pueden extender la emisión más adentro del ultravioleta(2). Los LASER's de colorante pueden ajustarse para operar sobre un ancho de banda espectral extremadamente estrecho, produciendo luz ultrapura para estudio de las propiedades ópticas de los materiales en regiones de longitud de onda muy estrechas. Éstos también pueden producir pulsos ultracortos, con duraciones mucho más pequeñas que 1 ps.

El Medio Activo El medio activo en un LASER colorante es un compuesto (un colorante) orgánico fluorescente disuelto en un solvente líquido. La iluminación intensa por parte de una fuente externa -otro LASER o una lámpara de destello-flash- excita las moléculas de colorante, produciendo una inversión de población. El colorante entonces produce emisiones estimuladas, generando un haz LASER.

Los colorantes son moléculas grandes que contienen múltiples estructuras de anillo, y tienen espectros complejos(3). Los colorantes más importantes caen dentro de un número de familias con estructuras químicamente similares. Los miembros de estas familias difieren en los grupos finales unidos por sus bordes externos, y estas diferencias químicamente superficiales traen como consecuencia importantes diferencias en características como la longitud de onda de emisión LASER, rango de sintonización, longitudes de onda de absorción y tolerancia de condiciones de operación. La lista de colorantes a los que la acción LASER ha sido demostrada puede ser de varias páginas(11). Varios de estos colorantes se ofrecen comercialmente para uso LASER.

Los solventes también son de consideración importante. Aunque unos cuantos colorantes son solubles en agua, la mayoría requiere de solventes orgánicos, como el metanol y el sulfoxido dimetil. En ciertos casos, los alcoholes pueden mezclarse con agua. Los solventes pueden influir en las características ópticas y de degradación de los colorantes.

La degradación del colorante es un importante resultado práctico. Las moléculas complejas tienden a ser descompuestas por una intensa luz de excitación. La degradación se hace cada vez más fuerte incrementando la intensidad de excitación y con longitudes de onda de excitación más cortas. Algunas reacciones son fotoquímicas, algunas térmicas y algunas una combinación(3). Los tiempos de vida de operación de los colorantes dependen de su estructura química, así como de las condiciones de excitación. Típicamente los tiempos de vida están especificados en watt-hora de potencia de excitación por litro, con valores de

unos cuantos watt-hora hasta miles(11). Bajo condiciones de operación favorables, algunos de los colorantes más estables pueden durar más de un año.

Transferencia de Energía La energía que acciona a un LASER colorante proviene de una fuente externa de luz. La absorción de un fotón eleva las moléculas de colorante a un estado altamente excitado, los procesos no radiactivos hacen caer a las moléculas a el nivel superior de la transición LASER, luego después en la transición a el nivel LASER más bajo la luz es emitida. La estructura actual de los niveles de energía es muy compleja(3).

Los colorantes pueden absorber y emitir luz sobre un rango de longitudes de onda, porque las interacciones entre los niveles electrónicos de energía, vibracionales y rotacionales crean una continuidad de niveles en algunos rangos de energía. Las energías de las transiciones electrónicas normalmente corresponden a longitudes de onda en o cerca de la región visible.

Es esta continuidad de niveles de energía la que permite que el colorante absorba y emita luz en lo que para estándares LASER es un amplio rango de longitudes de onda. La excitación inicial a el primer nivel electrónico excitado es seguida por una relajación no radiactiva a la base de aquel grupo de niveles de energía, donde una inversión de población es acumulada. La energía almacenada en el nivel LASER superior es pequeña porque el tiempo de vida del estado es de sólo unos cuantos nanosegundos. La emisión estimulada ocurre cuando una molécula realiza una transición de aquel nivel superior a un nivel en lo más bajo de la banda de emisión.

Longitud de la Cavidad y Configuración Diferentes configuraciones de la cavidad se usan con los LASER's de colorante. La elección depende de la fuente de excitación, de las aplicaciones y de la naturaleza del colorante. En la mayoría de los LASER's de colorante la celda del colorante dispone solamente de una pequeña parte de la longitud de la cavidad. (Los LASER's de colorante con excitación de lámpara de destello-flash son una excepción, con el colorante contenido en un tubo alineado a lo largo del eje axial) Excepto para modelos de baja potencia, la solución colorante fluye constantemente a través de la celda del colorante. Los LASER's de colorante están diseñados para que pueda intercambiarse el colorante para cambiar a otras longitudes de onda.

Las cavidades estándares de colorante que contienen elementos de sintonización frecuentemente están dobles, con los espejos del resonador sin tener una alineación derecha entre sí a lo largo del eje axial. En algunos diseños, los elementos selectores de longitud de onda sirven como uno de los espejos de la cavidad.

La longitud mínima es limitada por la necesidad de alojar elementos intracavitacionales de sintonización. De esta manera las longitudes típicas de la cavidad pueden ser de unos cuantos centímetros.

Disyuntivas Inherentes Hay un número de disyuntivas inherentes en la elección de los colorantes y de las fuentes de excitación.

- La excitación con fotones ultravioletas entrega más energía al colorante, pero también lo destruye más rápido. Tales LASER's de excitación con longitudes de onda más cortas tienden a tener menor tiempo de vida.
- Las longitudes de onda de emisión LASER más cortas tienden a degradar más rápido al colorante.
- Las fuentes luminosas de excitación son el factor más caro del sistema.
- Las lámparas de destello-flash ofrecen un bajo costo, pero la calidad del haz es limitada, y las lámparas coaxiales de destello son muy caras, así como los LASER's usados como fuente excitadora, para ser reemplazados.

Características del Haz

Longitud de Onda y Potencia de Salida La longitud de onda y la potencia de salida de los LASER's de colorante dependen de la elección del colorante y de la fuente de excitación, así como del diseño del LASER(11). El rango de las longitudes de onda de salida de la frecuencia fundamental es de cerca de 300 nm a 1250 nm, con las longitudes de onda más cortas y más largas que se pueden obtener solamente con LASER's de excitación pulsada. La tabla 3.1 presenta las características de longitud de onda de los LASER's de colorante más comunes.

Para excitación continua, la máxima salida es del orden de varios watts, la máxima potencia promedio en operación modelocking es un poco menor. Para la operación pulsada, las potencias pico fluctúan de kilowatts a megawatts, con cientos de megawatts posibles en pulsos de duración de picosegundos. Sin embargo, estos son valores especificados para el mejor de los colorantes; las potencias pueden ser mucho más bajas con colorantes ineficientes(11).

La potencia de salida depende de la elección de la fuente de excitación y del diseño del LASER de colorante, así como de la elección del colorante, ver Tabla 3.2. Las potencias disponibles de los LASER's comerciales de colorante fluctúan de 0.003 a 3W, dependiendo básicamente de la fuente excitadora (puede ser un LASER de otro tipo).

Generalmente las especificaciones de máxima potencia de salida están dadas para el colorante Rodamina 6G, un colorante particularmente eficiente, con una salida pico cercana a 600 nm, que se usa en gran parte de los LASER's colorantes.

La potencia del LASER de Colorante es proporcional a la potencia de excitación. Esto es, la potencia de salida depende de como la longitud de onda de excitación interactúe con las bandas de absorción del colorante. Esto hace de la elección del LASER de excitación un factor vital en el diseño del LASER de colorante, de manera que un estudio de las especificaciones de la fuente de luz es esencial, para entender como puede usarse la fuente de excitación, ver tabla 3.2.

Colorante	Longitud de onda pico (nm)	Rango de sintonización (nm)	Fuente de Excitación	Solvente
p-Terpino	340	323-364	KrF (249 nm)	Ciclohexano
	340	333-348	Nd:YAG (266 nm)	Ciclohexano
	341	334-347	XeCl (308 nm)	Ciclohexano
	341	335-355	Lámp. dest.-flash	Dimetilaminofenol
	341	335-349	XeCl (308 nm)	p-Dioxano
Estilbeno 249	424	410-454	XeCl (308 nm)	Etanol/H ₂ O, 1:4
	424	411-436	Nd:YAG (355 nm)	Metanol
	425	400-460	N ₂ (337 nm)	Etanol/H ₂ O, 1:4
	425	405-467	XeCl (308 nm)	Etanol
	425	408-453	N ₂ (337 nm)	Metanol
	432	406-448	Ar (uv)	Glicol de Etileno/ Metanol, 9:1
	445	421-466	N ₂ (337 nm)	H ₂ O
	449	420-470	Ar (uv)	Glicol de Etileno
Rodamina 590 (Rodamina 6G)	560	548-580	Nd:YAG (532 nm)	Metanol
	572	564-600	Vapor de Cobre	Etanol
	579	568-605	N ₂ (337 nm)	Etanol
	583	566-610	XeCl (308 nm)	Metanol
	587	565-615	Lámp. dest.-flash	Metanol
	590	570-650	Ar (458, 514 nm)	Glicol de Etileno
	596	577-614	Lámp. dest.-flash	Metanol/H ₂ O, 1:3
	602	560-654	Kr (azul-verde)	Metanol/Mezcla de Glicol de Etileno
	610	585-633	Lámp. dest.-flash	4% Ammonyx LO en H ₂ O

TABLA 3.1 Características de la longitud de onda pico y de sintonización de algunos LASER's de colorante.

Diámetro del Haz y Divergencia Los valores típicos del diámetro del haz y divergencia para diferentes tipos de LASER's de colorante son:

- Excitación con lámpara de destello-flash: 3-15 mm de diámetro, 1.5-2 mrad de divergencia con accesorios ópticos estándar.
- Excitación con LASER pulsado: 1-5 mm de diámetro, 0.5-3 mrad de divergencia
- Excitación con LASER ionizado: 0.5-1 mm, 1.5-2 mrad de divergencia.

Longitud de Coherencia La longitud de coherencia es altamente variable porque depende del ancho de banda espectral. Un valor aproximado puede calcularse de la fórmula

$$\text{Longitud de Coherencia} = (\text{Rapidez de la Luz})/(\text{Ancho de Banda de Frecuencia})$$

Fuente de Excitación	Energía del Pulso, mJ	Onda continua o potencia promedio, W
Excímero o Nd-YAG	5 - 75	0.01 - 10
N ₂	0.02 - 1	0.003 - 0.3
Vapor de Cobre	0.4 - 1	Sobre 1 W
Lamp. dest. flash	100-10,000	1 - 50
Argón ionizado	—	0.1 - 3

Tabla 3.2 Niveles de Potencia y Típicas Energías de Pulsos de LASER's comerciales de Colorante, excitados por varias fuentes.

Requerimientos de Operación

Potencia de Entrada Los LASER's de colorante que obtienen su potencia óptica de un LASER externo de excitación tienen requerimientos modestos de potencia eléctrica, porque la potencia eléctrica no es usada para generar el haz LASER. Sin embargo, la potencia puede requerirse para los controles ópticos y electrónicos, el bombeo de la solución colorante, y en otro equipo. Algunas hojas de datos de LASER's colorantes de baja potencia no mencionan los requerimientos de potencia eléctrica. Sin embargo, los LASER's de colorante de más alta potencia pueden requerir de 5 A con 110 V (o la mitad de corriente a 220 V) para bombear el fluido y para el equipo de control.

Los LASER's de colorante con excitación de lámpara de destello-flash requieren de una potencia significativa de entrada para accionar la lámpara, que excita a el colorante. Los requerimientos de potencia son de cerca de 15 A con 110 V, a 25 A con 220 V, en ambos casos se trata de corriente unifásica.

Condiciones de Operación y Temperatura Los LASER's de colorante están diseñados para operar en ambientes normales de laboratorio a temperatura ambiente, pero puede encontrar problemas si es operado a temperaturas extremas. La evaporación del solvente es un problema potencial a temperaturas elevadas, puesto que varios solventes comunes de colorante tienen puntos de ebullición más bajos que el agua(11). Por ejemplo, el punto de ebullición del metanol es a 65° C.

Seguridad Además de los peligros ópticos que presentan los LASER's de colorante, que son similares a aquellos que presentan los LASER's que emiten con la misma longitud de onda, los LASER's de colorante presentan cuatro

potenciales tipos de peligros: el propio haz de LASER, el sobreesalto eléctrico para accionar la lámpara de destello-flash, los colorantes tóxicos y los solventes, y las explosiones de las lámparas.

3.4 LASER's de Excímero

El término LASER de *excímero* no representa a un sólo dispositivo, mejor dicho es una familia de LASER's con características similares de salida(2). Todos emiten pulsos con duración de nanosegundos o decenas de nanosegundos en longitudes de onda en o cerca del ultravioleta. La mayoría de los LASER's comerciales de excímero pueden operarse con diferentes mezclas de gas para producir diferentes longitudes de onda de salida. La tecnología relativamente es nueva, y los dispositivos comerciales están aún evolucionando.

El término *excímero* es una contracción de "excitado dimer". Una representación de una molécula consiste de dos átomos idénticos, la cual existe solamente en un estado excitado, como por ejemplo están las de helio, He_2 , y xenón Xe_2 . Las moléculas de excímero más importantes son halógenos de gas raro; como el fluoruro de argón, fluoruro de criptón, fluoruro de xenón y cloruro de xenón, las cuales no existen en la naturaleza, pero pueden producirse pasando una descarga eléctrica a través de una mezcla de gas apropiado.

El Medio Activo Los LASER's de excímero cuentan con una mezcla de gases usualmente a una presión total debajo de 5 atm. La mayoría de la mezcla, 88 0 99%, es un gas amortiguador que interviene en la transferencia de energía, normalmente helio o neón, aunque en algunos casos se usa argón. El gas amortiguador no es parte de las moléculas que emiten luz. El gas raro que se combina para formar las moléculas de excímero está presente en concentraciones mucho más pequeñas, comúnmente de 0.5 a 12% de la presión total. El donador halógeno normalmente está presente en concentraciones de 0.5% o menos, puede ser un halógeno diatómico, como el flúor, o una molécula con halógeno, como el cloruro de hidrógeno o el trifluoruro de nitrógeno(11).

La óptima mezcla del gas es una función compleja de las condiciones de operación y de la cinética del gas y es distinta para diferentes modelos de LASER's de excímero. Además hay grandes diferencias entre diferentes moléculas de excímero. La concentración de argón puede ser tan alta como 12% en los LASER's de fluoruro de argón, mientras que una típica mezcla de fluoruro de xenón contiene cerca de 3% de Xe y 18% de F_2 , con el resto de gas amortiguador.

Transferencia de Energía La cinética detallada de la transferencia de energía en los LASER's de excímero es compleja(11). Las complejas interacciones entre las

especies molecular y atómica en el gas LASER, la energía de excitación, las paredes del tubo LASER, y los electrodos pueden afectar todos los parámetros de operación del LASER(11).

En casi todos los LASER's comerciales de excímero, la energía es depositada en el gas LASER por una descarga eléctrica. Otra alternativa comercial es la excitación con un haz de electrones. Hasta 5% de la energía de descarga puede convertirse en energía LASER. Los haces de electrones pueden depositar más energía en el gas y ligeramente pueden ofrecer una conversión más eficiente. Sin embargo, los generadores de haces de electrones son grandes, complejos, caros, ineficientes y limitados en su repetición. Una tercera alternativa, es la excitación con microondas, que ha sido demostrada en laboratorio, su principal objetivo es alcanzar una duración de pulso extendido de un par de cientos de nanosegundos, pero solamente cerca de 0.1% de la energía de la microonda ha sido convertida a salida LASER.

Para mejorar la transferencia de energía y evitar el arqueo de la descarga, el gas LASER normalmente es *preionizado*(11) antes del pulso de excitación. En los LASER's de excímero comerciales, la preionización normalmente es con un pulso de luz ultravioleta, pero un pulso de rayos-x o un disparo de un haz de electrones puede usarse también. Los electrones del pulso de excitación producen la excitación de los átomos de gas raro y de los halógenos, que reaccionan para formar las moléculas diatómicas excitadas, como la de fluoruro de xenón. (El estado excitado frecuentemente está indicado por la fórmula química con un asterisco, por ejemplo, XeF*.)

Las moléculas de excímero son cosas peculiares. Cuando son excitadas electrónicamente, los dos átomos componentes se atraen mutuamente para formar una molécula estable. Sin embargo, en el estado base o fundamental los dos átomos mutuamente son repulsivos o en algunos casos débilmente se rechazan. De esta manera cuando un excímero cae del estado excitado a el estado fundamental, la fuerza entre los dos átomos cambia de atrayente a repulsiva, y la molécula se separa.

Estructura Interna Un LASER de excímero contiene un tubo sellado relleno con el gas LASER, a través del cual un pulso de excitación es pasado. En LASER's accionados con descarga, el pulso eléctrico es perpendicular al eje axial del LASER. En un LASER excitado con haz de electrones, los electrones están dirigidos a lo largo del eje axial del LASER. Normalmente algo del gas está en un depósito exterior a la región de excitación, y el gas puede circular a través del LASER para su operación a altas potencias o en altas repeticiones de pulso.

La cavidad LASER está diseñada para ser vaciada y rellena con frecuencia, a menudo con diferentes mezclas de gas de excímero. Esto es necesario porque el gas LASER se degrada con el uso, durando de miles a millones de disparos en

los LASER's comerciales, dependiendo del tipo de gas y condiciones de operación(2). La cavidad LASER, accesorios ópticos y electrodos, necesitan estar diseñados para resistir la corrosión por la presencia de halógenos en el gas LASER. Los componentes pasivos comúnmente están cubiertos con *Teflón*, mientras que los electrodos están hechos de materiales resistentes al halógeno, como el níquel.

Longitud de la Cavidad y Configuración Las cavidades de los LASER's de excímero generalmente son un poco menores que 1 m de longitud. La configuración estándar es un resonador estable(4). Los accesorios ópticos en un resonador estable, con frecuencia están disponibles como opciones para producir haces más pequeños y más uniformes, aunque con el costo de reducir la potencia.

Disyuntivas Inherentes Como todos los otros LASER's constantemente pulsados, los pulsos de los LASER's de excímero producen una baja energía por pulso una vez que exceden cierto nivel de repetición.

- Como otros LASER's pulsados repetitivamente, los LASER's de excímero pierden energía por pulso una vez que la repetición excede cierto nivel. A baja repetición de pulso, la potencia promedio se incrementa linealmente con el número de pulsos por segundo. Sin embargo, si se excede el punto máximo de repetición por segundo, la potencia decrece.
- El LASER de fluoruro de criptón (KrF) ofrece una energía de pulso y una potencia promedio más altas que las de otros tipos, pero su tiempo de vida es más corto y su longitud de onda de 249 nm no se transmite bien por el aire a grandes distancias.
- El LASER de cloruro de xenón (XeCl) tiene un tiempo de vida más grande y su salida de 308 nm se transmite razonablemente bien por el aire, pero su potencia de salida es de tan sólo la mitad de la que se puede obtener con un LASER de KrF.

Características del Haz

Longitud de Onda y Potencia de Salida Sobre las líneas más fuertes -ArF, KrF, XeCl y XeF- las típicas potencias promedio fluctúan de abajo de 1 W a 100 W o más. Sin embargo, estos LASER's con similares potencias promedio pueden tener características de salida considerablemente diferentes(11). Una potencia promedio de 10 W puede producirse generando 100 pulsos de 100 mJ cada uno, o diez de 1 J. Aunque unos cuantos modelos caros entregan pulsos de alta energía con una repetición suficientemente alta para producir una alta potencia promedio, comúnmente la mayoría de los pulsos de más alta energía son producidos a bajas repeticiones -sobre el orden de un disparo por segundo. De esta manera un típico LASER que entrega pulsos de 1 J, producirá solamente un pulso por segundo, para una potencia promedio de 1 W, mientras que un LASER

que produce una potencia promedio de 20 W es más propenso a generar 100 pulsos de 0.2 J cada uno por segundo(11).

Las longitudes de onda de los excimeros comerciales son: el de fluoruro (F_2) a 157 nm, fluoruro de argón (ArF) a 193 nm, fluoruro de criptón (KrCl) a 222 nm, fluoruro de criptón (KrF) a 249 nm, cloruro de xenón (XeCl) a 308 nm, fluoruro de xenón (XeF) a 350 nm.

La energía por pulso de los LASER's de excímero más comunes son: F_2 con 15 mJ, ArF con 500 mJ, KrF con 1000 mJ, XeCl con 500 mJ y XeF con 400 mJ.

La potencia promedio de salida de los LASER's de excímero más comunes son: ArF con 4 W, KrF con 8 W, XeCl con 4 W y XeF con 3 W.

Aunque varias aplicaciones requieren de una longitud de onda específica, o de una elección limitada a un excímero sencillo, otras pueden requerir pulsos ultravioleta de alta potencia. En estos casos, frecuentemente la elección es el LASER de KrF a 249 nm y el LASER de XeCl a 308 nm. El KrF generalmente es un LASER más potente, pero el LASER de XeCl dura más, porque éste no contiene fluoruro, que es altamente corrosivo, y la longitud de onda más larga es más fácil de manipular ópticamente.

Longitud de Coherencia El ancho de banda de la amplia emisión de los LASER's de excímero trae como consecuencia una limitada longitud de coherencia. Para un típico LASER con ancho de banda de 0.3 nm en 300 nm de longitud de onda - cerca de 10^{12} Hz- la longitud de coherencia es de cerca de 0.3 nm.

Diámetro del Haz y Divergencia Los LASER's de excímero con accesorios ópticos de resonador estable, comúnmente tienen haces oblongos aproximadamente de 1 por 2 cm transversales a la ventana de salida. Aunque hay menores variaciones entre los diferentes modelos y gases, las dimensiones del haz casi siempre caen dentro de un factor de por 2 de aquellos valores de los LASER's accionados por descarga. La divergencia del haz también es escabrosa, comúnmente de 2 por 3 o de 2 por 4 mrad, aunque algunos LASER's tienen una divergencia más grande y más escabrosa, tal como de 3 por 10 mrad(11).

Los resonadores inestables generan haces de dimensiones similares, pero de divergencia mucho más pequeña, generalmente de cerca de 0.2 por 0.2 mrad.

Requerimientos de Operación

Potencia de Entrada Los suministros de potencia para un LASER pequeño de excímero son del orden de 10 A con 110 V, de fuentes trifásicas. Los modelos de potencia más alta requieren de 208 a 380 V trifásicos y corrientes de 20 a 30 A. Las especificaciones para algunos LASER's de más alta potencia no mencionan

los requisitos de entrada. Todos los LASER's de excímero accionados con descarga eléctrica requieren de altos voltajes, generalmente decenas de kilovolts.

Condiciones de Operación y Temperatura Los LASER's comerciales de excímero están diseñados para el ambiente normal de laboratorio y de trabajo.

La operación propia de los LASER's de excímero requiere de una pasividad de la cavidad del gas, para limitar las reacciones que implican los halógenos en la mezcla del gas(11). Estos requisitos de pasividad son muy estrictos cuando los gases del medio activo se cambian de la cavidad, hay que estar seguros que el gas anterior haya sido completamente expulsado de la cavidad.

Seguridad Hay tres potenciales peligros con los LASER's de excímero: los altos voltajes requeridos por los LASER's accionados con descargas eléctricas; la luz ultravioleta que pueden emitir sus pulsos y los cuales pueden dañar la retina; y los gases del medio activo, debido a que tienen halógenos los cuales pueden causar daños.

3.5 LASER's de Semiconductor

Los LASER's de diodo semiconductor mas que un sólo dispositivo son una familia de dispositivos. Hablando prácticamente, hay dos categorías mayores: LASER's de diodo fabricados de compuestos formados por las columnas III y V de la tabla periódica, como el arseniuro de galio (GaAs), el cual emite en el cercano infrarrojo (o algunas veces dentro del rojo), y los diodos hechos de compuestos de "sal de grafito", los cuales emiten a longitudes de onda infrarrojas más largas, cerca de 2.7 a 30 μm (2).

Los LASER's de diodo semiconductor son los LASER's más eficientes, baratos y pequeños que es posible obtener en la actualidad. Desde su invención en 1962 se han mantenido como líderes en muchas aplicaciones científico-tecnológicas y su continua producción masiva da un indicio de que esta situación se prolongará por mucho tiempo(2). La tecnología de producción ha sido estimulada por la extensión de las comunicaciones por fibra óptica (que requieren de una fuente de luz de semiconductor) y por la necesidad de fuentes de luz compactas y baratas para una variedad de aplicaciones de manejo de información(10).

Descripción Como su nombre lo dice, el LASER de diodo realmente es un diodo semiconductor que emite un haz LASER coherente. El LASER de diodo (o diodo LASER) es similar en estructura al diodo emisor de luz (LED), y de hecho los diodos LASER generalmente pueden funcionar como LEDs incoherentes -a pesar de cierta ineficiencia. Los LEDs, sin embargo, carecen de los elementos

estructurales y de superficies reflectivas que necesitan para funcionar como diodos LASER(11).

El diodo LASER es un bloque de material semiconductor de unión *pn*. Comúnmente un fragmento de un semiconductor LASER es menor que 1 mm en todas sus dimensiones, y solamente una banda de 10 μm de ancho dentro de él produce un haz LASER. La estructura interna es considerablemente más compleja que la de una simple unión *pn*, en particular para los LASER's sofisticados. Por sus pequeñas dimensiones, los diodos LASER comerciales están casi siempre empaquetados en encapsulados que simplifican la manipulación del haz. Los encapsulados aparecen en varios tipos dependiendo de las aplicaciones(11).

Funcionamiento Interno Se mencionó en el primer capítulo que se puede considerar a los átomos como pequeños sistemas solares con electrones girando alrededor de un núcleo con carga positiva. Los electrones de la última órbita son llamados *electrones de valencia* y no son retenidos tan firmemente como los que se encuentran en órbitas interiores. Cuando varios átomos se combinan para formar una molécula o una estructura cristalina los electrones de valencia son intercambiados libremente, ligando con esto a los átomos.

A muy bajas temperaturas el material semiconductor -comúnmente silicio (Si)- se comporta como un aislador, ya que no hay electrones libres que puedan conducir corriente eléctrica. Sin embargo, a temperatura ambiente, por la agitación térmica, algunos electrones serán separados dentro de su posición dentro de la red cristalina, quedando libres y dejando en su lugar un *hueco* con carga positiva. Si a través del cristal se aplica un campo eléctrico circulará una pequeña corriente eléctrica debido al movimiento de electrones libres y de huecos.

Es posible aumentar en forma controlada la conductividad de un semiconductor. Para realizar esto, durante la formación del semiconductor puro se introduce una pequeña cantidad de *átomos contaminantes* con tres o cinco electrones de valencia en lugar de sólo cuatro. La introducción de átomos contaminantes con tres electrones de valencia, como por ejemplo el bario (Ba), galio (Ga) o el indio (In), da lugar a una estructura cristalina imperfecta en la cual han quedado *huecos positivos* que aumentan la conductividad del material. Estos tipos de materiales se conocen como *semiconductores tipo-p*. De manera similar, la introducción de átomos contaminantes con cinco electrones de valencia, como por ejemplo el fósforo (P), el arsénico (As), el bismuto (B) o el antimonio (Sb), da origen a una estructura cristalina imperfecta en la cual han quedado electrones en exceso que incrementan la conductividad del material. Estos materiales contaminados con átomos de cinco de electrones de valencia son llamados *semiconductores tipo-n*(13).

Cuando un trozo de material semiconductor *tipo-p* y uno *tipo-n* se unen tenemos una *unión pn*. Si esta *unión pn* o diodo se polariza inversamente, esto es, si el

polo positivo de una batería es conectada al material *tipo-p* y el negativo al material *tipo-n*, los huecos positivos son repelidos por el potencial positivo de la batería y dirigidos hacia la unión de los materiales *p* y *n*. Por otra parte, los electrones libres de la región *n* son repelidos por el potencial negativo de la batería y dirigidos también hacia la unión de los materiales *p* y *n*. En dicha unión los electrones y los huecos se recombinan y permiten así el paso de corriente. Durante la recombinación de huecos y electrones pueden ser emitidos fotones que generalmente caen en la región infrarroja del espectro. La emisión de luz ocurre espontáneamente en los LEDs, pero en los diodos LASER, los cuales tienen los elementos estructurales y superficies reflectivas (lo que forma una especie de cavidad óptica, cuyo medio activo es la zona de recombinación) necesarios para que la emisión estimulada domine.

Altas corrientes de polarización se requieren en los diodos LASER para que además de producir la recombinación en la unión *p-n*, produzca una inversión de población en los transportadores excitados, para que la luz sea amplificada como ésta pase a través del material. Además de un par de espejos de resonador óptico, lo que en la práctica significa hendir extremos opuestos del cristal para producir caras reflectivas (revestimientos pueden agregarse para aumentar la reflectividad, y frecuentemente una cara es cubierta para hacerla totalmente reflectiva, para que toda la emisión LASER salga por la otra cara), las cuales proporcionan la realimentación óptica que es requerida por la emisión estimulada para superar las pérdidas de la cavidad y crear la oscilación LASER automantenible(13). La emisión estimulada no domina en los LEDs porque no tienen caras reflectivas y operan con corrientes de polarización muy bajas. La combinación de estos dos factores traen como consecuencia las grandes diferencias en las características de salida entre los LEDs y los diodos LASER.

De esta manera, a bajos valores de corriente de polarización, incluso un diodo (LASER) con un resonador óptico se comportará como un LED. A corrientes más altas, el dispositivo se hace un amplificador o un diodo superluminiscente, pero no tiene la suficiente ganancia para producir la oscilación LASER. Solamente cuando la corriente de umbral sea pasada, el dispositivo operará como un LASER.

Disyuntivas Inherentes Nuevos materiales y estructuras de salida han aumentado el rango de las longitudes de onda de salida y las características de operación, pero algunas deficiencias fundamentales permanecen en los dispositivos comerciales(11)

- Más allá de ciertos límites, el tiempo de vida de un diodo LASER decrece violentamente con la temperatura de operación y la potencia de salida.
- La operación en longitudes de onda mucho más cortas que el rango de 750 a 780 nm se obtiene solamente con un corto tiempo de vida del LASER. El problema empeora con una longitud de onda más corta y una potencia de salida más alta.

- Los encapsulados individuales están diseñados para producir, cada uno, pulsos de alta potencia pico con un ciclo bajo de repetición, o para operar establemente a niveles mucho más bajos de potencia
- Aunque se han insertado arreglos monolíticos en los encapsulados individuales, en lugar de una sola banda de recombinación, para mejorar la calidad del haz, la calidad de salida permanece como una limitación de todos los dispositivos comerciales.

Tipos de Estructuras de los Diodos LASER La variedad de estructuras de diodos LASER es muy extensa para ser cubiertas en detalle y no es el objetivo de este trabajo. Para propósitos prácticos, se describen sólo las estructuras que ocupan los tipos más importantes de diodos LASER y las que tengan los efectos más importantes sobre el funcionamiento del dispositivo.

- Los *diodos LASER homounión* están hechos enteramente de un sólo compuesto semiconductor, generalmente arseniuro de galio (GaAs), con diferentes porciones de dopaje. La capa activa (que es la emisora de luz) está entre las capas de materiales *p* y *n*, que son del mismo material que el de la capa activa, ver figura 3.2. Esta estructura fue usada en los primeros diodos LASER, pero ha sido sustituida por otras estructuras que puedan proporcionar mejores características LASER.
- Los *LASER de simple heterounión* (o simple heteroestructura) son aquellos en los que la capa activa de la unión tiene una frontera con un material de diferente banda de ganancia. En la práctica, esto se logra emparedando a la capa activa entre dos materiales de composición química diferente - generalmente GaAs y GaAlAs-, ver figura 3.2. Con mayor frecuencia la capa activa es de GaAs, y la longitud de onda de emisión LASER es de 904 nm. Los LASER's de simple heterounión tienen mejores propiedades que los LASER's de homounión y se usan ampliamente para generar altas potencias pico en operación pulsada. Se venden como encapsulados simples o como "arreglos" de varios dispositivos en un sólo encapsulado. Sin embargo, los LASER's de doble heterounión son relativamente ineficientes y tienen altas corrientes de umbral que los hace inapropiados para operación continua u operación de alto trabajo, como en sistemas de fibra óptica.
- Los *LASER's de doble heterounión* (o doble heteroestructura) tienen una capa activa, la cual es la emisora de luz, emparedada entre dos capas del mismo material, pero diferente al de la capa activa -por ejemplo, generalmente el GaAs es emparedado entre dos capas de GaAlAs. Estos LASER's tienen gran capacidad para la operación continua y se usan ampliamente en fibras ópticas. Éstos no pueden producir pulsos con alta potencia pico, pero pueden operar continuamente o en condiciones forzadas de trabajo con potencias de decenas de milliwatts a temperatura ambiente. Sus capas activas son más delgadas que las de los LASER's de heterounión simple, de manera que tienen densidades de corriente de umbral lo suficientemente bajas para operar continuamente a temperatura ambiente.

- Los LASER's de *banda-geometría* son una subcategoría de los LASER's de doble heterounión en los cuales la emisión LASER es confinada a una banda estrecha a lo largo de la longitud del LASER. Típicamente la banda es de 1 a 10 μm de ancho, que comparada con las bandas de 50 μm de ancho de los diodos de doble heterounión, es mucho más pequeña. Puesto que la corriente de polarización se concentra en un área de banda más pequeña, la corriente de umbral para iniciar la acción LASER es más baja que la de los LASER's de banda más ancha. Las bandas de emisión más estrechas además proporcionan buena calidad del haz, ya que limita el número de modos espaciales(4) en que el LASER puede oscilar, con frecuencia a un modo único. Como el haz tiene poca divergencia es apto para las aplicaciones de manejo de información. Además, el área pequeña de emisión favorece a las aplicaciones de fibra óptica, puesto que son fáciles de acoplar a fibras monomodo.

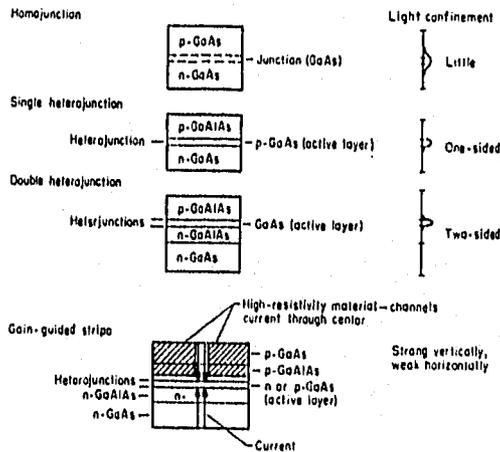


Figura 3.2 Tipos de estructuras básicas de los diodos LASER, a saber en orden descendente: homounión, simple heterounión, doble heterounión y de banda-geometría.

Tipos de Diodos LASER

- LASER's de GaAs-GaAlAs de heterounión-simple, encapsulados individualmente o en arreglos, para producir pulsos cercanos a 900 nm
- LASER's de GaAs-GaAlAs de heterounión-doble, encapsulados individualmente para producir una salida continua, normalmente entre 780 y 790 nm.
- Encapsulados monolíticos de hasta 500 bandas de recombinación de GaAs-GaAlAs de *multiheterounión*. Encapsulados de hasta cerca de 100 bandas LASER pueden operar en onda continua, produciendo potencias más altas que

los dispositivos individuales. Encapsulados más grandes pueden operar solamente en modo pulsado.

- LASER's de InGaAsP-InP de heterounión doble, encapsulados individualmente para generar una salida de onda continua entre cerca de 1150 y 1600 nm.

Características del Haz

Longitud de Coherencia Los fabricantes raramente especifican la longitud de coherencia. La cavidad óptica pequeña los conduciría a largas longitudes de coherencia, pero el amplio ancho espectral de los LASER's multimodo (longitudinales) la afectan, lo que trae como consecuencia longitudes de onda de milímetros. Los LASER's de modo único longitudinal pueden tener longitudes de coherencia del orden de 10 a 30 m.

Longitud de Onda y Potencia de Salida En concreto, las longitudes de onda de los materiales semiconductores que se emplean en los dispositivos comerciales son:

- GaAs : 904 nm
- GaAlAs: cerca de 720 a 900 nm, aunque las longitudes de onda más cortas de los dispositivos comerciales son de cerca de 750 nm.
- InGaAs: cerca de 1060 nm
- InGaAsP: generalmente cerca 1300 a 1550 nm en los dispositivos comerciales, aunque el material es útil desde cerca de 1000 a 1700 nm

Los fabricantes normalmente especifican variaciones de ± 20 a 30 nm de la longitud de onda resonante(11).

Los típicos LASER's de heterounión simple producen pulsos de potencia pico de 1 W a unas decenas de watts, durante una fracción de 1 μ s. Los LASER's de heterounión doble de GaAlAs pueden producir potencias promedio de uno a decenas de mW, mientras que las máximas potencias de salida de los LASER's de InGaAsP son un poco más bajas. Los encapsulados monolíticos de LASER's de GaAlAs pueden producir potencias de onda continua a 500 mW a temperatura ambiente.

Ancho de Banda Espectral El ancho de banda espectral de los diodos LASER de GaAlAs/GaAs de heterounión doble de modo longitudinal único típicamente es de 0.1 nm y para uno pulsado de heterounión simple es de cerca de 10 nm. El ancho de banda a longitudes de onda más grandes tiende a ser grande porque es proporcional a una fracción de la longitud de onda. De esta manera, una estructura LASER que produce 4 nm de ancho de línea en 800 nm, puede tener 6 nm de ancho de línea a una longitud de onda de 1,300 nm. Bajo condiciones cuidadosamente controladas, los anchos de banda de los LASER's de modo único pueden limitarse a decenas de MHz (equivalente a cerca de 10^{-5} nm).

Requerimientos de Operación

Potencia de Entrada Para los diodos LASER de heterounión doble, el máximo voltaje de entrada comúnmente es de 2 V para los dispositivos que emiten en el rango de 800 a 900 nm. Puede ser menor para los LASER's de longitud de onda más largas. Los requerimientos de corriente de accionamiento dependen del valor de umbral LASER, el cual es tan bajo como 10 mA para el mejor de los dispositivos comerciales, hasta cerca de 100 mA para las versiones menos costosas. En arreglos monolíticos, los LASER's están conectados en paralelo, de manera que los voltajes de accionamiento son de 1.5 a 2 V. Las corrientes típicas de umbral están cerca de 250 mA.

Los requerimientos de potencia de entrada son diferentes para los LASER's de heterounión simple diseñados para la operación pulsada. Estos dispositivos pueden soportar voltajes de varios volts y corrientes pico de decenas de amperes en pulsos que duran 1 μ s o menos. La potencia pico de entrada durante los pulsos puede ser de cientos de watts, con una potencia pico de entrada de 20 W o más.

Condiciones de Operación y Temperatura Generalmente los diodos LASER de las columnas III-V operan en o cerca de la temperatura ambiente. Los LASER's de heterounión simple comúnmente están especificados para temperaturas de -55 a 60°C. La corriente de umbral y los efectos de degradación generalmente se incrementan con la temperatura operante, de manera que limitando la temperatura puede obtenerse un seguro incremento en el tiempo de vida, además de estabilizar la potencia de entrada(11).

Seguridad Aunque los diodos LASER que emiten en el cercano infrarrojo son bajos en potencia, éstos no son completamente inofensivos. Los usuarios no deben engañarse por la aparente inofensividad de los diodos LASER de longitud de onda visible(2). La reacción con la retina disminuye fuertemente con el incremento de la longitud de onda más allá de 700 nm, pero es aún posible para el ojo detectar la débil emisión del rojo profundo de un diodo LASER que emite más allá de 780 nm (la cual puede señalarse como "visible", aunque no sería de utilidad para propósitos de display).

La luz a longitudes de onda más largas no se transmiten a través del medio ocular a el ojo, de manera que los LASER's de 1550 nm desarrollados para las comunicaciones por fibras ópticas de longitud de onda larga presentan mucho menos peligros

Capítulo 4 Aplicaciones Multidisciplinarias del LASER

En los principios de la década de 1960, el LASER fue una curiosidad de laboratorio, una invención esperando tener aplicación. Los medios de información de la época se deleitaron en cubrir las demostraciones de como este nuevo dispositivo podía enfocarse y realizar un orificio en una hoja de afetar templada en acero, o como los diferentes tipos de LASER's podían emitir diferentes colores (diferentes longitudes de onda) produciendo un efecto visual antes nunca visto. Sin embargo, no tomó mucho tiempo, para que las industrias militar, electrónica, manufacturera y de la construcción, así como la medicina y otras áreas científicas y de investigación encontraran aplicaciones útiles para el LASER. Las variedades y tipos de LASER's que surgieron de los laboratorios de investigación y desarrollo encontraron cientos de usos, y más aun se empezaron a crear LASER's, con variaciones de los ya existentes, para usos en específico. No es la intención de este trabajo describir las múltiples aplicaciones que existen, ya que se corre el riesgo de cometer omisiones graves, principalmente en las aplicaciones de vanguardia. Por el contrario, dentro de todo el campo de aplicaciones se ha seleccionado a la *Aplicación Industrial* para ser analizada a fondo y sólo se hace mención de algunas otras aplicaciones que demuestren potencial interés a los Ingenieros y a la gente en general que tenga interés en conocer sobre el LASER, y se dejan a un lado los detalles técnicas de cada disciplina.

4.1 Aplicaciones Industriales

4.1.1 Modo de Operación de los LASER's-Industriales

Hay actualmente muchas clases de Sistemas LASER industriales disponibles. Algunos de los más importantes aparecen en la lista de la Tabla 4.1. Como se mencionó en el capítulo anterior, hay otros Sistemas LASER, los cuales tienen importancia científica, médica o militar o se emplean en comunicaciones y otros campos.

GAS	ESTADO SÓLIDO
Argón Ionizado	Rubi Sintético
Criptón Ionizado	Arseniuro de Galio-Aluminio
Bióxido de Carbono (CO ₂)	Arseniuro de Galio
Helio-Neón	Nd:Vidrio Neodimio:Vidrio)
	Nd:YAG (Neodimio: Itrio-aluminio-granate)

Tabla 4.1 Algunos Sistemas LASER Industriales Importantes

Los Sistemas LASER para aplicaciones industriales que usan un gas como medio activo, son más comunes que los que usan otras sustancias. Entre los Sistemas LASER de gas, el de CO₂ es el que se emplea más frecuentemente en

aplicaciones industriales. Su utilidad se debe a la alta potencia que puede generar a una longitud de onda conveniente para procesar una gran variedad de materiales.

La variedad de los medios emisores en los Sistemas LASER de estado sólido es menor, aunque una barra de Rubí Sintético haya sido el primer material que se empleó para efectuar el fenómeno de emisión LASER(2). De los Sistemas LASER de estado sólido, los tipos de Nd:YAG y Nd:Vidrio son los que se emplean más comúnmente en la industria.

Un LASER puede funcionar en el modo de onda continua (CW) o en el modo pulsante, y en algunos sistemas se emplean velocidades de repetición hasta de 50,000 pulsos por segundo. En algunos pueden obtenerse pulsos con duración de sólo 10 picosegundos.

El rango de las potencias de salida es también muy amplio. Muchos sistemas que se usan comúnmente en la industria, tales como los tipos rojos de helio-neón que se emplean en la alineación, impresión, medición o demostraciones tienen potencias nominales de miliwatts. En el otro extremo, un haz simple de un LASER de CO₂, en operación de onda continua, puede tener hasta 100,000 watts de potencia. En un haz de modo múltiple(4) de un LASER de Nd:Vidrio, en operación pulsante, puede tenerse más de un megawatt de potencia.

Modo Pulsado y de Onda Continua

Para aplicaciones industriales un LASER, de los de uso industrial, puede hacerse funcionar emitiendo un haz continuo o intermitente como se muestra en la figura 4.1. El nivel de potencia de salida de onda continua (CW) es equivalente a la potencia total nominal para un modelo particular de LASER. Cuando opera en forma pulsante, el LASER se modula electrónicamente para que el pulso que se emita tenga una potencia máxima intensificada, varias veces mayor que el nivel de potencia de onda continua.

La parte inicial de un pulso intensificado tiene un aumento pronunciado de energía, tal que produce una alta potencia máxima. Una potencia máxima alta produce una rápida vaporización del material o substancia a la que se dirige el haz. Esta característica es útil para perforar, ya que la mayor parte de la energía del haz se emplea para vaporizar el material y no en calentar la zona que rodea el lugar donde se enfoca el LASER. El modo de pulso intensificado es también útil para cortar, porque hay una fusión mínima de material circundante al punto de enfoque del haz y se reduce la zona afectada por el calor. Cuando se usa para soldar metales, la energía del borde frontal de un pulso intensificado, supera rápidamente la reflectividad superficial para producir soldaduras de penetración profunda con un daño térmico mínimo al material del derredor.

Un pulso intensificado corto puede tener una potencia máxima de cinco a ocho veces la potencia de salida de onda continua (CW). Este modo se emplea provechosamente en aplicaciones en que la vaporización es útil, tales como perforar, grabar o cortar materiales. Produce bordes bien formados sin aplicar gran cantidad de calor al material.

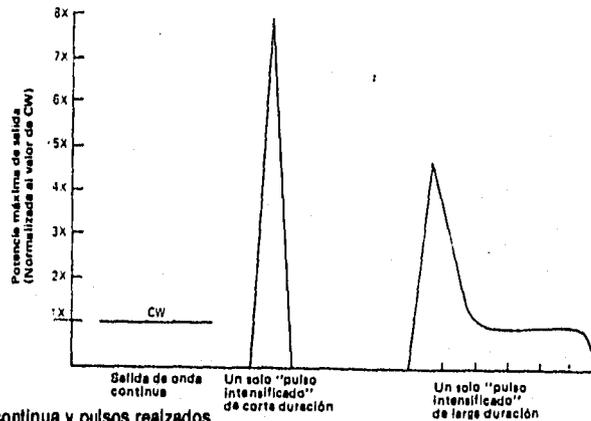


Figura 4.1. Onda continua y pulsos realizados

Un pulso largo puede ser configurado a modo de obtener un borde frontal con una potencia máxima que puede ser cuatro o cinco veces mayor que la potencia de onda continua (CW). Este pico es seguido por una disminución de potencia, para el resto del pulso, a menos del nivel de onda continua. El máximo del borde delantero es útil para iniciar una reacción en la superficie del material, mientras que el borde trasero, de menor potencia, se usa para mantener la reacción. Este modo es especialmente valioso en soldadura. Con esta técnica se obtienen penetraciones de soldadura más profundas y menos amplias en los metales.

Por ejemplo, un haz que funciona en el modo de pulso intensificado (con una duración de pulso de 4 milisegundos y una frecuencia de 100 pulsos por segundo) puede producir una soldadura que penetre 0.065 pulgadas en acero inoxidable a una velocidad de soldadura de 30 pulgadas por minuto(19). El modo de pulso realizado largo puede emplearse también para cortar metales y plásticos.

Excepto para velocidades muy altas de repetición de pulsos, la energía y la potencia por pulso intensificado, es generalmente mayor que la disponible en el modo de onda continua (CW). Esto es, a altas velocidades de repetición es menor la potencia máxima de los pulsos del LASER. Estas condiciones son propias para el corte, perforación de papel o plásticos delgados y operaciones de grabado, en las que se requieren velocidades elevadas de barrido sobre la superficie. En el extremo opuesto, a bajas velocidades de repetición, mayor es la potencia máxima por pulso. Las frecuencias bajas son apropiadas para perforación por pulso

simple, perforación de metales por pulsos múltiples, soldadura por puntos, corte y soldadura de metales y grabado de cerámica. A bajas velocidades de repetición, la elevada potencia máxima del pulso se concentra en una zona tan reducida que los problemas de transferencia de calor en el material se reducen al mínimo.

Cuando se emplean frecuencias muy altas de pulsación intensificada, es necesario reducir el tiempo de decaimiento de la parte final del pulso. Un pulso intensificado requiere aproximadamente 100 microsegundos para obtener la potencia máxima y después requiere casi 1 milisegundo para regresar a cero. Si la frecuencia es menor de mil pulsos por segundo, este tiempo de decaimiento es aceptable. Al elevar las velocidades de repetición, los pulsos se traslaparían mutuamente.

El tiempo de decaimiento de los pulsos, en el caso de un LASER de CO₂, puede acortarse a 400 microsegundos sustituyendo la mezcla normal de gases por una mezcla especial en el tubo de descarga, sin que se afecte seriamente la potencia máxima. Con una menor duración por pulso, es posible que el LASER opere a frecuencias mayores de 2,500 pulsos por segundo. Las altas velocidades de repetición de pulsos configurados así, se aplican provechosamente en trabajos tales como la perforación de papel a alta velocidad, el grabado y algunos casos de corte.

También se pueden emitir grupos de pulsos en forma intermitente. Un determinado número de pulsos, de duración definida, puede repetirse periódicamente a una frecuencia determinada por la regulación del control de la compuerta del LASER(11). Esto permite aplicar potencias máximas elevadas en pulsos cortos repetidos para vaporizar un material. Este es un medio eficaz para perforar, especialmente cuando la aplicación total de calor debe reducirse al mínimo. Cuando son de gran importancia la nitidez de los bordes y los lados paralelos, se pueden perforar áreas con altas relaciones de longitud a diámetro(7) con la técnica de ráfagas de pulso.

Manejo Óptico del Haz

Un haz LASER puede enfocarse por medio de un lente sobre una pequeña superficie, "una mancha", cuyo tamaño está limitado teóricamente por la divergencia y el diámetro del haz, por la longitud focal del lente y por la longitud de onda de la luz(19), ver figura 4.2. Por ejemplo, el haz de luz de un LASER de CO₂ de 100 watts, puede enfocarse hasta tener una "mancha" de menos de 0.005 pulgadas (0.1270 mm) de diámetro, con una densidad de potencia de 800,000 watts por centímetro cuadrado. Así, con los lentes adecuados a la longitud de onda y potencia del haz LASER, se pueden obtener densidades de potencia mucho más grandes y se puede enfocar a puntos muy pequeños, con lo que se optimiza el Sistema LASER.

Por lo anterior, es importante conocer los factores que determinan la profundidad de campo -la profundidad de campo es la distancia útil de trabajo del haz entre el LASER y el objeto- y el diámetro mínimo enfocado, cuando se definen las condiciones de trabajo de un Sistema LASER. La profundidad de campo y el diámetro mínimo son funciones de la longitud de onda del haz, del diámetro del haz no enfocado y de la distancia focal de la lente -distancia a la cual se encuentra el punto donde coinciden los rayos del haz refractados por la lente. Además debe de considerarse el grado de divergencia que existe en el haz ya que este fenómeno afectará directamente la densidad de potencia en el plano focal principal.

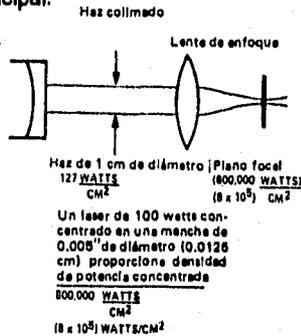


Figura 4.2 Uso de un lente de enfoque, para aumentar la densidad de potencia y por lo tanto disminuir el área de enfoque.

Asimismo guarda una estrecha relación la profundidad de foco de una lente con una distancia particular focal y la densidad de potencia que hay en el punto de diámetro mínimo enfocado. Esto es, que para tener un tamaño pequeño de mancha y por consiguiente una mayor densidad de potencia, debe tenerse una profundidad de campo corta. Y por el contrario, si se tiene una profundidad de campo larga y un diámetro de haz grande, entonces será menor la densidad de potencia.

Si se ocupa un LASER con lentes de focalización para perforar un cierto material, la posición del foco del lente respecto a la superficie de trabajo tiene un efecto crítico en la forma y la profundidad de los agujeros perforados. Cuando el foco queda antes de la superficie, las perforaciones son poco profundas, de diámetro grande y con lados algo cónicos. Cuando el foco coincide con la superficie, las perforaciones son de diámetro uniforme. Cuando el foco está más allá de la superficie, las perforaciones son menos profundas y con lados cónicos.

4.1.2 Corte de materiales

Introducción

El corte con LASER es un proceso inducido térmicamente, en el cual la energía del haz de luz focalizado es absorbida por el material, que se vaporiza formando así el corte.

Los factores que determinan la posible aplicación del LASER en el corte de materiales son, en su mayoría, propiedades ópticas, térmicas, eléctricas y mecánicas del propio material. La absorción de la radiación incidente es uno de los más importantes. No sólo depende de las características del material, sino también en gran medida de la longitud de onda de la radiación.

Para la longitud de onda de $10.6 \mu\text{m}$, característica de los LASER's de CO_2 , la interacción entre los electrones libres del material y la radiación es la causa de la alta reflectividad y baja absorción que presentan los materiales de elevada conductividad eléctrica como el oro y la plata. Para el hierro y materiales de conductividad eléctrica media, la reflectividad y la absorción tienen valores intermedios.

Por el contrario, los aislantes como plástico y madera tienen una reflectividad mínima con una alta absorción. Por este motivo, los aislantes son excelentes candidatos para ser cortados con LASER's de CO_2 . Los espesores del material que se pueden cortar y las velocidades que se pueden alcanzar son mucho mayores que para el acero, ver tabla 4.2.

Del mismo modo que la reflexión de la radiación disminuye con la temperatura del material, la absorción aumenta con la temperatura, pudiendo experimentar un incremento de hasta el 30%. La combinación de estos dos fenómenos permite la utilización de LASER's de CO_2 para el corte de metales.

Los metales presentan mayor absorción para la radiación de $1.06 \mu\text{m}$, característica de los LASER's de Nd:YAG. Por otra parte, esta menor longitud de onda permite la focalización del haz a un diámetro más pequeño, con lo cual la densidad de potencia alcanzada es muy grande, haciendo que el LASER de Nd:YAG sea en muchos casos el elegido para la mecanización de substratos metálicos. Las potencias promedio que se alcanzan con un LASER de CO_2 explica la mayor utilización del LASER de CO_2 en la industria.

Otro factor a tener en cuenta es la conductividad térmica, ya que para que la radiación absorbida consiga elevar la temperatura hasta el punto de fusión y posterior vaporización es necesario que el calor suministrado permanezca concentrado en la zona de trabajo. Plata, cobre, oro y aluminio son los metales

más difíciles de tratar por LASER, ya que tienen los valores más altos de conductividad térmica (dada en $J/cm \cdot s \cdot ^\circ C$).

Potencia del láser (watts)	Material	espesor (mm)	Velocidad de corte (m/min)															
			0	0.5	1	2	4	8	16	32	64							
1500	Acero	12																
1500	Acero	6																
1500	Acero	3																
1000	Acero	6																
1000	Acero	3																
1000	Acero	1																
1500	Acero inoxidable	8																
1500	Acero inoxidable	4																
1500	Acero inoxidable	2																
1000	Acero inoxidable	3																
500	Acero inoxidable	1																
1000	Titanio	4																
1500	Aluminio	3																
1500	Aluminio	0.8																
800	Plexiglas	10																
120	Plexiglas	3																
500	Caucho	3																
500	Cartón	2																
340	Vidrio	1.5																
1000	Fibra de carbono	0.8																
800	Cuero	2																
1000	Polietileno	2																
150	Poliestireno	20																
150	Poliestireno	40																

Tabla 4.2 Velocidades de corte para algunos materiales de espesores diferentes, usando un LASER de CO₂ de diferentes potencias

Mecanismo de Corte

En la técnica de corte mediante LASER la extracción del material se realiza por evaporación del mismo a lo largo de toda la zona de corte. El calor necesario para conseguir esta evaporación viene proporcionado por un sistema constituido por la fuente del haz LASER y la boquilla, que incorpora la óptica de focalización y permite el flujo de gas de aporte, acoplado todo ello a un conjunto mecánico automatizado que permita el movimiento relativo entre el haz y la pieza a cortar(19).

La transmisión de calor al material se realiza mediante la focalización del haz sobre la superficie, elevando su temperatura hasta el punto de ebullición y con la

consiguiente evaporación. La temperatura de la zona adyacente es algo inferior con lo que sólo se produce la fusión del material. La densidad de energía en la zona de corte ha de ser del orden de 10^6 W/cm².

La longitud focal de la lente a utilizar depende del espesor del material. Para planchas gruesas es necesario una mayor profundidad de campo, lo que se consigue con lentes de focal largo. Por ejemplo, para el corte de planchas de 2 mm se suelen utilizar lentes de 1.5 pulgadas mientras que para planchas de 10 mm se aconseja la utilización de lentes de 5 pulgadas.

Además del haz incidente se utiliza un flujo coaxial de gas de aporte el cual realiza varias funciones: contribuye a la expulsión del material a presión al incidir sobre la superficie de corte, produce el corte por oxidación en los metales y protege la óptica de la incidencia de partículas procedentes de la zona de corte.

El haz focalizado y la corriente de gas de aporte inciden sobre la cara superior de la superficie a cortar. Parte del haz es reflejado y parte es absorbido. Esta fracción de energía absorbida provoca un aumento de la temperatura evaporando una zona del material e iniciando así el corte. A partir de este momento, el calor se propaga preferentemente en profundidad hasta atravesar la totalidad del material. El cilindro de material evaporado constituye el llamado frente de erosión(7). Concéntricamente a este frente se forma una fina capa de material fundido separando la zona de corte del bloque sólido. Este frente avanza, siguiendo el movimiento, trazando la línea de corte.

En el caso de utilizar un gas aporte no inerte(19) se produce una reacción exotérmica que contribuye a calentar esta zona de material fundido alcanzando temperaturas superiores al punto de ebullición. Este fenómeno provoca una fuerte evaporación en la superficie de la capa fundida con gran eliminación de material. Además, una fracción de la zona fundida es arrastrada fuera de la pieza debido a la presión del gas.

Para materiales de poco espesor, del orden de 1 o 2 mm, la eliminación del material por evaporación domina debido a la alta temperatura producida. A medida que aumenta el espesor de la pieza la contribución de la eliminación de material en forma líquida crece en comparación con la evaporación porque la temperatura de la capa fundida disminuye.

Corte de Metal

Nos encontramos con el problema ya conocido de la alta reflexión que las superficies metálicas ofrecen a la radiación de $10.6 \mu\text{m}$ de los LASER's de CO₂. Para solventarlo se requiere el empleo de altas densidades de potencia en la zona de trabajo. Esto repercute en el rendimiento del proceso, obteniéndose peores valores que en el caso de los no metálicos.

Es característica la aparición de un estriado -la aparición de rayas uniformes- en toda la superficie del corte. La irregularidad de estas estrías se ha comprobado que aumenta con el espesor del material, obteniéndose las mejores calidades de corte para láminas delgadas.

Existen diversas teorías sobre la formación de estas estrías u ondulaciones entre las que se incluyen la influencia de la variación de temperatura o de las reacciones generadas por la interacción de la radiación.

En el proceso de corte de materiales que incorporan hierro en su composición, se utiliza oxígeno como gas de aporte. La zona de corte es calentada por el haz hasta temperaturas en las cuales se combina con el oxígeno. Se produce entonces una reacción de oxidación exotérmica, liberando una gran cantidad de energía. Esta energía se propaga radialmente a una velocidad superior a la de corte. El frente de oxidación avanza hasta ser alcanzado de nuevo por el haz. Este proceso se repite a lo largo de todo el corte, pudiendo ser el responsable de este estriado.

La amplitud y frecuencia de estas estrías es aleatoria cuando se trabaja en modo continuo, pero son controladas al operar con un LASER pulsante, mejorando la calidad del corte. Así por ejemplo, cuando se corta acero dulce de 1.25 mm de espesor con un LASER de CO₂ de 450 W, los mejores resultados se obtienen trabajando en modo pulsado a una frecuencia de 500 Hz de los pulsos.

El acero al carbono permite ser cortado con un LASER de CO₂ de 1 kW hasta de un espesor de 15 mm, consiguiéndose cortes de anchuras comprendidas entre 0.1 y 0.3 mm, donde el gas de aporte es oxígeno. La zona de afectación térmica es mínima, especialmente en aceros dulces y aceros con bajo contenido de carbono. El corte resultante es pulido, de ángulos rectos y con baja rugosidad. La presencia de fósforo y azufre en la composición del acero dulce origina a veces el oscurecimiento del corte por su combustión. Si el porcentaje de carbono es elevado se obtienen mejores calidades, pero la zona de afectación térmica es más amplia.

En el caso del acero inoxidable se consiguen también buenas velocidades de corte. Éstas son inferiores a las logradas por el acero carbonado debido a que el acero inoxidable no reacciona tanto con el oxígeno. Si se sustituye por un gas inerte, como el nitrógeno, la velocidad de corte se reduce en un 50%, pero se protege de oxidación el borde de la zona cortada. El fácil control de calor aplicado a la pieza permite minimizar la zona de afectación térmica, lo cual también mantiene la propiedad de resistencia a la oxidación.

En los aceros martensíticos y ferríticos (serie 400)(7), el corte es pulido y sin rebabas. La presencia de níquel en aceros austeníticos (serie 300)(7) altera las condiciones de transferencia de energía del LASER al material. Más exactamente,

la viscosidad del níquel fundido durante el proceso causa su deslizamiento hacia la parte inferior del corte donde se solidifica. Esto provoca la formación de rebabas, más evidentes cuanto mayor sea el contenido de níquel y el espesor del material.

El titanio absorbe la mayor parte de la radiación procedente de un LASER de CO₂, con lo cual es un buen candidato para ser cortado por LASER. Con la utilización de un flujo de oxígeno se consiguen altas velocidades de trabajo pero se crea una capa de óxido(8).

Utilizando LASER's de alta potencia, del orden de 2 kW, se han conseguido cortar láminas de cobre de un espesor de hasta 4 mm, a pesar de la alta reflexión inicial. Como en el caso anterior, se ayuda con oxígeno con la consiguiente formación de óxido. El acabado es pulido, con ausencia de escoria y baja rugosidad. Las velocidades alcanzadas para una plancha de 0.6 mm son del orden de 150 mm/min.

Corte de Plástico

Los plásticos constituyen uno de los campos de mayor aplicación del corte de materiales no metálicos por LASER. Absorben la radiación procedente de un LASER de CO₂ en un porcentaje muy elevado, cercano al 100%.

El alto nivel de absorción permite por un lado trabajar con LASER's de potencias bajas, a partir de 30 W, y por otro alcanzar altas velocidades de corte cuando se utilizan LASER's de potencias superiores a 1 kW. De esta manera se pueden tratar acrílicos, poliestireno, PVC, polipropileno, policarbonato, poliuretano, poliamidas, con espesores que llegan hasta los 30 mm promedio(7).

La calidad del corte depende fundamentalmente del tipo de plástico ya que cada uno se comporta de modo distinto frente a la radiación. Los que presentan mejores resultados son aquellos cuyo punto de fusión es preciso y elevado, no presentan descomposición con el aumento de la temperatura y los vapores formados no tienen coloración.

Independientemente del tipo de plástico, un factor importante para conseguir cortes de calidad es la distancia existente entre el punto focal y la superficie del material. Variaciones de posición relativa entre el foco y superficie afectan a la anchura del corte y a la forma del mismo. Focalizando el haz a una cierta distancia por encima de la superficie, se obtienen cortes anchos con las paredes del corte rectas y paralelas. Cuando se focaliza en el interior del material, la anchura del corte en la parte superior es mayor que en la inferior, mostrando las paredes una forma cónica. En conjunto el corte es más estrecho, consiguiéndose los mínimos valores cuando se sitúa el punto focal a 1/3 del espesor total del material. Si el punto focal coincide con la superficie, la anchura y forma del corte son intermedios de los casos anteriores.

En el corte de metacrilato(7) es donde se obtienen los mejores resultados. Cuando se trabaja con policarbonato o PVC la calidad del corte es muy buena, pero debe prestarse atención a la eliminación de los vapores ya que éstos pueden manchar la superficie de la pieza. En el caso de operar con polietileno(7), algo transparente a la radiación, la calidad del corte viene afectada por la formación de gotas y rebabas en los bordes del mismo.

La variación de la velocidad de corte de plásticos acrílicos para una potencia dada están en función del espesor. Para una misma potencia, las velocidades aumentan con la disminución del espesor.

En el corte de metacrilato el gas de aporte desempeña un papel muy importante. La determinación del flujo adecuado para conseguir resultados óptimos, además de la elección del tipo de gas, requiere un estudio para cada tipo de proceso en los que intervenga este material. De este modo, el empleo de un gas de aporte, como nitrógeno o argón, proporciona una mayor protección frente a la posible combustión o inflamación de los vapores formados que la suministrada por un flujo de aire. Sin embargo, el aire puede constituir un buen gas de aporte económico si se emplea un sistema potente de aspiración de vapores. El gas de aporte contribuye al mismo tiempo al enfriamiento de la zona cortada. Si la presión del gas es excesiva los vapores formados se depositan de nuevo en el ángulo superior del corte. Debido a que aún está ligeramente caliente se adhieren con facilidad y forman una fina línea de rugosidad; en caso contrario la superficie de corte aparece lisa y brillante.

Corte de Madera

Una de las aplicaciones del corte de madera por LASER con mayor tradición es la fabricación de troqueles para la industria de embalajes de cartón. Desde aproximadamente veinte años en el Reino Unido se emplean sistemas LASER que incorporan una fuente de LASER de CO₂ de 300 W de potencia operando en modo continuo. Mientras que la fuente permanece estática las piezas se desplazan debajo del haz por medio de unos ejes de coordenadas móviles gobernadas por control numérico.

Utilizando una lente de 5 pulgadas, con flujo coaxial de nitrógeno, se consiguen ranuras limpias de carbón en el corte de madera de arce laminada y contraplacada(7) de 18 mm de espesor.

La madera absorbe la radiación LASER casi en su totalidad. Las temperaturas que se alcanzan en la zona de corte son superiores a los 5,000 °K. La energía absorbida rompe los enlaces orgánicos del material(1) produciéndose los residuos típicos de la combustión de madera en ausencia de oxígeno, como son carbonilla, alquitranes y algunos hidrocarburos gaseosos, los cuales pueden ser fácilmente extraídos con un aspirador convencional.

La cantidad de residuo formado en el corte depende en gran medida del tipo de madera. Así, al cortar maderas nobles, se observa un ligero oscurecimiento de la zona cortada debido a la combustión producida. Cuando se trata de tablero, formado por capas sucesivas de maderas pegadas, el corte aparece mucho más oscuro, en especial en la zona del pegamento, observándose bandas más claras, correspondientes a las propias capas de madera. Si la madera a cortar está constituida por aglomerado, en el que la madera se forma de pequeñas astillas y aserrín prensados con pegamento, el resultado es un corte uniforme y muy oscuro de carbonilla.

La velocidad de corte depende entre otros factores del espesor del material. La anchura del corte comprendida entre 0.2 y 0.8 mm, es controlada por la potencia del LASER, la velocidad del proceso y la distancia entre el punto focal y la superficie del material.

El gas donador desempeña un papel importante en el acabado del corte. Si se emplea un gas inerte como el nitrógeno se crea una atmósfera local exenta de oxígeno, minimizando las posibilidades de combustión. Para aquellas aplicaciones en las cuales el oscurecimiento del corte sea admitido puede utilizarse como gas donante un flujo de aire.

Una de las grandes ventajas de la utilización del LASER en el corte de madera es la ausencia de contacto con la pieza. Gracias a esto se eliminan todos los inconvenientes causados por el clásico desgaste de las hojas de sierra. Por otra parte evita posibles deformaciones o fracturas en la pieza, permitiendo el corte de maderas frágiles como las usadas en marquetería.

Corte de Otros Materiales

A pesar de que las aplicaciones industriales recaen mayoritariamente en el corte de metales, plásticos y maderas, existe una gran diversidad de materiales que también pueden ser tratados por LASER. Entre estos encontramos piel, tela, cartón, papel, vidrio, cerámica, etc.

El corte de tela tiene una clara aplicación en la industria de la confección. La capacidad de seguir la complicada forma de los patrones y de obtener cortes limpios y sellados con objeto de evitar el posterior deshilachado hacen del LASER la herramienta idónea. Así por ejemplo, LASER's del orden de 300 W, montados en sistemas completamente automatizados, consiguen velocidades de corte del orden de 1.5 m/min. Se llegan a cortar cerca de 40 trajes por hora.

Otro caso distinto lo tenemos en el corte de tejido acrílico para peluches donde los troqueles tienen el inconveniente de segar el pelo. Por medio de un LASER, se corta únicamente la base del tejido, manteniendo intacto todo el pelo.

En cartones ondulados el efecto de la combustión causa un ligero oscurecimiento del corte, pero al no existir contacto físico con la herramienta no se produce ningún tipo de deformación. Con un LASER de CO₂ de 100 W se pueden alcanzar velocidades de corte de hasta 8,000 mm/min.

El procesado por métodos clásicos de materiales cerámicos presente gran dificultad debido a su gran dureza y extrema fragilidad. La gran importancia de este tipo de materiales en el campo de la electrónica ha hecho que se investiguen nuevos procesos de mecanizado. El LASER ha resultado ser de gran eficacia en este tipo de operaciones, experimentando en la actualidad un gran auge. El LASER de elección en este caso será de CO₂, trabajando en modo pulsado con el fin de disminuir al máximo la concentración de calor que podría causar microfisuras o llevar a la rotura de la pieza.

Comparación con Otras Técnicas de Corte

Las técnicas que compiten con el LASER en el corte de materiales son la preñe, la sierra, el oxicorte, la electroerosión y el chorro de agua(7).

Frente a los métodos mecánicos la principal ventaja del LASER reside en la ausencia de contacto con la pieza y una mayor rapidez de la operación. El costo de la inversión inicial se compensa con los gastos que originen el desgaste de las sierras y troqueles. Además, gracias a la utilización de sistemas automatizados, el LASER ofrece una mayor versatilidad.

Si se trata de electroerosión, el LASER es más rápido y más barato una vez en funcionamiento, pero los costos iniciales son más altos.

El chorro de agua comparte con el LASER la propiedad de no establecer contacto con la pieza. Además no origina ninguna afectación térmica y puede cortar espesores mayores. Sin embargo en el chorro de agua las velocidades de corte son inferiores con un costo de funcionamiento mayor. Por otra parte la instalación es más voluminosa.

La elección del sistema más apropiado dependerá de las necesidades y tipo de producción de cada empresa, aunque el nivel de introducción del LASER en la industria es cada día mayor.

4.1.3 Soldadura de Materiales

Introducción

Para entender la posible aplicación del LASER en el campo de la soldadura partiremos de la idea de que soldar es la acción de unir dos materiales calentándolos hasta su punto de fusión y uniéndose al solidificarse. Bajo este punto de vista el LASER se utiliza como la fuente de calor capaz de fundir los materiales a unir.

En la década de los ochenta, coincidiendo con la obtención de LASER's de algunos kilowatts de potencia, la soldadura por LASER ha sido objeto de numerosos estudios(7). Los resultados obtenidos presentan al LASER como una herramienta muy útil, tanto en la soldadura de elementos metálicos de hasta 20 mm de espesor como en la microsoldadura de componentes próximos a elementos altamente deteriorables con el calor, como por ejemplo se dan en la industria de la electrónica.

En la actualidad las industrias del automóvil, aeroespacial y naval han incorporado el LASER en sus líneas de montajes para soldar una gran variedad de materiales. Entre estos se encuentran el plomo, metales y aleaciones preciosas, el cobre y sus aleaciones, el aluminio y sus aleaciones, el titanio y sus aleaciones, materiales refractorios, aceros inoxidables, aleaciones de níquel y hierro resistentes al calor.

Los materiales no metálicos, como los plásticos, también se pueden soldar mediante el LASER. El fundamento es el mismo: conseguir la fusión de los materiales para que al solidificarse se unan. Las limitaciones en este campo no vienen del LASER sino de las características físicas de los plásticos, y hacen que su utilización sea mucho menor que en el caso de los metales.

Los factores que determinarán la posible aplicación del LASER, así como el tipo y la potencia del mismo son: el coeficiente de difusión térmica(7) y el punto de fusión y ebullición del material, que determinarán la cantidad de energía necesaria para fundir el material, y el grado de absorción o de reflexión de la superficie

Otros parámetros importantes en la soldadura por LASER son la geometría de la unión (diseño, accesibilidad); las mínimas tolerancias aceptables (distancia entre piezas); así como los referentes al gas de aporte (o donador) y al plasma -el vapor de metal que se forma encima de la zona de incidencia del haz-(7) que se pueda formar en el punto de soldadura.

A continuación se resumen los parámetros a tener en cuenta en la soldadura por LASER

Material Propiedades ópticas de la superficie a la radiación
Propiedades térmicas, como conductividad y difusión
Temperatura de ebullición y fusión
Facilidad de soldadura

Geometría de la Unión Diseño
Tolerancias
Accesibilidad

LASER Potencia promedio y pico
Modo continuo o pulsado
Modos de propagación
Longitud de onda

Proceso Velocidad de soldadura
Longitud focal utilizada
Posición relativa del punto focal y la pieza
Tipo de gas de aporte (o donador)

Tipos de LASER's útiles para la Soldadura

En el mercado se encuentran cuatro tipos de LASER's útiles para la soldadura; el LASER de Nd:Vidrio, el de Rubi, el de Nd:YAG y el de CO₂. Los dos primeros sólo pueden operar en modo pulsado ofreciendo además un rendimiento muy bajo, lo que hace que sólo se utilicen en casos en los que sea importante la localización de la soldadura. Los más utilizados en la industria son el LASER de Nd:YAG, y el LASER de CO₂. De éstos se utiliza principalmente su emisión característica de 1.06 μm y 10.6 μm respectivamente.

Para proporcionar la densidad de potencia necesaria para fundir el material, el LASER puede operar en modo continuo o en modo pulsado. El LASER de Nd:YAG opera generalmente en modo pulsado, aunque también puede hacerlo en modo continuo, mientras que el LASER de CO₂ opera tanto en modo pulsado o continuo.

Para la soldadura con LASER de CO₂ se puede utilizar un modo de pulsación estándar en el cual se producen pulsos cuya potencia máxima es el doble del nivel de potencia en onda continua. Este pico de potencia elevada desciende al nivel de potencia en onda continua y se mantiene en este nivel hasta el final del pulso. En la soldadura de metales la duración del pulso es generalmente de 3 a 6 milisegundos, pero el pico de potencia sólo existe en el primer milisegundo. Si se emplea un modo de pulsación intensificado, el pico alcanza un nivel máximo de potencia de unas cinco veces el nivel de potencia del LASER en onda continua. Este pico desciende rápidamente a un nivel de potencia menor que el de onda

continúa debido a que el LASER está operando al borde de la corriente de saturación. Trabajando en forma pulsada intensificada el LASER es muy estable y muy útil para la técnica de soldadura en profundidad.

Otra de las ventajas de operar en modo pulsado es la menor formación de plasma, mejorando con ello el rendimiento del proceso. El plasma que se forma se sitúa justo en la zona de trabajo, donde incide el haz con el material absorbiendo gran cantidad de energía antes de que ésta llegue a la pieza.

Para que se forme el plasma es necesario superar el umbral de ionización en la zona. La ionización creada por la interacción del haz LASER con la atmósfera creada sobre la soldadura, compuesta por el gas donante y vapores procedentes de la misma, contribuye a alcanzar dicho umbral. Con la utilización de un LASER pulsado se reduce el tiempo de interacción, la ionización de la zona es menor y el plasma no llega a formarse.

Los LASER's de Nd:YAG no pueden cortar ni fundir materiales transparentes tales como vidrios o plásticos, mientras que los LASER's de CO₂ sí lo permiten. Los LASER's de CO₂ existentes en el mercado son de potencias promedio mucho más altas y energéticamente más eficientes que los LASER's de Nd:YAG. Para igual potencia promedio los LASER's pulsados de Nd:YAG son considerablemente más pequeños que los LASER's de CO₂.

Soldadura de Metales

El principal problema que nos encontramos para soldar metales es el alto coeficiente de reflexión que éstos presentan a la radiación de 10.6 μm y 1.06 μm . Sin embargo, la absorción de la radiación es función de la temperatura del material. Se trata, por consiguiente de calentar lo suficiente la superficie del material a fin de que la reflexión de la radiación disminuya y la energía quede absorbida. Esto hace que para la soldadura de metales con alta reflectividad, como el aluminio y las aleaciones de cobre, el LASER Nd:YAG sea el más apropiado.

Para conseguir superar este valor de umbral de potencia y fundir el material el haz LASER se focaliza sobre la superficie, obteniéndose densidades de potencia comprendidas entre 0.5×10^6 y 5×10^7 W/cm². Se puede utilizar un LASER en modo continuo de alta potencia, o bien un LASER pulsado con una frecuencia de pulsos suficiente para producir su solapamiento.

Microsoldadura

Un campo de aplicación muy importante de la soldadura por LASER la industria de la electrónica. En ella se aprovecha por un lado la posibilidad que ofrece la soldadura por LASER de extrema localización de la misma, y por otro la fiabilidad

del proceso. Ésta se aplica en la realización de soldaduras próximas a uniones vidrio-metal o a componentes deteriorables por el calor y en el sellado de componentes electrónicos de gran valor o baja producción que deben garantizar su funcionamiento incluso bajo severas condiciones ambientales. Este es el caso de elementos destinados a aplicaciones aeronáuticas, tanto civiles como militares(1).

Puede utilizarse para soldar paquetes planos de circuitos integrados impresos sobre tabillas. Ésta tiene zonas grabadas de cobre que se estañan previamente. Un haz LASER de 50 W, enfocado con una lente de 2.5 pulgadas, se dirige a cada zona para refundir la soldadura en la unión, en 60 milisegundos. Con este método la aplicación de calor a la placa es mínima porque sólo se dirige la cantidad de energía que se requiere para que la soldadura vuelva a fluir. Componentes pequeños, como capacitores y resistencias en plaquitas también pueden soldarse en una tabilla de circuito impreso empleando técnicas de LASER.

Ventajas de la Soldadura LASER y Comparación con Otras Técnicas

La principal ventaja de la soldadura LASER frente a las otras técnicas de soldadura es la ausencia de contacto con el material. Esto elimina la distorsión mecánica de las piezas, particularmente en la soldadura de láminas delgadas. Uniendo a esto la dirigibilidad del haz es posible la realización de soldaduras en áreas muy restringidas, siempre que exista una línea óptica de visión. Mediante la utilización de espejos o de fibra óptica pueden realizarse soldaduras en zonas de difícil acceso, como pueden ser oleoductos y reactores nucleares(7). Estas cualidades permiten utilizar el LASER en sistemas automáticos de soldadura a alta velocidad. En soldadura completa de plancha delgada se alcanzan velocidades comprendidas entre 6 y 8 cm/min, mientras que en soldadura por puntos se pueden alcanzar velocidades de 150 a 300 cm/min. Debido a la focalización del haz se produce un calentamiento de la pieza muy localizado, obteniéndose zonas de afectación térmica muy estrechas.

En comparación con la soldadura por haz de electrones la principal ventaja es poder trabajar a presión atmosférica, así como la posibilidad de efectuar soldaduras en materiales magnéticos sin afectar a las propiedades de los mismos. También es importante la ausencia de producción de rayos-x, características de la soldadura por haz de electrones. En el caso de soldadura por LASER el único peligro proviene de la reflexión de parte del haz hacia el exterior del sistema. Para evitar lesiones con el operario basta con encerrar la zona de soldadura mediante chapas de metal si se utiliza un LASER de Nd:YAG. En el caso de trabajar con un LASER de CO₂ pueden utilizarse también vidrio o plástico. Las ventajas que ofrece la soldadura por haz de electrones frente a la soldadura por LASER son la disponibilidad en el mercado de fuentes de mayor potencia y la mayor absorción que los materiales presentan frente a los electrones que frente al haz LASER,

especialmente en el caso del CO₂. La experiencia indica que para la realización de soldaduras con penetraciones de hasta 8 mm la técnica de soldadura por LASER ofrece mejores resultados.

4.1.4 Perforado de Materiales

Introducción

Poco después de la invención del LASER en la década de 1960, se empleaba la primera máquina industrial que incorporaba un LASER de rubí para perforar troqueles de diamante para trefilar alambres (estirar hilos para reducir su diámetro). Esta fue declarada como la primera aplicación Industrial conocida del LASER a nivel de producción.

El perforado LASER continuó desarrollándose en Estados Unidos a lo largo de los años sesenta, empleándose para taladrar agujeros en componentes de motores en la industria aérea. Por entonces se utilizaban los LASER's de rubí y Nd:vidrio, adoptándose posteriormente el uso del LASER de Nd:YAG.

Este método ha demostrado ser un proceso seguro y efectivo durante más de quince años, y en la actualidad es conocido suficientemente bien como para ser considerado una de las herramientas imprescindibles para la obtención de un perforado de precisión y de alta calidad.

Geometría del Taladro

Cuando se trata de mecanización clásica, el diámetro y la forma del agujero vienen determinados por las características de la herramienta empleada. Del mismo modo, en el perforado con LASER influirán el tipo de LASER, la distribución de energía, el nivel de potencia, el sistema óptico y la técnica utilizada, así como el material a taladrar.

El diámetro del agujero se puede controlar variando la cantidad de energía suministrada por el haz y también por la longitud focal y el grado de desfocalización de la lente. El diámetro mínimo, vendrá determinado además por la longitud de onda del LASER. Un LASER de CO₂ producirá agujeros con diámetro mínimo de 0.07 mm en materiales de poco espesor, mientras que un LASER de Nd:YAG taladrará agujeros de 0.05 mm en chapas delgadas.

En condiciones favorables pueden obtenerse agujeros perfectamente cilíndricos, con un diámetro del orden de 0.1 mm y con una relación de profundidad/diámetro de 20. Esto es válido también para materiales muy duros que presentan dificultad para ser agujereados normalmente, como cerámica, diamante, acero templado o materiales refractarios.

Las ventajas de taladrar con LASER en una aplicación particular pueden ser la obtención de agujeros limpios, con poco material refundido, estrechos y profundos, además de la característica común a todos los procesos LASER de no ofrecer contacto con la superficie ni emplear herramientas adicionales, con lo que las fuerzas de mecanización son prácticamente nulas. Presenta además la posibilidad de actuar sobre lugares de difícil acceso o en ángulos estrechos respecto a la superficie, perforando agujeros de pequeñas dimensiones, donde las herramientas comunes suelen ser susceptibles de rotura.

El perforado con LASER es un proceso inducido térmicamente, en el que el material a tratar debe presentar una adecuada absorción óptica de la luz. De modo análogo al corte, se trata de un haz luminoso altamente direccional que puede focalizarse a pequeños diámetros para crear una elevada densidad de potencia. Con un diámetro de haz de 0.00254 cm y con una potencia de 500 W puede alcanzarse una densidad de potencia superior a 4×10^6 W/cm². Este nivel de potencia producirá calentamiento, fusión y vaporización en la mayoría de los materiales.

Suele utilizarse en modo pulsado ya que presenta dos efectos benéficos. El primero consiste en que la cantidad de energía transmitida al material puede regularse por el tiempo de duración del pulso. El segundo en que la primera parte del pulso puede presentar un pico de potencia varias veces superior a la potencia media absorbida cuando el LASER opera en modo continuo.

La profundidad de penetración de cada pulso depende del material, tamaño del haz focalizado, duración, frecuencia y energía del pulso y potencia pico del LASER.

La mayoría de los LASER's industriales de CO₂ pueden pulsarse a 2,500 Hz y algunos incluso por encima de 10,000 Hz. Los LASER's de Nd:YAG pueden ser pulsados a una frecuencia superior a 500 Hz.

La naturaleza del perforado LASER conduce a agujeros ligeramente cónicos, siendo el diámetro de entrada algo superior que el de salida. Esto depende en gran medida de si emplea un único pulso energético para la penetración completa o bien varios de menor energía. Para taladros de profundidades inferiores a 0.3 mm, el efecto cónico es pequeño, pudiéndose utilizar el método de un sólo pulso. Para agujeros más profundos, se conseguirá menor distorsión usando varios pulsos de corta duración. Como en el corte y soldadura LASER, el perfil del procesado dependerá de la posición relativa entre el plano focal y la superficie de la pieza y de la profundidad de campo. Ésta última dependerá a su vez de la longitud focal de la lente. Alrededor del punto focal, el diámetro del haz es mínimo, constituyendo la profundidad de foco.

Técnicas de Perforación LASER

Dependiendo del material, el perforado con LASER se realiza por vaporización, fusión, o por una combinación de ambos fenómenos físicos. Así, en los metales se produce la eliminación del material en estado líquido y vapor, formándose pequeñas gotas de metal que deben expulsarse del agujero. Esto ocurre gracias a la simultánea formación de vapor que al expandirse crea un aumento de presión que empuja al metal fundido, pero suele ayudarse por el empleo de un flujo coaxial de gas de aportación que lo empuja a través del orificio de salida.

Una fracción del material se solidifica formando una fina capa que recubre el interior de las paredes del agujero, conociéndose por el nombre de *refundido*. Dicha capa suele ser de unas milésimas de espesor, dependiendo en cualquier caso del tipo del material, del número de pulsos, su duración y energía, así como de los parámetros concernientes al gas de aporte. La proporción de líquido obtenida frente a la de vapor depende de la duración del pulso. Cuanto mayor es la amplitud del pulso mayor es la fracción líquida formada, con lo que aumenta la eficacia, pero presenta al mismo tiempo el inconveniente de causar un incremento en el espesor del refundido.

Los LASER's más usados en la industria para perforación son los de rubí, Nd:vidrio, Nd:YAG y el de CO₂. La elección del LASER más apropiado para cada aplicación está siempre supeditada al tipo de material a perforar, diámetro y profundidad del agujero, requerimientos finales de la superficie y acabados, así como de la velocidad de producción y costo del equipo.

A continuación se resumen los tipos de LASER's industriales para el perforado.

LASER	Longitud de Onda (μm)	Potencia (W)	Velocidad de Pulso (Pulsos por segundo)
Rubi	0.88	40	1
Nd:Vidrio	1.08	40	0.5
Nd:YAG	1.08	100-400	400
CO ₂	10.80	50-1500	5000

Ventajas y Desventajas del Perforado LASER Frente a un Proceso sin LASER

El perforado con LASER es una solución alternativa a otros procesos mecánicos de perforado que ofrece en muchos casos ventajas significativas: rapidez en el taladrado de agujeros, excelentes calidades geométricas y metalúrgicas, junto con una disminución de los costos de producción, han demostrado la flexibilidad y potencial de esta técnica.

En alguna aplicación concreta se presenta como la única alternativa posible de mecanizado, como en el caso del corte y perforado de substratos cerámicos para electrónica donde otros métodos fracasaban al intentar obtener pequeños

agujeros en láminas de poco espesor, produciéndose microfracturas y fisuras en las piezas mecanizadas.

Sin embargo, no es una solución para todos los problemas de perforación. Algunos materiales tales como oro, plata, o cobre, son difícilmente mecanizables por LASER debido a la alta reflectividad y conductividad térmica que presentan. En el caso de materiales no metálicos, como son algunos plásticos de bajo punto de fusión, puede disminuir la calidad del taladro debido al elevado porcentaje de fundido respecto al vaporado, agrandando el diámetro del agujero o formando gotas de difícil eliminación.

Desde el punto de vista energético el perforado LASER es un proceso costoso debido al hecho de que el material debe ser fundido y posteriormente vaporizado. Por ejemplo, en la mayoría de metales el calor necesario para la vaporización es aproximadamente unas diez veces al calor que hay que suministrar para conseguir su fusión.

Cabe destacar que el calor generado y sobrecalentamiento resulta extremadamente propenso a la ionización por el haz LASER, siendo la energía de ionización unas 100 veces mayor que la asociada a la fusión. El vapor ionizado se combina con los gases de alrededor y forma una zona de plasma, es decir, de gas ionizado. Éste tiende a absorber y al mismo tiempo a reflejar el haz LASER, impidiéndole alcanzar la superficie a mecanizar. Este efecto puede minimizarse con el empleo del LASER en modo pulsado, alcanzando altas densidades de energía y con la ayuda del gas de aporte que creará una atmósfera inerte no ionizable tan fácilmente.

Los principales competidores del perforado por LASER son el perforado mecánico, y el perforado por descarga eléctrica (E.D.M), aunque se utilizan también con cierta frecuencia los sistemas de haz de electrones o el mecanizado electroquímico (E.C.M).

Mientras que el perforado por métodos mecánicos compite con ventaja en el bajo costo de inversión del equipo, presenta el inconveniente del costo de mantenimiento generado por el desgaste y roturas de brocas. El LASER, una vez realizada la inversión inicial, resulta competitivo ya que los costos por consumibles son mínimos. Los taladros son de calidad superior y sin rebabas, pero vienen limitados por el espesor máximo de la plancha a perforar.

Comparado con el sistema E.D.M la principal ventaja del equipo LASER es su alta flexibilidad y el menor costo por operación. El perforado por descarga eléctrica necesita el empleo de electrodos. La velocidad global del proceso es lenta, aunque la calidad de los agujeros obtenidos es superior y no presenta forma cónica.

4.1.5 Consideraciones en el Uso de LASER's Industriales

Una de las consideraciones más importantes que se debe tomar en cuenta en la implementación de un Sistema LASER para usos industriales, es el gasto inicial que se tiene que hacer. En el costo inicial no sólo se debe tomar en cuenta el precio del dispositivo, que por sí solo es alto, también se debe considerar que, generalmente, se requiere ampliar la capacidad de las instalaciones de suministro de agua y de energía eléctrica(19). Además se necesita contar con medidas de seguridad más fuertes, debido a los altos voltajes que se necesitan para accionar un LASER industrial y al potencial peligro que representa la mal operación de un haz LASER. A parte de los requerimientos materiales, se necesita capacitar al personal que va a operar el dispositivo.

Debido a lo anterior habrá empresas que no puedan hacer un gasto inicial tan alto, aunque es importante mencionar que el LASER, a futuro, puede aumentar la calidad y el nivel de producción y disminuir costos totales. El LASER una vez puesto en funcionamiento requiere de poco mantenimiento, así como de consumibles. Debido a estos motivos el LASER es una inversión que se puede recuperar a mediano plazo y puede aportar mejoras significativas a los procesos industriales.

Otra consideración que se tiene que hacer, con respecto a la implementación de un Sistema LASER Industrial, es el giro de la empresa. No todas las empresas necesitan de demasiada precisión y calidad en el tratado de materiales -taladrado, soldadura, corte-, por lo que quizás sea suficiente la utilización de los métodos mecánicos tradicionales. Además el LASER tiene limitaciones en cuanto al tipo de material a tratar; ya que su uso depende de las propiedades físicas del material -reflectividad, conductividad térmica, punto de fusión y ebullición, etc.-, así como de sus dimensiones y forma, y de la accesibilidad que se tenga para trabajar con el material. Por estos motivos, no siempre el LASER satisface las necesidades de un proceso.

Por el contrario, si el material puede ser tratado por LASER, éste puede ahorrar tiempo, costos y aumenta la calidad y productividad de la empresa. Además hay operaciones donde sólo las técnicas con LASER han sido exitosas. Por ejemplo, en la industria naval y aeroespacial el LASER de CO₂ de Gas Dinámico (ver Capítulo 3) es utilizado para el corte de placas metálicas con alta precisión, lo cual es imprescindible. Con otras técnicas se había fracasado debido a su poca precisión en el corte y deformación del material. Otra ventaja del LASER es la posible total automatización del sistema, haciéndolo todavía aún más eficiente

La última consideración por hacer, no sólo involucra a los Sistemas LASER industriales, sino a todos los LASER's existentes para usos multidisciplinarios. Esta consideración consiste en comparar las grandes ventajas que presenta la luz LASER (luz coherente) contra la baja eficiencia del LASER, energéticamente

hablando. Un LASER aproximadamente tiene un eficiencia en el rango de 0.001 %, típica de los LASER's de argón ionizado, hasta 20%, característica de los LASER's de CO₂. Esta eficiencia es considerablemente baja si se compara con otros sistemas eléctricos. Pero aquí viene la gran disyuntiva, la *luz coherente* que emite el LASER.

La luz coherente tiene propiedades únicas(14) que las otras fuentes de luz no tienen. Un LASER emite un haz coherente, es decir, emite energía en la forma de cuantos de luz a una misma frecuencia (monocromática), esto es, con la misma longitud de onda, y con la misma fase y dirección, por lo que el haz presenta poca divergencia(14). Además el haz LASER tiene una gran colimación(14), por lo que se pueden alcanzar altísimas densidades de potencia, inalcanzables por las demás fuentes de radiación.

4.2 Otras Posibles Aplicaciones

4.2.1 Comunicaciones por Fibra Óptica

En el amplio espectro electromagnético se incluyen las bandas angostas de luz visible e infrarroja, con frecuencias mucho mayores y, por lo mismo, con longitudes de onda más pequeñas que las de radio.

El uso de esas ondas de luz, como portadoras de señales de información, ha sido largamente considerado a causa de su gran capacidad de ancho de banda, pero se había probado que era impracticable hasta hace poco. Esto se debía, principalmente, a que las fuentes de luz emitían pulsos de energía en forma aleatoria, que contienen varias ondas de frecuencia y fase diferentes (luz incoherente)(14), y porque los cables convencionales tienen una atenuación excesiva en las super altas frecuencias que se manejan.

El invento del LASER, el diodo emisor de luz (LED) y los cables de fibra óptica permitieron que estas ideas sean puestas en práctica. El LASER y el LED pueden pulsarse encendiendo y apagando muy rápidamente, y la atenuación del cable de fibra óptica es menor que la de los cables convencionales.

A continuación describiremos brevemente un sistema de comunicación por fibra óptica básico, desde sus componentes principales a su funcionamiento, para que se tenga una idea de la importancia que el LASER y la fibra óptica ha tomado en los sistemas de comunicación actuales.

Un cable de fibra óptica sencillo consiste básicamente en un núcleo interior de vidrio que permite el paso de ondas de energía luminosa; está completamente rodeado por un revestimiento exterior de vidrio que guía las ondas luminosas a lo largo del núcleo y minimiza las pérdidas de energía luminosa. El vidrio del núcleo tiene un índice de refracción diferente al del vidrio del revestimiento, lo que da como resultado que las ondas de luz se propaguen a lo largo del núcleo interior por una serie de reflexiones desde el revestimiento exterior. Algo de la luz es absorbida, o pérdida, de manera que la señal de luz debe ser reforzada en alguna distancia dentro de la fibra. Sin embargo, la tecnología ha avanzado a el punto de que las estaciones repetidoras no son requeridas por varios kilómetros, además el desarrollo de fibras ópticas mejoradas, así como la investigación con varios LASER's de estado sólido indudablemente han incrementado la distancia de propagación de una señal. Estas distancias son tan grandes ahora que la necesidad de reforzar una señal no restringe la instalación de cables de fibra óptica bajo los océanos para proporcionar nuevos sistemas de comunicación intercontinentales.

El núcleo y el revestimiento deben estar libres de cualquier impureza para evitar interrupciones de la energía luminosa. Algunos nuevos cables de fibra óptica

usan plásticos especiales, en lugar de vidrio, que resultan ser materiales muy puros con muy baja atenuación de las señales luminosas.

No obstante que los LASER's y los LED's son capaces de producir salidas de luz visible, los sistemas de telecomunicaciones de fibra óptica generalmente los usan como señales en la banda infrarroja con longitudes de onda desde aproximadamente $0.8 \mu\text{m}$ a $1.6 \mu\text{m}$. Gracias a los amplios anchos de banda disponibles a estas extremadamente altas frecuencias, los cables de fibra óptica son particularmente adecuados para sistemas digitales de alta capacidad, con rango en bits de más de 140 Mbits/s(13).

Las mejores tecnologías también incrementan continuamente las distancias a las que dichos sistemas pueden transmitirse antes de que sea necesaria la regeneración.

La línea de fibra óptica actúa como una guía de onda dieléctrica para portar energía luminosa proveniente del diodo LASER, la que es modulada por una señal eléctrica de información que puede ser de naturaleza analógica o digital. Las líneas de fibra óptica tienen varias ventajas sobre las líneas conductoras convencionales que portan ondas electromagnéticas con mucho menor frecuencia que las ondas de luz. Las ventajas pueden resumirse como siguen:

- Cables más ligeros, con un radio de flexión más pequeño, ocupan menos espacio en los ductos; son ideales para barcos y aeronaves en las que el espacio es muy importante, pues se necesitan menos hombres para su manejo.
- Un ancho de banda disponible muy amplio; se pueden transmitir simultáneamente señales de voz, datos y video por sistemas de alta capacidad.
- Secciones de baja pérdida más largas entre repetidores y regeneradores.
- Alta confiabilidad y larga vida.
- Está libre de interferencia electromagnética; puede usarse en situaciones eléctricas ruidosas.
- No hay inducción ni conducción; no hay radiación ni interferencia de otros circuitos y sistemas.
- Las continuas mejoras tecnológicas reducen constantemente el costo y se producen sistemas y dispositivos más eficientes.
- Mayor seguridad, ya que es muy difícil intervenir un cable de fibra óptica.

Cuando una onda de luz pasa de un material a otro, la dirección del viaje cambiará. A esto se le llama *refracción* y se demuestra simplemente observando cuando un popote recto parece curvarse cuando está parcialmente sumergido en agua. Cuando la onda luminosa llega a la unión de aire y otro material, como agua o vidrio, en un ángulo de incidencia ϕ_i , entonces el ángulo de refracción ϕ_r , con que abandona la unión es diferente del ángulo de incidencia. La razón $\frac{\sin \phi_i}{\sin \phi_r}$, es una constante para dos materiales cualesquiera y se llama *Índice de refracción* (n) para los dos materiales que están en contacto entre sí.

El núcleo de vidrio tiene determinado índice de refracción absoluto n_a , totalmente envuelto por un recubrimiento de vidrio que tiene un índice de refracción n_c menor que el del núcleo. El ángulo de incidencia en el cual ocurre primero la *reflexión total* es llamado *ángulo crítico* ϕ_c para los dos tipos de vidrio. Las ondas luminosas que inciden en ángulos mayores de ϕ_c , también serán reflejadas totalmente.

En la figura 4.3 se muestra el corte longitudinal de una fibra. Una onda de haz LASER (de semiconductor) que viaja a lo largo del núcleo y alcanza al recubrimiento en el ángulo crítico de incidencia ϕ_c se reflejará totalmente. Entonces, nuevamente toca la superficie opuesta del recubrimiento en el ángulo crítico ϕ_c , por lo que de nuevo se refleja totalmente. El haz LASER entonces se propaga a lo largo del núcleo por una serie de reflexiones totales del recubrimiento. Cualquier onda luminosa que toque el recubrimiento en un ángulo por debajo del valor crítico, pasará hacia el recubrimiento para ser absorbida por éste.

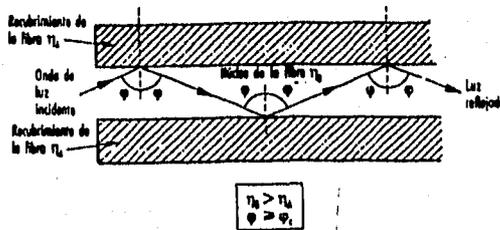


Figura 4.3 Propagación de la luz a lo largo de un núcleo de fibra óptica.

Sistemas de Telecomunicación por Fibras Ópticas

La información en forma eléctrica puede consistir en señales de voz o de video, o pulsos de señales digitales codificadas, como la de los sistemas PCM (Modulación por pulsos). Puede usarse cualquiera de ellas para modular la energía luminosa producida por la fuente (el diodo LASER).

La luz modulada se transmite a lo largo de la línea de fibra óptica, hasta que requiera regenerarse por una estación repetidora. En la terminal distante un detector, como un fotodiodo semiconductor, convierte de nuevo la energía luminosa modulada a la señal eléctrica digital analógica original. Ver figura 4.4.

Fuentes de Luz

La fuente de luz mostrada en la figura 4.4 debe entregar energía luminosa a la longitud o longitudes de onda requeridas, responder a la modulación por señales

de información eléctrica digital de baja potencia y entregar una potencia luminosa adecuada para ser enviada a lo largo de la fibra. Los diodos semiconductores contruidos con materiales especiales emitirán energía luminosa cuando se les opere bajo el control de potencia de polarización negativa, y la salida de la energía luminosa puede variarse o interrumpirse muy rápidamente.

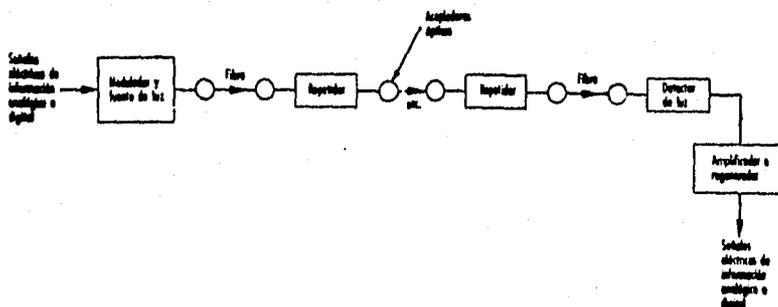


Figura 4.4 Sistema básico de telecomunicación unidireccional por fibra óptica.

Los materiales típicos son arseniuro de gallo (AsGa), arseniuro de aluminio de gallo (AsAlGa), y fosfuro arseniuro de gallo indio (PAsGaIn). Los diodos emisores de luz (LED) (sólo en distancias cortas) y los diodos de inyección LASER (injection LASER diodos, ILD) son dos de las principales fuentes luminosas que se usan actualmente. Sus dimensiones físicas son compatibles con las de las fibras ópticas, pueden emitir luz visible e infrarroja a las longitudes de onda que corresponden a las características de baja pérdida de las fibras ópticas, y la salida de energía luminosa puede controlarse rápidamente, por lo que son muy fáciles de modular. También tienen la confiabilidad y la larga vida típicas de los componentes de estado sólido.

Los LED's y los ILD's tienen ciertas similitudes, pero también diferencias importantes (ver Capítulo 3) que influyen en su elección para determinadas aplicaciones. Las fuentes LED emiten un haz de luz relativamente amplio con un espectro de ancho de banda bastante grande, por lo que son adecuados para cierta propagación. Las fuentes ILD radian un haz de luz mucho más angosto con un espectro de ancho de banda más estrecho, por lo que las fuentes ILD son compatibles con las fibras monomodales de índice escalonado(6).

El ancho del haz de luz y el ancho de banda del espectro de una fuente determinan la cantidad de potencia luminosa que puede enviarse por una fibra, y la cantidad de dispersión que ocurrirá en el ancho de banda de trabajo de la fibra. Un ILD puede enviar potencia luminosa dentro de la fibra en un rango aproximado de 0.5 a 5 mW, pero un LED se limita a alrededor de 0.05 a 0.5 mW. Un ILD puede modularse a una velocidad más rápida que un LED, y tiene un ancho de

banda modulada significativamente mayor, de más de 500 MHz, comparado con alrededor de 50 MHz que es el máximo del LED(6).

Sin embargo, un ILD necesita cierto control de retroalimentación para estabilizar la salida de luz. Los dispositivos ILD y LED de AsAlGa se usan para longitudes de onda en el rango de 0.8 a 0.9 μm . Se están desarrollando dispositivos PAsGain para aplicaciones de alrededor de 1.3 μm y 1.6 μm en la región Infrarroja donde las pérdidas y dispersión de las fibras son muy bajas(6).

Detectores de Luz

En la figura 4.4 se muestra un detector de luz; su función es detectar la señal luminosa modulada que viaja a lo largo de la fibra y convertir las variaciones o pulsos en las señales de información digitales o analógicas originales. Un fotodiodo semiconductor de polaridad negativa reversible conducirá, cuando está sujeto a la energía luminosa que choca con él. Si la corriente de salida se pasa a través de un resistor de carga, se obtiene un voltaje de salida.

Hay dos tipos principales de fotodiodos semiconductores, el diodo PIN y el fotodiodo de avalancha, APD. El diodo PIN tiene un material semiconductor intrínseco colocado entre las regiones tipo *p* y tipo *n*, y tiene una eficiencia de conversión de fotones de luz de entrada a electrones de salida menores a la unidad. Sin embargo, el APD provee una ganancia de conversión efectiva por la multiplicación de la portadora de la carga, lo que da como resultado la producción de múltiples electrones por fotón. Así, la elección entre el diodo PIN y APD depende enormemente de la sensibilidad requerida en el receptor y un costo aceptable.

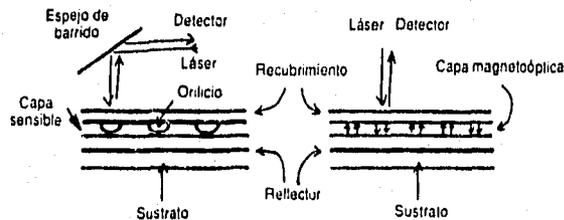
Repetidores

Los repetidores mostrados en la figura 4.4 se necesitan a intervalos regulares a lo largo de la línea de fibra para que la energía luminosa modulada no caiga debajo de un nivel detectable debido a las pérdidas: El repetidor consiste básicamente de un diodo PIN o un detector APD, un regenerador de pulso electrónico, y una fuente de luz LED o ILD para mandar las señales de luz modulada hacia la siguiente sección de la línea de fibra.

4.2.2 Almacenamiento Óptico de la Información

El almacenamiento óptico puede ser holográfico o digital. A causa del pequeño tamaño de las longitudes de onda visibles, se puede llegar a conseguir una densidad de almacenamiento muy alta. Los hologramas alcanzan su máxima densidad utilizando todas las partes de la película. Un almacenamiento en disco óptico codifica datos binarios como puntos claros y oscuros, o reflexivos o

transmitivos. Los datos se introducen quemando pequeños orificios en el disco o un recubrimiento reflexivo empleando un LASER de mediana potencia (Figura 4.5A). La lectura se realiza punto a punto, deflectando un haz LASER enfocado sobre cualquiera de las muchas pistas existentes, midiendo la cantidad de luz reflejada o transmitida. El método de lectura es optomecánico. Se dispone de un motor que gira el disco, mientras que un espejo orientable rastrea las pistas con el haz. Con un LASER de tan sólo 20 mW de potencia se puede quemar la superficie de una pista que se desplaza a 10 m/s. Para obtener estos niveles, se puede utilizar un LASER de semiconductor. La creación de cada agujero consume tan sólo 10^{-11} segundos, y la distancia entre orificios consecutivos es próxima a un micrómetro. En un solo disco se pueden almacenar hasta 10^{11} bits(13). La velocidad de lectura llega a alcanzar los centenares de millones de bits por segundo, leyendo varias pistas en paralelo de forma simultánea. Éste es el principio de funcionamiento de los reproductores de discos compactos. Como aplicación, se han desarrollado máquinas de entretenimiento que ofrecen imágenes de alta calidad, y a la vez son interactivas con el jugador. Estas máquinas contienen centenares de discos. También se han desarrollado computadoras que pueden leer información de discos ópticos.



A) Orificios perforados con LASER B) Dominios magnetoópticos borrables

Figura 4.5 Registro y lectura óptica con LASER sobre un disco con agujeros incorporados (no borrable), y con dominios magneto-ópticos (borrable por calor y por campo magnético)

La grabación LASER comentada en el párrafo anterior produce un disco permanente que no puede modificarse, lo cual resulta ventajoso en ciertas aplicaciones. Si se desean realizar cambios frecuentes en los datos, puede hacerse, porque la capacidad del disco es tan grande que se permite el lujo de crear un archivo nuevo, conservando el antiguo (lo cual es de agradecer en ciertas ocasiones en que se necesitan imperiosamente los datos anteriores). Se trabaja sobre discos ópticos borrables, de 8 o 12 cm de diámetro, que puedan reescribirse un número indeterminado de veces. Una de las posibilidades se basa en la utilización de recubrimientos magnetoópticos(10) (cobalto-gadolinio, por ejemplo) sobre la superficie del disco. Los datos se almacenan orientando pequeños dominios magnéticos sobre la superficie(Figura 4.5B). Cuando la luz

atraviesa un dominio, su polarización se gira de una forma o de otra. Los datos se detectan estudiando su polarización de la luz reflejada. Cuando se aplica un campo magnético, el calor del pulso LASER puede invertir la orientación del dominio. Aunque el sistema parezca semejante a la grabación magnética, no es necesario en ningún momento focalizar el campo magnético sobre una región concreta, por lo que el registro y lectura de los datos es potencialmente mucho más rápido; además, no existe el desgaste del disco, y la densidad del disco es mucho mayor. Los discos magnéticos convencionales tienen una capacidad de 1,000 millones de bits en el mejor de los casos; un sistema óptico puede conseguir superar este valor en un factor de 100.

El almacenamiento óptico de imágenes de video se encuentra comercialmente desde hace varios años. El método recuerda a los discos compactos digitales, a excepción de que los datos se codifican de forma semianalógica y no binaria(13), empleando orificios de diferente longitud en las pistas. Resulta además susceptible al polvo. Los videodiscos se desarrollaron como producción masiva, con un disco maestro creado directamente a partir de la matriz perforada por el LASER. Los discos almacenan hasta una hora de señales de video (ambas caras), equivalente a unos 400,000 millones de píxeles(13). La tasa de error está en uno en 10^5 , lo que resulta excesivo para datos de ordenador, incluso empleando procedimientos de corrección. Se espera que la adaptación del método a un sistema de registro completamente digital pueda tener soluciones técnicas y éxito comercial.

4.2.3 Holografía

El concepto de ver una fotografía dimensional que redituara en una tridimensional intrigaba al inventor de la holografía, Dennis Gabor. Él concibió la idea en 1947, y fue demostrada en 1948, además recibió el Premio Nóbel en 1971 por estos estudios. La primera demostración fue con luz ordinaria, pero la invención del LASER proporcionó otra fuente: luz coherente. Otros investigadores, como Emmett Leith y Juris Upatnieks, tomaron un gran interés en el concepto del uso del LASER, y no tardaron mucho para que esta experiencia visual intrigante fuese adaptada a la investigación y usos industriales, así como aceptada como una forma de arte(8).

El diagrama mostrado en la figura 4.3 muestra la luz emitida por un LASER dividida en dos partes, una para crear un haz objeto y la otra para servir como un haz de referencia. Es la Intersección, o interferencia, de los dos haces y el haz resultante proyectado sobre una película fotográfica lo que forma la imagen holográfica. Puesto que cada punto sobre el objeto es iluminado por el haz objeto, la reflexión interseca el patrón de referencia y la imagen resultante aparece

suspendida en el espacio de manera que el observador moviéndose alrededor de la imagen visualiza un objeto tridimensional. La representación dimensional sobre la película aparece teniendo volumen, con detalles minuciosos de las superficies escondidas que son fácilmente observables en el holograma.

Las aplicaciones industriales de la holografía incluye técnicas de pruebas no destructivas (NDT) para encontrar defectos en partes estructurales. La llamada interferometría holográfica; es el método de examinación de materiales para encontrar defectos, teniendo una exactitud en las dimensiones y observando los efectos del calor o de la vibración, u otros aspectos físicos que ha revolucionado el NDT, reemplazando a la radiografía en varios casos y ayudando a otros métodos de control de calidad para tener precisiones nunca disponibles hasta que el LASER fue adaptado a la holografía.

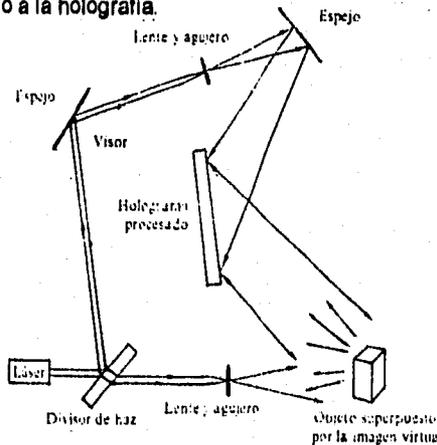


Figura 4.6 Diagrama que ilustra la técnica con un LASER para producir un holograma sobre una película.

Sin embargo, algunas de las técnicas más avanzadas con potencial uso en nuestra sociedad de alta tecnología incluye el almacenamiento de información, con lo cual la información escrita puede ser reducida a dimensiones tan pequeñas que toda la información de bibliotecas enteras se pueden almacenar. En la operación de robots, el reconocimiento de patrones almacenados en un banco de memoria ayuda a la realización de la decisión robótica. Los logos holográficos están siendo usados en bandas metálicas antifalsificaciones de tarjetas de crédito. También en este campo de identificación, los hologramas se usan para prestar seguridad a la circulación de moneda norteamericana (dólares), para evitar falsificaciones. Por último en las pinturas de grandes artistas por técnicas holográficas se pueden descubrir falsificaciones.

4.2.4 Aplicaciones Médicas

Introducción

El LASER es un eficaz escalpelo. Actúa de forma tan selectiva, que lo mismo penetra en el interior de la célula, que se adentra en un órgano dejando intacto lo demás, proeza inalcanzable por cualquier bisturí.

El refinamiento de su precisión en los últimos 30 años ha permitido ampliar las aplicaciones médicas del LASER, desde sus comienzos en que se aprovechaba el calor generado por el haz de LASER para destruir el tejido. Los efectos térmicos siguen hoy constituyendo la razón principal de su uso médico, pero empiezan a abrirse camino en el diagnóstico y la terapia otros efectos ajenos al calor. Además de calentar los tejidos, los fotones del haz LASER desencadenan reacciones químicas, rompen los enlaces atómicos que mantienen unidas a las moléculas y crean ondas de choque.

Se podrían citar muchas aplicaciones biomédicas del LASER, por citar algunas: limpieza de la luz de las arterias, disgregación de cálculos renales, eliminación de cataratas e incluso alteración del material genético. Con el LASER se extrae información del funcionamiento interno de las células, cuyo interés no es de la biología, sino en beneficio de la medicina.

El futuro realista de la cirugía LASER descansa en una mejor comprensión de los mecanismos básicos, físicos y químicos que involucran la interacción entre la luz y los órganos u orgánulos. Conocimiento que impondrá un criterio para establecer cuándo está o no indicado el empleo del LASER. "El saber reconocer que un escalpelo o una cuchilla de electrocauterización de costo bajo resultan, en determinadas circunstancias, más idóneos y menos peligrosos que un LASER de elevado costo constituye un requisito fundamental para que esta nueva técnica proceda abriéndose camino en el campo de la medicina" (16).

Oftalmología

Los primeros cirujanos recurrían al haz LASER por el calor intenso que generaba. Esa propiedad sigue explotándose todavía, a causa de su efecto destructor y al control preciso que permite tener su operación. Si la longitud de onda de la luz del LASER coincide con la banda de absorción de la zona diana, esta zona absorberá la luz del LASER y sufrirá la agresión consiguiente.

Por ejemplo, la melanina de la retina es un pigmento de color marrón que absorbe el haz verde del LASER de argón. Ello nos dice que el LASER de argón puede destruir regiones específicas de la retina sin dañar otras zonas del ojo, que

absorben la luz de diferentes longitudes de onda. Mediante este procedimiento se puede tratar eficazmente la retinopatía diabética -es una enfermedad no inflamatoria de la retina en pacientes diabéticos- una enfermedad degenerativa que causa buena parte de las cegueras adquiridas y que se caracteriza por la multiplicación de venas innecesarias arriba o debajo de la retina, las cuales se pueden romper y sangrar.

Los fotones procedentes del LASER excímero de fluoruro de argón, con una longitud de onda ultravioleta de $0.193 \mu\text{m}$, poseen casi un tercio más de energía que los de cloruro de xenón de longitud de onda $0.308 \mu\text{m}$. Esta energía es suficiente para romper enlaces moleculares simples. (Cuanto más corta es la longitud de onda, mayor es la energía asociada al fotón(4)). Rangaswamy Srinivasan, de la empresa IBM, pionero en el uso del LASER de excímero de $0.193 \mu\text{m}$ para grabar sobre películas de polímero, demostró sin problemas esta propiedad.

La precisión de la fotodisociación abrió la puerta para la cirugía ocular con LASER. En 1983, Stephen L. Trokel, de la Universidad de Columbia, demostró, en colaboración con Srinivasan, que la ruptura de los enlaces facilitaba la eliminación de pequeñas cantidades de tejido de la córnea del ojo. El grupo de Trokel determinó la relación entre la energía liberada por el LASER y la eliminación del tejido ocular, cada pulso de 10 ns eliminaba $0.2 \mu\text{m}$ de tejido aproximadamente una milésima del diámetro de una célula(16). La eliminación del tejido era precisa y limpia; además, no se veía que el tejido adyacente sufriera daños.

Los descubrimientos de Trokel condujeron a la aplicación del LASER de excímero de $0.193 \mu\text{m}$ a las técnicas de escultura de la córnea, con las que se busca corregir defectos importantes de la visión mediante el remodelado de la córnea - esta enfermedad se conoce como astigmatismo. Los cirujanos realizan, con ese fin, pequeños cortes lineales, en forma de rayos de bicicleta, u optan por eliminar zonas superficiales amplias -esta cirugía se le llama queratotomía radial. "Si la fortuna acompaña, se pueden corregir así miopías, hipermetropías y astigmatismos, entre otros defectos de la visión"(16). Los oftalmólogos también utilizan esta técnica para eliminar cicatrices de la córnea y crecimientos anómalos de tejido. Cada una de estas aplicaciones del LASER de excímero, mucho tiempo en fase de controvertida experimentación, se está valorando actualmente como una gran solución a los problemas de los ojos, ya que no todos los pacientes son candidatos a esta cirugía. Además de que se corre el peligro de causar mutaciones si se excede en la potencia del haz.

Además de romper los enlaces moleculares, el LASER induce ondas de choque(16), otro prometedor efecto clínico no térmico. Las ondas de choque encuentran razón de ser en la técnica quirúrgica de eliminación de cataratas secundarias, así se llaman las que se forman en la membrana posterior de los

cristalinos artificiales y que padecen el 30% de los enfermos que tienen estos implantes(8).

Hasta 1980 sólo había una manera de tratar las cataratas secundarias: la incisión quirúrgica de la membrana posterior, con obligada anestesia general. Danièle Aron-Rosa, de la Universidad de París, y Franz Fankhauser, de la Universidad de Berna, demostraron que podía enfocarse un LASER infrarrojo de ondas cortas hacia esta membrana opaca posterior, o en su contorno, produciéndose su desgarrar por una onda de choque. Emplearon un LASER de Nd:YAG, que puede generar pulsos del orden de nanosegundos o picosegundos, funcionando a su longitud de onda típica de 1.06 μm .

Después del tratamiento con el LASER, la visión del paciente mejora casi de inmediato. En Estados Unidos se llevan a cabo anualmente más de 200,000 operaciones de este tipo, llamadas capsulotomías posteriores. A diferencia de la técnica quirúrgica anterior, es más barata la capsulotomía y no requiere de anestesia general ni hospitalización.

Este recurso del LASER de ondas cortas de la intensidad de un haz apretadamente focalizado: se liberan millijoules de energía en un intervalo de tiempo de 10^{-12} a 10^{-9} segundos y en una superficie de 25 a 50 μm de diámetro. El haz atraviesa la córnea externa y el cristalino artificial, estructuras que son transparentes a la longitud de onda de 1.06 μm , para concentrarse de forma selectiva en la sustancia vítreas, o gelatinosa, adyacente a la catarata secundaria. En el caso de la capsulotomía posterior, los fotones atraviesan la córnea y el cristalino. Sin embargo, en el punto focal cercano a la catarata secundaria, la densidad de fotones es tan elevada que los átomos pierden electrones (ionización). Los electrones forman una nube gaseosa altamente excitada, o plasma, que atrapa los restantes fotones procedentes del LASER. En virtud de esta absorción, aumenta la temperatura en el punto focal, que no tarda en elevarse en decenas de grados Celsius. El plasma se expande rápidamente y produce una onda de choque que se propaga en todas direcciones. La onda de choque rompe la catarata secundaria. Sin embargo, el plasma no se crea hasta que los fotones alcanzan cierto umbral de intensidad. Una vez que sucede esto, la fuerza de la onda de choque se hace proporcional a la cantidad de energía absorbida.

Sin embargo el LASER aun presenta unos cuantos peligros. Se ha visto que después de un tratamiento excesivo de la retina con LASER, algunos pacientes diabéticos pierden algo de visión nocturna. A la vez que el LASER puede agregar una mancha sensitiva y causar un dolor agudo y breve.

En casos raroa la luz LASER puede dañar la mácula -el centro de la retina- y causar la pérdida parcial y permanente de la vista. Además los varios tipos de tratamientos LASER pueden temporalmente elevar la presión en el ojo a niveles

como los de glaucoma. Por lo que es necesario en cada tratamiento checar la presión intraocular.

Es importante mencionar que el tratamiento ocular con LASER en determinadas enfermedades tiene esperanzas de éxito sólo cuando la enfermedad se encuentra en las primeras etapas. Por ejemplo, si la retinopatía diabética se deja avanzar al grado de un desprendimiento de retina o sangrado, la cirugía LASER no tiene esperanzas de éxito.

Cirugía con LASER

Las manchas rojas de nacimiento absorben también el haz LASER de argón, que será azul o verde dependiendo de su longitud de onda. La luz destruye los cientos de vasos sanguíneos que se encuentran debajo mismo de la capa exterior de la piel y le confieren el color característico. Aunque en este caso la cirugía con LASER es preferible a la incisión e injerto de la piel, la técnica tiene sus inconvenientes. El calor generado por el haz podría extenderse a otras zonas adyacentes a los vasos sanguíneos anómalos y producir cicatrices o pérdidas de pigmentación.

El evitar esos efectos secundarios constituyó un triunfo en la cirugía por LASER. En 1983, R. Rox Anderson y John A. Parrish, de la Universidad de Harvard, sugirieron que exposiciones cortas, inferiores a una milésima de segundo, a luz intensa destruirían la zona de absorción sin dañar el tejido adyacente. El proceso de absorción de la energía y la subsecuente disipación del calor requerían menos tiempo que la transferencia de ese calor a las zonas contiguas. Por tanto, la destrucción selectiva de las zonas diana pigmentadas tendría dos requisitos: absorción de luz preferente y pulsación luminosa suficientemente corta.

Se demostró que está teoría era cierta. La fototermólisis selectiva, nombre que recibe la técnica, ha permitido mejorar notablemente el tratamiento de las manchas rojas de la piel. También se ha mostrado eficaz para eliminar tatuajes. Se puede evitar la cicatrización emitiendo el haz de LASER en pulsos cortos, en vez de emitirlo en forma continua o en pulsos largos, que duran apenas la cuarta parte de un segundo.

Ahora bien, en determinadas circunstancias, la propia extensión de las lesiones que produce el calentamiento mayor y más prolongado del tejido puede resultar una ventaja. Por ejemplo, si un cirujano se propone destruir una zona dañada del hígado sin producir hemorragias importantes; o si un ginecólogo desea extirpar un tumor maligno en fase inicial y utilizar simultáneamente el calor para obturar los capilares adyacentes que contribuyen al sangrado. En ambos casos, la exposición prolongada al LASER de onda continua (a diferencia del LASER de pulsos cortos) reduce la hemorragia gracias a que el calor se extiende a los capilares cercanos.

Para estas situaciones se recurre a un LASER de CO₂ con su longitud de onda típica de 10.6 μm , ya que es absorbido por el componente dominante en los tejidos, el agua.

Aunque para determinados procedimientos médicos se exigirá un haz continuo, y por tanto con efectos térmicos, el LASER de pulsos sirve también para destruir tejido. Se ha demostrado que el LASER de erbio-itrinio-aluminio granate (Erbio-YAG), con una longitud de onda de 2.9 μm y una duración de pulso de 200 μs , elimina con limpieza tejido óseo calcificado. En la parte opuesta del espectro visible se encuentra el LASER de excímero de cloruro de xenón, que se sitúa en la región ultravioleta del espectro con 0.308 μm y una duración de pulso de 10 ns. Este LASER puede vaporizar el hueso sin apenas producir lesiones térmicas secundarias.

Aunque estos dos tipos de LASER's vienen a producir idénticos efectos en los tejidos, operan de manera muy distinta. La energía del fotón ultravioleta duplica la del fotón procedente del LASER de erbio YAG, energía que se destina probablemente a la ruptura de los enlaces moleculares en el tejido diana a través de un proceso no térmico llamado fotodisociación molecular(16).

Cuando el tejido y sus células absorben la intensa luz del LASER, la energía debe disiparse. Esta pérdida adquiere distintas formas: calor, fotodisociación, ondas de choque, reacciones químicas o fluorescencia(16). Los médicos utilizan todos estos efectos para manipular o estudiar las células y los tejidos de manera muy precisa y con fines diagnósticos o terapéuticos.

Más aún, con el acoplamiento del LASER con otras técnicas, como la fibra óptica, se consiguen efectos no térmicos y térmicos en partes del organismo antes inaccesibles. En este contexto, los cirujanos se sirven de fibras ópticas y sondas para inyectar luz de LASER a través de las paredes del tórax y tratar dos alteraciones pulmonares muy graves: el neumotórax espontáneo -acumulación de aire o gas en el espacio pleural, que se produce por causa no conocida- y el enfisema severo -acumulación patológica de aire en los pulmones. En el primer caso, la persona sana sufre una rotura o escape en uno de los pulmones. Se puede recurrir al LASER para cerrar el escape, tal y como lo hicieron los investigadores Akio Wakabayashi y Matthew Brenner, de la Universidad de California en Irvine. No se necesita la intervención quirúrgica tradicional.

El mismo procedimiento se ocupa para tratar el enfisema, que, en distintos grados, afecta a muchos millones de personas. Se aplica un LASER de CO₂ -canalizado a través de un orificio en la pared torácica- a las frágiles ampollas, *bulae*, que ocupan amplias zonas de los pulmones. El calor del LASER encoge las ampollas cerrando los escapes y disminuyendo el riesgo de nuevas roturas. En promedio, 11 de 12 pacientes con enfisema severo, demasiado graves para pasar por cirugía tradicional, han mejorado después de este tratamiento(16).

En otras aplicaciones de la técnica, los cardiólogos y los radiólogos pueden introducir en los vasos sanguíneos fibras ópticas de 400 μm -o un haz flexible de hasta 400 fibras de 50 μm - y llegar a una zona obstruida en el sistema circulatorio periférico o coronario -el sistema coronario consta de las arterias que irrigan el músculo cardíaco. A través de la fibra óptica, se transmite la luz del LASER que acaba con el bloqueo y restablece la circulación normal de las sangre.

La angioplastia con LASER, nombre que recibe esta técnica, se hacía originariamente con haces de LASER térmicos en combinación con la angioplastia de globo. Correspondía a la sonda de LASER abrir paso a través de un vaso sanguíneo total o parcialmente ocluido. Se introducía luego el globo y se hinchaba para aplanar una placa contra la pared arterial.

Pero el enfoque térmico no resultaba idóneo para eliminar los depósitos calcificados que caracterizan a la arterioesclerosis. Los investigadores de la Universidad de California en Irvine, Jonathan M. Tobis y Walter L. Henry, descubrieron que, con cierta frecuencia, los depósitos duros desviaban las fibras y el haz perforaba el vaso. Igualmente, tal y como se ve en el caso de manchas rojas de nacimiento, el calor puede lesionar más allá de la zona diana. En algunos casos daña la pared vascular normal adyacente(16).

Por contra, el LASER de excímero de 0.308 μm parecía ideal para la angioplastia, con o sin globos. La fibra óptica flexible de cuarzo transmite eficazmente la longitud de onda del excímero de 0.308 μm . James S. Forrester, Frank Litvack y Warren S. Grundfest, del Hospital de los Cedros Sinaí en Los Angeles, demostrarían que el LASER de excímero podía restaurar la circulación coronaria.

Las angioplastias coronarias realizadas con la ayuda del LASER se han multiplicado, con una tasa de complicaciones igual a las que se siguen de la aplicación de las técnicas de angioplastia tradicionales. La cifra actual de reoclusiones viene a ser de la misma que la de angioplastia con globo, pero es de esperar que, con el paso del tiempo, una técnica basada en la destrucción y desintegración de la placa dura será más eficaz que el mero ensanchamiento del vaso con la ayuda de un globo. Cualquiera de las dos técnicas constituye una vía alternativa a la cirugía de derivación coronaria(8), cara y arriesgada, que requiere, además, de un largo período de hospitalización.

Los cálculos del riñón, uréter y vesícula biliar pueden someterse a la acción de las ondas de choque de un LASER de Nd:YAG de 1.06 μm de longitud de onda. La propagación de haces de pulsos cortos, a través de la uretra -conducto membranoso que conduce la orina desde la vejiga hasta el exterior del cuerpo- o el uréter -tubo fibromuscular que conduce la orina desde el riñón hacia la vejiga-, con la ayuda de la fibra óptica rompería los cálculos. Las piedras en la vesícula biliar pueden fragmentarse mediante un proceso nuevo y bastante similar. El cirujano inserta un endoscopio de fibra óptica, llamado laparoscopio, a través de

un pequeño orificio practicado en el paciente. Utilizando una cuchilla de electrocauterización o un haz de LASER térmico de onda continua, se desprende la vesícula enferma del hígado para extirparla a través de la pequeña incisión abdominal.

Aunque no sea imprescindible para la dirección, el LASER resulta idóneo cuando la vesícula biliar tiene cálculos. Por culpa de estos depósitos duros, el cirujano no puede extirpar la vesícula a través de la incisión, dificultad que orilla con la introducción directa de un LASER de pulsos en la vesícula biliar a través del laparoscopio. Las ondas de choque fragmentan los cálculos y la vesícula se puede extirpar fácilmente. La operación resulta mucho menos traumática para el paciente que la cirugía mayor.

Algunas Otras Aplicaciones Médicas

La destrucción inmediata de una catarata o la fragmentación de un cálculo renal son aplicaciones espectaculares del LASER. Pero consiguen efectos más sutiles. El LASER puede inducir reacciones químicas, igual que el sol promueve la fotosíntesis. Lo cierto es que la fotoquímica del LASER podría explotarse muy pronto para tratar el cáncer.

Una vez más, esta aplicación curativa de la luz constituye el cumplimiento actual de las observaciones realizadas en el pasado. Se observó, a principios de siglo, que los tejidos cancerosos concentraban pigmentos corporales, en particular la porfirina, el pigmento rojizo de la sangre. Hasta los años setenta no se sacaría partido de esta observación. El investigador Thomas J. Dougherty y colaboradores del Instituto Roswell Park Memorial en Buffalo, Nueva York, demostró que los animales inyectados con porfirina retenían altas concentraciones de este pigmento en sus tumores después de entre 48 y 72 horas. Cuando se les aplicaba un haz de LASER con la longitud de onda que coincidía con la banda de absorción de la porfirina, se detenía el crecimiento y, en ocasiones, el tumor desaparecía.

Se sabe en la actualidad que esa destrucción del tumor mediada por la presencia del pigmento se produce a causa de la generación de un citotóxico, una molécula de oxígeno excitada, llamada oxígeno singlete. (El término "singlete" denuncia el estado de espín de la molécula de oxígeno.) La transferencia de energía de la molécula excitada de porfirina al oxígeno crea el oxígeno singlete excitado. En este estado, el oxígeno es altamente reactivo y, por tanto tóxico. El oxígeno singlete ataca la membrana celular externa, así como a muchas de las estructuras del interior celular limitadas por membranas, como las mitocondrias y los lisosomas(16). Se destruye, en definitiva, el tumor sin dañar el tejido normal.

Aunque los primeros estudios esporádicos fueron alentadores, el papel que la sensibilización del pigmento, o terapia fotodinámica, desempeñará en oncología está todavía por determinar. Es necesario llevar a cabo estudios de supervivencia a largo plazo, aparte de realizar comparaciones con los otros tratamientos ya establecidos, como la radioterapia, quimioterapia y la cirugía. En algunos países, como Estados Unidos, la técnica fotodinámica aplicada al cáncer se encuentra en fase experimental.

El potencial de esta técnica es grande. Muchos pigmentos que absorben energía toman a emitir la luz en forma de fluorescencia(8), descubriendo la presencia de zonas cancerosas. En los primeros estudios realizados en Estados Unidos y Japón, se utilizó la fluorescencia para detectar tumores de pulmón y de vejiga en fases iniciales. Mediante el uso de fibra óptica y detectores de luz, podríase diagnosticar la presencia de pequeños tumores en zonas recónditas del cuerpo. En última instancia, se puede administrar al paciente una "mezcla" de pigmentos, unos para el diagnóstico y otros para la destrucción del tumor instada por la luz.

Se trabaja también en una perspectiva más general de la perforación celular, que facilite la penetración de los espermatozoides en el óvulo. Desde un enfoque clínico, podría recurrirse a un LASER ultravioleta de pulsos, finamente focalizado, para abrir un orificio de 10 μm en la capa protectora externa del óvulo, por donde entrara sin dificultad un espermatozoide. Esta micromanipulación LASER del óvulo es viable, como lo confirma la investigación realizada por Ricardo H. Asch, de Irvine, y Yona Tadir, de la Universidad de Tel Aviv.

Por último se menciona lo que la UNAM ha desarrollado con el LASER en la medicina. Según el cirujano Juan Bernal Sanluis, de la dirección de Servicios Médicos de la UNAM, informó que la aplicación más importante de la terapia LASER en esta institución, en cuanto al número de casos se refiere, se da en problemas de osteoporosis y artritis reumatoide(20). También se ha utilizado para tratar episodios dolorosos de origen traumatológico, retiro de cicatrices queloides, acné y otros problemas dermatológicos, así como en casos de síndromes varicosos -síndrome relativo a las varices tortuosamente dilatadas-, tromboflebitis -inflamación de una vena acompañada por formación de trombo- y congestión vascular.

Uno de los casos más significativos de este proyecto de investigación, fue el de un joven que, a consecuencia de una caída, sufrió una serie de fracturas en la columna vertebral con los resultados de invalidez y pérdida total de la sensibilidad. Después de dos meses de tratamiento, el paciente recuperó la sensibilidad normal en glúteos y esfínteres(20) y ahora le es posible identificar sensaciones de calor, presión y punción.

"Este tipo de casos anima a los investigadores de la UNAM a dedicar tiempo, dinero y energía al proyecto de terapia LASER", según Bernal Sanluis(20).

4.2.5 Aplicaciones Biológicas

Es cierto que la salud del cuerpo humano y sus órganos constituye el motivo principal de investigación en las aplicaciones del LASER. Pero no es el único. Otros objetivos menores merecen también su debida atención. El LASER ofrece una técnica inédita para el estudio singular de las células y los procesos fotofísicos, que aportan las bases para la aplicación del LASER en medicina(8).

Por ejemplo, se pueden incorporar pigmentos fotoactivos a un segmento de la molécula de ADN. Se puede luego inactivar esa zona mediante la exposición al haz azul-verde del LASER de argón, produciéndose una supresión genética selectiva. De forma alternativa, un LASER ultravioleta de pulsos puede generar un microplasma en la membrana exterior de la célula, produciendo un pequeño orificio que se abrirá lo suficiente para permitir que se introduzca en la célula una cadena de ADN, con genes específicos. Este ADN puede insertarse en la dotación genética celular mediante un procedimiento 10,000 veces más eficaz que la ingeniería genética al uso(8). Procedimiento que beneficiará grandemente a la bioingeniería vegetal, por cuanto resulta difícilísimo introducir ADN extraño, con los métodos bioquímicos conocidos, a través de la pared celular rígida de las células vegetales(8).

4.2.6 Aplicaciones Químicas

Una de las ramas de la Química es la Fotoquímica, la cual se encarga del estudio de las reacciones químicas provocadas o activadas por la luz. La luz puede engendrar reacciones químicas, como lo prueba por ejemplo, la descomposición de las sales de plata de las emulsiones fotográficas(20), que se traduce por el ennegrecimiento de éstas en las partes iluminadas de las imágenes. Dichas reacciones pueden ser de dos tipos diferentes, a saber: en ciertos casos la luz obra como un catalizador y acelera una reacción que también se produciría espontáneamente, sin la necesidad de luz externa, aunque muy lentamente, lo cual, por ejemplo, ocurre con la combinación del cloro y del hidrógeno. En otros casos se trata de reacciones que no podían producirse sin energía externa, como en la transformación del oxígeno y el ozono(20).

Comercialmente hablando, el uso más importante de la Fotoquímica es el de la fotografía. Además, los métodos fotoquímicos se utilizan para iniciar la fotopolimerización en la producción de plásticos, en el depósito de capas

metálicas en la manufactura de microcircuitos electrónicos(8) y, para producir, en pequeña escala, determinados compuestos orgánicos(20). Desde el punto de vista comercial, una fuente de luz común es un pobre convertidor de energía para ser usado en reacciones químicas y por esta razón, el uso de métodos fotoquímicos en gran escala resultaba demasiado costoso. Esto ha cambiado, debido a las propiedades de la luz LASER -que se emite con la misma fase y dirección, potencia y tiene gran direccionalidad.

Aunque la química ha hecho considerables progresos en los últimos cien años, los principios fundamentales de su práctica industrial siguen casi invariantes. Los métodos empleados para romper o modificar los enlaces químicos aún dependen en gran medida de que se cambien la temperatura y la presión de la reacción o que se añada un catalizador. Este camino es a menudo ineficaz, porque no toma en consideración los movimientos moleculares. Por eso, las reacciones industriales suelen ser dispendiosas y generan, además de los materiales deseados, cantidades desorbitadas de productos secundarios inútiles(15).

Pero se han ideado nuevas técnicas, capaces de controlar las trayectorias seguidas por las reacciones. Se basan en la iluminación de los compuestos químicos con LASER's. Estos métodos prometen la alteración, a voluntad, de los resultados de las reacciones a partir de cierta característica esencial de la mecánica cuántica: las propiedades ondulatorias de la luz y de la materia(3). Los últimos cálculos revelan la eficacia de los LASER's a la hora de conducir la reacción por el camino deseado.

La idea de aplicar los LASER's para guiar reacciones químicas no constituye ninguna revolución. Los primeros intentos se remontan casi a la misma invención del LASER, hace unos 35 años. El método más reciente, el de control coherente, ha salido de las investigaciones que se emprendieron a mediados de los años ochenta, cuando se abordaron las propiedades de la luz LASER(14) que se habían ignorado en los estudios del control químico. Una de ellas es la coherencia de la luz.

La luz coherente muestra una propiedad muy importante: la interferencia constructiva y destructiva(14). No es necesario que la palabra "interferencia" signifique que unas ondas perturben las trayectorias de las otras; remite a la forma en que todas las ondas (incluidas las del agua) se combinan. En la interferencia constructiva, las crestas o los valles de dos (o más) ondas se juntan, y así alturas, o depresiones, se suman, es decir la amplitud de la onda aumenta. En la interferencia destructiva, las crestas se juntan con los valles y la onda se extingue.

Los fenómenos de la interferencia constructiva y destructiva se manifiestan en cuanto se dispara un haz LASER contra una placa opaca en la que se hayan abierto dos rendijas. Cada una hace las veces de una nueva fuente de ondas de

luz. Las ondas que emanan de cada rendija, al expandirse, se interfieren entre sí. La interferencia se torna visible si colocamos una pantalla al otro lado de las rendijas. Aparecerá en ella un patrón de franjas, oscuras y luminosas. Las luminosas corresponden a la interferencia constructiva, las oscuras, a la destructiva.

La técnica de control molecular más reciente saca partido del hecho de que la luz no sea la única entidad que exhiba fenómenos de interferencia. De acuerdo con un principio básico de la mecánica cuántica, partículas, átomos y moléculas también se comportan como ondas que se interfieren entre sí. La observación experimental ha confirmado la existencia de esas ondas de materia y de las interferencias asociadas.

La pregunta ahora es, ¿cómo aprovechar los fenómenos de interferencia para controlar las reacciones? Se han desarrollado numerosas técnicas(15). La más sencilla consiste en dirigir dos haces de LASER diferentes sobre las moléculas, cuyo aspecto ondulatorio excitará cada uno de ellos de manera particular. Las dos ondas de materia resultantes pueden interferirse entre sí. La interferencia constructiva, a su vez, puede originar un producto determinado. La destructiva haría que no se diera ese producto o que se incrementase la formación de otro(20). Resulta que se puede controlar el patrón de interferencia -es decir, la magnitud de los productos de reacción- por medio del ajuste de las propiedades de coherencia e intensidad de los dos haces(14).

Sin embargo, en el control de las reacciones con luz coherente valen para moléculas aisladas y hay por lo menos dos obstáculos contra su aplicación inmediata. Uno es que el rendimiento del control por LASER cae mucho cuando las fases de las ondas de luz de la materia están mal definidas. La fase pierde definición a causa de las colisiones entre las moléculas, que abundan más cuando la temperatura y la presión son altas, lo que suele ocurrir en ambientes industriales. El segundo obstáculo de importancia, que ahora empieza a parecer superable, tiene que ver con la fase de la luz de LASER. Ante dos fuentes de LASER, no se sabe hasta qué punto la luz de una está en fase con la luz de la otra. Una diferencia de fase inestable entre los dos LASER's reduce el grado de interferencia y control.

Quizá sean los laboratorios farmacéuticos quienes disfruten de una de las primeras aplicaciones en el mundo real del control por LASER. Hoy en día, los químicos han de poner cuidado en que los productos de reacción adopten una conformación específica. A menudo, una misma molécula puede existir en dos formas distintas, a las que se les da el nombre de *enantiómeros*. Los enantiómeros son imágenes espectaculares; suelen denominarse dextrógiros o levógiros. Los laboratorios farmacéuticos han de invertir bastantes esfuerzos en formar compuestos con la orientación correcta, pues a menudo un enantiómero es biológicamente activo y el otro es inactivo o dañino.

4.7 Aplicaciones Odontológicas

El LASER entra a la odontología en 1964 con la introducción del modelo 300 Nd:YAG de American Dental Technologies, que combinaba alta potencia pico con pulsaciones de corta duración que permite la disipación del calor entre pulsaciones. Las investigaciones han demostrado que los aparatos LASER tienen un potencial de aplicación abierto a casi todos los campos de la odontología. Hay cirujanos maxilofaciales y parodontistas que usan LASER's de CO₂ para la remoción de grandes porciones de tejido blando(18). Algunos investigadores han intentado usar el LASER de CO₂ en otras aplicaciones dentales, pero lo han encontrado inadecuado para el tejido duro(18) por la acumulación de calor y la consecuente necrosis. Los aparatos LASER de más reciente introducción, operados con gas de argón como medio activo, se muestran aptos para la cirugía en tejidos blandos y para ciertas funciones especializadas, como la fotopolimerización de resinas sintéticas. Ya han sido introducidos al mercado otros aparatos con medios activos diferentes, como el Er:YAG, el Ho:YAG y gases halogenuros, que están siendo usados experimentalmente, pero que no se establecen todavía como instrumentos clínicos.

El LASER de Nd:YAG es usado por el 72% de los odontólogos que están usando un LASER en su consultorio(18). Los LASER's de Nd:YAG han demostrado grandes resultados en el tratamiento de la gingivitis -inflamación que abarca solamente el tejido de las encías-, se ocupa en frenectomías -extirpación del nervio frénico o frenillo-, vestibuloplastias -modificación quirúrgica de las relaciones de la mucosa de las encías en el vestibulo de la boca-, así como en operculotomías -eliminación del gancho relativo e las encías que sobrepasa la corona de un diente en erupción-, eliminación de úlceras aftosas, vaporización de caries y en el sellado de fosetas y fisuras, por citar algunos ejemplos.

Además del LASER de Nd:YAG y de CO₂, el LASER de diodo semiconductor también se emplea en la odontología. La baja intensidad del diodo produce efectos fotoquímicos en los tejidos que aceleran los mecanismos de cicatrización y otros procesos que elevan el umbral del dolor, dándole al odontólogo una nueva herramienta terapéutica para el manejo de ciertos procesos.

El medio activo de este dispositivo es de arseniuro de galio aluminio. Se usan puntas de 10 a 99 mW de potencia y tiene un control programable. Por lo regular su rayo es pulsante, a frecuencias variables entre 2.5 y 166 kHz. La combinación de pulsaciones y energía da una efectiva densidad de energía (en J/cm²), suficiente para obtener efectos positivos en periodos de radiación cortos. En el mercado se encuentran para su uso odontológico longitudes de onda de 660, 680, 820, 880 y 960 nm con combinaciones de 3 y 31 diodos(18).

Capítulo 4 Aplicaciones Multidisciplinarias del LASER

El rayo LASER de un diodo de baja intensidad controla el dolor y ha sido usado con éxito en casos de gingivitis, así como en los procesos de recuperación de hipersensibilidad dentinaria, por citar algunas aplicaciones.

Conclusiones

El LASER es una fuente de radiación coherente, en cual su espectro de emisión abarca el infrarrojo, visible y el ultravioleta dependiendo del medio activo. El principio del funcionamiento de un LASER se basa en el principio de la emisión estimulada, desarrollado por Einstein en 1917.

Debido a limitaciones tecnológicas y no de otra índole, la teoría de la emisión estimulada tardó casi medio siglo en ponerse en práctica. A principios de la década de 1970 varios investigadores retomaron la idea de la emisión estimulada para construir el primer dispositivo basado en este principio, el cual se llamó MASER y asimismo fue el antecesor del LASER.

Fue Theodore Maiman el primero en construir un LASER, fue el de rubí, el cual marcó el camino a seguir por los demás investigadores. No sólo se concentró la investigación en materiales sólidos para producir la acción LASER, también se analizó la posibilidad de utilizar materiales gaseosos y líquidos, así como otros materiales sólidos.

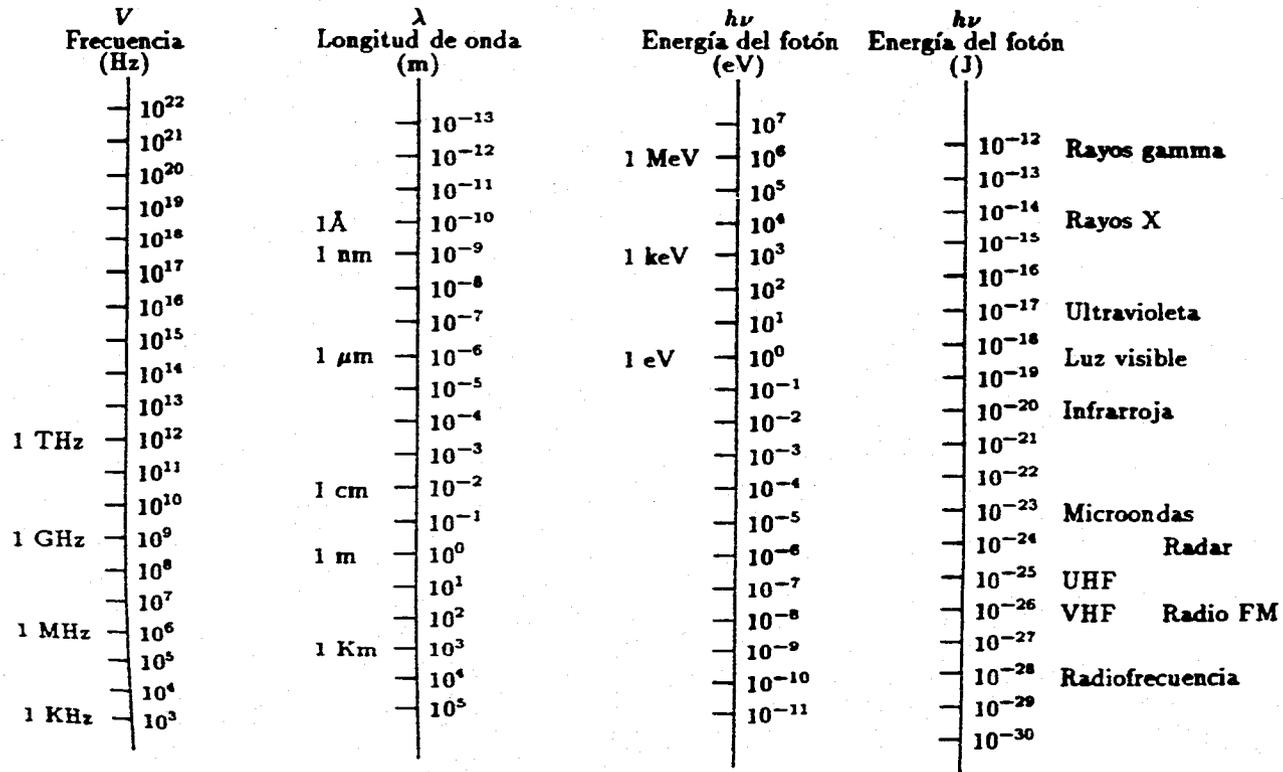
La ventaja del LASER sobre las fuentes comunes de radiación, es que el haz LASER es coherente. El haz coherente produce la mínima divergencia, una densidad de potencia más alta, es de fase única a través de su frente de onda y tiene una gran colimación. Son estas propiedades las que hacen del LASER una valiosa y única herramienta en una gran diversidad de aplicaciones en la vida cotidiana.

El LASER de CO₂, es el más usado en la industria, debido a que puede emitir haces de gran potencia, hasta del orden de megawatts. Sus principales aplicaciones en la industria son en el corte, en la soldadura de materiales y en el perforado de materiales. En países altamente industrializados el LASER es muy común en ambientes industriales, no así en los menos industrializados, donde el LASER aún es un sistema caro, pero que puede ser rentable, se si aprovecha adecuadamente.

Los LASER's de diodo semiconductor son los más eficientes, baratos y pequeños que existen en la actualidad. Desde su invención en 1962 se han mantenido como líderes en muchas aplicaciones científico-tecnológicas y mientras no exista otro LASER con estas características, esta situación permanecerá así. Sin lugar a dudas el nivel de producción y los esfuerzos en mejorar las características de operación del diodo LASER han sido estimulados por la extensión de las comunicaciones por fibra óptica y por la necesidad de fuentes de luz coherente compactas y baratas, para una variedad de aplicaciones de manejo de información. Los esfuerzos de investigación se concentran en mejorar la calidad del haz y el tiempo de vida del LASER semiconductor.

El LASER ofrece a los médicos y a los investigadores una serie de recursos ópticos precisos sin precedentes. En muchas especialidades, la cirugía con LASER se ha convertido ya en un procedimiento estándar y rutinario. El calor generado por el haz LASER y los efectos térmicos que causa en el tejido siguen constituyendo la razón principal de su uso médico, pero empiezan a abrirse camino en el diagnóstico y la terapia otros efectos ajenos al calor. Sin embargo, algunas aplicaciones médicas no son del todo exitosas y el futuro realista de la cirugía LASER radica en una mejor comprensión de los mecanismos básicos, físicos y químicos que involucran la interacción entre la luz y los órganos o tejidos.

El LASER es dispositivo que a pesar de tener más de treinta años de su invención aún se sigue perfeccionando y se estudian nuevos materiales con los cuales se pueda obtener acción LASER. Además se dedican grandes esfuerzos en la investigación de sus posibles aplicaciones, que tal parece son interminables, y en el mejoramiento de las ya existentes.



Bibliografía

1. Aboites, Vicente; El Láser
Ed. Fondo de Cultura Económica SEP, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología; México, D.F., 1991
2. Hecht, Jeff; Laser Pioneers
Ed. Academic Press Inc., New Jersey, United States of America, 1994
3. Troup, Gordon; Masers & Lasers
Ed. Cambridge University Press, Great Britain, 1969
4. Ghatak, A.K y Thyagarajan, K.; Optical Electronics
Ed. Cambridge University Press, Great Britain, 1989
5. Ruiz Boulosa, Ricardo; Láser
Ed. Imprenta Universitaria UNAM, México, D.F., 1985
6. Smale, P.H.; Introducción a los sistemas de comunicación
Ed. Trillas, México, D.F., 1993
7. Bachs, L. Cuesta, J y Carles N.; Aplicaciones industriales del láser
Ed. Marcombo, S.A., Barcelona, España, 1988
8. Winburn, D.C.; What Every Engineer Should Know Lasers
Ed. Marcel Dekker Inc., Los Alamos, New Mexico, 1986
9. Safford, Edward L.; Introducción a la fibra óptica y el láser
Ed. Paraninfo S.A., Madrid, España, 1988
10. Mauldin, John H.; Luz, Láser y Óptica
Ed. McGraw-Hill, Madrid, España, 1993
11. Hecht, Jeff; The Laser Guide Book
Ed. McGraw-Hill Company; Singapore; 1986
12. Lugomer, Sijepan; Laser technology: Laser driven processes
Ed. Prentice Hall, New Jersey, USA, 1990
13. Sedra, Abel S. y Smith, Kenneth C.; Dispositivos Electrónicos y Amplificación de Señales; Ed. McGraw-Hill, México, D.F., 1992
14. Calvo Padilla, María Luisa; "Coherencia Óptica"; Scientific American Ed. Española, Mayo de 1995, Nú. 224, p.p 66-73

15. Brumer, Paul y Shapiro, Moshe; "Reacciones químicas controladas por láser"; Scientific American Ed. Española, Mayo de 1995, Nú. 224, p.p 8-14

16. Berns, Michael W., "Cirugía con láser"; Scientific American Ed. Española, Agosto de 1991, Nú. 179, p.p 60-67

17. Bernal Sanluis, Juan, "Láser y artritis"; Información Científica y Tecnológica, Septiembre de 1993, Vol. 15, Nú. 204, p.p 6-7

18. Martínez Arizpe, Héctor, "Aplicaciones del láser en Odontología"; Seminario dictado en el Auditorio de la Agrupación Mexicana de la Industria y el Comercio Dental, 26 de Agosto de 1993

19. Coherent Inc; LASERS Operación, equipo, uso y diseño; Ed. LIMUSA, México D.F., 1992

20. Borrell, Peter; FOTOQUIMICA
Ed. El Manual Moderno, S.A., México, D.F.; 1980