

UNIVERSIDAD DE SONORA
DIVISIÓN DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIÓN EN FÍSICA

**FETS CON PELÍCULAS DELGADAS DE CdS Y
CONTACTOS METÁLICOS OBTENIDOS MEDIANTE UN
SISTEMA LITOGRÁFICO SIN MÁSCARAS**

**Que para obtener el grado académico de:
MAESTRO EN CIENCIAS
(FÍSICA)**

Presenta:

ING. JESÚS ALBERTO ÁVILA AVENDAÑO

Director de Tesis:

DR. LUIS ALFREDO GONZÁLEZ LÓPEZ

Co-director:

DR. DAINET BERMAN MENDOZA

Hermosillo, Sonora

Noviembre de 2011

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

AGRADECIMIENTOS...

... a mis padres, que siempre estuvieron conmigo, y me apoyaron en todos los sentidos, no solo en este proyecto, sino en todo el camino que llevo recorrido para haber llegado hasta aquí. Aunque las palabras no demuestran todo el agradecimiento y amor que les tengo, este logro se los dedico con mucho cariño.

A mis hermanos, que siempre me han apoyado, con su particular manera, y espero que esto los haga sentir orgullosos de mí, como yo lo estoy de ellos.

A mi novia Fabiola, que siempre ha estado cerca apoyándome, y por qué no decirlo, aguantándome en los momentos difíciles. Gracias por estar ahí conmigo, tú eres parte de esto.

A mi familia, sin escaparse ninguno, que siempre me apoyaron y nunca perdieron oportunidad de demostrármelo.

A mis directores, Dr. Luis Alfredo González y Dr. Dainet Berman, por ayudarme y encaminarme durante todo el trayecto de este proyecto, siempre mostrando la mejor disposición, por brindarme gran parte de su tiempo, y porque sé que sin ellos, este proyecto no hubiera salido adelante.

Al Dr. Jesús Castillo por la gran disposición que mostró a lo largo de todo este proyecto, porque siempre tuvo tiempo y nunca dudó en apoyarme, y por compartir sus conocimientos, siempre de manera clara y abundante.

Al Dr. Mario Flores por su disposición siempre amable, para que hiciera uso del equipo de baño químico.

Al Dr. Thomas Piters por su ayuda y disposición, y además, permitirme utilizar el equipo para las mediciones de transmitancia óptica.

Al Dr. Manuel Quevedo y al Mtro. Gerardo Gutiérrez, por los procesos y pruebas realizadas en la Universidad de Texas en Dallas.

Al Dr. Martín Pech por facilitar el uso del equipo para tratamiento térmico en CINVESTAV-Saltillo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca 41209, la cual me ayudó durante este proyecto y por el apoyo del proyecto (CB-2009-01)134572.

A mis amigos, que caminamos juntos al principio, y fue con el apoyo de todos que salimos juntos adelante, y aunque cada quien tomó su sendero, la amistad sigue presente, muchas gracias.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVO GENERAL	2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.3 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO	3
2. PROCESAMIENTO DE CALCOGENUROS POR SOLUCIÓN	4
2.1 INTRODUCCIÓN	4
2.1.1 Rocío pirolítico químico	4
2.1.2 Sol-gel	5
2.1.3 Reacción y absorción de capas iónicas sucesivas	5
2.1.4 Depósito por baño químico	5
2.2 FABRICACIÓN DE PELÍCULAS DELGADAS MEDIANTE BAÑO QUÍMICO	6
2.2.1 Propiedades de CdS	9
2.2.2 Propiedades de PbS	11
3. CARACTERÍSTICAS DE LOS TRANSISTORES DE EFECTO DE CAMPO	13
3.1 ESTRUCTURA BÁSICA MIS (METAL INSULATOR SEMICONDUCTOR)	16
3.2 PARÁMETROS DE IMPORTANCIA	23
4. LITOGRAFÍA SIN MÁSCARA	30
4.1 TIPOS DE LITOGRAFÍA	31
4.2 INTERFERENCIA DE HACES A PARTIR DE UNA PANTALLA DIFRACTORA	34
5. RESULTADOS EXPERIMENTALES	46
5.1 FABRICACIÓN DE PELÍCULAS DELGADAS DE CdS Y SU CARACTERIZACIÓN	47
5.1.1 Formulaciones para películas de CdS	47
5.1.2 Características ópticas	49
5.1.3 Análisis estructural	52
5.1.4 Morfología	53
5.2 FABRICACIÓN DE PELÍCULAS DELGADAS DE PbS/CdS Y SU CARACTERIZACIÓN	54
5.2.1 Estructura	55
5.2.2 Difusión	55

5.3 FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE FETS	59
5.3.1 Caracterización eléctrica de FETs con CdS como capa activa	61
5.3.2 Caracterización eléctrica de FETs con películas semiconductoras de CdS con difusión de Pb	64
6. CONCLUSIONES	66
6.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS	66
6.2 TRABAJO FUTURO	68
ANEXO	
A. PROGRAMA PARA GENERAR CGHs Y SIMULACIÓN DE RESULTADOS EN MATLAB	69
BIBLIOGRAFÍA	73

LISTA DE TABLAS

Tabla 5.1 Energías de los gap directos calculados en películas de CdS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Estructuras cristalinas de CdS: a) zincblenda y b) wurtzita; en las dos figuras, la esfera grande representa el átomo de cadmio y la esfera pequeña, el átomo de azufre.

Figura 2.2 Estructura cristalina rock salt de PbS, la esfera grande representa el átomo de plomo y la esfera pequeña, el átomo de azufre.

Figura 3.1 Diferentes tipos de MOSFETs, sus curvas de salida y sus características de transición.

Figura 3.2 Estructura del MOSFET.

Figura 3.3 Estructura ideal MIS.

Figura 3.4 Diagrama de bandas para la estructura ideal MIS, sin polarización aplicada ($V=0$). a) Semiconductor tipo n. b) Semiconductor tipo p.

Figura 3.5 Diagramas de bandas para la estructura ideal MIS, donde se muestran diferentes polarizaciones para generar las condiciones de: a) acumulación, b)

agotamiento e c) inversión. Todos los casos para ambos tipos de semiconductor, tipo p y tipo n.

Figura 3.6 Diagrama de bandas para la superficie de un semiconductor tipo p.

Figura 3.7 Curva de variación de la corriente del drenaje, respecto al voltaje drenaje-fuente.

Figura 3.8 Diagramas del ancho del canal de MOSFET en las tres regiones de operación: a) lineal, b) punto de estrangulamiento y c) saturación.

Figura 3.9 Ejemplos de curvas de operación de un transistor MOSFET de canal n en color rojo y su curva de voltaje de saturación en color azul.

Figura 4.1 Pasos del proceso de litografía con máscara.

Figura 4.2 Perfil de un haz Bessel.

Figura 4.3 Sistema 4f empleado para obtener patrón de interferencia.

Figura 4.4 Diagrama de montaje óptico completo con fotografía tomada en el laboratorio.

Figura 4.5 Hologramas generados por computadora con diferentes funciones portadoras: a) portadora horizontal, b) portadora vertical y c) portadora cuadrada.

Figura 5.1 Resultados de transmitancia para películas de CdS sobre vidrio, depositadas con la formulación a) con amonio y b) libre de amonio.

Figura 5.2 Ejemplos de curvas $(\text{Absorción} \times \text{Energía})^2$ vs Energía, con ajuste de rectas para calcular energía del gap directo para películas de CdS depositadas en 15 minutos a) con amonio a 60°C, b) libre de amonio a 60°C, c) con amonio a 70°C, d) libre de amonio a 70°C, e) con amonio a 80°C y f) libre de amonio a 80°C.

Figura 5.3 Difractograma de películas de CdS empleando la formulación a) con amonio y b) libre de amonio.

Figura 5.4 Resultados de SEM con mediciones de tamaño de grano.

Figura 5.5 Difractograma de películas de PbS/CdS sometidas a tratamiento térmico de a) 300°C y b) 400°C.

Figura 5.6 Resultados de XPS con diferentes tiempos de erosión, para película de PbS/CdS con tratamiento térmico a 220°C

Figura 5.7 Resultados de XPS con diferentes tiempos de erosión, para película de PbS/CdS con tratamiento térmico a 300°C

Figura 5.8 Resultados de XPS con diferentes tiempos de erosión, para película de PbS/CdS con tratamiento térmico a 400°C

Figura 5.9 Estructura completa de los FETs con el proceso litográfico propuesto, y con el proceso litográfico con máscara.

Figura 5.10 Resultados de curvas de operación para diferentes películas de CdS fabricadas por CBD.

Figura 5.11 Resultados de mediciones I_D - V_G con ajuste de recta para calcular V_T .

Figura 5.12 Resultados de curvas de operación para FET de CdS con difusión de Pb como transistor de a) canal n y b) canal p.

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

Hoy en día, resulta difícil y para algunas personas, casi imposible, imaginar un mundo sin computadoras, sin celulares, sin televisiones o sin muchos otros aparatos electrónicos, sin embargo, hace 50 años, el mundo era así. La actualidad es muy diferente, en estos tiempos, una gran parte de la población somos dependientes a muchos dispositivos donde la electrónica está presente, o simplemente donde las máquinas que los fabricaron son electrónicas.

Esta revolución tecnológica ha llevado a buscar materiales para hacer dispositivos cada vez más pequeños, más rápidos y más económicos. Hasta hoy, el silicio ha sido el material más usado para dispositivos electrónicos, sin embargo, se está llegando al límite en cuanto al tamaño de los dispositivos, además, el costo de fabricación también ha aumentado en gran medida.

Debido a lo anterior, desde hace varios años se están desarrollando materiales alternativos al silicio. Aunque el silicio es un elemento semiconductor, algunos materiales que pueden ser alternativos a éste, son compuestos que también presentan el comportamiento semiconductor, como por ejemplo algunos calcogenuros, entre los que se encuentra el sulfuro de cadmio (CdS).

En la actualidad existen diversos métodos para el crecimiento de películas de calcogenuros metálicos. En este trabajo, se emplea el depósito de películas delgadas de CdS para fabricar transistores de efecto de campo mediante deposición por baño químico, ya que es uno de los más económicos, y el equipo utilizado también suele ser de muy bajo costo. La síntesis de películas de CdS con esta técnica se ha llevado a cabo usualmente mediante el empleo de soluciones de amoníaco como agente complejante o nivelante de pH [1], el cual es altamente volátil, tóxico y peligroso para la salud y el medio ambiente. La volatilidad del amoníaco hace que el pH de la solución en el baño químico cambie produciendo películas con propiedades irreproducibles. Por esta razón presentamos una

propuesta novedosa usando una formulación libre de amonio y glicina como complejante.

Para fabricar dispositivos electrónicos, además del depósito de películas delgadas, es necesario implementar un sistema de litografía, para delimitar ciertas áreas de las películas y en nuestro caso, depositar contactos metálicos sobre la película. El sistema litográfico que se implementó, es un sistema novedoso, que usa la interferencia de haces adifraccionales generados a partir de una pantalla difractora. Con esto podemos prescindir del uso de máscaras en el proceso litográfico. De manera que este trabajo de tesis es resultado de tres disciplinas; en primer lugar tenemos el procesamiento de materiales calcogenuros (síntesis de películas delgadas inorgánicas), luego el análisis y desarrollo de sistemas ópticos difractivos para obtener patrones periódicos metálicos que operarán como contactos (óptica física) y el análisis en el desempeño eléctrico de las películas delgadas semiconductoras en un dispositivo (física de semiconductores).

1.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar transistores de efecto de campo con películas delgadas de CdS y contactos metálicos producidos mediante un sistema litográfico sin máscaras.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Presentar el desarrollo y las condiciones óptimas para el depósito de películas delgadas de CdS mediante el método de baño químico libre de amonio.
- Presentar un estudio de las propiedades estructurales y ópticas de las películas delgadas de CdS.

- Mostrar los efectos producidos por procesos de tratamiento térmico en bicapas de PbS/CdS con el fin de obtener la difusión de Pb en la película de CdS.
- Presentar un estudio del desempeño de transistores de efecto de campo con las películas de CdS y CdS con Pb difundido empleando contactos producidos mediante la interferencia de haces adifraccionales.

1.3 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

En el Capítulo 2 se define el método de depósito de calcogenuros por baño químico, donde se resumen los mecanismos involucrados dentro de este proceso. Además se describen las propiedades reportadas de los materiales que se depositaron a lo largo de este proyecto. En el siguiente capítulo, se presenta el marco teórico que envuelve los transistores de efecto de campo, principalmente los MOSFETs, así como las características eléctricas que los definen. En el Capítulo 4, se desarrolla todo lo referente al sistema de interferencia que se diseñó para el proceso de litografía sin máscaras, así como la teoría detrás de los hologramas fabricados, y también los resultados obtenidos solo de ese capítulo. En el Capítulo 5 se presentan los resultados de los depósitos de películas delgadas, así como las diferentes pruebas para su caracterización; al final del capítulo, se muestran los resultados de las pruebas eléctricas a los transistores de efecto de campo, fabricados con las películas depositadas. Por último, en el Capítulo 6, se muestran las conclusiones de este trabajo, así como el trabajo futuro que se puede realizar.

CAPÍTULO 2 PROCESAMIENTO DE CALCOGENUROS POR SOLUCIÓN

2.1 INTRODUCCIÓN

En la introducción de este trabajo, se mencionó la importancia que las películas delgadas tienen en la actualidad, y es debido a este gran auge que, se han desarrollado una gran cantidad de procesos para depositar películas delgadas de semiconductores en diferentes sustratos.

Los procesos para la fabricación de películas delgadas se pueden dividir en dos grandes grupos: procesos físicos, donde el material que se deposita ya está creado y solo es transportado al sustrato por diferentes mecanismos físicos; y los procesos químicos, donde el proceso de depósito involucra una reacción química para crear el material que formará la película delgada [2] [3] [4].

En algunos de los procesos químicos, se prepara una solución precursora para depositar las películas. Entre los métodos de fabricación por solución más conocidos están:

2.1.1 Rocío pirolítico químico

En este método de depósito, el sustrato se coloca en una cámara al vacío y es calentado a una temperatura estable. Por otra parte, la solución precursora pasa por un atomizador, que convierte la solución en un aerosol y es transportada al sustrato en forma de gotas. Cuando las gotas de la solución precursora hacen contacto con el sustrato caliente, se da una reacción química conocida como pirólisis, que es la separación de la solución debido al calentamiento en ausencia de oxígeno. La pirólisis produce la película delgada que se adhiere al sustrato. La desventaja de este método, es que las películas son poco uniformes, además, comparado con los otros métodos, el equipo necesario para realizarlo es costoso [5].

2.1.2 Sol-gel

En esta técnica, una solución que contiene partículas suspendidas que son precursoras del material que se quiere depositar se coloca sobre el sustrato; esta solución es llamada sol-gel debido a que generalmente tiene una consistencia viscosa. Existen diferentes maneras de depositar el sol-gel sobre el sustrato, puede ser por spin coating, por inmersión o rociándolo directamente; posteriormente, el sustrato se coloca en un ambiente seco a una temperatura controlada, con lo cual, el sol-gel se endurece formando la película delgada. En algunas ocasiones, es necesario proporcionarle un tratamiento térmico adicional, para generar mayor adherencia. Al igual que el método anterior, la desventaja de este método es que se obtienen películas poco uniformes [6].

2.1.3 Reacción y absorción de capas iónicas sucesivas

El depósito por SILAR es una técnica nueva que surge como una variación del método de depósito por baño químico, consiste en una serie de pasos que se repiten sucesivamente para formar la película capa por capa. El primer paso es de absorción, que consiste en sumergir el sustrato en una solución donde solo es absorbido el catión por el sustrato; posteriormente se enjuaga el sustrato en otra solución para dejar una sola capa de material; después, en la etapa de reacción, se sumerge el sustrato en otra solución donde solo el anión está presente, por lo que reacciona con los cationes adheridos al sustrato; y el último paso del ciclo es otra solución de enjuague, que retira los residuos de material no adheridos al sustrato. El ciclo anterior se repite tantas veces como se requiera el grosor de la película. La ventaja más importante de este método, es el control que se tiene sobre el crecimiento de la película, aunque el tiempo que toma, puede ser excesivo [7].

2.1.4 Depósito por baño químico

La técnica de depósito por baño químico será bien definida en la siguiente sección, pero un breve resumen sería que, esta técnica consiste en una solución

acuosa donde se genera una reacción química controlada a una temperatura estable, dicha reacción produce moléculas suspendidas del material que se quiere depositar. En la solución, se introduce el sustrato, y a medida que se lleva a cabo la reacción química, las moléculas empiezan a adherirse al sustrato formando la película delgada en éste. Con este método se obtienen películas bastante uniformes [8].

2.2 FABRICACIÓN DE PELÍCULAS DELGADAS MEDIANTE BAÑO QUÍMICO

El método de fabricación de películas delgadas por baño químico o CBD (Chemical Bath Deposition), por sus siglas en inglés, es probablemente el procedimiento más simple para fabricar películas delgadas, dicho método consiste en la mezcla de diferentes reactivos en una solución acuosa, la cual se coloca a una temperatura estable, (generalmente entre 50°C y 100°C) para acelerar la reacción. El sustrato se coloca dentro del recipiente donde se lleva a cabo la reacción, y a medida que se forman las moléculas del material que se quiere depositar, éstas se van adhiriendo al sustrato, formando la película delgada.

Por otro lado, por la misma simplicidad del método CBD, podemos decir que, los pasos necesarios para el depósito de las películas delgadas en el sustrato son solo dos, de manera general. El primer paso sería la formación, en suficiente cantidad, de las moléculas del material que se quiere depositar; el segundo paso, la adhesión de este material al sustrato.

Sin embargo, por la poca complejidad que presenta este método, son pocas las variables que podemos modificar para producir cambios en las películas delgadas que se van a depositar, pero esas variables son fundamentales, y en ocasiones, llegan a ser críticas para que se dé un depósito adecuado.

En otras palabras, en el depósito por CBD, no basta con mezclar reactivos que contengan los elementos que queremos depositar y con el simple hecho de

agregarlos en una solución, que se combinen los átomos para formar las moléculas del compuesto exacto para nuestra película; depende de nosotros dar las condiciones ideales en la solución para que esa formación del compuesto se pueda dar, ya sea controlando el pH, la complejación, la solubilidad y la temperatura.

En el CBD, la manera como se controla la solución acuosa, y se convierta en el ambiente ideal para que haya formación del compuesto que queremos depositar es, en primer lugar, eligiendo algunos de los diferentes reactivos que aportan los átomos para el compuesto de la película, y ya seleccionados, calcular la concentración; posteriormente, se elige la temperatura a la que se realiza el baño químico. Con estas variables, se pueden obtener diferentes parámetros en las películas delgadas o, en el peor de los casos que no haya depósito en el sustrato o ni siquiera reacción entre los componentes de la solución.

Como se mencionó en el párrafo anterior, hay cuatro parámetros que debemos tomar en cuenta antes de hacer un depósito por CBD, para seleccionarlos debemos contestar las preguntas; ¿Qué reactivos voy a mezclar?, ¿En qué cantidad y en qué concentración cada uno de ellos?, y por último, ¿A qué temperatura pondré el baño químico? Pero para responder estas preguntas, debemos entrar al mundo de la química para definir algunos conceptos que nos ayuden con las respuestas.

Primeramente, debemos conocer el concepto de potencial de hidrógeno (pH), que se define como, el negativo del logaritmo de la concentración de iones de hidrógeno en una solución, es decir, $pH = -\log[H^+]$, donde denotamos $[H^+]$ como concentración de iones de hidrógeno, y para el resto del capítulo, denotaremos con corchetes las concentraciones. De una manera más cuantitativa, podemos mencionar que el pH define el nivel de acidez de una sustancia; si el pH es 7, se considera una sustancia neutra, pero si el pH está en un nivel entre 1 y 7, se considera una sustancia ácida, es decir, con una alta concentración de iones H^+ .

Por otro lado, si el pH está en un nivel entre 8 y 14, la sustancia se considera básica, esto se debe, a que existe una relación constante K_w , llamada *producto iónico del agua*, entre la concentración de iones de hidrógeno e iones de hidroxilo (OH^-), la cual se define como $K_w = [\text{H}^+][\text{OH}^-] = 10^{-14}$ (para una temperatura de 25°C), por lo tanto, si $[\text{H}^+]$ disminuye, como en el caso del pH entre 8 y 14, entonces $[\text{OH}^-]$ aumenta; es por eso, que para ese nivel de pH, la sustancia se considera básica.

El pH es importante, ya que la mayoría de las reacciones químicas para CBD deben estar en un nivel de pH entre 9 y 12, sin embargo, cuando agregamos un reactivo que contiene un metal, como los metales hidratados, la solución se vuelve ácida, lo que no es adecuado para la reacción química que esperamos, por lo tanto, es necesario agregarle una solución básica, para nivelar el pH. La solución que se agrega es el llamado buffer, o solución tampón, cuyo propósito es que la solución del CBD tenga un pH adecuado para la reacción química.

En general, las soluciones que actúan como buffer son una combinación de ácidos débiles o bases con su respectiva sal. En los procesos de CBD, el amonio es muy utilizado como solución tampón, sin embargo, se obtienen mejores resultados si en vez de usar amonio puro, se mezcla éste, con alguna sal de amonio.

Otro concepto fundamental para entender el proceso de CBD es el producto de solubilidad, el cual lo podemos definir como un valor constante, que como su nombre lo indica, nos da la solubilidad de una sal en una solución acuosa, y está definido por K_{sp} . Para obtener el K_{sp} de un compuesto formado por $M_aX_b \leftrightarrow aM^{n+}bX^{m-}$, el K_{sp} se obtiene como $K_{sp} = [M^{n+}]^a[X^{m-}]^b$, en otras palabras, si una sal es disuelta en agua, el K_{sp} nos indica la cantidad de iones que son disueltos para llegar a la saturación.

La importancia del producto de solubilidad en CBD recae, en que el K_{sp} nos da una idea de qué cantidad de iones debemos tener en la solución, antes de que empiecen a precipitarse, lo cual no es adecuado para el depósito de las películas.

Esto se debe a que el K_{sp} puede deducirse de las energías libres de la formación de los compuestos involucrados, por lo tanto, puede obtenerse como una variable termodinámica que, en la mayoría de los casos, nos ayudará a predecir cuándo ocurrirá la precipitación.

Ahora que hemos llegado al punto de la precipitación, tenemos que mencionar otro compuesto que nos ayuda a evitar este fenómeno en el CBD, el complejante. Dado que muchas reacciones usan como intermediarios los hidroxilos, la concentración de éstos en la solución es de gran importancia, pero en ocasiones, puede ocurrir que la formación de hidróxidos del metal, produzca una precipitación casi instantánea de esos hidróxidos, lo cual evitaría la formación del compuesto que queremos depositar.

EL complejante tiene como funciones la de ligar a los metales, para que éstos no se precipiten; así como también, la de disolver la formación de hidróxidos del metal, todo esto con el fin de evitar la precipitación y puedan quedar suspendidos para la formación del compuesto que se va a depositar. Por otro lado, la estabilidad de los compuestos complejantes depende de la temperatura, por lo que es necesario aumentar la temperatura de la solución para que realicen sus funciones de mejor manera.

Con lo descrito en esta sección, se debe entender de una manera más clara, el por qué en el CBD, hay que mezclar una serie de compuestos, para lograr la formación de moléculas que solo tienen dos o tres átomos diferentes [8].

2.2.1 Propiedades de CdS

En nuestro trabajo, se fabricó principalmente el semiconductor sulfuro de cadmio (CdS), el cual, debido a sus propiedades, es muy usado para la fabricación de celdas fotovoltaicas, más conocidas como celdas solares. Haciendo un recuento de las diferentes propiedades que son reportadas en la literatura podemos mencionar las siguientes:

- **ESTRUCTURA:** Los cristales de CdS generalmente se presentan en dos tipos de estructura; la estructura que más se presenta en el CBD, es la estructura zincblenda con una coordinación geométrica en tetraedro, la cual se muestra en el inciso a) de la Figura 2.1; la otra estructura que también puede presentarse en CBD, pero generalmente se obtiene al dar tratamiento térmico a la estructura zincblenda, es la estructura wurtzita también con coordinación geométrica en tetraedro, la cual se muestra en el inciso b) de la Figura 2.1. Generalmente, las películas delgadas de CdS, presentan una combinación de dos estructuras cristalinas, zincblenda y wurtzita, ya que la estructura en la película delgada depende de muchas variables, como el sustrato, el complejante, entre otras.

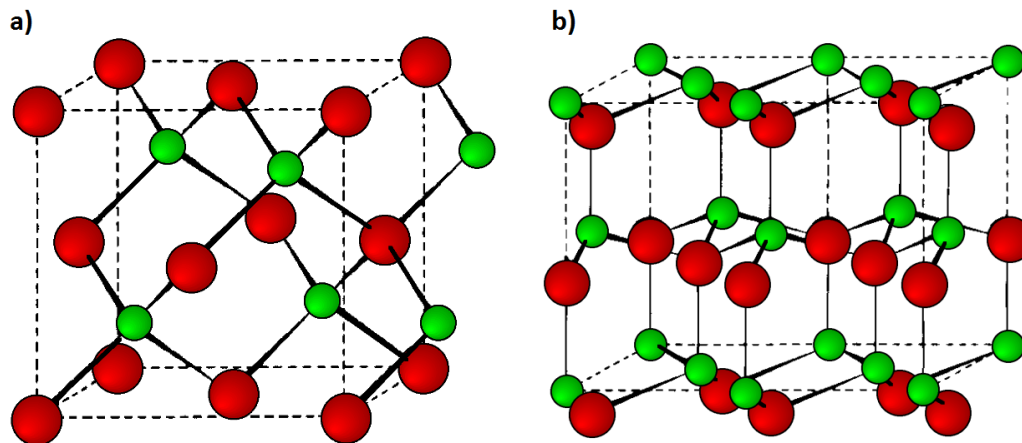


Figura 2.1 Estructuras cristalinas de CdS: a) zincblenda y b) wurtzita; en las dos figuras, la esfera grande representa el átomo de cadmio y la esfera pequeña, el átomo de azufre.

- **ORIENTACIÓN:** La orientación cristalina, al igual que la estructura, depende de muchas variables en la solución y del sustrato, sin embargo hay una orientación preferente para cada estructura cristalina de CdS, la (111) para zincblenda y la (0002) para wurtzita. Aun con esta preferencia, en la fabricación por CBD, no es muy común obtener películas con estructura muy homogénea, pero para métodos de crecimiento de ion por ion, se pueden obtener mejores resultados.

- **PROPIEDADES ÓPTICAS:** En las películas de CdS, se ha estudiado principalmente la transmitancia óptica, ya que como se mencionó, el CdS se usa como capa de ventana en las celdas fotovoltaicas, por lo tanto, la transparencia es importante, y ésta depende del grosor y estructura de la película y el bandgap, el cual se ha reportado principalmente en 2.45eV. Otra propiedad óptica que se ha estudiado es la fotoluminiscencia, pero los resultados han sido variados, ya que las películas que se obtienen, generalmente están formadas por granos de diferentes tamaños de cristal, y esto genera diferentes picos de luminiscencia, aunque el más común es de color rojo, aproximadamente en 1.8eV, también se han reportado picos verdes, amarillos e, inclusive, en infrarrojo.
- **PROPIEDADES ELÉCTRICAS Y FOTOCONDUCTIVIDAD:** En lo referente a resistividad eléctrica, se han reportado valores muy variados, desde $10^9 \Omega\text{-cm}$ hasta $15 \Omega\text{-cm}$ y debido a su alta resistividad, es común que presenten una fotoconductividad grande, se han reportado cambios de resistividad de hasta aproximadamente 10^9 por el efecto de fotoconductividad [8].

2.2.2 Propiedades de PbS

Otro semiconductor que usamos en este trabajo es el sulfuro de plomo (PbS), el cual es estudiado principalmente por sus propiedades fotoconductoras. Del PbS podemos mencionar las siguientes propiedades:

- **ESTRUCTURA Y MORFOLOGÍA:** En la formación de PbS por CBD se reporta como única estructura cristalina la rock salt, que se muestra en la Figura 2.2, y generalmente no

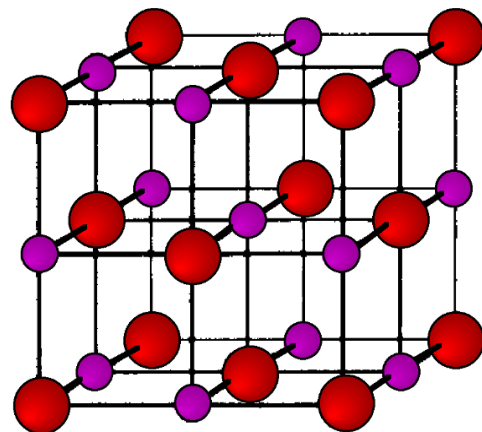


Figura 2.2 Estructura cristalina rock salt de PbS, la esfera grande representa el átomo de plomo y la esfera pequeña, el átomo de azufre.

presenta ninguna orientación de preferencia, se reportan en su gran mayoría crecimientos no homogéneos de granos de cristal.

- PROPIEDADES ELÉCTRICAS: En general, las propiedades eléctricas de PbS se reportan después de un tratamiento térmico en una atmósfera de aire. Entre los resultados importantes está que el PbS, con diferentes técnicas y tratamientos, puede encontrarse como semiconductor tipo p o tipo n. Por otro lado hay reportes, donde la resistividad varía un orden de magnitud después del tratamiento térmico (de $10^5\Omega\text{-cm}$ a $10^4\Omega\text{-cm}$), sin embargo, dependiendo de la técnica, este cambio puede variar en 5 o 6 órdenes de magnitud (de $10^9\Omega\text{-cm}$ a $10^3\Omega\text{-cm}$). Por último, también hay reportes de fotoconductividad antes y después del tratamiento térmico, donde la oxidación por la atmósfera de aire en el tratamiento térmico, juega un papel fundamental para este fenómeno [8].

CAPÍTULO 3 CARACTERÍSTICAS DE LOS TRANSISTORES DE EFECTO DE CAMPO

En este trabajo, uno de los objetivos es la fabricación de transistores de efecto de campo y la caracterización de los mismos, por lo tanto, es importante entender qué son los transistores, cómo funcionan y cuáles son los parámetros requeridos, para considerar que el dispositivo que hemos fabricado presenta las características de estos transistores.

Lo primero que debemos saber es qué es un transistor de efecto de campo, el cual es tan importante, que se encuentra prácticamente en todos los aparatos electrónicos que usamos. Un transistor es un dispositivo basado en semiconductores que generalmente tiene tres terminales, en las cuales, una de las tres controla la resistencia de un canal que existe entre las otras dos terminales, y si entre estas dos existe una diferencia de potencial, se puede controlar la corriente que pasa entre ambas terminales.

La manera en que la terminal de control modifica la resistencia del canal entre las otras dos terminales, genera dos familias de transistores, los transistores de efecto de potencial o PETs (Potential – Effect Transistor) y los transistores de efecto de campo o FETs (Field – Effect Transistor). En los PETs, la terminal de control es llamada base, y está conectada de manera directa al canal entre las otras dos terminales, llamadas colector y emisor; un ejemplo común de estos transistores son los transistores de unión bipolar o BJT (Bipolar Junction Transistor). Por otra parte, en los FETs, la terminal de control es llamada compuerta, y ésta controla la resistencia del canal de manera capacitiva, es por eso que son llamados de efecto de campo; un ejemplo de estos transistores son los MOSFETs, que serán importantes para el resto del trabajo.

El MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor), como su nombre lo indica, es un transistor de efecto de campo, en el cual se utiliza un

óxido como capa aislante y algún metal para el contacto de compuerta; y es muy usado en circuitos digitales y en la fabricación de memorias. Se conocen diferentes maneras de clasificar las diferentes estructuras de MOSFET que existen, pero la más común es dependiendo del tipo de canal que se forma entre la fuente y el drenaje, si el canal se forma con electrones, entonces es llamado MOSFET de canal n; por el contrario, si el canal es formado por huecos, entonces será un MOSFET de canal p. En combinación con la clasificación anterior, podemos definir un MOSFET por el estado del canal cuando no existe polarización en la compuerta; si no existe un canal entre la fuente y el drenaje, es decir, estará normalmente apagado, es llamado MOSFET de enriquecimiento. Por el contrario, si con la ausencia de polarización en la compuerta, existe un canal entre la fuente y el drenaje, en ese caso, el MOSFET estará normalmente encendido y será un

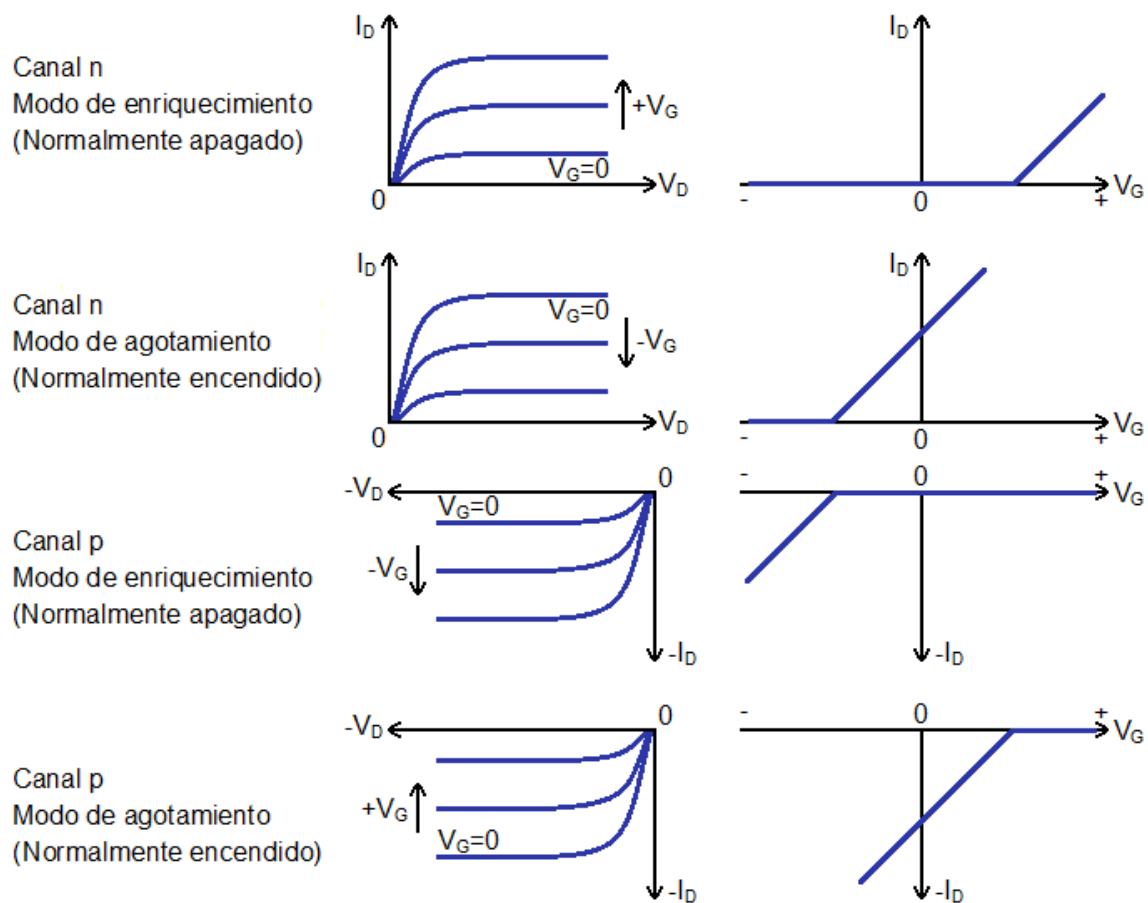


Figura 3.1 Diferentes tipos de MOSFETs, sus curvas de salida y sus características de transición.

MOSFET de agotamiento. Por sus características de respuesta eléctrica se presentan combinaciones de estas dos características de los MOSFET, las cuales nos producen cuatro diferentes posibilidades, tal como se muestra en la Figura 3.1, obtenemos cuatro distintos tipos de MOSFETs.

Para finalizar esta breve explicación de los MOSFETs, es importante conocer cómo es su estructura; un ejemplo de un MOSFET de canal n es el que se presenta en la Figura 3.2, en ella podemos ver que la base de la estructura es un semiconductor tipo p, donde se generan dos regiones de semiconductor tipo n altamente dopadas, este proceso generalmente se hace por implantación de iones; sobre cada región se deposita un contacto metálico con el propósito de que cada uno actúe como fuente y como drenaje; posteriormente se coloca un óxido como aislante sobre la sección que queda expuesta del semiconductor tipo p, en caso de que el semiconductor sea silicio, éste se oxida térmicamente para generar SiO_2 como aislante, y por último, se coloca un contacto sobre el óxido que será la compuerta del MOSFET; por otro lado, a la parte inferior del semiconductor también se le agrega un contacto, para poder generar una diferencia de potencial respecto a la compuerta y así producir el canal.

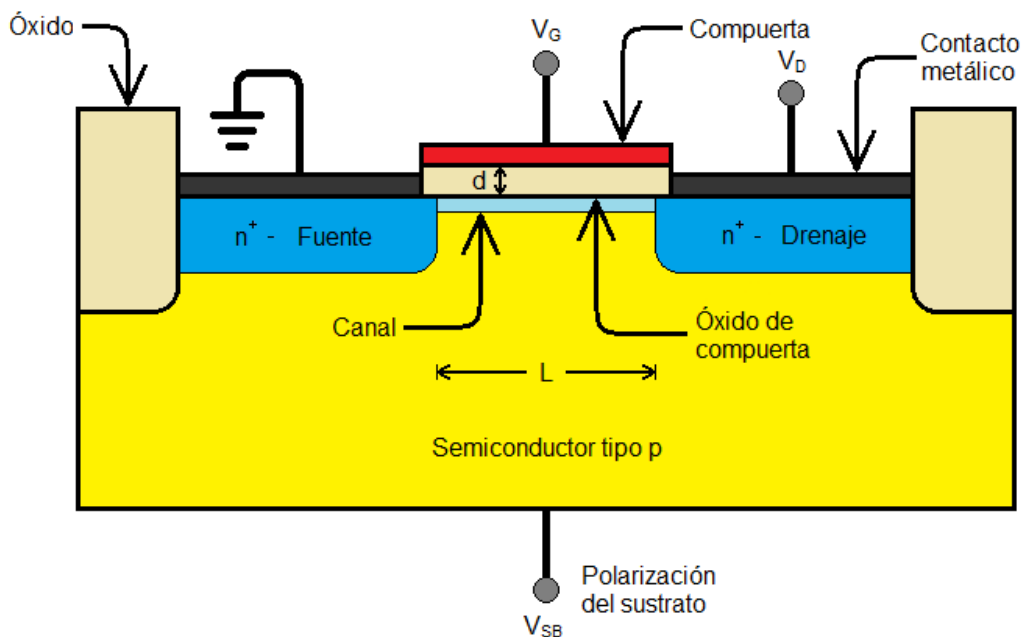


Figura 3.2 Estructura del MOSFET.

3.1 ESTRUCTURA BÁSICA MIS (METAL INSULATOR SEMICONDUCTOR)

Como se mencionó en la sección anterior, el MOSFET funciona por la generación de un canal con portadores minoritarios en un semiconductor a través de un campo eléctrico; para entender cómo es generado este canal en el semiconductor, es de gran ayuda entender que pasa en la superficie de una estructura formada por la unión de un metal, un aislante y un semiconductor, o MIS (Metal – Insulator – Semiconductor), por sus siglas en inglés. Debido a que esta estructura está presente en gran parte de los dispositivos semiconductores, y ya que el funcionamiento de éstos, depende en gran medida de las condiciones superficiales, la estructura MIS es ampliamente estudiada.

Para comprender los cambios que ocurren en la superficie del semiconductor en la estructura MIS, definiremos la estructura ideal del capacitor MIS que aparece en la Figura 3.3, donde d es el grosor del material aislante y V es un voltaje aplicado en el metal, respecto al semiconductor. Las condiciones para que esta estructura MIS sea ideal son las siguientes:

- La única carga que existe en toda la estructura, bajo cualquier condición de polarización, es la que se genera en el semiconductor y la misma cantidad de carga pero de signo contrario en el metal.
- La resistividad del aislante es infinita, esto es, que no existe flujo de carga del metal al semiconductor.

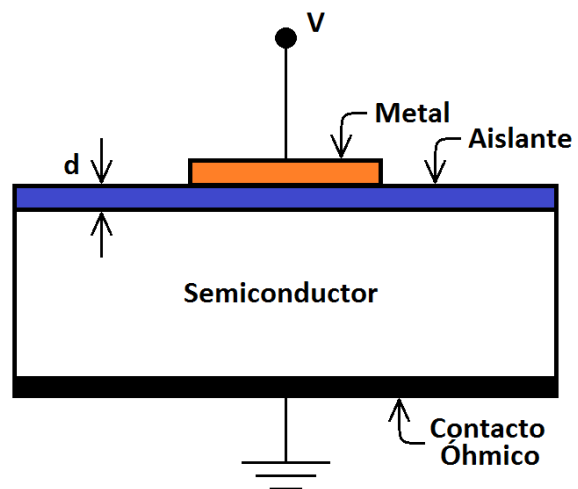


Figura 3.3 Estructura ideal MIS.

Además de estas dos condiciones, se puede agregar que la diferencia entre la función trabajo del metal y la del semiconductor sea igual a cero, esto con el fin de facilitar los cálculos.

Por otra parte, como en la mayoría de los casos de modelado de dispositivos que se basan en materiales semiconductores, se utiliza la teoría de bandas para poder comprender de una manera más sencilla, qué pasa en la superficie del semiconductor cuando realizamos la unión metal, aislante y semiconductor. En la Figura 3.4 podemos observar el diagrama de bandas para la unión MIS para el caso de un semiconductor tipo n y un semiconductor tipo p, en este caso, se considera que no existe polarización, es decir, $V=0$, por lo tanto, solo tenemos bandas planas.

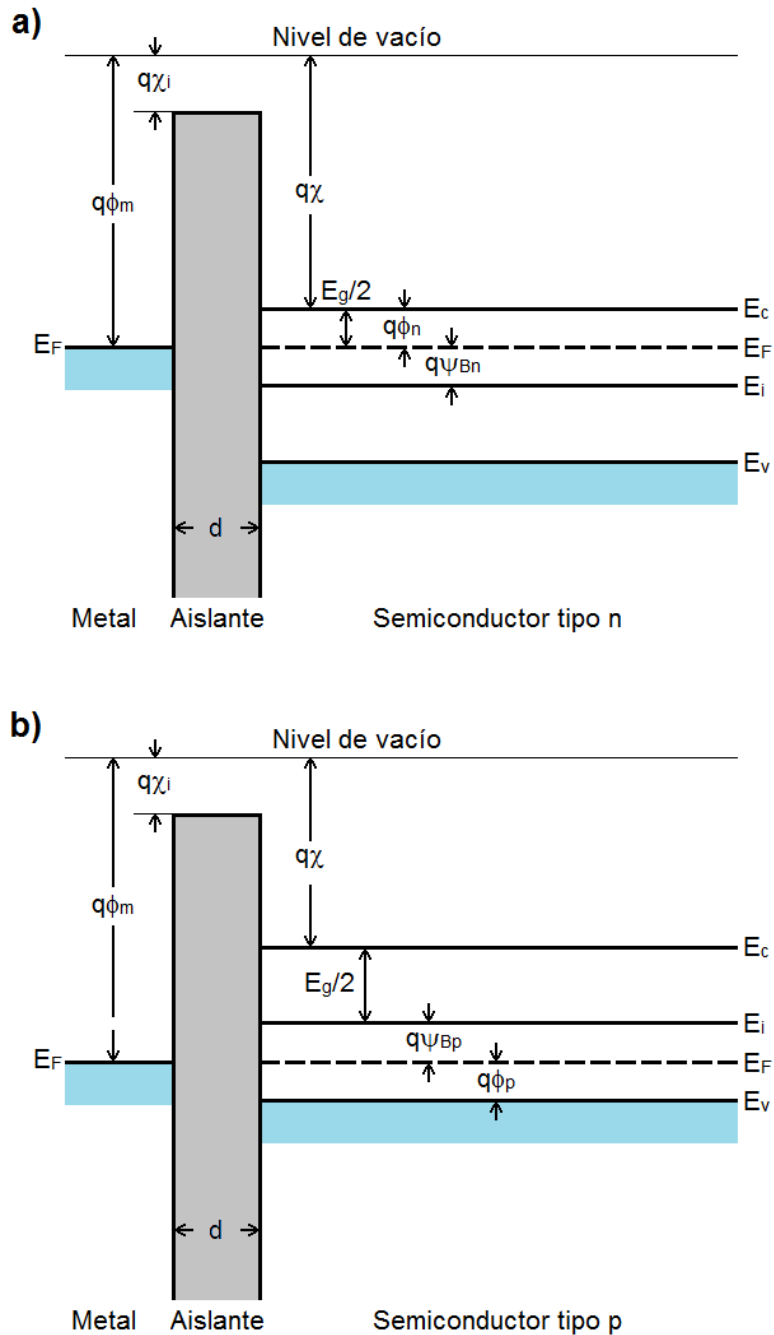


Figura 3.4 Diagrama de bandas para la estructura ideal MIS, sin polarización aplicada ($V=0$). a) Semiconductor tipo n. b) Semiconductor tipo p.

En los diagramas de la Figura 3.4 podemos observar diferentes niveles de energía necesarios para el estudio de esta unión, primeramente tenemos el nivel de vacío, el cual debe ser constante en todo el sólido y se considera como la cantidad de energía que debe tener un electrón para quedar sin influencia del material. Por otra parte, tenemos la función trabajo del metal ϕ_m , que es la diferencia entre el nivel de vacío y el nivel de Fermi del material; también tenemos la afinidad electrónica del aislante y del semiconductor χ_i y χ_s , respectivamente, que representan la diferencia entre el nivel de vacío y el nivel de conducción; y por último, en el semiconductor tenemos los potenciales del nivel de Fermi respecto al nivel de energía intrínseco y al nivel de energía de conducción o de valencia, según sea el caso, representados por ϕ_n y ψ_{Bn} para el semiconductor tipo n y por ϕ_p y ψ_{Bp} para el semiconductor tipo p.

Como lo mencionamos anteriormente, para facilitar los cálculos, podemos asumir que no existe diferencia entre la función trabajo del metal y la función trabajo del semiconductor, para lo cual definimos $\phi_{ms} = \phi_m - \phi_s$, entonces esta condición la podemos escribir como:

$$\phi_{ms} \equiv \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} - \psi_{Bn} \right) = \phi_m - (\chi + \Phi_n) = 0 \quad \text{para semiconductor tipo n}$$

$$\phi_{ms} \equiv \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} + \psi_{Bp} \right) = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{q} - \Phi_p \right) = 0 \quad \text{para semiconductor tipo p}$$

Ahora bien, la parte más interesante de esta estructura es cuando la polarizamos, siguiendo la Figura 3.3, tomaremos un voltaje V en el metal, ya sea positivo o negativo, con respecto a la polarización del semiconductor que será de 0V. Primero tomaremos la estructura MIS con un semiconductor tipo p, el cual si lo polarizamos de la manera ya indicada podemos describir tres casos diferentes:

- Primero, si polarizamos la estructura con un voltaje $V < 0$, la banda de valencia se doblará hacia arriba en la superficie más cercana al metal, mientras que el nivel de Fermi quedará constante, ya que no hay flujo de carga en la estructura; debido a que la densidad de portadores depende de manera exponencial de la diferencia entre los niveles de Fermi y de

valencia, la cantidad de huecos aumentará en la superficie del semiconductor donde la banda de valencia esté más próxima al nivel de Fermi, y eso es en la superficie pegada al aislante, por lo tanto, éste es el **caso de acumulación** de carga, en este caso, acumulación de huecos.

- En otro caso, si polarizamos la estructura con un voltaje pequeño $V > 0$, entonces habrá un doblamiento de las bandas hacia abajo en la superficie de contacto con el aislante, del mismo modo que en el caso anterior, el nivel de Fermi no cambia, por lo tanto, como la diferencia entre el nivel de Fermi y el nivel de valencia aumenta, habrá una disminución en la densidad de huecos, hasta que la cantidad de huecos sea prácticamente nula, es por esto, que este caso es conocido como **caso de agotamiento**.
- Por último, si polarizamos la estructura con un voltaje relativamente grande $V > 0$, de modo que las bandas se doblen aun más hacia abajo que el caso anterior, llegando al punto donde el nivel intrínseco quede por debajo del nivel de Fermi, entonces estaremos en el caso donde la diferencia entre el nivel de Fermi y la banda de conducción, será menor que la diferencia entre el nivel de Fermi y la banda de valencia, por lo tanto, habrá una mayor concentración de electrones que de huecos en la superficie del semiconductor; como estamos tratando con un semiconductor tipo p donde existe una mayor densidad de huecos, estaremos generando una región donde la densidad de electrones es mayor que la de huecos, como si fuera un semiconductor tipo n, es por eso, que se llama **caso de inversión**.

Una explicación gráfica de los tres casos explicados en los párrafos anteriores puede verse en los tres diagramas superiores de la Figura 3.5. Del mismo modo, un desarrollo similar puede llevarse a cabo para una estructura MIS con semiconductor tipo n, y llegar a los mismos tres casos de acumulación, agotamiento e inversión, la explicación gráfica de éstos se puede ver en los tres diagramas inferiores de la misma la Figura 3.5.

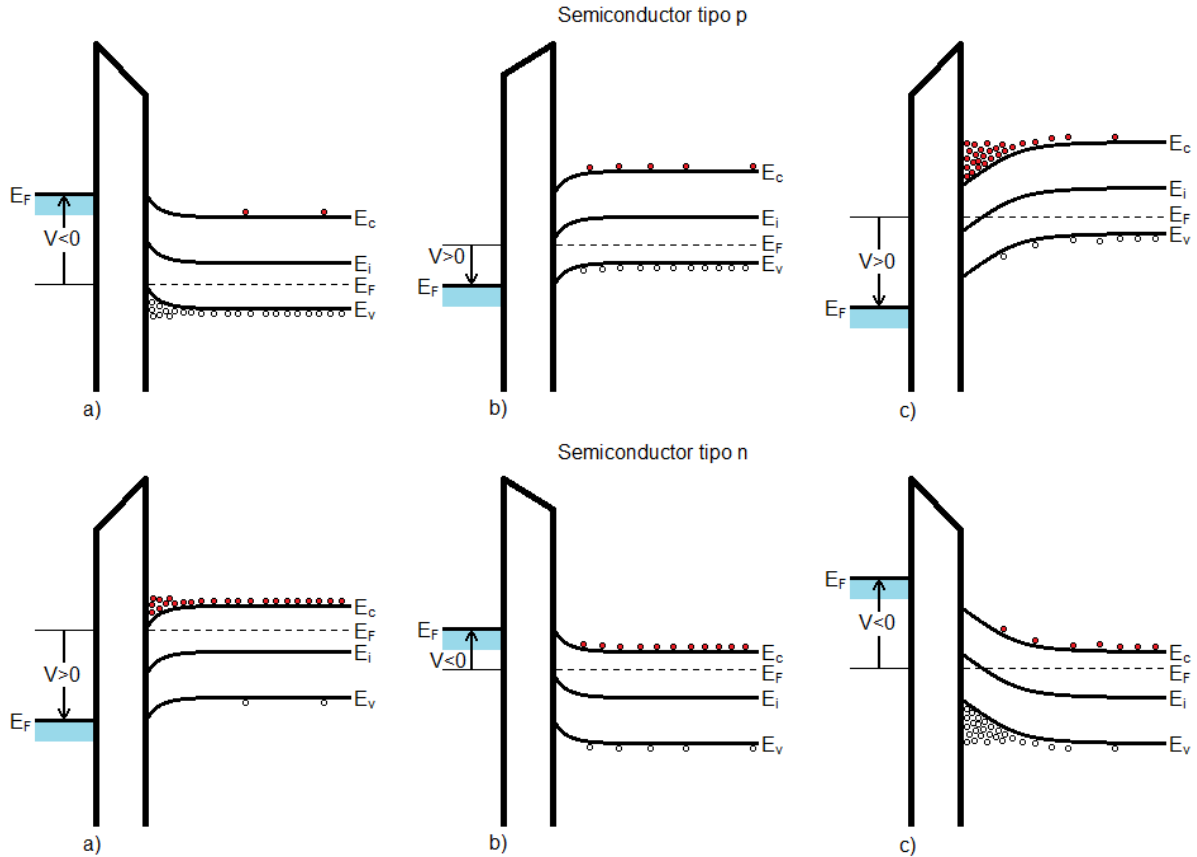


Figura 3.5 Diagramas de bandas para la estructura ideal MIS, donde se muestran diferentes polarizaciones para generar las condiciones de: a) acumulación, b) agotamiento e c) inversión. Todos los casos para ambos tipos de semiconductor, tipo p y tipo n.

Un análisis más cuantitativo que nos ayuda a entender cómo funciona la estructura MIS, es encontrar el campo eléctrico que se genera en la superficie del semiconductor dependiendo del potencial de superficie, y con ello, poder encontrar la cantidad de carga espacial que se genera en dicha superficie. En la Figura 3.6 se muestra el diagrama de bandas de un semiconductor tipo p, en la superficie de contacto con el aislante. El potencial $\psi_p(x)$ está definido como la variación del nivel intrínseco de energía, debido al doblamiento de las bandas, respecto al nivel intrínseco sin polarización, y todo esto sobre la cantidad de carga, es decir, está dada por la relación:

$$\psi_p(x) \equiv -\frac{[E_i(x) - E_i(\infty)]}{q}$$

Por definición, si la banda está doblada hacia abajo el potencial será $\psi_p > 0$, pero si la banda está doblada hacia arriba entonces, el potencial será $\psi_p < 0$. Por otra parte, definiremos el potencial $\psi_p(x)$ en la superficie como $\psi_p(0) = \psi_s$. Además, con el potencial ψ_p podemos definir las densidades de portadores a lo largo del volumen del semiconductor. Para electrones y huecos, las densidades están dadas por las siguientes ecuaciones:

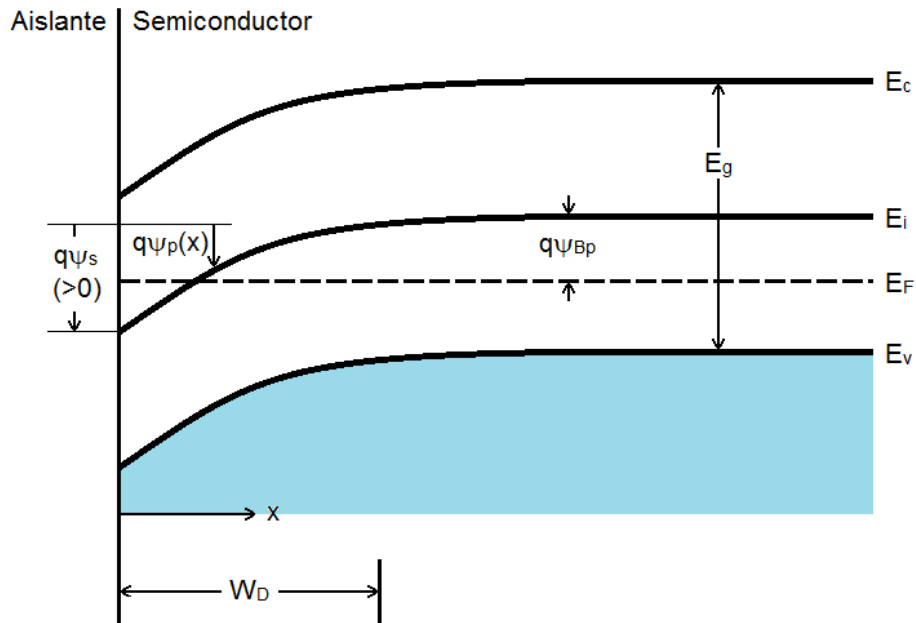


Figura 3.6 Diagrama de bandas para la superficie de un semiconductor tipo p.

$$n_p(x) = n_{p0} e^{\frac{q\psi_p}{kT}} = n_{p0} e^{\beta\psi_p}$$

$$p_p(x) = p_{p0} e^{\frac{-q\psi_p}{kT}} = p_{p0} e^{-\beta\psi_p}$$

donde n_{p0} y p_{p0} , son las densidades en equilibrio de electrones y huecos respectivamente. Con estas nuevas definiciones, podemos dar una descripción más cuantitativa y más detallada de los casos que pueden presentarse con la polarización de la estructura MIS definidos en la Figura 3.5, estos casos para el semiconductor tipo p serían:

- $\psi_s < 0$ Acumulación de huecos.
- $\psi_s = 0$ Condición para bandas planas.
- $\psi_{Bp} > \psi_s > 0$ Agotamiento de huecos por doblamiento hacia abajo.

$\Psi_s = \Psi_{Bp}$ Nivel de Fermi en la mitad del gap, es decir, $E_F = E_i(0)$,
 $n_p(0) = p_p(0) = n_i$

$2\Psi_{Bp} > \Psi_s > \Psi_{Bp}$ Caso de inversión débil.

$\Psi_s > 2\Psi_{Bp}$ Caso de inversión fuerte.

Ahora bien, para encontrar la carga superficial, que es el objetivo de esta parte, utilizaremos la ecuación de Poisson en una dimensión, para relacionar el potencial ψ_p con la densidad de carga espacial $\rho(x)$, esta relación está dada por:

$$\frac{d^2\psi_p}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_s}$$

La densidad de carga espacial $\rho(x)$ depende de la densidad de portadores n_p y p_p , los cuales, como ya vimos, depende del potencial ψ_p , por lo tanto tendremos una ecuación diferencial, que bajo ciertas condiciones, se puede llegar a encontrar el campo eléctrico E en función del potencial ψ_p , por la relación $E = -\frac{d\psi_p}{dx}$. Después del desarrollo matemático de la ecuación de Poisson, se obtiene la siguiente ecuación para el campo eléctrico E :

$$E(x) = \pm \frac{\sqrt{2}kT}{qL_D} F\left(\beta\psi_p, \frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right)$$

donde L_D es la longitud extrínseca de Debye para los huecos, y es igual a:

$$L_D = \sqrt{\frac{kT\epsilon_s}{p_{p0}q^2}} = \sqrt{\frac{\epsilon_s}{p_{p0}\beta^2}}$$

y también se abrevia

$$F\left(\beta\psi_p, \frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right) = \sqrt{(e^{-\beta\psi_p} + \beta\psi_p - 1) + \frac{n_{p0}}{p_{p0}}(e^{\beta\psi_p} - \beta\psi_p - 1)} \geq 0$$

Además, el signo \pm depende del signo de ψ_p , si $\psi_p > 0$ entonces el signo es positivo y si $\psi_p < 0$ entonces se usará el signo negativo. Entonces, como lo que realmente estamos buscando es el campo eléctrico en la superficie, solo tenemos

que sustituir el potencial ψ_p por el potencial superficial ψ_s , por lo tanto, el campo eléctrico superficial en el semiconductor E_s estaría dado por:

$$E(0) = E_s = \pm \frac{\sqrt{2}kT}{qL_D} F\left(\beta\psi_s, \frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right)$$

Por último, solo resta encontrar la cantidad de carga espacial que se acumula en la superficie, para lo cual, ya encontrado el campo eléctrico E_s , se puede deducir de la ley de Gauss:

$$Q_s = -\varepsilon_s E_s = \mp \frac{\sqrt{2}\varepsilon_s kT}{qL_D} F\left(\beta\psi_s, \frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right)$$

Estos efectos de acumulación, agotamiento o inversión de carga en la superficie de la estructura MIS, son los que generan el canal entre la compuerta y el drenaje de los dispositivos MOSFET, que es de gran importancia para el funcionamiento de este dispositivo, de ahí la relevancia de este tema en nuestro estudio.

3.2 PARÁMETROS DE IMPORTANCIA

Cuando se fabrica un transistor, existen parámetros que nos ayudan a definir si el dispositivo fabricado tiene un funcionamiento adecuado o para cuáles aplicaciones nos puede resultar útil. En los dispositivos MOSFET, los principales parámetros eléctricos son la movilidad de portadores, el voltaje umbral, las curvas de operación y el voltaje y la corriente de saturación.

Primero, la movilidad en un FET, depende en mayor medida del material, que del dispositivo, ya que se define como la velocidad de los portadores en el material en presencia de un campo eléctrico. Sin embargo, nos ayuda a determinar el comportamiento del dispositivo en frecuencia y en velocidad de respuesta, que son de los principales factores en los FETs.

Por otra parte, como ya hemos mencionando anteriormente, el MOSFET funciona con una estructura MIS como base, donde al ser generado un canal de portadores minoritarios, por la polarización de la base respecto al sustrato, puede haber conducción de portadores desde la fuente al drenaje. El concepto de voltaje umbral o V_T (Voltage Threshold) puede obtenerse de la explicación anterior, ya que V_T tiene que ver solamente con la estructura MIS en el MOSFET, y se define como el voltaje necesario en la fuente para tener una condición de inversión fuerte en la superficie del semiconductor, y así generar el canal en el MOSFET.

Por lo tanto, podemos deducir el voltaje de umbral usando solo los conceptos estudiados en el tema de la estructura MIS. Visto de una manera menos idealizada, el voltaje umbral debe ser la suma de tres potenciales individuales; el primero sería el voltaje de banda plana o V_{FB} (flat-band voltage), que es el voltaje utilizado para llegar a la condición de banda plana, como en la Figura 3.4, cuando la diferencia entre la función trabajo del metal y la función trabajo del semiconductor no es igual a cero; también habría que sumar el potencial de superficie ψ_s , y puesto que queremos la condición de inversión fuerte, éste debe ser $\psi_s=2\psi_B$, los cuales están definidos en la Figura 3.6; y por último, debemos sumar la caída de tensión en el aislante V_i , que puede ser definida por la cantidad de carga superficial y la capacitancia del material, en este caso de un óxido; por lo tanto, el voltaje umbral de nuestro MOSFET, queda definido por:

$$V_T = V_{FB} + \psi_s + V_i = V_{FB} + 2\psi_B + \frac{|Q_s|}{C_{ox}}$$

Además, se puede encontrar que la cantidad de carga superficial para la condición de inversión fuerte está dada por $|Q_s| = \sqrt{2\varepsilon_s q N_A (2\psi_B)}$, por lo tanto, el voltaje umbral quedaría como:

$$V_T = V_{FB} + 2\psi_B + \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A (2\psi_B)}}{C_{ox}}$$

Por otro lado, tenemos las curvas de operación, que tienen que ver con el funcionamiento global de la estructura MOSFET y generalmente, son la carta de

presentación de cualquier transistor que se fabrica. Para definir las, partimos de que ya existe un canal entre la fuente y el drenaje, debido a que se está aplicando un voltaje en la compuerta V_G , mayor que el voltaje umbral V_T , entonces las curvas de operación se obtienen de la relación que existe entre la corriente que pasa de la fuente al drenaje I_D con el voltaje aplicado al drenaje V_D , tal como se muestra en la Figura 3.2.

En la Figura 3.7, puede observarse el comportamiento de la corriente I_D respecto a V_D , para un voltaje de compuerta fijo V_G mayor V_T , de un MOSFET de enriquecimiento de canal n, este comportamiento se puede resumir en tres regiones y es análogo al comportamiento de los otros tres tipos de MOSFETs que ya definimos al inicio de esta sección:

- En la primera región, partimos de $V_D=0$, por lo tanto, el canal tendrá una anchura homogénea a lo largo de todo el canal, desde la fuente hasta el drenaje, actuando como una resistencia con un valor bajo, como se muestra en

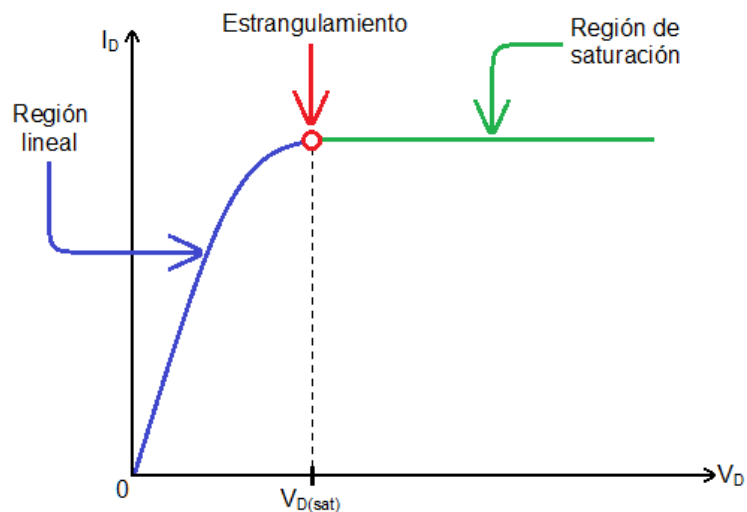


Figura 3.7 Curva de variación de la corriente del drenaje, respecto al voltaje drenaje-fuente.

el inciso a) de la Figura 3.8. Del mismo modo, si incrementamos un poco el valor de V_D , el canal permanecerá casi homogéneo, por lo cual, el incremento de la corriente I_D será proporcional con el incremento del voltaje V_D , generando la región lineal en la Figura 3.7.

- Posteriormente, mientras aumentamos V_D , aproximándonos al valor de V_G , la región de agotamiento, que está entre el canal y la región p del semiconductor, se ensanchará en la región más cercana al drenaje, ya que

la diferencia de voltaje entre la compuerta y el drenaje será casi cero, este ensanchamiento de la región de agotamiento produce una reducción del canal en la región cercana al drenaje. Esta reducción será cada vez mayor mientras más aumentamos V_D , hasta llegar al punto donde el ancho del canal en el drenaje será igual a cero, tal como se muestra en el inciso b) de la Figura 3.8, y en la gráfica de la Figura 3.7 está representado por el punto de estrangulamiento.

- Por último, después de llegar al estrangulamiento del canal, si continuamos aumentando V_D , la región de agotamiento seguirá ensanchándose en la región cercana al drenaje, por lo tanto, el punto donde el canal tiene una anchura igual a cero, llamado punto P en el inciso c) de la Figura 3.8, se alejará del drenaje. Este efecto de alejamiento del canal al drenaje, no afecta la corriente I_D , la cual

permanece casi constante desde el punto de estrangulamiento, debido a

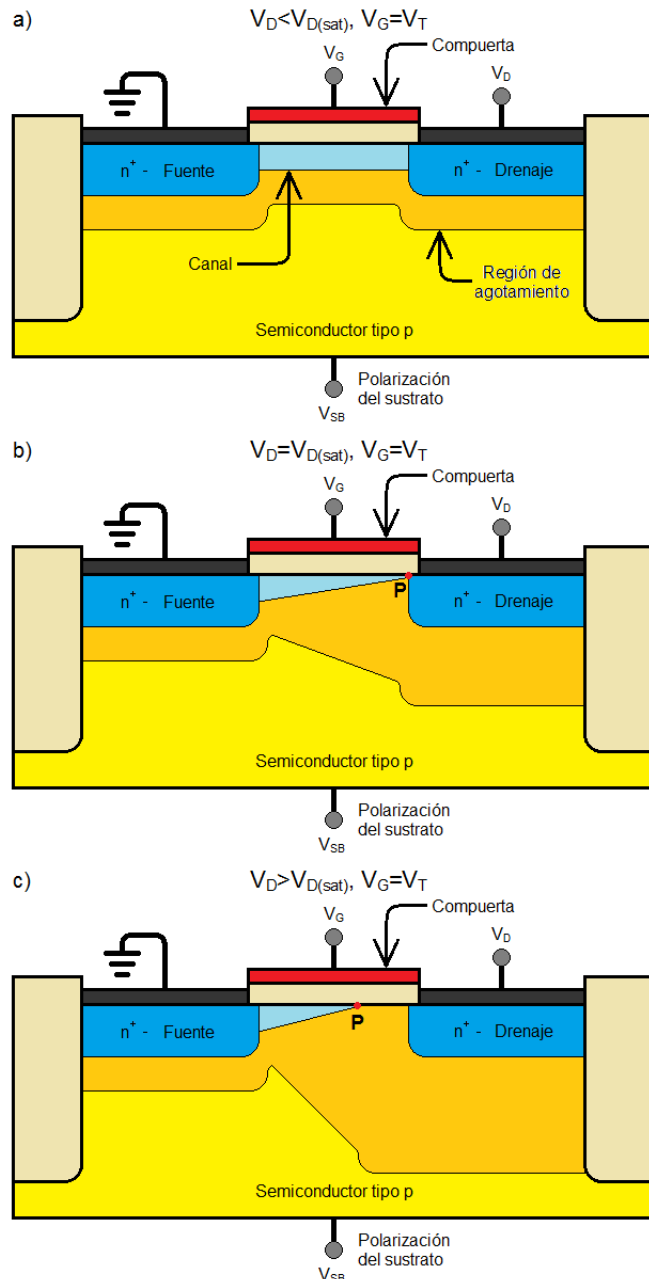


Figura 3.8 Diagramas del ancho del canal de MOSFET en las tres regiones de operación: a) lineal, b) punto de estrangulamiento y c) saturación.

esto, la pendiente es casi cero en la gráfica de la Figura 3.7; por el hecho de que la corriente I_D ya no aumenta, aunque siga aumentando el voltaje V_D , esta región es llamada, región de saturación.

Para obtener una ecuación que describa el comportamiento de la relación I_D - V_D que se explicó en la parte de arriba, debemos hacer un análisis cuantitativo. Del mismo modo, el análisis será para un canal tipo n, pero el desarrollo puede hacerse extensivo a los otros tipos de MOSFETs. Primero, partimos de la Ley de Ohm en el canal n, donde la corriente será constante a lo largo del canal e igual a I_D , no así el voltaje y la resistencia, entonces tenemos:

$$dV = I_D dR$$

Si el canal se forma a lo largo del eje x, con la altura definida en el eje y y profundidad en el eje z, entonces, el elemento dR se puede definir por:

$$dR = \rho(x) \frac{dx}{S}$$

donde la resistividad y el área transversal son variables que dependen del eje x, y están dadas por $\rho(x) = \frac{1}{q\mu_e n(x)}$ (donde μ_e y n es la movilidad de los electrones y la concentración de los electrones, respectivamente) y $S = zy(x)$. Entonces, sustituyendo estos valores en la Ley de Ohm, y despejando $I_D dx$ obtenemos

$$I_D dx = z\mu_e qn(x)y(x)dV$$

donde el producto $qn(x)y(x)$ es igual a la carga acumulada de inversión en el canal en la posición x, y lo definiremos como $Q_{inv}(x)$. Esta carga acumulada de inversión podemos encontrarla como la diferencia entre la carga de superficie en la posición x, $Q_s(x)$ y la carga en la región de agotamiento también en la posición x, $Q_{agot}(x)$ ambas por unidad de superficie.

La carga de superficie $Q_s(x)$, que ya ha sido mencionada, puede ser encontrada mediante la relación de la capacitancia del óxido y la caída de voltaje en el mismo, y se puede encontrar como $Q_s(x) = -C_{ox}(V_G - 2\psi_B - V(x))$. Por otra

parte, también se puede encontrar la relación para $Q_{agot}(x)$, la cual quedaría como $Q_{agot} = -\sqrt{2q\epsilon N_A[2\psi_B + V(x)]}$. Sustituyendo estos valores, e integrando ambos lados de la ecuación, podemos encontrar la relación que buscamos, I_D respecto a V_D :

$$I_D = \frac{z}{L} \mu_e \left\{ C_{ox} \left(V_G - V_{FB} - 2\psi_B - \frac{V_D}{2} \right) V_D - \frac{2}{3} \sqrt{2q\epsilon N_A} \left[\sqrt{(2\psi_B + V_D)^3} - \sqrt{(2\psi_B)^3} \right] \right\}$$

Como podemos ver, el comportamiento de la curva I_D - V_D también depende de V_G , por lo tanto, las curvas de operación son necesarias, por que relacionan estos tres parámetros de suma importancia en el MOSFET: I_D , V_D y V_G . Las curvas de operación se definen como la familia de curvas que se obtiene de graficar la relación I_D - V_D , tal como en la Figura 3.8, pero para diferentes valores fijos de V_G . Un ejemplo de estas curvas de operación, para un MOSFET de canal n, es el que se muestra en la Figura 3.9.

De las mismas curvas de operación, podemos obtener los parámetros restantes, el voltaje y la corriente de saturación, $V_{D(sat)}$ e $I_{D(sat)}$ respectivamente. Ambos parámetros, pueden deducirse de su propio nombre, $V_{D(sat)}$ es el voltaje en el que inicia la región de saturación, y para cualquier voltaje $V_D \geq V_{D(sat)}$ la corriente I_D permanecerá constante, y es llamada corriente de saturación, $I_{D(sat)}$. En la Figura 3.9, también se muestra la curva de $I_{D(sat)}$ - $V_{D(sat)}$; cabe señalar, que para cada valor de V_G , existe un voltaje y una corriente de saturación, como se observa también en la gráfica.

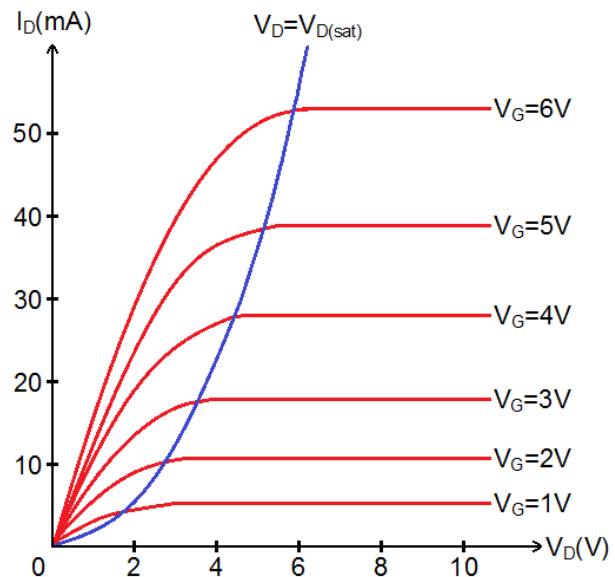


Figura 3.9 Ejemplos de curvas de operación de un transistor MOSFET de canal n en color rojo y su curva de voltaje de saturación en color azul.

Para terminar esta sección, mencionaremos algunos casos particulares de la ecuación de I_D que son utilizados regularmente. Para la región lineal, tenemos:

$$I_D = \frac{Z}{L} \mu_n C_{ox} (V_G - V_T - \frac{V_D}{2}) V_D$$

y para los últimos parámetros mencionados $V_{D(sat)}$ e $I_{D(sat)}$ también existe una manera de obtenerlos analíticamente:

$$V_{D(sat)} = V_G - V_{FB} - 2\psi_B + K^2 \left[1 - \sqrt{1 + \frac{2(V_G - V_{FB})}{K^2}} \right]$$

donde $K \equiv \frac{\sqrt{\epsilon_s q N_A}}{C_{ox}}$; por otro lado:

$$I_{D(sat)} = \frac{Z}{2BL} \mu_n C_{ox} (V_G - V_T)^2$$

donde $B \equiv 1 + \frac{K}{2\sqrt{\psi_B}}$, y corresponde a una función de la concentración de dopaje y del grosor del óxido, el cual no siempre es conocido y se toma como la unidad.

Además, esta relación es importante, ya que define un comportamiento lineal entre $I_{D(sat)}^{1/2} - V_G$, de donde se desprende que para $I_{D(sat)}=0$, $V_G=V_T$, lo que nos permite conocer experimentalmente V_T . A su vez, comparando la relación $I_{D(sat)}^{1/2} - V_G$ con la forma de la recta $y=mx+b$, puede deducirse, que $m = \sqrt{\frac{Z\mu_n C_{ox}}{2BL}}$, lo que nos permite conocer μ_n de la siguiente relación:

$$\mu_n = \frac{2BLm^2}{ZC_{ox}}$$

Por último, también existe una ecuación para el caso muy particular de $V_{D(sat)}$ donde el óxido es muy delgado y existe una concentración de dopaje muy baja [9] [10] [11] [12]:

$$V_{D(sat)} = \frac{V_G - V_T}{B}$$

CAPÍTULO 4 LITOGRAFÍA SIN MÁSCARA

El proceso de litografía es una secuencia de pasos muy usados en la fabricación de dispositivos electrónicos, el objetivo es trazar un patrón en el material, que queda cubierto y protegido por una resina. El propósito del proceso litográfico es atacar y remover solo algunas áreas del material, implantar iones en lugares específicos, añadir una capa de algún otro material en algunas secciones de la oblea, o como en nuestro trabajo, definir el área de los contactos de la fuente y drenaje en los dispositivos fabricados.

Actualmente, el proceso litográfico, o fotolitográfico, como también es conocido, es tan usado en la fabricación de dispositivos, que consume el 60% del tiempo y el 40% de costo de fabricación de los dispositivos electrónicos. Además, para la fabricación de una sola oblea con circuitos CMOS, se puede repetir hasta 50 veces el proceso litográfico. Es tan importante, que prácticamente, el tamaño de los dispositivos depende de la tecnología con que se cuenta para realizar el proceso de litografía.

Los pasos que generalmente se siguen en un proceso litográfico son:

1. Limpieza de la superficie del material.
2. Depósito de la resina fotosensible sobre la superficie, generalmente por spin coater.
3. Horneado del material para deshidratar la resina fotosensible y que ésta quede como una película sólida.
4. Exposición de la película con el patrón deseado, usando luz ultravioleta.
5. Removido de la película expuesta, si se usó una resina fotosensible positiva, o removido de la resina fotosensible no expuesta, si ésta era negativa; lo que permite descubrir solo algunas áreas del sustrato. Para realizar este paso, se usa una solución química apropiada llamada revelador.

6. Tratamiento de la parte descubierta del sustrato, ya sea ataque del material, implantación de iones o añadir un nuevo material que queremos que solo quede depositado en las áreas descubiertas.
7. Por último, se remueve la resina fotosensible que protegió el sustrato con otra solución química llamada eliminador.

Antes de continuar, explicaré la diferencia entre resina fotosensible positiva y negativa mencionada en el paso 5, para entender esto, diremos que, la resina fotosensible positiva está formada por cadenas largas de moléculas orgánicas; la luz ultravioleta, rompe estas cadenas, formando cadenas más cortas, lo que permite al revelador eliminarlas del sustrato, dejando solo las cadenas largas de las áreas no expuestas. El caso contrario es el de la resina fotosensible negativa, donde la luz induce que cadenas cortas se unan entre sí, formando cadenas de moléculas más largas, lo que permite que el revelador disuelva solo las cadenas cortas donde no hubo exposición a la luz. Para finalizar, un resumen gráfico de los pasos puede verse en la Figura 4.1.

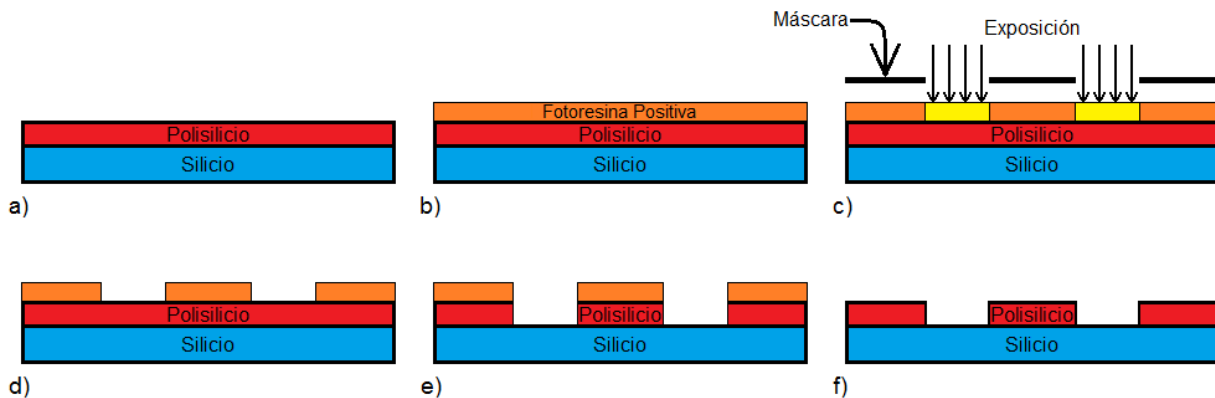


Figura 4.1 Pasos del proceso de litografía con máscara.

4.1 TIPOS DE LITOGRAFÍA

A pesar de que el proceso de litografía consiste en varios pasos, como se explicó anteriormente, la clasificación de estos procesos se hace por la manera de efectuar solo uno de ellos, la exposición. El proceso de exposición consiste en

grabar un patrón con resina fotosensible sobre el sustrato, el cual, posteriormente, será el que delimite qué área del sustrato será modificada, de aquí su importancia.

Existe una manera sencilla de clasificar el proceso de exposición, ésta sería, con o sin máscara. En la litografía con máscara, se utiliza una plantilla, o máscara, con áreas opacas y áreas transparentes, dependiendo del patrón que se quiera grabar con la resina fotosensible, la plantilla es colocada entre la resina fotosensible y una fuente de luz, la cual protege, solo en las partes deseadas, a la resina fotosensible de la exposición de la fuente de luz, un ejemplo de este método es el que se muestra en la Figura 4.1. Por el contrario, en la litografía sin máscara, no se utiliza ninguna plantilla entre la resina y la fuente de exposición, se utilizan diferentes técnicas para dirigir la fuente solo a las partes deseadas de la resina fotosensible.

Otra clasificación de los procesos de litografía es mediante la naturaleza de la fuente de exposición, entre las cuales se encuentran, desde fuentes de luz que van del visible a los rayos X, hasta exposición de electrones o de iones. Una breve descripción de cada tipo de litografía sería la siguiente:

- Fotolitografía (óptica, UV o EUV): Su nombre proviene de que se usan fuentes de luz para exponer la resina fotosensible. La fotolitografía óptica, UV y EUV, utilizan fuentes de luz visible, de luz ultravioleta y de luz ultravioleta extrema, respectivamente. Es de los procesos de litografía más económicos, se usa principalmente con máscaras, pero también es posible usarlo sin máscaras, usando interferencia de haces, exponiendo punto por punto usando un láser, o pantallas difractoras para generar distintos patrones. Entre las desventajas de este tipo es la difracción de la luz, y mientras mayor es la longitud de onda de la fuente, el proceso resulta más afectado, es por eso que se busca realizar la fotolitografía con las longitudes de onda más pequeñas que se encuentren.
- Litografía por rayos X: Este tipo de litografía tiene prácticamente las mismas ventajas que la fotolitografía, en lo que no tiene parecido, es en las desventajas, principalmente porque en este tipo de litografía la difracción es

casi nula, ya que la longitud de onda de los rayos X es muy corta. Además, en el proceso se utilizan materiales y componentes muy diferentes a los utilizados en la fotolitografía, es por eso que se clasifican aparte. Del mismo modo se puede usar con máscara o sin máscara, usando interferencia de rayos X.

- Litografía por haz de electrones: Éste es un proceso de litografía sin máscara, debido a que se realiza incidiendo un haz de electrones sobre la resina fotosensible. Se puede decir que el patrón es trazado en la resina fotosensible punto por punto, es por eso que tiene una resolución muy alta, pero el proceso es demasiado lento como para usarse en una producción de volumen muy alto. La gran ventaja de este proceso es que la difracción de los electrones es despreciable, y que se puede enfocar fácilmente el haz de electrones en cualquier punto de la resina con un campo magnético o electrostático.
- Litografía por haz de iones: Es un proceso muy parecido al anterior, solamente que en éste, se utiliza un haz de iones que impacta directamente sobre el material; generalmente se usan iones de Hidrógeno H^+ , por ser los iones de menor peso y pueden penetrar una gran distancia en el material, pero también son muy usados los iones de Galio Ga^+ , ya que se han desarrollado fuentes de estos iones que tienen una densidad de flujo muy alta. Los iones, al ser partículas como los electrones, tienen difracción despreciable, pero a diferencia de los electrones, poseen mucha mayor masa, por lo tanto tienen mucha mayor energía y provocan cambios tanto físicos, como químicos en la región del material donde impactan, y estos cambios son los que son aprovechados para modificar el material solo en las áreas deseadas, así es como se realiza este tipo de litografía.

Por último, cabe señalar que en nuestro trabajo, usaremos un proceso de fotolitografía óptica sin máscaras, y los patrones que serán expuestos, se obtendrán usando un montaje óptico que combina una pantalla difractora e interferencia de haces [10] [13] [14] [15].

4.2 INTERFERENCIA DE HACES A PARTIR DE UNA PANTALLA DIFRACTORA

Uno de los objetivos de este trabajo, es diseñar e implementar un sistema para realizar el proceso de litografía sin máscara. Para lograr nuestro objetivo se implementó un sistema óptico $4f$, que con el uso de un modulador espacial de luz, genera dos o más haces de luz con perfil Bessel, y se hacen interferir para obtener un patrón periódico, el cual se expone en la resina fotosensible.

La definición de un haz Bessel puede encontrarse a través de la ecuación de Helmholtz. La ecuación de Helmholtz en el espacio libre tiene un conjunto de soluciones que poseen propagación invariante. Estas soluciones tienen amplitudes del campo eléctrico proporcionales a funciones Bessel. El haz Bessel consiste en una cantidad de órdenes infinita; el haz de orden cero tiene un brillo máximo central, mientras que los haces de órdenes más altos tienen un núcleo central oscuro los cuales se propagan en el espacio libre sin ningún tipo de difusión debido a la difracción, por eso son llamados adifraccionales.

El comportamiento adifraccional de los haces Bessel es la razón principal de su elección, debido a que permite tener un sistema más robusto, ya que en un sistema interferométrico convencional, la distancia donde se genera el patrón de interferencia es crítica, en cambio, en la interferencia de haces adifraccionales, existe un rango amplio donde se puede obtener este patrón. Un ejemplo de un haz de perfil Bessel es el que se muestra en la Figura 4.2.

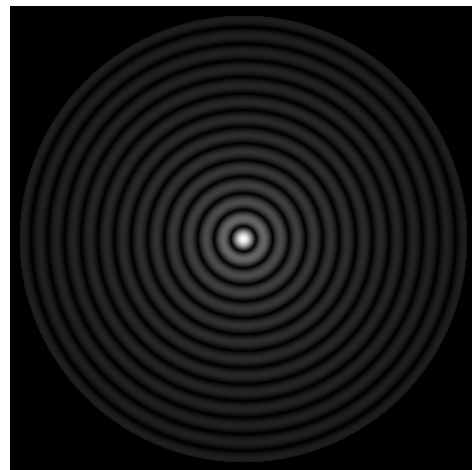


Figura 4.2 Perfil de un haz Bessel.

En nuestro caso, la generación de estos haces Bessel es realizada a partir de hologramas generados por computadora, o CGHs (Computer-Generated

Holographic), por sus siglas en inglés, que emplean un código holográfico con la capacidad de sintetizar campos escalares complejos.

Los CGHs son implementados en moduladores espaciales de luz, o SLM (Spatial Light Modulator) por sus siglas en inglés, en modo de fase. Estos moduladores de fase están compuestos por una matriz de píxeles, los cuales despliegan el holograma y modifican la fase del campo escalar complejo de luz. Sin embargo, los moduladores no son completamente ideales y siempre tiene asociada una modulación de amplitud respecto a la fase, la cual no puede eliminarse, por eso en ocasiones son llamados moduladores mayormente de fase; por otro lado, los píxeles no son continuos entre sí, lo que altera el campo de luz deseado; todo esto y otros factores perjudican el campo complejo que se requiere, este conjunto de errores es llamado error de modulación.

Para generar nuestros hologramas, nos basamos en el código holográfico propuesto por Davis [16] para sintetizar campos complejos arbitrarios usando un modulador de luz solo de fase. Para entenderlo, definimos primero la transmitancia compleja que queremos obtener como

$$c(x, y) = |c(x, y)|e^{i\phi(x, y)}$$

donde el módulo de la función $c(x, y)$ tiene la restricción de $0 \leq |c(x, y)| \leq 1$.

Del mismo modo, la transmitancia de fase del CGH que codificará la función compleja $c(x, y)$ está dada por

$$h(x, y) = e^{iM(x, y)\phi(x, y)}$$

en esta función, $M(x, y)$ es el factor de atenuación de fase y tiene su dominio en $0 \leq M(x, y) \leq 1$. Se puede ver que hay una relación implícita en la función de fase del CGH, está sería $h(x, y) = c(x, y) + e(x, y)$, donde $e(x, y)$ representa el error de modulación del CGH.

A partir de aquí, por simplicidad, omitiremos mencionar las variables (x,y) . Se derivan los términos $M(x,y)$ y $e(x,y)$, y podemos expresar la función h como una serie de Fourier infinita

$$h = e^{iM\phi} = \sum_{q=-\infty}^{\infty} a_q e^{iq\phi}$$

donde la fase ϕ está limitada en el dominio $[-\pi, \pi]$. Entonces, los coeficientes de Fourier se obtienen por

$$a_q = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{iM\phi} e^{-iq\phi} d\phi = \text{sinc}(q - M)$$

donde se usa la definición de $\text{sinc}(w) = \text{sen}(\pi w) / \pi w$. Ahora, calculando M como la solución de la ecuación transcendental obtenemos

$$|c| = \text{sinc}[1 - M]$$

Por lo tanto, la modulación de fase del CGH puede ser expresado como

$$h = c + e$$

donde c es la modulación compleja codificada y e es el error de modulación, y está definido por

$$e = \sum_{q \neq 1} a_q e^{iq\phi}$$

Dicho de otra manera, para este código se requiere un aislamiento de la señal deseada c de la señal de ruido e .

Para nuestro sistema, no tenemos un modulador solo de fase, por lo tanto, el código fue generalizado, por V. Arrizón y L. A. González [17], para un modulador mayormente de fase, es decir, donde la amplitud no es constante y varía en función de la modulación de fase, con el fin de implementar el CGH en un SLM comercial. Para este caso, la relación entre la modulación de fase y la modulación

de amplitud está definida por la “curva de modulación SLM”. Para este nuevo código, la transmitancia del CGH que codificará la función c , estará dada por

$$h' = a(M\phi)e^{iM\phi}$$

donde puede verse que $a(M\phi)$ es la amplitud de la función, y en este caso, no es constante y depende de $M\phi$, al igual que la fase de la función. El conjunto de valores complejos posibles para h' se encuentran en la curva de modulación SLM. Además, la amplitud de h' debe estar normalizada, por lo tanto estará sujeta a $|h'|_{min} \leq |h'| \leq 1$. También, el nuevo dominio para M está dado por $[0, M_{max}]$, donde $M_{max} < 1$, mientras que ϕ mantiene el dominio original. Por lo tanto, el dominio de la fase de h' , está dado por $[-M_{max}\pi, M_{max}\pi]$.

Siguiendo un desarrollo parecido al anterior, podemos expresar h' por medio de una serie de Fourier, y quedaría

$$h' = a_1 a(M\phi)e^{i\phi} + a(M\phi) \sum_{q \neq 1} a_q e^{iq\phi}$$

Si definimos la condición que $a_1 a(M\phi) = |c|$, entonces el término de orden 1 de la serie corresponde a la señal compleja $c = |c|e^{i\phi}$. Sin embargo, como $a(M\phi) \leq 1$ y $a_1 \leq \text{sinc}(1 - M_{max}) < 1$, entonces para valores de c cercanos a 1, esta condición no puede cumplirse, para resolver esto, se adopta una nueva restricción para M

$$\text{sinc}(1 - M)a(M\phi) = c_0 |c|$$

donde obtenemos una constante c_0 más pequeña que 1. Por lo tanto, se obtiene la nueva relación $h' = c_0 c + e$, donde el error de modulación e , estará dado por la suma de todos los órdenes, excepto el orden 1. Si se obtiene el valor máximo de c_0 que satisfaga la restricción de M , se alcanza la máxima eficiencia del CGH. En este caso el valor de c_0 debe ser el valor mínimo de dos constantes definidas por $b_1 = \min\{a(M\phi)\}$ y $b_2 = \text{sinc}(1 - M_{max})$.

Como puede verse, la función del código holográfico utilizado es concentrar el campo complejo a reconstruir en un solo orden de la serie de Fourier, mientras que el error de modulación se concentra en el resto de los órdenes. Para aislar el campo complejo deseado del error de modulación, se le incluye una función portadora al CGH; esto nos ayuda a separar los órdenes en el espacio de Fourier, los cuales se pueden filtrar para obtener solo el campo complejo que queremos. Pero además, la selección apropiada de la función portadora nos ayuda a generar múltiples haces que son interferidos en el plano de reconstrucción de salida para producir patrones luminosos periódicos, sin la necesidad de montar un sistema de interferencia, tal como se muestra en la Figura 4.3.

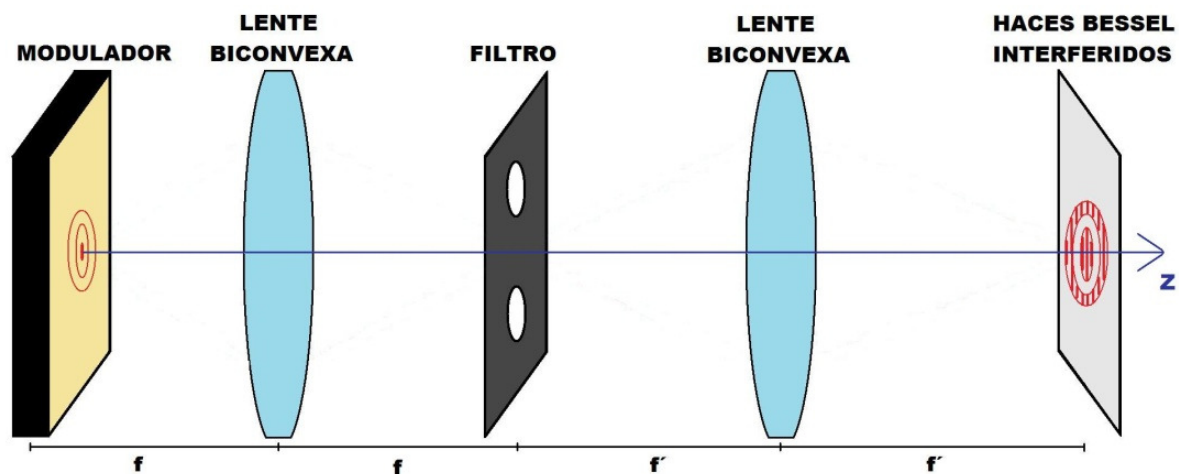


Figura 4.3 Sistema $4f$ empleado para obtener patrón de interferencia.

Por otra parte, se requiere de una serie de elementos ópticos para obtener un funcionamiento adecuado en el sistema óptico. El montaje óptico completo que se diseñó para generar los patrones de exposición, se muestra en la Figura 4.4, así como una fotografía del sistema que se armó en el laboratorio.

En el diagrama, se tiene como fuente de luz un láser, en nuestro caso se usó un láser sintonizable de iones de Argón, y fue sintonizado a una longitud de onda de 454nm; el primer componente en el camino del haz es un objetivo de microscopio, que se utiliza para limpiar el haz; posteriormente una lente colimadora, y después dos polarizadores, uno antes y otro después del SLM,

actuando como polarizador y como analizador, respectivamente; el modelo de SLM que usamos es el LC2002, un modulador configurado como de fase.

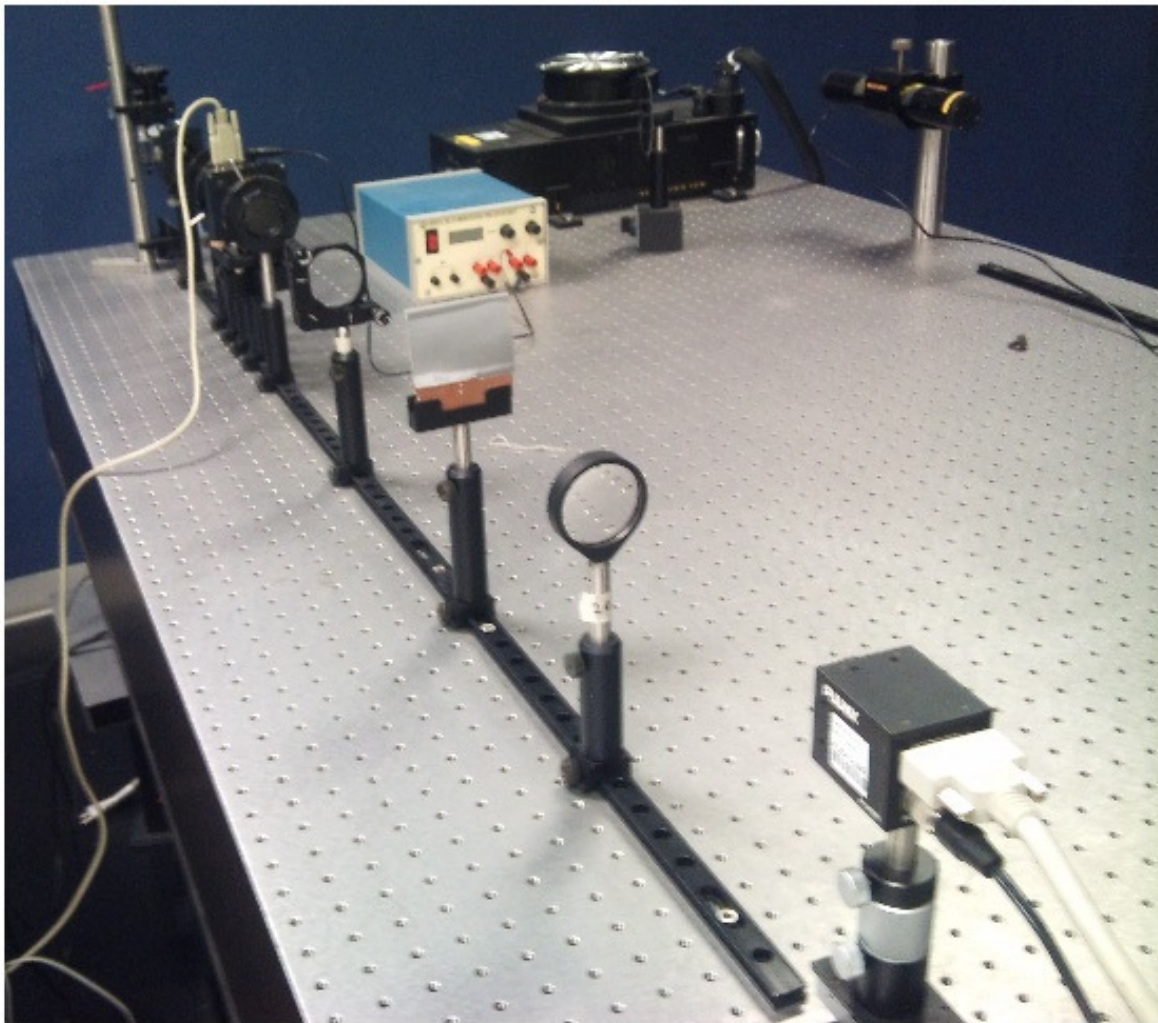
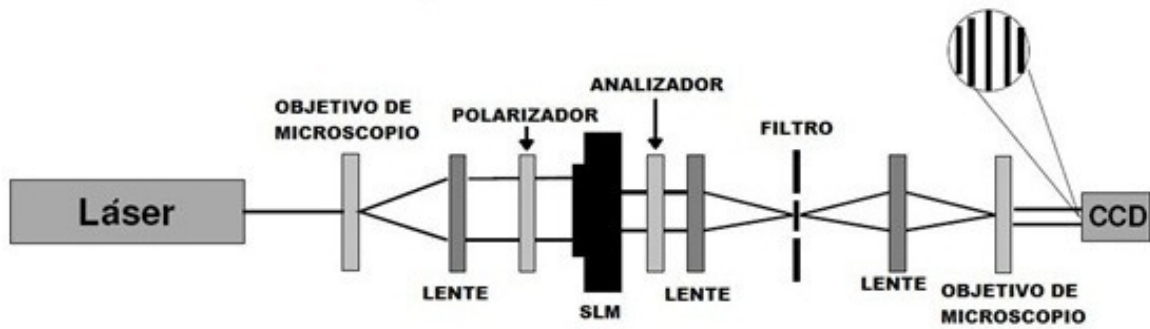


Figura 4.4 Diagrama de montaje óptico completo con fotografía tomada en el laboratorio.

En la última parte del diseño se tiene una lente para mover el campo al espacio de frecuencia, un filtro para dejar pasar solo el primer orden del patrón de difracción de Fourier, y posteriormente otra lente, para recuperar el campo complejo con los haces Bessel y hacerlos interferir, los resultados de esta interferencia fueron tomados por una cámara CCD acoplada a un objetivo de microscopio para amplificar el patrón y confirmar que existía dicha interferencia.

Con el código holográfico definido y la implementación del sistema óptico, se generaron en

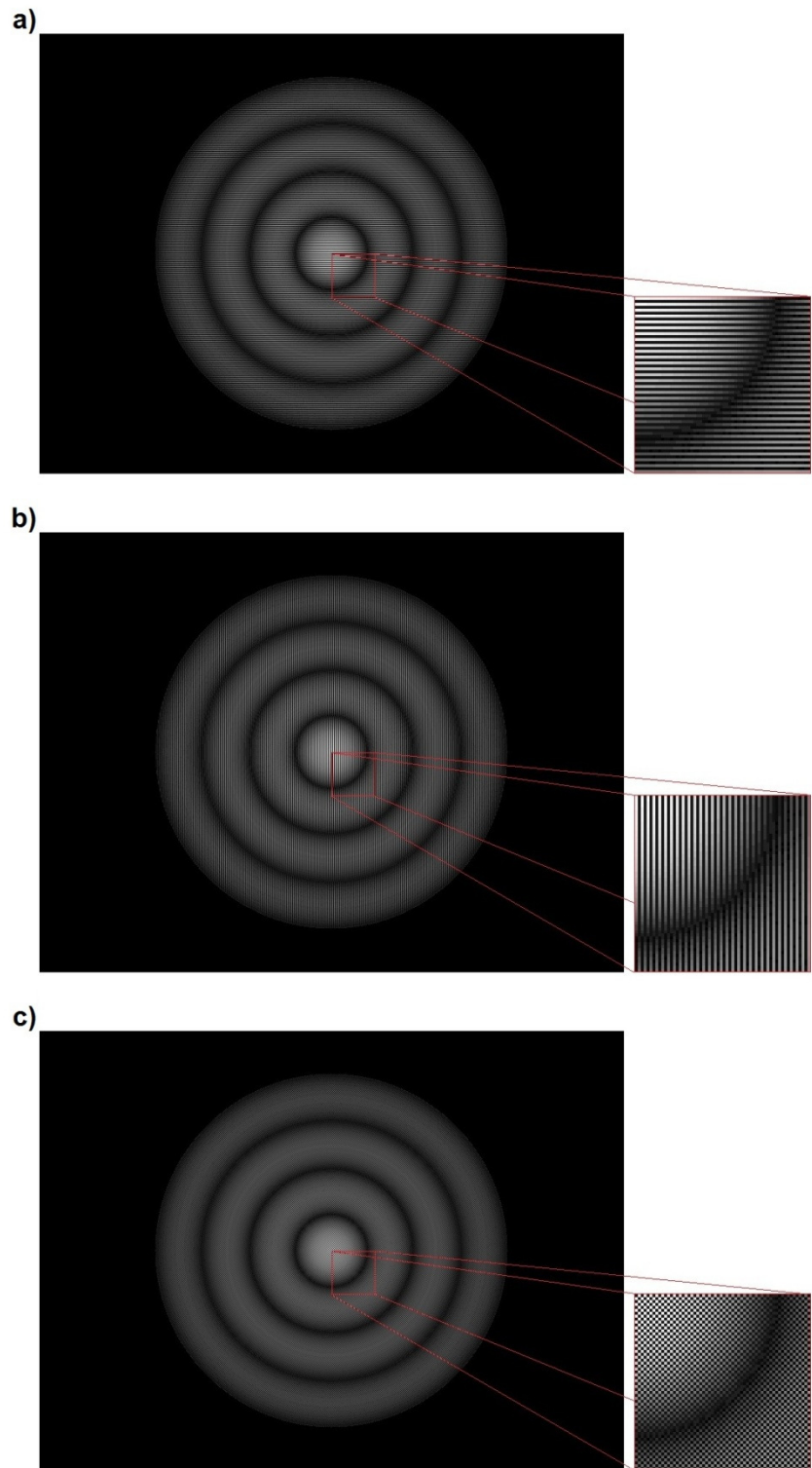
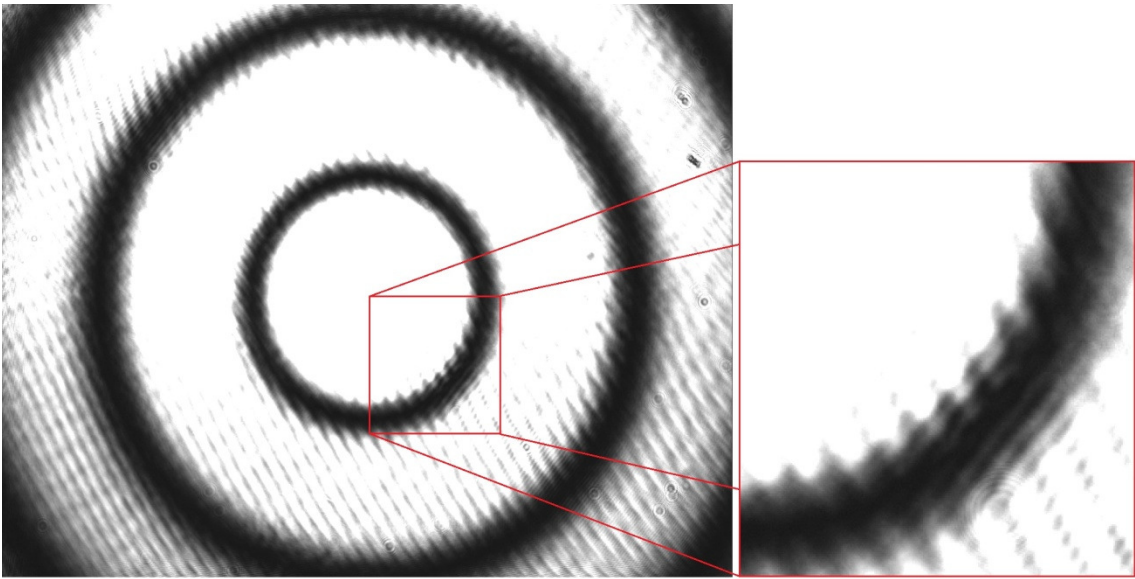
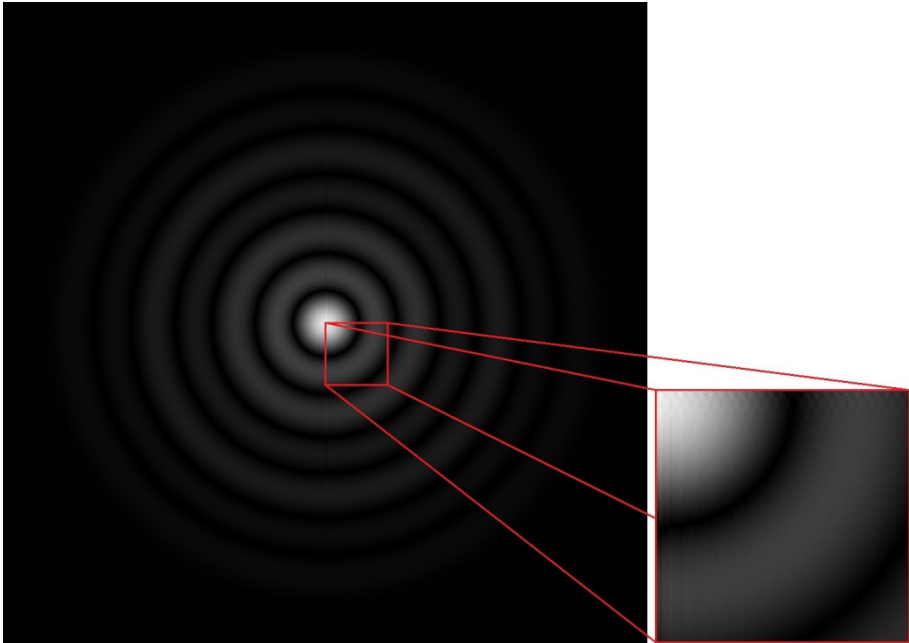


Figura 4.5 Hologramas generados por computadora con diferentes funciones portadoras: a) portadora horizontal, b) portadora vertical y c) portadora cuadrada.

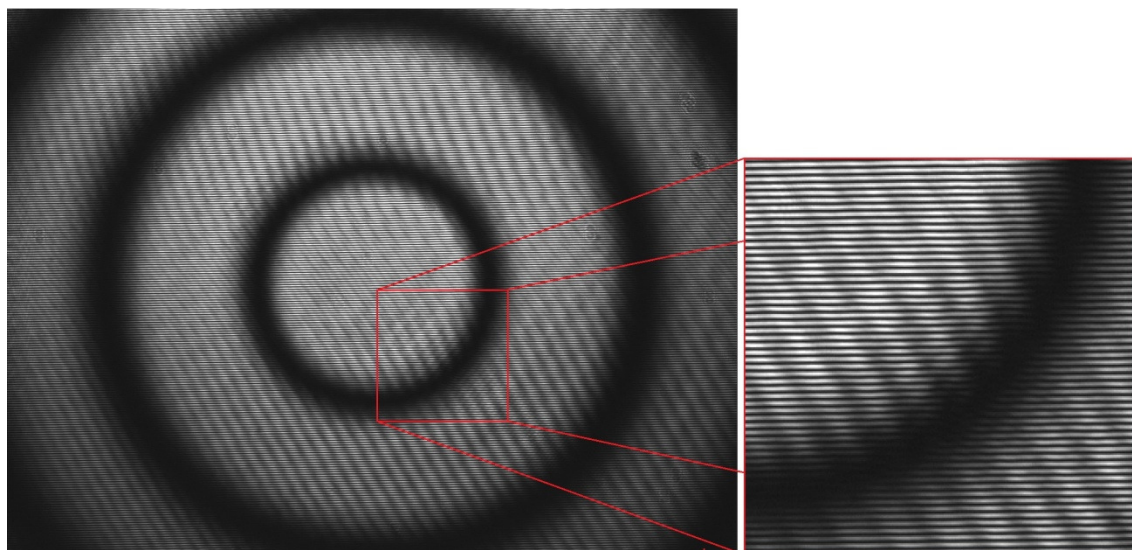
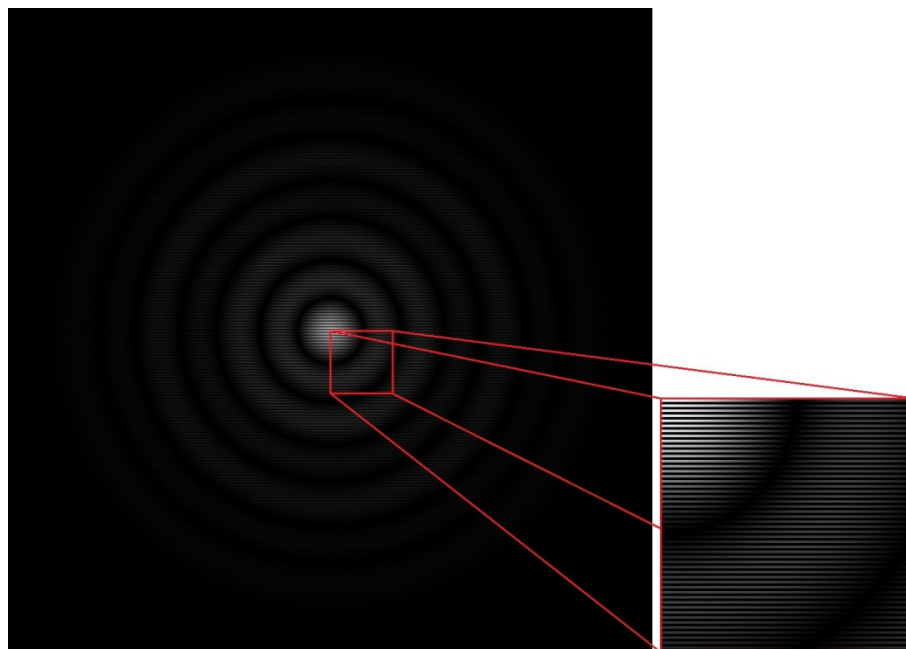
MATLAB los CGHs que se muestran en las Figura 4.5. Cada uno de los tres CGHs tiene como base el mismo holograma, la diferencia entre ellos es la función portadora que se le agregó a cada uno; el CGH en el inciso a) tiene una función portadora binaria horizontal; el holograma del inciso b) tiene una función portadora binaria vertical; y por último, al CGH del inciso c) se le agregó una función portadora binaria cuadrada. Además, en el programa MATLAB, también escribimos un código para generar las simulaciones de los patrones de interferencia que esperamos obtener en el montaje del sistema en el laboratorio.

Después de obtener los hologramas, el siguiente paso es desplegarlos en el SLM y observar los resultados en la cámara CCD. Las imágenes obtenidas por la cámara fueron comparadas con las simulaciones obtenidas en MATLAB y en las siguientes figuras se muestran ambos resultados:

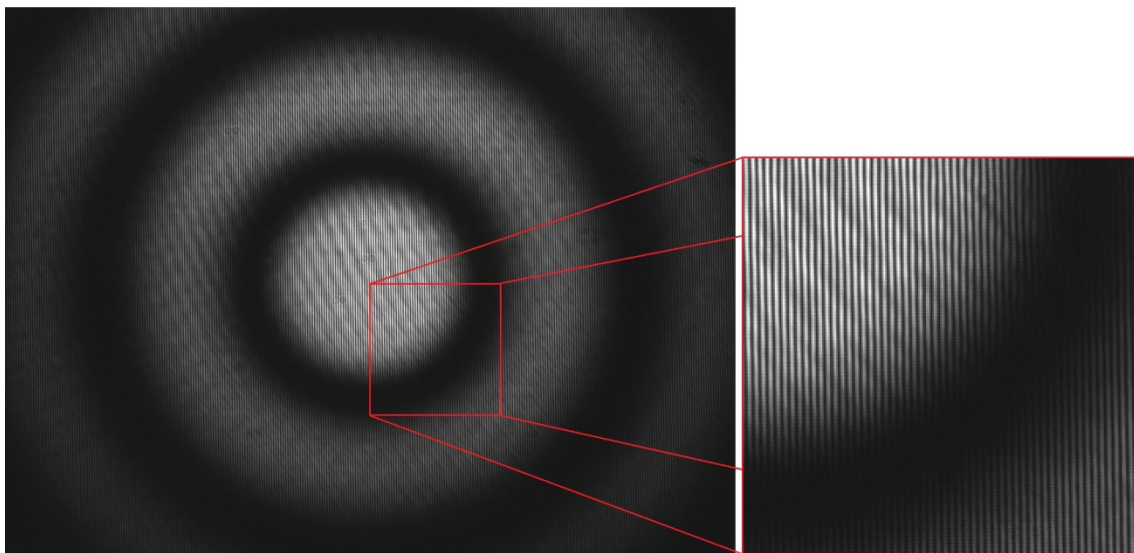
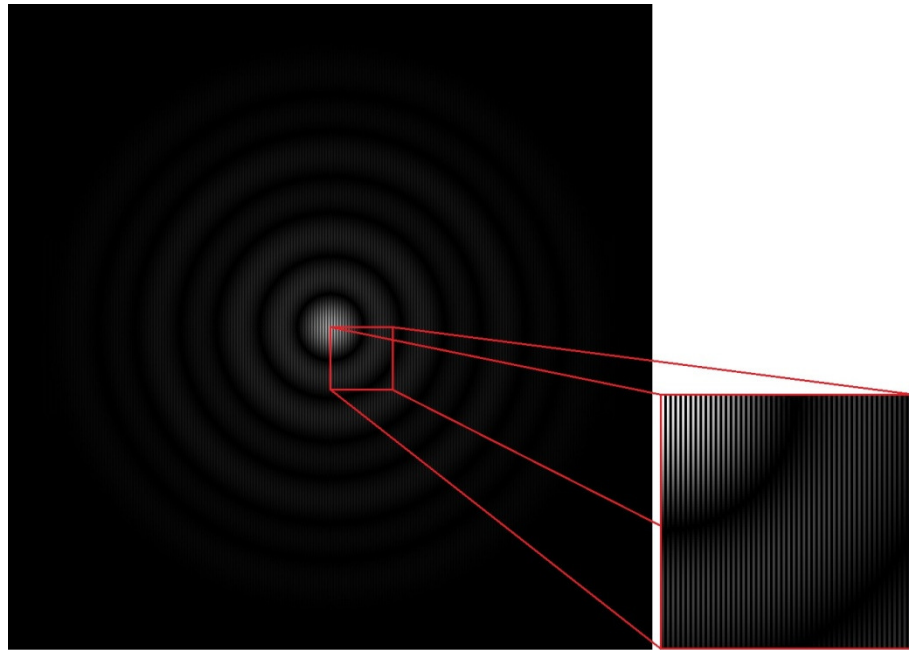
1. Simulación de MATLAB y resultado experimental de un haz Bessel sin interferir, obtenido de filtrar un solo haz.



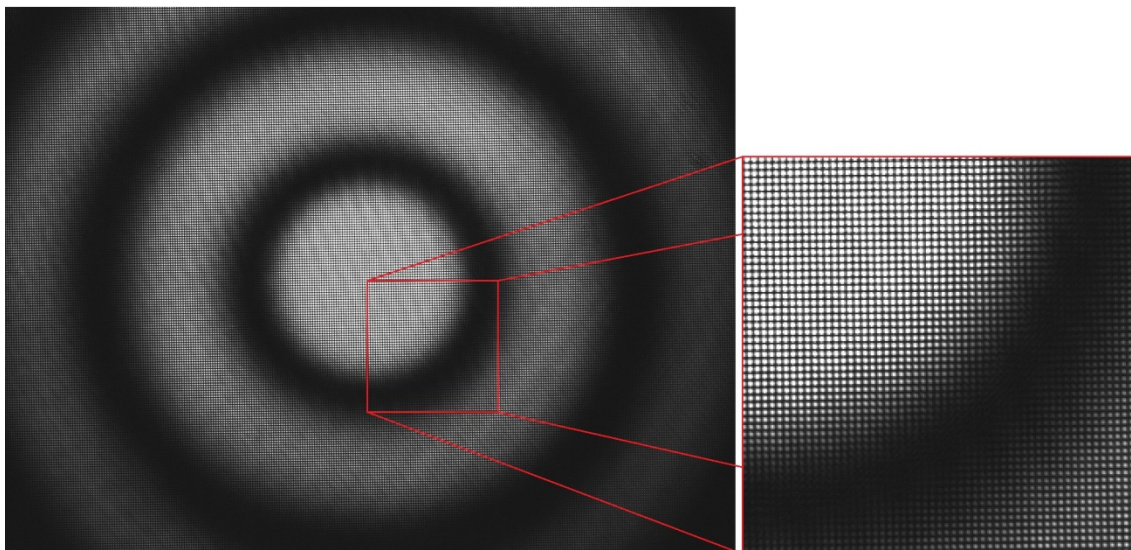
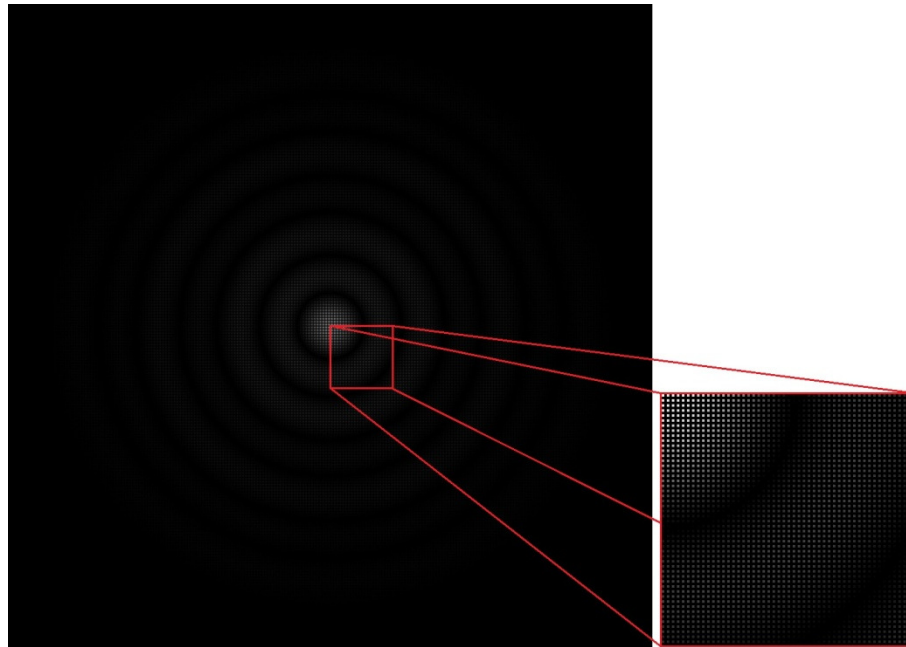
2. Simulación en MATLAB y resultado experimental de la interferencia de dos haces Bessel, usando una función portadora binaria horizontal.



3. Simulación en MATLAB y resultado experimental de la interferencia de dos haces Bessel, usando una función portadora binaria vertical.



4. Simulación en MATLAB y resultado experimental de la interferencia de cuatro haces Bessel, usando una función portadora binaria cuadrada.



Como puede verse en las imágenes, el sistema óptico que diseñamos, genera el patrón de interferencia que se esperaba. Usando uno o la combinación de los patrones generados, se puede delimitar el tamaño y la forma que tendrán los contactos metálicos en los FETs fabricados.

CAPÍTULO 5 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Uno de los objetivos de este trabajo es presentar el desempeño de transistores de películas delgadas, las cuales fueron hechas mediante la técnica de CBD, para esto, se fabricaron una cantidad considerable de películas delgadas sobre diferentes sustratos. Además, se realizaron diversas combinaciones de los reactivos con el fin de encontrar la mejor formulación y el mejor procedimiento para obtener películas semiconductoras, que operaran activamente en el esquema de transistores.

El otro objetivo fue emplear contactos en los FETs, cuya área fuera delimitada con el método de litográfica sin mascarar que se presentó en el capítulo anterior. Sin embargo, los contactos se delimitaron con un sistema de litografía con máscaras en la Universidad de Texas en Dallas, ya que a pesar de que generamos los patrones necesarios para nuestro propósito, no fue posible encontrar una resina fotosensible, que funcionara adecuadamente con la longitud de onda de nuestro sistema.

En la primera parte de los resultados, se definen las formulaciones que se usaron para fabricar las películas delgadas. Además, las pruebas de transmitancia que se realizaron a las muestras en sustrato de vidrio, con el fin de obtener el gap de energía.

Posteriormente, se presentan los diferentes resultados de caracterización, específicos del material que conforman las películas fabricadas. También se presenta un estudio de difusión de plomo en películas de CdS, con el propósito de encontrar una película delgada que actúe como semiconductor ambipolar en un transistor. Finalmente, se presentan los resultados del desempeño eléctrico en la forma de transistores de efecto de campo, con las películas que fabricamos a lo largo de este trabajo.

5.1 FABRICACIÓN DE PELÍCULAS DELGADAS DE CdS Y SU CARACTERIZACIÓN.

Las primeras películas de CdS fabricadas por el método de CBD se llevaron a cabo tomando en consideración la formulación reportada en [18], las cuales fueron depositadas sobre sustratos de vidrio y SiO₂ de 100nm sobre Si. Así mismo, a partir de la formulación preliminar, se hicieron modificaciones a algunos parámetros como tiempo y temperatura de depósito, concentración molar de reactivos, entre otros, con el fin de obtener películas delgadas de CdS mediante una formulación totalmente libre de amonio.

Las pruebas de transmitancia óptica se realizaron solo a las muestras con sustrato de vidrio, y a partir de estos resultados, se obtuvo el gap de energía para las diferentes películas de CdS que fabricamos. Por otro lado, se consideró una muestra representativa para realizar la caracterización morfológica y estructural de las películas semiconductores depositada sobre SiO₂/Si.

5.1.1 Formulaciones para películas de CdS

Como ya se mencionó en el capítulo 1 de este trabajo, la fabricación de películas delgadas se lleva a cabo mediante la mezcla de diferentes reactivos en una solución acuosa, donde cada reactivo, cumple con un objetivo particular dentro del proceso de formación de las películas delgadas. Dentro de la solución se coloca el sustrato donde se depositará la película y posteriormente, se coloca la solución al baño maría, para mantenerla a una temperatura constante, durante un tiempo definido.

En este proyecto, para la fabricación de películas de CdS partimos de una formulación base, la cual consiste en lo siguiente: mezclar, en un vaso de precipitado de 100ml, los siguientes reactivos: 31ml de H₂O desionizada, 4ml de Cd(NO₃)₂·4H₂O 0.1M, 5ml de glicina 0.1M, 2ml de buffer NH₄Cl/NH₄OH pH11, 5ml de Tiourea 1M y por último, 13ml de H₂O desionizada (c.b.p. 60ml). Posteriormente se colocó la solución a una temperatura aproximada de 75°C,

durante 30 minutos. Las películas fabricadas presentaron las mismas características que las reportadas en la referencia [18], donde la glicina es el agente complejante empleado. Con el objetivo de conocer el efecto que producía la variación de molaridad de la solución de glicina en la formación de las películas de CdS, realizamos un primer estudio donde se fabricaron varias muestras considerando como variables a modificar en la formulación preliminar:

- Molaridades de glicina: 0.1M, 0.5M, 1M, 1.5M y 2M.
- Sustrato: Vidrio
- Temperaturas: 60°C y 75°C.
- Tiempo de baño: 30min.

El resultado de dicha prueba sobre vidrio fue que la concentración de glicina más próxima a 0.1M hizo que las películas depositadas fueran las más gruesas a simple vista.

Después de la prueba anterior, y basándonos en experiencias previas en el empleo de formulaciones libre de amonio (NH_4) reportadas en la literatura [19], buscamos una formulación alternativa libre de amonio, lo que nos llevo a sustituir el buffer $\text{NH}_4\text{Cl}/\text{NH}_4\text{OH}$ pH11, por el buffer de borato pH10.

Después de realizar varias pruebas, con diferentes cantidades de solución de borato, se definió que la formulación libre de amonio para películas de CdS consistiría en mezclar los siguientes reactivos: 31ml de H_2O desionizada, 4ml de $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.1M, 5ml de glicina 0.1M, 4ml de buffer de borato pH10, 5ml de Tiourea 1M y por último, 11ml de H_2O desionizada (c.b.p. 60ml).

Con ambas formulaciones para películas de CdS, con amonio y libre de amonio, se hizo una serie de películas variando la temperatura y el tiempo de depósito, sobre vidrio como sustrato, con el fin de calcular el gap de energía de las películas de CdS que estábamos fabricando. La serie de películas consistió en varias muestras, de cada una de las posibles combinaciones de las siguientes variables:

- Buffer: Con amonio y libre de amonio.
- Temperatura: 50 °C, 60 °C, 70 °C y 80 °C.
- Tiempo: 10min, 15min y 20min.

5.1.2 Características ópticas

Con las películas de CdS que fabricamos sobre vidrio, decidimos hacer pruebas de transmitancia óptica con un espectrómetro Lambda19. Esto, con el fin de encontrar el gap directo de energía en el material depositado. Para encontrar el gap directo del material, a partir de mediciones de transmitancia, utilizamos la Ley de Beer-Lambert, que es una relación empírica entre la absorción de luz de un material con sus propiedades, como por ejemplo, el gap de energía.

En la Figura 5.1 se muestran algunos resultados de las mediciones de transmitancia para películas de CdS, usando la formulación sin amonio y libre de amonio. En ellas puede observarse, que las películas con amonio son más gruesas que las películas libre amonio, ya que al tener los mismos tiempos y temperaturas de depósito, puede observarse, que las películas con amonio absorbieron más luz.

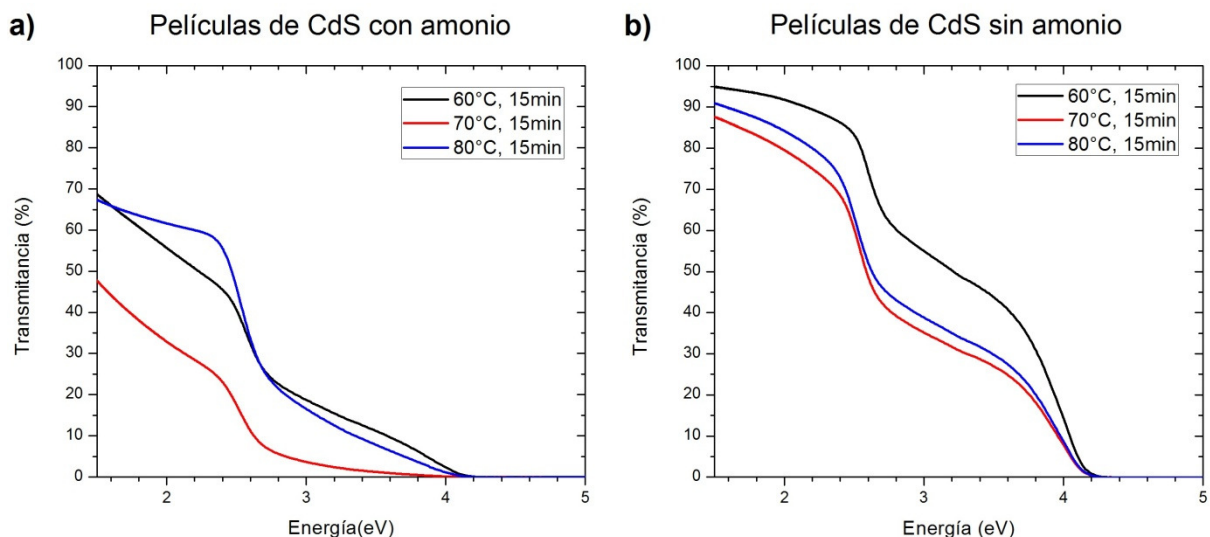


Figura 5.1 Resultados de transmitancia para películas de CdS sobre vidrio, depositadas con la formulación a) con amonio y b) libre de amonio.

Para obtener el gap directo de energía, usando la ley de Beer-Lambert, primero debemos sustituir los resultados de transmitancia por absorbancia, mediante la relación $A = -\ln T$, donde A es la absorbancia y T la transmitancia, ambas normalizadas. Posteriormente, usando la misma ley, podemos encontrar que hay una relación entre la absorbancia y el gap de energía directo, la cual está dada por $(EA)^2 \propto (E - E_g)$, donde E es la energía del fotón $E = h\nu$ y E_g la energía del gap directo que buscamos. Por lo tanto, la energía E que corresponde a E_g , es aquella donde la $(EA)^2=0$.

Por lo tanto, para calcular la energía del gap, se grafica $(EA)^2$ respecto a la energía E , y se busca el valor de E donde la recta que se ajusta a la primera pendiente de la gráfica corta al eje horizontal, es decir, donde $(EA)^2=0$.

En la Figura 5.2, se pueden ver algunos ejemplos de las gráficas de diferentes funciones $(EA)^2$ vs E , para diferentes películas de CdS, así como las rectas ajustadas a la primera pendiente de las curvas, con las que se obtuvo la energía del gap para cada caso. Y en la tabla 5.1 se muestra una recopilación de todas las energías del gap directo calculadas con el método ya explicado, para las diferentes películas de CdS depositadas. Donde puede observarse, que todos los valores están muy próximos a los 2.45eV, en coincidencia con los reportados por la literatura referenciada en el capítulo 1 de este trabajo.

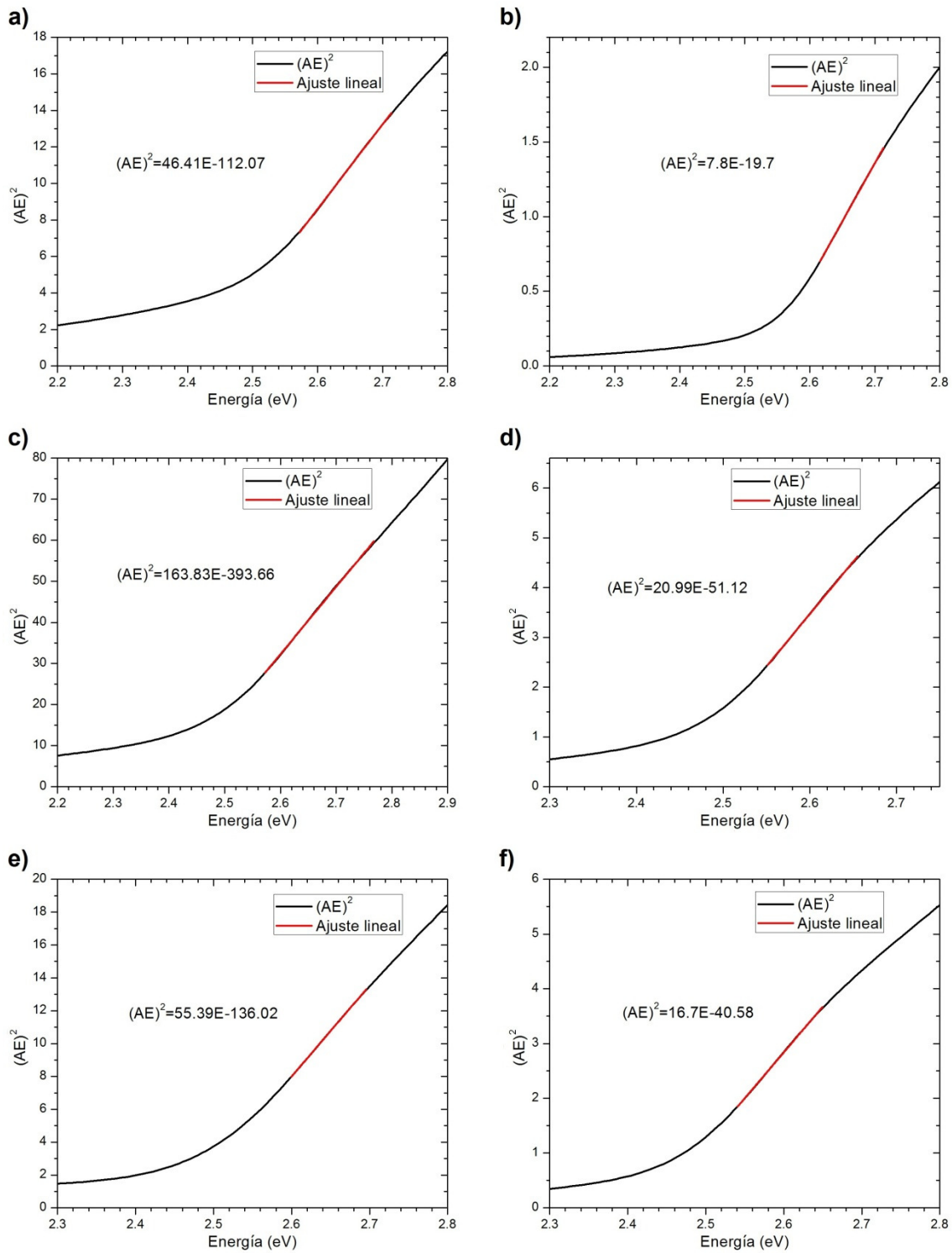


Figura 5.2 Ejemplos de curvas $(Absorción \times Energía)^2$ vs Energía, con ajuste de rectas para calcular energía del gap directo para películas de CdS depositadas en 15 minutos a) con amonio a 60 °C, b) libre de amonio a 60 °C, c) con amonio a 70 °C, d) libre de amonio a 70 °C, e) con amonio a 80 °C y f) libre de amonio a 80 °C.

Temp.	Con amonio			Libre de amonio		
	Tiempo de depósito			Tiempo de depósito		
	10min	15min	20min	10min	15min	20min
50 °C	2.5206	2.4887 2.4845 2.4699	2.4571 2.4561 2.4494	Muy poca absorbancia	Muy poca absorbancia	Muy poca absorbancia
60 °C	2.4507 2.4552 2.4761	2.4633 2.4631 2.4147	2.4732 2.4888 2.3934	Muy poca absorbancia	2.52094 2.52902 2.52598	2.49645 2.49148 2.49396
70 °C	2.5363 2.5238 2.45416	2.5103 2.4815 2.4029	2.4032	2.47607	2.49452 2.42382 2.43481	2.46492 2.47157 2.43295
80 °C	2.4631 2.4879 2.4558	2.4798 2.4722 2.4557	2.4524	2.46808 2.46081 2.43954	2.4285 2.42485 2.43002	2.42898

Tabla 5.1 Energías de los gap directos calculados en películas de CdS.

5.1.3 Análisis estructural

Para las películas de CdS se realizó un análisis estructural considerando las de mayor tiempo de depósito con las formulaciones con y sin amonio. Para esto, se realizaron pruebas de difracción de rayos X o XRD (X-ray diffraction), por sus siglas en inglés, lo cual nos permitió conocer la estructura cristalina del material. El equipo usado fue un difractómetro de rayos X de la marca RIGAKU y modelo Dmax2100, el cual posee un tubo de Cobalto (Co) con generación de rayos de longitud de onda de 1.78899Å a 30kV-16mA. De acuerdo a los difractogramas

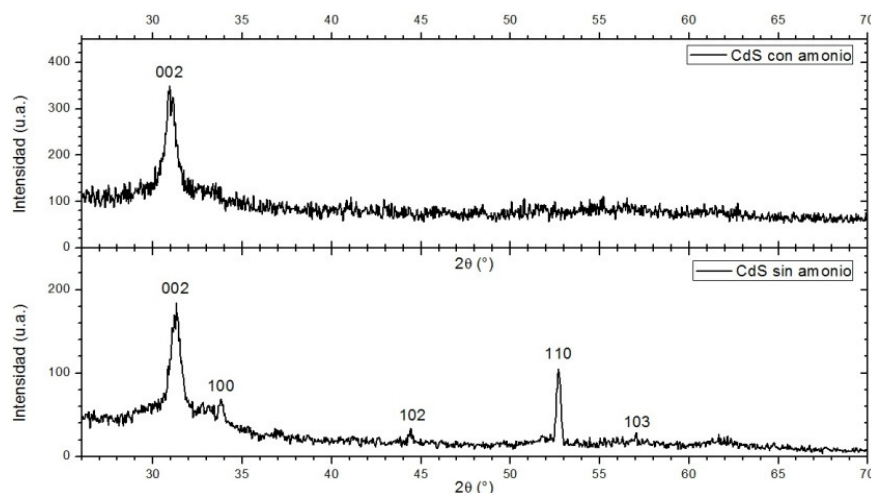


Figura 5.3 Difractograma de películas de CdS empleando la formulación con amonio y libre de amonio.

presentados en la Figura 5.3, en el caso de la película de CdS a partir de la formulación que contiene amonio se localiza un pico intenso en 31° plano (002). Esto es indicativo que la fase cristalina que se presenta es la hexagonal. Sin embargo, para el caso de la película de CdS obtenida con la formulación libre de amonio además del pico en 31° se obtienen notablemente una serie de picos en 33.8°, 44°, 52.7° y 57°. La fase dominante es la hexagonal, aunque es posible tener presencia de la fase cúbica, especialmente para el pico que corresponde con el plano 110 (para la fase hexagonal), que también puede considerarse como un traslape con el plano 220 de la fase cúbica.

5.1.4 Morfología

Algunas películas de CdS que fueron depositadas sobre obleas de Si con una película de SiO₂, fueron analizadas por un microscopio electrónico de barrido o SEM (Scanning Electron Microscope), por sus siglas en inglés.

Las pruebas de SEM tuvieron como propósito obtener imágenes a gran escala de la formación del material depositado y con ellas, poder tener una idea del tamaño del grano de la película depositada.

En la Figura 5.4 se muestra la imagen obtenida en esta prueba para una película de CdS mediante el proceso libre de amonio, donde puede apreciarse tamaños de grano que oscilan entre los 65 y 90 nanómetros.

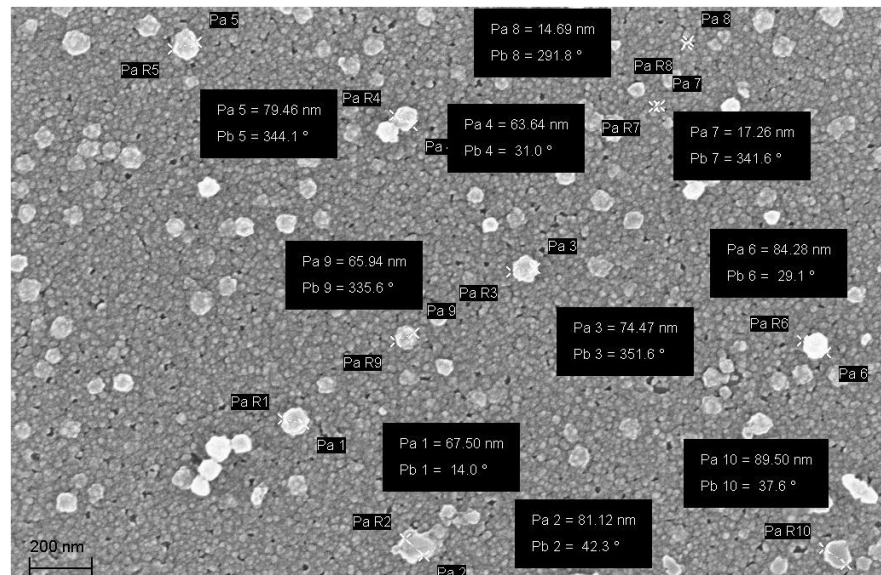


Figura 5.4 Resultados de SEM con mediciones de tamaño de grano.

5.2 FABRICACIÓN DE PELÍCULAS DELGADAS DE PbS/CdS Y SU CARACTERIZACIÓN.

Además de las películas de CdS, se fabricaron también una serie de películas de PbS. La formulación base [20] para fabricar películas de PbS consiste en mezclar en un vaso de precipitado de 100ml los siguientes reactivos: 5ml de Acetato de plomo 0.5M, 5ml de NaOH 2M, 6ml de Tiourea 1M, 2ml de Trietanolamina 1M y por último, 82ml de H₂O destilada (c.b.p. 100ml). Para este caso, la solución se procesa a una temperatura de 55°C durante una hora.

Con las películas de PbS se realizó un estudio rápido sobre la variación de la concentración del acetato de plomo, pero esto demostró que la concentración ya establecida es muy crítica, y pequeñas variaciones tienen el efecto de que no haya depósito sobre el sustrato.

El principal objetivo de las películas de PbS, fue el de obtener bicapas de PbS/CdS, y que mediante tratamiento térmico se obtuviera la difusión del plomo hacia la película de CdS. La intención de lograr esta difusión fue obtener películas semiconductoras en FETs mostrando operación ambipolar, es decir, dependiendo de la configuración de polarización con estos FETs se pueden presentar tanto comportamiento n como p.

Las películas bicapas que se fabricaron fueron depositadas sobre sustratos de silicio con una capa de 100nm de SiO₂. El procedimiento consistió en crecer sobre el sustrato una capa de CdS con la formulación base, posteriormente se depósito una película de PbS. Para lograr la difusión del plomo, las muestras fueron puestas en tratamiento térmico, en una atmósfera de nitrógeno, a 220°C, 300°C y 400°C durante un tiempo de 30 minutos por cada muestra.

5.2.1 Estructura

En cuanto a las películas bicapas PbS/CdS, que se fabricaron y sometieron a tratamiento térmico, se realizaron diferentes pruebas para caracterizar el material. Primeramente se realizaron pruebas de difracción de rayos X sobre la superficie de la bicapa. En la Figura 5.5, se muestran las gráficas de los resultados obtenidos por las mediciones de XRD, a las películas que estuvieron en tratamiento térmico a 300 °C y a 400 °C. En estas gráficas se identifica los planos correspondiente a la estructura cristalina del tipo cúbica, como lo es la estructura rock salt, que es la estructura cristalina adoptada por el PbS, como se mencionó en el Capítulo 2.

Por otra parte, podemos destacar que la diferencia de temperaturas en el tratamiento térmico, no provocó cambio alguno en la estructura cristalina de las películas resultantes, excepto por una variación de intensidad.

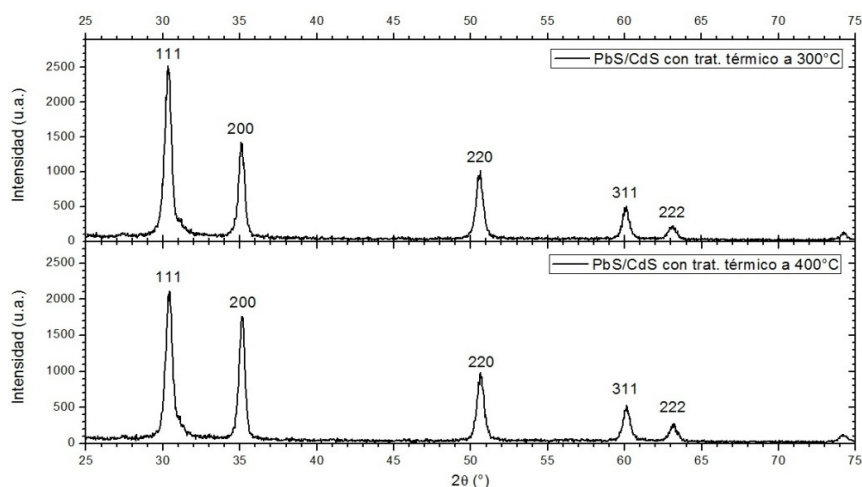


Figura 5.5 Difractograma de películas de PbS/CdS sometidas a tratamiento térmico de a) 300 °C y b) 400 °C.

5.2.2 Difusión

Además de las mediciones de XRD, también se practicaron pruebas de espectroscopia de fotoelectrones emitidos por rayos X o XPS (X-ray photoelectron spectroscopy), por sus siglas en inglés, el cual nos ayuda a conocer los diferentes elementos que conforman las películas delgadas.

El XPS que usamos para nuestras mediciones, también cuenta con una herramienta de decapado por haz de iones de Ar, lo que nos sirve para ir erosionando, de una manera muy controlada, el material que conforma la película delgada y así poder hacer un análisis a diferentes profundidades de la película. El análisis que se obtuvo fue del tipo cualitativo debido a que no se cuentan con estándares de los compuestos para realizar un cálculo de sensibilidades y deconvolución (procedimientos que se usan con regularidad en la literatura con el objetivo de estimar la proporción de compuestos que se encuentran en las películas delgadas). El procedimiento realizado se explicará en términos de la Figura 5.6, que corresponde a la muestra que recibió tratamiento térmico de 220 °C. Una lectura preliminar se realizó sobre la superficie, la cual, presenta una buena cantidad de oxígeno debido a la exposición de la película superior (PbS) al medio ambiente. Después de esto se consideraron tiempos de erosión de 1, 3, 5, 7, 9 y 12 minutos. Por lo que se observa que en el primer minuto se muestra una concentración solo de plomo y azufre, que forman el PbS.

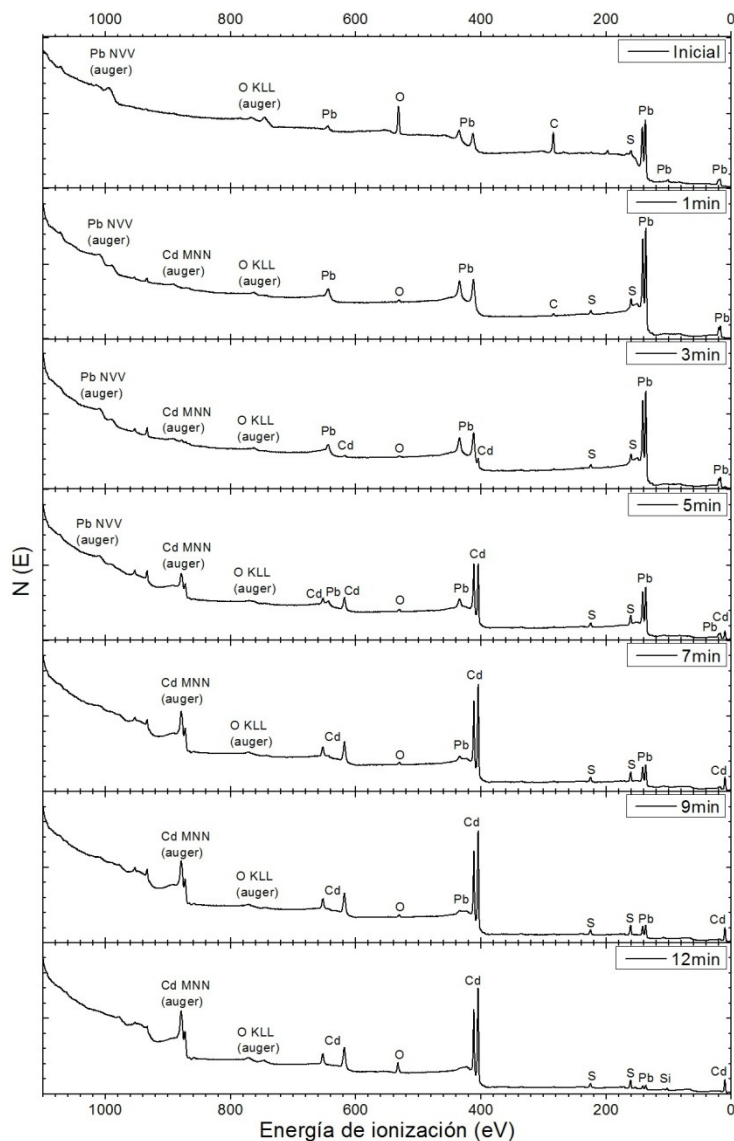


Figura 5.6 Resultados de XPS con diferentes tiempos de erosión, para película de PbS/CdS con tratamiento térmico a 220 °C.

A partir de la gráfica con erosión de 3 minutos, puede verse que empiezan a aparecer picos de CdS, y a medida que erosionamos más el material, se puede observar, que existen capas donde los picos correspondientes al cadmio crecen en mayor proporción. A medida que avanzamos con la erosión de la película, llegamos a la parte final de CdS, ya que encontramos elementos que corresponden a la capa de SiO₂, (entre 9 y 12 minutos de erosión) donde prácticamente la cantidad de plomo es despreciable.

Después de analizar la muestra que recibió tratamiento térmico a 220°C, se realizaron las mismas mediciones de XPS a la muestra con el tratamiento térmico de 300°C y los resultados se muestran en la Figura 5.7.

Los resultados del XPS para la muestra de 300°C son muy similares a los de la muestra anterior. Primero se puede observar capas donde solo existe plomo y azufre. A medida que erosionamos el material vamos encontrando poco a poco cadmio. Y a medida que seguimos avanzando sobre las capas del material, el plomo empieza a desaparecer, hasta llegar a la capa donde

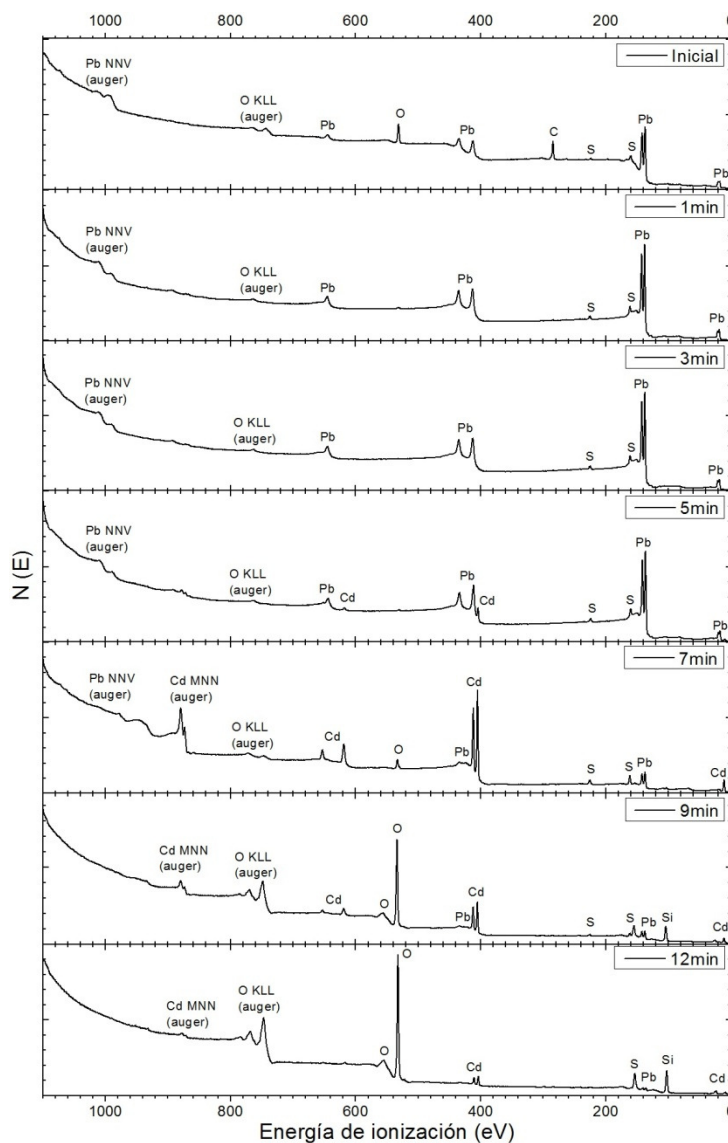


Figura 5.7 Resultados de XPS con diferentes tiempos de erosión, para película de PbS/CdS con tratamiento térmico a 300°C.

se hace presente el oxígeno y el silicio, como la muestra anterior.

Por último, se realizaron mediciones de XPS, con los mismos tiempos de erosión, a la muestra que recibió el tratamiento a 400 °C, los resultados de estas mediciones se muestran en la Figura 5.8. En estas gráficas, se puede observar el mismo comportamiento que en las dos figuras anteriores, primero existen capas con solamente PbS y a medida que quitamos capas del material, nos encontramos con profundidades en las que conviven los tres elementos principales (Cadmio, Plomo y Azufre). Estos resultados nos indican que con el tratamiento térmico a 400°C se obtuvo la mayor difusión de PbS hacia la película de CdS en comparación con la presentada en los casos correspondientes a las Figuras 5.6 y 5.7.

Otro comportamiento que puede observarse es el del cadmio, y éste es que a mayor temperatura, los picos de cadmio fueron más pequeños, y aparecieron a profundidades mayores, lo cual coincide con lo dicho en el párrafo anterior, ya que al haber más penetración de plomo al CdS, el cadmio se debe haber distribuido al resto del material.

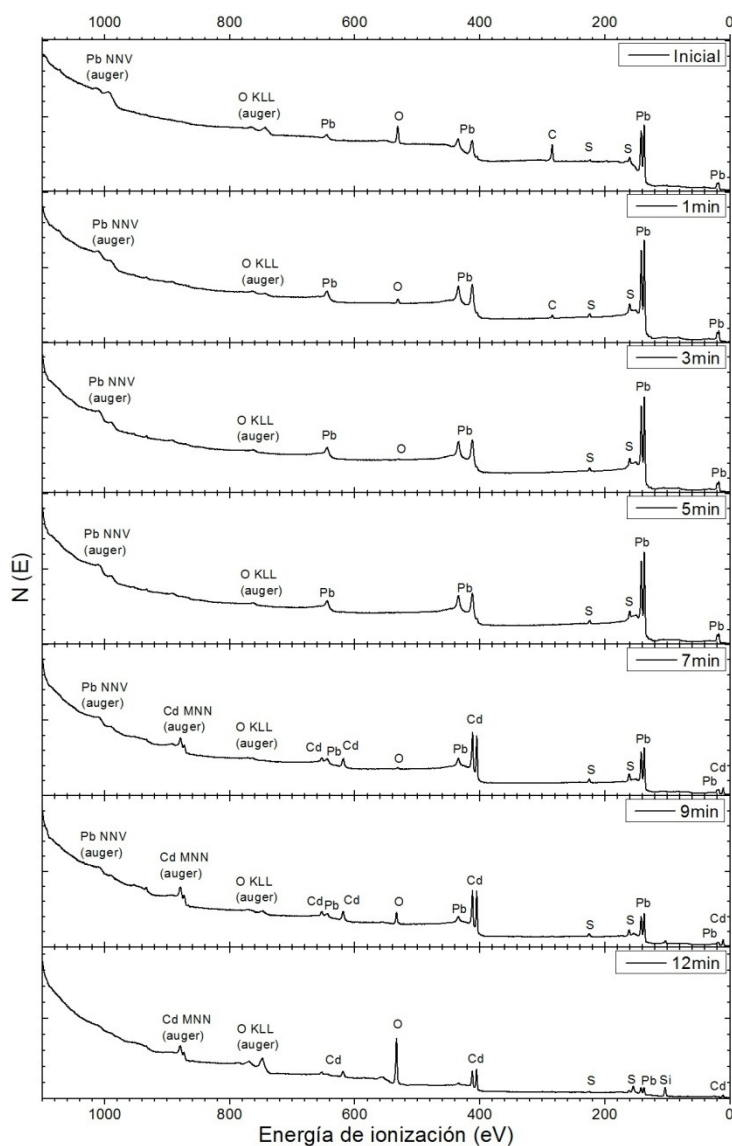


Figura 5.8 Resultados de XPS con diferentes tiempos de erosión, para película de PbS/CdS con tratamiento térmico a 400 °C.

Por último, cabe destacar que, aunque las mediciones del XPS no nos muestran cuantitativamente, a que profundidad se difunde el plomo en la película de CdS; ya que la velocidad de erosión del material, depende de muchos factores, y debido a eso no se puede establecer la medida de la profundidad a la que fueron tomadas las mediciones; aun así, las gráficas nos muestran resultados evidentes de que existió penetración del plomo hacia la película de CdS.

5.3 FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE FETS

En esta sección se muestra el desempeño de películas de CdS y CdS con plomo difundido como películas activas semiconductoras en estructuras de FETs. El procedimiento para fabricar nuestros FETs consistió en depositar las películas delgadas, ya sea de CdS o PbS/CdS (con posterior tratamiento térmico para obtener difusión), sobre un sustrato de silicio dopado tipo n, al cual se le creció previamente una película de óxido de silicio mediante un sistema sputtering, de aproximadamente 100nm, que actúa como capa dieléctrica entre el silicio y la película delgada.

Después del depósito de las películas, se utilizó un proceso de litografía con máscara, en los laboratorios del Departamento de Ingeniería y Ciencia de los Materiales de la Universidad de Texas en Dallas, para delimitar el área de los contactos metálicos que son usados como drenaje y fuente en el FET. La razón de no usar el proceso litográfico sin máscara, descrito en el Capítulo 4, fue que las pruebas con varias resinas fotosensibles no arrojaron resultados positivos con la longitud de onda con que trabaja nuestro sistema, como ya fue explicado al inicio de este capítulo.

Posteriormente, en los mismos laboratorios, a cada muestra se le depositó una capa de oro sobre la resina fotosensible, con lo cual, quedaron delimitados contactos. Además, se depositó una capa de oro/cromo sobre la cara expuesta del sustrato de silicio. Un esquema de la estructura de los dispositivos con el proceso

litográfico propuesto y otro con la estructura de los dispositivos fabricados se muestra en la Figura 5.9.

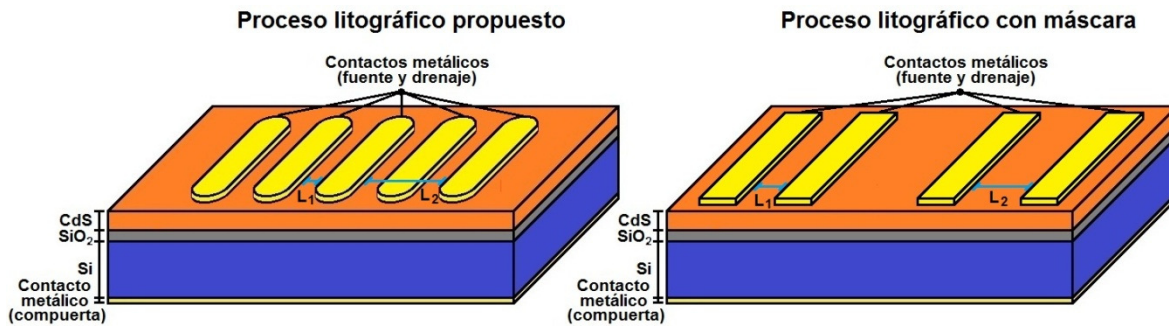


Figura 5.9 Estructura completa de los FETs con el proceso litográfico propuesto, y con el proceso litográfico con máscara.

En los FETs fabricados, los contactos de la parte superior tienen una longitud de $450\ \mu\text{m}$, los cuales cumplen la función de fuente y drenaje dentro de la estructura del FET. Además, la distancia entre los contactos es de aproximadamente 10 y $20\ \mu\text{m}$. Por otra parte, nuestra estructura propuesta nos permitiría tomar mediciones entre diferentes contactos y obtener resultados del efecto de campo con longitudes de canal diferente. Por último, el contacto inferior, que cubre el sustrato de manera uniforme, funciona como una compuerta común para los diferentes FETs.

Además, puede verse en la Figura 5.9, que la estructura de nuestros FETs, difiere de la estructura mostrada en el capítulo 3 del presente trabajo, la razón es que esta estructura es mucho más sencilla de fabricar que la de un MOSFET comercial, y aun así, esta estructura es de gran utilidad para poder observar el efecto de campo usando las películas de CdS y CdS con difusión de plomo que fabricamos.

Por último, cabe mencionar, que en los mismos laboratorios de la Universidad de Texas en Dallas, se realizaron las pruebas eléctricas a los FETs, los cuales nos permitieron conocer las curvas de operación y el voltaje umbral de nuestros dispositivos. Los resultados de estas mediciones se presentan en la siguiente sección.

5.3.1 Caracterización eléctrica de FETs con CdS como capa activa

En los transistores de efecto de campo que se fabricaron, se midieron diferentes parámetros para establecer si el funcionamiento era adecuado; dichos parámetros ya fueron definidos en la Sección 3.2 de este trabajo.

Uno de los parámetros más importantes son las curvas de operación, ya que establece el comportamiento del canal formado en el material, y debe de cumplir las etapas ya definidas, región lineal, punto de saturación y región de saturación.

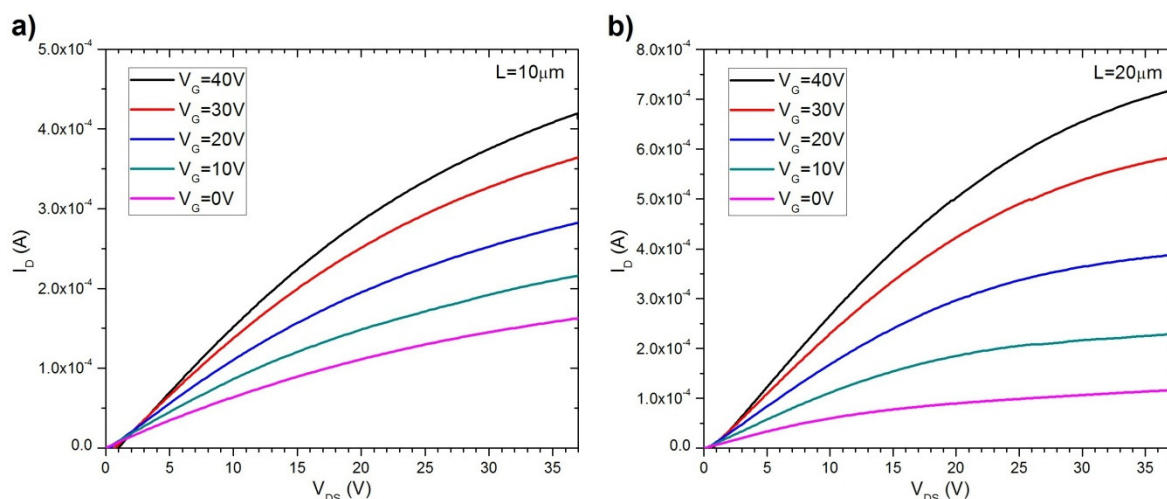


Figura 5.10 Resultados de curvas de operación para diferentes películas de CdS fabricadas por CBD.

En la Figura 5.10, se muestran las curvas de operación de un par de dispositivos con las películas de CdS fabricadas. En las gráficas se puede ver que el comportamiento de las curvas es aceptable, pero no del todo adecuado. Al empezar a aumentar el voltaje del drenaje a la fuente, la corriente del drenaje empieza a aumentar de manera logarítmica, no completamente lineal.

Posteriormente, mientras más se aumenta el voltaje V_{DS} , el canal empieza a estrecharse cerca de la fuente, por lo que el aumento de la corriente I_D empieza a decrecer, hasta ser muy pequeño, por lo que solo se aproxima, sin llegar a ser una

corriente de drenaje constante. Esto quiere decir que, nuestros dispositivos no llegan a la corriente de saturación $I_{D(sat)}$.

La razón de que en ninguna de las gráficas de la Figura 5.10 es posible observar o calcular la corriente y voltaje de saturación, se debe principalmente a que las películas depositadas son muy delgadas, aproximadamente de 60nm. Además, el equipo donde se realizaron las mediciones, no puede suministrar un voltaje V_{DS} mayor que 40V, pero resulta visible en el comportamiento de las curvas, que tienden a una asíntota horizontal, es decir, de corriente constante. Por lo tanto, de las observaciones anteriores, podemos definir que el voltaje de saturación debe ser mayor que 40V.

Por último, además de mencionar que la forma de las curvas tiene un comportamiento que coincide en gran parte con la teoría, es importante recordar la relación entre las curvas de operación y el voltaje de compuerta. En otras palabras, a medida que se aumenta el voltaje de la compuerta, la densidad de portadores en el canal debe aumentar, por lo que a mayor voltaje V_G , las curvas alcanzan mayor corriente I_D , lo cual también se puede observar en las gráficas.

Después del análisis de las curvas de operación de los transistores fabricados, se calculó para los mismos, los otros dos parámetros de importancia ya definidos, el voltaje umbral y la movilidad.

El voltaje umbral o V_T corresponde al voltaje necesario en la compuerta para formar el canal en el semiconductor, además, nos permite conocer en qué modo funcionan nuestros dispositivos, ya sea normalmente apagado o normalmente encendido.

Existen diferentes maneras de calcular el voltaje umbral para los FETs fabricados, pero el que utilizamos en esta ocasión, consiste en obtener el comportamiento de la corriente I_D respecto al voltaje V_G , aplicando un voltaje constante y suficientemente alto en V_{DS} para poner el dispositivo en la región de saturación.

En la Sección 3.2, se definió que la corriente del drenaje de saturación está en función del cuadrado del voltaje de compuerta; además, cuando el voltaje V_G es igual al voltaje V_T , la corriente I_D es igual a cero. Por lo tanto, para calcular el voltaje umbral, se grafica la raíz cuadrada de la corriente del drenaje, respecto al voltaje de compuerta, hecho esto, se ajusta a una recta a la primer pendiente de la curva, que es la que describe el comportamiento arriba mencionado.

El voltaje umbral de los FETs fabricados, corresponde al valor de V_G donde la recta ajustada corta al eje horizontal en la gráfica de $I_D^{1/2}$ - V_G . En la Figura 5.11 se pueden observar algunos ejemplos de resultados de las mediciones de I_D respecto a V_G ; así como los ajustes de las rectas que nos permitieron calcular el voltaje umbral para los diferentes FETs.

En las gráficas puede observarse que el voltaje umbral es menor que cero, de aproximadamente -40V para la separación de contactos de $10\mu\text{m}$ y -20V para la separación de contactos de $20\mu\text{m}$. Esto quiere decir, que es un FET normalmente encendido, ya que el voltaje de compuerta debe ser mucho menor que cero, para que no exista un canal en el semiconductor.

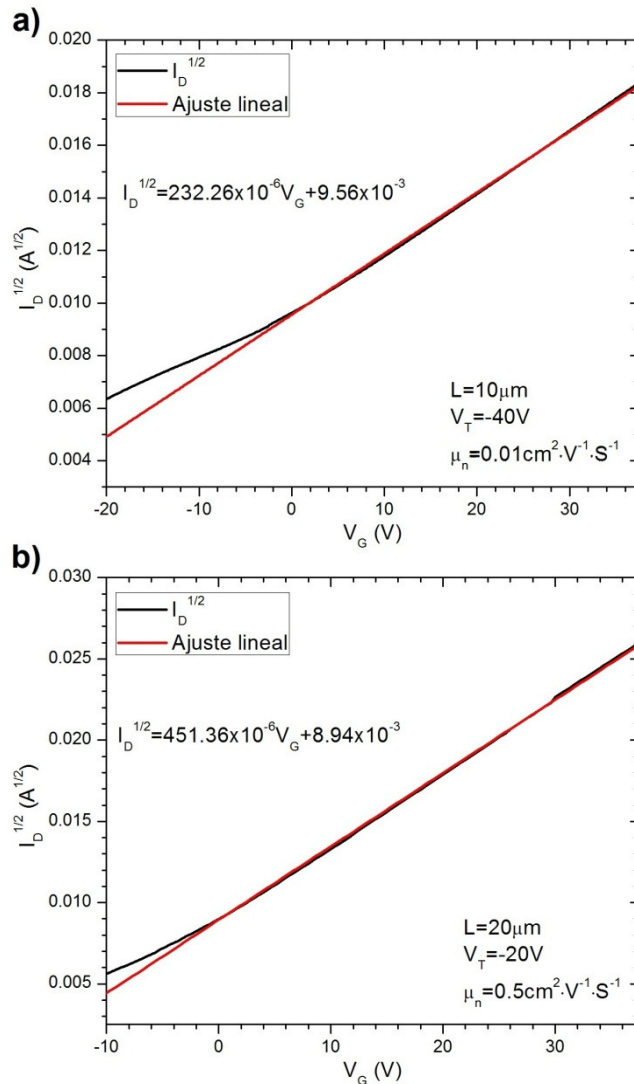


Figura 5.11 Resultados de mediciones I_D - V_G con ajuste de recta para calcular V_T .

Por último, con el ajuste de las rectas en las gráficas de la Figura 5.11 también es posible obtener el parámetro restante, la movilidad de portadores, para esto, usamos la fórmula del final de la Sección 3.2. Primeramente, tomamos la permitividad del SiO_2 , definida por $\epsilon_{\text{SiO}_2}=3.9\epsilon_0$ [10], con la cual calculamos la capacitancia del SiO_2 por unidad de área, que sería $C_{\text{ox}}=C_{\text{SiO}_2}=3.453 \times 10^{-8} \text{F} \cdot \text{cm}^{-2}$.

Sustituyendo el valor de C_{ox} , los valores de las dimensiones de los contactos, el valor $B=1$ y las pendientes de las rectas en la Figura 5.11, se obtuvieron valores para la movilidad del orden de $0.01 \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}$ y $0.5 \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}$, para los FETs con contactos de $10\mu\text{m}$ y $20\mu\text{m}$ de separación, respectivamente.

5.3.2 Caracterización eléctrica de FETs con películas semiconductoras de CdS con difusión de Pb

Los FETs de CdS con difusión de PbS, fueron fabricados a partir de las muestras bicapas PbS/CdS, específicamente aquellas sometidas a tratamiento térmico de 400°C , como se explicó en la Sección 5.1.

Para tomar las mediciones de curvas de operación de estos FETs, se realizó un decapado con el fin de tener una película con CdS y PbS.

El decapado consistió en sumergir las muestras durante diferentes tiempos, de 10 y 20 segundos, en una solución de HCl al 3.7%. Posteriormente se depositaron contactos de oro, y se hicieron mediciones de las curvas de operación en los laboratorios del Departamento de Ingeniería y Ciencia de los Materiales de la Universidad de Texas en Dallas.

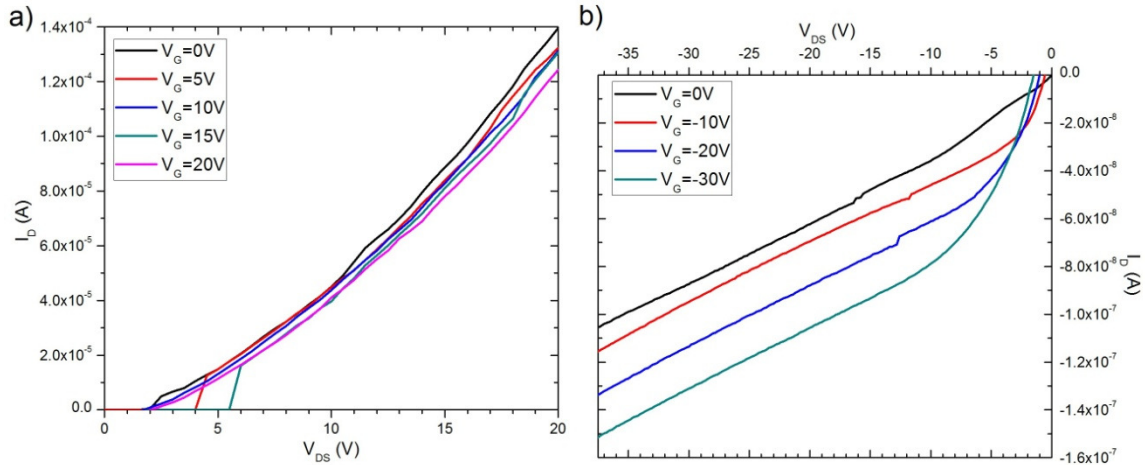


Figura 5.12 Resultados de curvas de operación para FET de CdS con difusión de Pb como transistor de a) canal n y b) canal p.

En la Figura 5.12 se muestran las curvas de operación de un FET con una película semiconductor que tuvo un tiempo de decapado de 10 segundos. Como podemos apreciar el procedimiento de difusión mediante el tratamiento térmico propuesto muestra un dispositivo semiconductor con propiedades potenciales para operar como un FET ambipolar. Específicamente, en la Figura 5.12 a) observamos que, la película semiconductor actúa como tipo n para la configuración correspondiente. Por otro lado, en la Figura 5.12 b) observamos que la película semiconductor presenta una curva con mejores características actuando como una película tipo p. El comportamiento mostrado en ambos casos se debe a que la película tiene una baja resistividad por lo que no obtenemos el comportamiento de efecto de campo deseado. Además, es importante señalar que el procedimiento de decapado empleado no es el más conveniente debido a que no se tiene razón de la cantidad de material removido y su remoción no es uniforme. Otro factor que pudo haber influido es la oxidación del material. Sin embargo, la respuesta del dispositivo mostrada en la Figura 5.12 puede considerarse como una evidencia de la difusión de plomo en la película de CdS.

En el caso de las películas con decapado de 20s, no se tuvieron resultados satisfactorios. Esto se debe a que la película resultante era demasiado delgada y en algunos casos ni siquiera había película semiconductor.

CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES

6.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Particularmente, puedo comentar que en proyectos experimentales, se debe ser sumamente cuidadoso y sistemático, hasta casi caer en el perfeccionismo, ya que pequeñas variaciones en el sistema, pueden cambiar a gran escala el resultado final. A pesar de los inconvenientes presentados en nuestros arreglos experimentales, durante este proyecto de tesis, se obtuvieron una serie de contribuciones entre las que destacan las siguientes:

Se presentó el procesamiento y fabricación de películas delgadas de CdS con una formulación libre de amonio, la cual emplea glicina como agente complejante en un proceso de deposición por baño químico. El comportamiento óptico de estas películas fue muy similar a aquellas obtenidas mediante las formulaciones convencionales reportadas en la literatura que incluyen el amonio como agente complejante y en algunos casos como agente nivelador de pH. La fase cristalina dominante de las películas resultantes fue la del tipo hexagonal con la posibilidad de una incipiente fase cúbica.

Otra contribución de este trabajo es la presentación del estudio de películas de CdS con Pb difundido. Se observó la pertinencia del tratamiento térmico aplicado a bicapas de PbS/CdS y su efecto en el proceso de difusión. De manera que dependiendo de la temperatura de tratamiento es posible obtener un material semiconductor con diferentes características. De manera particular, empleamos la película con tratamiento de 400°C, la cual, presentó la mayor difusión de Pb en la película de CdS con el propósito de usarlo como película activa en FETs con características ambipolares.

Con el propósito de fabricar estructuras de FETs, presentamos un sistema de litografía novedoso sin mascarar que emplea la interferencia de haces Bessel generados mediante una pantalla difractora. En este caso se empleo una pantalla

de cristal líquido como modulador espacial de luz configurado mayormente en fase. En este dispositivo se codificaron, en forma de hologramas pixelizados, la función de fase generadora de un haz Bessel, así como una función portadora empleada para separar la señal de interés del error de modulación producida por el dispositivo. Esta función portadora fue aprovechada para replicar la señal de información y en lugar de tener un solo haz se obtuvieron múltiples haces cuya interferencia formaron patrones periódicos.

Por otra parte, el uso de haces Bessel por su característica de adifraccionalidad, nos dio una de las mayores ventajas del sistema, ya que permite que la muestra se coloque en un amplio rango de distancia. Además, en el sistema implementado, tiene la ventaja que con solo modificar los hologramas, ya sea la función compleja o la función portadora, nos permite obtener una amplia gama de patrones de interferencia, lo que aumenta la funcionalidad del sistema. Sin embargo, el uso de este sistema de litografía está condicionado a encontrar en el mercado, una resina fotosensible que responda a la longitud de onda de 454nm.

A su vez, los FETs con películas delgadas de CdS empleando la formulación libre de amonio mostraron efecto de campo. Los parámetros eléctricos obtenidos de estos transistores fueron $V_T = -40V$ y $\mu_n = 0.01 \frac{cm^2}{V \cdot s}$ para los FETs con longitud de canal de $10\mu m$; y $V_T = -20V$ y $\mu_n = 0.5 \frac{cm^2}{V \cdot s}$ para los FETs con longitud de canal de $20\mu m$. Con los parámetros anteriores, además de las curvas de operación mostradas en el capítulo anterior, indican que son FETs de canal n, que funcionan en modo normalmente encendido.

Por su parte, aun cuando no se presentó el comportamiento de efecto de campo para los FETs con películas de CdS con Pb difundido, los resultados mostraron una potencialidad del procedimiento desarrollado para un comportamiento ambipolar. En este caso, los FETs mostraron indicios de formación de canal cuando la compuerta era polarizada de manera positiva, como canal n; y también cuando la compuerta era polarizada de manera negativa, como canal tipo p.

Finalmente, los resultados obtenidos mediante este trabajo de tesis nos motivan a establecer nuevas propuestas que se expresan en la siguiente sección.

6.1 TRABAJO FUTURO

- Encontrar en el mercado y caracterizar una resina fotosensible que responda a una longitud de onda alrededor de 454nm, con el propósito de completar el sistema de litografía sin máscaras diseñado.
- Adaptar y automatizar el sistema litográfico para no solo depositar contactos, sino también establecer patrones o delimitaciones en los materiales (semiconductores, dieléctricos, conductores metálicos y no metálicos) empleados para el desarrollo de dispositivos.
- Hacer un estudio sobre decapado de las películas de CdS con difusión de Pb o bien encontrar una vía para la síntesis y codepósito de películas de CdPbS con el propósito de optimizar la operación de los FETs ambipolares.

ANEXO A PROGRAMA PARA GENERAR CGHs Y SIMULACIÓN DE RESULTADOS EN MATLAB

```
%Simulación del código para representar una modulación
%compleja en un SLM de fase limitada (código "DAVIS MODIFICADO")
%PHASE DOMAIN=[-Flmax:Flmax]
%Variancia de amplitud no nula

%Inicia parte agregada

%Función bessel de orden alto para codificar con CGH Davis de fase reducida
clear

np=128; %np=input('número de píxeles por banda de Bessel: ');
lamb=0.488; pix=76; N=512; M=N;
k=2*pi/lamb;
ro=1/(1*np*pix);
n=-N/2:N/2-1; m=n; %Índices de píxel para filtro complejo
x=n*pix; y=-m*pix; %Muestreo de coordenadas para filtro complejo
xe=repmat(x,M,1); ye=repmat(y,1,N);
r=sqrt(xe.*xe+ye.*ye);
R=241*pix; %Máximo radio
xy=xe+i*ye;
teta=angle(xy);
ar=2*pi*r*ro;
re=besselj(0,ar);
supp=r<=R;
c=re.*supp;
c=c/max(max(abs(c))); %Normalización

%Portadora
Du=1/pix; %SLM bandwidth
uo=Du/4;

%Frecuencia de portadora propuesta (elegir solo 1)

%Portadora binaria vertical con máxima frecuencia
%CG=[0, pi, 0, pi]; Carr = repmat(CG,256,256);

%Portadora binaria horizontal con máxima frecuencia
%CG=[0, 0, pi, pi]; Carr = repmat(CG,256,256);

%Portadora binaria cuadrada con máxima frecuencia
%CG=[0, pi, pi, 0]; Carr = repmat(CG,256,256);

%Portadora binaria vertical con frecuencia fmax/2
CG=[0, 0, pi, pi]; Carr = repmat(CG,512,128);
```

```

%Portadora binaria horizontal con frecuencia fmax/2
%CG=[0, 0; pi, pi]; Carr = repmat(CG,256,256);

%Portadora binaria cuadrada con frecuencia fmax/2
%CG=[0, pi; pi, 0]; Carr = repmat(CG,256,256);

Carr = exp(i*Carr);
c=c.*Carr;           %Señal con portadora lineal

valx=(0:51);
valx=5*valx;

%Valores de la caracterización del SLM LC2002
valdesf=[397 396 396 398 399 400 400 400 401 402 402 403 403 404 405 407 407 409
411 412 413 415 416 417 418 421 428 436 437 439 446 450 452 457 459 461 465 467
469 474 474 477 478 479 479 479 480 479 479 481 481 482];
valdesf=valdesf-397;
valdesf=valdesf./85;
valdesf=valdesf*2*pi;

valampl=[1.18 1.17 1.16 1.15 1.14 1.12 1.1 1.09 1.07 1.05 1.03 1 .97 .94 .9 .86 .82 .77 .72
.67 .62 .57 .51 .46 .41 .36 .32 .28 .26 .25 .25 .28 .32 .38 .46 .55 .66 .76 .88 .98 1.09 1.19
1.27 1.34 1.39 1.43 1.47 1.5 1.51 1.53 1.54 1.55];
valampl=sqrt(valampl);
valampl=valampl./(max(max(valampl)));

xi=0:1:255;

phi = interp1(valx,valdesf,xi,'linear');

a = interp1(valx,valampl,xi,'linear');

%Termina parte agregada

%Incorporación de vector de amplitud "a" y de fase "phi" del SLM
Flmax=.5*max(phi);
phi=phi-Flmax;
bo=sinc(1-Flmax/pi);
ao=min(a);           %Mínimo de la modulación de amplitud del SLM
co=min([ao bo]);
c=co*c;             %Renormalización de c (originalmente normalizado a 1)
modu=abs(c);
argu=angle(c);

%Cómputo del CGH de Davis
no=find(abs(phi)==min(abs(phi)));
no=floor(mean(no));   %Índice n para amin

%si=sinc(1-x);
for n=1:512

```

```

for m=1:512
    A=modu(n,m);
    fo=argu(n,m);
    if A==0
        indi(n,m)=no;
    else
        if fo==0
            indi(n,m)=no;
        else
            if fo>0
                nn=find(phi>0);
            else
                nn=find(phi<0);
            end
            M=(phi(nn))/fo;
            si=a(nn).*sinc(1-M);
            fu=abs(A-si);
            aux=find(fu==min(fu));
            num=aux(1);
            indi(n,m)=nn(num);
        end
    end
end
end
end
end

```

```

%Generación del CGH
CGH=(a(indi)).*exp(i*phi(indi));
figure(1)
imagesc(angle(CGH))
axis off
axis square
colormap gray

```

%Programa para generar imagen BMP de 800x600

```

angCGH=angle(CGH);
mini=min(min(angCGH));
angCGH=angCGH+abs(mini);
mayor=max(max(angCGH));
angCGH=floor(angCGH*255/mayor);
angCGH=angCGH.*supp;
CGH_bmp=zeros(600,800);
CGH_bmp(300-256:300+255,400-256:400+255)=angCGH;
imwrite(CGH_bmp,gray(256),'CGH.bmp','bmp');

```

```

figure(2)
imagesc(CGH_bmp)
axis off
colormap gray

```

%Simulación de patrones de interferencia

```

CGH2=CGH;
CGH2(2048,2048)=0;

%Separación de órdenes
recon=fft2(CGH2);
recon=recon.*conj(recon);
recon=fftshift(recon);

%Reconstrucción

%Filtrado de órdenes para caso particular
R2=25*pix;
supp2=r<=R2;
supp2=supp2(256-32:256+32,256-32:256+32);
filtro=zeros(2048);
filtro(1024-32:1024+32,512-32:512+32)=supp2;
filtro(1024-32:1024+32,1536-32:1536+32)=supp2;
recon=recon.*filtro;

figure(3)
imagesc(abs(recon))
axis off
axis square
colormap gray

%Reconstrucción del patrón de interferencia
pat_int=ifft2(recon);
pat_int=fftshift(pat_int);

figure(4)
imagesc(abs(pat_int))
axis off
axis square
colormap gray

```

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Pauer S.M., Pauer B.S., Kim J.H., Oh-Shim Joo, C.D. Lokhande, *Recent status of chemical bath deposited metal chalcogenide and metal oxide thin films*, Current Applied Physics Vol. 11, p.117-161 (2011)
- [2] Krishna Seshan, *Handbook of thin-film deposition, processes and techniques*, Intel corporation, 2002
- [3] Aicha Elshabini-Riad and Fred Barlow, *Thin film technology handbook*, McGraw-Hill, 1998
- [4] Donald Smith, *Thin film deposition*, MacGraw-Hill, 2005
- [5] Bhavana Godbole, Nitu Badera, S. B. Shrivastav and V. Ganesan, *A simple chemical spray pyrolysis apparatus for thin film preparation*, Jl. Of Instrum. Soc. Of India, 2009
- [6] John Vossen and Werner Kern, *Thin film processes II*, Academic Press, 1991
- [7] H. M.Pathan and C. D. Lokhande, *Deposition of metal chalcogenide thin film by SILAR method*, Bull. Mater. Sci., 2004
- [8] Hodes, G., *Chemical Solutions Depositions of Semiconductor Films*, Marcel Dekker, 2002
- [9] S. M. Sze and Kwok K. Ng, *Physics of Semiconductor Devices, 3rd Edition*, John Wiley & Sons, 2007
- [10] J. P. Colinge and C. A. Colinge, *Physics of Semiconductor Devices*, Kluwer Academic Publishers, 2002
- [11] J. M. Abella and J .M. Martínez-Duart, *Fundamentos de Electrónica Física y Microelectrónica*, Addison Wesley, 1996
- [12] Dieter K. Schroder, *Semiconductor Material and Device Characterization*, John Wiley & Sons, 2006
- [13] John P. Uyemura, *CMOS Logic Circuit Design*, Kluwer Academic Publisher, 2001
- [14] R. Jacob Baker, *CMOS, Circuit Design, Layout, and Simulation*, John Wiley & Sons, 2010

- [15] John N. Helbert, *Handbook of VLSI Microlithography, Principles, Technology, and applications*, Noyes Publications, 2001
- [16] J. A. Davis, D. M. Cottrell, J. Campos, M. J. Yzuel and I. Moreno, *Encoding amplitude information onto phase-only filters*, Appl. Opt. 38, 5004-5013, 1999
- [17] V. Arrizón and L. A. González, *Encoding fully-complex transmittance with coupled amplitude-phase liquid-crystal modulator*, OE Letters, Vol. 44(7), 2005
- [18] T. Mendivil-Reynoso, D. Berman-Mendoza, L. A. González, S. J. Castillo, A. Apolinar-Irribé, B. Gnade, M. A. Quevedo-López and R. Ramírez-Bon, *Fabrication and electrical characteristics of TFTs base on chemically deposited CdS films, using glycine as a complexing agent*, Semicond. Sci. Technol. 26, 2011
- [19] Arreola-Jardón, L.A. González, L.A. García-Cerda, B. Gnade, M.A. Quevedo-López and R. Ramírez-Bon, *Ammonia-free chemically deposited CdS films as active layers in thin film transistors*, G., journal of Thin Solid Films, 517-520, Vol. 519, Issue 1, 29 October (2010)
- [20] J. J. Valenzuela Jáuregui, *Síntesis y caracterización de películas delgadas semiconductoras de PbS mediante la técnica de depósito químico, variando parámetros de tiempo y temperatura*, Tesis profesional, División de Ciencias Biológicas y de la Salud, Universidad de Sonora, 1998