



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

MEDIDA DE LA ENERGÍA LIBERADA
EN UN PLASMA DE ABLACIÓN LÁSER

REPORTE DE
INVESTIGACIÓN

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

FÍSICO

P R E S E N T A:

CARMELO GUADALUPE ROSALES GUZMÁN



TUTOR
DR. MAYO VILLAGRÁN MUNIZ

2007



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

| | |
|--|---------------|
| I. INTRODUCCCIÓN..... | PAG. 1 |
| 1. 1. LOS PLASMAS..... | 1 |
| 1. 2. ABLACION LÁSER..... | 2 |
| 1. 3. EFECTO FOTOACÚSTICO..... | 3 |
| II. ANTECEDENTES..... | 6 |
| III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 8 |
| IV. OBJETIVOS..... | 9 |
| V. PRESENTACIÓN DEL TRABAJO..... | 10 |
| 5. 1. OPTIMIZACIÓN DE LA SEÑAL ELÉCTRICA A BAJAS TENSIONES..... | 11 |
| 5. 2. MONITOREO DE LA SEÑAL FOTOACÚSTICA..... | 11 |
| 5. 3. ABLACIÓN SOBRE BLANCOS SÓLIDOS..... | 13 |
| VI. RESULTADOS..... | 15 |
| 6. 1. CARACTERIZACIÓN DE LA SEÑAL ELÉCTRICA A BAJAS TENSIONES..... | 16 |
| 6. 1. 1. <i>ANÁLISIS DE LA SEÑAL ELÉCTRICA EN FUNCIÓN DEL DIAMETRO DE LOS CAPACITORES.....</i> | 16 |
| 6. 1. 2. <i>ANÁLISIS DE LA SEÑAL ELÉCTRICA EN FUNCIÓN DE LA TENSIÓN APLICADA AL CAPACITOR.....</i> | 17 |
| 6. 1. 3. <i>ANÁLISIS DE LA SEÑAL ELÉCTRICA EN FUNCIÓN DE LA SEPARACIÓN ENTRE LAS PLACAS DEL CAPACITOR.....</i> | 19 |
| 6. 2. OPTIMIZACIÓN DE LA SEÑAL ELÉCTRICA A BAJAS TENSIONES..... | 20 |
| 6. 3. ANÁLISIS DE LA SEÑAL FOTOACÚSTICA..... | 23 |

| | |
|---|---------------|
| 6. 4. INTEGRACIÓN DE LAS TECNICAS DE MEDICIÓN..... | 25 |
| 6. 5. ABLACIÓN SOBRE MATERIALES SÓLIDOS..... | 26 |
| VII. CONCLUSIONES..... | 31 |
| APENDICES | |
| 1. INTRODUCCIÓN A LOS LÁSERES..... | 33 |
| 1. 1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UN LÁSER..... | 33 |
| 1. 2. ESTRUCTURA PRINCIPAL DE UN LÁSER..... | 34 |
| 1.3. EL LÁSER DE Nd : YAG..... | 36 |
| 2. COMPLEMENTO SOBRE PLASMAS..... | 37 |
| 2. 1. CARACTERISTICAS PRINCIPALES DE UN PLASMA..... | 37 |
| 2. 2. PROPIEDADES ELECTROMAGNÉTICAS DEL PLASMA..... | 38 |
| 2. 3. TRATAMIENTO TEÓRICO DE LOS PLASMAS..... | 39 |
| REFERENCIAS..... | 40 |

RESUMEN

En un artículo publicado en 2002 [1] se propuso una técnica novedosa para la caracterización de plasmas inducidos en aire, técnica basada principalmente en la perturbación que produce un plasma generado por un láser pulsado de alta potencia, al ser colocado en un campo eléctrico uniforme producido por un capacitor cargado de placas plano-paralelas. Tiempo después, en 2005 se publicó otro artículo [2] en el cual se utilizó la técnica mencionada anteriormente para realizar un análisis de la energía involucrada en procesos de ablación inducidos sobre blancos sólidos, en éste artículo se propuso también una técnica que proporcionaba una forma de cuantificar la energía absorbida por la muestra. Esta segunda técnica consiste en monitorear (utilizando un micrófono piezoeléctrico adherido a la muestra) la señal fotoacústica producida por el láser al incidir sobre la muestra. Dentro del régimen de ablación, la amplitud del primer máximo de la señal fotoacústica nos proporciona una medida de la energía absorbida por la el blanco ablacionado. En el trabajo que se describe a continuación, se mejoró de forma relevante la técnica de análisis de plasmas utilizada en [2]. Por un lado, bajando hasta un mínimo de 9 V la tensión aplicada entre las placas del capacitor y por otro lado al construir un dispositivo rotatorio que permite que el blanco sobre el cual se induce el plasma pueda girar al mismo tiempo que se monitorea la señal fotoacústica, un hecho importante debido a que esto nos asegura una homogeneidad en el plasma producido. En forma adicional, se realizó ablación sobre blancos de grafito, carbón natural, cuarzo y vidrio.

I. INTRODUCCIÓN

1. 1. LOS PLASMAS

El concepto moderno de plasma es de origen reciente y se remonta apenas al inicio de la década de los cincuenta. Un plasma es cualquier gas con un grado de ionización suficiente como para que sea sensible a la presencia de fuerzas eléctricas y magnéticas. Se le ha llamado el cuarto estado de la materia porque, en general, equivale a un estado de mayor energía.

Los átomos en su forma completa son eléctricamente neutros. Cuando se extraen del átomo uno o más de sus electrones, lo que queda tiene un exceso de carga positiva y constituye lo que se conoce como un ión. La ionización de un material puede producirse por diversos medios, por ejemplo, a través de descargas eléctricas o por medio de la absorción de fotones.

Un gas que contiene iones, a la vez que conserva los electrones, aunque ya libres del amarre atómico, es un plasma. Así pues, se puede considerar a un plasma como cierto estado específico de la materia en el que, en conjunto, el material es eléctricamente neutro, pero que contiene iones y electrones libres capaces de moverse en forma independiente.

Durante los últimos cuarenta años la física de plasmas ha recibido un enorme impulso desde muchos frentes y, sin embargo, todavía hay en ella muchos problemas sin resolver. Como los plasmas reaccionan fuertemente a las fuerzas electromagnéticas, su comportamiento presenta una complejidad que excede por mucho a la del comportamiento exhibido por la materia en los estados sólido, líquido o gaseoso; así, el estudio de los plasmas constituye una de las áreas de mayor dificultad en la física de hoy.

1. 2. ABLACIÓN LÁSER

El láser es una herramienta que permite depositar energía sobre un material, prácticamente en el lugar, en el momento, y en la cantidad que se desee. La posibilidad de concentrar una gran densidad de potencia, permite producir la ablación del material, la cual ocurre cuando pulsos energéticos de un láser mayores a 100 W/cm^2 inciden en la superficie de un material. El plasma producido por algunos materiales (grafito por ejemplo) mediante la ablación láser puede ser utilizado en el crecimiento de películas delgadas; pulsos intensos y muy cortos de láser inciden sobre el material evaporando pequeñas porciones del mismo para formar así un plasma del compuesto que luego puede ser depositado en forma de capas finas en un sustrato. Esta técnica de ablación láser es también empleada en la limpieza y restauración de patrimonio cultural.

Los mecanismos exactos que dan origen a la ablación aun son desconocidos. Se ha dado gran importancia a la contribución térmica en el proceso de rompimiento de enlaces. La opinión generalizada es que la ablación a longitudes de onda de 248 nm o mayores es debida al rompimiento térmico de enlaces, siempre y cuando se considere un proceso simple de absorción. Estudios que se han realizado a este respecto indican que existen dos procesos principales que dan lugar a la remoción de material del blanco. El primero de ellos es la vaporización normal en el sentido de emisión de partículas de la superficie. El segundo de ellos, compuesto por ebullición normal y explosión de fase, es un proceso térmico transitorio y requiere que el pulso sea suficientemente largo o con fluencia de pulso suficientemente alta para que ocurra nucleación de burbujas de vapor. Un aspecto importante que diferencia notablemente los dos procesos de remoción es que tienen distinta distribución angular. La evaporación térmica tiene una distribución parecida a $\text{Cos}(\theta)$, mientras que la ebullición y explosión de fase tienen una distribución dada por $\text{Cos}^n(\theta)$, donde n toma valores mayores a 4. Esto indica que el frente de evaporación tiene dos componentes con distribuciones geométricas distintas, debido a la contribución térmica estable con una distribución angular ancha y debido al régimen térmico transitorio con una distribución angular aguda.

1. 3. EFECTO FOTOACÚSTICO

Si sobre un medio se hace incidir radiación electromagnética de una determinada energía, éste absorberá parte de la energía produciendo excitación entre los átomos o moléculas que lo componen, pasando de su estado fundamental a uno de mayor energía. A esta interacción radiación-materia se le conoce como *absorción*. Después de un cierto tiempo estas especies excitadas decaerán regresando a su estado original, por medio de procesos radiativos y no radiativos (desexcitación).

Los procesos no radiativos pueden dar lugar a reacciones químicas, pero si no se generan reacciones químicas, se produce, en última instancia calor, en la región que ha sido excitada por la radiación incidente. Si la radiación tiene un carácter intermitente o periódico, este calor producirá variaciones de densidad en el medio, originando así, ondas de presión y por consiguiente ondas acústicas, que se propagan dentro del material, dando lugar a lo que se conoce como efecto fotoacústico. Las ondas acústicas producidas de ésta manera pueden ser detectadas por medio de un transductor adecuado. El efecto fotoacústico, puede ser resumido como la generación de ondas acústicas en un medio debido a la interacción con radiación electromagnética modulada o pulsada (figura 1). La detección de estas ondas (detección fotoacústica u optoacústica), da lugar a métodos de análisis llamados *fotoacústicos u optoacústicos*.

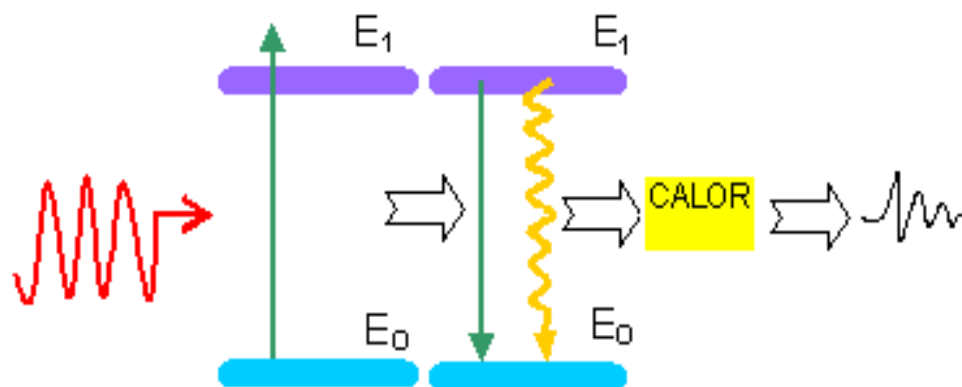


Figura 1. Esquema de generación del efecto foto-acústico

DETECCION DE LA SEÑAL FOTOACÚSTICA

Un transductor adecuado para detectar la señal foto-acústica generada de esta manera es un micrófono piezoeléctrico. Estos micrófonos, están contruidos con materiales que presentan un efecto piezoeléctrico

La piezoelectricidad (del griego *piezein*, "estrujar o apretar") es un fenómeno presentado por determinados materiales que al ser sometidos a tensiones mecánicas adquieren una polarización eléctrica en su masa, apareciendo una diferencia de potencial y cargas eléctricas en su superficie.

Los materiales piezoeléctricos son cristales naturales o sintéticos que no poseen centro de simetría. El efecto de una compresión o de un cizallamiento consiste en disociar los centros de gravedad de las cargas positivas y de las cargas negativas. Aparecen de este modo dipolos elementales en la masa y, por influencia, cargas de signo opuesto en las superficies enfrentadas.

Pueden distinguirse dos grupos de materiales: los que poseen carácter piezoeléctrico de forma natural (cuarzo, turmalina) y los llamados ferroeléctricos, que presentan propiedades piezoeléctricas tras ser sometidos a una polarización (tantalio de litio, nitrato de litio, bernilita en forma de materiales monocristalinos y cerámicas o polímeros polares bajo forma de microcristales orientados).

EXCITACIÓN CON LÁSER PULSADO

Al utilizar luz láser para irradiar materiales, hay que distinguir dos casos que dependen de la potencia óptica aplicada en la superficie del material: *el régimen de ablación y el régimen termo-elástico*. En el régimen de ablación se modifica la superficie irradiada ya que la densidad de potencia es tan alta que ocurre fusión y evaporación, transfiriendo momento por el material removido del sólido. En este régimen las fuerzas generadas son normales a la superficie irradiada. En el régimen termo-elástico (donde no se produce ablación) no se modifica la superficie irradiada ya

que los pulsos láser son de baja potencia. La fuente acústica generada por el calor depositado en la superficie del material debido a la expansión térmica, está caracterizada por dos fuerzas dipolares paralelas a la superficie. Figura 2.

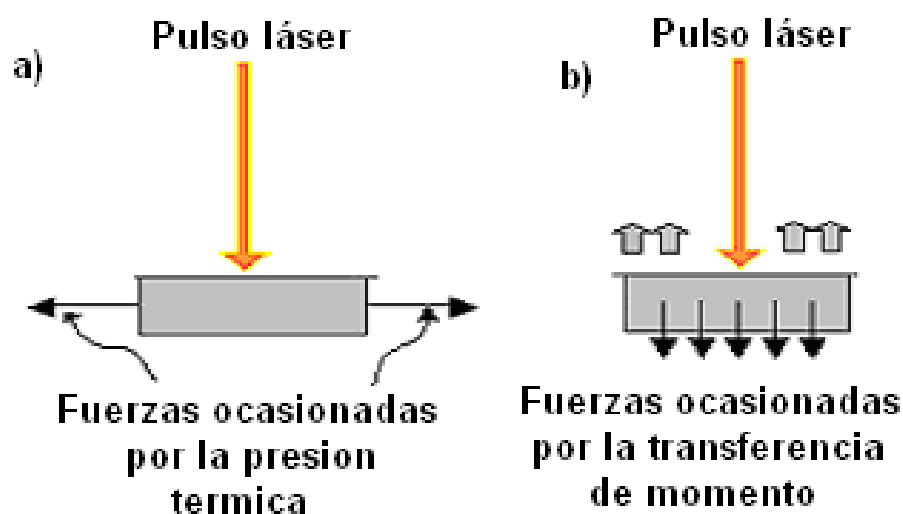


Figura 2. Generación por incidencia láser: a) régimen termo-elástico, b) régimen de ablación.

La combinación de láseres y detectores (micrófonos) de cerámicas piezoeléctricas de Plomo-Zirconio-Titanio (PZT) o películas de fluoruro de polivinilo (PVF2), permite un grado de sensibilidad relativamente alto, en medios condensados. Además se optimiza la relación señal a ruido propia de la técnica (relación entre la señal acústica medida con el PZT, vista en el osciloscopio y el ruido acústico aéreo y el ruido eléctrico que se puede introducir en la medición), como consecuencia de la diferencia entre las señales de excitación (ópticas) y las detectadas (acústicas) puesto que están físicamente desacopladas entre sí. En estas condiciones es evidente el buen acoplamiento acústico entre el material y el detector. Se puede evitar el calentamiento de la muestra (lo que permite trabajar con pequeños volúmenes del material), de suerte que se minimizan efectos de difusión térmica. El ruido generado es normalmente muy bajo debido a que se excita con pulsos de luz muy cortos y se detectan ondas ultrasónicas de alta frecuencia. Debido a estos bajos niveles de ruido es posible evitar blindajes y cuidados adicionales que son necesarios cuando se trabaja a bajas frecuencias, donde el ruido ambiente generado por vibraciones mecánicas, frecuencia de línea, etc, es importante en la zona de dc a 10kHz.

I I. ANTECEDENTES

En años recientes la técnica de espectroscopía de ablación inducida por láser (LIBS por sus siglas en inglés) se ha convertido en una herramienta poderosa que nos permite la detección y la medición de los componentes elementales de una muestra por medio del análisis espectral de la luz emitida por el plasma. Esto es posible solo si una cantidad representativa de la muestra es convertida en plasma. Para lograr una optimización de la muestra a analizar, se considera de gran importancia la optimización individual de algunos parámetros tales como una focalización adecuada del láser pulsado sobre la muestra y la absorción de energía durante el proceso de ablación [3]. Estos parámetros se determinan en general a través de medidas espectroscópicas directamente relacionadas con el plasma.

En un trabajo reciente [1] se propuso una técnica alternativa para la caracterización de plasmas inducidos en aire la cual, está basada en la perturbación que produce un plasma generado por un láser en aire, al ser colocado en un campo eléctrico uniforme producido por un capacitor plano cargado de placas paralelas. Al enfocar un láser pulsado de alta energía sobre aire (o sobre algún blanco sólido), se induce una descarga, el plasma producido por ésta descarga es colocado entre las placas de un capacitor cargado. La descarga inducida genera una redistribución temporal de las cargas eléctricas de las placas que, puede ser medida fácilmente a través de una resistencia conectada a tierra. La señal observada depende de la energía utilizada para producir la descarga, el voltaje aplicado al capacitor y la distancia entre las placas.

En 2005 [2] se aplicó la técnica de caracterización de plasmas mencionada arriba sobre algunos blancos metálicos, entre los que destacan aluminio y cadmio, para hacer un análisis de la energía efectiva involucrada en un proceso de ablación. Este análisis se realizó utilizando tres técnicas: Medición de la señal eléctrica debida a la perturbación producida por el plasma dentro de un campo eléctrico, monitoreo de la energía absorbida por la muestra usando una técnica fotoacústica y medición directa de la energía esparcida usando un medidor de energía. La figura 3 muestra el dispositivo experimental que fue utilizado.

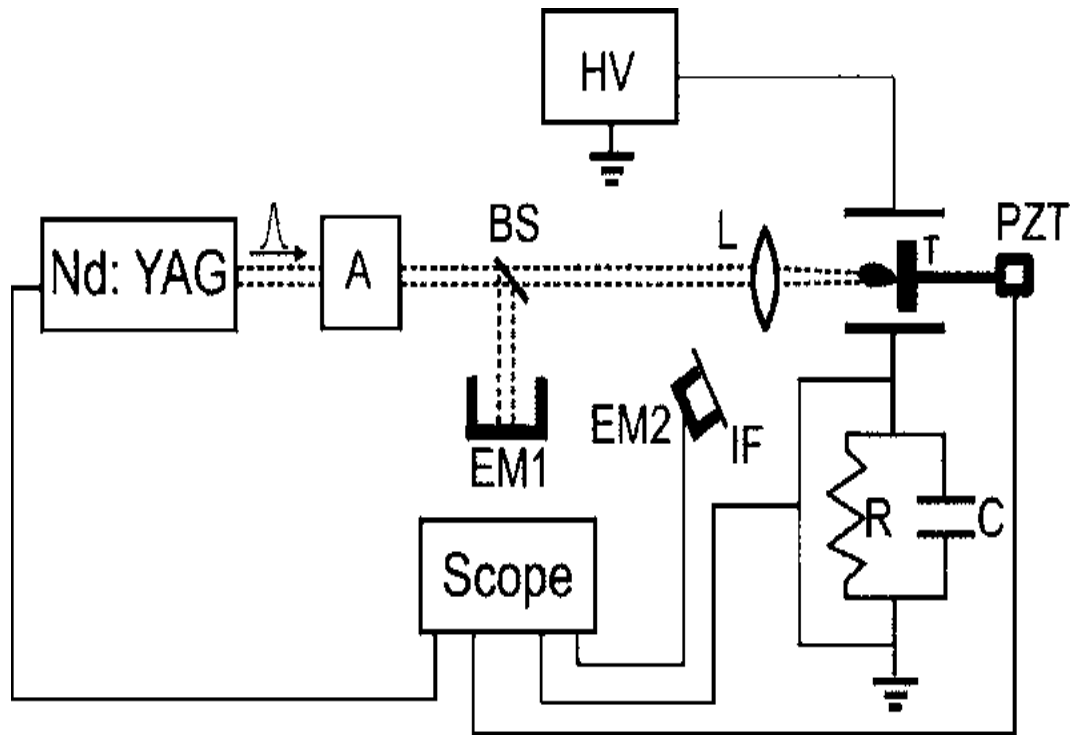


Figura 3. Dispositivo utilizado para analizar la energía efectiva en un proceso de ablación en aire. A: Atenuador. BS: Divisor de haz. L: Lente. T: Blanco. PZT: Micrófono piezoeléctrico. R: Resistencia. C: Capacitor. EM: Medidor de energía. HV: Fuente de alto voltaje. IF: Filtro interferencial.

En éste trabajo se generaba el campo eléctrico dentro del capacitor utilizando voltajes del orden de KV, esto con el fin de producir un campo eléctrico adecuado, de tal forma que se pudiera obtener una señal eléctrica que pudiera ser discriminada del ruido.

En general las técnicas utilizadas para la caracterización de plasmas involucran instrumentación sofisticada y cara. Esta nueva técnica ha permitido una reducción considerable en los costos ya que es una técnica que no requiere de instrumentación complicada y que es muy fácil de instalar.

I I I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Como se mencionó anteriormente la técnica de caracterización de plasmas requiere de la implementación de un campo eléctrico. El campo eléctrico es generado por medio de un capacitor cargado de placas plano-paralelas conectado a una fuente de alto voltaje, debido a que para poder producir un campo eléctrico adecuado se requiere de voltajes elevados (mayores a 1KV). Es aquí donde surge la idea de poder implementar ésta técnica utilizando voltajes relativamente bajos entre las placas del capacitor. Con este objetivo en mente se realizará un análisis completo de las señales eléctricas producidas al modificar las características geométricas del capacitor utilizado. Se determinaran las variaciones de las señales eléctricas cuando se modifican: el diámetro de los capacitores, la separación entre sus placas y el voltaje aplicado a las mismas. Con lo cual se buscan las condiciones optimas para que, a voltajes pequeños se pueda obtener una buena señal eléctrica.

Por otro lado, cuando se realiza ablación sobre algún blanco sólido, se produce un cráter sobre la superficie del material, el cual aumente en profundidad cada vez que un pulso láser incide sobre el, ocasionando que la densidad del plasma formado no sea homogénea. Una forma de evitar lo anterior es haciendo girar la muestra de tal forma que el láser incida sobre puntos distintos. Pero, como ya se ha mencionado, para poder analizar la señal fotoacústica, es necesario que la muestra esté adherida a un micrófono piezoeléctrico, el cual a su vez debe estar conectado a un osciloscopio. Por tanto, necesitamos de un micrófono piezoeléctrico rotatorio, con el que en principio no contamos. Para darle la vuelta a éste problema, se propuso construir un dispositivo mecánico rotatorio, sobre el cual se pueda montar el micrófono. De esta forma se pueden monitorear señales eléctricas de muestras rotando.

Una aplicación inmediata de las mejoras realizadas a ésta técnica de caracterización de plasmas es en el análisis de plasmas para el crecimiento de películas delgadas, pues éste proceso se realiza a baja presión dentro de una cámara de vacío. Aunque el dispositivo experimental original [2] puede ser colocado sin ningún problema dentro de una cámara de vacío, es sin duda de una menor complicación tener conectado el capacitor a una batería de 9 V que a una fuente de alto voltaje.

IV. OBJETIVOS

1. Implementar la técnica de caracterización de plasmas utilizada en [2] a bajas tensiones. Para lograr este objetivo se realizará un estudio completo de la señal eléctrica producida por un plasma de ablación láser, con el objetivo de encontrar las condiciones adecuadas para las cuales se puede obtener una señal eléctrica con el menor voltaje posible en el capacitor. Este estudio está comprendido por tres análisis independientes.

- a) Análisis de la amplitud de la señal eléctrica en función del diámetro del capacitor.
- b) Análisis de la amplitud de la señal eléctrica en función del voltaje aplicado al capacitor
- c) Análisis de la amplitud de la señal eléctrica en función de la separación de las placas del capacitor.

2. Lograr un monitoreo de la señal fotoacústica con el blanco rotando; para lo cual se construirá un dispositivo mecánico rotatorio al cual se le conectará el micrófono piezoeléctrico. Además se caracterizará este dispositivo para asegurar que no haya pérdida de la información contenida en la señal fotoacústica.

3. Finalmente se utilizará el dispositivo con las modificaciones realizadas para realizar ablación sobre blancos sólidos de grafito, carbón natural, dióxido de silicio amorfo (vidrio) y dióxido de silicio cristalino (cuarzo), con la finalidad de comparar la señal eléctrica generada por un plasma producido por un material amorfo con la generada por el plasma de un material cristalino.

V. PRESENTACIÓN DEL TRABAJO

El montaje experimental utilizado en la primera parte de este trabajo se muestra en la figura 4. El plasma fue formado enfocando un láser (Surelite I Continuum) pulsado de Nd:YAG (yttrium aluminium garnet) sobre aire. Este láser opera en $\lambda = 1.06\mu\text{m}$, dando pulsos de hasta 300 mJ a una frecuencia de 10 Hz, con un ancho de pulso de 7 ns y un haz con un diámetro igual a 6mm. Se podía variar la energía a través de un atenuador de alta energía (modelo 934-10 de Newport). El láser pulsado fue enfocado en un punto con un diámetro de 500 μm utilizando una lente con una longitud focal de 7.5cm, con recubrimiento antirreflejante. El plasma formado fue colocado dentro de las placas de un capacitor plano cargado. Una de las placas es conectada a tierra a través de una resistencia de 10 K Ω en paralelo con un condensador de 177pF que funciona como filtro para ruido. La caída de potencial a través de la resistencia fue registrada por un osciloscopio digital de 500 MHz (TDS 540 de Tektronix) disparado por medio de un fotodiodo rápido colocado cerca del punto de formación del plasma.

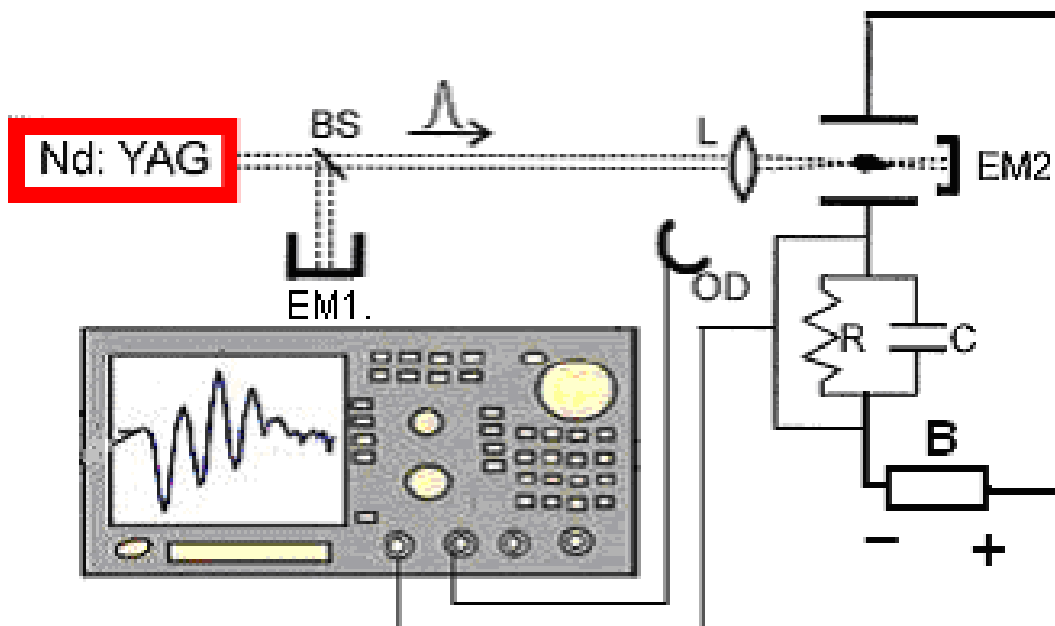


Figura 4. Dispositivo experimental utilizado para ablación en aire. BS: Divisor de Haz. L: Lente. R: Resistencia. C: Capacitor. EM: medidor de energía. OD: Detector Óptico. B: batería.

5. 1. OPTIMIZACIÓN DE LA SEÑAL ELÉCTRICA A BAJAS TENSIONES.

Con el objetivo de obtener las condiciones optimas para las cuales se puede obtener una buena señal eléctrica aplicando voltajes pequeños al capacitor, se realizó en primer lugar una modificación a la geometría del capacitor original, el cual estaba formado por dos placas circulares y paralelas con un diámetro de 100 mm y cuya distancia entre ellas podía ser variada desde 20 mm y hasta 70 mm. Se construyeron dos nuevos capacitores. Ambos capacitores constan de dos placas circulares de aluminio con diámetros de 25 y 50 mm respectivamente. Su construcción se realizó de tal forma que la separación entre ambas placas pudiera ser variada desde 5 y hasta 50 mm. Esta modificación experimental nos hizo posible una disminución considerable a la tensión aplicada al condensador. Se pudieron reproducir con bastante precisión resultados ya obtenidos anteriormente (ver ref. [1]), aplicando una tensión de 9 V a las placas del capacitor.

Para una caracterización mas detallada de la señal eléctrica, se realizaron mediciones de su amplitud variando el diámetro de los capacitores, la separación entre sus placas y el voltaje aplicado. Los voltajes utilizados variaron entre 9 y 1000 V, para voltajes de 9, 18 y 27 V, se utilizaron baterías Duracell, de 9 V y para voltajes mayores se utilizo una fuente de alto voltaje (modelo 52241 de Leybold).

5. 2. MONITOREO DE LA SEÑAL FOTOACÚSTICA.

Como se dijo anteriormente, al analizar la energía involucrada en los procesos de ablación, también es de gran importancia monitorear la energía absorbida por la muestra, esto se puede realizar utilizando una técnica fotoacústica [2]. La muestra a analizar es adherida a un micrófono piezoeléctrico; cuando el láser incide sobre la muestra, se genera una onda acústica (debido al efecto fotoacústico), aunado a esto, si la fluencia del haz incidente (energía por unidad de área) es lo suficientemente grande como para ablacionar el material, se genera (por conservación de momento lineal) una onda de presión (mecánica) producida por un retroceso de la muestra al expulsar el material ablacionado. Ambas señales son registradas por el micrófono e integradas en una sola. A medida que aumenta la energía del haz incidente, empieza a dominar el segundo

fenómeno y esto puede observarse en el primer máximo de la señal fotoacústica, lo cual nos da una información adicional, es en el primer máximo donde se encuentra la contribución a la señal fotoacústica debida al fenómeno de ablación.

El micrófono fue montado sobre un dispositivo rotatorio cuya construcción se detalla a continuación. Como ya se menciono, éste dispositivo rotatorio fue construido con el fin de que la muestra pueda rotar de tal forma que el plasma producido tenga una densidad homogénea.

En la construcción de éste aparato se utilizó un motor convencional que funciona con una batería de 1.5 V. Un conector BNC (macho) fue fijado sobre el eje de rotación del motor, el pin del conector fue soldado con el eje del motor, de tal forma que la señal eléctrica proveniente del micrófono piezoeléctrico pueda viajar a través del eje del motor. Una pequeña porción de eje del motor sobresale en la parte trasera, suficiente para que pueda ser conectada a un alambre de cobre que transportará la señal hasta otro conector BNC (hembra), que llevará la señal hasta el osciloscopio; es importante señalar que el eje y el alambre de cobre no están soldados sino solamente en contacto eléctrico (ver figura 5).

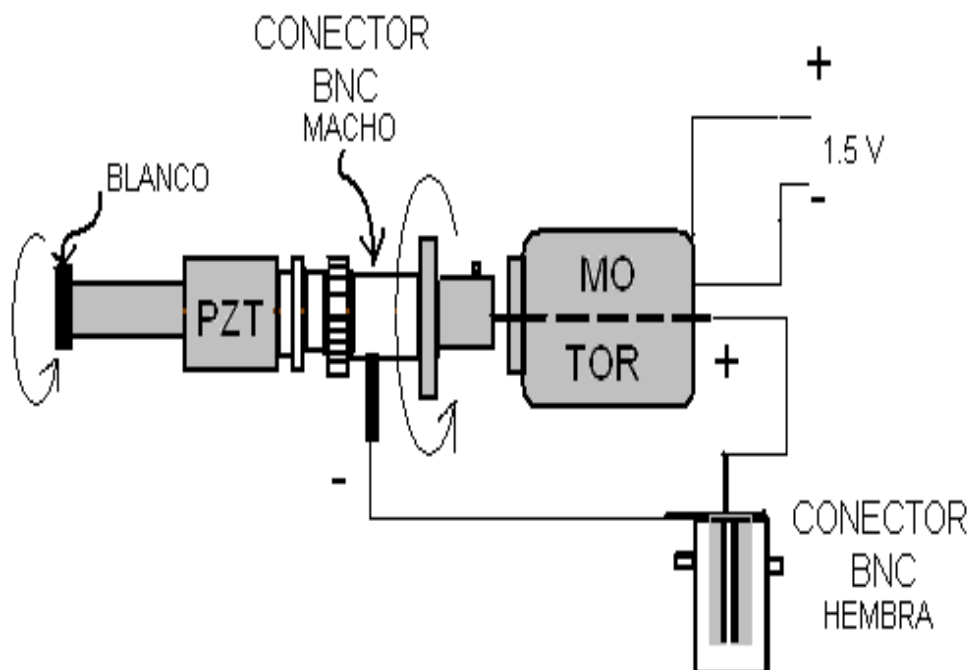


Figura 5. Esquema del dispositivo que nos permite monitorear la señal acústica de la muestra cuando ésta se encuentra rotando.

5. 3. ABLACIÓN SOBRE BLANCOS SÓLIDOS.

Finalmente se realizó ablación sobre cuatro blancos sólidos, los cuales fueron elegidos de tal forma que se pudiera tener un material amorfo y su alótropo cristalino. Para esta sección se utilizó el dispositivo mostrado en la figura 6. Este experimento consistió en comparar la señal eléctrica del plasma generado por un material amorfo con el de su alótropo cristalino, para ello se utilizaron muestras de carbono cristalino (grafito), carbono amorfo (carbón natural), dióxido de silicio cristalino (cuarzo) y dióxido de silicio amorfo (vidrio). El diámetro de las muestras fue de aproximadamente 5mm y su grosor de alrededor de 1mm. Se realizó un gráfico de energía incidente contra amplitud de la señal eléctrica (pico máximo) y, se hizo una comparación de los plasmas producidos por el material amorfo y el cristalino. Adicionalmente se realizó un gráfico de fluencia contra amplitud de la señal eléctrica, utilizando como blanco de ablación grafito, esto con el fin de reproducir una curva que ha sido obtenida para otros materiales utilizando técnicas distintas de caracterización de plasmas tales como espectrometría de masas y espectrometría de emisión óptica.

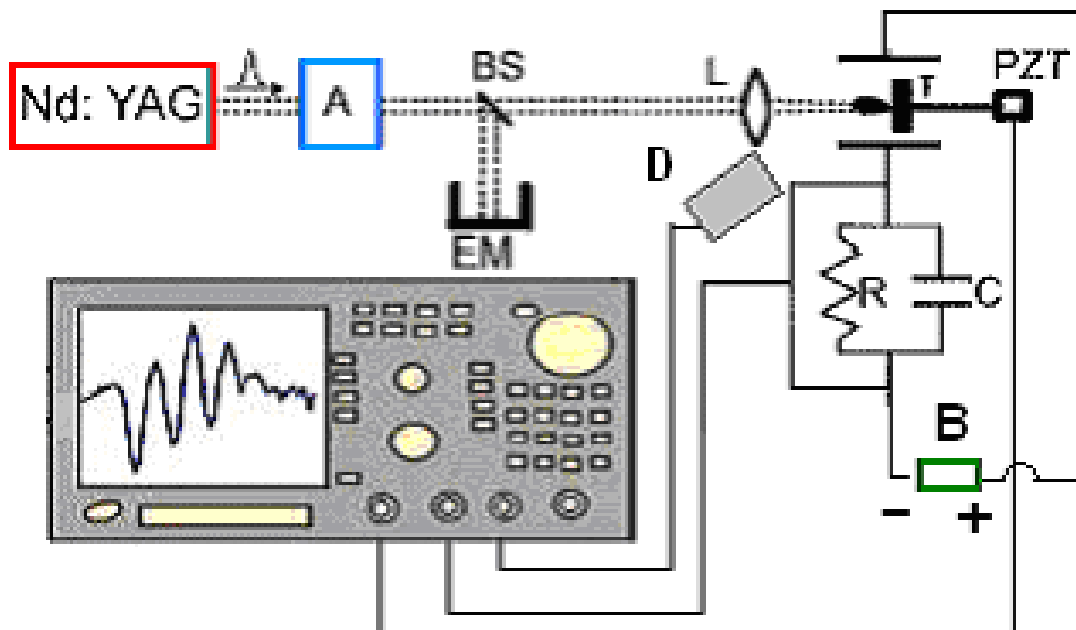


Figura 6. Dispositivo experimental utilizado para ablación sobre materiales amorfos y materiales cristalinos en aire. A: Atenuador BS: Divisor de haz. L: Lente. T: Blanco. D: Fotodiodo (trigger) PZT: Micrófono piezoeléctrico. R: Resistencia. C: Condensador. EM: Medidor de energía. B: batería (tres de 9V cada una).

Las muestras fueron adheridas con pegamento epoxico a un micrófono piezoeléctrico cuyo ancho de banda es de 240 KHz y colocadas entre las placas del capacitor. Con este montaje experimental se puede observar en forma simultánea la señal eléctrica ocasionada por el plasma y la señal fotoacústica del micrófono adherido a la muestra durante el proceso de ablación. El micrófono fue montado sobre el dispositivo rotatorio cuya construcción fue detallada en párrafos anteriores. Al girar la muestra, se logra que el haz ablacione en puntos distintos del blanco (siguiendo una trayectoria circular), esto con el fin de obtener un plasma de densidad homogénea, ya que el plasma que se forma con la superficie del material, no tiene la misma densidad que el que se forma con capas internas. La figura 7 muestra fotografías de este dispositivo.

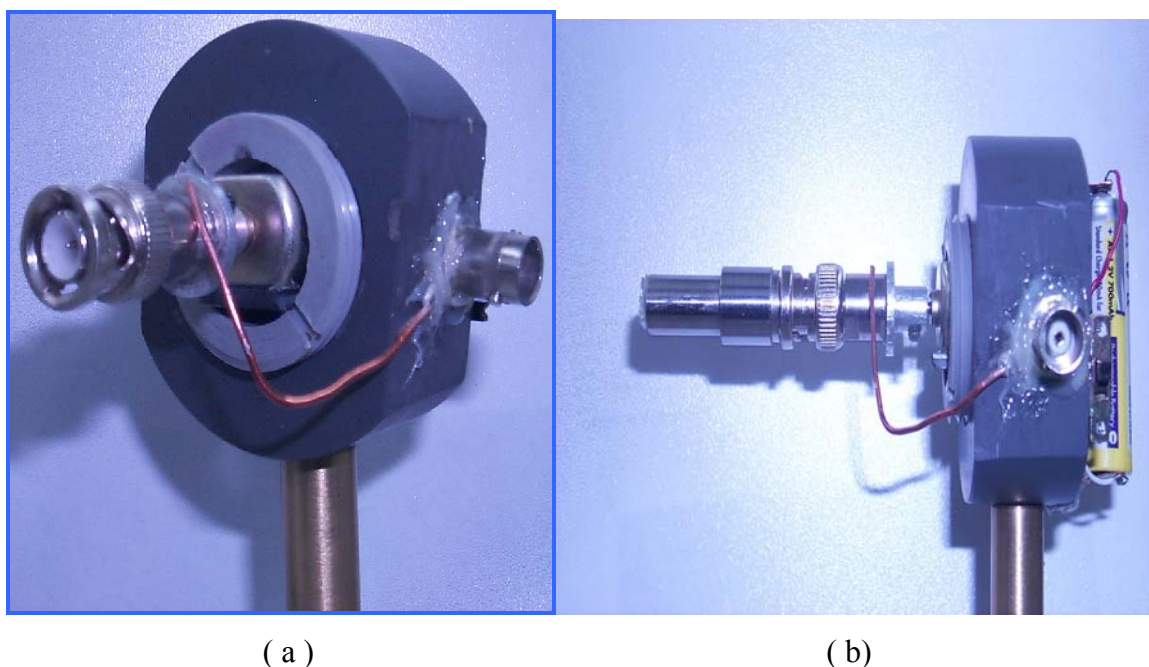


Figura 7. Fotografías tomadas del dispositivo electrónico construido. Este dispositivo permite que el micrófono piezoeléctrico pueda rotar con la muestra adherida a él al mismo tiempo que se monitorea la señal fotoacústica. (a) Vista frontal en la que se puede apreciar un conector BNC que fue soldado al eje del motor. (b) Vista lateral en la que se aprecia el dispositivo con el micrófono piezoeléctrico conectado al BNC.

VI. RESULTADOS

Como se verá mas adelante, primero se realizó una comparación de la señal eléctrica producida con un plasma inducido en aire a altas y a bajas tensiones. A continuación se hizo un estudio mas detallado de la señal obtenida por cada uno de los capacitores, variando la separación de sus placas y el voltaje aplicado a éste. En forma complementaria se repitió a bajas tensiones uno de los experimentos reportados en un trabajo anterior por: Fausto O. Bredice, Hugo Sobral, y Mayo Villagrán-Muniz [1], en el cual se obtuvo una curva de amplitud en la señal eléctrica contra separación entre placas del capacitor, lo anterior con el objetivo de corroborar a bajas tensiones una expresión obtenida a altas tensiones. Finalmente y como una aplicación de este dispositivo se realizó ablación sobre blancos amorfos y blancos cristalinos.

La figura 8 nos muestra la forma de una señal eléctrica típica (obtenida con voltajes del orden de KV) [1] comparada con la emisión óptica integrada del plasma. Esta señal eléctrica experimental corresponde a un promedio de 60 disparos de láser y fue obtenida con un capacitor de 100mm de diámetro cuya separación entre placas fue de 30mm a una tensión de 2 KV. El plasma produce una redistribución espacial de la carga eléctrica dentro de las placas, modificando temporalmente la capacitancia del circuito debido a la presencia del plasma dentro del campo eléctrico. Esta redistribución produce una corriente eléctrica muy rápida que puede ser medida como una caída de voltaje a través de la resistencia R. El pico de ésta señal eléctrica alcanza varios volts para un campo eléctrico del orden de cientos de volts por centímetro.

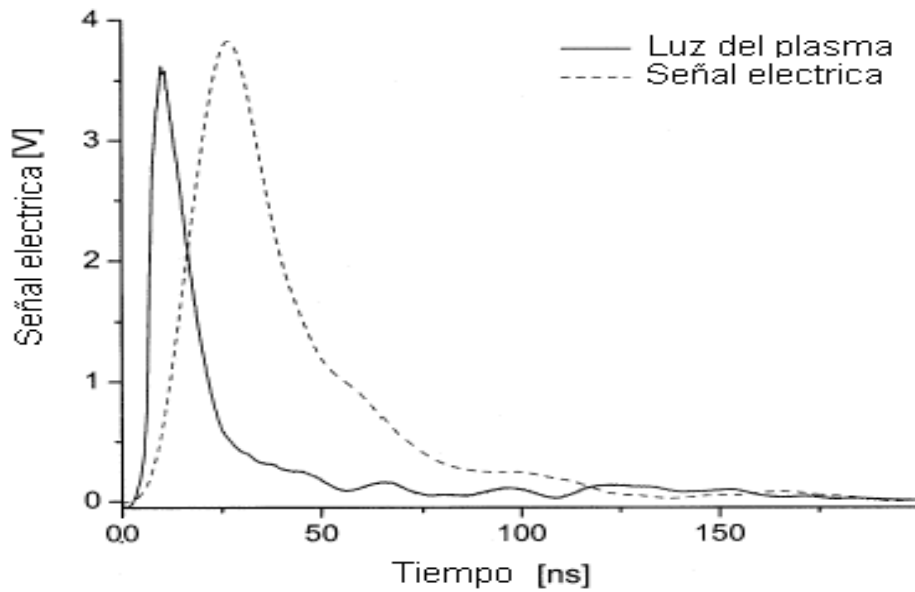


Figura 8. Evolución de una señal eléctrica típica comparada con la luz del plasma. Energía incidente 150 mJ. Tensión entre placas 2 KV. Separación entre placas 3cm.

6. 1. CARACTERIZACION DE LA SEÑAL ELECTRICA A BAJAS TENSIONES.

6. 1. 1. ANÁLISIS DE LA SEÑAL ELÉCTRICA EN FUNCIÓN DEL DIAMETRO DE LOS CAPACITORES.

El primer trabajo que se realizó (con plasmas en aire) fue la obtención de la señal eléctrica para los tres capacitores con diámetros de 25, 50 y 100 mm a una separación entre placas de 18 mm. La energía del haz incidente fue 46 mJ. Esto se realizó para dos tensiones distintas 27 y 520V respectivamente. Las figuras 9 y 10 muestran que la señal eléctrica en esencia no depende del diámetro de los capacitores, pues la amplitud del pico de la señal eléctrica varía muy poco. Este resultado es el mismo tanto para 27 V (Fig. 7) como para 520 V (Fig. 8).

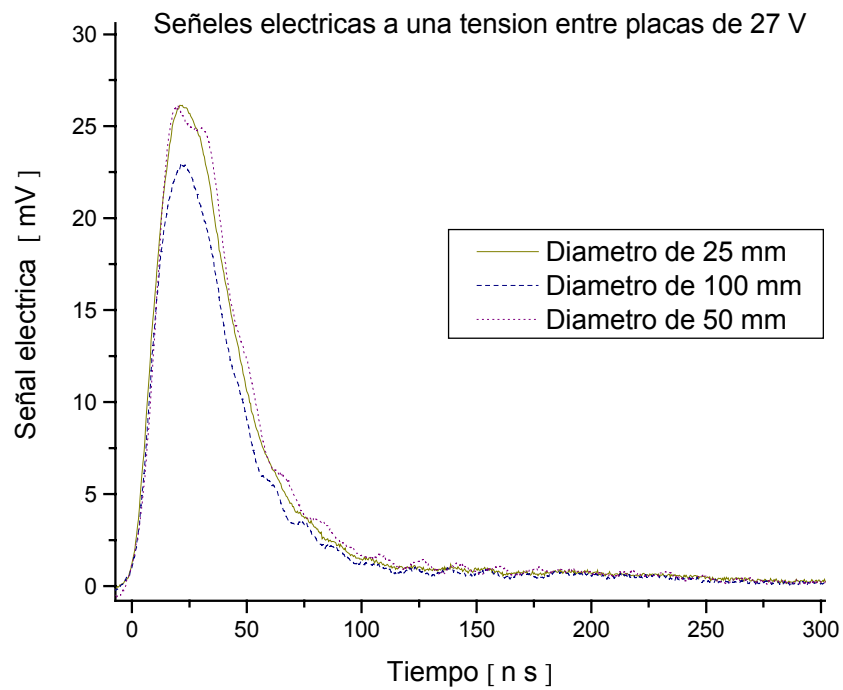


Figura 9. Comparación de la señal eléctrica obtenida por tres capacitores cuyos diámetros son 25, 50 y 100 mm a una tensión entre placas de 27 V para una separación de 18mm.

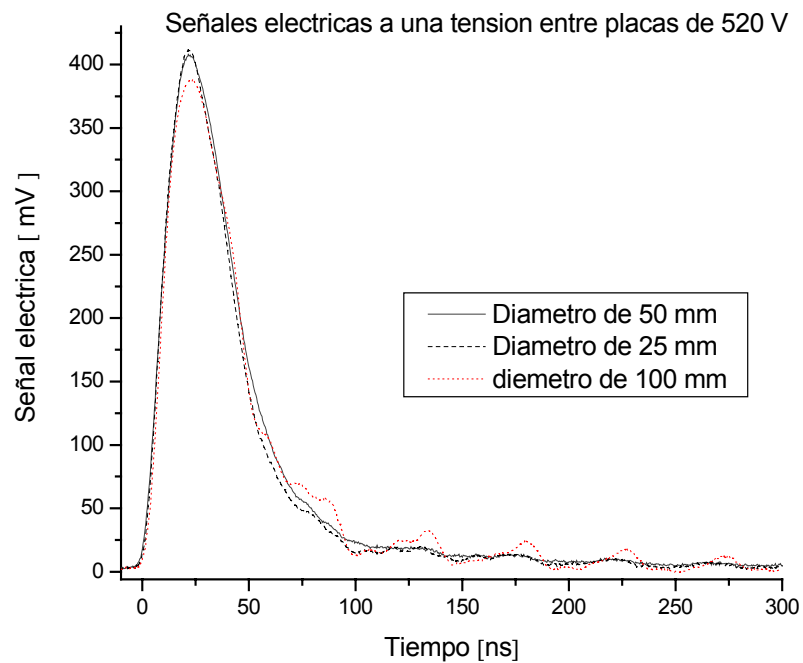


Figura 10. Comparación de la señal eléctrica obtenida a una tensión entre placas de 520 V para una separación de 18mm.

6. 1. 2. ANÁLISIS DE LA SEÑAL ELÉCTRICA EN FUNCION DE LA TENSIÓN APLICADA AL CAPACITOR.

El siguiente experimento consistió en observar la dependencia de la señal eléctrica con la tensión aplicada para un capacitor de 50 mm de diámetro con una separación entre placas de 9 mm. La energía del haz incidente con el cual se formó el plasma fue de 43 mJ. La figura 11 muestra la señal eléctrica para seis tensiones distintas que van desde 9 hasta 951 V. Puede verse fácilmente que al disminuir la tensión aplicada a las placas del capacitor, la amplitud del pico de la señal eléctrica disminuye drásticamente, hasta que finalmente a una tensión de 9 V este pico es casi inapreciable. La figura 12 nos muestra la curva de variación del pico de la señal eléctrica con la tensión aplicada entre las placas.

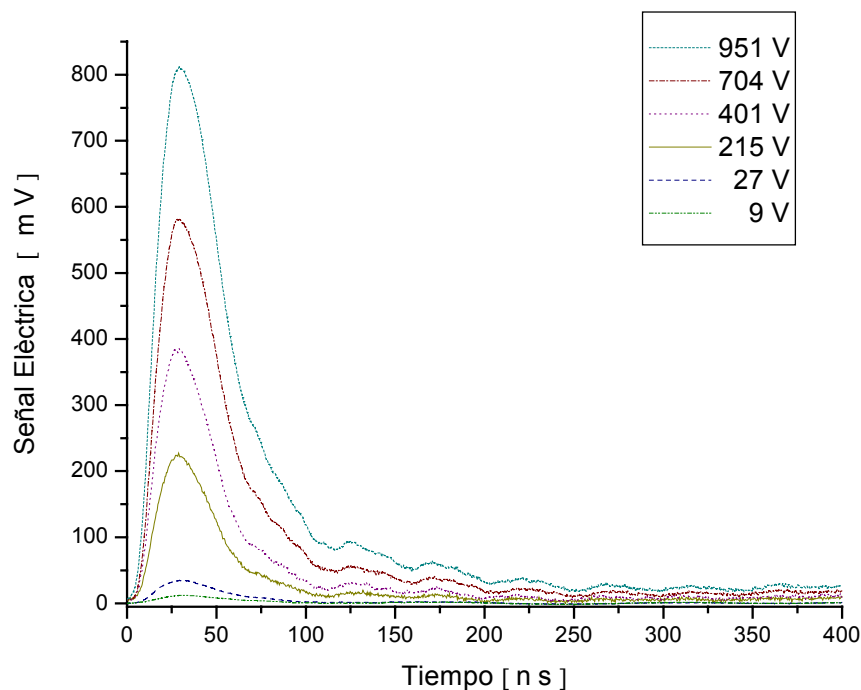


Figura 11. Señal eléctrica para seis tensiones distintas. Puede apreciarse que el pico de la señal eléctrica disminuye en forma considerable al disminuir la tensión aplicada al capacitor.

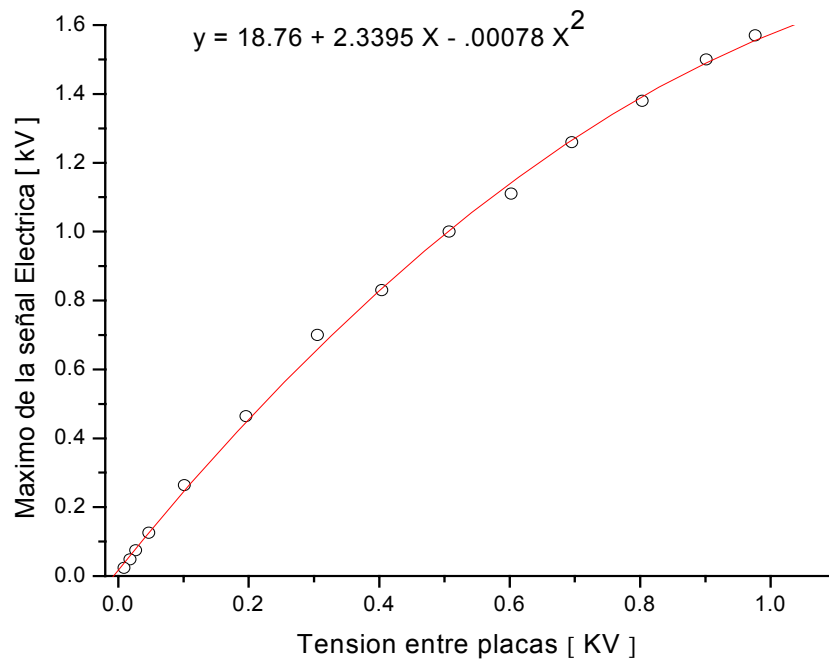


Figura 12. Variación de la señal eléctrica con la tensión aplicada a un capacitor de 50 mm con una separación entre placas de 9 mm.

6. 1. 3. ANÁLISIS DE LA SEÑAL ELÉCTRICA EN FUNCIÓN DE LA SEPARACION ENTRE LAS PLACAS DEL CAPACITOR.

Para concluir con la caracterización de la señal eléctrica a bajas tensiones, se hizo un análisis mas detallado de la amplitud de la misma en función de la separación entre las placas del capacitor para un voltaje fijo de 9.0 V a una energía incidente de 60.5 mJ, este análisis se realizó con el fin de corroborar que a bajas tensiones se sigue cumpliendo la relación experimental que fue encontrada utilizando 2KV [3].

$$h = k_c E_b \frac{V}{d^{2.8}}$$

Donde:

h máxima caída de potencial a través de la resistencia (Pico de la señal);

K_c constante que depende de los parámetros del circuito;

V Voltaje;

d distancia entre las placas;

E_b Energía a la cual se rompe el aire.

La figura 13 muestra gráficamente este análisis. El plasma se formó siempre en el centro del capacitor, de tal forma que la distancia del plasma a las placas fue siempre $d/2$. Entonces la variación de la señal eléctrica (proveniente de una variación en el plasma) está relacionada con la variación de “d”.

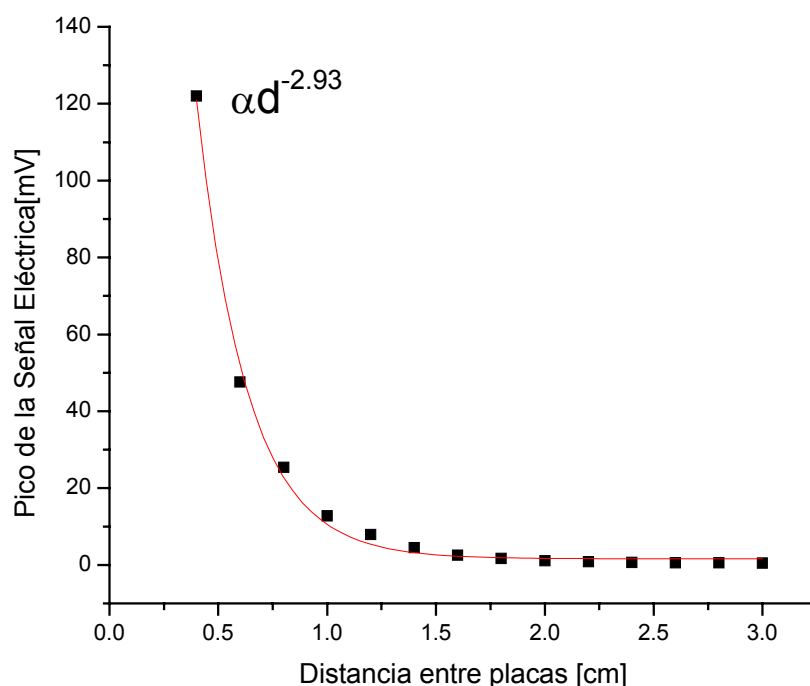


Figura 13. Dependencia de la señal eléctrica con la separación entre las placas del capacitor para una energía incidente de 60.5 mJ y una tensión entre placas de 9V.

6. 2. OPTIMIZACIÓN DE LA SEÑAL ELÉCTRICA A BAJAS TENSIONES.

Como se mostró anteriormente la señal eléctrica depende drásticamente de la separación entre las placas del capacitor. Se mostró también que al disminuir el voltaje del capacitor, disminuye la amplitud de la señal eléctrica (fig 12), por lo tanto para contrarrestar esta disminución en amplitud, basta con disminuir moderadamente la separación entre las placas del capacitor teniendo cuidado de conservar la uniformidad del campo eléctrico. La figura 14 muestra una comparación entre las señales eléctricas obtenidas con una tensión entre placas de 520 V para dos condensadores, el primero con un diámetro de 100mm y una separación entre placas de 30mm (como el utilizado en [1]

y [2]), y el segundo con un diámetro de 50mm y una separación entre placas de 18mm. La energía del haz incidente fue de 57.3 mJ.

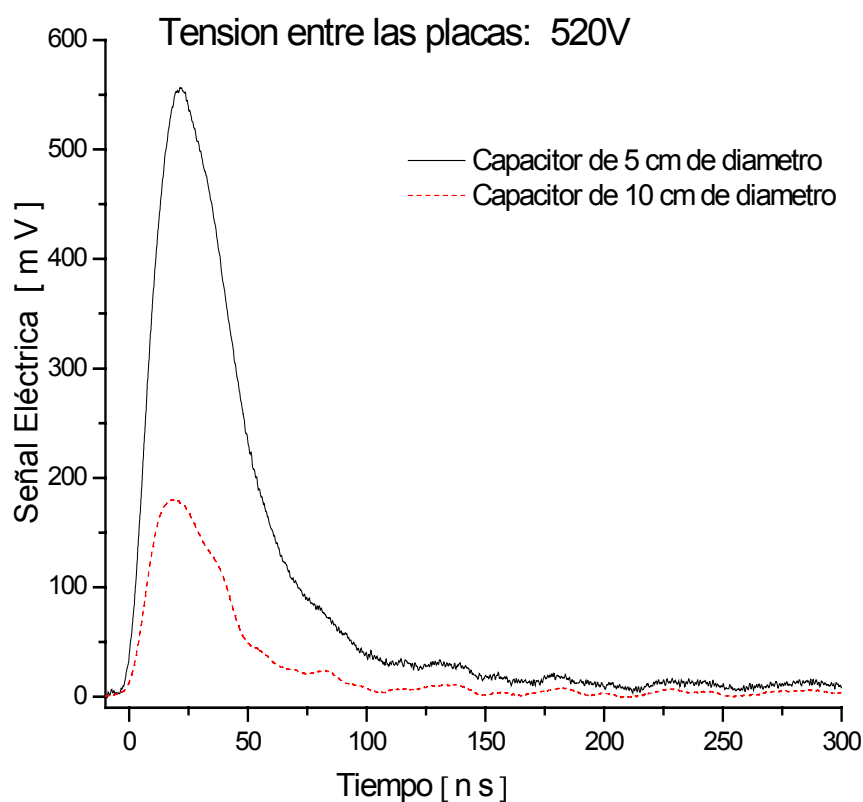


Figura 14. Dependencia de la señal eléctrica con la separación entre las placas del capacitor a altas tensiones (520 V).

Como ya se ha mostrado la señal eléctrica en esencia no depende del diámetro de los capacitores, la diferencia tan grande en la amplitud del máximo de la señal eléctrica (ver fig. 14 y 15) se debe principalmente a la separación que existe entre las placas de ambos capacitores.

La figura 15 muestra otra comparación de dos señales eléctricas pero ahora con una tensión entre placas de 27 V. Es importante notar que la dependencia de la señal eléctrica con la distancia entre las placas del capacitor, juega un papel importante tanto a altas como a bajas tensiones. Finalmente se logró cumplir un primer objetivo al obtener una buena señal eléctrica con solamente 9 V (fig. 16).

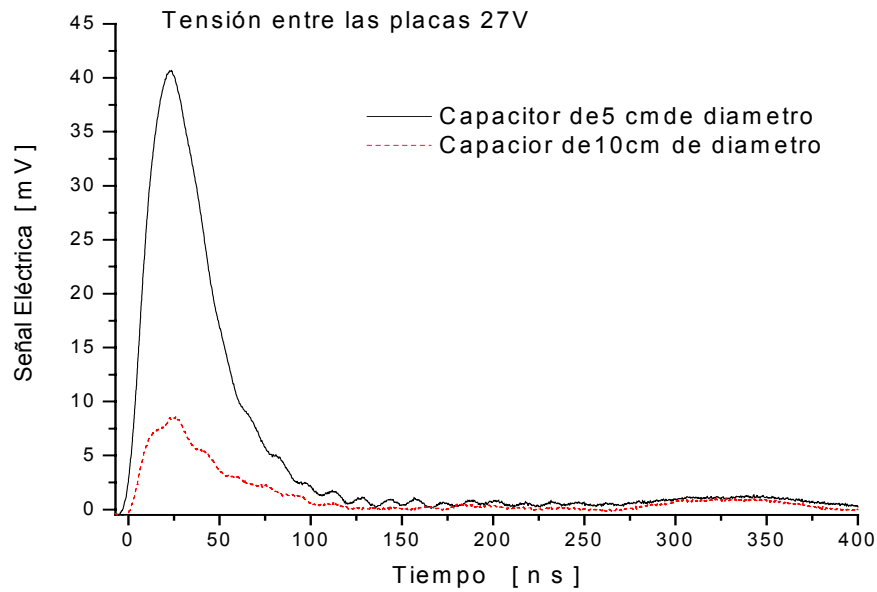


Figura 15. Dependencia de la señal eléctrica con la separación entre las placas del capacitor a bajas tensiones (27V).

La Figura 16 muestra una señal eléctrica obtenida con un capacitor de 50 mm de diámetro y una separación entre placas de 15 mm. Lo sobresaliente de esta señal es el hecho de que fue obtenida con una tensión entre placas de solamente 9V.

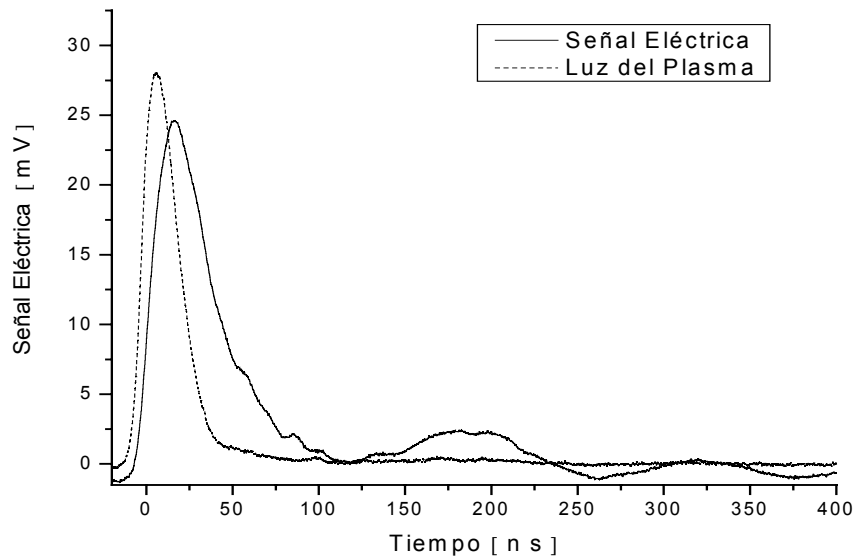


Figura 16. Señal eléctrica obtenida a bajas tensiones (9 V) con un capacitor de 50 mm de diámetro y una separación entre placas de 15 mm. Energía del haz incidente 60 mJ.

6. 3. ANALISIS DE LA SEÑAL FOTOACÚSTICA.

Otra parte importante para el monitoreo de la energía absorbida por la muestra [1], fue la construcción del dispositivo rotatorio. Para lograr que la señal fotoacústica obtenida por el micrófono piezoeléctrico pasara a través del motor y hasta el osciloscopio, se realizaron varias pruebas hasta asegurar un buen contacto eléctrico entre las piezas utilizadas. Finalmente se logro obtener la señal fotoacústica deseada. Se realizaron varias comparaciones de la señal fotoacústica obtenida, conectando el micrófono piezoeléctrico directamente, y conectándolo a través del dispositivo rotatorio. La figura 17 muestra una de estas comparaciones donde puede apreciarse que en esencia no hay diferencia alguna entre ambas señales.

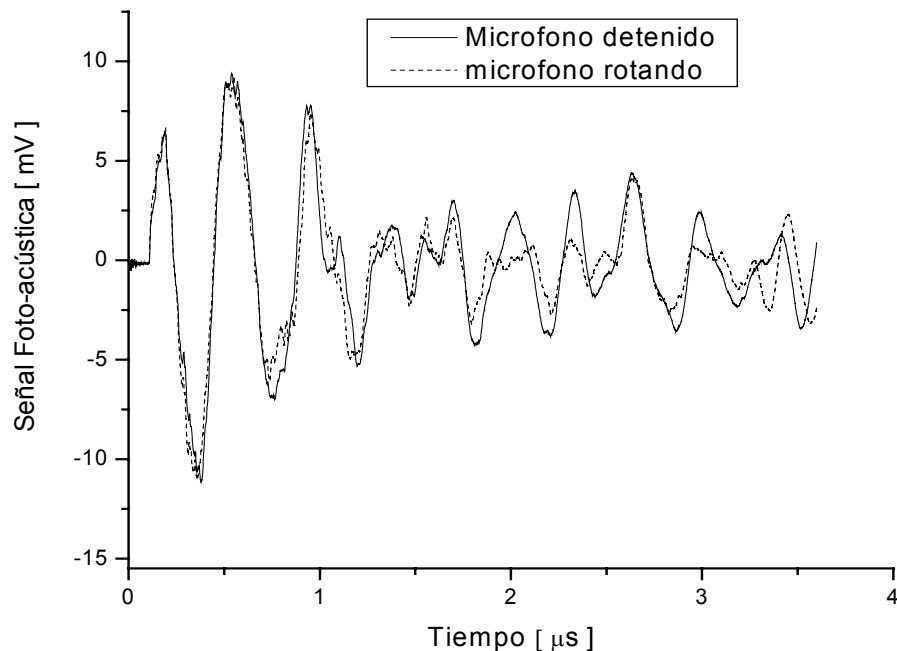


Figura 17. Señal fotoacústica obtenida cuando una muestra de grafito es ablacionada por el láser. Esta grafica intenta mostrar que las señales obtenidas por el micrófono solo y con el dispositivo rotatorio (figura 7), son muy similares.

Cuando el pulso láser incide sobre el blanco, el material expulsado debido a la ablación, ejerce una fuerza de retroceso que da una señal integrada por el micrófono. Se observa un pico positivo, debido a la expansión térmica, seguido de uno negativo debido a una rarefacción asociada a una contracción como resultado de un enfriamiento en la

parte final del pulso láser, el resto de los picos de la señal fotoacústica esta asociado a rebotes de ondas ultrasónicas dentro del blanco y en el transductor.

Para analizar la señal fotoacústica, se pueden efectuar diferentes tratamientos matemáticos. La forma mas simple es tomando la amplitud del primer pico positivo como un valor representativo de la energía absorbida. Lo anterior se puede hacer porque, según la referencia [2], en donde se analizó la señal completa por medio del coeficiente de estabilidad, se llegó a la conclusión de que la contribución debida a la presión de retroceso, que se vuelve dominante a altas energías, esta superpuesta con el primer pico de la señal.

Esto hace posible que sea suficiente con tomar el primer pico positivo de la señal. La figura 18 muestra la comparación del primer pico de las dos señales fotoacústicas obtenidas: una con el micrófono piezoeléctrico solo y la otra con el micrófono conectado al dispositivo construido. Puede verse que no hay diferencia entre ambas señales.

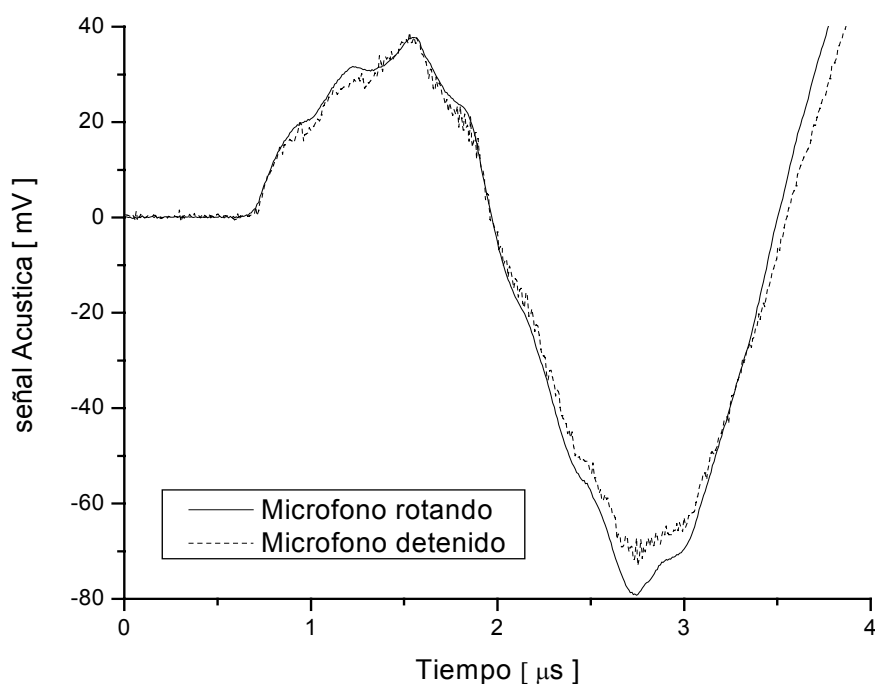


Figura 18. Comparación del primer pico positivo de la señal fotoacústica, del micrófono solo y del micrófono conectado al dispositivo construido.

Con las mejoras realizadas al dispositivo que se utilizó originalmente y que fueron descritas en detalle, es posible realizar de una manera más sencilla un análisis de la energía involucrada en un proceso de ablación láser. Como se menciona en la introducción, este análisis ya ha sido realizado sobre algunos metales; nuestros planes a futuro, son los de realizar éste mismo análisis pero sobre dos materiales cuya composición sea la misma y que solo difieran en su estructura atómica, (un material amorfo y su alótropo cristalino). A continuación se describe en forma breve el método a seguir en este tipo de análisis.

6. 4. INTEGRACION DE LAS TECNICAS DE MEDICION

En general la energía incidente puede ser expresada como [4]:

$$E_{\text{incidente}} = E_{\text{ablación}} + E_{\text{absorbida}} + E_{\text{esparcida}} \quad (1)$$

Asumiendo, en una primera aproximación, que la señal eléctrica depende solamente de la energía consumida durante el proceso de ablación, es posible escribir:

$$E_{\text{ablación}} = C_1 S_e \quad (2)$$

Donde S_e es la amplitud de la señal eléctrica y C_1 es una constante que depende de condiciones experimentales (tales como las características del blanco, la inductancia eléctrica del circuito, etc.) y que es independiente de la energía depositada.

De manera similar se define:

$$E_{\text{absorbida}} = C_2 S_a \quad (3)$$

Donde S_a es la amplitud del primer pico de la señal acústica obtenida y C_2 es una constante instrumental que depende del blanco y del acoplamiento de la muestra con el transductor, pero, con una variación con la energía incidente despreciable.

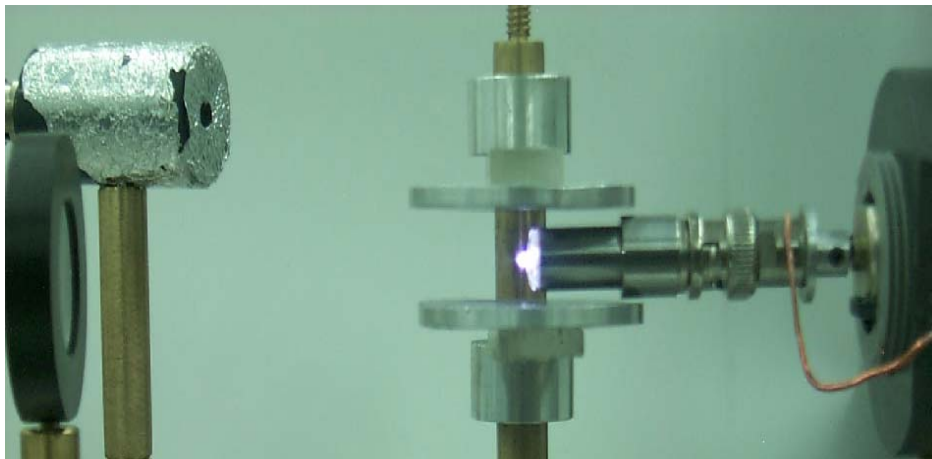
La energía total esparcida, que en esencia depende de la reflectividad de la muestra, puede medirse directamente utilizando un medidor de energía.

Utilizando las curvas de: fluencia vs. máximo de señal eléctrica y fluencia vs. máximo del primer pico de la señal fotoacústica (curvas experimentales), es posible resolver las ecuaciones (1) a (3) y obtener los valores de las constantes.

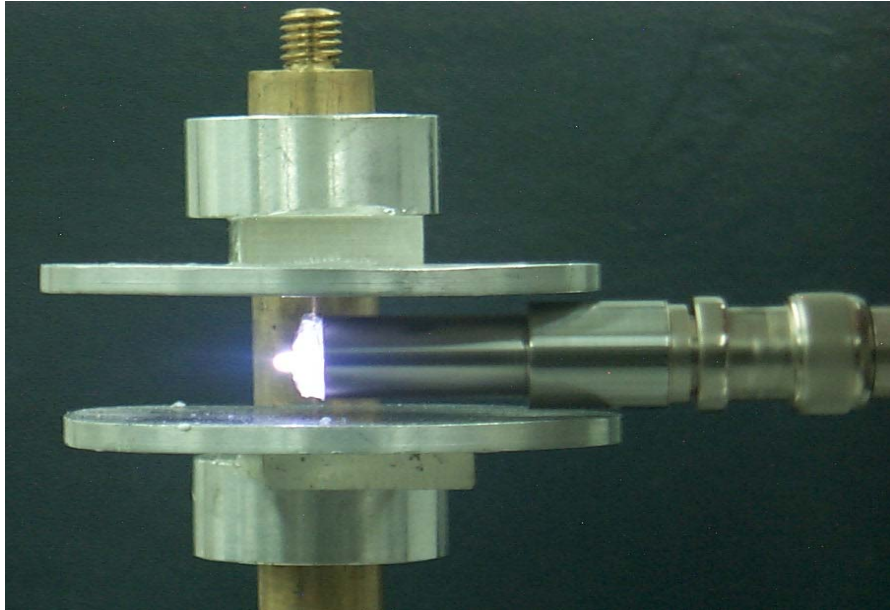
Finalmente se presenta un avance de lo que se está haciendo con materiales amorfos y cristalinos. Hasta el momento solamente se ha monitoreado la señal eléctrica.

6. 5. ABLACIÓN SOBRE MATERIALES SÓLIDOS.

A continuación se describe brevemente el trabajo que hasta el momento se ha realizado con muestras amorfas, y cristalinas (fig. 19), para comparar la señal eléctrica obtenida cuando se ablaiona sobre un cristal con la obtenida cuando se realiza ablación sobre un material amorfo. Esto se realizó para: dióxido de silicio (cuarzo y vidrio) y carbono (carbón natural y grafito).



(a)



(b)

Figura 19. Ablación sobre muestras amorfas y cristalinas. (a) ablación sobre cuarzo, (b) ablación sobre vidrio.

En el caso del carbón y del grafito se obtuvo, como lo muestra la figura 20, que la amplitud de la señal eléctrica es mayor para el grafito que para el carbón sin importar con cuanta energía incida el haz del láser, lo cual nos dice que es más fácil ablacinar la estructura cristalina del grafito que la estructura amorfa del carbón.

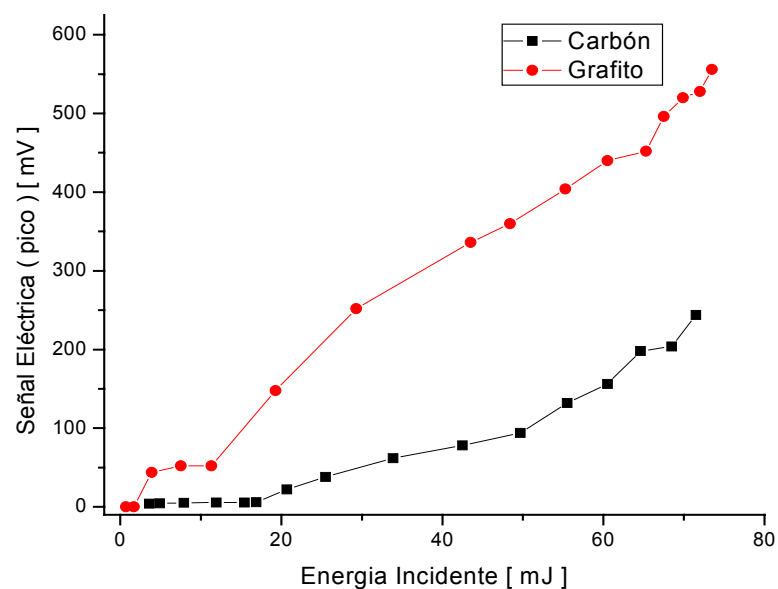


Figura 20. Comparación de los máximos en la señal eléctrica a energías incidentes que van desde 4 y hasta 80 mJ para el caso de grafito y carbón.

Por otro lado al comparar la señal eléctrica de la ablación sobre el dióxido de silicio (cuarzo y vidrio) se obtuvo que es mas fácil ablacionar el vidrio que el cuarzo. La figura 21 muestra (para una energía incidente de 9.6 mJ) las señales eléctricas obtenidas para el cuarzo y para el vidrio.

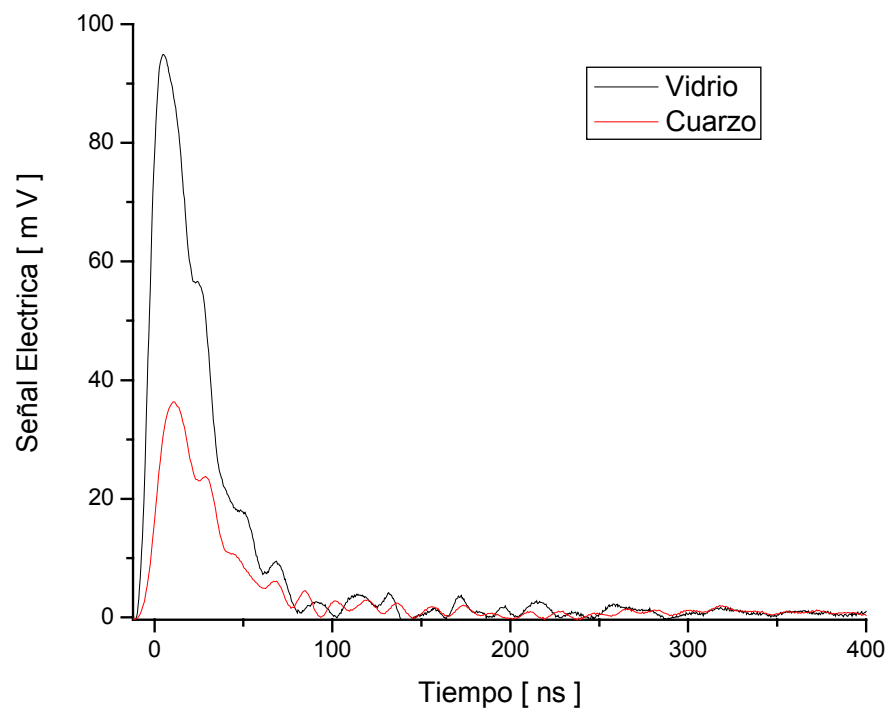


Figura 21. Señal eléctrica obtenida a una energía incidente de 9.6 mJ. Puede apreciarse que el máximo en esta señal es mayor en el vidrio que en el cuarzo

La figura 22 muestra una comparación de la señal eléctrica obtenida con el cuarzo y con el vidrio, para energías incidentes que van desde 5 hasta 35 mJ. Puede observarse que en éste caso los picos máximos en la señal eléctrica para el vidrio están por encima de los máximos en el cuarzo, lo cual nos indica que es mas fácil hacer ablación sobre el material amorfo (vidrio) que sobre el material cristalino (cuarzo).

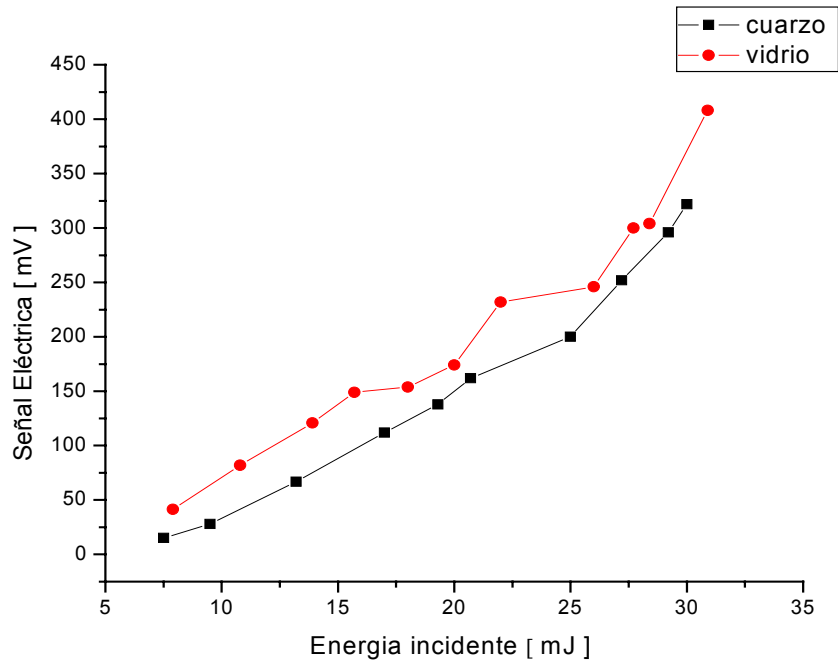


Figura 22. Comparación de la señal eléctrica en un plasma de cuarzo y en un plasma de vidrio.

Se analizó finalmente la dependencia de la señal eléctrica (pico máximo) con la fluencia incidente del láser (fig. 23). En esta gráfica se pueden observar tres diferentes regiones, [5]: vaporización a bajas fluencias, ablación a altas fluencias, y una transición a valores intermedios donde ambos procesos coexisten. En esencia esta gráfica nos muestra que para fluencias menores a 2 J/cm^2 se desprende muy poco material de la muestra (en este caso grafito), para fluencias entre 2 y 11 J/cm^2 la cantidad de material desprendido aumenta muy rápido con la fluencia y finalmente para fluencias mayores a 11 J/cm^2 la cantidad de material removido ya no aumenta con la fluencia.

Se hizo un ajuste a los datos obtenidos experimentalmente, a los cuales se les pudo ajustar una sigmoide. Este comportamiento ha sido analizado en un trabajo previo sobre materiales como Ca, Mg y Ba [5]. R. En este trabajo se propuso una ecuación heurística para ajustarla a la curva obtenida, la cual está dada por.

$$M_J(\phi) = \left[\frac{A_1(\phi) - A_2(\phi)}{1 + (\phi/\phi_C)^{s_c}} + A_2(\phi) \right] \quad \text{--- (4)}$$

Donde ϕ es la fluencia del láser, $M_J(\phi)$ es la cantidad de material ablacionado por unidad de área, $A_1(\phi)$ y $A_2(\phi)$ son los valores de M_J en la regiones de baja y alta fluencia respectivamente, S_c es un parámetro de ajuste que depende de la superficie, y ϕ_c es una fluencia critica que indica donde el proceso de ablación empieza a dominar todo el mecanismo.

Esta ecuación nos puede dar información de la superficie ablacionada, algo en lo que se esta trabajando actualmente.

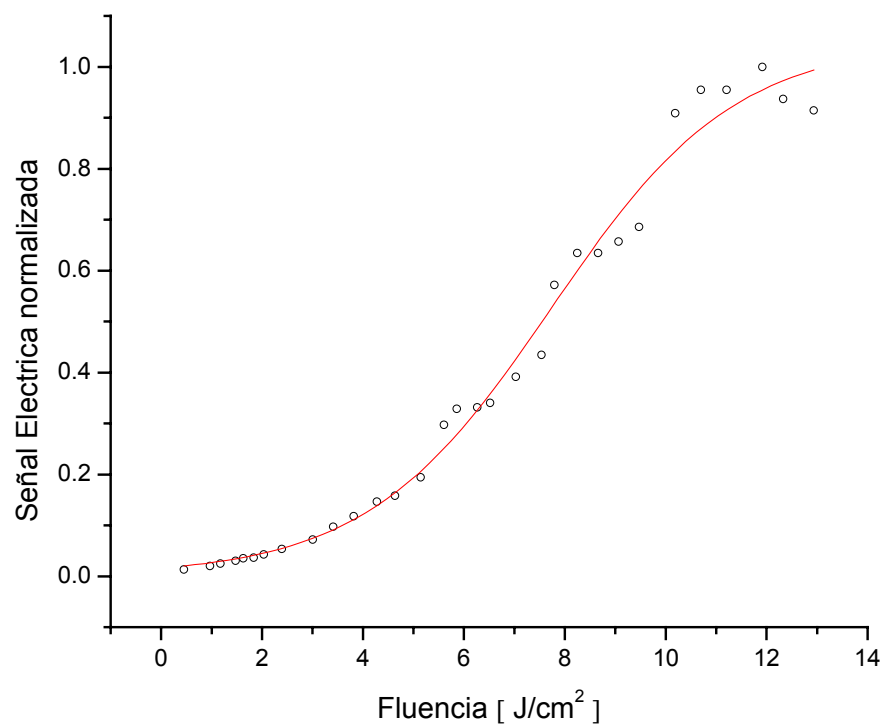


Figura 23. Señal eléctrica en función de la fluencia incidente, para una muestra de grafito. Se utilizó un capacitor de 50 mm de radio, con una separación entre placas de 10 mm y una tensión de 27 V, la fluencia fue variada desde 0.2 hasta 13.5 J/ cm².

VII. CONCLUSIONES

Se logró obtener una señal eléctrica bastante buena con una tensión mínima de 9 V entre las placas del capacitor, además ahora se sabe que esta señal eléctrica depende muy poco del diámetro del capacitor, y que en esencia depende de la separación entre sus placas. Se logró también construir y caracterizar un dispositivo rotatorio mecánico que permite monitorear la señal fotoacústica con muestras rotando.

Estas modificaciones realizadas al experimento original son de gran importancia, pues en un futuro se pretende implementar esta técnica de caracterización de plasmas para comparar el proceso de ablación en materiales cristalinos y en materiales amorfos.

Con este dispositivo en funcionamiento, se realizó ablación sobre carbón natural y grafito. Se observó que los “picos” máximos en la señal eléctrica del grafito eran mayores a los máximos en el carbón natural. Este resultado se puede explicar desde el punto de vista de los enlaces electrónicos, pues en el grafito que tiene una estructura laminar, las fuerzas que unen cada una de las capas son del tipo Van der Waals (débiles), y en el carbón que carece de estructura, existen fuerzas mayores; siendo así más fácil romper el grafito que el carbón.

Se realizó también ablación sobre el dióxido de silicio cristalino (cuarzo) y sobre dióxido de silicio amorfo (vidrio), lo cual nos arrojó resultados importantes sobre el máximo de la señal eléctrica. Se obtuvo que para un intervalo de energías que va desde 5 hasta 30 mJ la señal eléctrica producida por el vidrio es mayor que la producida por el cuarzo, esto nos dice que es más fácil romper los enlaces del material amorfo que los del material cristalino.

Finalmente se realizó un análisis de la variación de la señal eléctrica con la fluencia del láser y se logró encontrar una curva que ha sido observada anteriormente sobre materiales tales como Ca, Mg y Ba [5]. Esta curva tiene la forma de una sigmoide que básicamente nos da información sobre la cantidad de material desprendido en función de la fluencia incidente, la forma de la curva nos dice que a fluencias relativamente bajas la cantidad de material desprendido aumenta muy poco al aumentar

fluencia, hasta que a cierta fluencia crítica, la cantidad de material desprendido aumenta en forma considerable con la fluencia, y que finalmente se alcanza una fluencia para la cual se estabiliza la cantidad de material desprendido, esto es, aun cuando se siga aumentando la fluencia del láser la cantidad de material desprendido se mantiene constante. Es importante resaltar que en este artículo, la cantidad de material removido fue determinada utilizando otras técnicas (espectrometría de masas y espectrometría de emisión óptica), mientras que el análisis realizado en este trabajo fue con la amplitud de la señal eléctrica. Actualmente también se está trabajando en este campo.

APÉNDICES

1. INTRODUCCIÓN A LOS LÁSERES.

Un láser (acrónimo del inglés *laser*, *Light Amplificación by Stimulated Emission of Radiation* que en español sería "Amplificación de Luz por Emisión Estimulada de Radiación"), es un dispositivo que utiliza un efecto de la mecánica cuántica, la emisión inducida o estimulada, para generar un haz de luz coherente de un medio adecuado y con el tamaño, la forma y la pureza controlados.

Los fundamentos teóricos para el desarrollo de los láseres y de sus predecesores, los máseres (que emiten microondas) fueron establecidos por Albert Einstein en 1917, utilizando la ley de radiación de Max Planck basada en los conceptos de emisión espontánea e inducida de radiación. Sin embargo, es hasta 1960 cuando el físico Theodore Maiman en Hughes Laboratories construye el primer láser, utilizando un cristal de rubí como medio activo. Los centros activos usados fueron los iones de Cr^{+3} que se presentan como impurezas en el cristal de Al_2O_3 . Después del descubrimiento del laser de rubí, Sorokin y Stevenson por un lado y Kaiser y Garret por el otro, crearon el láser sólido de cuatro niveles energéticos, donde el medio activo usado fue el cristal CaF_2 activado por iones de elementos de tierras raras. El siguiente paso importante en esta dirección fue dado por Snitser quien en 1961 disparó el primer láser activado con iones de Nd^{+3}

1. 1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UN LÁSER

Existen cuatro procesos básicos en la generación de la emisión láser: el bombeo, la absorción, la emisión espontánea de radiación y la emisión estimulada de radiación.

BOMBEO. Se realiza mediante una fuente de radiación. Es el paso de una corriente eléctrica o el uso de cualquier otro tipo de fuente energética, que da lugar a la transición energética de los electrones de los átomos o moléculas a un estado de excitación.

ABSORCIÓN. Proceso mediante el cual un átomo o molécula absorbe un fotón. El sistema atómico se excita a un estado de energía más alto, pasando un electrón al estado metaestable. Este fenómeno compite con la emisión estimulada de radiación.

EMISIÓN ESPONTANEA DE RADIACIÓN. Durante este proceso, los electrones vuelven al estado fundamental emitiendo fotones. Es un proceso aleatorio y la radiación resultante está formada por fotones que se desplazan en distintas direcciones y con fases distintas, generándose una radiación monocromática incoherente.

EMISIÓN ESTIMULADA DE RADIACIÓN. La emisión estimulada, base de la generación de radiación de un láser, se produce cuando un átomo en estado excitado recibe un estímulo externo que lo lleva a emitir fotones y así retornar a un estado de menor energía. El estímulo en cuestión, proviene de la llegada de un fotón con energía similar a la diferencia de energía entre los dos estados. Los fotones así emitidos poseen fase, energía y dirección similares a las del fotón externo que les dio origen. La emisión estimulada es la raíz de muchas de las características de la luz láser. No sólo produce luz coherente y monocromática, sino que también, "amplifica" la emisión de luz ya que, por cada fotón que incide sobre un átomo excitado, se genera otro fotón.

1. 2. ESTRUCTURA PRINCIPAL DEL LÁSER

La estructura principal de un láser, consta del medio activo, los espejos que forman el resonador láser y el sistema de bombeo. En la Figura A1 se muestra la cavidad amplificadora con un sistema de bombeo y un par de espejos planos (o ligeramente cóncavos) en sus extremos. La línea del centro indica el eje óptico del sistema.

El par de espejos paralelos recibe el nombre de resonador óptico. Uno de los espejos del resonador es altamente reflectante (casi 100%) y el otro es parcialmente reflectante (típicamente de 90%). Para comprender la función del resonador óptico, en la Figura 1 se muestra al oscilador óptico inmediatamente después de que el sistema de bombeo fue disparado. Cualquier fotón que sea emitido en una dirección diferente a la definida por el eje óptico del resonador se perderá, mientras que cualquier fotón emitido a lo largo del eje óptico del oscilador será amplificado por el proceso de emisión

estimulada e inmediatamente se generará un enorme flujo de fotones confinados en el resonador que se propaga a lo largo del eje óptico. Si el resonador óptico no estuviera presente, después de disparar el sistema de bombeo, los átomos o moléculas que fueron excitados pasarían a su estado base debido al proceso de emisión espontánea, emitiendo fotones en todas direcciones y perdiendo la energía recibida. El resonador óptico permite extraer en forma eficiente la energía que el sistema de bombeo deposita en los átomos o moléculas contenidos en la cavidad amplificadora. Si por ejemplo uno de los espejos del resonador tiene una reflectancia del 90%, el 10% de los fotones que incidan en él son transmitidos fuera del resonador óptico, formando un haz de luz muy intenso, monocromático (formado por fotones de idéntica energía), coherente (todos sus fotones están en fase ya que fueron producidos por el proceso de emisión estimulada) y altamente direccional. Éstas son las propiedades fundamentales de la luz láser generada por todo oscilador óptico.

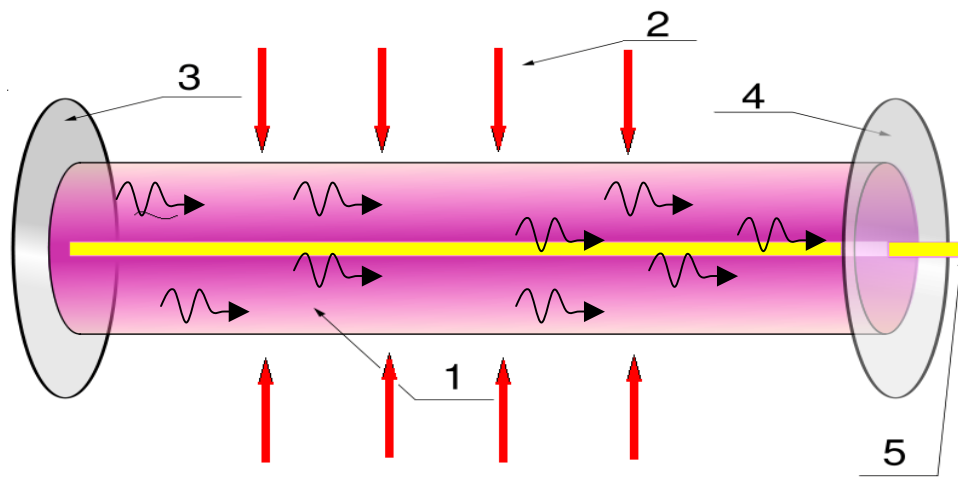


Figura A1. Componentes principales de un Láser: 1. Medio activo, 2. Fuente de excitación, 3. Espejo altamente reflectante, 4. Espejo parcialmente reflectante, 5. Emisión del haz láser

1.3. EL LÁSER DE Nd : YAG

El Nd-YAG (acrónimo del inglés *neodymium-doped yttrium aluminium garnet*) es un cristal de óxido de ytrio y aluminio ($Y_3 Al_5 O_{12}$), una variedad de granate, dopado con neodimio, que es utilizado como medio activo para láseres de estado sólido con bombeo óptico. El dopante, tres veces ionizado Nd^{+3} , es introducido como impureza que varía desde 1% hasta 3% por peso, que típicamente reemplaza al ytrio en la estructura cristalina, debido a que tienen un tamaño similar.

Los láseres de Nd:YAG son bombeados ópticamente usando lámparas de flash o diodos láser. Este tipo de láseres emiten típicamente en el infrarrojo, con una longitud de onda de 1064 nm, existiendo también transiciones alrededor de 940, 1120, 1320, y 1440 nm. Existen dos modos de operación para éste tipo de láseres: continuo y pulsado. El láser pulsado típicamente es operado en el llamado modo Q-switch, que consiste básicamente en lo siguiente: Se inserta un switch óptico dentro de la cavidad láser, el cual se abre solo hasta que hay un máximo en la inversión de población de los iones de neodimio, logrando entonces un láser de máxima potencia y alta repetitividad.

Los láseres de Nd:Yag tienen cuatro niveles de energía (Figura 2). Desde los niveles excitados (E_4), los iones de Nd son transferidos a un nivel inferior (E_3) mediante transiciones no radiativas. La emisión estimulada tiene lugar desde estos niveles (E_3) a otros inferiores (E_2), emitiendo fotones a una longitud de onda de 1064 nm. Posteriormente tienen lugar más transiciones no radiativas hasta el nivel fundamental (E_1). Los iones de Nd absorben mayormente en dos bandas: 730-760 nm y 790-820 nm. Por lo tanto las lámparas más adecuadas para el bombeo óptico de éste tipo de láseres son las de Kriptón.

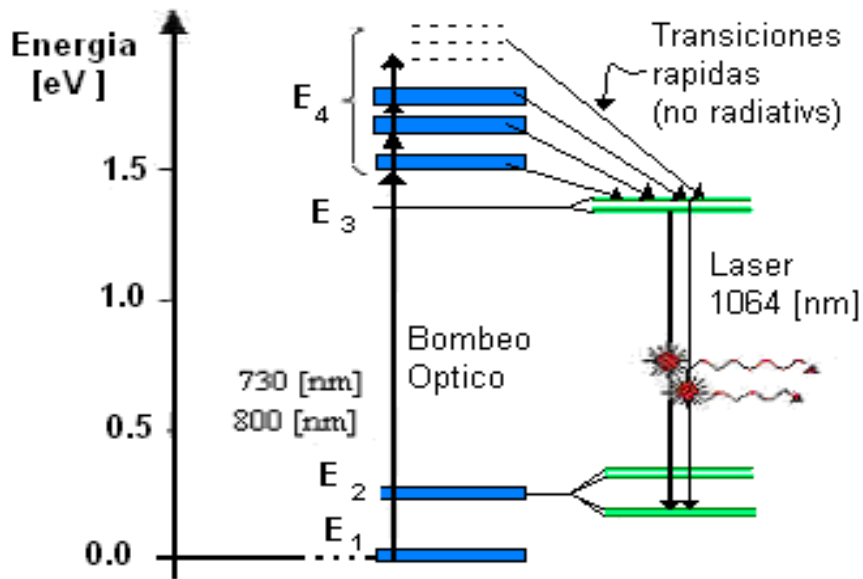


Figura A2. Diagrama de Niveles de Energía del láser de Nd-YAG. $E_4 > E_3 > E_2 > E_1$.

2. COMPLEMENTO SOBRE PLASMAS.

2.1 CARACTERISTICAS PRINCIPALES DE UN PLASMA.

MOVIMIENTOS COLECTIVOS.

Una de las principales características de la materia en estado de plasma es su capacidad de responder colectivamente a impulsos internos y externos. Este comportamiento fue descrito por primera vez por John William Strutt Rayleigh. Los movimientos colectivos del plasma son consecuencia del gran alcance de las fuerzas electrostáticas que sienten entre sí las partículas cargadas que lo componen. En el interior de un plasma las partículas interactúan a distancias mucho mayores comparadas con un gas y de esta manera, aun los plasmas de muy baja densidad funcionan de manera cohesiva.

El comportamiento colectivo de los plasmas no siempre es estable. De hecho, el plasma es un sistema muy inestable. Dentro de un plasma existen muchas inestabilidades ya clasificadas y una buena parte de la investigación en la física de plasmas consiste en entender mejor estas inestabilidades y encontrar la manera de controlarlas con la ayuda de campos magnéticos.

CUASINEUTRALIDAD DEL PLASMA.

Puesto que en el plasma existe muy poca restricción al movimiento de las cargas, este tiende a mantener un estado de neutralidad eléctrica aun en regiones muy pequeñas. Cualquier acumulación de carga de un solo signo en cierta región del plasma producirá una fuerza atractiva para las cargas opuestas lo suficientemente grande como para recuperar el equilibrio de la carga eléctrica casi instantáneamente. De esta manera, si el plasma no es forzado por campos eléctricos o magnéticos muy intensos a mantener acumulaciones locales de carga, permanecerá en un estado de cuasineutralidad, esto es, un estado en el que la concentración de cargas positivas será prácticamente igual a la concentración de cargas negativas, aun en pequeñas regiones del espacio.

Los movimientos colectivos y la cuasineutralidad son fundamentales para el estado del plasma, al grado que suele definirse al plasma como un sistema cuasineutro constituido por un gran número de partículas cargadas que exhiben movimientos colectivos.

2. 2. PROPIEDADES ELECTROMAGNÉTICAS DEL PLASMA.

Un gas es normalmente un buen aislante eléctrico, la corriente no puede pasar fácilmente a través de él. Sin embargo, si el gas tiene suficientes cargas libres como para ser un plasma éste se vuelve un buen conductor eléctrico, pues en esta situación los electrones libres transportan la corriente con facilidad. Así el plasma responde fácilmente a la imposición de campos eléctricos externos y también a la de campos magnéticos.

Pero así como el plasma responde a la presencia de campos electromagnéticos impuestos externamente, en su interior el mismo también genera este tipo de campos. Puesto que el plasma consiste en partículas cargadas que se mueven, en su interior se encuentran campos electromagnéticos. En este sentido, el estado del plasma es único ya que interactúa con los campos electromagnéticos impuestos desde el exterior y con los suyos propios. Entonces la respuesta de un plasma a la imposición de campos electromagnéticos externos generará a su vez otros campos electromagnéticos que, si el

plasma es muy denso o se mueve con gran velocidad, puede causar grandes deformaciones al campo originalmente impuesto.

2. 3. TRATAMIENTO TEÓRICO DE LOS PLASMAS

La forma en que un plasma va a comportarse se puede deducir, en principio, de las interacciones de todas las partículas. Evidentemente éste procedimiento, que correspondería lo que se conoce como la teoría cinética del estado de plasma, es muy difícil de llevar a cabo, dada la gran cantidad de partículas que componen al plasma. Sin embargo, ya en 1905 el físico holandés Hendrik Antón Lorente aplicó al estudio del comportamiento de los electrones en los metales, los métodos estadísticos que el físico austriaco Ludwig Eduard Boltzmann desarrollo para los átomos en movimiento aleatorio que componen un gas. En este tipo de tratamientos, el comportamiento macroscópico del plasma se describe estadísticamente calculando las probabilidades de que el plasma se encuentre en diversos estados en el nivel microscópico, determinados por las posiciones y las velocidades de todas las partículas. Las características macroscópicas del plasma, como su presión, temperatura, densidad y los campos electromagnéticos en su seno se derivan estadísticamente a partir de esta descripción microscópica. Varios físicos y matemáticos en las décadas de 1930 y 1940 desarrollaron ya propiamente la teoría cinética del plasma hasta un alto grado de complejidad y en las décadas subsiguientes este enfoque se ha desarrollado cada vez mas.

Pero por fortuna, en muchas ocasiones el comportamiento del plasma puede considerarse como el de un fluido y entonces se le aplican las leyes de la hidrodinámica; así las características macroscópicas antes mencionadas (presión, temperatura y densidad) se tratan de manera directa, sin ningún contexto microscópico estadístico de partículas en movimiento. Pero como los plasmas son sensibles a los campos eléctricos y magnéticos deben obedecer también las leyes del electromagnetismo. Esta combinación de hidrodinámica y electromagnetismo se llama magnetohidrodinámica (MHD) y estudia el comportamiento de fluidos conductores en presencia de campos electromagnéticos. Así, en muchos casos el comportamiento de un plasma se estudia utilizando las ecuaciones de la MHD. El conjunto de ecuaciones que representan a la MHD es también bastante complicado, pero más fácil de manejar que el enfoque cinético.

REFERENCIAS

[1] F. Bredice, D. Orzi, D. Schinca, H. Sobral, M. Villagrán-Muniz, 2002, “Characterization of pulsed laser generated plasma through its perturbation in an electric field”, *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol.30, No.6, pp.2139-43.

[2] H. Sobral, F. Bredice, M. Villagrán-Muniz, 2005, “Energy Balance in Laser Ablation of Metal Targets”, *Journal of Applied Physics*, vol.98, no.8, pp.83305-1-5.

[3] A. Ciucci, V. Palleschi, S. Rastelli, A. Salvetti, D. P. Singh, and E. Tognoni, 1978, “Effect of imperfect focusing in laser induced plasma spectroscopy measurements,” *Nuovo Cimento Della Societa Italiana di Fisica D-Condensed Matter Atomic Molecular & Chemical Physics Fluids Plasmas Biophysics*, vol. 20D, pp. 1469–1478.

[4] C. Sánchez Aké, H. Sobral, M. Villagrán Muniz, L. Escobar-Alarcón y E. Camps, 2003, “Characterization of laser ablation plasmas by laser beam deflection”, *Optics and Lasers in Engineering*, vol 39, no 5-6, pp. 581-588.

[5] Iván Cabanillas-Vidosa, Carlos A. Rinaldi, y Juan C. Ferrero, 2007, “optical emission and mass spectrometric characterization of laser ablation process of Ca, Mg, and Ba at 1064 nm”, *Journal of Applied Physics*, vol. 102,