



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“FABRICACIÓN DE UN TRANSISTOR DE EFECTO DE
CAMPO CON NANOTUBOS DE CARBONO”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO

PRESENTA:

RICARDO SANDOVAL VÁZQUEZ

DIRECTOR DE TESIS

DR. DOROTEO MENDOZA LOPEZ



CIUDAD UNIVERSITARIA 2010



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.

Dedicatoria

¡A mi mamá y a mi papá, a mis hermanos Rafael y Claudia, a todos mis seres queridos que se adelantaron en el camino y a los que están presentes y me han acompañado!

Agradecimientos

Expreso mi total agradecimiento a la Universidad Nacional Autónoma de México, reconocida como la mejor Universidad de América Latina.

Le doy las gracias a mi hermosa Facultad de Ingeniería y a la Unidad de Servicios de Cómputo Académico.

Un agradecimiento personal al Dr. Doroteo Mendoza y al Instituto de Investigaciones en Materiales por brindarme la oportunidad de realizar mi trabajo de tesis.

ÍNDICE

Resumen

Objetivo

1. Antecedentes de la Nanotecnología

1.1 Nanotecnología.	2
1.1.1 ¿Qué es la nanotecnología?	2
1.1.2 Nanomateriales.	5
1.1.2.1 Nanotubos de carbono.	6
1.1.2.2 Nanopartículas.	6
1.1.2.3 Puntos cuánticos	7
1.1.3 Presente y futuras aéreas de aplicación de la nanotecnología.	8
1.2 Aplicaciones de los nanotubos de carbono.	9
1.2.1 Electrónica.	10
1.2.2 Sensores.	11
1.2.3 Instrumentación científica.	12
1.2.4 Materiales.	12
1.3 Antecedentes de los transistores de efecto de campo con nanotubos de carbono.	13
Referencias	16

2. Nanotubos de carbono

2.1 Nanotubos de carbono.	19
2.2 Estructura geométrica de los nanotubos de carbono.	21
2.2.1 Clasificación de los Nanotubos de Carbono.	21
2.3 Estructura electrónica de los nanotubos de carbono.	23
2.4 Métodos de síntesis de los nanotubos de carbono	25
Bibliografía	28

3. Transistores de efecto de campo (FET)

3.1 Introducción al transistor efecto de campo.	30
3.2 Construcción y características de los FET.	32
3.2.1 JFET	32
3.2.2 MOSFET	33
3.3 Configuraciones de polarización	34
3.4 Curvas características del FET	37
3.5 Aplicaciones actuales de los FET	39
Referencias	42

4. Fabricación y caracterización de FET's con nanotubos de carbono

4.1 Síntesis de nanotubos de carbono	44
4.2 Fabricación de electrodos para el FET con nanotubos de carbono.	45
4.3 Caracterización eléctrica del FET con nanotubos de carbono.	47
4.5 Mediciones y recopilación de resultados experimentales.	51
4.6 Análisis de resultados.	52
Referencias	61

Conclusiones

Resumen

El gran interés en los nanotubos de carbono se debe a su gran potencial en aplicaciones debido a las características electrónicas favorables que poseen.

Los parámetros eléctricos en nanotubos semiconductores han demostrado que un nanotubo conectado a dos electrodos metálicos sobre una placa de silicio tienen las características de un transistor de efecto de campo. Aplicando voltaje a un electrodo de compuerta, el nanotubo puede cambiar de conducir a un estado aislador. Este sistema se estudió para demostrar que puede ser operado incluso a temperaturas ambiente.

Este trabajo se divide en tres etapas:

- Síntesis de nanotubos de carbono
- Fabricación de electrodos mediante películas delgadas
- Caracterización eléctrica.

La síntesis de los nanotubos de carbono se realizó empleando la técnica de descomposición térmica de vapores químicos (CVD) usando disulfuro de carbono como la fuente del carbono.

La caracterización eléctrica fue hecha en una cámara de vacío equipada con un calefactor y puede ser enfriada mediante nitrógeno líquido.

El comportamiento así como la respuesta se pudo medir y graficar en curvas que caracterizan a este tipo de dispositivos. (Curvas de salida, I_D vs. V_{DS} , curvas de transferencia, I_D vs. V_{GS} y curvas de comportamiento I_D vs T .)

El rango de temperaturas a las que puede trabajar el transistor de efecto de campo fabricado es entre los 125 K a los 300 y las variaciones en el valor de la corriente I_D están en el rango de los 20 μ A a 30 μ A

Este comportamiento del dispositivo fabricado con nanotubos de carbono funcionando a diferentes temperaturas puede ser útil en diversas innovaciones o aplicaciones tecnológicas.

Las movilidades obtenidas en los dispositivos fabricados en el presente trabajo van desde los 110.3 cm^2/Vs hasta los 150.7 cm^2/Vs

Los valores de movilidad en el dispositivo fabricado son mayores a los reportados en otros estudios, este aumento de la movilidad puede deberse a la composición de los nanotubos de carbono ya que estos fueron fabricados usando disulfuro de carbono.

The page features a decorative design with three large, overlapping blue circles of varying shades (dark blue, medium blue, and light blue) arranged in a vertical line. Two thin blue lines intersect at the top left, forming a large 'V' shape that frames the circles. A rectangular box with a folded bottom-right corner is positioned on the left side of the page.

Objetivo:

Fabricar un dispositivo transistor de efecto de campo utilizando nanotubos de carbono ya que estos son estructuras únicas con notables propiedades electrónicas, con lo cual se desea estudiar las diferentes características eléctricas del dispositivo construido y su comportamiento a diferentes temperaturas.



1. Antecedentes de la Nanotecnología

1.1 Nanotecnología.

- 1.1.1 ¿Qué es la nanotecnología?
- 1.1.2 Nanomateriales.
 - 1.1.2.1 Nanotubos de carbono.
 - 1.1.2.2 Nanopartículas.
 - 1.1.2.3 Puntos cuánticos (Quantum dots).
- 1.1.3 Presente y futuras áreas de aplicación de la nanotecnología.

1.2 Aplicaciones de los nanotubos de carbono.

- 1.2.1 Electrónica.
- 1.2.2 Sensores.
- 1.2.3 Instrumentación científica.
- 1.2.4 Materiales.

1.3 Antecedentes de los transistores de efecto de campo con nanotubos de carbono.

1.1 Nanotecnología.

La nanotecnología es un área de investigación constante y desarrollo prometedor, tiene como objetivo controlar el comportamiento y la estructura fundamental de la materia a un nivel atómico y molecular. Esta rama de la ciencia nos proporciona la oportunidad de comprender nuevos fenómenos y el continuo descubrimiento de nuevas propiedades con futuro prometedor. Las aplicaciones originadas a través de la nanotecnología son cada día más tangibles y evolucionan muy rápidamente, su impacto es fundamental para el desarrollo de la tecnología como del ser humano.

1.1.1 ¿Qué es la nanotecnología?

Para iniciar la definición de nanotecnología podemos usar sus raíces etimológicas, el prefijo "nano" deriva del griego y su significado es "enano", en términos científicos el prefijo nano quiere decir 10^{-9} , un nanómetro es una milmillonésima parte de un metro, es decir, miles de veces más pequeño que el diámetro de un cabello humano (Figura 1.1).

Los orígenes de la nanotecnología se remontan al año de 1974 cuando Norio Taniguchi de la Universidad de Tokio introdujo el término "nanotecnología" para calificar la precisión en la fabricación de materiales cuando estos tenían tolerancias de nanómetros [1], este tema ya había sido discutido sin usar el término de "nanotecnología" a través de Richard Feynman en el año de 1959 cuando habló de "*There's Plenty of Room at the Bottom*"[2], en el que planteaba la manipulación de los átomos. Para el año de 1986 Eric Drexler del MIT retomó la definición de Taniguchi y popularizó la nanotecnología con su libro "*Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology*" [3].

En la actualidad la nanotecnología se refiere a las actividades científicas y tecnológicas llevadas a cabo a escala atómica o molecular, al trabajar a esta escala surgen principios científicos y nuevas propiedades que pueden ser comprendidos y controlados. Estas propiedades pueden ser observadas y explotadas tanto a escala microscópica como macroscópica, por ejemplo, para el desarrollo de materiales e instrumentos con nuevas funciones y prestaciones.

Cuando se habla de nanoescala, se habla de todo lo menor a 100nm hasta aproximadamente a 1 nm.



Figura 1.1 Perspectiva de la nanoescala. Tres ejemplos de la nanoescala, ADN, un nanotubo de carbono y una nanopartícula comparados con elementos con tamaños comunes [4].

La nanotecnología explota la interacción de tres características tecnológicas:

1. Nuevo y mejorado control de tamaño así como la manipulación a nanoescala en la construcción de estructuras.

2. Nuevas y mejoradas características de los materiales fabricados a nanoescala (por ejemplo, la resolución espacial, químicas, sensibilidad)

3. Nuevo y mejor comprensión de las relaciones entre nanoestructura y propiedades así como la forma en que estos pueden ser integrados a la ingeniería.

Cuando los materiales se trabajan a nanoescala se puede observar que las propiedades de estos pueden llegar a ser diferentes de lo que se conoce en una escala mayor, esto tiene lugar debido a que los nanomateriales tienen en primer lugar, una mayor superficie que masa en comparación con el material producido en una forma más amplia. Esto puede hacer materiales químicamente más reactivos (en algunos casos materiales que son inertes en tamaño mayores se vuelven reactivos cuando se elaboran a nanoescala), y afectan su fuerza o propiedades eléctricas. En segundo lugar, por debajo de 50 nm, las leyes de la física clásica dan paso a los efectos cuánticos, los que provocan comportamientos ópticos, eléctricos y magnéticos diferentes de los que se dan en el mismo material a una escala mayor.

La nanotecnología puede aportar materiales muy útiles con excepcionales propiedades físicas tales como conducción o resistencia eléctrica, así como una alta capacidad de almacenamiento o transferencia de calor, y pueden incluso modificar propiedades biológicas, un ejemplo es la plata que puede convertirse en bactericida a nanoescala.

Sin embargo la nanotecnología da propiedades que pueden ser muy difíciles de controlar. Por ejemplo, si algunas nanopartículas entran en contacto, pueden fusionarse, perdiendo tanto su forma y las propiedades especiales tales como el magnetismo, que los científicos esperan aprovechar para una nueva generación de dispositivos microelectrónicos y sensores.

En la escala en que se encuentra la nanotecnología, la química, la biología, la electrónica, la física, la ciencia de los materiales, y la ingeniería comienzan a converger y las distinciones en cuanto a una determinada medición de una propiedad en una disciplina ya no son aplicables. Todas

estas disciplinas contribuyen a la comprensión y la explotación de las posibilidades que ofrece la nanotecnología, pero si la ciencia básica converge, las posibles aplicaciones son de todo tipo, abarca todo, desde raquetas de tenis, medicamentos, hasta nuevos sistemas de energía. (Figura 1.2)



Figura 1.2

Aplicaciones que se dan gracias a la nanotecnología, desde objetos de uso común hasta productos tecnológicos de alto desempeño [4].

1.1.2 Nanomateriales.

La nanotecnología nos da ciertos materiales a nanoescala los cuales se conocen como nanomateriales cuya principal característica son sus dimensiones estructurales que están en el rango de los 1 a 100 nanómetros.

Por su configuración geométrica, los nanomateriales pueden clasificarse en los siguientes grandes grupos: cero dimensionales (como los puntos cuánticos [6]), unidimensionales (como los nanotubos de carbono), bidimensionales (como el grafeno que es una monocapa bidimensional que constituye al grafito) y materiales nanoestructurados que pueden considerarse como una aglomeración de nanopartículas en contacto físico.”

1.1.2.1 Nanotubos de carbono.

Los nanotubos de carbono son finos cilindros largos de capas de grafito enrolladas. Estos nanotubos de carbono pueden tener diversas estructuras, lo que permite una amplia variedad de propiedades. Son generalmente clasificados como unipared (SWNT, "Single Wall Nanotubes"), que consta de una sola pared cilíndrica, o multipared (MWNT, "Multi Wall Nanotubes"), que tienen cilindros dentro de otros cilindros.

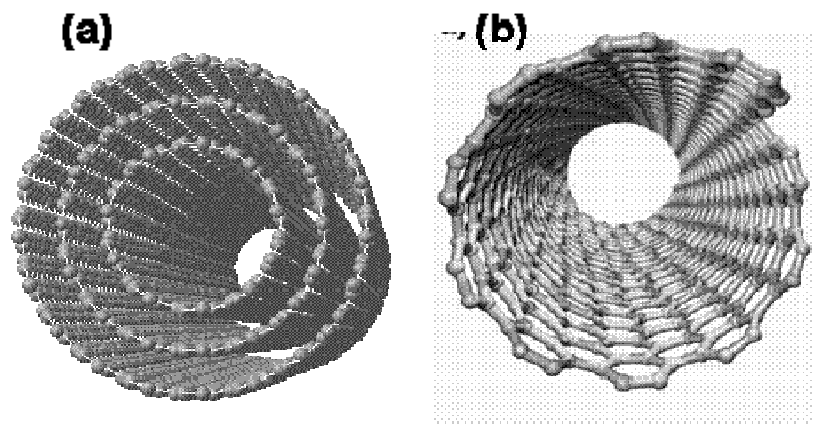


Figura 1.3 Existen dos tipos principales de nanotubos de carbono (a) Vista de un nanotubo de múltiples paredes (MWNT) donde se aprecian las capas concéntricas que lo forman. (b) Nanotubo de carbono de una sola pared (SWNT) se observa la capa única que forma el tubo [5].

1.1.2.2 Nanopartículas.

Las nanopartículas son todas aquellas que tienen una dimensión en el rango de los 1 nm a 100 nm.

Estando a nanoescala se observan cambios en las propiedades físicas de las partículas, en particular mediante el aumento de la proporción de la superficie que afecta el volumen y el área, se da la aparición de los efectos cuánticos. El aumento de superficie en el área también resulta útil en las interacción entre los materiales y nanopartículas, dando lugar a propiedades especiales tales como incremento de la fuerza y / o el aumento de resistencia química o calorífica [7].

Figura 1.4 La parte superior del traje está hecha de algodón recubierto de nanopartículas de plata que desactivan bacterias y virus. La capucha, las mangas y los bolsillos de la chaqueta contienen nanopartículas de paladio que actúan como diminutos convertidores catalíticos para acabar con los componentes dañinos de la polución [8].



Las nanopartículas tienen dimensiones por debajo de la longitud de onda de la luz, dicha característica hace transparente a estos materiales, este efecto se puede explotar en la fabricación de envases o empaques, cosméticos y revestimientos [9].

1.1.2.3 Puntos cuánticos (Quantum dots).

Quantum dots conocidos como "Puntos cuánticos", son estructuras de 1nm fabricados con materiales como el silicio, capaces de confinar un solo electrón, o unos pocos miles, cuyos estados de energía pueden ser controlados mediante la aplicación de un determinado voltaje [10].

Un uso más probable en alguna aplicación sería explotar el hecho de que los puntos cuánticos pueden fabricarse para emitir luz en diferentes longitudes de onda, entre más pequeño es el punto la luz se vuelve azul. Los puntos emiten luz sobre un espectro corto lo cual los hace aptos para adaptarlos a una imagen, sobre todo para muestras biológicas.

La amplia gama de colores que pueden ser producidos por los puntos cuánticos significa que tienen un gran potencial en seguridad. Podrían, por ejemplo, ser ocultados en notas de banco o tarjetas de crédito, produciendo una imagen visible cuando son expuestos a luz ultravioleta.

Es posible hacer diodos emisores de luz (LED) de puntos cuánticos que podrían producir luz blanca, para edificios o automóviles.

Los puntos cuánticos dan la posibilidad de fabricar dispositivos con velocidades altas, todo tipo de switches ópticos y compuertas lógicas tendrían velocidades mayores a 15 Terabits por segundo. En comparación con las existentes Ethernet que trabajan a una máxima velocidad de 10 Megabits por segundo.

Los biólogos están experimentando con compuestos de células vivas y los puntos cuánticos. Estos podrían ser utilizados para reparar las vías neuronales dañadas o suministrar medicamentos mediante la activación de los puntos con luz [10].

1.1.3 Presente y futuras aéreas de aplicación de la nanotecnología.

Los materiales fabricados a nanoescala ya están presente en una amplia gama de productos al alcance de la mano de todos los consumidores. Entre la más conocida es un vidrio utilizado en ventanas el cual está recubierto con nanopartículas de óxido de titanio que reacciona con la luz del sol eliminando la suciedad. Cuando el agua tiene contacto con el vidrio, se propaga uniformemente sobre la superficie, en lugar de formar gotas, se extiende rápidamente, tomando la suciedad en ella. Las nanotecnologías son utilizadas por la industria automovilística para reforzar ciertas propiedades de los parachoques y mejorar las propiedades adhesivas de las pinturas [10].

La nanotecnología tiene la capacidad de aplicarse prácticamente a todos los sectores tecnológicos[11]:

-Medicina. Sistemas de diagnóstico a nanoescala, recubrimientos nanotecnológicos que puedan mejorar la compatibilidad de los implantes, sistemas de administración de medicamentos e implantación de nanopartículas al interior de células cancerosas para su tratamiento.

-Electrónica. Sistemas de almacenamiento de datos de muy alta densidad de registro (por ejemplo, 1 Terabit/pulgada²) y las nuevas tecnologías de visualización a base de plásticos flexibles.

-Energía. Baterías de combustible nanoestructuradas que tienen el potencial para un almacenamiento eficaz del hidrógeno. Células solares fotovoltaicas eficaces y de bajo costo. Mejoramiento en la conducción y distribución de la energía.

-Ciencia de los materiales. Las nanopartículas ya se emplean para reforzar materiales o cosméticos. Se recurre al uso de nanoestructuras superficiales para conseguir superficies resistentes al rayado, hidrófugas, limpiar o esterilizar [10].

-Alimentos, agua y medio ambiente. La nanotecnología ayudará en el desarrollo de instrumentos que se especialicen en la detección y neutralización de microorganismos, plaguicidas o cualquier otro tipo de

elemento peligroso. Se podrá desarrollar mecanismos de limpieza y purificación de agua y aire [19].

Al día de hoy ya se han comercializado diferentes productos desarrollados gracias a las nanotecnologías. Se trata de productos sanitarios (vendajes, válvulas cardíacas), componentes electrónicos, pintura resistente al rayado, equipos deportivos, telas antiarrugas y antimanchas y lociones solares. Las cifras indican que el mercado de este tipo de productos en la actualidad es aproximadamente en 2.500 millones de euros, pero opinan que ascenderá a cientos de miles de millones de euros para el año 2010 y a un billón después de esa fecha [18].

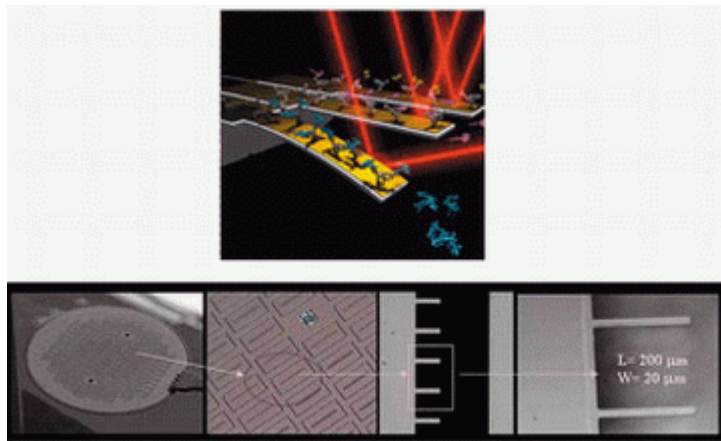


Figura 1.5 Nanobiosensores de reconocimiento celular o molecular [12]

1.2 Aplicaciones de los nanotubos de carbono.

Los nanotubos de carbono son materiales que se caracterizan por sus propiedades mecánicas, eléctricas, ópticas, térmicas y químicas.

Al contar con todas estas propiedades permiten concebir aplicaciones potencialmente útiles y mejorar las ya existentes.

Diversos artículos son los que se pueden obtener al usar nanotubos de carbono para su fabricación. Los elementos compuestos y reforzados con nanotubos de carbono, pantallas planas, sensores biológicos y químicos entre muchos otros.

Campos como la electrónica, materiales, sensores, biotecnología, química, energía, mecánica, instrumentación científica se ven favorecidos por la introducción de nanotubos de carbono en muchos de sus productos [24].

1.2.1 Electrónica

Las primeras aplicaciones prácticas para los nanotubos de carbono han sido electrónicas.

En la actualidad los dispositivos electrónicos tienden a la miniaturización y sobre todo al incremento de sus funciones y características como el aumento de velocidad, eficiencia entre muchas otras más. Los nanotubos de carbono pueden llegar a desempeñarse como el silicio que se usa actualmente en los circuitos electrónicos, pero a diferencia del silicio u otros semiconductores a nivel molecular dejan de funcionar apropiadamente a diferencia de los nanotubos de carbono donde pueden desempeñarse adecuadamente [24].

Al saberse que un nanotubo de carbono puede llegar a ser metálico o semiconductor hace que estos se puedan utilizar para implementar nanocircuitos, si es metálico puede ser empleado como interconector o nanocable y si es semiconductor puede emplearse para fabricar diodos o transistores.

Puede verse a continuación en la Figura 1.6 las principales aplicaciones que surgen debido a la utilización de los nanotubos de carbono, va desde los nanocables [21], diodos [23], transistores, pantallas planas, filtros [22] y memorias [13].

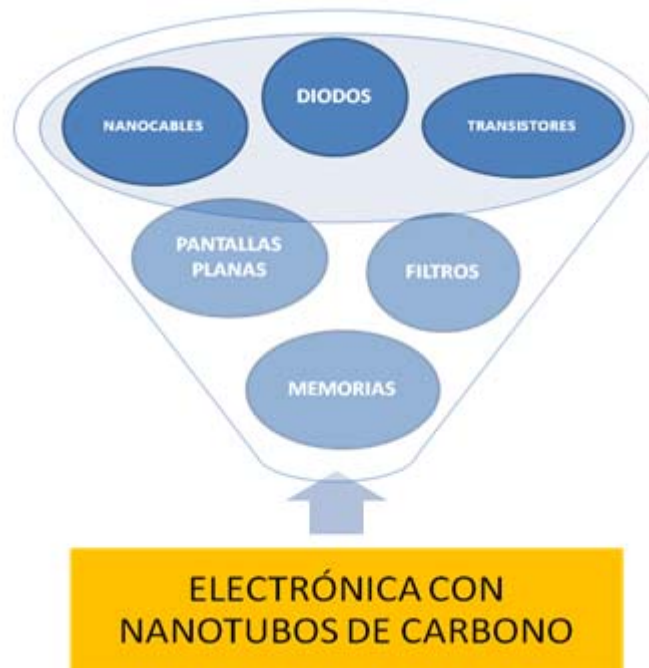


Figura 1.6. Aplicaciones electrónicas que se desarrollaran a través del uso de los nanotubos de carbono como elemento activo.

1.2.2 Sensores

Los sensores son dispositivos que se encargan de detectar características del medio externo (temperatura, presión) y la transmite adecuadamente para que pueda ser sencillamente medible y procesable.

Los nanotubos son una opción viable para la fabricación de sensores de dimensiones pequeñas, que sean rápidos y de bajo consumo de energía.

En la Figura 1.7 se muestran los posibles sensores que se pueden implementar gracias a la utilización de nanotubos de carbono.

Estos sensores utilizan características de los nanotubos de carbono como el cambio en la resistencia y la capacidad al reaccionar químicamente con ciertas sustancias o cambio en la resistencia al ser sometidos a fuerzas mecánicas: presión, curvado, torsión [24].

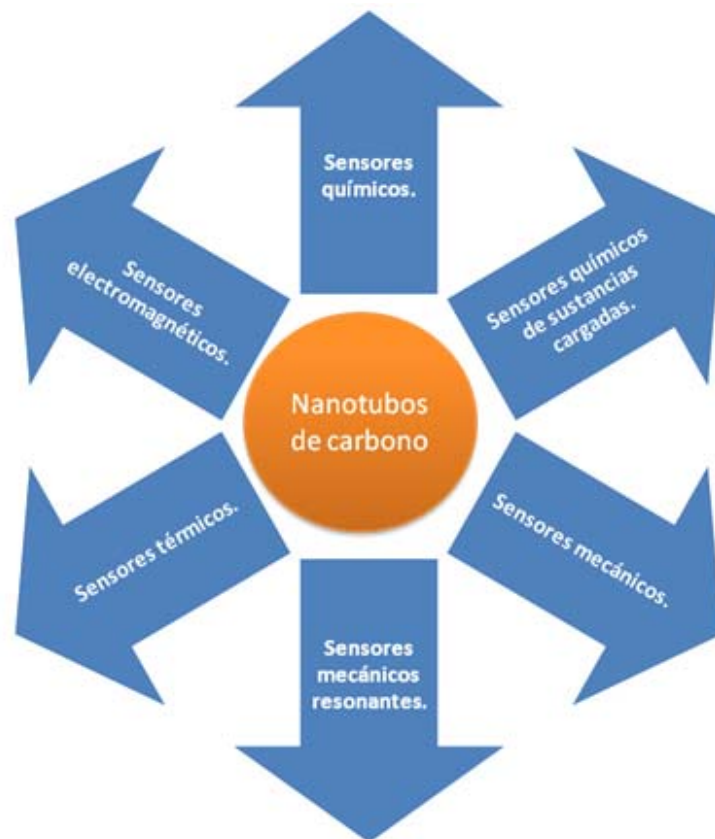


Figura 1.7. Sensores que se desarrollan con nanotubos de carbono hoy en día.

1.2.3 Instrumentación científica

Los nanotubos de carbono pueden ser utilizados para mejorar la funcionalidad de ciertos instrumentos científicos. En concreto pueden utilizarse como puntas de las sondas de microscopios de sonda de barrido y como elemento del dispositivo para contar y medir partículas (contador Coulter)[24].

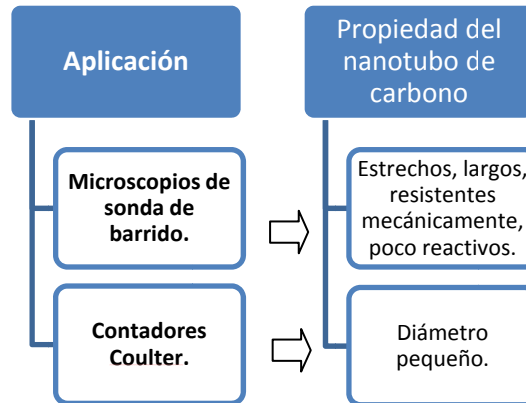


Figura 1.8. Propiedades de los nanotubos de carbono que se aprovecha para la instrumentación.

1.2.4 Materiales

Los nanotubos de carbono tienen el potencial para la generación de nuevos materiales y pueden hacerlo de dos maneras:

- 1.- Agrupándose para formar fibras.
- 2.- Mezclándose con otros materiales para formar nanocompuestos.

Los elementos que en su composición constan de nanotubos de carbono tienen propiedades nuevas debido a que los nanotubos de carbono les transfieren sus peculiares características, con lo cual se pueden desarrollar compuestos que posean propiedades mecánicas, eléctricas, ópticas, químicas y térmicas de alto desempeño.

En el mercado se encuentran artículos que utilizan ya como un elemento en su composición a los nanotubos de carbono, uno de ellos es el cuadro de una bicicleta (Figura 1.9) la cual es ligera y más resistente.



Figura 1.9 Cuadro de bicicleta "BMC Pro Machine SLC 01" hecha a partir de nanotubos de carbono, pesa menos de un kilogramo [25].

1.3 Antecedentes de los transistores de efecto de campo con nanotubos de carbono.

Se puede construir un transistor de efecto de campo (FET, Field Effect Transistor) nanométrico colocando un nanotubo semiconductor entre dos electrodos metálicos que harían de fuente (source) y colector (drain). El flujo de electrones pasaría a través del nanotubo, y se controlaría aplicando los voltajes adecuados a un tercer electrodo situado cerca de él, la compuerta (gate), que produciría el campo eléctrico responsable de controlar la conductividad del nanotubo. Un transistor construido de esta manera podría funcionar a temperatura ambiente de forma muy parecida a los fabricados con silicio. Sin embargo, debido a su pequeño tamaño consumiría mucha menos potencia.

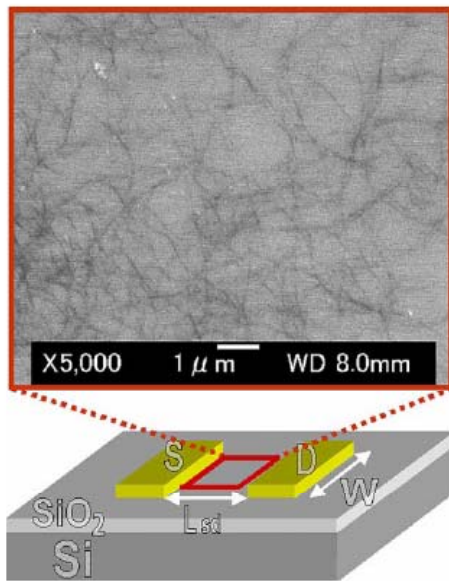


Figura 1.10 Estructura típica de un transistor efecto de campo con nanotubos de carbonos unipared (SWNT) dispersos entre los electrodos que hacen de colector (D,drain) y fuente (S,source) [15].

El transistor puede actuar como un interruptor lógico, pasando el nanotubo de conductor a aislante según los voltajes aplicados a la compuerta. Un transistor efecto de campo fabricado con un nanotubo de carbono puede efectuar conmutaciones ON-OFF y viceversa a una velocidad mucho mayor (alrededor de 1000 veces) que la que se consigue con los mismos dispositivos fabricados en silicio. Este dato es muy importante para la fabricación de futuros procesadores, basados en conmutaciones de este tipo.

Para analizar las propiedades de semiconductor de un nanotubo de carbono, las investigaciones han utilizado intensamente al transistor de efecto de campo debido a su única propiedad de transporte, su alta movilidad en su operación y al origen de su polaridad [14].

Desde la primeras investigaciones relacionadas a los nanotubos de carbono unipared con un funcionamiento tipo p [14], el desarrollo de transistores de efecto de campo con nanotubos de carbono unipared (SWNT-FETS por sus siglas en ingles) y transistores de efecto de campo con nanotubos de carbono multipared (MWNT-FETS por sus siglas en ingles) se han intensificado en la actualidad por su gran potencial [15].

Investigaciones recientes han demostrado los posibles valores de movilidad dependiendo el método de síntesis de los nanotubos de carbono y materiales, ya sean orgánicos o inorgánicos los elementos activos que se usan en la fabricación [16] (Figura 1.11).

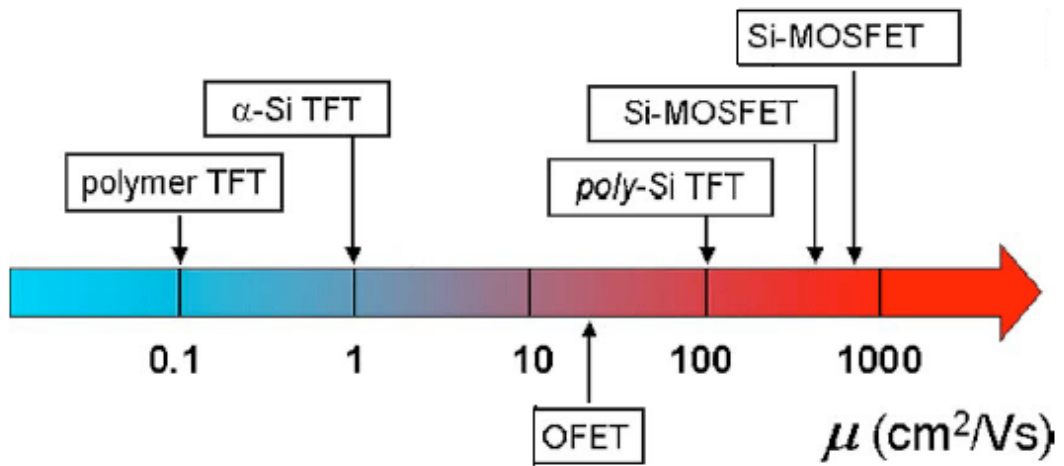


Figura 1.11 Movilidad de carga en transistores de efecto de campo construidos con materiales semiconductores orgánicos e inorgánicos [16].

Referencias

- [1] "On the Basic Concept of Nano-Technology" ,N. Taniguchi, Proc. Intl. Conf. Prod. Eng. Tokyo, Part II, Japan Society of Precision Engineering, 1974.
- [2] Transcripción de la conversación de Richard Feynman (1959- meeting of the American Physical Society at the California Institute of Technology) publicada en Febrero de 1960 como "Caltech's Engineering and Science".
<http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html>
- [3] "Engines of Creation" ,originalmente publicado por Anchor Books en 1986. <http://www.foresight.org/EOC/> reimpressa y adaptada por Russell Whitaker.
- [4] "Nanotechnology- Big things from tiny world." National Nanotechnology Coordination Office.
- [5] "Science and technology of the twenty-first century: Synthesis, Properties, and Applications of Carbon Nanotubes". M. Terrones. Annu. Rev. Mater.Res.
- [6] "Nanotechnology" publicada por Científica en <http://www.cientifica.com/html/Whitepapers/whitepapers.htm>
- [7] "Technology White Papers no. 3." Paul Holister, Jan-Willem, Cristina Román. Nanoparticles.
- [8] "Ropa que repele bacterias, virus y contaminación" <http://www.euroresidentes.com/Blogs/noticias-nano/2007/10/ropa-que-repele-bacterias-virus-y.html>
- [9] Paul O'Brien Physics World. A summary is available here: <http://www.nanotechweb.org/articles/feature/2/12/1/1>, Diciembre 2003.
- [10] "Opportunities and risks of Nanotechnologies." Report in co-operation with the OECD International Futures Programme,
- [11] "Current Consumer Products using Nanotechnology" <http://www.azonano.com/details.asp?ArticleID=1657>
- [12] Nanobiotecnología: Avances Diagnósticos y Terapéuticos <http://www.madrimasd.org/revista/revista35/tribuna/tribuna2.asp>
- [13] "Nanoelectromechanical Systems (NEMS) and Modeling," chapter 121 in the Handbook of Theoretical and Computational Nanotechnology, C.-H. Ke and H.D. Espinosa, American Scientific Publishers, 2006.
- [14] S.J. Tans, A.R.M. Verschueren, C. Dekker, Nature (London) ,1998.
- [15] "Single-walled carbon nanotube aggregates for solution-processed field effect transistors" ,Masashi Shiraishi , Taishi Takenobu, Toshinori Iwai, Yoshihiro Iwasa Hiromichi Kataura, Masafumi Ata, 2004. Chemical Physics Letters 394 (2004) 110–113
- [16] "Electronic transport in single-crystal organic transistors", M. E. Gershenson and V. Podzorov Department of Physics and Astronomy, Rutgers University, Piscataway,2006.
- [17] "Nanostructure Science and Technology, A Worldwide Study".US National Science and Technology Council, Committee on Technology, Interagency Working Group on NanoScience, Engineering and Technology,September 1999. <http://www.wtec.org/loyola/nano/>
- [18] Cifras presentadas en "New Dimensions for Manufacturing: A UK Strategy for Nanotechnology" DTI (2002) pag. 24.

[19] "Desarrollo sostenible en Europa para un mundo mejor: Estrategia de la Unión Europea para un desarrollo sostenible" COM(2001) 264. Declaración del milenio de las Naciones Unidas (<http://www.un.org/millennium/>).

[20] "The oldest known nanotechnology dates back to the ninth century" New Materials International, Marzo 2004.

<http://www.newmaterials.com/news/680.asp>

[21] "Carbon Nanotubes for Inteconnect Applications", Franz Kreupl, Andrew P. Graham, Maik Liebau, Georg S. Duesberg, Robert Seidel, Eugen Unger Infineon Technologies AG, Corporate Research, Otto-Hahn-Ring, Munich, Germany

[22] "A carbon nanotube film as a radio frequency filter" Nina A. Prokudina, Evgenii R. Shishchenko, Oh-Shim Joo, Kyung-Hee Hyung and Sung-Hwan Han . Eco-nano Research Center, Korea Institute of Science and Technology.

[23] "Nanotubes for Electronics", Philip G. Collins, Phaedon Avouris, Scientific American Magazine, December 2000.

[24] "Aplicaciones actuales y futuras de los nanotubos de carbono." Marta Jesús Rivas Martínez, José Román Ganzer, María Luisa Cosme Huertas. http://www.madrimasd.org/informacionIDI/biblioteca/Publicacion/doc/VT/V T11_nanotubos.pdf

[25] " BMC PRO MACHINE SLC01 DEMO BIKE" <http://www.competitivecyclist.com/road-bikes/demo-bike/2009-bmc-pro-machine-slc01-demo-bike-3998.html>



2. Nanotubos de carbono

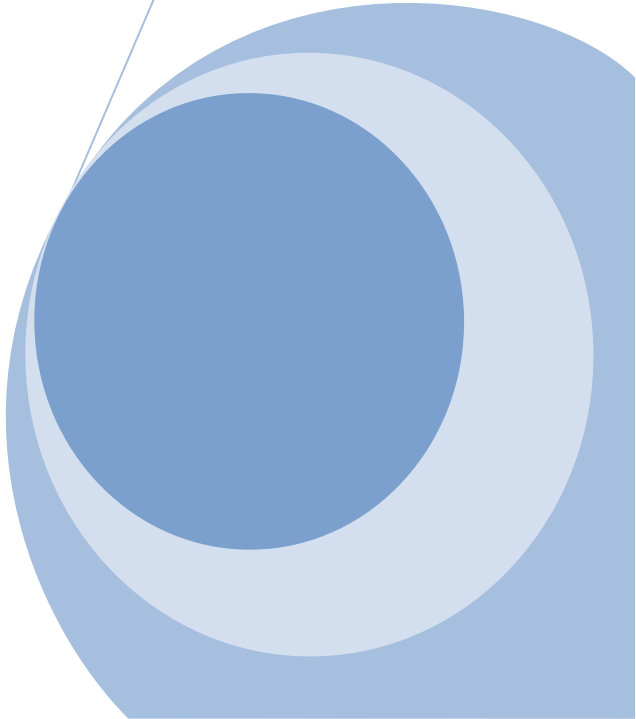
2.1 Nanotubos de carbono.

2.2 Estructura geométrica de los nanotubos de carbono.

2.2.1 Clasificación de los Nanotubos de Carbono.

2.3 Estructura electrónica de los nanotubos de carbono.

2.4 Métodos de síntesis de los nanotubos de carbono



2.1 Nanotubos de carbono.

A mitad de la década del los 80's, se pensaba que solo habían dos formas ordenadas de carbono elemental: el grafito y el diamante. (Figura 2.1)

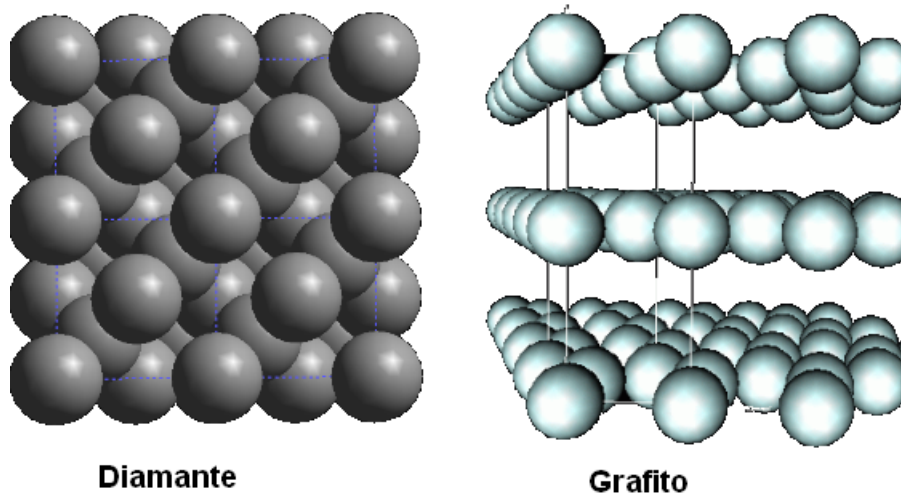


Figura 2.1 Estructura atómica del diamante y grafito.

En el año de 1985 los químicos Harold Kroto, de la Universidad de Sussex (Reino Unido), James Heath, Sean O'Brien, Robert Curl e Richard Smalley de la Universidad de Rice (Estados Unidos), demostraron la existencia de una nueva familia de formas elementales de carbono, denominados fullerenos. Los fullerenos son moléculas "huecas" de carbono (Figura 2.2), que poseen anillos pentagonales y hexagonales. En 1996, Smalley, Kroto y eCurl ganaron el premio Nóbel de química por este descubrimiento.

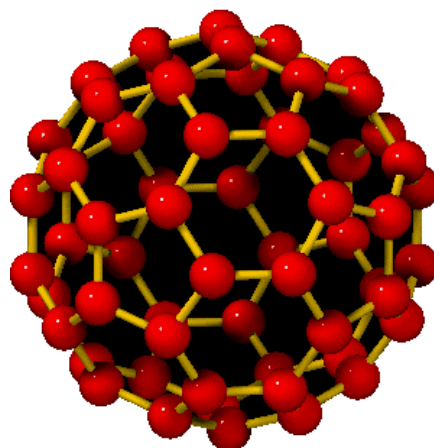


Figura 2.2 Estructura atómica de los fullerenos

A inicios de la década de los 90's, el físico japonés Sumio Iijima [1], del laboratorio de investigaciones fundamentales NEC en Tsukuba, Japón, observó, usando un microscopio electrónico, la existencia de moléculas tubulares en el hollín formado a partir de una descarga de arco usando grafito. Investigaciones posteriores determinaron que estos tubos eran macromoléculas formadas por átomos de carbono puro de alrededor de un micrómetro de largo y de entre 1 y 100 nanómetros de diámetro, que poseían semiestructuras de fullerenos en sus extremos, por lo cual, fueron bautizadas apropiadamente como nanotubos de carbono de pared múltiple, "multiwall nanotubes" (MWNT).

En el año de 1992, los físicos Noriaki Hamada, Shin-ichi Sawada y Atsushi Oshiyama predijeron propiedades interesantes para los nanotubos de pared única, SWNT, los cuales aún no se lograban sintetizar en el laboratorio. Inicialmente, ellos observaron que había muchas maneras de "enrollar" una hoja de grafito para formar un SWNT [2].

En 1993, los físicos Sumio Iijima e Ichihashi demostraron la existencia de nanotubos de pared única SWNT [3].

Los nanotubos de carbono de pared única, "single-wall nanotubes" (SWNT) son nanoestructuras que poseen propiedades electrónicas y mecánicas muy especiales [2]. Un SWNT ideal se puede describir como una capa bidimensional de grafito "enrollada" formando un cilindro de radio del orden de los nanómetros. Dependiendo de su quiralidad y de su diámetro el nanotubo puede comportarse como conductor o semiconductor. Esta particular dependencia de sus propiedades electrónicas con la geometría de los nanotubos se ha demostrado experimentalmente, lo cual ha generado gran interés por sus posibles usos en nanoelectrónica y dispositivos nanomecánicos como transistores nanométricos, puntas de prueba de Microscopios Electrónicos, entre otros.

Un nanotubo de carbono (NTC) ideal puede ser considerado como una red hexagonal de átomos de carbono que se ha enrollado hasta formar un cilindro hueco como se observa en la Figura 2.3 Su estructura es semejante a una lámina de grafito (actualmente a esta lámina monoatómica se le denomina "grafeno") enrollada que forma un cilindro cuyo diámetro se encuentra en la escala de los nanómetros.

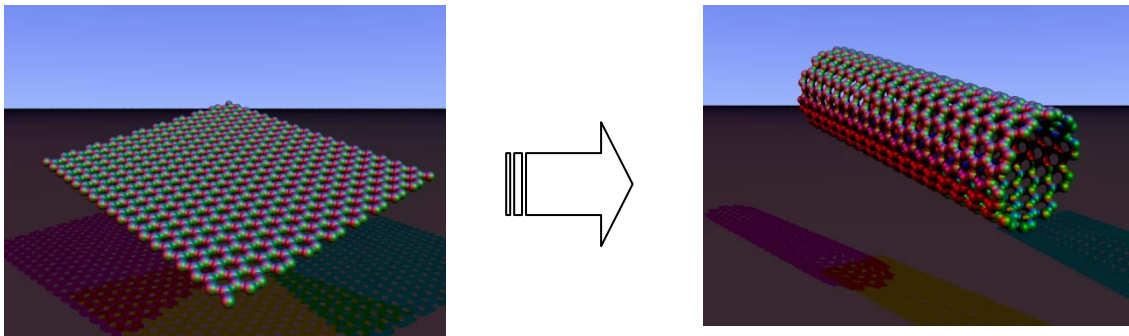


Figura 2.3 Un nanotubo de ideal puede ser considerado como una red hexagonal de átomos de carbono que se ha enrollado hasta formar un cilindro hueco.

2.2 Estructura geométrica de los nanotubos de carbono

El estudio de la estructura geométrica de los nanotubos de carbono, es sumamente importante, ya que, su geometría y la mayoría de las propiedades de los nanotubos de carbono dependen de su diámetro y ángulo quiral. Estos dos parámetros, diámetro y quiralidad, resultan completamente definidos por los dos índices de Hamada (n, m), v (Figura 2.5) [2].

2.2.1 Clasificación de los Nanotubos de Carbono:

De acuerdo al número de capas se clasifican en:

Nanotubos de capa múltiple (MWNT).- Son aquellos formados por capas concéntricas de forma cilíndrica, las cuales están separadas aproximadamente una distancia similar a la distancia interplanar del grafito.

Nanotubos de capa única o unipared (SWNT).- Son los que se pueden describir como una capa bidimensional de grafito "enrollada" formando un cilindro de radio del orden de los nanómetros, los cuales además poseen en sus extremos semiestructuras de fullerenos.

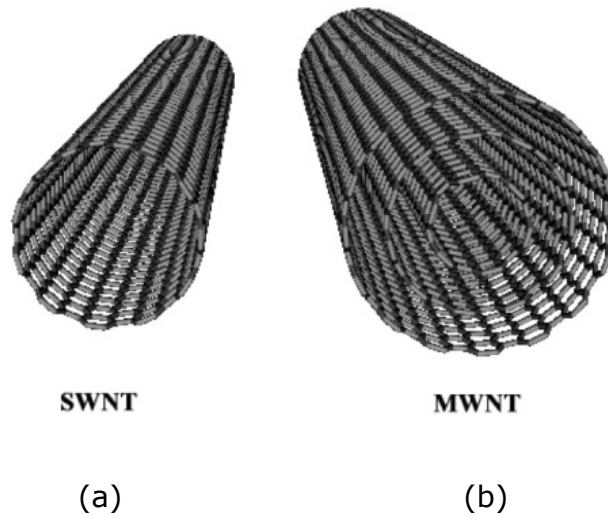


Figura 2.4 Existen dos tipos principales de nanotubos de carbono. (a) Nanotubo de carbono de una sola pared (SWNT) se observa la capa única que forma el tubo. (b) Vista de un nanotubo de múltiples paredes (MWNT) donde se aprecian las capas concéntricas que lo forman.

De acuerdo a los índices de Hamada (n,m): [2] (Figura 2.6)

Nanotubos armchair.- Los nanotubos tendrá esta denominación si ($n = m$) y si además posee una quiralidad de $\Phi = 0^\circ$.

Nanotubos zigzag.- Se llamara así cuando ($m = 0$) y poseen además una quiralidad de $\Phi = 30^\circ$.

Nanotubos chiral.- Los nanotubos son tipo chiral si ($n > m > 0$) y si además poseen una quiralidad de $0^\circ < \Phi < 30^\circ$.

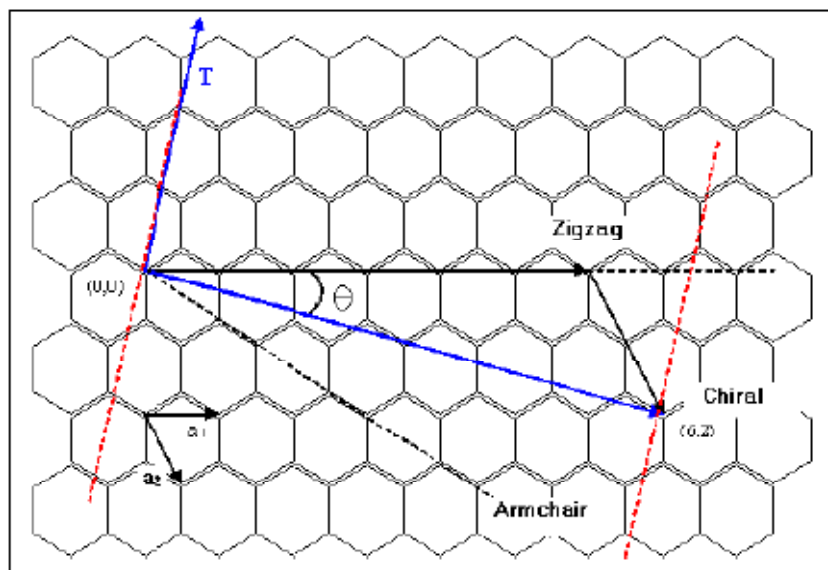


FIGURA 2.5: Se muestra el SWNT, que puede ser construido enrollando una hoja de grafito de tal forma que coincidan dos sitios cristalográficamente equivalentes de la red hexagonal. Además dependiendo de la forma de envolverse se pueden presentar los tres tipos de nanotubos [6].

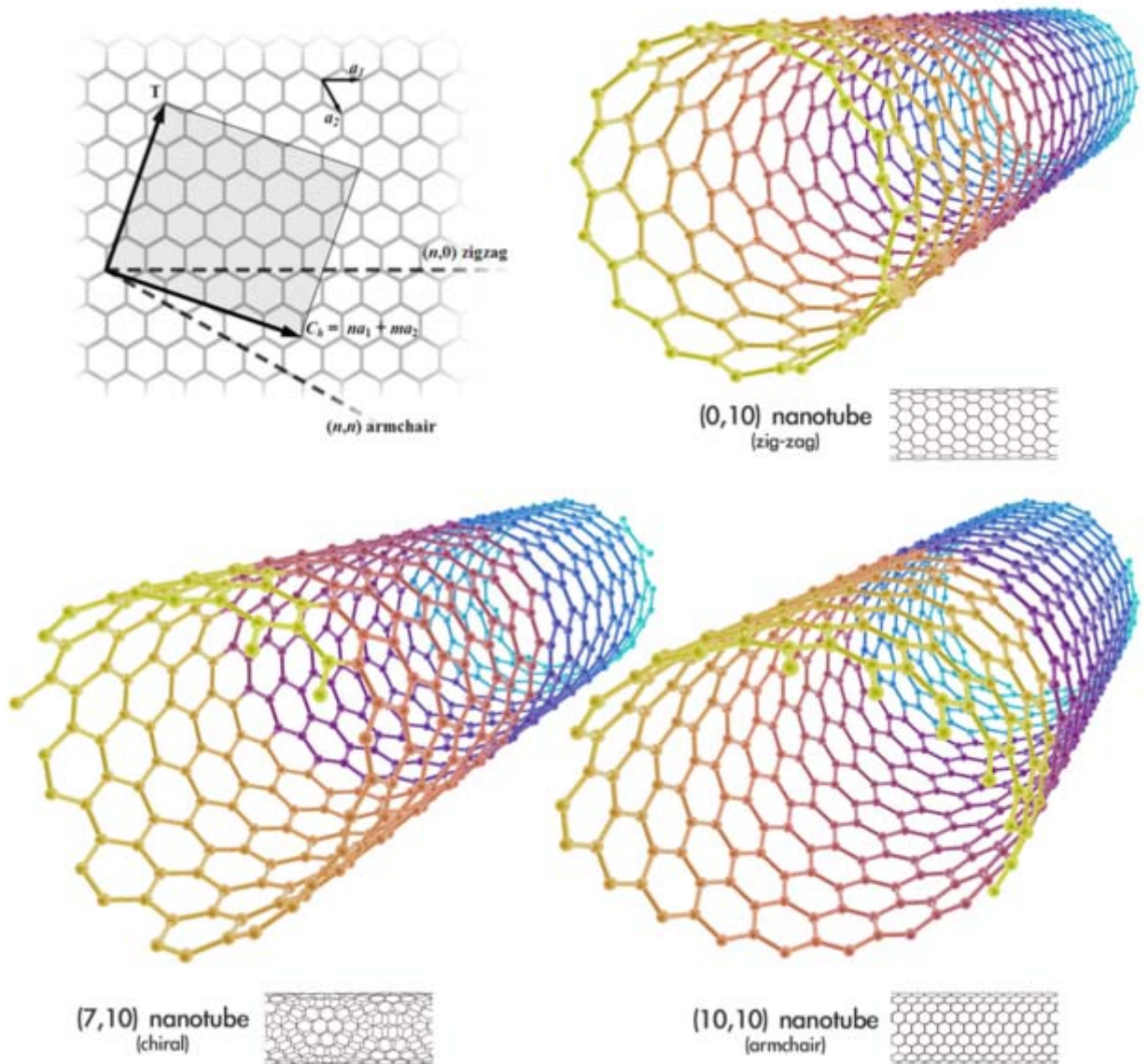


FIGURA 2.6 De acuerdo a la forma en que es enrollada la hoja de grafito, se pueden tener 3 tipos de nanotubos de carbono, chiral, zig-zag y armchair.

2.3 Estructura electrónica de los nanotubos de carbono.

Un nanotubo de carbono puede actuar de diversas maneras, puede tener características metálicas, semiconductoras o también superconductoras. Las características electrónicas de los nanotubos de carbono dependen principalmente de su diámetro como de su quiralidad como ya se había mencionado (Figura 2.7).

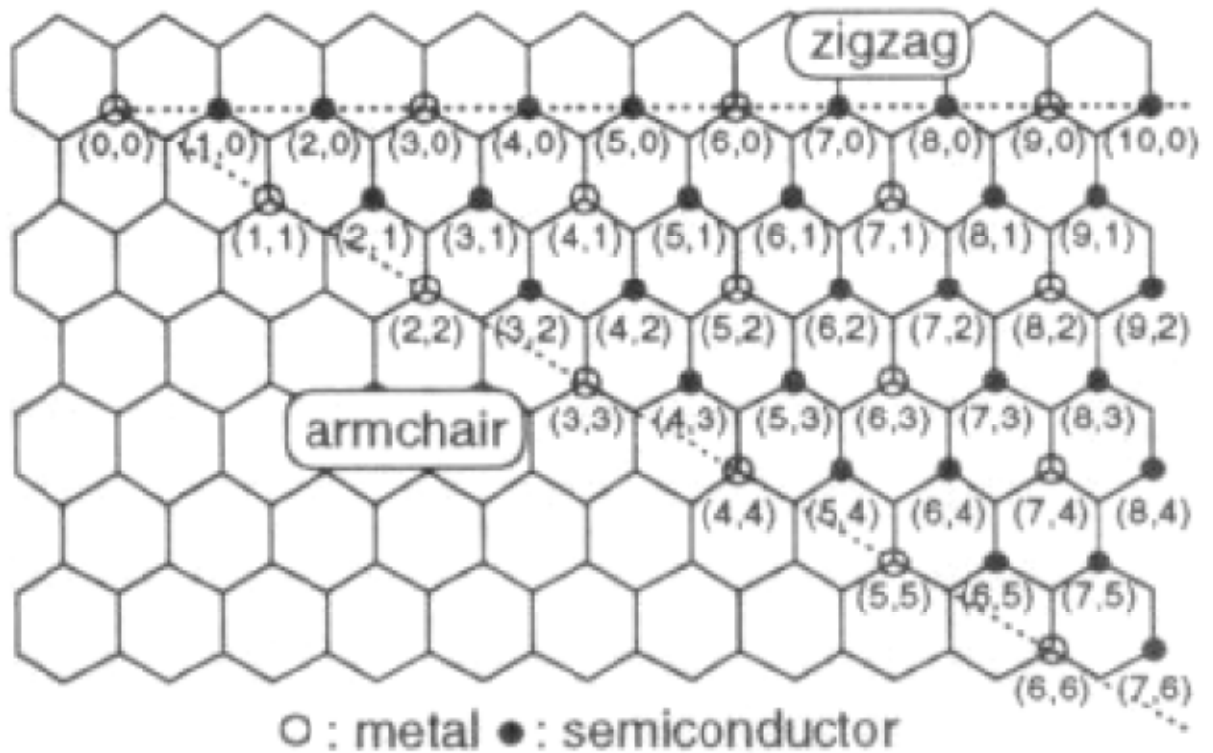


Figura 2.7 En presente diagrama se muestra el carácter electrónico de cada tipo de nanotubo de carbono, vectores quirales especificados por los pares de los números enteros (n,m) para nanotubos de carbono en general, incluyendo nanotubos zigzag, armchair y quiral [7].

Un nanotubo de carbono tiene la posibilidad de ser semiconductor y en algunos casos metálicos debido a las diferencias minúsculas en su arreglo atómico [8].

Estudios confirman que algunos nanotubos son metálicos y algunos son semiconductores, para los nanotubos semiconductores demuestran que esta característica está en función al recíproco del diámetro del nanotubo, independiente de la quiralidad del nanotubo. Esta característica notable es debido a la anisotropía de las bandas de energía del grafito, el material con el que se sintetizan y la estructura geométrica particular de los nanotubos [15] (Figura 2.8).

Un nanotubo zigzag $(n,0)$ puede tener dos tipos distintos de comportamiento, los nanotubos pueden ser metálicos cuando n es un múltiplo entero 3 y semiconductores en caso contrario. Cuando el vector de quiralidad rota lejos de $(n,0)$, es posible tener nanotubos quiral (n,m) con propiedades eléctricas similares a los nanotubos zigzag, el nanotubo es metálico y de otra manera semiconductor. Finalmente, cuando el vector de quiralidad rota 30° respecto a la dirección $(n,0)$, tenemos nanotubos armchair (n,n) , donde $n=m$ y se espera sean metálicos (Figura 2.7).

Las investigaciones muestran que todos los nanotubos armchair son metálicos, en cuanto a los nanotubos quiral y zigzag solamente 1/3 de ellos son metálicos, mientras los 2/3 restantes son semiconductores, esto depende del diámetro del nanotubo y del ángulo quiral entre el eje del nanotubo y la dirección del zigzag.

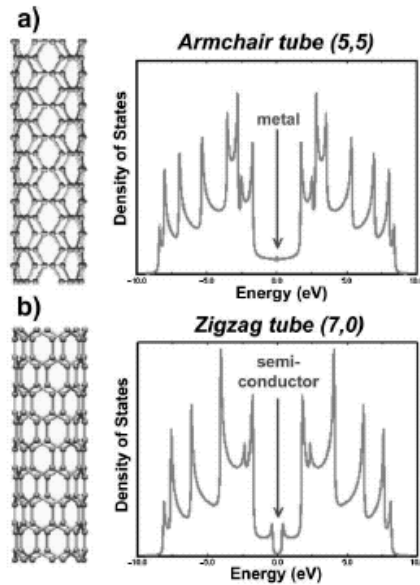


Figura 2.8 Propiedades electrónicas de dos diferentes nanotubos de carbono. (a) un tubo armchair metálico, el cual muestra estados electrónicos en la energía de Fermi (característicos de un metal); (b) un tubo zigzag que revela un comportamiento semiconductor causado por la brecha de energía localizada entre las bandas de valencia y de conducción (característica de un semiconductor).

2.4 Métodos de síntesis de los nanotubos de carbono

Los métodos para la síntesis de NTCs son de gran importancia, algunas aplicaciones requieren gran cantidad de este material, en otros casos alta pureza es la propiedad más importante, o para algunas aplicaciones el crecimiento con una morfología especial o en sustratos específicos siguiendo patrones particulares son las características más importantes.

Los nanotubos fueron descubiertos primero en el hollín del método de descarga de arco por Iijima. Este método se había utilizado mucho antes en la producción de las fibras y de los fullerenos de carbono. Llevó 2 años a Iijima y a Ichihashi, a Bethune y otros, sintetizar SWNTs por medio de los catalizadores metálicos en el método de descarga de arco en 1993. Un progreso significativo fue alcanzado por la síntesis de ablación láser de paquetes de SWNTs alineado con una distribución de diámetros pequeños por Smalley y colaboradores.

Los métodos de ablación láser y descarga de arco para el crecimiento de nanotubos se han seguido activamente en los últimos años. Ambos métodos

involucran la condensación de átomos de carbono generados de la evaporación de fuentes sólidas de carbono. La temperatura involucrada en estos métodos es cercana a la temperatura a la que se funde el grafito, 3000-4000°C. [11]

2.4.1 Síntesis por descarga de arco

En 1992 Thomas Ebbeser y Pullickel M. Ajayan, del laboratorio de investigación Fundamental de NEC, publicaron el primer método de fabricación de cantidades macroscópicas de nanotubos. Consiste en conectar dos barras de grafito con diámetros de 0,5 a 40 mm a una fuente de alimentación con voltaje de 20 - 50 V, separadas unos milímetros y accionar un interruptor. Al saltar una chispa de corriente DC de 50 - 120 A entre las barras y una presión base de 400 torr de helio, el carbono se evapora en un plasma caliente. Parte del mismo se vuelve a condensar en forma de nanotubos. Las altas temperaturas y los catalizadores metálicos añadidos a las barras puede producir nanotubos de pared única y múltiple con pocos defectos estructurales. Los nanotubos tienden a ser cortos (50 micras o menos) y depositarse en formas y tamaños aleatorios. Durante el proceso también son formados el carbono amorfo y los fullerenos. Típicamente se obtiene un amplio rango de diámetros de nanotubos.

2.4.2 Síntesis por vaporización láser

Un método eficiente para la síntesis de paquetes de SWNTs con un diámetro estrecho emplea la vaporización láser de un blanco de grafito, es una técnica de corta duración y altas temperaturas. Para generar SWNTs usando la técnica de láser es necesario agregar partículas de metal como catalizador al blanco de grafito. Smalley y colaboradores emplearon este método para el crecimiento de SWNTs de alta calidad, ellos utilizaron pulsos intensos de láser para evaporar un blanco de carbono que contenía un porcentaje atómico de 0.5 de níquel y cobalto. El blanco fue colocado en un tubo horizontal calentado a 1200°C, mientras un flujo de gas inerte cruza a través de este. El material así producido contienen una mezcla de nanotubos y nanopartículas. En cuanto a los MWNTs son similares a aquellos MWNTs producidos por descarga de arco. Recientemente se reportó que esta técnica de síntesis logra una alta producción al transformar del 70 al 90% de grafito en nanotubos de carbono. Este método produce nanotubos de pared única con una gama de diámetros que se pueden controlar variando la temperatura de reacción. Una de las desventajas de este método es que necesita láseres muy costosos.

2.4.3 Síntesis por descomposición térmica de vapores químicos (CVD)

La técnica por descomposición térmica de vapores químicos ó CVD ("Chemical Vapor Deposition", por sus siglas en inglés) ha probado ser un método útil para crecer nanotubos de carbono debido a su versatilidad en el uso de una gran variedad de precursores de carbono y catalizadores [11]. Una ventaja de CVD sobre los otros dos métodos es que es posible crecer nanotubos de carbono en diferentes sustratos cubriéndolos con un catalizador conveniente. Por otra parte, si el catalizador es depositado siguiendo algún patrón específico, entonces los nanotubos de carbono pueden crecer en el sustrato con la misma morfología que el del patrón del catalizador, es decir, este determina la localización y diámetro de los nanotubos formados.

El proceso del crecimiento implica calentar un material catalizador a altas temperaturas en un horno horizontal con un tubo de cuarzo y hacer fluir un gas de hidrocarburo a través del reactor tubular por un período del tiempo. Los materiales crecidos sobre el catalizador se recogen al enfriar el sistema a la temperatura ambiente. Los parámetros claves en el crecimiento de nanotubos por CVD son: (1) la existencia de hidrocarburos, (2) la presencia de un catalizador metálico, que sirva como semilla de crecimiento del nanotubo, y (3) la temperatura de crecimiento.

En una primera etapa se preparan los catalizadores y en una segunda etapa se crecen los nanotubos. En la segunda etapa (el catalizador ha de estar ya en todo momento en atmósfera controlada libre de aire), se introduce en el sistema la fuente de carbono para producir el crecimiento de los nanotubos. Las temperaturas utilizadas para la síntesis de nanotubos por CVD se hallan generalmente comprendidas entre 650 y 900°C. Suele emplearse un reactor tubular, introducido en un horno eléctrico, para llevar a cabo ambas etapas, pasando de una a otra mediante los flujos de gases y las temperaturas.

La técnica de CVD es el más sencillo de los tres métodos para su aplicación a escala industrial. Podría emplearse para fabricar nanotubos largos, necesarios en las fibras empleadas en materiales compuestos.

Referencias

- [1] S. Iijima, *Nature (London)* 56, 354 (1991).
- [2] N. Hamada, S. Sawada, and A. Oshiyama, *Phys. Rev. Lett.* 68, 1579 (1992).
- [3] Z. C. Tu and Z. C. Ou-Yang, *J. Phys. Cond-Mat*, 0205544 v3, (2005).
- [4] Huber, J.G.; Romero, J.M.; Rosolen, J.D.; and Luengo, C.A.; *Quim. Nova* 25, 59-61 (2002).
- [5] Rodrigo B. Capaz, Hélio Cacham, *CIÊNCIA HOJE* • vol. 33 • nº 198 (2003).
- [6] Carbon nanotubes, Endo M. Iijima S. Dresselhaus, M.S. Vol 33, Pergamon, 1996.
- [7]. Rodrigo B. Capaz, *Física de Fullerenos y Nanotubos de carbono*, cap.7 (2000).
- [8]. A. Oshiyama, S. Okada y S. Saito. *Physica B* 323(2002) 21. Prediction of electronic properties of carbon-based nanostructures.
- [9] K. Ichimura, et al. *Physica B* 323(2002)230. Tunneling spectroscopy on carbon nanotubes using STM.
- [10]. Simulation of STM images and STS spectra of carbon nanotubes. Ph. Lambin, V. Meunier y A. Rubio. *Science and Application of Nanotubes*, edited by Tománek and Enbody Kluwer Academic / Plenum Publishers, New York, 2000.
- [11]. Carbon nanotubes Synthesis, Structure, Properties, and Applications, Dresselhaus, M.S. Dresselhaus, G. Avouris, Ph. vol. 80, Springer, Berlin, 2001.
- [12]. P. Kim, et al. *Phys. Rev. Letters*, 82(1999)1225. Electronic density of states of atomically resolved single-walled Carbon Nanotubes: Van Hove singularities and end states.
- [13]. L. C. Venema, et al. *Phys. Rev. B* 62(2000)5238. Spatially resolved scanning tunneling spectroscopy on single-walled carbon nanotubes.
- [14]. M.S. Dresselhaus, G. Dresselhaus y A. Jorio. *Annu. Rev. Mater. Res.* 34(2004)247. Unusual properties and structure of carbon nanotubes.
- [15]. T. Wang Odom. et al. *J. Phys. Chem.* 104(2000)2794. Structure and electronic properties of carbon nanotubes.



3. Transistores de efecto de campo (FET)

3.1 Introducción al transistor efecto de campo.

3.2 Construcción y características de los FET.

3.2.1 JFET

3.2.2 MOSFET

3.3 Configuraciones de polarización

3.4 Curvas características del FET.

3.5 Aplicaciones actuales de los FET.

3.1 Introducción al transistor efecto de campo.

Un transistor es un dispositivo que controla el flujo de una señal por medio de una segunda señal de mucho menor intensidad. La señal de control puede ser una señal de corriente o voltaje. El transistor es un dispositivo semiconductor, que presenta dos modos de funcionamiento: lineal y no lineal. Una de sus aplicaciones es la conmutación la cual se centra en la parte no lineal, que permite utilizar dos estados claramente diferenciado (corte y saturación; "1" lógico y "0" lógico) [1], estos dispositivos también son fundamentales en la parte de amplificación de señales [2].

Existen diversos tipos de transistores, entre ellos los TBJ ó BJT (del inglés Bipolar Junction Transistor, transistor bipolar de unión o juntura), los TECJ ó FET (por sus siglas en ingles de Field Effect Transistor , Transistor de Efecto de Campo), MOS-FET (Transistor efecto de campo metal-óxido semiconductor) ó TECMOS y otros [1].

El transistor de efecto de campo (FET) (por sus siglas en ingles de Field Effect Transistor) es un dispositivo de tres terminales para aplicaciones diversas que se asemejan, en una gran proporción, a los transistores BJT (del inglés Bipolar Junction Transistor, transistor bipolar de unión). Aunque existen importantes diferencias entre los dos tipos de dispositivos, también es cierto que tienen muchas similitudes [2].

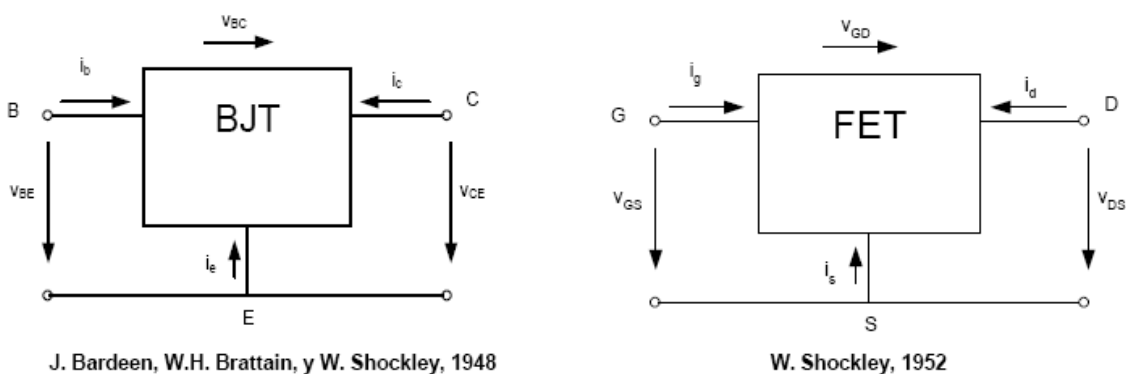


Figura 3.1 BJT es un dispositivo controlado por corriente, mientras que el transistor efecto de campo es un dispositivo controlado por voltaje.

La diferencia básica entre los dos tipos de transistores es el hecho de que el transistor BJT es un dispositivo controlado por corriente, mientras que el transistor efecto de campo es un dispositivo controlado por voltaje. En otras palabras, la corriente I_C (corriente de colector), es una función directa del nivel de I_B (corriente en la base). Para el transistor efecto de campo la

corriente I_D es una función del Voltaje V_{GS} aplicado al circuito de entrada [5]. En cada caso, la corriente del circuito de salida está controlado por un parámetro del circuito de entrada, en un caso se trata de un nivel de corriente y en el otro de un voltaje aplicado (Figura 3.1).

Así como existen transistores bipolares npn y pnp, también hay transistores de efecto de campo de canal n y canal p. Sin embargo, es un dispositivo bipolar, el prefijo bi indica que el nivel de conducción está en función de dos portadores de carga: los electrones y los huecos. El FET es un dispositivo unipolar que depende únicamente de la conducción de electrones (canal -n) o de huecos (canal -p) [1][4][5].

Una de las características más importantes del FET es su gran impedancia de entrada. Con un nivel de uno, hasta varios cientos de megaohms, excede por mucho los niveles típicos de resistencia de entrada de las configuraciones con transistores BJT, lo cual es una característica muy importante para el diseño de sistemas de amplificación. Por otro lado, el transistor BJT tiene mayor sensibilidad ante cambios en la señal aplicada. En otras palabras, la variación en la corriente de salida, por lo general, es mucho mayor para el caso de los BJTs que para el caso de los FETs, ante el mismo cambio de voltaje aplicado. Por esta razón, las ganancias comunes de voltaje para los amplificadores de BJT son mucho mayores que para los de FET. En general, los FETs son más estables a la temperatura que los BJTs, lo cual los hace particularmente útiles en los circuitos integrados. Sin embargo, las características de construcción de algunos FETs los pueden hacer más delicado que los BJTs.

3.2 Construcción y características de los FET.

Hay dos familias de transistores de efecto de campo: los JFET y los MOSFET[5].







TRANSISTOR DE EFECTO CAMPO DE UNIÓN (JFET)		CANAL N	
		CANAL P	
TRANSISTORES DE METAL OXIDO SEMICONDUCTOR DE EFECTO CAMPO (MOSFET)	ACUMULACION O ENRIQUECIMIENTO	CANAL N (NMOS)	
		CANAL P (PMOS)	
	DEPLEXION O EMPOBRECIMIENTO	CANAL N	
		CANAL P	

Figura 3.2 División de los FET, se muestran las dos familias de transistores de efecto de campo: los JFET y los MOSFET, con su representación grafica [4].

3.2.1 JFET

El JFET es un dispositivo de tres terminales, con una terminal capaz de controlar la corriente entre las otras dos, utiliza un campo eléctrico para controlar la conductividad de un canal en un semiconductor[5][6].

Los transistores de efecto de campo de unión o juntura, fueron primero propuestos por Shockley en 1952[10] y su funcionamiento se basa en el control del paso de la corriente por el campo aplicado a la compuerta (gate), constituida por una o varias uniones p-n polarizadas.

La estructura física de un JFET (transistor de efecto campo de unión o juntura) (Figura 3.4) consiste en un canal de semiconductor tipo n o p dependiendo del tipo de JFET, con contactos en cada extremo, llamados FUENTE (source) y DRENADOR O SUMIDERO (drain). A los lados del canal existen dos regiones de material semiconductor de diferente tipo al canal, conectados entre sí, formando el terminal de PUERTA o COMPUERTA (gate).

Los JFET están constituidos por una capa semiconductor de tipo n depositada sobre un sustrato de silicio u otro semiconductor, de tipo p. Un área pequeña de la superficie de la capa semiconductor de tipo n esta difundida con impurezas también de tipo p, y forma, junto con el sustrato de silicio, el contacto de la compuerta(gate). Los electrodos metálicos que

hacen de fuente (source) y drenador (drain) se depositan directamente a ambos lados del contacto superior de la compuerta (gate) [7]. En la Figura 3.4 se presenta un esquema de la geometría de las diferentes zonas y contactos de un JFET. El símbolo gráfico que se utiliza para representar al JFET de tipo n en los circuitos se muestra en la Figura 3.4, con la flecha de la compuerta apuntando hacia dentro (a la derecha) para indicar el carácter n del semiconductor. En el caso del JFET de tipo p, la flecha de la puerta tiene la dirección opuesta a la figura.

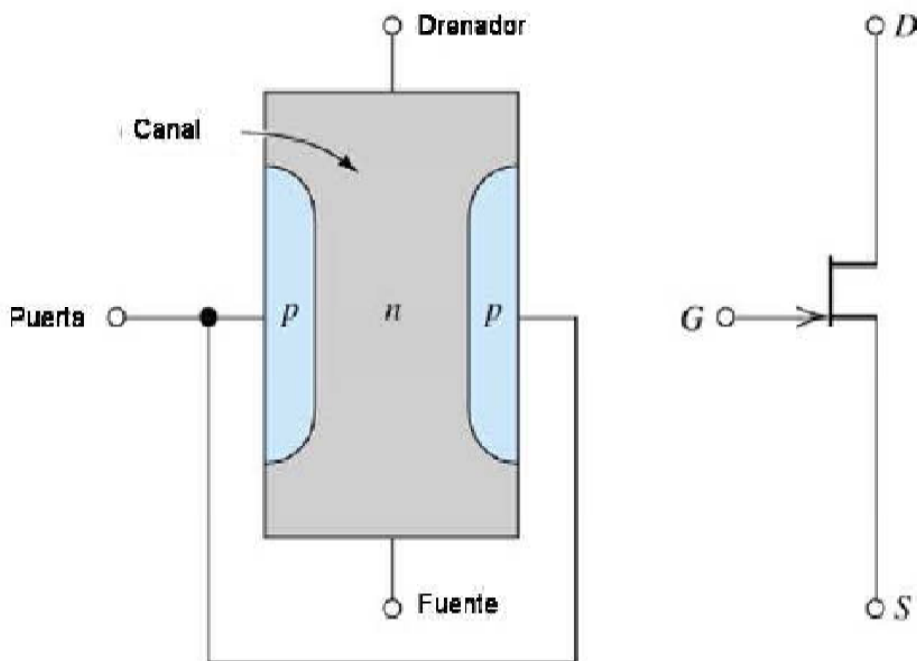


Figura 3.4 La estructura física de un JFET (transistor de efecto campo de unión o juntura) que consiste en un canal de semiconductor tipo n y su símbolo gráfico.

3.2.2 MOSFET

MOSFET significa transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor[7].

En la Figura 3.5 se muestra la estructura básica de un MOSFET de silicio tipo p. Básicamente consiste en una estructura en la cual el electrodo metálico superior es la compuerta (gate), depositado sobre la capa aislante. Existen además dos regiones pequeñas de la superficie dopadas fuertemente con impurezas donadoras de tipo n. Sobre cada una de estas regiones de tipo n se deposita un electrodo metálico, formando el contacto de fuente y drenador del transistor. En la figura 3.5 se muestra el símbolo del transistor MOSFET de canal en el cual la flecha indica el sentido convencional de la corriente (drenador a fuente). En el MOSFET de canal p, la corriente tiene sentido opuesto y la flecha del dibujo lleva la dirección invertida.

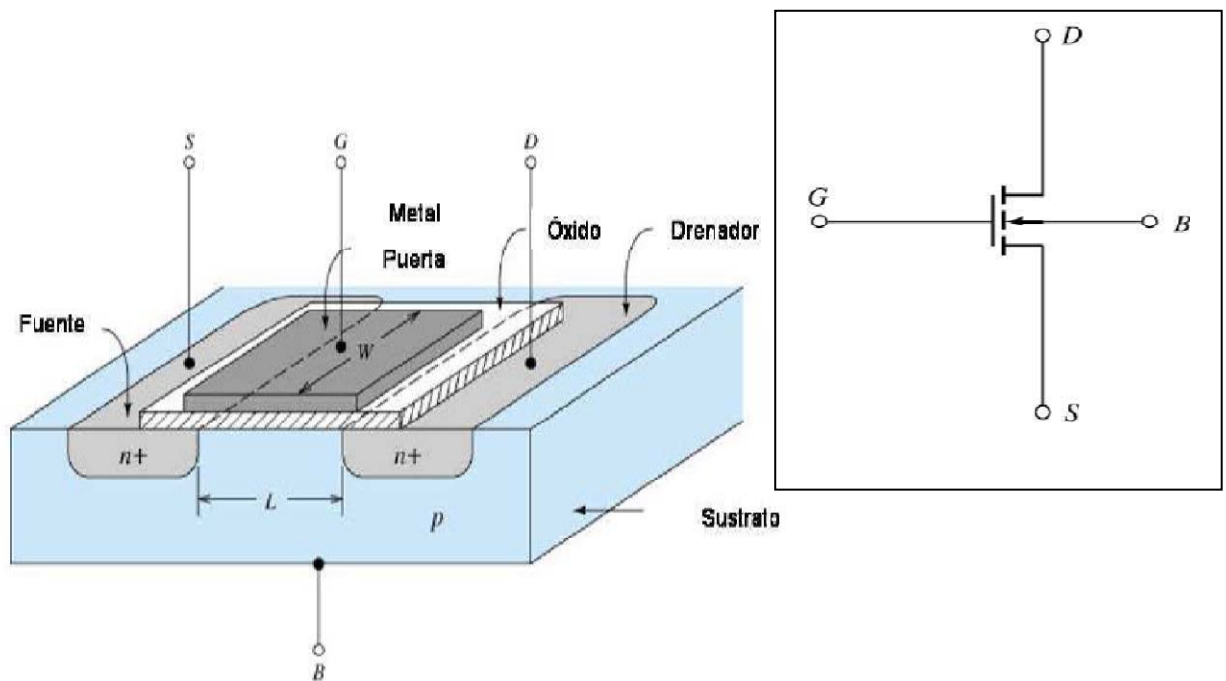


Figura 3.5 Estructura típica de un MOSFET de canal n y el símbolo del MOSFET de canal n utilizado en la representación de circuitos.

3.3 Configuraciones de polarización

Entre los circuitos de polarización para el FET más comunes y usadas se tienen:

- Circuito de Polarización Fija
- Circuito de Polarización por Divisor de Voltaje

- Circuito de Autopolarización
- Circuito de Polarización de compuerta común.
- Circuito de Polarización por retroalimentación

El análisis de estos circuitos involucra dos pasos básicos:

1. Identificación de la entrada y la salida del circuito.
2. Obtención de las ecuaciones tanto para la entrada como para la salida del circuito.

- ✓ Circuito de Polarización Fija

El circuito básico de polarización fija se muestra en la figura siguiente:

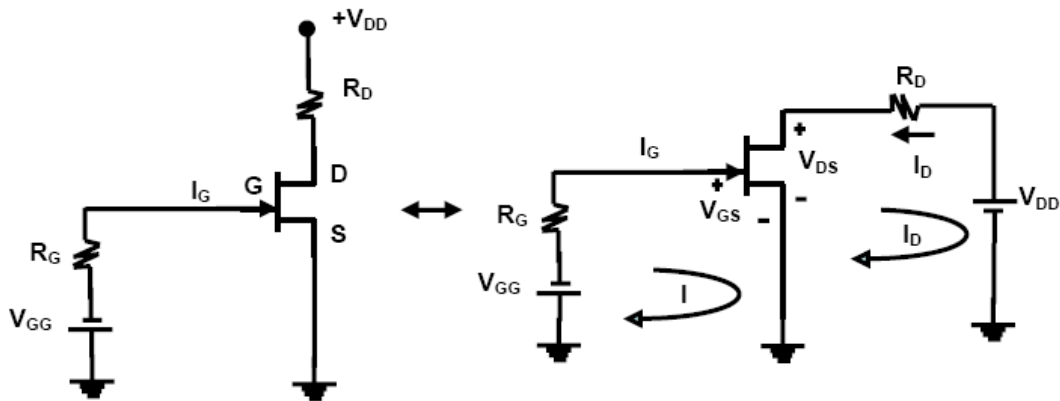


Figura 3.6 Circuito de Polarización Fija

Una configuración de polarización fija tiene, como su nombre lo indica, un voltaje fijo que es aplicado de la compuerta a la fuente para establecer el punto de operación.

- ✓ Circuito de Polarización por Divisor de Voltaje

El circuito básico para este tipo de polarización se observa en la figura siguiente:

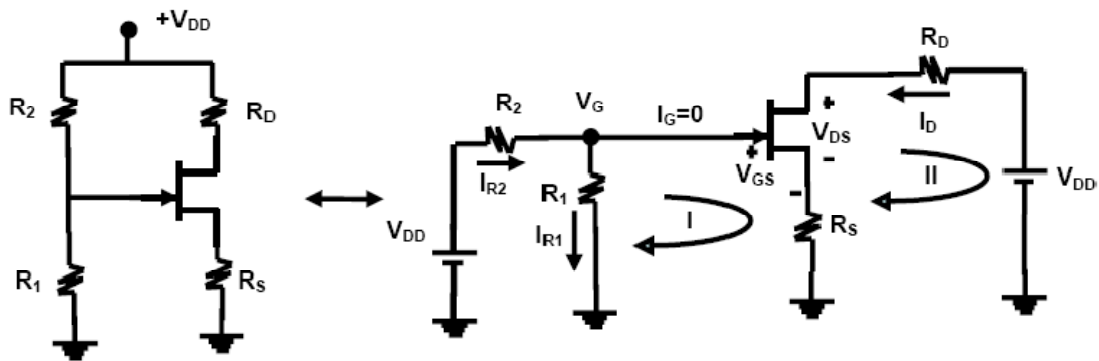


Figura 3.7 Circuito de Polarización por Divisor de Voltaje

✓ Circuito de Autopolarización

Este circuito elimina las fuentes para el circuito de entrada y el voltaje de control V_{GS} es determinado por la resistencia R_S . La figura muestra el circuito básico.

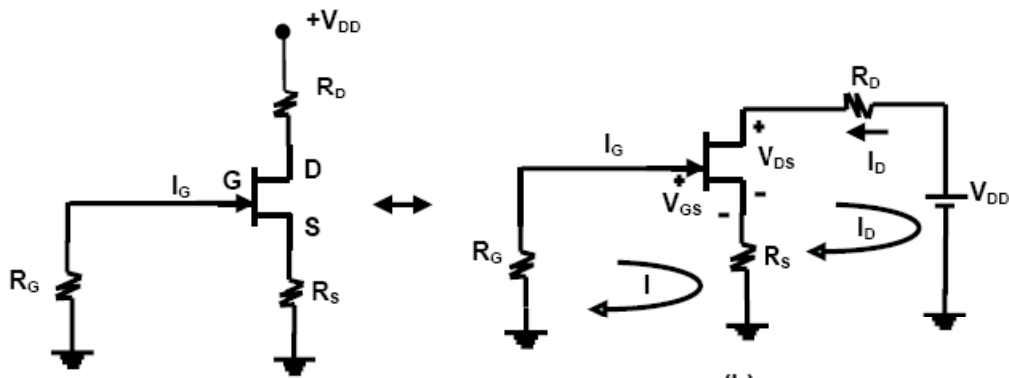


Figura 3.8 Circuito de Autopolarización

3.4 Curvas características del FET.

Las curvas del FET que caracterizan al dispositivo son:

- Curvas de Salida, I_D vs. V_{DS}
- Curva de Transferencia, I_D vs. V_{GS}

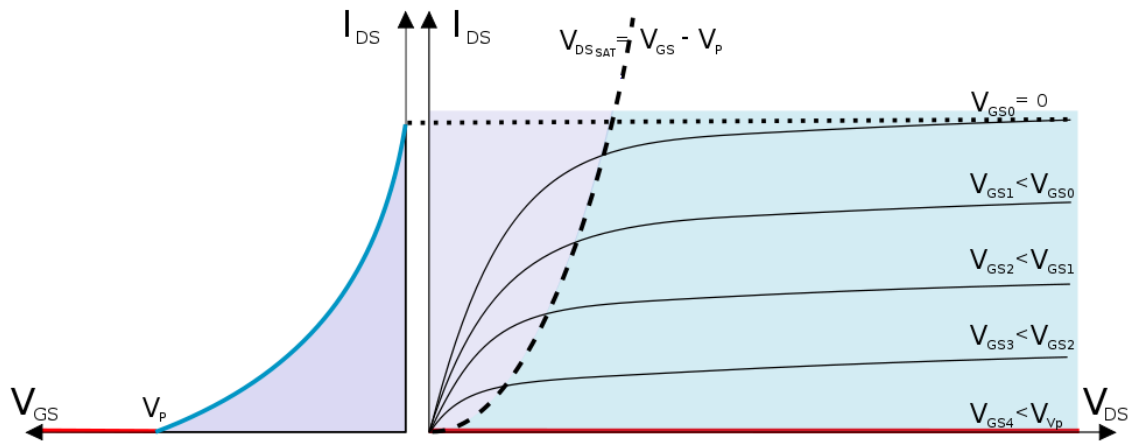


Figura 3.9 Curvas características del FET, a la derecha está la curva Curvas de Salida, I_D vs. V_{DS} y a la izquierda la curva de Transferencia, I_D vs. V_{GS}

Curvas de salida

Estas curvas son parecidas a las curvas de salida del BJT. En el FET se tendrá una curva de salida para cada valor de V_{GS} .

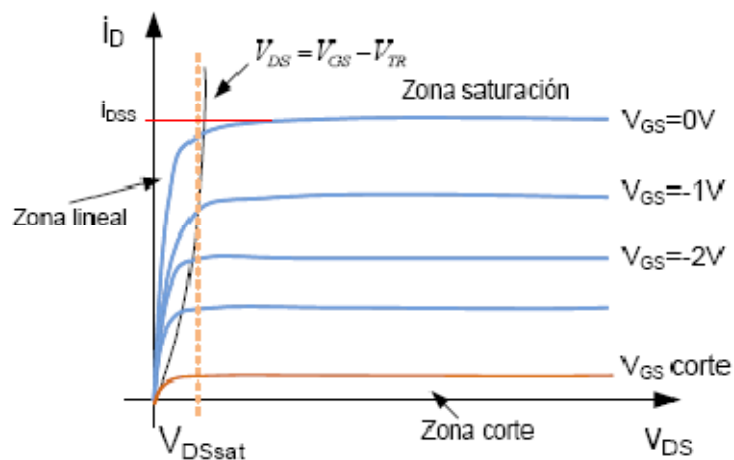


Figura 3.10 En la Curva de Salida, I_D vs. V_{DS} se observan las diferentes zonas o regiones de operación, saturación, corte, ruptura.

En las curvas de salida se pueden observar las diferentes zonas o regiones de operación del FET.

Zona Resistiva o Lineal (Zona Óhmica)

Es la zona cercana al eje I_D , delimitada en cuanto a voltaje por: $0 < V_{DS} < V_P$.

V_P - Valor de tensión V_{DS} para el cual I_D comienza a estabilizarse con $V_{GS}=0$.

V_P - Tensión de umbral para cada curva de salida o para cada valor de V_{GS} constante.

La variación de I_D en esta zona es lineal y el dispositivo se comporta como una resistencia controlada por voltaje. A medida que V_{DS} aumenta de cero hasta V_P , la corriente I_D aumenta linealmente a pesar del aumento de la resistencia del canal, debido a que el aumento de V_{DS} contrarresta el aumento de la resistencia.

Zona Saturada o Zona de Corrientes Constantes

Cuando V_{DS} aumenta por encima de V_P , la corriente I_D aumenta más lentamente debido al estrangulamiento del canal ocasionado por la unión de las dos barreras de potencial correspondiente a cada unión *pn* o *np*. Sin embargo, el aumento de V_{DS} mantiene la corriente I_D en un valor constante.

La zona en la cual I_D es constante se conoce como zona de saturación y la zona útil para el uso del dispositivo como amplificador de señales.

La zona de saturación está limitada en cuanto a voltaje por: $V_P < V_{DS} < V_{DSO}$, donde V_{DS} es el máximo voltaje entre drenador y surtidor indicado por el fabricante.

Zona de Ruptura

Es la zona para la cual I_D aumenta drásticamente para pequeños aumentos de tensión V_{DS} .

Zona de Corte

Es la zona para la cual $I_D=0$ sea cual sea el valor de V_{DS} y se debe a que V_{GS} se hace tan negativo que el canal se obstruye totalmente por la unión de las dos barreras de potencial.

El valor de V_{GS} para el cual $I_D=0$ es suministrado por el fabricante del transistor como:

V_{GS0} - Máximo voltaje entre compuerta y surtidor.

La relación $|V_{GS}| = |V_P|$ indica que para $I_D=0$ se debe tener $V_{GS} > V_P$ en magnitud.

Región de contracción

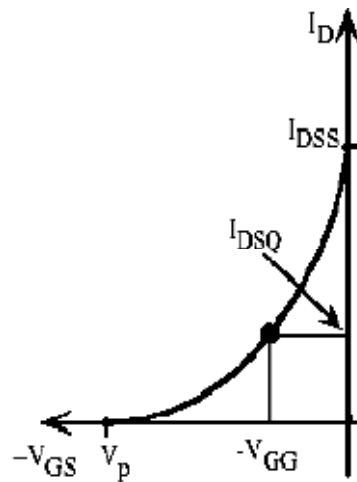
$$|V_{DS}| \approx |V_P| - |V_{GS}|$$

Al elevar V_{DS} , I_D deja de crecer linealmente \rightarrow se entra en la zona de contracción.

Curva de Transferencia

La curva de transferencia se obtiene a partir de las variaciones de I_D con respecto a V_{GS} , en la zona de saturación. Esta variación de I_D con respecto a V_{GS} para un V_{DS} constante no es lineal y se expresa matemáticamente como:

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2 \Big|_{V_{DS} = \text{cte}}$$



Esta expresión se conoce como Ecuación de Transferencia y permite obtener I_D en la zona de saturación para cualquier valor de V_{GS} , conociendo previamente I_{DSS} (Corriente entre drain y source cuando $V_G = 0V$) y V_P los cuales son generalmente dados por el fabricante.

3.5 Aplicaciones actuales de los FET.

Pese a que el concepto básico de los FET se conocía ya en 1930, estos dispositivos sólo empezaron a fabricarse comercialmente a partir de la década de los 60. Y a partir de los 80 los transistores de tipo MOSFET han alcanzado una enorme popularidad. Comparados con los BJT, los transistores MOS ocupan menos espacio, es decir, dentro de un circuito integrado puede incorporarse un número mayor. Además su proceso de fabricación es también más simple. Esto ha hecho del transistor MOS el componente estrella de la electrónica digital[9].

Entre las principales aplicaciones de los JFET podemos destacar:

APLICACIÓN	PRINCIPAL VENTAJA	USOS
Aislador o separador (buffer)	Impedancia de entrada alta y de salida baja	Uso general, equipo de medida, receptores
Amplificador de RF	Bajo ruido	Sintonizadores de FM, equipo para comunicaciones
Mezclador	Baja distorsión de intermodulación	Receptores de FM y TV, equipos para comunicaciones
Amplificador con control de ganancia automática (CAG)	Facilidad para controlar ganancia	Receptores, generadores de señales
Amplificador cascodo	Baja capacidad de entrada	Instrumentos de medición, equipos de prueba
Troceador	Ausencia de deriva	Amplificadores de CC, sistemas de control de dirección
Resistor variable por voltaje	Se controla por voltaje	Amplificadores operacionales, órganos electrónicos, controles de tono
Amplificador de baja frecuencia	Capacidad pequeña de acoplamiento	Audífonos para sordera, transductores inductivos
Oscilador	Mínima variación de frecuencia	Generadores de frecuencia patrón, receptores
	Pequeño tamaño	Integración en gran escala, computadores, memorias

En la actualidad se estudia el llamado CNT-FET (Carbon nanotube-based Field Effect Transistor) (Figura 3.11) que ha sido recientemente considerado como el más firme candidato para sustituir la tecnología CMOS en un futuro. De manera resumida, los CNTFET son dispositivos basados en la unión de los dos electrodos de metal de un transistor mediante un nanotubo de carbono, haciendo los primeros las veces de terminal y controlando de este modo el funcionamiento del nanotubo (conducción o no conducción) al aplicar una tensión [12].

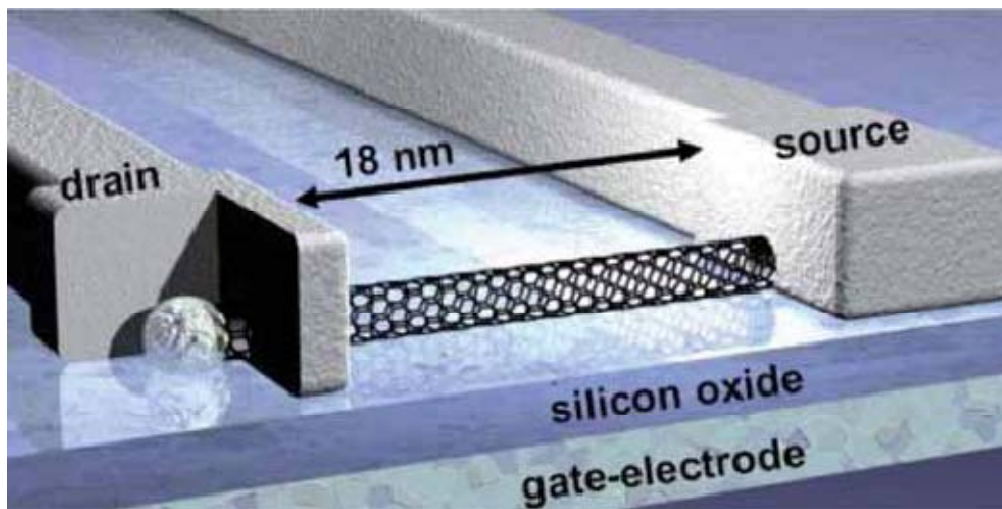



Figura 3.11 Simulación de un CNTFET [12]

REFERENCIAS

- [1] Transistores. <http://materias.fi.uba.ar/6609/docs/Transistor.pdf>
- [2] Robert L. Boylestad . Electrónica: Teoría de circuitos 6a Ed. Capítulo 5 y 6. Pearson Hall 1996.
- [3] Sedra / Smith. Circuitos Microelectrónicos 4a. Ed. Capítulo 5. Oxford 1998
- [4] El transistor como elemento de circuito.
<http://www.videosistemas.com/proyectos/tutorial-transistores.pdf>
- [5] Transistores de efecto de campo
http://www.scribd.com/doc/1011540/El-transistor-de-Efecto-de-Campo?__cache_revision=1230315207&__user_id=-1&enable_docview_caching=1
- [6] Transistores de efecto de campo.
<http://ocw.um.es/ingenierias/tecnologia-y-sistemas-electronicos/material-de-clase-1/tema-4.-transistores-de-efecto-campo.pdf>
- [7] Transistores de efecto de campo.
<http://www.fceia.unr.edu.ar/eca1/files/clases/Clase%204%20-%20FET.pdf>
- [8] Transistores de efecto de campo.
<http://www.uhu.es/adoracion.hermoso/Documentos/transistor-fet.pdf>
- [9] Características del transistor bipolar y FET:
<http://grupos.unican.es/dyvci/ruizrg/postscript/LibroEcaBasica/Tema1.PDF>
- [10] The junction field-effect transistor (JFET).
<http://courses.ece.illinois.edu/ece443/jfet.pdf>
- [11] Transistores de efecto de campo (JFET, MESFET y MOSFET)
http://www.icmm.csic.es/fis/gente/josemaria_albella/electronica/8%20Transistores%20de%20Efecto%20Campo.pdf
- [12] Aplicaciones de la nanotecnología.
http://www.idepa.es/sites/web/Europal_D_i/Repositorios/galeria_descargas_Europal_D_i/Aplicaciones_industriales_01.pdf

The page features a decorative graphic on the right side consisting of three overlapping circles in shades of blue, arranged vertically. Two thin blue lines cross the page diagonally from the top-left to the bottom-right, intersecting the circles.

4. Fabricación y caracterización de FET's con nanotubos de carbono

4.1 Síntesis de nanotubos de carbono

4.2 Fabricación de electrodos para el FET con nanotubos de carbono.

4.3 Caracterización eléctrica del FET con nanotubos de carbono.

4.5 Mediciones y recopilación de resultados experimentales.

4.6 Análisis de resultados.

4.1 Síntesis de nanotubos de carbono

La síntesis de los nanotubos se realizó empleando la técnica de descomposición térmica de vapores químicos (CVD) usando disulfuro de carbono como la fuente del carbono. Nitrato de hierro como precursor del hierro, el cual funciona como catalizador, sobre sustratos de cuarzo fundido. Preparamos una solución de 485.9 mg de nitrato de hierro en 10 ml de etanol, misma que fue esparcida sobre los sustratos de cuarzo fundido haciéndolos girar a una velocidad aproximada de 1800.0 rev/min.

Para hacer crecer los nanotubos, contamos con un sistema que consiste en un horno horizontal con un tubo de cuarzo que funciona como la cámara de reacción en la cual los flujos controlados de argón e hidrógeno pueden ser introducidos directamente o vía un burbujeador con el líquido deseado como la fuente de carbono (disulfuro de carbono en nuestro caso), el sistema empleado es mostrado en la Figura 4.1 Los sustratos preparados con el catalizador son colocados en el centro del horno y mediante un proceso que involucra la introducción controlada de gases y el aumento en la temperatura del horno, es posible obtener los nanotubos de carbono.

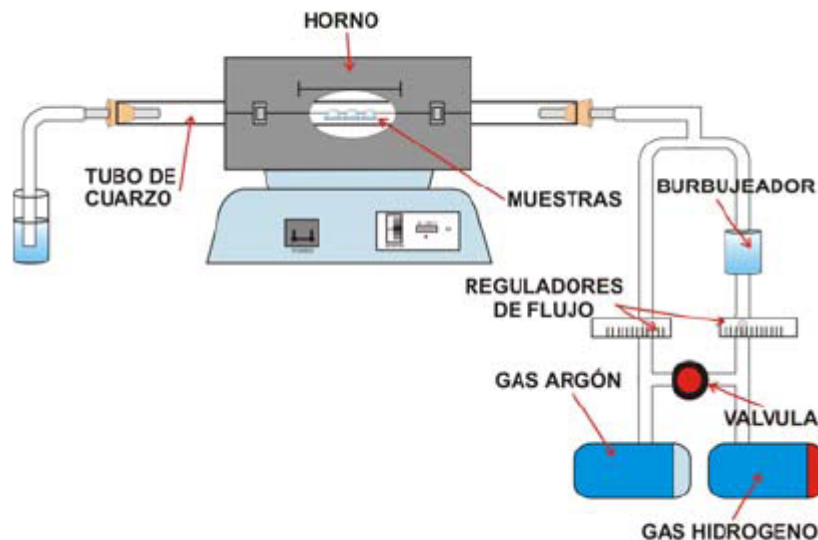


Figura 4.1 Diagrama del sistema de CVD

Se colocan los sustratos preparados con el catalizador en el centro del horno donde la temperatura en el interior del tubo de cuarzo ha sido previamente calibrada. Al inicio del proceso, el argón puro (126 sccm) es directamente introducido en el tubo del horno durante varios minutos para desplazar el aire, entonces la temperatura es elevada al valor deseado (900 °C en aproximadamente 40 minutos).

Cuando la temperatura deseada es alcanzada, el flujo de argón es cerrado y el hidrógeno puro (450 sccm) es directamente introducido por un tiempo de

5 minutos con la finalidad de desplazar el argón restante. Posteriormente el flujo de hidrógeno es reducido (88 sccm) y se hace pasar por el burbujeador que contiene 20 ml de disulfuro de carbono durante 60 minutos.

El hidrógeno, que es el gas portador por el burbujeador, y el vapor del líquido son los únicos gases que son introducidos en el horno. Al final de este proceso, se detiene el flujo de hidrógeno por el burbujeador y es sustituido por el argón puro directamente en el horno (126 sccm, durante 15 minutos) para desplazar la mezcla restante de hidrógeno y vapor del líquido y por lo tanto, evitar cualquier deposición del material carbonoso indeseado durante la fase de enfriado del horno.

Finalmente, el horno es apagado y enfriado a temperatura ambiente bajo el flujo de argón.

Por estudios con microscopia electrónica de transmisión se encuentra que los nanotubos sintetizados por el método de CVD son de múltiples paredes [11].

Una muestra típica de nanotubos de carbono utilizada en el presente trabajo se puede observar claramente en la Figura 4.2[2]

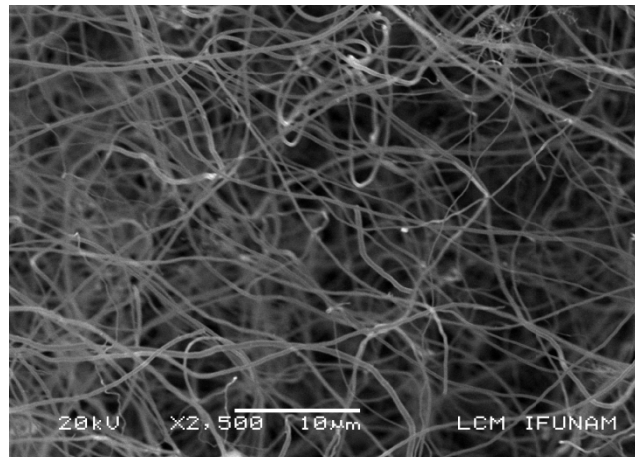


Figura 4.2 Imagen tomada con un microscopio electrónico de barrido de nanotubos de carbono[2] sobre un sustrato de cuarzo de una muestra típica obtenida en nuestros experimentos.

4.2 Fabricación de electrodos para el FET con nanotubos de carbono.

La fabricación de los electrodos para el transistor con nanotubos de carbono está sumamente ligada a la creación de películas delgadas.

El estudio de las características de estas películas y la fabricación constituye por sí misma un área de investigación con una amplia gama de aplicaciones, como los recubrimientos para materiales con características específicas (conductividad) y en nuestro caso electrodos.

Una película delgada o recubrimiento se define como una región cercana a la superficie de un material (sustrato, en nuestro caso fue silicio), que tiene las propiedades distintas a las del resto del volumen. De esta forma es fácil distinguir tres regiones: la película o recubrimiento, la interfaz y el sustrato, cada una con propiedades distintas. La formación de estas películas puede tener varios orígenes que pueden agruparse en dos técnicas principales: las

formadas al depositar materiales distintos al del sustrato; y la formada por modificación superficial del propio material.

La técnica más común de formación de películas delgadas consiste en depositar átomos de cierto material sobre un sustrato. Se pueden distinguir distintas etapas en este proceso:

- Absorción de átomos/condensación
- Nucleación
- Formación de la interfaz
- Crecimiento de la película.

Al incidir los átomos sobre la superficie del sustrato le ceden energía y finalmente se condensan formando átomos estables. Al condensarse, la energía cinética de los átomos incidentes, así como la fuerza y el tipo de interacción con la superficie, determinaran el grado de movilidad de los átomos y por tanto la densidad de átomos sobre la superficie (nucleación).

El amarre entre los átomos y la superficie se puede dar de varias formas:

- Amarre químico, es decir, por transferir o compartir electrones;
- Amarre electrostático, debido a la atracción eléctrica por separación de cargas, y
- Amarre por polarización que se debe a la asimetría en el campo eléctrico alrededor de los átomos o moléculas.

Es durante la condensación de los átomos sobre el sustrato cuando se forma la interfaz, que depende de la morfología de la superficie (rugosidades, porosidad) La interfaz puede presentarse de distintas formas:

- Como un cambio brusco del material de la película al material del sustrato, en una región del orden de la separación entre átomos.
- Como un compuesto entre los átomos de la película y los del volumen.
- Como difusión, donde los átomos pueden depositarse dentro del sustrato dando como resultado la difusión de estos en una región extensa en la que no se puede distinguir una separación entre el material y la película, y en la que se presenta un cambio gradual en las propiedades.

A partir de aquí, los átomos empiezan a acumularse para formar una película continua ("crecimiento de la película") [2].

Las propiedades de la película delgada así como de la interfaz pueden verse modificadas debido a impurezas del medio gaseoso circundante.

El vacío determinara la pureza del depósito.

Para los depósitos en vacío, la evaporación térmica del material es el método más utilizado.

La mayoría de los materiales a evaporar son metales (sólidos), en nuestro caso se utilizó plata, la forma que se utilizó para formar los electrodos fue el de evaporar la plata colocándola en crisol de molibdeno en forma de canoa, a través de la cual se hizo pasar una corriente eléctrica, el paso de esta por la canoa elevó su temperatura por disipación (efecto Joule) y por consecuencia alcanzó la temperatura de fusión del material (plata). La plata es evaporada hacia el sustrato (silicio) para su depósito.



Figura 4.3. Evaporadora utilizada para la fabricación de los electrodos de la plata.

4.3 Caracterización eléctrica del FET con nanotubos de carbono.

Para la caracterización eléctrica se hicieron muestras del tipo película delgada [3], donde un sustrato de silicio es colocado sobre el sustrato de cuarzo fundido en donde se encuentran los nanotubos de carbono (Ver Figura 4.2) y es presionado contra este (Figura 4.4a); con esto se obtiene una película delgada a base de nanotubos sobre el sustrato de silicio.

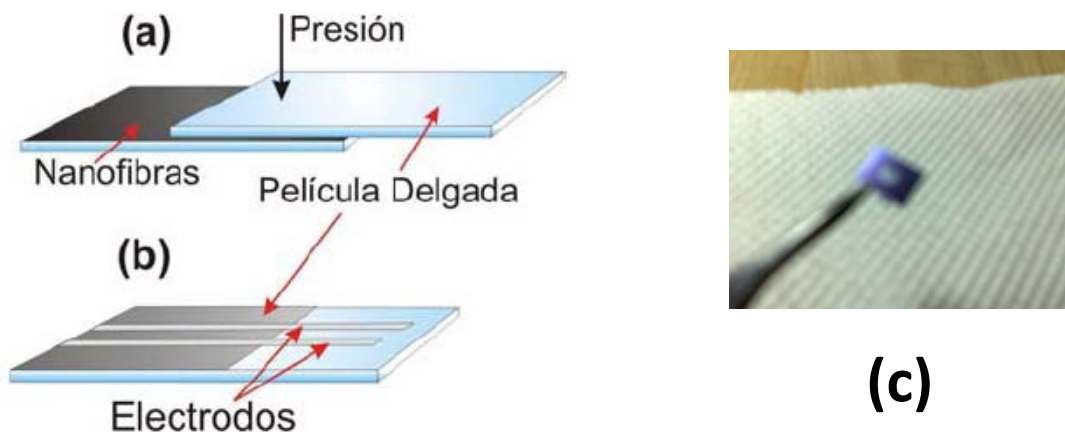


Figura 4.4(a) Muestra el proceso de elaboración de las muestras tipo película delgada. (b) Película delgada con electrodos evaporados de plata. (c) Imagen real de la placa de silicio con electrodos y nanotubos.

Posteriormente a cada sustrato de silicio con nanotubos de carbono se les evaporó electrodos de plata de aproximadamente 500 Å de grosor y

separados por una distancia de $100\ \mu\text{m}$ entre ambos, que sirven para poner dos terminales eléctricas (Figura 4.4b).

Con el fin de verificar la presencia de nanotubos sobre la placa de silicio se analizó con ayuda del microscopio óptico (Figura 4.5) la presencia de estos, observándose las nanotubos de carbono homogéneamente dispersos sobre el silicio, dando pie a seguir con la colocación del dispositivo en el sistema de medición.

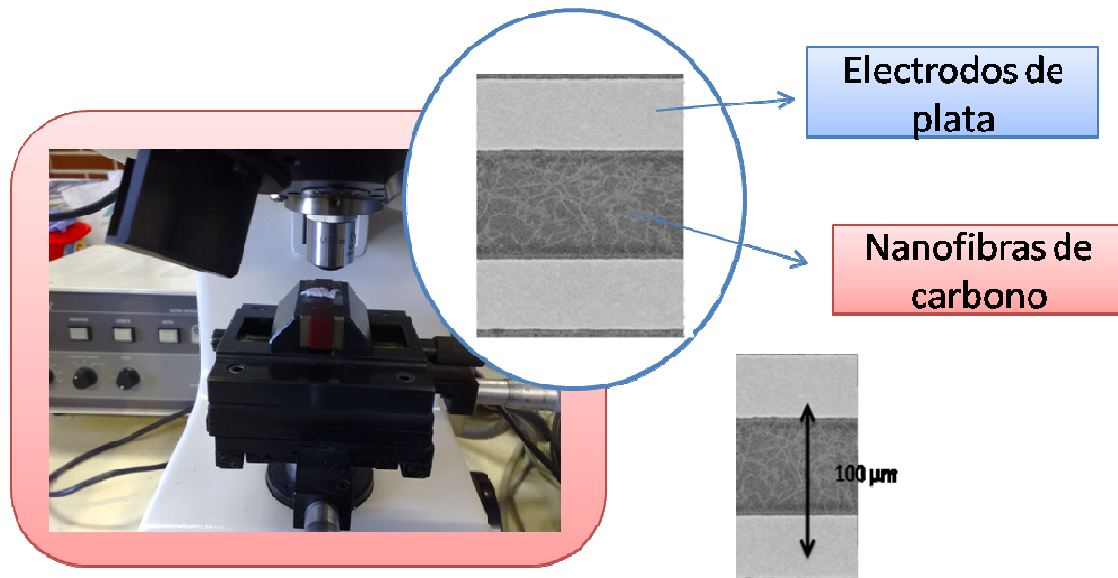


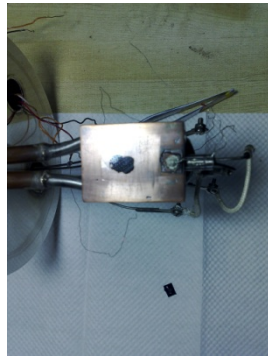
Figura 4.5. Observación de los nanotubos de carbono en el dispositivo. Imagen tomada con un microscopio óptico donde se puede observar los nanotubos entre electrodos fuente –sumidero (source-drain). La separación entre estos es de aproximadamente de $100\ \mu\text{m}$.

La caracterización eléctrica fue hecha en una cámara de vacío equipada con un calefactor y puede ser enfriada mediante nitrógeno líquido.

La colocación de la muestra se hace de manera manual fijando primero un cubre objeto sobre una placa de cobre con pintura de plata (Figura 4.6a) con el fin de aislar eléctricamente el bloque de cobre-portasustrato del dispositivo a medir, al tener fijo el cubre objeto se coloca el sustrato de silicio sobre esta (Figura 4.6b), previamente se hizo una terminal en la parte inferior del sustrato que funcionará como el *gate* o compuerta, posteriormente se coloca el sustrato de silicio sobre el cubre objeto adhiriéndolo a este con pintura de plata (Figura 4.6c).



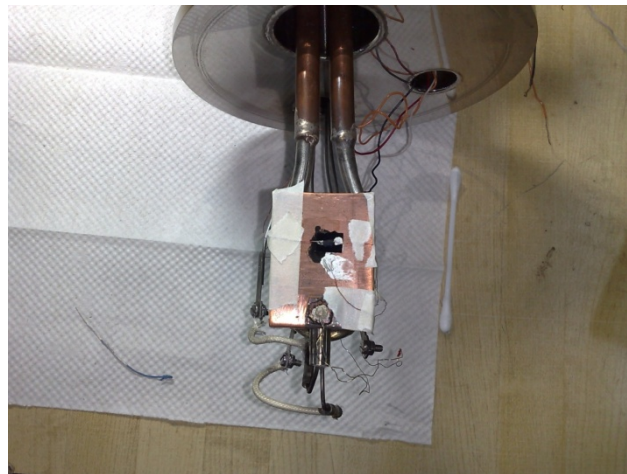
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.6. Proceso de montaje del dispositivo en la cámara de vacío.

Antes de obtener alguna medición o hacer las conexiones pertinentes para su análisis se mide la resistencia eléctrica entre las terminales del dispositivo así como la conducción del dispositivo a través de los contactos y terminales colocadas, se verifica que no haya algún corto o ningún problema que afecte las mediciones.

Teniendo condiciones adecuadas de conducción y valores de resistencia acordes, se prosigue con las conexiones a los sistemas de medición y de alimentación.

Para la caracterización eléctrica la configuración de polarización utilizada fue la de "polarización fija" (Figura 4.7).

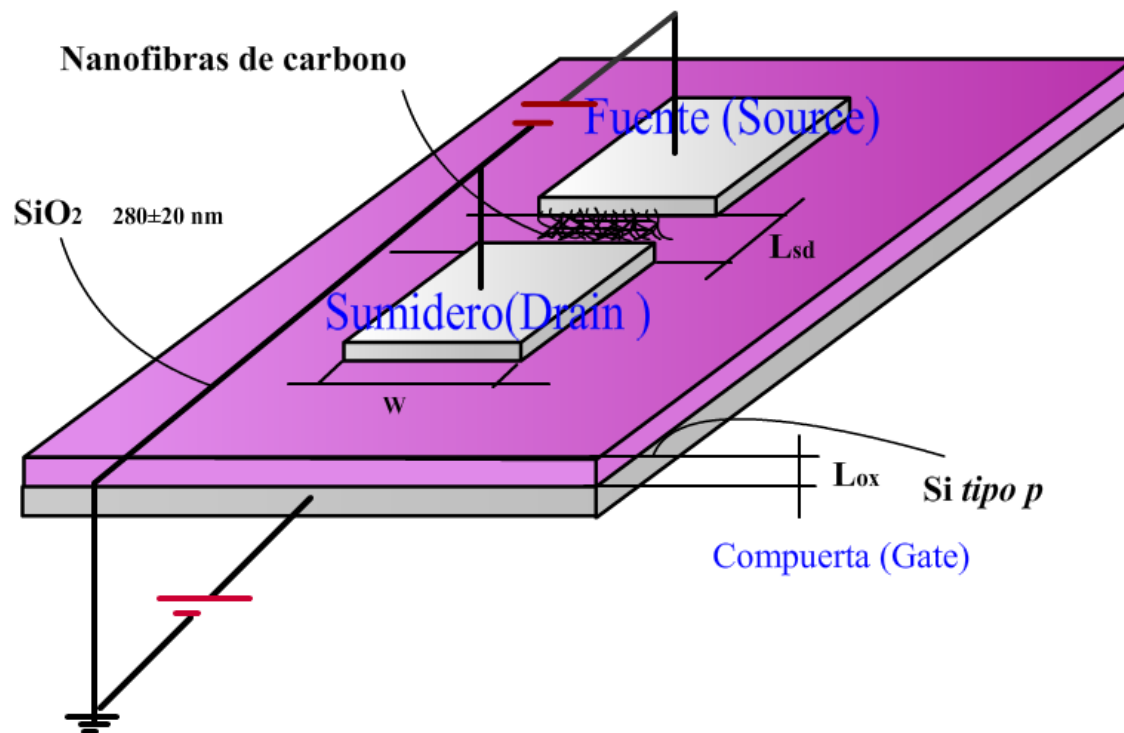


Figura 4.7. Configuración de polarización fija utilizada para la caracterización eléctrica del dispositivo. El silicio que se emplea para el FET es un sustrato de silicio con la orientación (111), tipo p altamente impurificado con boro, resistividad entre 0.01 y 0.05 Ωcm y con una capa aislante de óxido de silicio de 280 ± 20 nm.

Con la colocación de las terminales adecuadamente para tener una polarización fija se prosigue a energizarlo para tomar mediciones de prueba y verificar que el dispositivo muestra una respuesta, de ser nula la respuesta se hace una verificación de las conexiones para eliminar la posibilidad de que este sea el problema.

Si aún continua sin dar respuesta se desmonta la muestra para hacer un análisis para encontrar las fallas que no permitieron continuar con la caracterización. Si las fallas persisten lo siguiente es colocar una nueva muestra para su análisis.

Con una respuesta afirmativa del dispositivo se prosigue a recopilar mediciones y resultados que se utilizarán para analizar el comportamiento de este.

Se hacen las mediciones eléctricas con un voltaje en diversos rangos y variando la temperatura de 123 K a 427 K, tomando los valores de corriente eléctrica mientras se incrementa como para cuando se decrementa la temperatura.

Los parámetros a medir para la caracterización eléctrica son los siguientes:



Teniendo estos datos se puede llevar a cabo la caracterización eléctrica del dispositivo así como un profundo análisis de las prestaciones, del desempeño en ambientes controlados y demostrar su potencial en las aplicaciones actuales como en futuras.

4.5 Mediciones y recopilación de resultados experimentales.

Como se ha descrito a lo largo de este trabajo, un transistor efecto de campo se puede construir colocando nanotubos de carbono entre los electrodos fuente y colector o sumidero, al utilizar un material como los nanotubos de carbono dan un comportamiento y una respuesta distinta al dispositivo que puede ser cuantificada y observada a través de diferentes métodos.

Este comportamiento así como la respuesta se puede medir y graficar en curvas que caracterizan a este tipo de dispositivos.

Para nuestro caso los resultados serán presentados de dos maneras las cuales son las más destacadas para describir su comportamiento y respuesta.

- Curvas de Salida, I_D vs. V_{DS}
- Curva de Transferencia, I_D vs. V_{GS}

También se presentan las curvas

- Curvas de comportamiento I_D vs T .

En las curvas de I_D vs T se observa el comportamiento a diferentes temperaturas para hacer una comparación con otros dispositivos que son afectados en gran medida por la variación de la temperatura.

Se midieron 100 curvas I-V y un total de 20 I-T empleando el sistema de medición para obtener de esta forma los datos numéricos y posteriormente graficar cada una de las curvas con lo cual se obtendrá la información relacionada con el comportamiento y se podrá calcular la movilidad en el dispositivo.

Se hicieron pruebas individuales de medición a muestras preparadas de la manera que fueran lo más parecido pero aún así se tienen diversas diferencias entre cada muestra, las diferencias en las curvas y resultados depende de mucho de las condiciones iniciales de estas y de los elementos activos que participan.

4.6 Análisis de resultados.

Se han fabricado transistores de efecto de campo con nanotubos de carbono empleando la técnica de descomposición térmica de vapores químicos (CVD) usando disulfuro de carbono como la fuente de carbono [2].

Los nanotubos de carbono están recibiendo considerable atención en la actualidad debido a su prometedor rendimiento semiconductor en los transistores de efecto de campo por lo que se emplearon los nanotubos de carbono en el dispositivo, colocándolos dentro del canal que separa los electrodos fuente (source) y sumidero (drain), para la integración de los nanotubos de carbono al dispositivo se tuvo que superar varios desafíos, uno en particular fue el posicionamiento de los nanotubos de carbono sobre el sustrato de SiO₂.

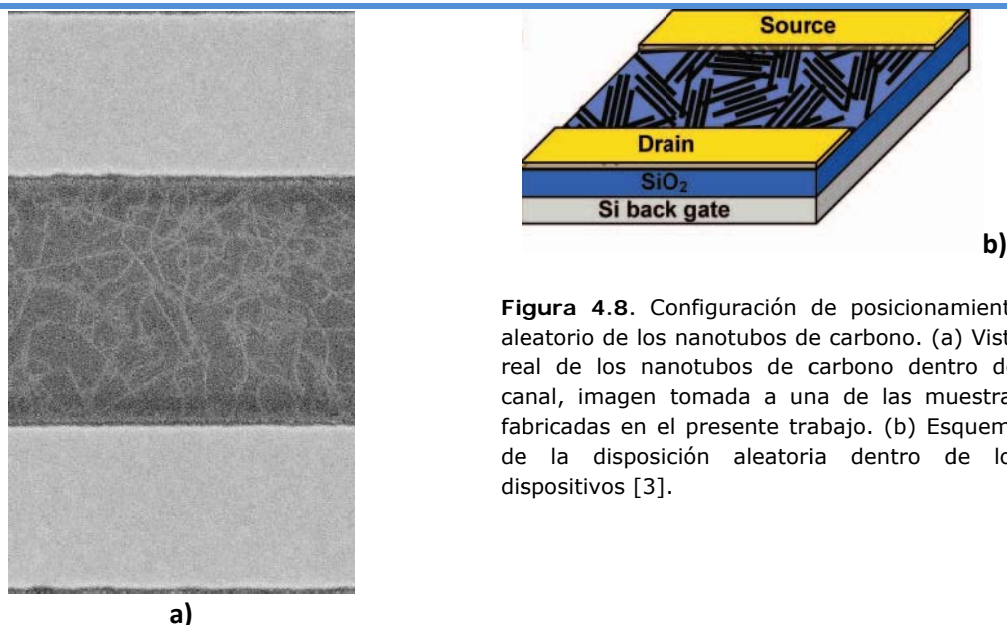


Figura 4.8. Configuración de posicionamiento aleatorio de los nanotubos de carbono. (a) Vista real de los nanotubos de carbono dentro del canal, imagen tomada a una de las muestras fabricadas en el presente trabajo. (b) Esquema de la disposición aleatoria dentro de los dispositivos [3].

Debido a la limitada capacidad de carga de corriente de cada uno de los nanotubos de carbono, se utilizó una disposición aleatoria para formar nanofibras de carbono como lo muestra la Figura 4.8, ya que una distribución aleatoria es adecuada para proporcionar la densidad de

corriente que necesitan los dispositivos electrónicos de este tipo [3]. El desempeño de los nanotubos de carbono puede ser mejorado mediante el aumento de la densidad de estas, se han ideado varios métodos para alinear los nanotubos de carbono pero la mayoría de los métodos están limitados debido a la baja densidad de corriente que pueden llegar a proporcionar.

Una de las mejores opciones es una configuración aleatoria debida a la alta densidad de corriente que puede proporcionar aunque el contacto entre los nanotubos de carbono genera resistencia debido a la superposición de muchos nanotubos limitando la plena explotación de estas [3].

El conjunto de curvas que se presentan son del tipo I_D vs. V_{DS} (Figura 4.9) midiendo diferentes voltajes V_{DS} se observan las variaciones de la corriente I_D con valores fijos de V_{GS} . Las diversas curvas presentadas son de diferentes dispositivos fabricados con el mismo método ya descrito.

La aplicación de un voltaje provoca el crecimiento de la corriente I_D a través del nanotubo de carbono llegando una meseta en la curva en donde las corrientes crecen variando los voltajes V_{DS} desde valores negativos (Figura 4.9) hasta que llegan a valores positivos donde la corriente I_D se incrementa notablemente en variaciones mínimas de voltaje. Los valores de corrientes obtenidos en cada muestra aunque sigan un comportamiento similar gráficamente presentan variaciones significativas con respecto a los valores de I_D . (Figura 4.9). Esto se explica por dos razones, difusión del canal de conducción o por el modelo de barrera de contacto de Schottky [4]. Comparando las graficas obtenidas con los dispositivos fabricados en el presente trabajo con la gráfica que se presenta en la Figura 4.9b donde el dispositivo CNTFET [4] fue fabricado con electrodos de oro y nanotubos de carbono de pared sencilla, se observa que los comportamientos en la corriente I_D son muy similares, los voltajes V_G aplicados en el dispositivo de la Figura 4.9b van desde los -10V hasta los 20V.

Las diferencias vistas en nuestros dispositivos pueden ser ocasionadas por la diferente cantidad de nanotubos de carbono dentro del canal, esto va mas enfocando a la difusión del canal de conducción mencionada ya, al presentarse más nanotubos de carbono dentro del canal se asegura la conducción de corriente eléctrica en el dispositivo pero puede llegar a ocasionar la difusión, esta difusión del canal también puede darse debido a la presencia de oxígeno o la presencia de azufre en los nanotubos, como se había comentado antes se usó disulfuro de carbono como la fuente de carbono para la fabricación del transistor de efecto de campo [2]. El comportamiento de la corriente I_D va de la mano de las condiciones de la prueba, los valores de la corriente tienden aumentar en condiciones

ambientales normales, cuando los dispositivos son colocados en vacío tiene a disminuir los valores de corriente I_D .

Observando las curvas de la figura 4.9a, 4.10 a y b se nota que la zona de saturación no se alcanzó bajo las condiciones experimentales que se tuvieron a lo largo de la prueba. Además, el dispositivo muestra una modesta dependencia al voltaje de compuerta V_G , esto tal vez se deba a la composición de los nanotubos ya que estas pueden estar formadas de nanotubos con un comportamiento metálico [3].

Otro valor importante es la impedancia de entrada del dispositivo, los valores obtenidos en las diferentes muestras están en los rangos para un transistor de este tipo (JFET $\gg 10^6 \Omega$ MOS-FET $\gg 10^8$ a $10^{15} \Omega$), cualidad que es fundamental ya que la alta impedancia de entrada en los transistores de efecto de campo permite retener carga el tiempo suficiente para utilizar estos dispositivos como elementos de almacenamiento.

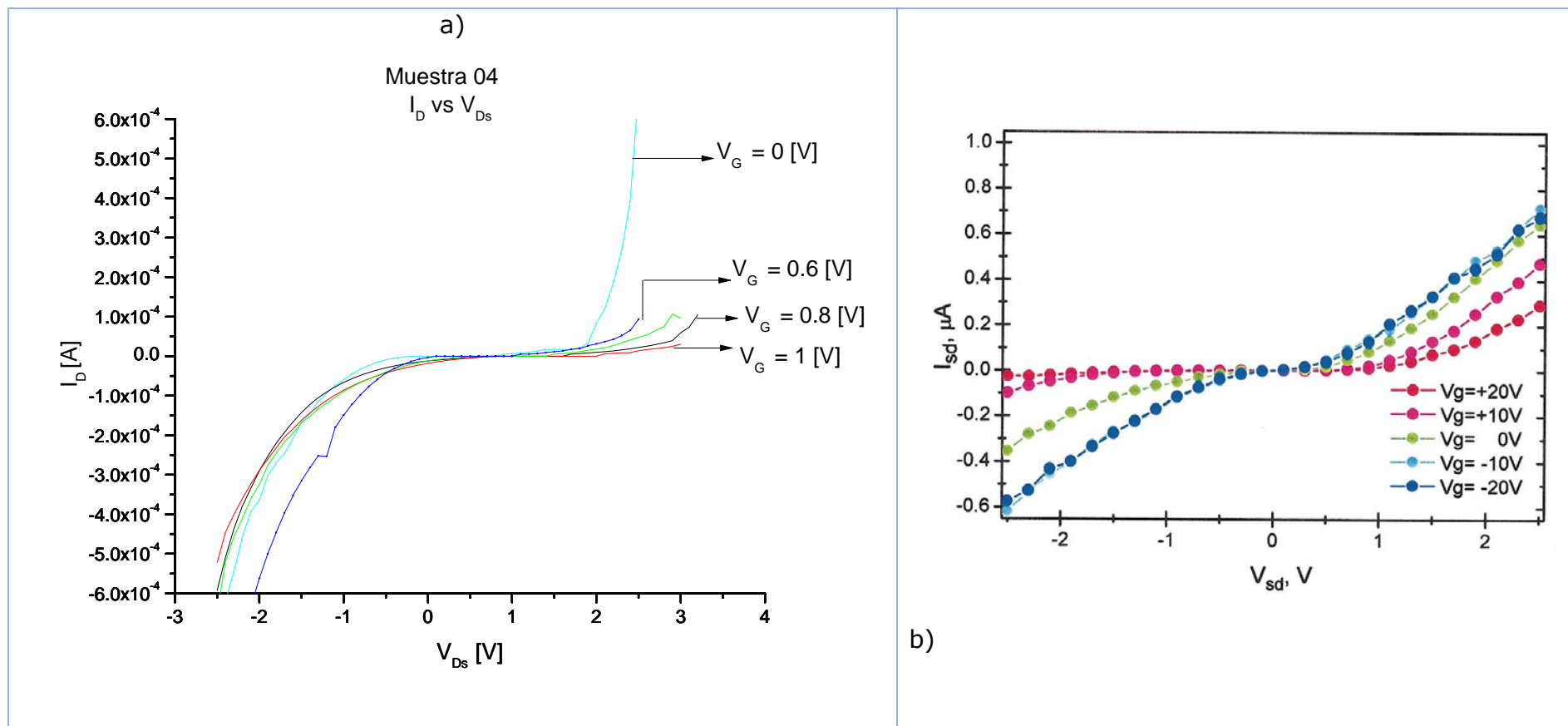


Figura 4.9 Familia de curvas I_D vs. V_{D_s} tomadas para un dispositivo (a) mostrando la comparación de las curva obtenida (b) en otro experimento [4] en condiciones similares con la diferencia en la magnitud de los voltajes de la compuerta V_G mostrando aun así un comportamiento similar pero con valores de corriente de I_D diferentes.

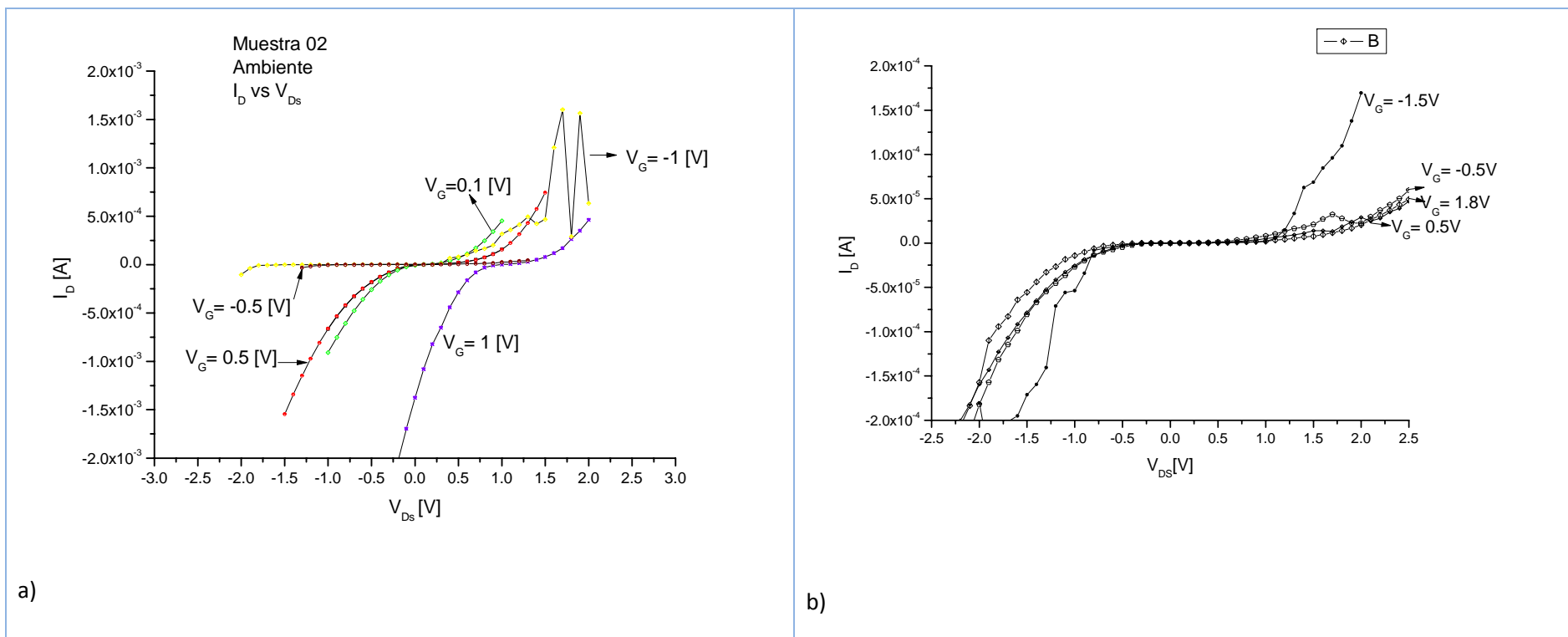


Figura 4.10 Familia de curvas I_D vs. V_{D_S} tomadas para dos dispositivos fabricados en este trabajo. a) Curva del comportamiento de la corriente I_D tomada en condiciones normales de ambiente. b) Curva obtenida del dispositivo en el vacío, se observan un comportamiento similar pero el valor de las corrientes se ve afectada de manera notable.

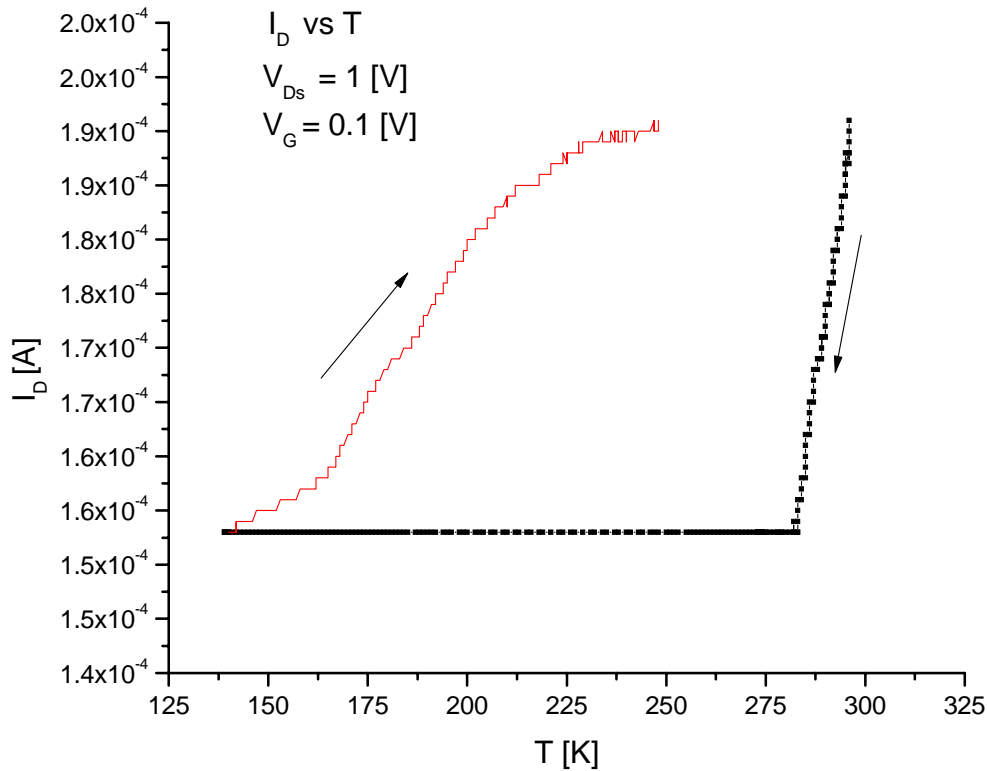


Figura 4.11 Gráfica I_D vs T que muestra el comportamiento de la corriente en función a la temperatura, muestra como la corriente I_D disminuye conforme la temperatura desciende y la misma I_D aumenta cuando la temperatura asciende

Analizando el comportamiento que tienen la corriente I_D cuando la temperatura es modificada, se observa la disminución de esta corriente cuando la temperatura desciende, el valor de la corriente llega hasta a un valor constante, y se observa que I_D aumenta cuando la temperatura asciende.

Estos dispositivos en la actualidad son afectados por la temperatura a la cual trabajan y es necesario tener sistemas que controlen estas temperaturas para que puedan trabajar a la temperatura ideal y su desempeño sea el correcto.

Con el transistor efecto de campo con nanotubos de carbono, se puede ver que el rango de temperaturas a las que puede trabajar este transistor de efecto de campo es grande ya que las variaciones en el valor de la corriente I_D están en el rango de los $20\mu A$ a $30\mu A$ entre los 125 K a los 300 K.

Otro valor importante en los dispositivos transistores de efecto de campo es la medición de la movilidad que va de la mano de la longitud del canal, esta

movilidad se incrementa en aquellos dispositivos que tengan un canal que estén dentro de rangos de longitud corta [3][7].

La movilidad para aquellos dispositivos que usen una configuración orientada de los nanotubos de carbono en el canal se encuentra en el rango de los 60-92 cm^2/Vs . Se cree que debido a la orientación lineal que se presenta en los nanotubos orientadas, reducen significativamente el número de contactos entre los nanotubos de carbono por los cuales debe pasar la corriente eléctrica, esto da lugar a un aumento considerable de la movilidad [3][4][8].

La mayor movilidad alcanzada para dispositivos tipo FET con una configuración orientada dentro del canal es de 126 cm^2/Vs la cual se compara con la movilidad de 125 cm^2/Vs en transistores de efecto de campo con ordenamiento dentro del canal utilizando nanotubos de carbono fabricados por el método CVD, estas movilidades son más altas que las obtenidas en transistores de efecto de campo con arreglos paralelos de nanocables de silicio (119 cm^2/Vs) [3].

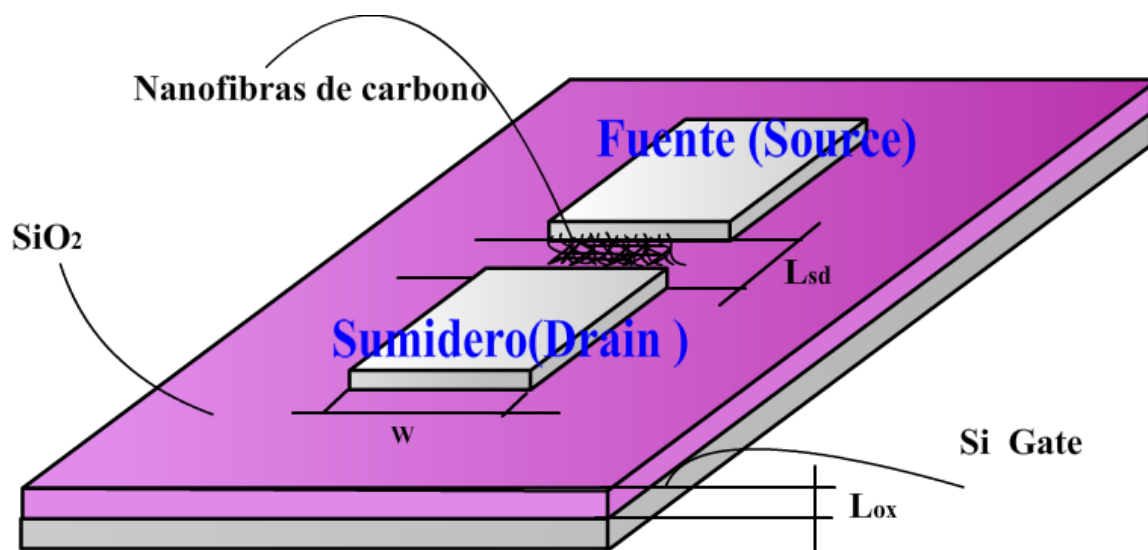


Figura 4.12. L_{ox} el grosor de la capa de dióxido de silicio SiO_2 (280 nm), L_{SD} la anchura entre los electrodos de la fuente (source) y sumidero (drain) (81.6 μm), ϵ la constante dieléctrica del SiO_2 (3.84), y W la anchura de los contactos (900 o 950 μm).

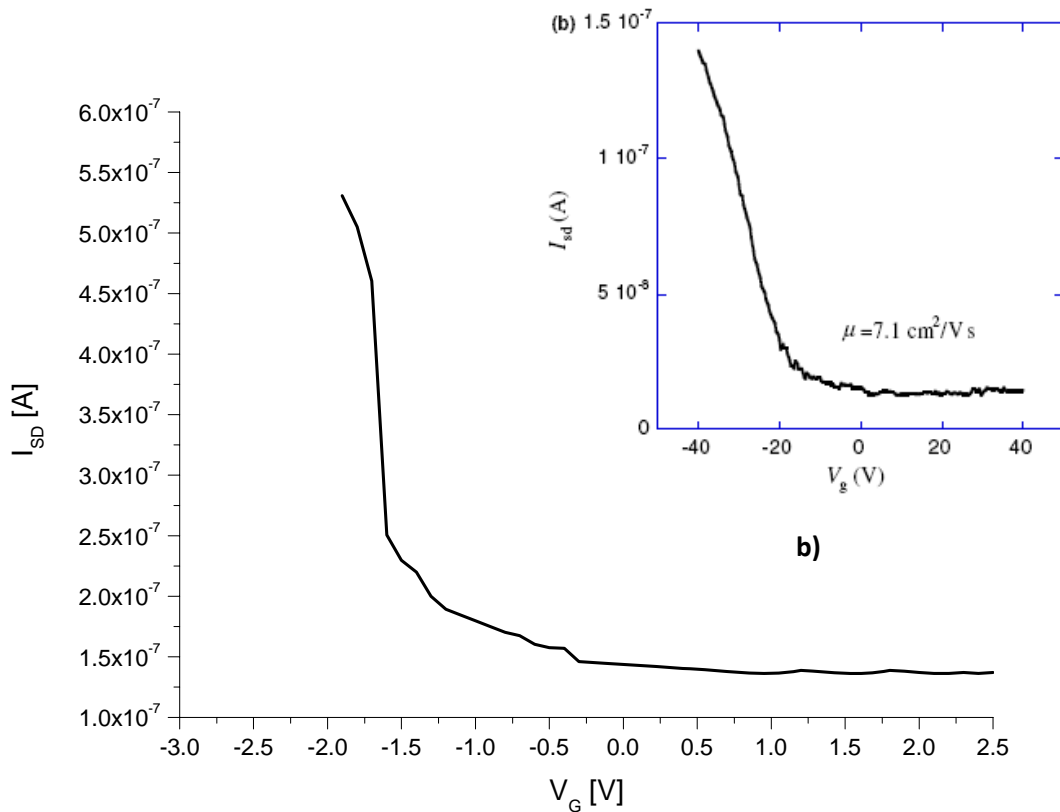


Figura 4.13 Curva I_{SD} vs V_G con V_{SD} con valor de 0.1 V, con esta curva se obtiene la transconductancia $g_m = dI_{sd}/dV_g$, la movilidad para esta muestra fue de $\mu=150.7 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. b) Curva obtenida para un dispositivo FET con características $L_{ox}=400 \text{ nm}$, $W=100 \mu\text{m}$ [9].

El comportamiento de la corriente I_{SD} que se muestra en la Figura 4.13 corresponde a una conducción del tipo- p que presentan los nanotubos de carbono [4], en transistores de efecto de campo que operan en condiciones ambientales, como es nuestro caso, haciendo una comparación (Figura 4.13b) con otro dispositivo con grosor de la capa de dióxido de silicio SiO_2 de 400nm y la anchura de los contactos (W) menor [9], la movilidad es inferior a la obtenida para los diversos dispositivos fabricados en el presente trabajo.

La movilidad puede ser calculada para nuestros dispositivos por medio de

$$\mu = \frac{dI_{sd}}{dV_g} / \frac{\epsilon V_{sd} W}{L_{ox} L_{sd}}$$

la fórmula estándar [5], donde I_{SD} es la corriente de la fuente-drenaje, V_G el voltaje de la compuerta (gate), L_{ox} el grosor de la capa de dióxido de silicio SiO_2 (280 nm), L_{SD} la anchura entre los electrodos de la fuente (source) y sumidero(drain) (81.6 μm), ϵ la constante dieléctrica del SiO_2 (3.84), V_{SD} el voltaje de la fuente-fuente-drenaje (0.1 V), y W la anchura de los contactos (900 o 950 μm).

$$\frac{dI_{sd}}{dV_g}$$

Para obtener la transconductancia $\frac{dI_{sd}}{dV_g}$ [3] se deriva numéricamente los datos de la Figura 4.13, tomando el mínimo valor de la derivada el cual nos arroja el valor de máximo de movilidad para la muestra, cabe mencionar que la movilidad depende del punto de operación, en este caso buscamos el máximo valor de movilidad del dispositivo.

Estos cálculos se repitieron para cada una de las muestras para obtener las movilidades de cada dispositivo fabricado.

Las movilidades obtenidas en los dispositivos fabricados en el presente trabajo van desde los 110.3 cm²/Vs hasta los 150.7 cm²/Vs (Figura 4.14), estas variaciones se dan en primer lugar al número de nanotubos de carbono presente en el canal y su configuración, lo cual provoca como ya se menciona la difusión del canal de conducción. Otro factor importante para la diferencia de movilidad es la anchura de los contactos del dispositivo, los cuales están en el rango de 900 a 950 μm.

Los valores obtenidos de movilidad son ligeramente mayores a los reportados en otros estudios, este aumento de la movilidad puede deberse a la composición de los nanotubos de carbono, recordando que estos fueron fabricados usando disulfuro de carbono [2].

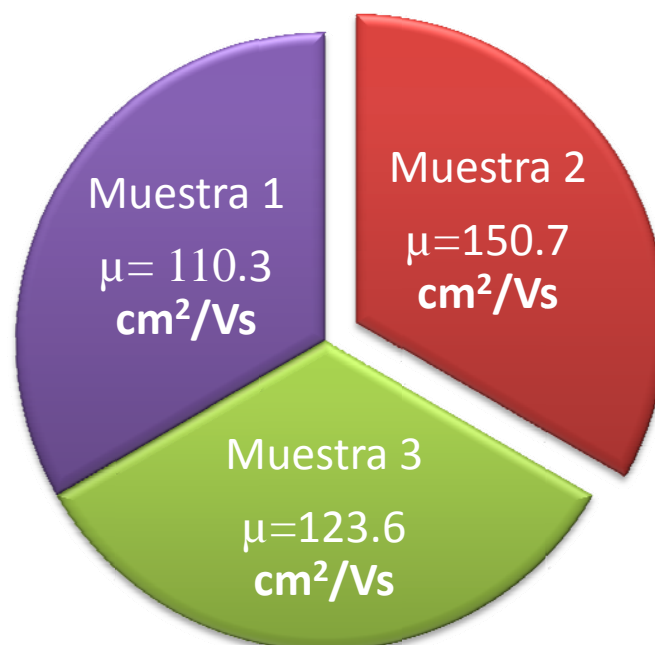
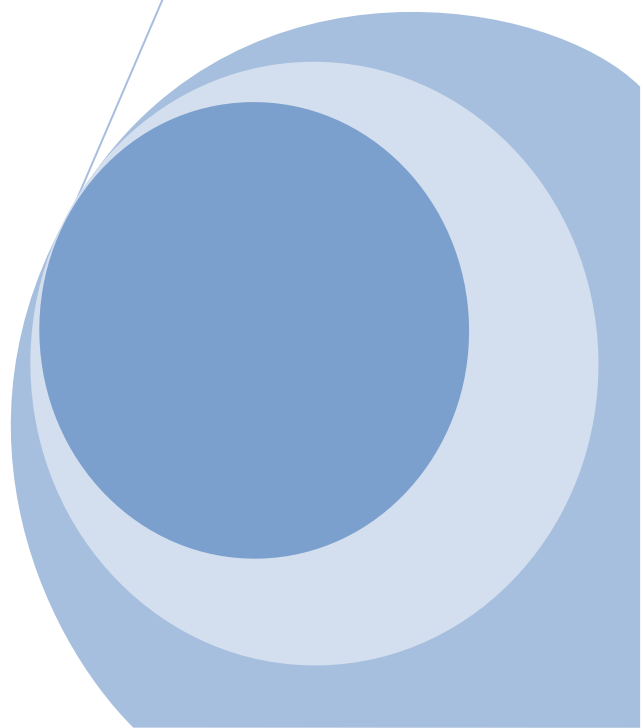
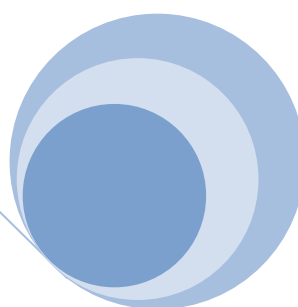
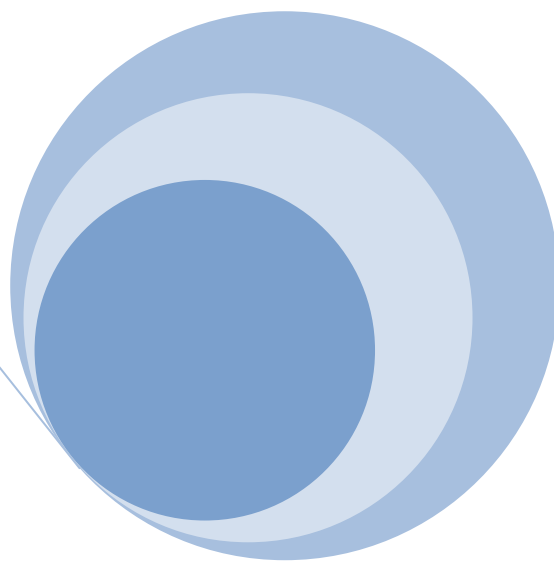


Figura 4.14. Movilidad obtenida en tres muestras diferentes fabricadas en el presente trabajo.

REFERENCIAS.

- [1] M.S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, Ph. Avouris, (Ed.): Carbon Nanotubes, Topics in Appl. Phys. 80,147, Springer, Berlin 2001.
- [2] D. Mendoza; Electrical properties of carbon nanofibers synthesized using carbon disulfide as precursor. Optical Materials (2006).
- [3] Hyunhyub Ko and Vladimir V. Tsukruk. Liquid-Crystalline Processing of Highly Oriented Carbon Nanotube Arrays for Thin-Film Transistors (2006). Y referencias dentro de este artículo.
- [4] Miron Hazani, Dmitry Shvarts, Dana Peled, Victor Sidorov Self-assembled carbon-nanotube-based field-effect transistors. 2004. Y referencias dentro de este artículo.
- [5] M. Shiraishi, T. Takenobu, T. Iwai, Y. Iwasa, H. Kataura, M. Ata, Chem. Phys. Lett. 394, 110(2004)
- [6] R.J. Kline, M.D. McGehee, E.N. Kadnikova, J. Liu, J.M.J. Frechet, Adv. Mater. 15 (2003) 1519.
- [7] E.J. Meijer, D.M. De Leeuw, S. Setayash, E. Van Veenendaal, B.-H. Huisman, P.W.M. Blom, J.C. Hummelen, U. Scherf, T.M. Klapwijk, Nature Mater. 2 (2003) 678.
- [8] H. Shiringhaus, N. Tessler, R.H. Friend, Science 280 (1998) 1741.
- [9] Single-walled carbon nanotube aggregates for solution-processed field effect transistors", Masashi Shiraishi, Taishi Takenobu, Toshinori Iwai, Yoshihiro Iwasa Hiromichi Kataura, Masafumi Ata, 2004. Chemical Physics Letters 394 (2004) 110-113.
- [10] F. Nihey, N. Hongo, Y. Ochiai, M. Yudasaka and S. Iijima, Jpn. J. Appl. Phys. 42, L1288 (2003)
- [11] D. Mendoza; Synthesis of carbon nanofibers and nanotubes using carbon disulfide as the precursor. Revista Mexicana de Física S 53 (5) 9-12

Conclusiones



CONCLUSIONES

El resultado del presente trabajo de investigación nos da pie a presentar las siguientes conclusiones.

En primer lugar gracias a la creación e innovación y aplicación de sistemas y procesos de la ingeniería se fabricó un dispositivo electrónico con lo cual se obtuvo un método sencillo para la fabricación del dispositivo transistor efecto de campo con nanotubos de carbono.

Se fabricó un dispositivo transistor efecto de campo (FET, "Field Effect Transistor" por sus siglas en inglés) utilizando nanotubos de carbono. Se sintetizaron los nanotubos de carbono empleando la técnica de CVD usando disulfuro de carbono como la fuente del carbono y nitrato de hierro como precursor del hierro, el cual funciona como catalizador.

Se usaron los nanotubos de carbono ya que son estructuras con notables propiedades electrónicas y mecánicas, con lo cual se estudió las diferentes características eléctricas dadas al dispositivo construido y su operación a temperaturas ambientes para tener una visión de su potencial de uso práctico.

Con el actual trabajo podemos ver que la fabricación del dispositivo hasta cierto punto es artesanal y se obtienen resultados favorables para seguir con las investigaciones y llegar en un futuro a usarlos en aplicaciones, se debe seguir mejorando el método de fabricación ya que durante el proceso intervienen factores de suma importancia que modifican el desempeño del dispositivo de gran manera. La manipulación del dispositivo durante las pruebas es también importante ya que es muy sensible y puede dañarse con facilidad.

En nuestro caso de estudio, la constitución física del dispositivo construido hace que este se pueda clasificar dentro de la familia de los MOSFET (Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor) ya que usa un aislante SiO_2 .

La elaboración del dispositivo se realizó colocando nanotubos de carbono entre dos electrodos metálicos de plata que harían de fuente (source) y sumidero (drain) sobre una placa de silicio. El flujo de electrones o huecos pasa a través del nanotubo de carbono, y se controla aplicando los voltajes adecuados a un tercer electrodo situado en la parte inferior de la placa de silicio, la compuerta (gate), que produce el campo eléctrico responsable de controlar la conductividad del nanotubo de carbono.

Un valor importante es la impedancia de entrada del dispositivo fabricado ($Z < 10^6 \Omega$), los valores obtenidos en las diferentes muestras están en los rangos para un transistor de este tipo, cualidad que es fundamental ya que la alta impedancia de entrada en los transistores de efecto de campo permite retener carga el tiempo suficiente para utilizar estos dispositivos como elementos de almacenamiento.

El dispositivo resultó sensible a la aplicación de voltajes negativos y positivos, estos valores de voltaje provocan el crecimiento de la corriente I_D a través del nanotubo de carbono llegando adoptar un comportamiento similar a los reportados en investigaciones anteriores.

El comportamiento de la corriente I_D es no lineal, este tipo de comportamiento es típico en los transistores de efecto de campo.

El comportamiento I_{SD} vs V_G hace que el dispositivo tenga una conducción del tipo- p similar a la que presentan los nanotubos de carbono en transistores de efecto de campo que operan en condiciones ambientales reportadas en anteriores investigaciones.

Los dispositivos MOSFET (transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor) fabricados con nanotubos de carbono resultaron ser sensibles a la variación de la temperatura, el rango de temperaturas a las que pueden trabajar estos transistores está entre los 125 K a los 300K y las variaciones en el valor de la corriente I_D están en el rango de los 20 μ A a 30 μ A.

La poca variación de la corriente en un intervalo tan grande de temperatura que se da debido al uso de nanotubos de carbono, es muy relevante, debido a que los dispositivos de este tipo de la actualidad, la temperatura es un factor determinante en su desempeño.

Se obtuvo una movilidad eléctrica de 150.7 cm^2/Vs en una de las muestras construidas que está por arriba de otras investigaciones, esto puede deberse al disulfuro de carbono presente en los nanotubos de carbono, las mayores movilidades en anteriores trabajos se dan cuando se utiliza una configuración ordenada de los nanotubos de carbono en el canal, en el presente trabajo se utilizó una configuración aleatoria la cual provoca la difusión del canal de conducción lo cual puede disminuir la movilidad del dispositivo de en el presente trabajo.

A partir de los valores de la movilidad eléctrica obtenidos en las diferentes muestras nos hacen ver que el método de fabricación puede ser modificado para controlar principalmente los factores determinantes de esta característica como por ejemplo, el número de nanotubos, la distribución de estos dentro del canal y así conseguir valores mayores en la movilidad.

El rango de temperaturas a las que puede trabajar este transistor de efecto de campo es grande ya que las variaciones en el valor de la corriente I_D están en el rango de los $20\mu\text{A}$ a $30\mu\text{A}$ entre los 125 K a los 300 K .

La sensibilidad del dispositivo fabricado con nanotubos de carbono funcionando a diferentes temperaturas puede ser útil en cuestiones tecnológicas.

Al utilizar nanotubos de carbono en la fabricación de transistores, con investigaciones como esta y avances tecnológicos, permitirá en el futuro tener un dispositivo con dimensiones menores a los transistores de 45nm que presentan los procesadores que se manejan en la actualidad, pero con un desempeño mejor.