

U

N

I

S

O

N



EL SABER DE MIS HIJOS
HARÁ MI GRANDEZA

Universidad de Sonora

Ingeniería en Tecnología y Electrónica

Tesis de Licenciatura:

“Optimización de un sensor de radiación

Ultravioleta a base de SRO”

Presenta

Jesús Román Martínez Castelo

Director:

Dr. Dainet Berman Mendoza

Asesor:

Dr. Santos Jesús Castillo

Hermsillo, Sonora, México a 12 Febrero de 2010

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

Dedico este trabajo a.....

Dedico este trabajo a mis padres, Román Martínez y Mirna Castelo quienes a pesar de todo siempre me han apoyado en todas mis decisiones ya sean para bien o para mal.

A mis hermanos Aquiles y Jorge que a pesar de nuestras diferencias siempre se han preocupado por mí.

A mi prima Melisa que siempre me ha estado dando ánimos para seguir adelante en lo que hago y aconsejando en todo lo que puede.

A director de tesis Dr. Dainet Berman y mi asesor Dr. Jesús Santos Castillo que a pesar de todos los problemas y tiempo que nos tomo realizar este trabajo, nunca perdieron la fe en mí y siempre me impulso a seguir adelante.

A mis amigos Mario Acosta, Ramón Borbon, Víctor Burton y familia, Luis Petterson y Javier Moreno por brindarme su amistad, estar con mígo en los buenos y malos momentos, prestarme su apoyo cuando lo he necesitado, pero sobre todo por ser mis amigos.

Agradezco a.....

PROMEP por la beca que me brindó durante la realización de este trabajo.

A mis maestros por brindarme una parte de su conocimiento y ayudarme a ser una mejor persona.

A mis compañeros de carrera por el compañerismo y momentos que pase con ellos todo este tiempo.

A mis sinodales: Dra. Alicia Vera Marquina y Dr. Armando Rojas Hernández por sus sugerencias y correcciones.

Índice

Introducción.....	10
Objetivo	11
Capítulo 1 Óxido de Silicio Rico en Silicio	13
Introducción.....	13
1.1 Materiales Semiconductores.....	13
1.1.1 Conductores, aislantes y semiconductores	15
1.1.1.1 Aislante	16
1.1.1.2a Semiconductor	17
1.1.1.2b Semiconductores intrínsecos y extrínsecos	18
1.1.1.3 Conductor.....	20
1.2 Oxido de Silicio Rico en Silicio	20
1.2.1 Características del Oxido de Silicio Rico en Silicio.....	21
1.3 Métodos de fabricación del SRO	23
1.3.1 Deposito Químico en Fase Vapor (CVD)	24
1.3.2 Deposito Químico en fase Vapor Asistido por Plasma. (PECVD)	25
1.3.3 Deposito Química en Fase Vapor a Baja Presión (LPCVD).....	25
1.4 Aplicaciones del SRO	26
Referencias	28
Capítulo 2 Procesos Luminiscentes	30
Introducción.....	30
2.1 Propiedades ópticas de los semiconductores.....	30
2.1.1 Absorción óptica en los semiconductores	31

a) Absorción	32
b) Emisión espontánea.....	33
c) Emisión estimulada	34
2.2 Procesos Luminiscentes.....	34
2.3 Fotoluminiscencia	35
2.3.1 Fotoluminiscencia en el SRO	37
2.3.2 SRO y sus posibles causas de fotoluminiscencia	38
2.3.2.1 Confinamiento cuántico.....	38
2.4 Termoluminiscencia en el SRO	40
Referencias	42
Capítulo 3 Fotodetectores	43
Introducción.....	43
3.1 Coeficiente de absorción y fotodiodos	43
3.2 Procesos de absorción óptica fundamentales	45
3.3 Eficiencia cuántica y responsividad	46
3.4 Fotodetectores.....	47
3.4.1 Fotoconductores.....	47
3.4.2 El fotodiodo de unión pn.....	49
3.4.3. El fotodiodo pin.....	51
3.4.4. El fotodiodo de avalancha	52
3.5 El fotodiodo pin como fotodetector	53

3.6	Implantación de iones	54
3.7	Ruido en Fotodetectores.....	56
3.7.1	Ruido de la fotocorriente	56
3.7.2	Ruido de circuito.....	57
3.8	Fotodetector de Radiación UV de SRO y Silicio	57
3.8.1	Detectores UV de silicio	57
3.8.2	El SRO en el fotodetector.....	59
3.8.3	Anillo de guarda	60
	Referencias	62
	Capítulo 4 Diseño del Fotodetector pin	64
	Introducción.....	64
4.1	Obtención de la profundidad de penetración de un fotón en el silicio	64
4.2	Calculo de la región de agotamiento	67
4.3	Simulación del proceso de fabricación	70
4.3.1	Características de <i>Supreem</i>	70
4.3.2	Simulación del proceso de implantación	71
4.4	Caracterización electrónica.....	79
4.4.1	Resultados obtenidos en <i>Atlas</i>	80
4.5	Aplicaciones.....	81
	Referencias	82
	Capitulo 5 Conclusiones y trabajos a futuro.....	83
5.1	Conclusiones	83

5.2 Trabajo a futuro	84
Apéndice A.....	86
Apéndice B.....	88

Figuras

Figura 1. Estructura cristalina del diamante y el silicio monocristalino (cúbica centrada en la cara)	14
Figura 2. Diagrama de bandas de energía en el proceso de cristalización	16
Figura 3. Tipos de materiales según la distribución de Bandas de energía	17
Figura 4. Semiconductor extrínseco tipo p	19
Figura 5. Semiconductor extrínseco tipo n	19
Figura 6. Estructura de las bandas de energía de a) un aislante, b) un semiconductor, c) conductor	20
Figura 7. Curvas de emisión fotoluminiscente del SRO excitado con 250 nm	22
Figura 8. La densidad de carga total atrapada en la película de SRO contra el grosor de la misma.....	23
Figura 9. Sistema de CVD.....	24
Figura 10. Sistema de PECVD	25
Figura 11. Sistema de LPCVD	26
Figura 12. Oxido de Silicio Rico en Silicio (SRO).....	27
Figura 13. Espectro electromagnético.....	31
Figura 14. Diagrama de bandas de un semiconductor.....	32
Figura 15. (a) Absorción, (b) Emisión espontánea y (c) Emisión estimulada	32
Figura 16. Diagrama de bandas de la fotoluminiscencia.....	36

Figura 17. Imágenes en tres dimensiones (3D) de un Microscopio de Fuerza Atómica (AFM) donde se muestra la rugosidad de la película dependiendo del exceso de silicio en ella.....	37
Figura 18. Intensidad de la fotoluminiscencia contra rugosidad de la película	38
Figura 19. Primeros 3 niveles de energía y funciones de onda, para una partícula de masa m confinada a una línea de longitud L	39
Figura 20. Algunas curvas de emisión de la película con $R_0=20$ irradiado con luz con una longitud de onda entre 250 y 500 nm. La línea por las máximas del primer pico indica el recorrimiento del pico con la intensidad.....	41
Figura 21. Espectros de creación de termoluminiscencia de las muestras con $R_0=10, 20$ y 30 . Los insertos muestran las curvas de brillo y los rangos de integración usados para construir los espectros	41
Figura 22. Coeficientes de absorción para diferentes longitudes de onda o energías del fotón.....	45
Figura 23. Transiciones directas e indirectas asociadas al proceso de absorción fundamental.....	46
Figura 24. Diagrama esquemático de un Fotoconductor.....	48
Figura 25. La unión pn	49
Figura 26. a) Representación esquemática de un fotodiodo de unión pn, b) Densidad de carga neta a través de la región de agotamiento del fotodiodo, c) Campo en la región de agotamiento	50
Figura 27. a) Representación esquemática de un fotodiodo pin, b) Densidad de carga neta a través de la región de agotamiento del fotodiodo, c) Campo en la región de agotamiento, d) Fotodetección del fotodiodo pin en polarización inversa	51
Figura 28. a) Representación esquemática de un fotodiodo de avalancha, b) Densidad de carga neta a través de la región de agotamiento del fotodiodo, c)	

Campo en la región de agotamiento, donde se pueden identificar las múltiples regiones de este dispositivo	53
Figura 29. Diagrama esquemático de un fotodiodo pin	54
Figura 30. Representación esquemática de un sistema de implantación de iones	55
Figura 31. Comparación de la responsividad en longitud de onda de la emisión de SRO y de diodo del silicio	58
Figura 32. Esquema del fotodetector de silicio mejorado en el UV	59
Figura 33. Integración de un Fotodetector de Silicio con una película de SRO	60
Figura 34. Diodo pn con anillo de guarda.....	61
Figura 35. Curvas de diferentes longitudes de absorción, con referencia al silicio	65
Figura 36. Grafica de profundidad de penetración contra longitud de onda	66
Figura 37. Aumento del ancho de la región de agotamiento	69
Figura 38. Crecimiento de una capa de oxido de silicio (SiO ₂).....	73
Figura 39. Grabado del SiO ₂	74
Figura 40. Deposito de la película de SRO	75
Figura 41. Profundidad de unión del fotodetector.....	76
Figura 42. Tratamiento térmico final.....	77
Figura 43. Simulación resultante	78
Figura 44. Densidad de potencia óptica contra Densidad de corriente	80

Introducción

Desde hace algunos años, la detección de radiación ultravioleta (UV) se ha presentado como una línea de investigación con un interés creciente por sus aplicaciones potenciales entre las cuales se pueden mencionar: detección de fuego, comunicaciones, medicina, detección de radiación solar, purificación de agua, monitoreo del proceso de combustión, lectores DVD y almacenamiento de información digital.

Ya existen sensores de UV comerciales pero éstos son sumamente caros debido a que el proceso de fabricación es complejo y no son compatibles con los procesos CMOS.

El silicio es el material electrónico por excelencia, ya que los procesos de fabricación se encuentran bien establecidos y el material es abundante en la naturaleza. Sin embargo el silicio no es adecuado para realizar una funciones optoelectrónicas tales como la detección de fotones de alta energía como la UV, debido principalmente a que esta energía es absorbida en la superficie del material debido a que su coeficiente de absorción para radiación UV es muy alto. Hoy en día se realizan grandes esfuerzos para encontrar materiales que sean compatibles con los procesos de fabricación del silicio y que permitan realizar funciones optoelectrónicas.

Uno de estos materiales es el SRO (*Silicon Rich Oxide*), con el cual se empezó a experimentar a finales de los años setentas. El SRO es un material de doble fase formado por islas de silicio incrustadas en una matriz de óxido de silicio (SiO_2) y sus características dependen del exceso de silicio, el cual se fabrica por diferentes métodos y que presenta propiedades optoelectrónicas interesantes, tales como la detección de radiación ultravioleta al ser incrustado dentro de una estructura CMOS.

El SRO es normalmente obtenido mediante depósito químico en fase vapor (CVD) mediante la mezcla de los gases reactivos de silano [SiH₄] y óxido nitroso [N₂O] y la razón:

$$R_o = \frac{N_2O}{SiH_4}$$

es el parámetro que determina el exceso de silicio. Para $R_o=50$ se tiene óxido de silicio estequiométrico y para $R_o=0$ se tiene silicio puro. El SRO puede ser representado como SiO_x con $0 < x < 2$. Este material presenta propiedades fotónicas interesantes dentro de las cuales la más importante para nuestros propósitos, es que este material produce fotoluminiscencia (FL) en el rango visible-infrarrojo cuando es excitado con radiación ultravioleta, además el SRO es compatible con la tecnología de fabricación del silicio. En el INAOE se desarrolló el primer sensor de este tipo por el método de difusión, pero debido a que por este proceso de fabricación no se tiene un control de la concentración de impurezas y de la profundidad de unión, se ha propuesto en este trabajo realizar la optimización del método realizando el diseño del dispositivo por el método de implantación iónica.

Objetivo

El objetivo de este trabajo es la optimización del sensor de UV desarrollado en el INAOE, la cual consiste en utilizar el método de implantación iónica en lugar del método de difusión debido a que presenta algunas ventajas entre las cuales podemos mencionar:

- Mayor control de la concentración y profundidad de las impurezas, que nos permitirá definir de manera más precisa la zona de unión.
- No produce cambio alguno de dimensiones.
- Se aplica a baja temperatura (por debajo de 150°C), de manera que no produce deformaciones.

- Puede aplicarse sobre otros tratamientos.
- Es extremadamente controlable.

Para lograr este objetivo, este trabajo se ha estructurado de la siguiente manera:

En el primer capítulo se realizará un estudio sobre el Oxido de Silicio Rico en Silicio (SRO), realizando un estudio de los materiales semiconductores, aislantes y conductores, además de sus características y algunos de sus procesos de fabricación.

En el segundo capítulo se tratarán los diferentes procesos luminiscentes, las propiedades ópticas de los semiconductores, la fotoluminiscencia en el SRO, así como sus posibles causas y la termoluminiscencia que presenta.

En el tercer capítulo se hablarán de los diferentes tipos de fotodetectores, sus características y sus procesos de fabricación. Al igual que se hace mención del fotodetector anterior a este trabajo desarrollado en el INAOE.

En el cuarto capítulo se hablará sobre el diseño del dispositivo, la razón por la cual se decidió por la técnica de implantación, se mostrarán los resultados obtenidos en las simulaciones por computadora del dispositivo utilizando *Supreem 3.0 de Athena*, entre las cuales se hace énfasis en las simulaciones del diseño del dispositivo, etapa por etapa, y las graficas de su respuesta eléctrica.

En el quinto capítulo se describen las conclusiones y recomendaciones referentes a este trabajo. Al igual que se propondrán trabajos a futuro que se pueden realizar.

CAPÍTULO 1

Óxido de Silicio Rico en Silicio

Introducción

La Electrónica es la ciencia que se encarga del estudio del flujo de electrones mientras que la fotónica se encarga de estudiar el flujo de fotones. La electrónica y la fotónica se han unido en dispositivos semiconductores optoelectrónicos donde los fotones generan electrones libres, y los electrones generan y controlan el flujo de fotones.

Un semiconductor es un sólido amorfo o cristalino cuya conductividad se encuentra entre la de un material conductor y un aislante y puede ser cargado significativamente alterando la temperatura o el contenido de impurezas del material, o bien por iluminación de una fuente luminosa. En este capítulo se presenta un estudio de los procesos ópticos que ocurren en los materiales semiconductores, tales como absorción y fotoluminiscencia. Además se presenta el estudio de las propiedades y métodos de fabricación del SRO que lo hacen atractivo para algunas aplicaciones fotónicas y compatible con la tecnología CMOS de fabricación del Silicio.

1.1 Materiales Semiconductores

A los estados en los que se puede encontrar un electrón al ser confinado en una zona con un potencial eléctrico inferior al espacio que lo rodea, se les denominan Orbitales. A cada orbital, le corresponde una energía dada, que describe el estado que el electrón puede ocupar.

La disposición de los diferentes orbitales, permite establecer las afinidades de unos elementos con otros o entre sí mismos. La energía de un electrón viene definida por el orbital que ocupa en el átomo. Orbitales en el mismo nivel se diferencian poco en energía, y es posible que un electrón ocupe uno u otro de los mismos con pequeños saltos energéticos que vienen alimentados por la agitación térmica de la materia.

Muchos elementos pueden llegar a ser ionizados mediante un aporte de energía, que obtienen del entorno siempre que éste se encuentran a cierta temperatura no nula. Estos elementos se ionizan, es decir, adquieren una carga positiva si han perdido un electrón o varios, o bien una carga negativa si han absorbido un electrón o varios. Los iones, cargados de forma contraria, se atraen electrostáticamente, y configuran estructuras cristalinas, generalmente del tipo cúbico sencillo ya que la influencia electrostática que generan tiene simetría esférica. Aunque el proceso de ionización requiere absorción de energía, ésta se devuelve con creces cuando se produce la ligadura de ambos iones de forma electrostática. Este tipo de enlace así formado se le denomina electrovalente¹.

Si en cambio los elementos solo comparten electrones de la última orbita y estos se llenan con electrones de otro vecino, generando un enlace atómico muy estable, denominado enlace covalente, en las que las fuerzas de las ligaduras están vinculadas a la interacción electromagnética y cuántica entre electrones compartidos y cada uno de sus núcleos².

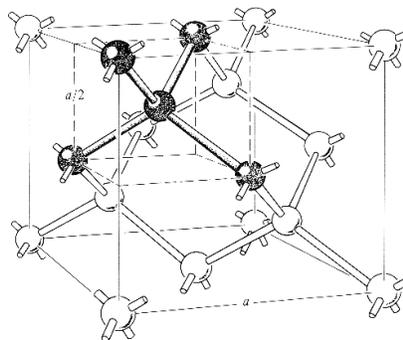


Figura 1. Estructura cristalina del diamante y el silicio monocristalino (cúbica centrada en la cara)

Los cristales son formas de ordenación de átomos en forma rectangular, siguiendo una cierta regla de repetición, que da lugar al estado sólido, dependiendo del tipo de enlace que lo sustente. La separación entre átomos de la malla cristalina está bien definida y es periódica según diferentes direcciones de alineamiento. Si es un enlace electrovalente origina un tipo de cristal concreto, mientras que un enlace covalente genera un tipo de cristal con una estructura distinta, como el que se muestra en la Figura 1, también de gran solidez. La diferencia fundamental entre ellos estriba en que el enlace electrovalente puede ser disuelto por el agua, mientras el covalente no. El cristal tipo electrovalente suele ser aislante, porque no queda carga electrónica libre para conducir. La fundamentación del enlace covalente puede explicar el comportamiento electrónico de conductores, aislantes y semiconductores³.

1.1.1 Conductores, aislantes y semiconductores

La distancia que define la periodicidad de una red cristalina, determina el grado de interacción entre los electrones de los orbitales externos (valencia), de modo que las bandas de conducción y de valencia pueden adoptar diferentes configuraciones, dependiendo si quedan separadas por una banda prohibida, o si resultan encimadas, como las diferentes situaciones que se muestran en la Figura 2, así como el grado de ocupación de los orbitales contenidos en cada capa. Así, la distancia de cristalización corresponde con r_1 las Bandas de conducción y de valencia quedan separadas por una banda prohibida de valor E_g . Si la banda de valencia está totalmente llena y la de conducción totalmente vacía, la situación resultante queda reflejada en las figuras 3.a y b. Estos materiales no son conductores de modo espontáneo. Si el valor de E_g supera los 2 eV, el material tiende a ser aislante, ya que resulta difícil que algún electrón de la banda de valencia salte a la banda de conducción para que facilite el movimiento de carga³.

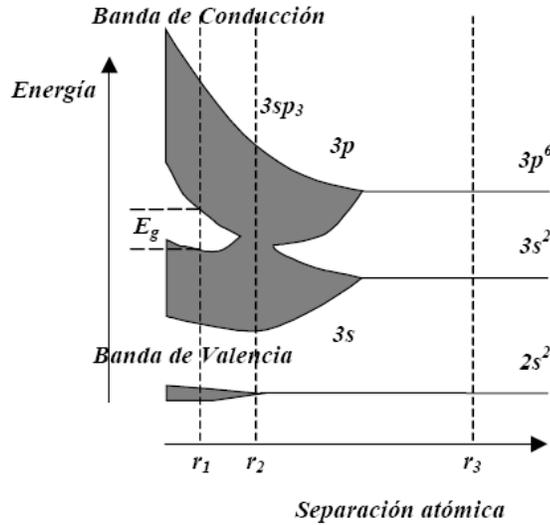


Figura 2. Diagrama de bandas de energía en el proceso de cristalización

1.1.1.1 Aislante

La estructura de bandas de energía de la figura 3a y 6a muestra a un aislante. Este material tiene una gran banda prohibida que separa la banda de valencia llena, de la banda de conducción vacía. Haciendo que la energía que se le puede suministrar a un electrón, desde un campo exterior, resultase demasiado pequeña para llevar la partícula desde la banda llena a la banda vacía. Como el electrón no puede adquirir la suficiente energía, esto hace que la conducción sea imposible³.

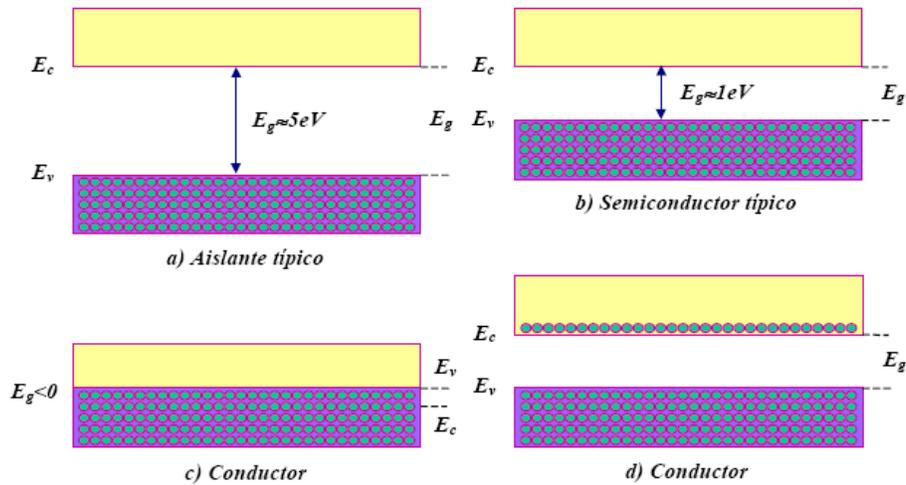


Figura 3. Tipos de materiales según la distribución de Bandas de energía.

1.1.1.2a Semiconductor

Un material cuyo ancho de banda prohibida es relativamente pequeño ($\sim 1 eV$), se denomina semiconductor⁴.

Los semiconductores son un grupo de materiales que tienen conductividad entre los metales conductores y los aislantes. Los cuales se pueden colocar en dos clasificaciones generales: los materiales semiconductores generales, en el grupo IV de la tabla periódica, y los materiales semiconductores compuestos, los cuales son formados por una combinación de los elementos del grupo III y V. En la Tabla 1 se muestra una porción de la tabla periódica y los materiales semiconductores elementales⁵.

III	IV	V	Semiconductores elementales	
B	C		Si	Silicio
Al	Si	P	Ge	Germanio
Ga	Ge	As		
In		Sb		

Tabla 1. Porción de la tabla periódica y semiconductores elementales.

Los semiconductores elementales son el silicio y el germanio, que tienen valores de E_g de 1.21 y 0.785 respectivamente, $^{\circ}K$. Esta energía no puede ser adquirida normalmente desde un campo aplicado de manera externa, por lo que la banda de valencia permanece llena y la de conducción vacía, por eso es que estos materiales se comportan como aislantes a bajas temperaturas. Pero si se les aumenta la temperatura su conductividad aumenta, dado que son semiconductores intrínsecos y se comportan como conductores.

1.1.1.2b Semiconductores intrínsecos y extrínsecos.

Los semiconductores intrínsecos son aquellos que se encuentran de manera pura, es decir, sin ningún material adicional que se pueda considerar como una impureza y que presentan una conductividad nula a bajas temperaturas, pero que pueden ser débilmente conductores a temperatura ambiente, debido a que la anchura de su banda prohibida no es elevada. A medida que la temperatura aumenta, algunos electrones de valencia adquieren una energía térmica mayor que E_g , y por tanto se mueven hacia la banda de conducción. A partir de este momento, son electrones libres en el sentido de que pueden moverse bajo la influencia de cualquier campo exterior aplicado. El material que antes era aislante ahora sea convertido en un conductor, esta característica de poder cambiar entre los dos estados electrónicos hace que se le considere como semiconductor^{3, 4}.

Por su lado los semiconductores extrínsecos son aquellos a los que se les ha introducido un elemento contaminante, llamado impureza, generalmente del grupo III o V de la tabla periódica, que cambia bruscamente las propiedades de conducción de los materiales intrínsecos, reduciendo enormemente la resistividad del mismo. La razón para que suceda tal cosa es que el material contaminante es del tipo III (Boro: B, Aluminio: Al, Galio: Ga o Indio: In) y los átomos de dicho material completan solamente 3 enlaces covalentes, quedando un enlace covalente incompleto, que puede ser completado por un electrón de un orbital vecino de un átomo de silicio con una pequeña aportación de energía del entorno. Si esto sucede se genera una ausencia de un orbital abandonado, que se

denomina hueco. Así, la consecuencia de impurificar con estos materiales, llamados aceptores, es la aparición de un hueco por cada átomo de impureza introducido en el cristal y generan un material del tipo p como se muestra en la figura 4. Si el material dopante es del grupo V (Fósforo: P, Arsénico: As o Antimonio: Sb), sobra un electrón débilmente ligado, que podría pasar a la banda de conducción y dando como resultado un material del tipo n como se muestra en la figura 5.³

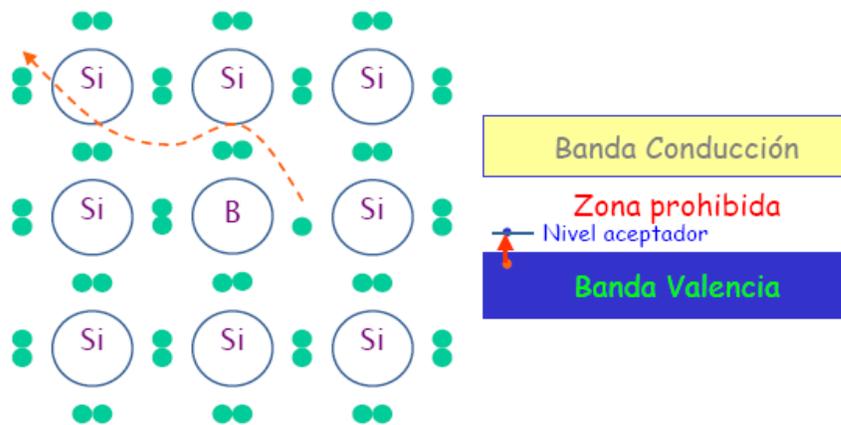


Figura 4. Semiconductor extrínseco tipo p

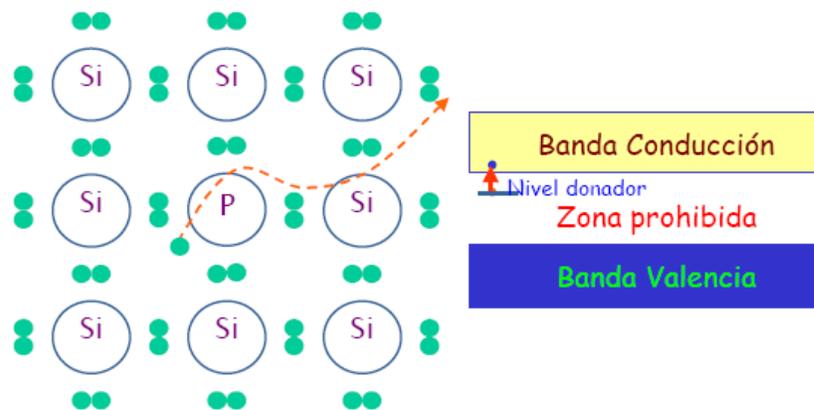


Figura 5. Semiconductor extrínseco tipo n

1.1.1.3 Conductor

Un sólido que contenga una estructura de banda parcialmente llena se denomina conductor. Con la influencia de un campo eléctrico los electrones pueden adquirir una energía adicional y cambiar a etapas más elevadas. Ya que estos electrones móviles constituyen una corriente, por esta razón estos materiales son conductores y la región parcialmente llena es la banda de conducción. En su diagrama de bandas como se muestra en la Figura 6c se puede ver que sus bandas de conducción y valencia se encuentran superpuestas, a lo que se debe su característica.⁴

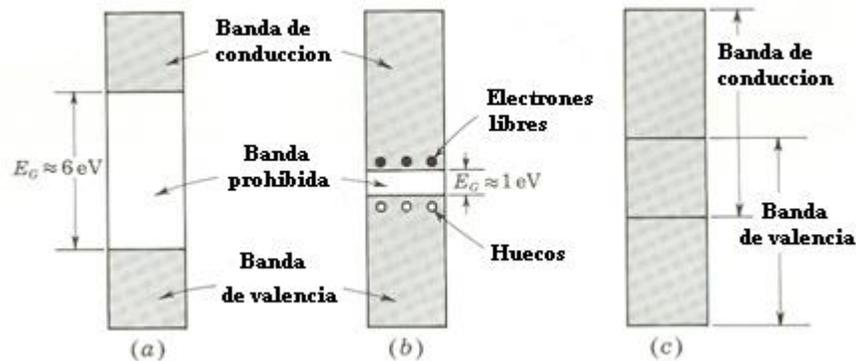


Figura 6. Estructura de las bandas de energía de a) un aislante, b) un semiconductor, c) conductor.

1.2 Oxido de Silicio Rico en Silicio.

El descubrimiento de propiedades optoelectrónicas en algunos materiales basados en silicio; como el óxido de silicio fuera de estequiometría (SiO_x , $x < 2$, o SRO) a finales de la década de los 70's, abrió la posibilidad de integrar funciones fotónicas a la tecnología del silicio. Esto no era posible con el Silicio debido a que éste es un semiconductor que posee una banda indirecta, es decir el decaimiento desde niveles excitados ocurre a través de procesos no-radiativos (lo cual hace del silicio un pésimo material para manejar señales ópticas).

1.2.1 Características del Óxido de silicio rico en silicio

El óxido de silicio fuera de estequiometría también conocido como poli silicio semiaislante (SIPOS) u óxido de silicio rico en silicio, SRO por sus siglas en inglés, es un material formado por una matriz de dióxido de silicio con exceso de silicio. La fórmula SiO_2 ya no es válida y en su lugar se tiene que usar la de SiO_x donde el valor de x queda determinado dependiendo del contenido de oxígeno, por lo general está delimitado entre [0-2]; teniendo que cuando $x=2$ es Dióxido de Silicio (SiO_2) y si $x=0$ es poliSilicio; mientras que, si el valor de x se encuentra comprendido entre 0 y 2 es Silicio policristalino semiaislante (SIPOS).

Este material se obtiene normalmente por Deposito Químico en Fase Vapor a Baja Presión (Low Pressure Chemical Vapor Deposition, LPCVD) con Silano y Óxido nitroso como gases reactivos. En este método, la razón de flujo de gases⁵:

$$Ro = \frac{N_2O}{SiH_4} \quad [1.1]$$

se usa como un parámetro que determina el exceso de silicio. Otros métodos por los cuales se puede obtener SRO son:

- Óxidos Térmicos Implantados con Silicio (SITO)
- Deposito Químico en Fase Vapor Activado por Plasma (PECVD)

Se considera el LPCVD como el método más eficiente para obtener el SRO debido a que las películas se obtienen con una excelente uniformidad, baja densidad de defectos y una excelente cobertura topográfica.

Cuando se somete el SRO a un proceso de recocido, adquiere propiedades fotónicas sobresalientes. Estas propiedades, aparecen como consecuencia de diversos efectos, derivados del recocido, como son: consolidación y cambio de tamaño de las nano-estructuras (cristalinas) de silicio, aparición de especies químicas en la superficie de los nanocristales, con propiedades fotoluminiscentes

propias, y debido también al acoplamiento de excitones con vibraciones locales de las redes cristalinas, entre otras.

Por otro lado, como es sabido, una medida de la capacidad fotonica de un material, se obtiene midiendo su respuesta a una excitación óptica. Es decir efectuando experimentos de foto y catodoluminiscencia (PL y CL) con este material. En la Figura 7 se puede observar la curva de emisión fotoluminiscente de una muestra de SRO con $R_0=30$, una implantación de silicio de 5×10^{15} átomos/cm³ y con diversos tratamientos térmicos a 1100°C⁶, en esta figura podemos observar el pico máximo de emisión del SRO después de ser excitado a una longitud de onda de 250nm, el cual es a una longitud de onda de 750 nm dando casi los 1.8 eV de energía en el fotón que emite, dando 225 U.A. (Unidades Arbitrarias) de su intensidad fotoluminiscente.

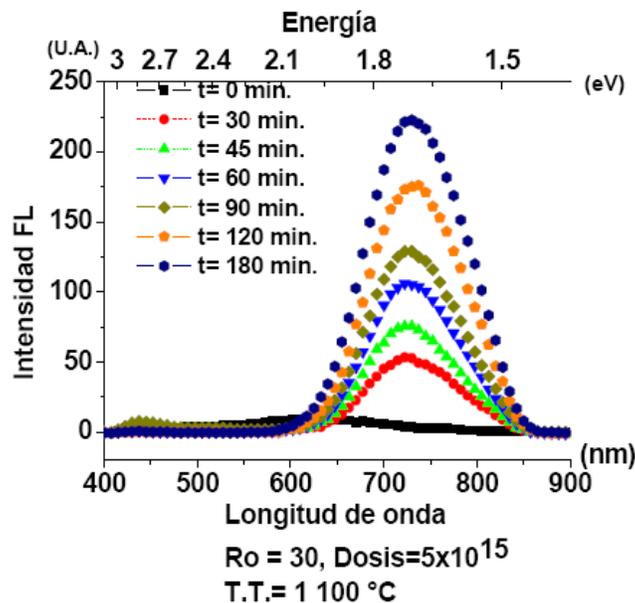


Figura 7. Curvas de emisión Foto luminiscente del SRO excitado con 250 nm.

Varios efectos del SRO dependen de las características de la película uno de ellos es el efecto de trampa de carga el cual está en función del grosor de la película de SRO como se muestra en la figura 8, la densidad de carga atrapada se

incrementa con el grosor de la película, aproximadamente en una relación lineal. De la forma:

$$N = N_0 + N_b d_{ox} = 1.08 \times 10^{12} + 1.87 \times 10^{16} d_{ox} \text{ (cm}^{-2}\text{)} \quad [1.2]$$

donde N es la densidad de carga atrapada total en el SRO por unidad de área, N_0 es la densidad de carga cuando el grosor es aproximado a 0 (d_{ox}); N_b es la densidad de volumen de las cargas atrapadas en la mayor parte de la capa del SRO, y esta parte de las cargas se supone que están uniformemente distribuidas en el grueso de la capa de SRO⁷.

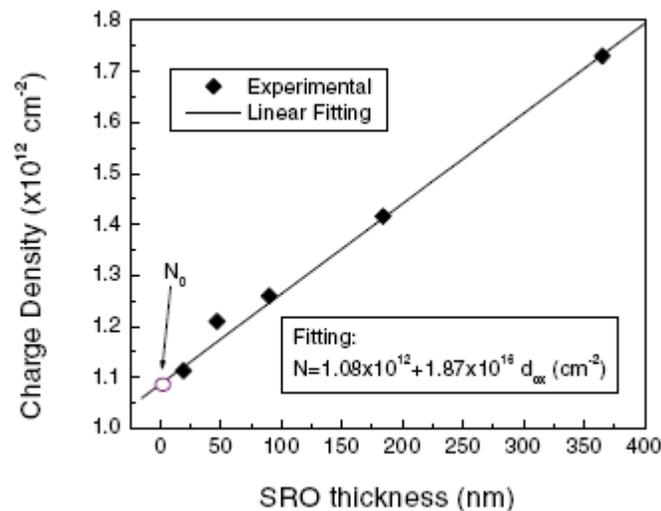


Figura 8. La densidad de carga total atrapada en la película de SRO contra el grosor de la misma.⁷

1.3 Métodos de fabricación del SRO.

El SRO es uno de los materiales que presentan las mejores perspectivas para realizar funciones fotónicas, el cual se puede obtener por diferentes técnicas de fabricación, tales como: Deposito Químico en Fase Vapor a Baja Presión (LPCVD), Deposito químico en fase Vapor Asistido por Plasma (PECVD) o bien por implantación de iones (SITO), entre muchas más. En general el sustrato es Silicio sobre el cual se deposita la película de oxido no estequiométrico.⁸

1.3.1 Deposito Químico en Fase Vapor (CVD).

La técnica de depósito químico en fase vapor consiste en la reacción de una mezcla de gases en el interior de una cámara, que da lugar a la formación de un material de forma de capa delgada. Los sub-productos de la reacción son evacuados hacia el exterior mediante un sistema de alta velocidad de bombeo. Esta técnica es útil para el depósito de óxidos de silicio, así como para depositar capas amorfas, policristalinas o cristales simples.⁹

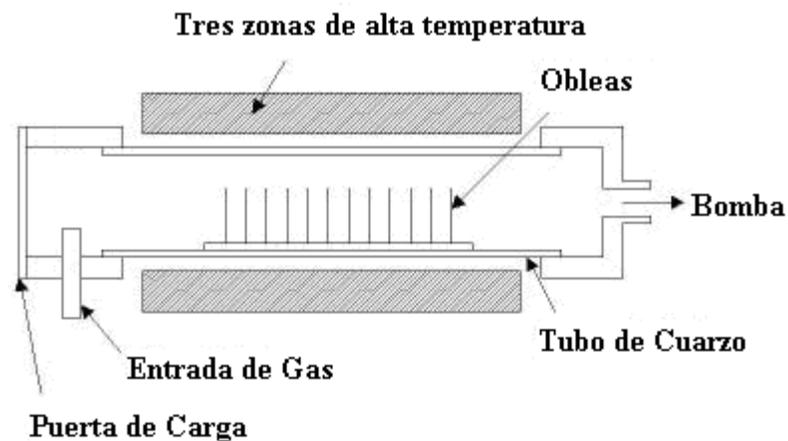


Figura 9. Sistema de CVD

Existen diferentes técnicas de CVD dependiendo el modo de activación de la reacción de la mezcla gaseosa durante el proceso de depósito, entre las más usadas se encuentran:

- Deposito químico en fase de vapor asistido por plasma (PECVD)
- Deposito químico en fase de vapor a baja presión (LPCVD)
- Deposito químico en fase de vapor a presión atmosférica (APCVD)

1.3.2 Deposito Químico en fase Vapor Asistido por Plasma. (PECVD)

El proceso PECVD utiliza un reactor a temperatura de hasta 400°C, donde la película depositada es producto de una reacción química entre los gases introducidos al reactor. Un plasma es generado en el reactor para incrementar la energía disponible para la reacción química a una temperatura dada. Los óxidos depositados mediante esta técnica tienen altas concentraciones de hidrógeno; la composición exacta depende de la potencia de la cámara y de los flujos de gas; cuando se incrementa la potencia del plasma, se produce un incremento en la razón del depósito.⁹

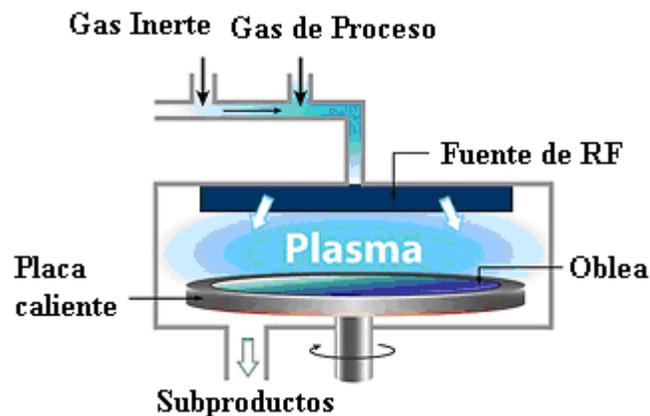


Figura 10. Sistema de PECVD

1.3.3 Deposito Química en Fase Vapor a Baja Presión (LPCVD).

Este método para obtener películas de un material en el cual los constituyentes de la fase de vapor reaccionan para formar un sólido en una superficie. Las películas depositadas por LPCVD presentan una excelente uniformidad, baja densidad de efectos y excelente cobertura topográfica¹⁰. El depósito de residuos sobre las paredes tiene una fuerte adherencia y no tienden a precipitarse sobre la oblea, evitando de esta forma la contaminación de la misma.⁹

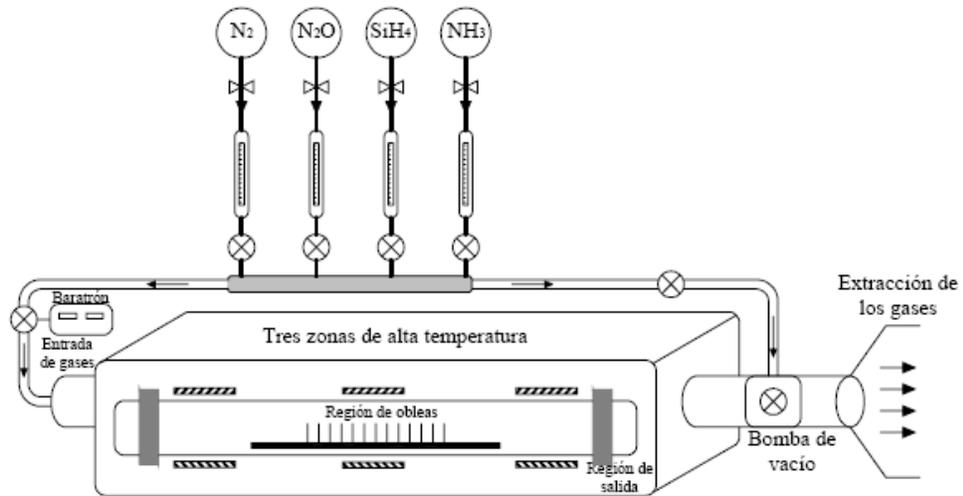


Figura 11. Sistema de LPCVD

En el proceso de LPCVD el exceso de silicio en la película de SRO se controla a través de la razón R_0 , que se define por el cociente de los gases de reacción utilizados durante el crecimiento de la película. Este método permite obtener películas de SRO con diversos excesos de silicio; por lo que valores de R_0 comprendidos entre 10 y 30 generan excesos de silicio en el SRO, entre 12.73 y 4.24%.⁹

1.4 Aplicaciones del SRO

Como se vió en este capítulo, el SRO presenta propiedades optoelectrónicas interesantes que lo hacen atractivo para diferentes aplicaciones entre las que podemos mencionar, el desarrollo de sensores Ultravioleta que es el motivo de este trabajo, esto permitiría la mejora de los sensores de radiación ultravioleta en base a silicio, otras de las aplicaciones propuestas son, la de un dispositivo de emisión de luz, por sus efectos de trampa de carga debidos a la característica nanocrystalina del SRO que se muestra en la figura 12, una estructura nanocrystalina quiere decir que un material tiene cristales o estructuras cristalinas de tamaño de nanómetros y están en forma de pequeñas islas incrustadas en el, también se ha propuesto para dispositivos de memoria no volátil o eléctricamente alterable, supresores de carga, microsensores y cámaras

CCD. Para esta última aplicación y para muchas otras se propone desarrollar un arreglo de sensores de UV, para así poder realizar detección de imágenes.

Además de la fotoluminiscencia, el SRO presenta: Electroluminiscencia que lo hace atractivo para aplicaciones en sistemas de iluminación como LEDs y LASERs. Sensibilidad Fotovoltaica la cual es muy interesante para su aplicación en el desarrollo de Celdas solares. Termoluminiscencia, con lo cual se pueden desarrollar dosímetros para medir y cuantificar dosis de radiación.

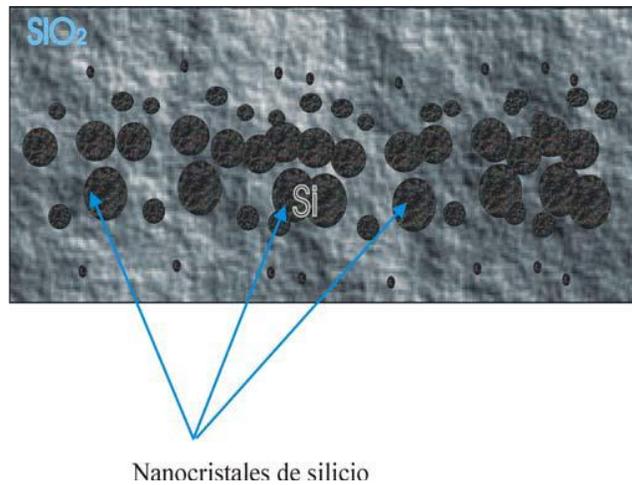


Figura 12. Oxido de Silicio Rico en Silicio (SRO)

Referencias

- 1.- Holger Grahn, "Introduction to semiconductor physics", World scientific publishing, (1999).
- 2.- A. S. Grove, "Physics and technology of semiconductor devices", John Wiley & Sons
- 3.-Pedro Gómez Vilda. "Fundamentos físicos de la informática", Universidad Politécnica de Madrid. (2000)
- 4.- Armando Gregorio Rojas Hernandez. "Aplicaciones de películas delgadas dopadas con erbio", Tesis de Licenciatura Universidad Autónoma de Puebla. (1996)
- 5.- Berman Mendoza Dainet, Aceves Mijares Mariano, Berriel Valdós Luis Raúl, Domínguez Carlos, IV Encuentro de Investigación de, INAOE, "Sensor de Radiación Ultravioleta fabricado con SI SRO" INAOE, Puebla, México. (2002)
- 6.- Berman Mendoza Dainet, Aceves Mijares Mariano, "Silicon excess and thermal annealing effects on the photoluminescence of SiO₂ and silicon rich oxide super enriched with silicon implantation", Physics Status Solidi. (2004)
- 7.- Zhenrui Yu, Mariano Aceves, Jesus Carrillo and Francisco Flores "Single electron charging in Si nanocrystals embedded in silicon-rich oxide", Department of Electronics, INAOE, CIDS-BUAP
- 8.-Z. Yu, M. Aceves et. Al. "Photoluminescence and single electron effect of nanosized silicon materials", Editorial Nova.
- 9.- Rosa Elvia López Estopier. "Estudio de Efecto del Nitrógeno en la fotoluminiscencia de películas de SRO depositadas por LPCVD", Tesis de Maestría INAOE, (2005)

10- Dainet Berman Mendoza. "Sensor de Radiación de Silicio y SRO con eficiencia mejorada en el UV", Tesis de Doctorado INAOE, (2005).

Capítulo 2

Procesos Luminiscentes

Introducción

Una fuente de energía externa aplicada puede causar que un sistema molecular o atómico transite de un nivel de energía bajo a uno más alto. Cuando se decae a un nivel de energía más bajo, el sistema puede subsecuentemente emitir radiación óptica. Este proceso es conocido como luminiscencia. En otras palabras, la luminiscencia se define como el decaimiento de un átomo o molécula por emisión de fotones. Este fenómeno ocupa un rol fundamental en la vida. Procesos como la visión y logros como el secuenciamiento del genoma humano y la tecnología de la información serían imposibles de concebir sin la luminiscencia. La excitación del material luminiscente es un prerequisite para la emisión. La termoluminiscencia no es nueva en materiales nanocristalizados, en lo que se refiere a trabajos previos de termoluminiscencia en otros materiales nanocristalizados, se ha encontrado emisión en $Y_3Al_5O_{12}:Er^{3+}$ y $Y_3Al_5O_{12}:Yb^{3+}$ al ser excitados con radiación β .¹

Para el desarrollo de este trabajo hay que tomar en cuenta los diferentes procesos luminiscentes que hay, para comprender esto en este capítulo se mencionarán los diferentes tipos de procesos luminiscentes y se estudiará los dos principales que aparecen en las películas de SRO que son Fotoluminiscencia y Termoluminiscencia.

2.1 Propiedades ópticas de los semiconductores

En la figura 13 se muestra el espectro electromagnético. El ojo humano puede detectar la luz con longitudes de onda aproximadamente $0.4\mu m$ a $0.7\mu m$, lo que normalmente se conoce como espectro visible. Las mediciones ópticas usan la

porción que comprende desde el ultravioleta hasta el infrarrojo cercano basadas en los parámetros de longitud de onda (λ) y energía (E o $\hbar\omega$). La relación entre la longitud de onda y la energía del fotón resultante está dada por:²

$$\lambda = \frac{1.24}{\hbar\omega} \quad [2.1]$$

donde $\hbar\omega$ es la energía del fotón en eV y la longitud de onda (λ) está dada en μm .

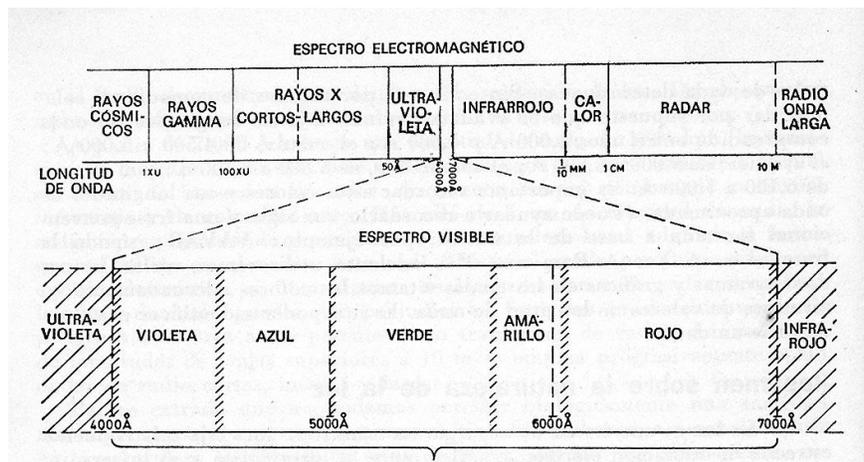


Figura 13. Espectro electromagnético

2.1.1 Absorción óptica en los semiconductores

En un semiconductor, los electrones se encuentran en dos bandas de energía, como se muestra en la figura 14, llamadas bandas de valencia y conducción, de la interacción de partículas de carga entre estas dos bandas puede resultar la emisión o absorción de radiación electromagnética³.

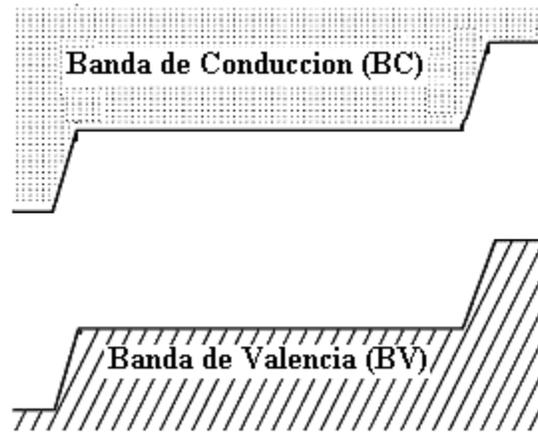


Figura 14. Diagrama de bandas de un semiconductor

Cuando un semiconductor es iluminado, los electrones son absorbidos para crear un par electrón-hueco. Un par electrón-hueco se genera cuando un electrón pasa de un estado en reposo a un estado de excitación, la interacción entre un fotón y un electrón permite la generación de tres procesos en un semiconductor, los cuales son la absorción, la emisión espontánea y la emisión estimulada de un fotón como se muestra en la figura 15.^{2, 4}

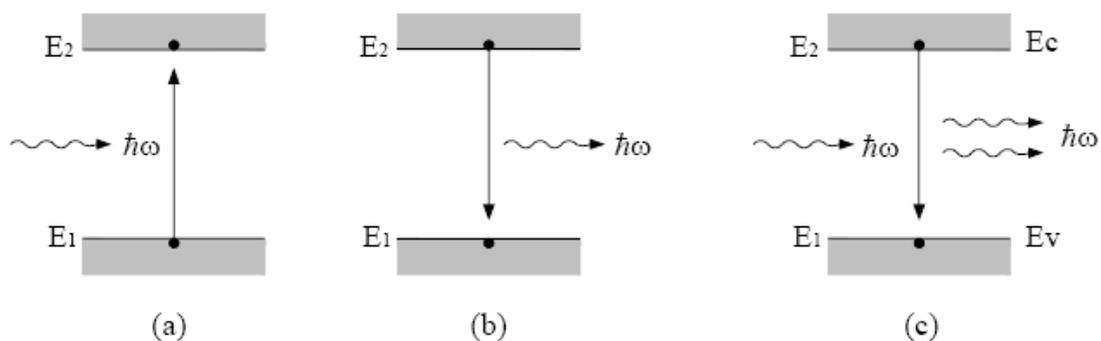


Figura 15. (a) Absorción, (b) Emisión espontánea y (c) Emisión estimulada

a) Absorción

Al hacer incidir luz sobre un semiconductor, si la energía incidente es mayor a la energía de la banda prohibida (E_g) del material, el fotón es absorbido y su energía es transferida a un electrón de la banda de valencia, excitándolo hacia la banda de conducción y generando un par electrón hueco, como se observa en la

figura 15a. Si la energía del fotón es menor que la energía E_g del semiconductor, el fotón no es absorbido ya que el material es transparente para longitudes de onda más grandes que:

$$\lambda = \frac{hc}{E_g} \quad [2.2]$$

donde λ es la longitud de onda de la luz incidente, h es la constante de Planck, c es la velocidad de la luz en el vacío y E_g es la energía de la banda prohibida del material semiconductor.^{4,5}

En la fabricación de dispositivos fotodetectores, es importante conocer la profundidad de penetración de un fotón, es decir la distancia a la cual el fotón es absorbido, la cual podemos determinar mediante: ^{4,5}

$$x_j = \frac{1}{\alpha} \quad [2.3]$$

donde x_j es la profundidad de penetración del fotón, y α es el coeficiente de absorción del material. Para conocer la cantidad de luz absorbida por el material se usa la ley de Lambert: ³

$$I = I_0 \exp(-\alpha x_j) \quad [2.4]$$

donde : I_0 es la intensidad inicial, x_j es la distancia de penetración y α es el coeficiente de absorción.

b) Emisión espontánea

Una vez ocurrida la absorción el estado excitado del átomo es inestable. Después de un corto tiempo y sin ningún estímulo externo, ocurre una transición espontánea de la banda de conducción a la banda de valencia, como se observa en la figura 15b. Estas transiciones pueden ser radiativas o no radiativas. Para semiconductores directos las transiciones radiativas son usualmente dominantes, emitiendo fotones con fases y direcciones estadísticamente distribuidas La razón

de emisión espontánea es proporcional a la densidad de estados y a la probabilidad de ocupación.^{2, 6}

c) Emisión estimulada

La emisión estimulada es el proceso inverso a la absorción, cuando un fotón con energía E afecta a un electrón mientras está en su estado excitado (banda de conducción), el átomo puede ser estimulado a hacer una transición a la banda de valencia, como se muestra en la figura 15c. Aquí los fotones son creados viajando con la misma orientación de la fase y dirección de propagación de la onda excitadora. La radiación estimulada es monocromática debido a que cada fotón tiene precisamente una energía E y es coherente debido a que todos los fotones emitidos están en fase. Las razones de transición son controladas por la densidad de fotones y las densidades de ocupación de los niveles de energía participantes.^{2,6}

2.2 Procesos Luminiscentes

Una emisión luminiscente se presenta cuando ocurre un proceso de recombinación radiactivo, y de acuerdo a la energía que provoca el decaimiento del electrón, se clasifica en: ⁷

- Fotoluminiscencia: Ocurre cuando un material es excitado con fotones (ya sea luz visible, ultravioleta e infrarroja).
- Roentgenoluminiscencia: ocurre cuando se excita un material con fotones de alta energía (como son rayos X, rayos gamma).
- Electroluminiscencia: Este ocurre cuando se excita un material por medio de un campo eléctrico.
- Catodoluminiscencia: Ocurre cuando a un material se le aplica un bombardeo de electrones, o un flujo de rayos catódicos.
- Radioluminiscencia: Este ocurre cuando se hace incidir en el material partículas de alta energía (alfa, beta).

- Quimioluminiscencia: Ocurre cuando la energía que provoca la excitación es derivada de una reacción química.
- Bioluminiscencia: Es cuando la reacción química se produce en un organismo vivo.
- Sonoluminiscencia: Es cuando el material se excita por medio de ultrasonido.
- Triboluminiscencia: Ocurre cuando al material se le aplica algún tipo de presión.
- Incandescencia: Ocurre cuando un material se excita térmicamente.
- Termoluminiscencia: Es la remoción de los estados excitados por medio de una estimulación térmica.
- Magnetoluminiscencia: Ocurre cuando se le aplica un campo magnético al material.

En este trabajo se utiliza principalmente la fotoluminiscencia por lo cual se hará una mayor mención en ella, aunque no se descartará la termoluminiscencia la cual también se mencionaran ya que puede promover trabajos a futuro sobre el sensor.

2.3 Fotoluminiscencia

La fotoluminiscencia (FL) como se ha mencionado, es la emisión de luz por un material que se encuentra bajo la excitación óptica y es generalmente donde un material absorbe luz con una longitud de onda baja y emite en una longitud de onda mayor, normalmente la luz estimulante es radiación ultravioleta.⁴

Se considera que la fotoluminiscencia se produce básicamente por tres pasos:²

- I. Absorción de energía de excitación y estímulo de los átomos hacia un estado excitado.
- II. Transformación y transferencia de la energía de excitación.
- III. Emisión de luz y relajación a un estado no excitado.



Figura 16. Diagrama de bandas de la fotoluminiscencia

En la figura 16 podemos observar el diagrama de bandas de la FL, donde un estímulo excita a un electrón de la banda de valencia hacia la banda de conducción, desde donde decae no radiativamente hasta un nivel E₂. El cual es llamado nivel metaestable (trampa dentro de la banda prohibida). Donde después de un periodo de tiempo se empiezan a acumular electrones y llegan a un punto donde este estado contiene más electrones que la banda de valencia y entonces los electrones decaen radiativamente emitiendo un fotón con una longitud de onda mas grande, pero de menor energía, de esta forma la intensidad de la luz emitida es proporcional a la intensidad de la luz estimulante.³

Si deseamos saber niveles de energía pertenecen la luz emitida y la luz absorbida, lo podemos relacionar mediante: ⁴

$$E = hf \quad [2.5]$$

donde E es la energía de la banda prohibida, h es la constante de Planck y f es la frecuencia de la luz.

Esta propiedad de FL del SRO lo convierte en un material muy interesante, las posibles causas de su FL aun se encuentran en un debate constante, pero como ya se ha mencionado anteriormente se toman como modelos más aceptados el confinamiento cuántico en los nanocristales y los defectos de interfaces del nanocristal.

2.3.1 Fotoluminiscencia en el SRO

El mecanismo de emisión de las películas de SRO se encuentra bajo un debate científico. En la actualidad dos modelos que explican la emisión de este tipo de materiales son los más aceptados: el primero nos dice que la emisión es debida a los confinamientos cuánticos presentes en los nanocristales de silicio y el segundo modelo atribuye la emisión a los defectos en la interface del nanocrystal del silicio con el oxido.²

La intensidad de la fotoluminiscencia del SRO tiene una dependencia de la morfología de la película delgada. Esto es debido a la disminución del exceso de silicio durante la fabricación de la película delgada. Conforme disminuye la cantidad de silicio en la película, su rugosidad aumenta como se muestra en la figura 17.⁹

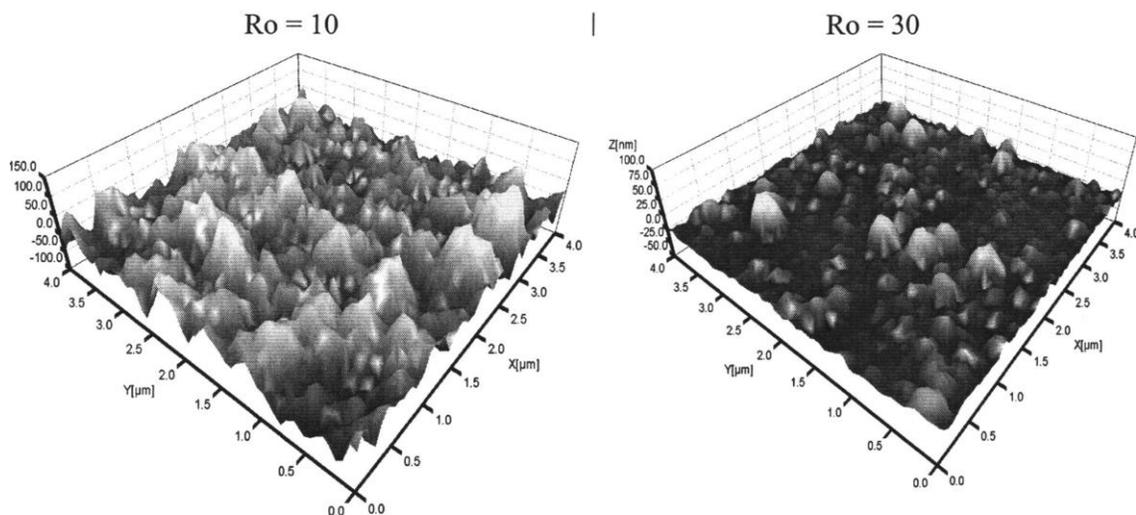


Figura 17. Imágenes en tres dimensiones (3D) de un microscopio de fuerza atómica (AFM) donde se muestra la rugosidad de la película dependiendo del exceso de silicio en ella.

Como podemos observar el SRO con $R_0=30$ tendrá una mayor fotoluminiscencia que el $R_0=10$, esto se puede ver en la figura 18, donde se hace una comparación de la rugosidad de la película con la intensidad de la fotoluminiscencia de ésta.⁹

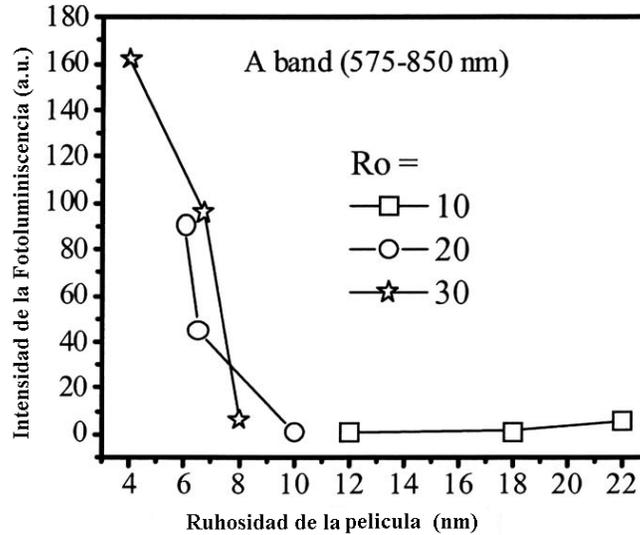


Figura 18. Intensidad de la Fotoluminiscencia contra rugosidad de la película.

2.3.2 SRO y sus posibles causas de fotoluminiscencia

Como ya se ha mencionado antes para explicar las causas de la fotoluminiscencia del SRO hay dos teorías altamente aceptadas una es el confinamiento cuántico en los nanocristales de silicio y el segundo a los defectos de interfaces del nanocristal.

2.3.2.1 Confinamiento cuántico

Es bien sabido que el silicio cristalino no es conveniente para aplicaciones optoelectrónicas, debido a que existen muchos fenómenos no radiativos que suprimen la recombinación radiativa de los pares electrón-hueco. Para incrementar su eficiencia cuántica, se puede limitar el movimiento del electrón en un espacio reducido, por lo tanto reducir las probabilidades de encontrar defectos y la incidencia de un fenómeno no radiativo.²

El SRO es un material de óxido sub-estioquiométrico, SiO_x ($x=2$), que después de aplicársele tratamientos térmicos se obtiene una separación de fase compuesta de islas de silicio rodeadas de silicio (Si/SiO_2). En el silicio de pequeñas dimensiones (silicio ~5 nm) tiene un comportamiento diferente cuando

se observan sus propiedades. Estos son los puntos donde se dan los fenómenos denominados confinamiento cuántico.²

Los electrones al estudiarlos como partículas, el confinamiento cuántico les puede ocurrir en una, dos o tres dimensiones, lo cual dependerá de la forma de la nanoestructura. Si se considera una partícula libre en una dimensión, y basándose en la teoría cuántica, una partícula de masa m es confinada a una longitud de L por barreras infinitas como se muestra en la figura 19, las longitudes de ondas tomarán valores discretos dados por: ⁸

$$\lambda = \frac{2L}{n}, n = 1, 2, 3, \dots \quad [2.6]$$

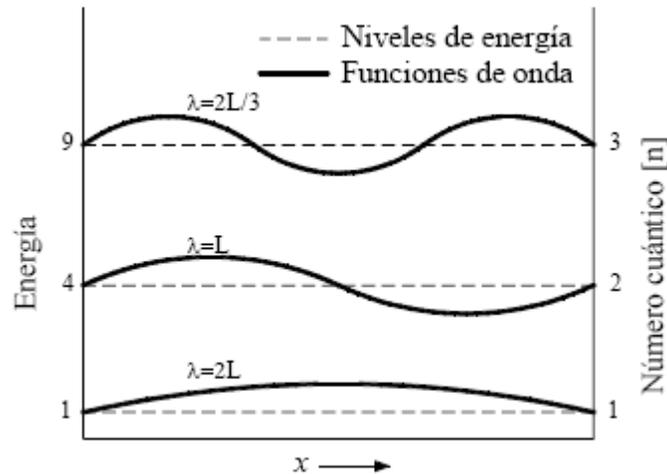


Figura 19. Primeros 3 niveles de energía y funciones de onda, para una partícula de masa m confinada a una línea de longitud L .

Cuando la energía de la partícula se incrementa, entonces a esa energía se le conoce como energía de confinamiento de la partícula. Al efecto de este cambio de energía se le conoce como confinamiento cuántico. El confinamiento cuántico provoca que los estados de energías excitados se cuanticen.⁸

Estos efectos sugieren que los picos de luminiscencia se corran al rojo cuando las islas crecen. Por lo contrario cuando el tamaño de éstas disminuye, el

espaciamiento entre los niveles de energía se incrementa y se hace un corrimiento al azul en la banda de luminiscencia.²

2.4 Termoluminiscencia en el SRO

Una nueva característica que se ha empezado a estudiar en el SRO es su termoluminiscencia, y las aplicaciones que puede tener, como es el caso de docímetros.⁵ En ese trabajo se determinan los espectros de Fluorescencia (FL) y de Termoluminiscencia (TL) de películas de óxido de silicio rico en silicio (SRO) con tres diferentes contenidos de exceso de silicio. Para estudiar la termoluminiscencia de SRO, películas de 550 nm de SRO fueron depositadas por la técnica de LPCVD, en el INAOE, sobre sustratos de Silicio (Si) con una resistividad entre 3 y 5 Ω -cm con exceso de silicio controlado por la razón del flujo de gases usados en el proceso, películas de SRO con $R_0=10, 20$ y 30 (12-6% exceso de silicio) fueron obtenidas. Posteriormente, fueron térmicamente tratadas en N_2 a altas temperaturas durante diferentes tiempos para difundir y homogeneizar el exceso de silicio. En el espectro de fluorescencia dos espectros de emisión fueron observados, una alrededor de 400nm y la otra alrededor de 800 nm. Los espectros de creación de TL fueron determinados graficando la intensidad de TL integrada como función de la longitud de onda de excitación.¹⁰

En la figura 20 se muestra el resultado de las mediciones de TL para SRO con $R_0=20$. Se nota que las formas de las curvas de brillo son muy similares para todas las longitudes de onda. Solo hay un pequeño desplazamiento del primero pico que al aparecer depende de la intensidad del pico y no tanto de la longitud de onda de la radiación. Las demás muestras presentan un comportamiento similar, pero con un menor desplazamiento. El espectro de creación de termoluminiscencia (o de formación de defectos) lo construimos con las intensidades de TL total (la integración de la curva de emisión en un intervalo de temperatura). Los resultados para cada muestra se encuentran en la figura 21. Los insertos de esta figura muestra la curva de emisión correspondiente y el rango de temperatura de la integración.¹⁰

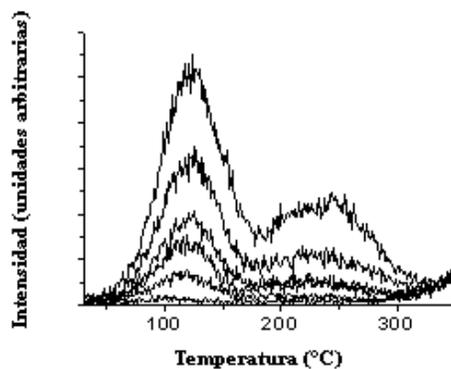


Figura 20. Algunas curvas de emisión de la película con $R_0=20$ irradiado con luz con una longitud de onda entre 250 y 500 nm. La línea por las máximas del primer pico indica el re-corrimento del pico con la intensidad.¹⁰

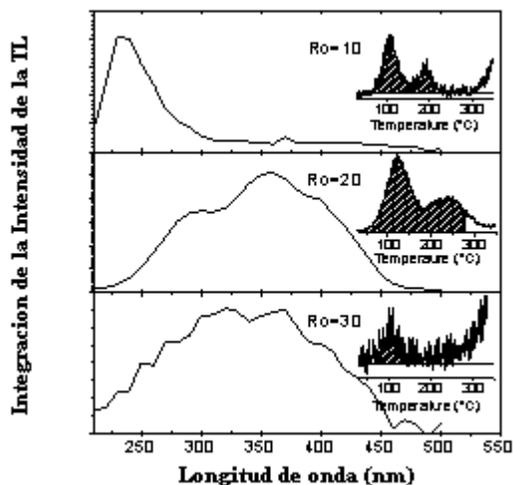


Figura 21. Espectros de creación de termoluminiscencia de las muestras con $R_0=10, 20$ y 30 . Los insertos muestran las curvas de brillo y los rangos de integración usados para construir los espectros.¹⁰

Referencias

- 1.- R A Rodriguez, E De La Rosa, P Salas, R Melendrez and M Barboza-Flores, Thermoluminescence and optically stimulated luminescence properties of nanocrystalline Er³⁺ and Yb³⁺ doped Y₃Al₅O₁₂ exposed to β -rays
- 2.- Rosa Elvia López Estopier. "Estudio de Efecto del Nitrógeno en la fotoluminiscencia de películas de SRO depositadas por LPCVD", Tesis de Maestría INAOE, (2005)
- 3.- S. M. Sze, "Physics of Semiconductor Devices", John Wiley & Sons, (1981).
- 4.- Dainet Berman Mendoza. "Sensor de Radiación de Silicio y SRO con eficiencia mejorada en el UV", Tesis de Doctorado INAO. (2005)
- 5.-S. Donati, "Photodetectors: Devices, circuits and applications", Prentice hall, (1999).
- 6.- Bahaa E. A. Saleh and Malvin Carl Teich, "Fundamentals of Photonics", John Wiley & Sons, Inc., (1991).
- 7.-Ming-Fu Li, "Modern semiconductor quantum physics", world scientific publishing, (1994).
- 8.-A. S. Grove, "Physics and technology of semiconductor devices", John Wiley & Sons, (1967).
- 9.- J.A. Luna-López, A. Morales-Sánchez M. Aceves-Mijares y Z. Yu, C. Domingez, "Analysis of surface roughness and its relationship with photoluminescence properties of silicon-rich oxide Films", American Vacuum Society. (2008)
- 10.- D. Berman-Mendoza, M. Aceves-Mijares, T.M. PETERS, L.R. Berriel-Valdos, J. A. Luna-López, "Espectro de emisión fluorescente y termoluminiscente de películas de Oxido de Silicio Rico en Silicio".

Capítulo 3

Fotodetectores

Introducción

Un fotodetector es un dispositivo que convierte una señal de luz a una señal eléctrica de voltaje o corriente. En muchos fotodetectores tales como fotodiodos y fotoconductores esta conversión es típicamente lograda por la creación de pares electrón-huecos, por la absorción de fotones, esto es, la creación de electrones en la banda de conducción y huecos en la banda de valencia. En algunos dispositivos como detectores de fuego la energía de conversión implica la generación de calor mediante el incremento de la temperatura mediante calor que cambia su polarización y por lo tanto su permitividad relativa. La unión pn de los fotodiodos se puede considerar como pequeña, con buena velocidad y sensibilidad. En este capítulo se estudiara los diferentes tipos de fotodetectores más utilizados para la detección de radiación infrarroja y visible, tales como el diodo de unión pn , fotodiodos pin , fotodiodos de avalancha y fotoconductores. También se estudiará el proceso de diseño del sensor de radiación UV de esta tesis, haciendo énfasis al uso de la herramienta de simulación *Suprime 3*.

3.1 Coeficiente de absorción y fotodiodos

La absorción de fotones para el proceso de fotogeneración, esto es, la creación de pares electrón-hueco, requiere que la energía del fotón sea como mínimo igual a la energía de la banda prohibida E_g del material semiconductor, para lograr excitar un electrón de la banda de valencia y pase a la banda de conducción. La longitud de onda de corte λ_g de la absorción está determinada por la energía de la banda prohibida E_g del semiconductor:

$$E_g = h \left(\frac{c}{\lambda_g} \right) \text{ o } \lambda_g (\mu m) = \frac{1.24}{E_g (eV)} \quad [3.1]$$

El número de fotones incidentes con longitud de onda de corte λ_g que son absorbidos en el semiconductor, es proporcional al número de fotones, que decaen exponencialmente con la distancia que penetran en el semiconductor. La intensidad de la luz I a una distancia x de la superficie del semiconductor está dada por:

$$I(x) = I_0 \exp(-\alpha x) \quad [3.2]$$

donde I_0 es la intensidad de la radiación incidente, y α es el coeficiente de absorción el cual depende de la energía del fotón o la longitud de onda λ . El coeficiente de absorción α es una propiedad del material. La mayoría de los fotones absorbidos (63%) ocurre a una distancia $1/\alpha$ y esta distancia es llamada la profundidad de penetración, en la figura 22 se muestra una gráfica donde podemos observar el coeficiente de absorción para diferentes longitudes de onda o energías.¹

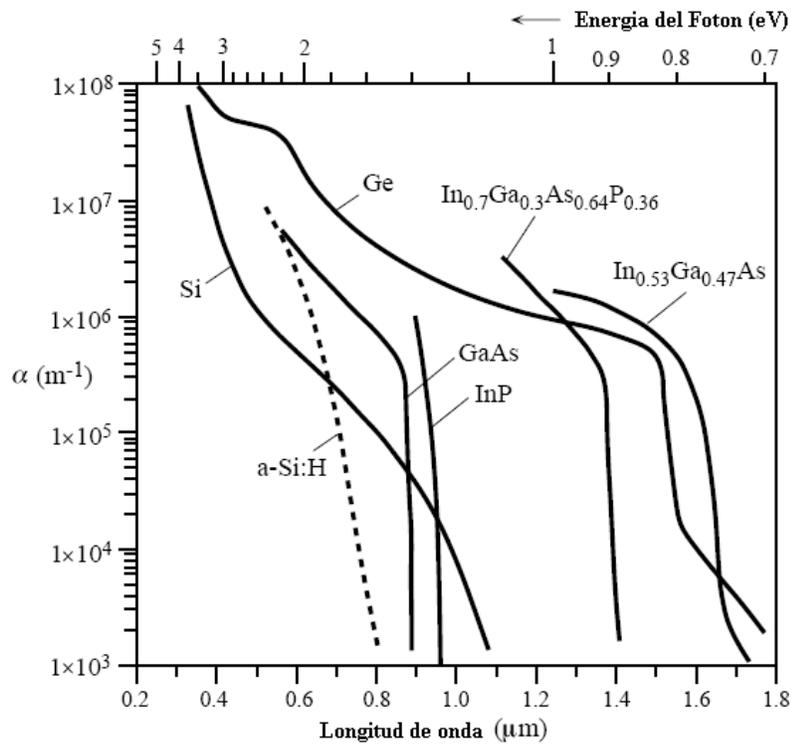


Figura 22. Coeficientes de absorción para diferentes longitudes de onda o energías del fotón.

3.2 Procesos de absorción óptica fundamentales

El proceso de absorción óptica fundamental consiste en el paso de electrones de la banda de valencia a la banda de conducción, esto debido a que el semiconductor es iluminado. A la energía o longitud de onda con el cual el proceso de absorción fundamental inicia se le llama borde de absorción. Existen dos tipos de transiciones asociados con el proceso de absorción fundamental, llamados transiciones directas e indirectas, como se muestra en la figura 23.

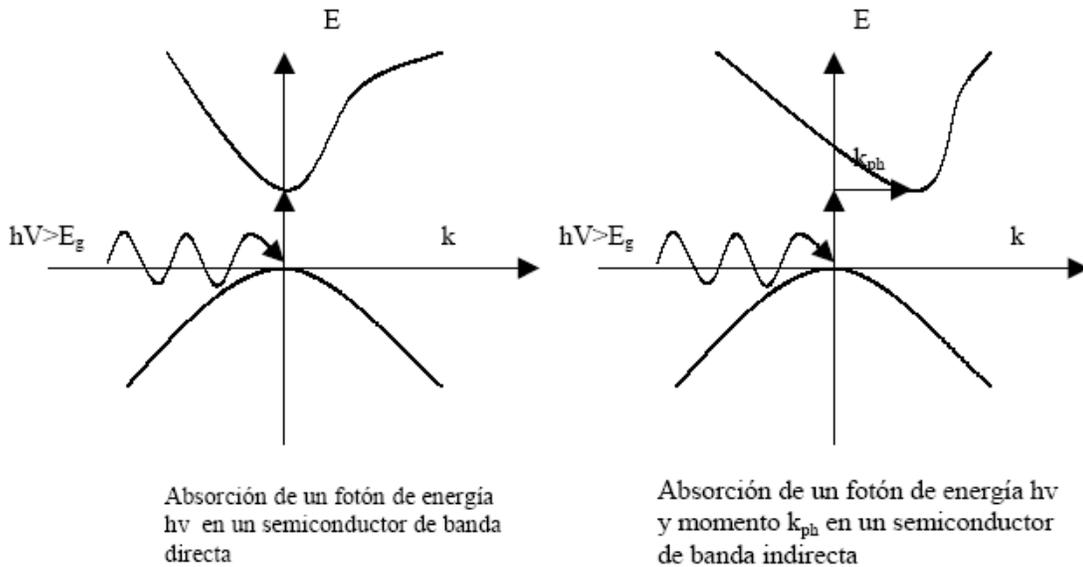


Figura 23. Transiciones directas e indirectas asociadas al proceso de absorción fundamental.

Estas transiciones afectan al coeficiente de absorción el cual a energías cercanas al borde de absorción se puede expresar:

$$\alpha \propto (h\nu - E_g)^{\frac{1}{2}} \quad [3.3]$$

para las transiciones directas y

$$\alpha \propto (h\nu - E_g \pm E_{ph})^2 \quad [3.4]$$

para transiciones indirectas, donde $h\nu$ es la energía del fotón incidente, E_g es la energía de la banda prohibida y E_{ph} es la energía del fotón relacionada con la transición indirecta. El proceso de absorción fundamental es el equivalente a la transición de un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción y es también llamado absorción intrínseca.²

3.3 Eficiencia cuántica y responsividad

No todos los fotones incidentes son absorbidos y crean pares electrón-hueco, que pueden dar lugar a una fotocorriente. La eficiencia del proceso de

conversión de fotones a pares electrón-hueco es conocida como eficiencia cuántica η del fotodetector que se define como³:

$$\eta = \frac{I_{ph}/e}{P_0/h\nu} \quad [3.5]$$

donde I_{ph} es la fotocorriente debida al flujo de electrones por segundo en las terminales del fotodiodo. El número de electrones colectados por segundo es I_{ph}/e , donde e es la carga del electrón. Si P_0 es la potencia óptica incidente entonces el número de fotones incidentes por segundo es $P_0/h\nu$.

La responsividad (R) de un fotodetector está dada en términos de la fotocorriente generada (I_{ph}) por la potencia óptica incidente (P_0) de una determinada longitud de onda;

$$R = \frac{I_{ph}}{P_0} \quad [3.6]$$

de la definición de η , se puede escribir como,

$$R = \eta \frac{e}{h\nu} = \eta \frac{e\lambda}{hc} \quad [3.7]$$

donde η depende de la longitud de onda.¹

3.4 Fotodetectores

3.4.1 Fotoconductores

El fotoconductor es una simple estructura de metal-semiconductor-metal; esto es, dos electrodos conectados a un semiconductor, esto lo hace el más simple de los detectores ópticos que exhibe ganancia interna y tiene limitaciones en la relación ganancia ancho de banda³. Los electrones incidentes son absorbidos en el fotodetector y generan pares electrón-hueco. Dando como resultado un incremento en la conductividad del semiconductor y por lo tanto

incrementa la corriente externa que constituye la fotocorriente I_{ph} , como se muestra en la figura 24.

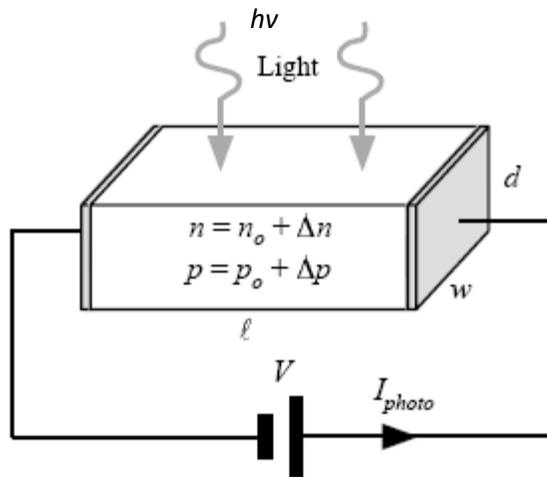


Figura 24. Diagrama esquemático de un Fotoconductor¹

Para un semiconductor intrínseco, la conductividad está dada por:

$$\sigma = q(\mu_n n + \mu_p p) \quad [3.8]$$

la corriente I_{ph} de un fotoconductor depende de los parámetros del dispositivo: longitud l , espesor d , el ancho w y el voltaje aplicado V , q es la carga del electron, μ_n y μ_p son las concentraciones de huecos y aceptores, y se puede expresar como:

$$I_{ph} = dwq(\mu_n n + \mu_p p) \frac{V}{l} \quad [3.9]$$

la eficiencia cuántica está dada por:

$$\eta_i = \frac{GV}{P_{in} / hv} \quad [3.10]$$

donde G es la fotoconductividad del material, V el voltaje aplicado, P_{in} es la potencia óptica recibida y $h\nu$ es la longitud de onda de la luz incidente.

La principal desventaja de los detectores fotoconductorivos es su gran corriente de oscuridad y su ruido asociado. La eficiencia del fotoconductor depende del área de detección y el tiempo de respuesta es proporcional de los portadores fotogenerados, así que si se incrementa el área, el tiempo de respuesta también se incrementa⁴. Un dato siempre útil es la longitud de onda (λ) de corte:

$$\lambda = \frac{hc}{E_g} \quad [3.11]$$

que como se puede ver en la ecuación, la longitud de onda de corte de un fotoconductor está en función de la energía de la banda prohibida del semiconductor.

3.4.2 El Fotodiodo de unión *pn*

La unión *pn* básicamente consiste de un diodo semiconductor (unión *pn*) el cual genera una fotocorriente al ser iluminado con una longitud de onda adecuada. La unión *pn* base de todos los fotodiodos es pequeña y posee alta velocidad y sensibilidad para el uso de varias aplicaciones optoelectronicas¹. Este se puede formar de varias formas, una de las más comunes es la difusión, la cual consiste en colocar una oblea de silicio tipo N en una atmosfera gaseosa con alta concentración de impurezas tipo P, a temperaturas alrededor de los 1000°C, esto permite la difusión de las impurezas a través de la oblea formando la unión *pn*. Una alternativa a esta técnica, es la implantación de impurezas tipo P, que consiste en la introducción de iones de impurezas mediante la aceleración de las mismas energías cinéticas entre 50 y 500 keV.²

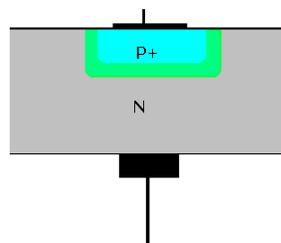


Figura 25. La unión *pn*.²

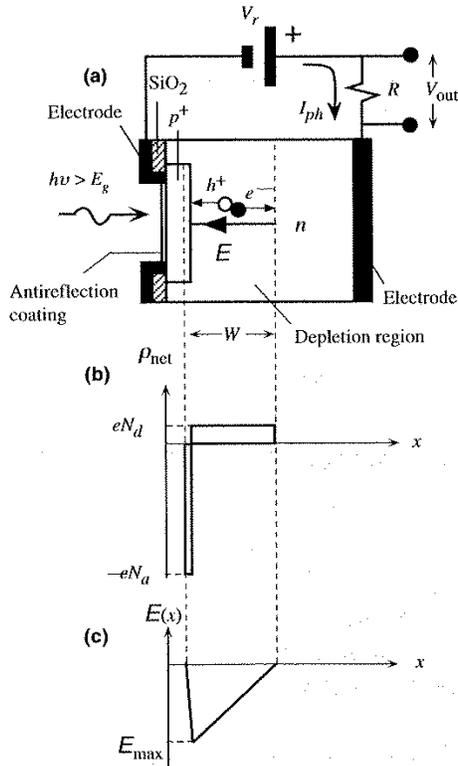


Figura 26. a) Representación esquemática de un fotodiodo de unión pn , b) Densidad de carga neta a través de la región de agotamiento del fotodiodo, c) Campo en la región de agotamiento.¹

Esto convierte al fotodiodo de unión pn como el más común de los fotodetectores. El principio de operación es muy simple, ya que el diodo se polariza inversamente generando una pequeña corriente de oscuridad, la cual fluiría a través del dispositivo. Así, cuando se incide luz sobre el diodo de unión pn , los fotones se absorben principalmente en la región de agotamiento y también en las regiones neutras, particularmente en la parte superior, donde incide la radiación. Los fotones que fueron absorbidos en la región de agotamiento crean pares electrón-hueco los cuales son acelerados en direcciones opuestas por el campo eléctrico y dan lugar a la fotocorriente en el circuito externo de polarización, como se muestra en la figura 26.

Es deseable tener una región de agotamiento grande, para que los fotones absorbidos puedan generar un gran número de pares electrón-hueco. Sin

embargo, el tiempo de transito de los portadores a través de la región de deserción se incrementaría, dando como resultado un aumento en el tiempo de respuesta del diodo y degradando su funcionamiento a alta velocidad.⁴

3.4.3. El fotodiodo pin

Un fotodiodo de unión pn, tiene un gran inconveniente. Su zona de agotamiento es a lo más de unos pocos micrómetros. Este y otros problemas se ven reducidos por el fotodiodo pin (p-intrínseco-n) como el mostrado en la figura 27.

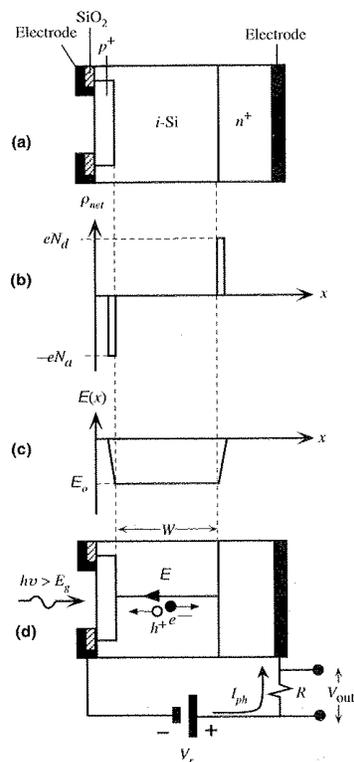


Figura 27. a) Representación esquemática de un fotodiodo pin, b) Densidad de carga neta a través de la región de agotamiento del fotodiodo, c) Campo en la región de agotamiento, d) Fotodetección del fotodiodo pin en polarización inversa.¹

El fotodiodo PIN es un diodo de unión pn el cual tiene una región sin dopar o ligeramente dopada (p⁻ o n⁻ dependiendo del método de fabricación de la unión), la cual es insertada entre las regiones p⁺ y n⁺. El diodo pin opera bajo un voltaje

inverso para que la región de deserción cubra completamente la región I, región Intrínseca, esto es debido a la baja densidad de portadores libre en la región I, y su alta resistividad, ya que cualquier voltaje de polarización cae completamente en esta región, lo cual nos da como resultado una zona de deserción de un ancho casi igual al de la oblea utilizada en su fabricación. Pero esto no quiere decir que no pueda ser controlada, lo cual se puede hacer mediante los requerimientos de respuesta y ancho de banda. Para alta velocidad de respuesta, el ancho de la región de deserción debe de ser pequeño y para lograr una mayor eficiencia o responsividad el ancho debe de ser grande.⁵

3.4.4. El fotodiodo de avalancha

El fotodiodo de avalancha (ADP) es el más sensible de los fotodetectores de estado sólido disponibles. En la Figura 28, se muestra un diagrama esquemático simple de uno de estos dispositivos, a este dispositivo se le puede miniaturizar para dispositivos de microescala y nanoescala, pero algunas de sus desventajas son los altos voltajes de operación, la necesidad de una circuitería complicada y un alto costo debido a su dificultad de fabricación.

Los fotodiodos ADP son estructuras PIN operados bajo un elevado voltaje de polarización. La multiplicación de la señal es obtenida cuando los portadores fotogenerados ganan suficiente energía proveniente del campo eléctrico para generar portadores secundarios a través de la zona de ionización por impactos lo cual lo podemos calcular mediante la fórmula: ⁴

$$M = \frac{I_{ph}}{I_{poh}} \quad [3.12]$$

donde I_{ph} es la fotocorriente del fotodiodo de avalancha cuando ha sido multiplicada, y I_{poh} es la fotocorriente primaria antes de ser multiplicada¹.

Estos portadores secundarios son también acelerados por el campo eléctrico y generan otros pares electrón-hueco. La corriente de salida es la

corriente primaria, que está en función de los fotones incidentes multiplicada por el factor M, el cual es dependiente del voltaje de polarización.⁴

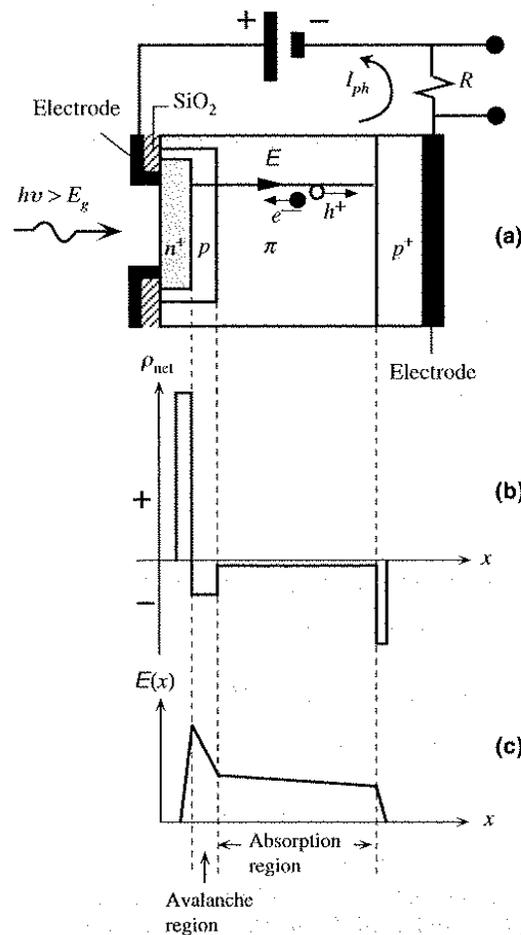


Figura 28. a) Representación esquemática de un fotodiodo de avalancha, b) Densidad de carga neta a través de la región de agotamiento del fotodiodo, c) Campo en la región de agotamiento, donde se pueden identificar las múltiples regiones de este dispositivo.¹

3.5 El fotodiodo pin como fotodetector

Como se mencionó antes el diodo pin es un diodo de unión pn al cual se le ha agregado una región con bajo dopaje o sin dopar. El análisis lo podemos empezar caracterizando conociendo la capacitancia que hay entre las capas con cargas negativas y cargas positivas, usando W como la distancia de un capacitor

de placas paralelas. La capacitancia de unión o de zona de agotamiento de un diodo pin está dada por: ⁶

$$C_{dep} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{W} \quad [3.13]$$

donde A es el área transversal y $\epsilon_0 \epsilon_r$ es la permitividad en el semiconductor.

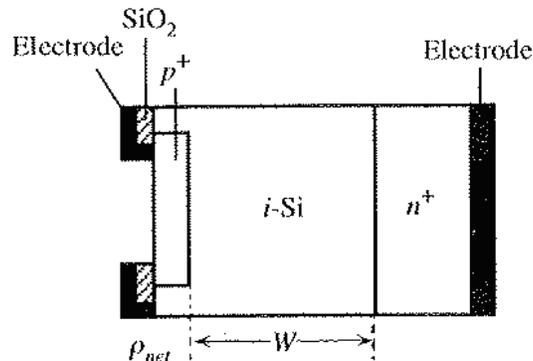


Figura 29. Diagrama esquemático de un fotodiodo pin.¹

El tiempo de respuesta de un fotodiodo pin está determinado por el tiempo de transito de las carga fotogeneradas cuando cruzan W. Incrementando W se absorben mas fotones incrementando la eficiencia cuántica pero a costo de que baje la velocidad de respuesta y haciendo el tiempo de transición mayor. El tiempo de transición se puede obtener mediante:

$$t_{drif} = \frac{W}{v_d} \quad [3.14]$$

donde v_d es la velocidad de transito. Si nosotros reducimos el tiempo de transición, se incrementa la velocidad de respuesta para eso necesitamos incrementar v_d .⁶

3.6 Implantación de iones

La implantación de iones consiste en la introducción de iones de un material dopante a un sustrato, normalmente silicio. Mediante este método al igual que la difusión se logra dopar el sustrato. La ventaja de este método es que se realiza a

temperatura ambiente y logramos tener un mayor control de la cantidad de impurezas que se depositan. Las energías más comunes de los iones son de 30 y 300 keV y van de 10^{11} hasta 10^{16} iones/cm². Las unidades de las dosis se refieren a la cantidad de iones que se implantan sobre cada cm² del sustrato. Una de las desventajas de este método es el daño que sufre el cristal por el choque de los iones contra su red, pero este daño se puede reparar casi por completo mediante un tratamiento térmico, dejando así a la red casi intacta y las impurezas activas.^{7,8,9}

En la figura 30 podemos observar el esquema de un sistema de implantación de iones. La fuente de iones contiene los iones del material dopante. Después estos iones pasan por un analizador magnético el cual elimina los iones no deseados después de separar las masas. Los iones que no han sido eliminados pasan a un tubo de aceleración, en el cual se aceleran a altas energías por medio de un campo eléctrico. En el último punto del proceso el haz de iones pasa por dos escáneres uno vertical y otro horizontal, para después ser implantados en el sustrato^{8, 9}.

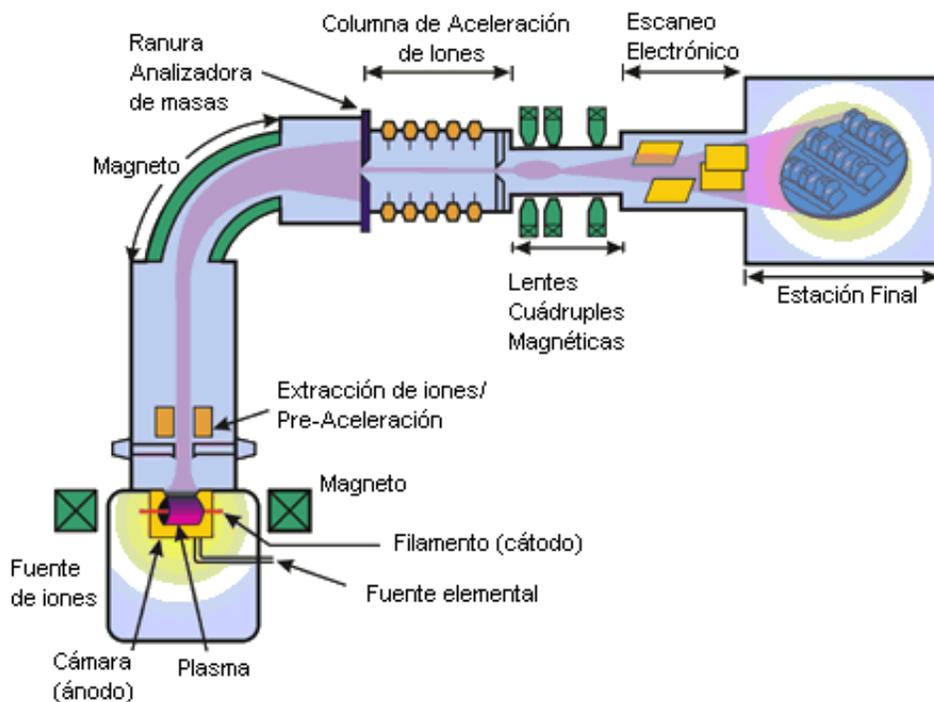


Figura 30. Representación esquemática de un sistema de implantación de iones.

3.7 Ruido en Fotodetectores

El fotodetector es un dispositivo que mide flujos de fotones. Idealmente, responde a un flujo de fotones Φ (potencia óptica $P=h\nu \Phi$) generando una corriente eléctrica proporcional i_p . Estos dispositivos generan una corriente eléctrica aleatoria i , estas fluctuaciones aleatorias, que se manifiestan como ruido.

Si el fotodetector tiene un mecanismo de ganancia, se amplifican tanto la señal como el ruido del fotoelectrón, y se introduce también su propio ruido de ganancia. Finalmente, el ruido del circuito afecta a la corriente actual ^{10, 11}.

Muchas fuentes de ruido son inherentes en el proceso de detección de los fotones. Algunas de ellas son las que se describen a continuación.

Ruido del fotón: la fuente más fundamental de ruido está asociada con las llegadas aleatorias de fotones.

Ruido del fotoelectrón: para un detector de fotones con eficiencia cuántica $\eta < 1$, un simple fotón genera un par fotoelectrón-hueco con probabilidad η , pero no puede hacer con tanta probabilidad $1-\eta$. Debido a la aleatoriedad inherente en este proceso de la generación de portador, sirve como una fuente de ruido.

Ruido del circuito receptor: varios componentes en un circuito eléctrico de un receptor óptico, como resistencias o transistores, contribuyen para el ruido del circuito receptor. ¹²

3.7.1 Ruido de la fotocorriente

Ahora se analizan las propiedades de la corriente eléctrica $i(t)$ inducida en circuito por un flujo de fotones con $\eta\Phi$. El tratamiento que se proporciona incluye los efectos del ruido del fotón, el ruido del fotoelectrón, y las características del tiempo de respuesta y circuitería. Un fotón incide sobre un fotodetector, por lo tanto da lugar a una corriente de pulsos eléctricos los cuales se agregan juntos para constituir una corriente $i(t)$. La aleatoriedad de la corriente de unos fotones es transformada en una corriente eléctrica que fluctúa. ¹²

3.7.2 Ruido de circuito

Todo ruido adicional es introducido por el circuito eléctrico asociado con un receptor óptico. El ruido del circuito resulta del movimiento térmico de los portadores cargados en resistencias y otros elementos disipantes (ruido térmico) y las fluctuaciones de la carga de los portadores en transistores usados en receptores amplificadores.

En otras palabras el ruido térmico es una perturbación de carácter aleatorio que aparece de forma natural en los conductores por agitación de los electrones; es dependiente de su temperatura, aumenta su potencia conforme aumenta la temperatura. Se suele denominar ruido blanco.¹²

Para aumentar la relación señal a ruido y eliminar el ruido, se pueden usar dispositivos digitales los cuales pueden extraer las señales de entornos con ruido, que hagan un amarre de fase y anulando las que no estén en fase.¹¹

3.8 Fotodetector de Radiación UV de SRO y Silicio

Se presenta un dispositivo desarrollado en el INAOE, el cual amplía el rango espectral de detección de los detectores de silicio que es de 450-700nm hasta 200-700nm. Este dispositivo de radiación tiene importantes aplicaciones en el mercado, por ejemplo: en los discos compactos para el almacenamiento de información digital, en indicadores para sensar la potencia de la luz solar en playas o albercas, en colorimetría, en fotometría, en medicina etc. El dispositivo presentado es una integración adecuada de un fotodetector de silicio con una película de SRO donde el proceso es totalmente compatible con los procesos de fabricación de sensores de silicio.¹³

3.8.1 Detectores UV de silicio

Hay un gran interés por desarrollar un sensor UV de silicio, porque la tecnología usada es más barata y más convencional comparándola con otros sensores de UV que tienen un proceso de fabricación más complejo y por lo tanto

son más costosos; sin embargo, los fotodiodos del silicio exhiben un bajo rendimiento en la región UV (200-400nm).

Posterior al descubrimiento de la emisión fotoluminiscente (PL) de los nanocristales de silicio incrustados en el dióxido del silicio, se han hecho esfuerzos para aprovechar al máximo esta emisión.¹⁴

El SRO es un material nanoestructurado, que normalmente se modela como dióxido del silicio con los nanocristales de silicio incrustados. El SRO se obtuvo por el método de LPCVD (Depósito Químico en Fase Vapor a Baja Presión), el cual presenta excelentes propiedades fotoluminiscentes¹⁵. En el capítulo 1 se habla más detalladamente acerca de este método de fabricación. Cuando el SRO es iluminado con luz UV (240-320nm), fotoluminesce en el rango visible y cerca del infrarrojo (650-800nm) donde el silicio es sensible, se hace una comparación con un fotodetector comercial (FDS-100) contra el sensor a base de SRO, se muestran ambas respuestas en la figura 31.

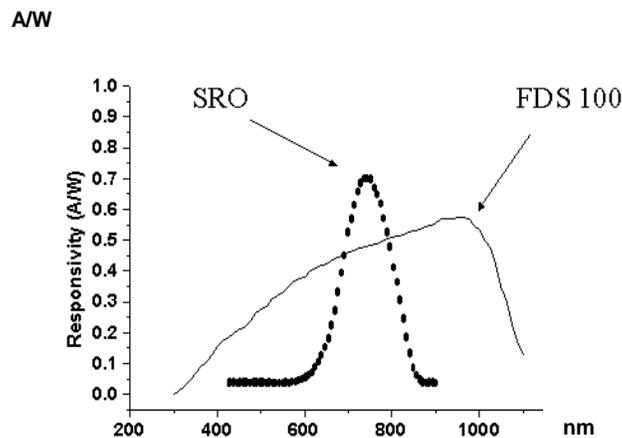


Figura 31. Comparación de la responsividad en longitud de onda de la emisión de SRO y de diodo del silicio.

La figura 32 demuestra la integración del SRO con un fotodetector de silicio que permite que la radiación UV sea detectada con una eficiencia mejor que los diodos estándares del silicio.

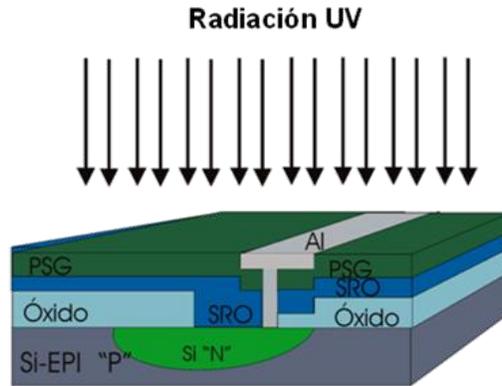


Figura 32. Esquema del fotodetector de silicio mejorado en el UV.

La luz UV se aplica sobre la película de SRO, produciendo fotoluminiscencia, la cual hace un corrimiento en la longitud de onda; esta emisión cae sobre el fotodetector de silicio colocado debajo de la película de SRO y se genera una fotocorriente proporcional a la radiación UV.

3.8.2 El SRO en el fotodetector

El SRO es uno de materiales que presenta buenas perspectivas para realizar funciones optoelectrónicas. Este material se obtiene usando diversos procesos tecnológicos como: SITO, LPCVD y PECVD los cuales se mencionaron en el capítulo 1. En general el material usado como substrato es en la mayoría de los casos silicio.¹⁴

En el proceso de LPCVD se menciona a fondo en el capítulo 1, el exceso del silicio en la película de SRO es controlado por la razón del flujo, R_o es definido en la ecuación [1.1].

Una integración adecuada como se muestra en la Figura 33, del SRO con un detector de silicio permite la detección de radiación UV con alta eficiencia.

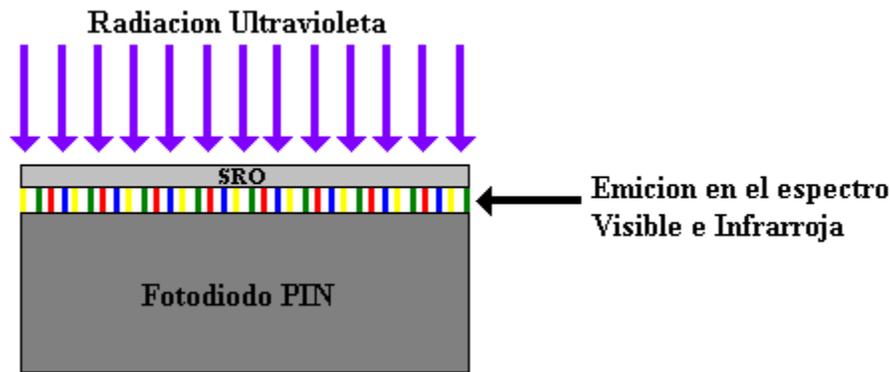


Figura 33. Integración de un Fotodetector de Silicio con una película de SRO⁴.

Una de las estructuras típicas para la detección luminosa desde hace algunos años es la unión pn, cuya principal limitación para ser utilizados como fotodetectores es su corriente de oscuridad, ya que esta corriente define la mínima señal luminosa detectable por el dispositivo; esta limitación aumenta cuando se detecta radiación de alta energía. El sensor de SRO cuenta con un anillo de guarda que permite disminuir la corriente de oscuridad y además incrementar los voltajes de polarización inversos (Voltaje de ruptura) que mantienen la corriente de salida baja.¹⁶

3.8.3 Anillo de guarda.

Los diodos de unión pn operan bajo voltajes de polarización inversos y sufren rompimientos prematuros. El voltaje de rompimiento está asociado a grandes campos eléctricos en la unión. Por otro lado la corriente de oscuridad en diodos de silicio, depende de la razón de generación- recombinación en la región activa, de la corriente de fuga y de la corriente de tuneleo. Un gran problema en los diodos de unión pn usados para detectar radiación de alta energía, como por ejemplo radiación UV, es la alta corriente de fuga en las orillas de la unión. En diodos de silicio, la técnica comúnmente usada para resolver estos problemas consiste en incorporar un anillo de guarda, el cual es una unión pn alrededor del diodo.

Una de las funciones del anillo de guarda es producir la relajación del campo eléctrico en las orillas de la región p^+ , y de este modo aumentar el voltaje de ruptura en polarización inversa. Así cuando el anillo de guarda existe, la concentración del campo eléctrico es dividida en dos, una se concentra en la orilla de la región p^+ del diodo y la otra se concentra en la orilla del anillo, pero si los mismos efectos que actúan sobre el diodo lo hacen sobre el anillo de guarda se aumenta el voltaje de ruptura inversa. Otra función del uso del anillo de guarda es que suprime las corrientes de difusión lateral ¹⁶. En la figura 34 se muestra la distribución del campo eléctrico con un anillo de guarda, se observa que el campo eléctrico se distribuye sobre el diodo y sobre el anillo, reduciendo la intensidad del campo sobre las orillas del diodo.

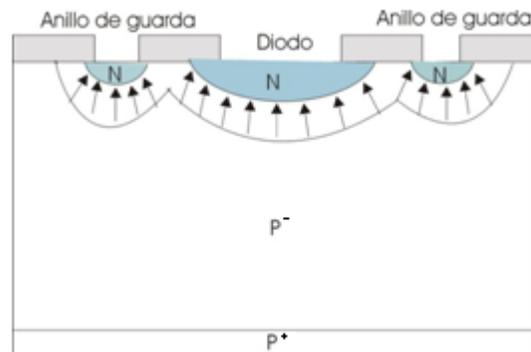


Figura 34. Diodo pin con anillo de guarda.

Ahora que se conocen las características generales de los fotodetectores de silicio y del sensor de SRO se puede caracterizar el dispositivo, con la finalidad de hacer una comparación contra otros sensores comerciales y así determinar si efectivamente está mejorado en el rango del ultravioleta.

Referencias

- 1.- Optoelectronics and Photonics. S.O Kasap, Prentice-Hall (2001).
- 2.- Andres Trinidad Medel de Gante. "Optimizacion de diodos PIN usando técnicas estadísticas", Tesis de Maestría INAOE, (2000)
- 3.- Mitsuo Fukuda, Optical Semiconductor Devices, John Wiley & Sons. 1998.
- 4.- Dainet Berman Mendoza. "Sensor de Radiación de Silicio y SRO con eficiencia mejorada en el UV", Tesis de Doctorado INAOE. (2005)
- 5.- Sheng S. Li, "Semiconductor physical electronics", Microdevices physics and fabrication technologies, 327-563, (1993).
- 6.- Shun Lien Chuang, Physics of Optoelectronic Devices, John Wiley & Sons.1995.
- 7.- Gray, Hurts, Lewys, Meyer, Analysis and Desing of Analog Integrated Circuits. Jonh Weley & Sons. Fourth Edition
- 8.- Donald E. Neamen. Semiconductor Physics and Device. Mc Graw Hill. Third Edition.
- 9.- Gary S. May. Fundamentals of Semicunductor Fabrication. Jonh Wiley & Sons.
- 10.- P.N.J. Dennis, Photodetectors, and Introduction to Current Technology, Plenum Press. 1986.
- 11.- Pallab Bhattacharya, Semiconductor Optoelectronic Devices, Prentice Hall. 1994.
- 12.- Mitsuo Fukuda, Introduction to Semiconductor Integrated Optics, Mitsuo Fukuda, Artech House. 1995.

13.- D. Berman-Mendoza, M. Aceves-Mijares, L. R. Berriel-Valdos, Z. Yu, C. Falcony, C. Domínguez-Horna, Jorge Pedraza, "Design, fabrication, and characterization of an ultraviolet silicon sensor", Proceedings ICO XX Begin, China, 0105-04, (2005).

14.- F. J. Flores Gracia, "Estudio de Películas SRO y su potencial uso como sensores de radiación", Tesis de doctorado en el INAOE, (2001).

15.- Rosa Elvia López Estopier. "Estudio de Efecto del Nitrógeno en la fotoluminiscencia de películas de SRO depositadas por LPCVD", Tesis de Maestría INAOE, (2005)

16.- Joseph Ya-Min Lee, Reduction of Leakage Current of Large-Area High Resistivity Silicon PIN Photodiodes for Detection AT 1.06 μm . IEEE Transactions on Electron Devices, Vol, Ed-28 No. 4 April 1981.

Capítulo 4

Diseño del Fotodetector PIN

Introducción

Generalmente todo dispositivo semiconductor como fotodetector tiene que separar los pares electrón hueco generados a través de un campo eléctrico, para hacer posible la recombinación de los mismos, sin embargo el fotodiodo utilizado para estos fines tiene la ventaja de que ya tiene un campo eléctrico interconstruido que barre con los portadores creados. Sin embargo el fotodiodo presenta algunas limitantes, ya que en la práctica existe un compromiso entre la respuesta del dispositivo y el ancho de banda, producto del tiempo de transito, la capacitancia de la unión y la resistencia de la unión diodo (causada por los portadores dentro de la zona de deserción) y el circuito de medición (el cual es afectado por la carga y descarga del circuito RC que forma el capacitor de la unión y la resistencia del propio dispositivo y su circuito de medición)¹.

4.1 Obtención de la profundidad de penetración de un fotón en el silicio

El proceso de absorción de fotones en el silicio cristalino, como ya se ha mencionado un semiconductor de banda indirecta, es más bajo que la de un material de banda directa. Para lograr un buen diseño se necesita saber la profundidad de penetración de un fotón en el silicio, para esto necesitamos el coeficiente de absorción del silicio, pero éste varía conforme cambia la longitud de onda con la que llega cada fotón. En la figura 35 podemos observar las diferentes curvas de absorción para distintos tipos de materiales semiconductores, y

podemos ver el coeficiente de absorción del silicio para longitudes de onda que van desde 500 a 800 μm .²

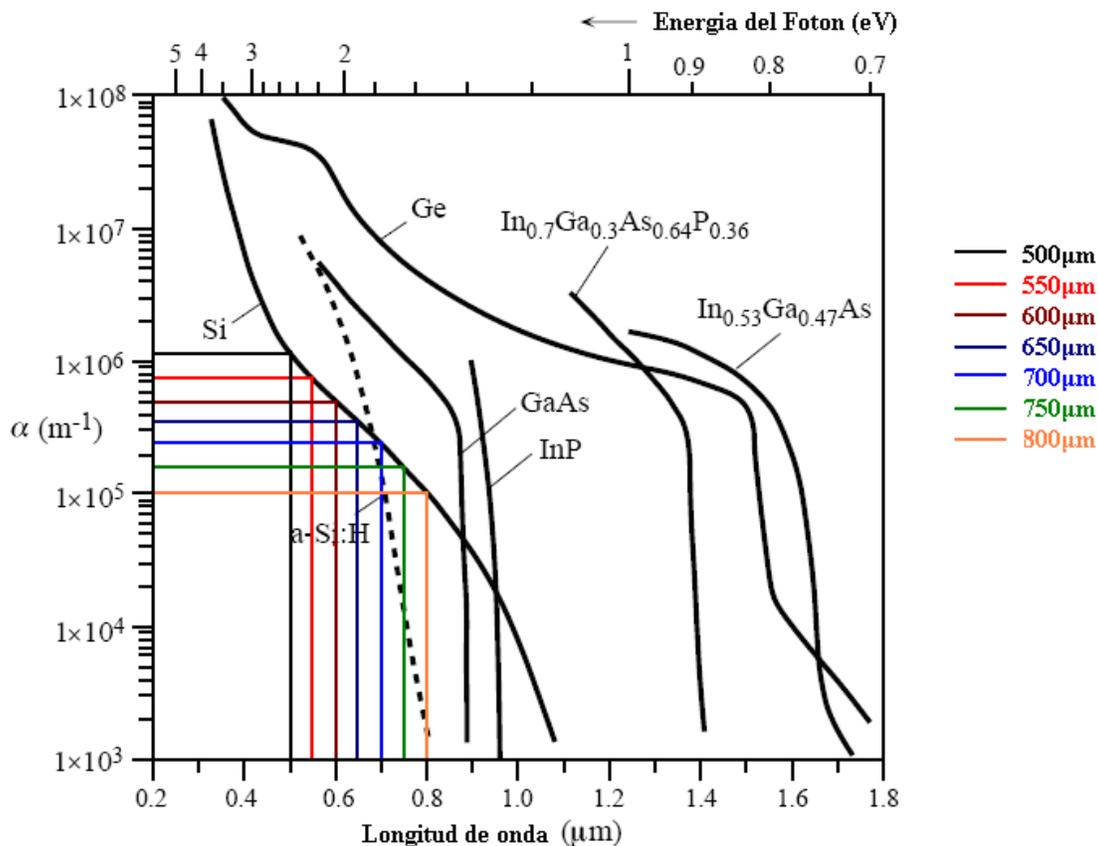


Figura 35. Curvas de diferentes longitudes de absorción, con referencia al silicio.

Mediante esta figura nosotros podemos calcular, usando el coeficiente de absorción (α), la profundidad de penetración de los fotones ($1/\alpha$), en la Tabla 1 podemos observar los coeficientes de absorción y de penetración del silicio para las longitudes de onda que se marcan en la figura 35.

Longitud de onda λ	Coefficiente de absorción α	Profundidad de penetración $1/\alpha$	Longitud de onda λ	Coefficiente de absorción α	Profundidad de penetración $1/\alpha$
500nm	$1.2 \mu\text{m}^{-1}$	$0.83 \mu\text{m}$	550nm	$0.75 \mu\text{m}^{-1}$	$1.33 \mu\text{m}$
600nm	$0.5 \mu\text{m}^{-1}$	$2 \mu\text{m}$	650nm	$0.35 \mu\text{m}^{-1}$	$2.85 \mu\text{m}$
700nm	$0.25 \mu\text{m}^{-1}$	$4 \mu\text{m}$	750nm	$0.17 \mu\text{m}^{-1}$	$5.88 \mu\text{m}$
800nm	$0.1 \mu\text{m}^{-1}$	$10 \mu\text{m}$			

Tabla 1. Profundidad de penetración del fotón en el silicio, obtenidos mediante la longitud de onda y el coeficiente de absorción.

En la figura 36 podemos observar los valores de la profundidad de penetración, que se obtuvo en la Tabla 1, contra la longitud de onda de cada uno de ellos, como se puede observar en la grafica el aumento de la profundidad de penetración es exponencial conforme aumenta la longitud de onda.

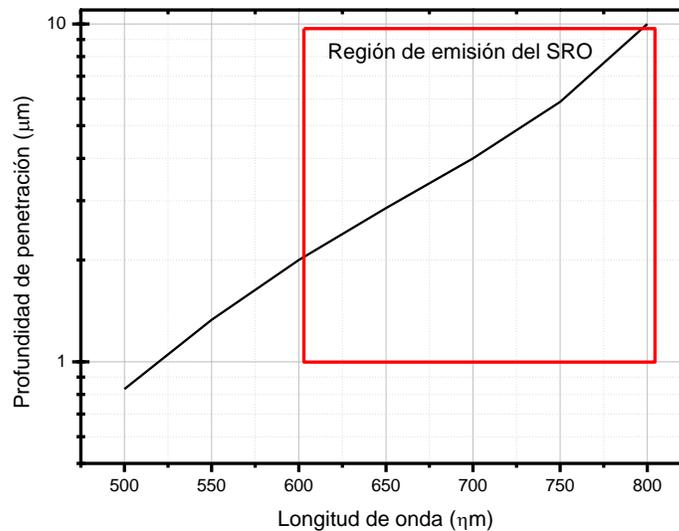


Figura 36. Grafica de profundidad de penetración contra longitud de onda.

En la Figura 36, podemos observar la región de emisión del SRO, gracias a esto podemos saber que las regiones de agotamiento para el sensor se deben de encontrar entre 2 y 10 μm .

4.2 Cálculo de la región de agotamiento.

Cuando el SRO fotoluminesce, solo los fotones que son absorbidos en la región de agotamiento son los que producen pares electrón-hueco, generando cargas para contribuir con la fotocorriente, por esta razón es necesario calcular con la mayor precisión posible la unión del fotodetector, así como su región de agotamiento.

Para poder obtener el ancho de la región de agotamiento es importante calcular primero su voltaje interconstruido, el cual podemos obtener mediante^{3, 4}:

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right] \quad [4.1]$$

donde V_{bi} es el voltaje interconstruido, k es la constante de Boltzman, T es la temperatura ambiente, q es la carga del electrón, N_A y N_D son la concentración de aceptores y donadores respectivamente y n_i es la concentración intrínseca de portadores.

Nosotros podemos calcular el ancho de la región de agotamiento de 2 maneras, la cuales son: no polarizada (sin aplicarle un voltaje) y polarizada (aplicándole un voltaje de polarización), mientras mayor sea este voltaje de polarización inverso, mayor será el ancho de la región de agotamiento. El ancho de la región de agotamiento polarizada inversamente lo podemos obtener mediante:

$$W = \left[\frac{2K_s \epsilon_0}{q} (V_{bi} - V_A) \frac{(N_A + N_D)}{N_A N_D} \right]^{1/2} \quad [4.2]$$

donde W es el ancho de la región de agotamiento, K_s es la constante dieléctrica del semiconductor, ϵ_0 es la permitividad en el espacio libre y V_A es el voltaje aplicado. Mientras que para obtenerla sin polarización es mediante:

$$W = \left[\frac{2K_s \epsilon_0 V_{bi} (N_A + N_D)}{q N_A N_D} \right]^{1/2} \quad [4.3]$$

Mediante estas ecuaciones podemos el cálculo de la región de agotamiento que se obtuvo mediante el proceso de implantación^{3,4}.

Para este proceso tenemos las siguientes concentraciones de:

$$N_A = 1.2 \times 10^{21} \text{ iones/cm}^3 \text{ (Boro)}$$

$$N_D = 1 \times 10^{21} \text{ iones/cm}^3 \text{ (Fósforo)}$$

Con estos datos podemos calcular el voltaje de la unión (V_{bi}) con la ecuación [4.1], el cual nos da como resultado:

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right] = 0.025852026 \ln 5.7074910 \times 10^{21} = 1.29508 \text{ V}$$

Una vez obtenido el voltaje la unión podemos calcular al ancho de la región de agotamiento (W) la cual se encontrara en modo fotovoltaico, es decir, sin un voltaje de polarización, esto lo realizamos con la ecuación [4.3]:

$$W = \left[\frac{2K_s \epsilon_0 V_{bi} (N_A + N_D)}{q N_A N_D} \right]^{1/2} = \left[\frac{2(11.8)(8.854 \times 10^{-14})(1.29508)(1.2 \times 10^{21} + 1 \times 10^{21})}{(1.6 \times 10^{-19})(1.2 \times 10^{21})(1 \times 10^{21})} \right]^{1/2}$$

$$W = \sqrt{(6.022112 \times 10^6)(8.433 \times 10^{-21})} = 0.1050739 \mu\text{m}$$

Ya conociendo W sin polarización, ahora necesitamos saber cuán grande será una vez que se polarice la unión, utilizando la ecuación [4.2] procedemos calcularlo con un voltaje que variara de los -2.5V a los -20V, considerando estos valores como los voltajes mas comunes de polarización de un fotodetector.

$$W = \left[\frac{2K_s \epsilon_0 (V_{bi} - V_A) (N_A + N_D)}{q N_A N_D} \right]^{1/2}$$

$$W = \left[\frac{2(11.8)(8.854 \times 10^{-14})(1.29508 - (-2.5)) (1.2 \times 10^{21} + 1 \times 10^{21})}{(1.6 \times 10^{-19}) (1.2 \times 10^{21})(1 \times 10^{21})} \right]^{1/2}$$

$$W_{(-2.5)} = 0.646 \mu m$$

$$W_{(-5)} = 0.832 \mu m$$

$$W_{(-7.5)} = 0.983 \mu m$$

$$W_{(-10)} = 1.114 \mu m$$

$$W_{(-12.5)} = 1.231 \mu m$$

$$W_{(-15)} = 1.338 \mu m$$

$$W_{(-17.5)} = 1.437 \mu m$$

$$W_{(-20)} = 1.530 \mu m$$

En la Figura 37 podemos observar los valores de W calculados para el proceso de implantación que hemos realizado.

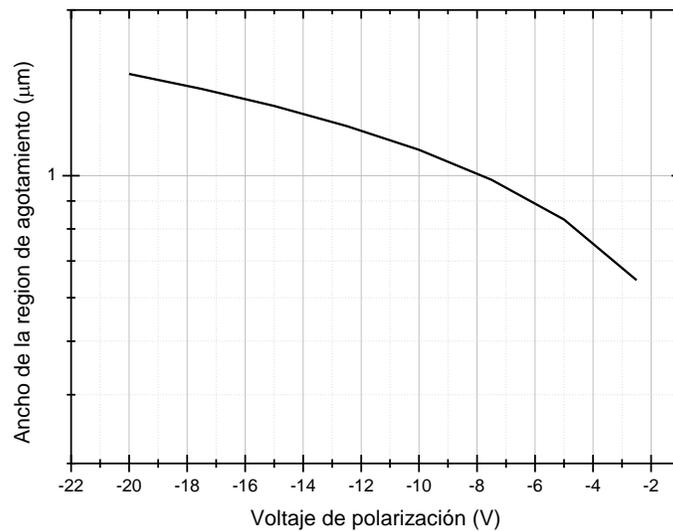


Figura 37. Aumento del ancho de la región de agotamiento

Es muy importante observar que la región de agotamiento se extiende hacia el sustrato, es decir hacia la parte con menor concentración de material. Recordando que la efectividad de un fotodetector depende del ancho de la región de agotamiento, entonces entre más ancha sea esta región mayor es la cantidad de fotones que absorberá y que contribuirán en una gran parte a la generación de la fotocorriente.²

4.3 Simulación del proceso de fabricación

El proceso de fabricación se simuló mediante *Supreem3*, este programa es una herramienta muy útil en el diseño de dispositivos, ya que nos permite optimizar recursos económicos y humanos. Este paquete de aplicaciones permiten hacer diferentes tipos de estudios, con lo cual podemos llegar a predecir el funcionamiento y posibles problemas que presente un dispositivo.

4.3.1 Características de *Supreem*

Entre los diferentes componentes de *Supreem* podemos encontrar *Athena*, el cual es un simulador de 2D el cual es muy usado por los diseñadores en lo que se refiere a tecnología de silicio. Se compone de 4 herramientas primarias y muchas más herramientas secundarias. Sus herramientas primarias son: *Supreem 3* la cual es para la simulación de procesos de fabricación, como implantación, difusión, oxidación, entre otras más. *Flash* para la simulación de implantación, difusión y activación para tecnología de materiales más avanzados. *Elite* para la simulación topográfica y *Optolith* para la simulación litográfica.⁵

Supreem 3 se utiliza para simular procesos de fabricación en la tecnología de silicio como implantación de iones, oxidación y difusión. Desde el desarrollo de este software para el diseño de dispositivos semiconductores, y que el silicio se haya convertido en el más importante de estos materiales, no solo se ha vuelto importante, sino crítico para obtener un modelo apropiado para obtener la mejor precisión posible cuando al simular algún proceso se involucran factores clave como dopantes u otros procesos como la implantación.⁵

Algunas de las grandes ventajas de contar con *Supreem 3* son las siguientes: ⁵

- Simulación rápida de tratamiento térmico.
- Concentración de impurezas dependiente del modelo de difusión.
- Simulación de crecimiento epitaxial.
- Oxidación durante la difusión.
- Depósito y grabado por medio de las especificaciones de las mascarillas.
- Modelo de difusión del polisilicio basado en el grano.
- Es posible graficar el proceso mediante la herramienta *TonyPlot*.
- Especificación de la estructura.
- Pasos del proceso y modelos (difusión, implantación, oxidación, depósitos, mascarillas, grabado, etc.)

4.3.2 Simulación del proceso de implantación

El proceso de implantación iónica se simuló en dos etapas: la implantación iónica y un proceso de difusión térmica, para lograr una mayor penetración de las impurezas en el material.

La implantación iónica se hizo a través de la película de SRO, dándosele después como se ha mencionado anteriormente un proceso de difusión o tratamiento térmico a una temperatura de 1100°.

Para el proceso de implantación de iones, se realizó una simulación con los datos mostrados en la Tabla 2, donde se puede ver la implantación de boro. Para esto se realizaron los siguientes pasos:

- Crecimiento de una capa de oxido de silicio (SiO_2)
- Grabado del SiO_2
- Depósito de la película de SRO
- Implantación de iones de Boro
- Tratamiento térmico

En las Figuras 38, 39, 40 y 41 se muestran los resultados de cada uno de los pasos que se mencionaron anteriormente.

Implantación de Boro	Energía	Tratamiento térmico	Grosor de la película de SRO	Profundidad de la unión
1.2×10^{21} iones/cm ³	180eV	180 minutos a 1100°C	530nm	1.23µm

Tabla 2. Características elegidas para la simulación del proceso de fabricación.

Este proceso fue seleccionado por las necesidades del sensor para así lograr su optimización en su funcionamiento, para lo cual se ha considerado la profundidad de unión, la energía de implantación, el tiempo del tratamiento térmico, y el grosor de la película de SRO ya que esta si es demasiado delgada no se lograría la suficiente fotoluminiscencia para el buen funcionamiento del sensor.

En las figuras 42 y 43 se puede observar el resultado de esta simulación con las características que se mencionan en la Tabla 2.

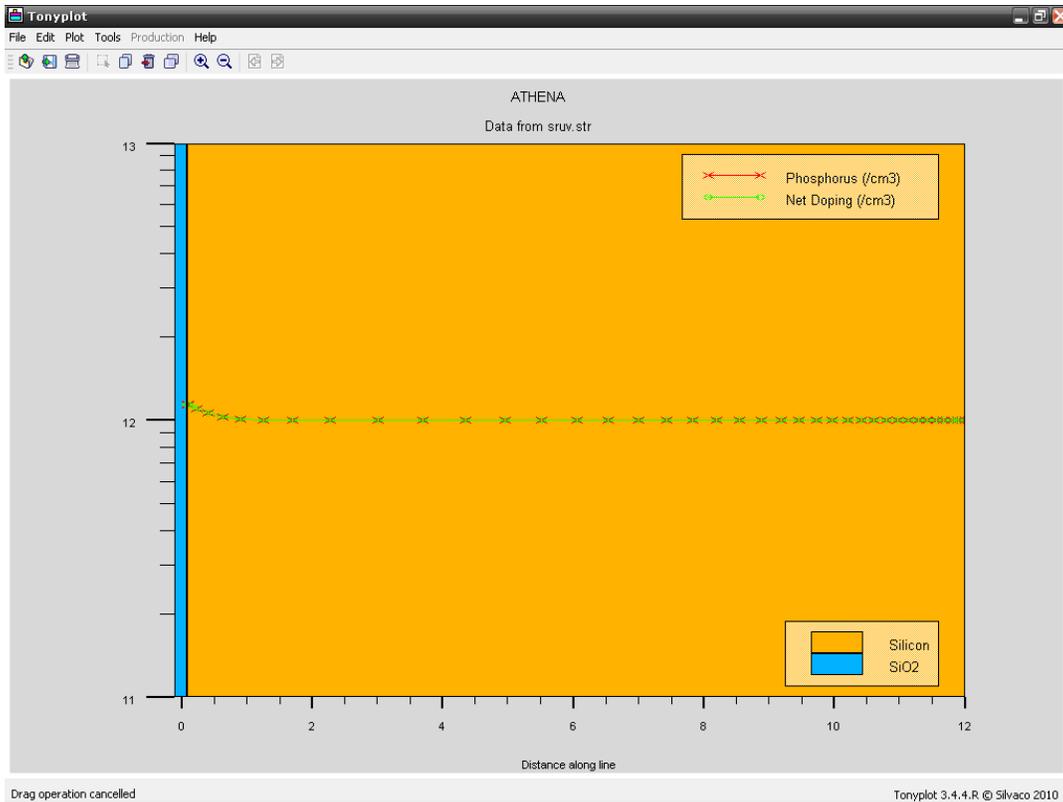


Figura 38. Crecimiento de una capa de oxido de silicio (SiO_2)

En la figura 38 se muestra la oblea de silicio (Si), con una capa de dióxido de silicio (SiO_2), que le fue crecido para poder realizar los procesos de grabado, depósito e implantación durante la fabricación del sensor.

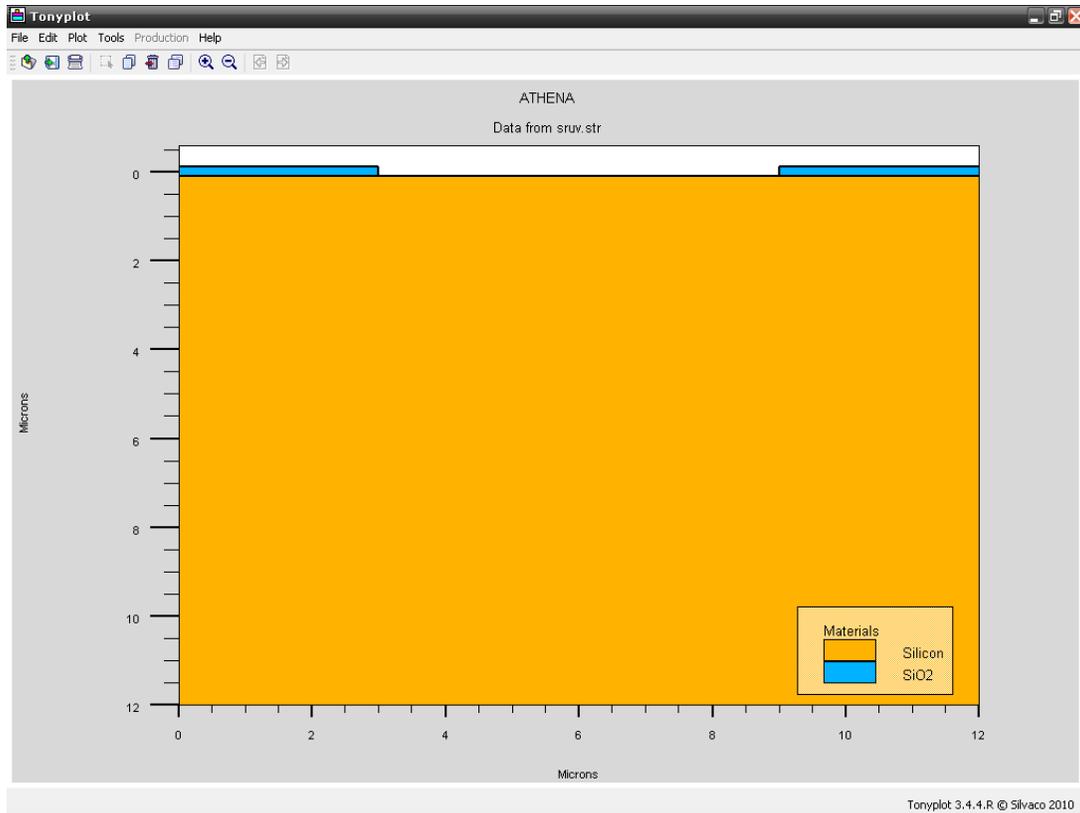


Figura 39. Grabado del SiO₂

En la figura 39 se grabo el SiO₂, esto se realiza para poder definir mas la zona donde se creara la unión que dará origen al diodo, ya que en la parte donde no hay SiO₂ la implantación de iones tendrá una profundidad mayor de penetración.

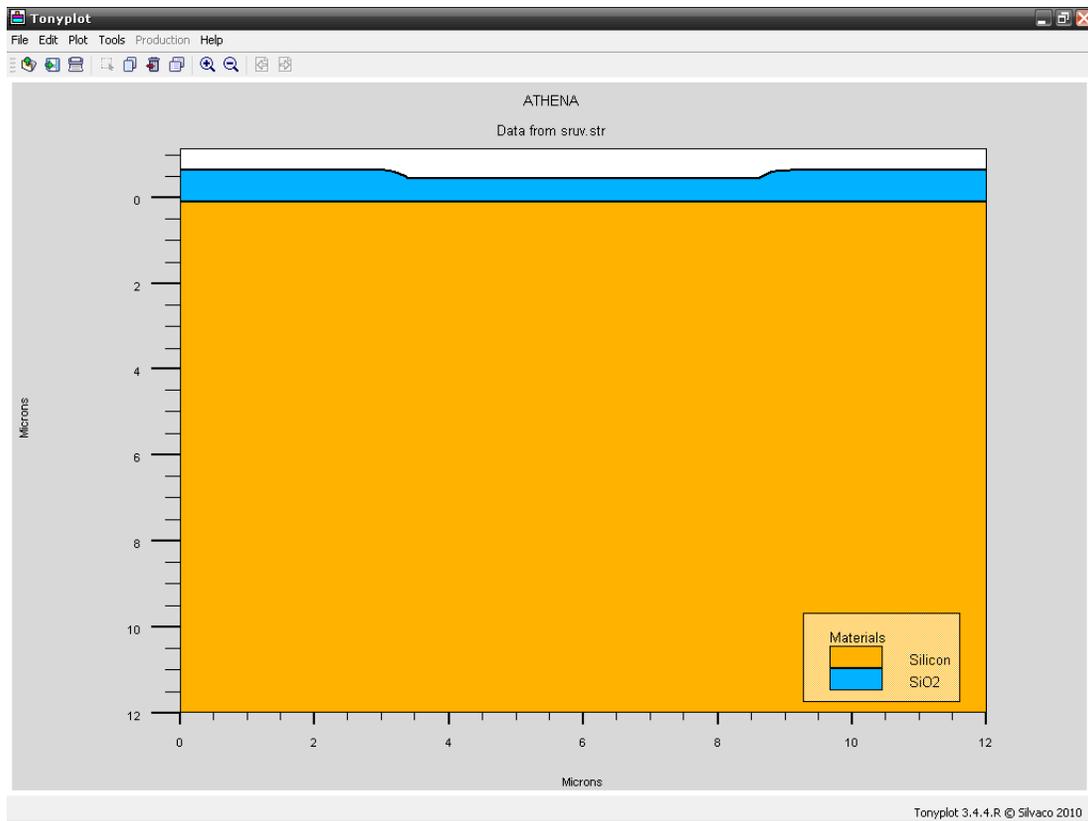


Figura 40. Deposito de la película de SRO

En la figura 40 se realizo el depósito de la película de SRO la cual es la que nos da la característica de poder tener una mejor detección en el ultravioleta y sobre la cual se realiza la implantación de iones.

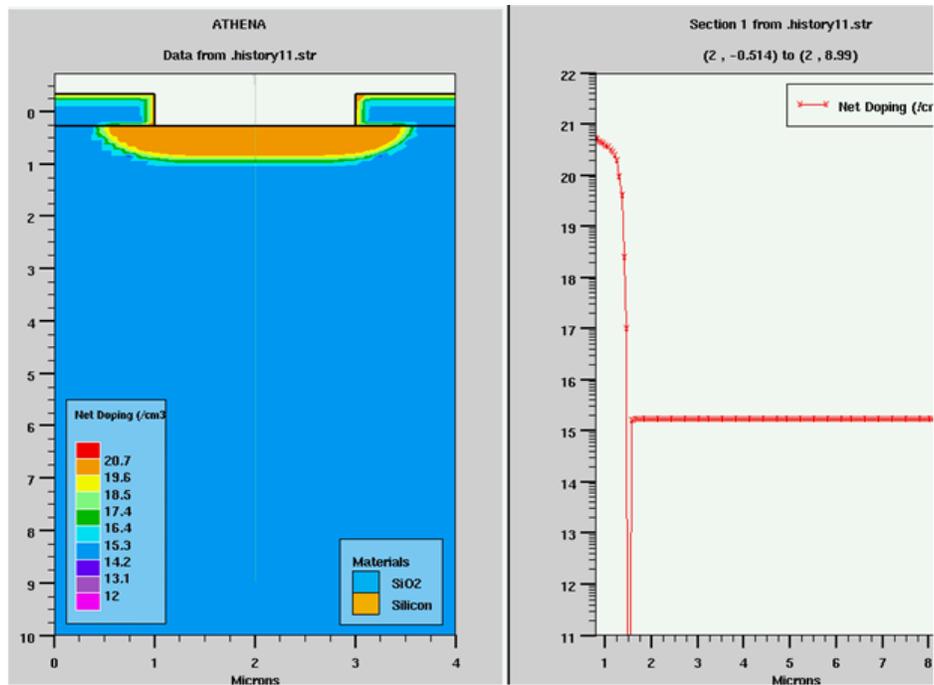


Figura 41. Profundidad de unión del fotodetector

En la figura 41 se puede ver la profundidad de unión del fotodetector que se logro mediante el proceso de implantación de iones, para luego darle el tratamiento térmico final.

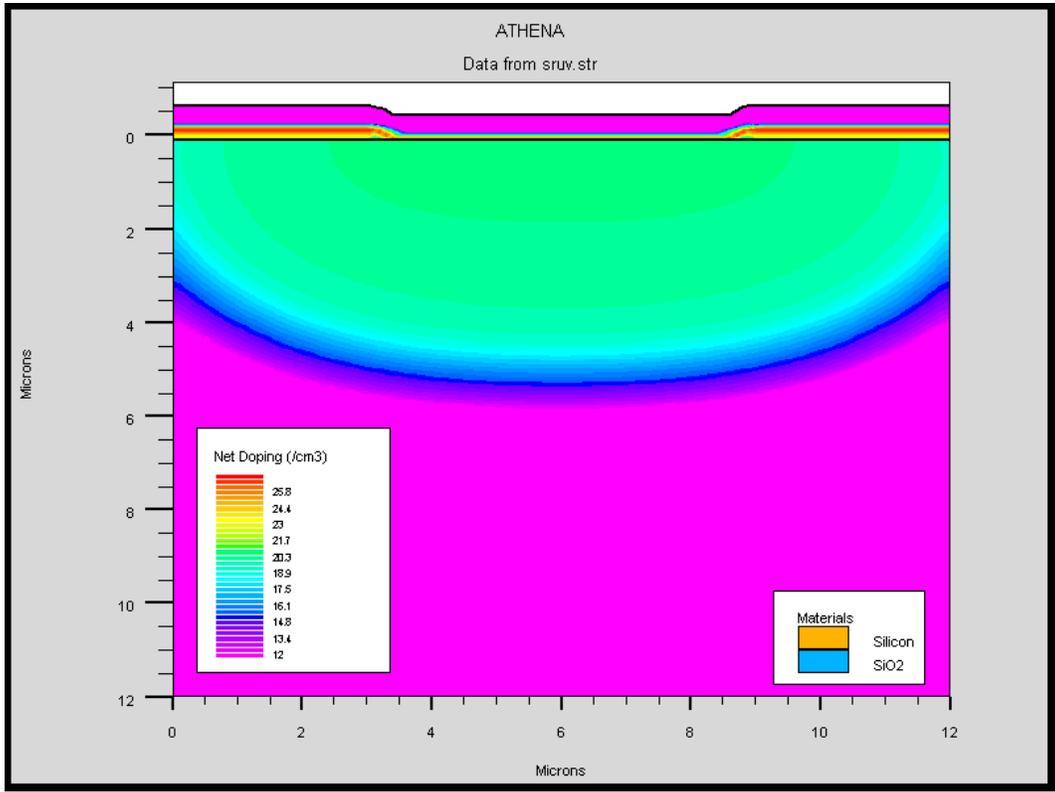


Figura 42. Tratamiento térmico final

En la figura 42 se muestra el resultado del tratamiento térmico final con el cual se difundió más la zona de unión que se logro mediante el proceso de implantación de iones, dándonos así una mejor región de absorción de fotones.

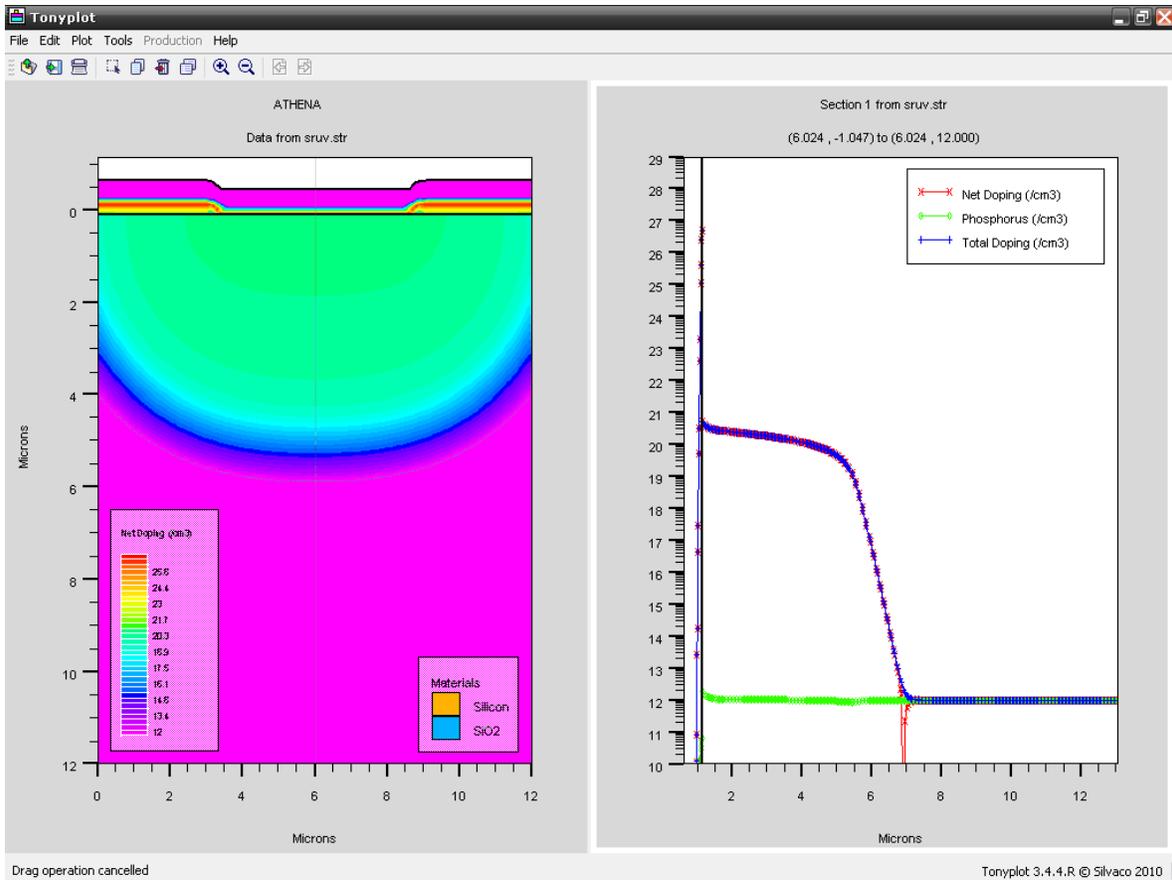


Figura 43 Simulación resultante.

Si observamos la Figura 41 se observa que la profundidad de unión del fotodetector después del proceso de implantación es de $1.5\mu\text{m}$, por lo cual podemos decir que es una buena profundidad de unión, ya al terminar todos los procesos de fabricación se tiene una profundidad de $6\mu\text{m}$, como se muestra en la Figura 43, con la cual se si se observa la Tabla 1, de este capítulo, podemos ver que pertenece la profundidad de penetración de 750nm lo cual pertenece al pico de máxima emoción del SRO, esto nos asegura que la mayor cantidad de fotones incidentes en el fotodetector contribuirán con la generación de la fotocorriente, por lo cual nosotros tendremos un detector más eficiente, ya que todos los fotones serán absorbidos en la región de la unión que es lo que nos interesaba para este trabajo.

Mediante estos resultados podemos decir que el proceso de implantación de iones presenta grandes características para la optimización de un fotodetector, ya que se logro una región de agotamiento bastante ancha y este proceso se puede controlar de una manera precisa. Ya que al disminuir la profundidad de unión mediante el tratamiento térmico final se logra que los fotones sean aprovechados en un mayor porcentaje.

4.4 Caracterización electrónica

Una vez realizado todo el proceso de simulación de fabricación del fotodetector podemos pasar a hacer la caracterización electrónica del mismo, con esto esperamos obtener la densidad de corriente del sensor. Para esto utilizamos la herramienta Atlas de Supreem3, el cual nos permite poder obtener la respuesta eléctrica de un dispositivo.

Atlas es un simulador de dispositivos en 2 y 3 dimensiones, el cual predice el comportamiento eléctrico de las estructuras de dispositivos semiconductores. Esto lo convierte en el complemento ideal de *Athena*, en el cual se desarrollan las estructuras físicas, para el diseño total de dispositivos. Esto nos permitirá conocer el impacto de cada uno de los pasos de fabricación en la respuesta eléctrica de dispositivo diseñado⁶.

Esta herramienta nos permite realizar la simulación de distintos dispositivos como lo son diodos, transistores, celdas solares, fotodetectores, entre otros más. Entre las características que se pueden obtener de Atlas se encuentran los análisis de pequeña señal de A.C. y D.C. al igual que su dependencia del tiempo, en este trabajo se realizó una caracterización optoelectrónica del dispositivo, para lo cual se obtuvo la respuesta con dependencia de la intensidad luminosa que recibía de una fuente de luz el dispositivo, cuya caracterización también nos permite realizar atlas ya que tiene una funcionalidad para caracterizar y simular respuestas de dispositivos optoelectronicos.⁶

4.4.1 Resultados obtenidos en Atlas

En los resultados que se obtuvieron de la simulación realizada en Atlas, podemos observar como varía la densidad de corriente del fotodetector referente a la densidad de la potencia óptica que recibe, como se muestra en la Figura 45.

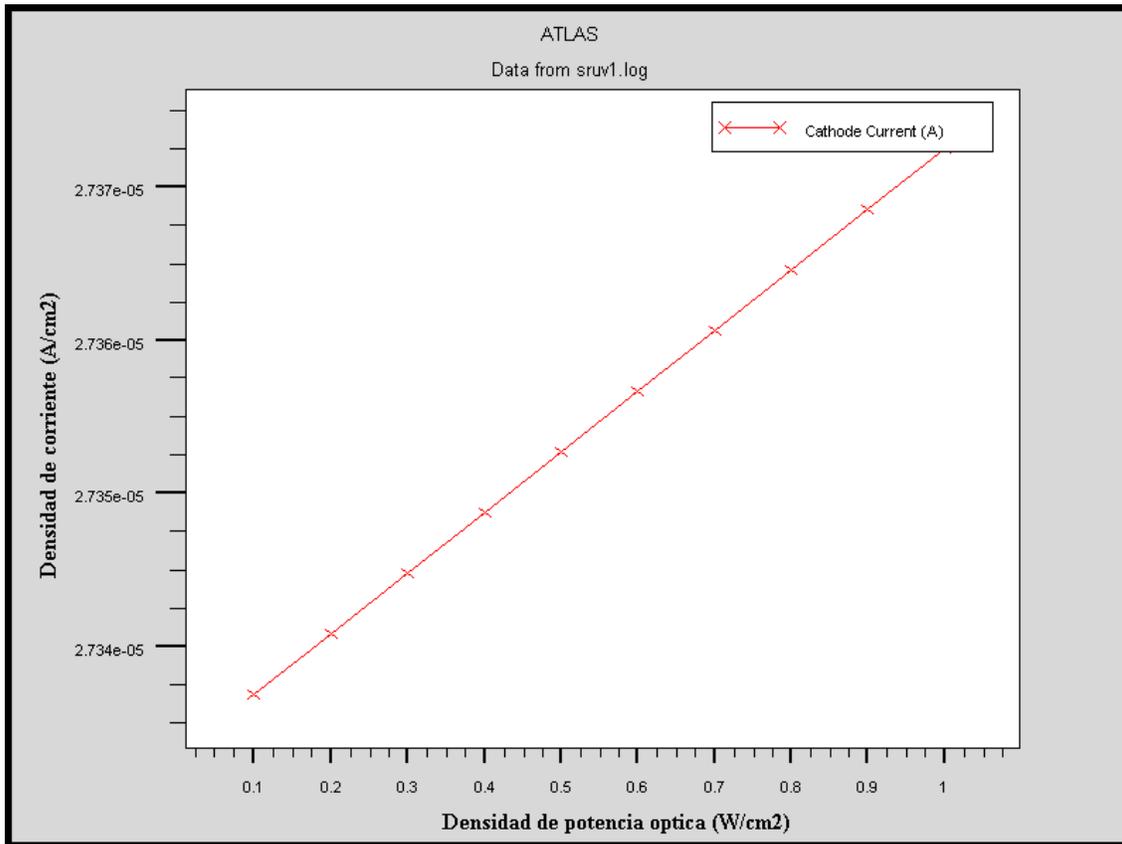


Figura 44. Densidad de potencia óptica contra Densidad de corriente.

La simulación resultante únicamente nos muestra que el dispositivo detector está funcionando. Como podemos observar conforme aumenta la potencia óptica que recibe, aumenta la corriente eléctrica generada por el fotodetector. Para lograr la obtención de esta respuesta al programa que se realizó para *Athena*, se le agregó una sección más de escrito en la cual se hace el llamado a *Atlas*.

En esta sección se hace la declaración de los electrodos y la fuente de luz que iluminará el dispositivo, la cual irá variando su longitud de onda con lo cual se

creó un barrido de los 500 a los 800 nm que son las que nos interesan para este trabajo.

Para poder saber la corriente que se genera es necesario definir la densidad de corriente, la cual es corriente entre área, como la grafica nos proporciona la densidad solo se despeja la corriente, esto se puede observar en las ecuaciones 4.4 y 4.5.

$$\rho_I = \frac{I}{A} \quad [4.4]$$

$$I = A\rho_I \quad [4.5]$$

$$I = (0.3cm)(0.15cm)(2.737 \times 10^{-5} A/cm^2)$$

$$I = 1.23165 \times 10^{-6} A$$

Se utilizan las medidas de 0.3cm y 0.15cm como las medidas con las que sería fabricado el sensor y con esos calculamos el área, para la densidad de corriente, se utiliza el valor máximo que nos da la grafica el cual es de $2.737 \times 10^{-5} A/cm^2$, hay que recordar que todo se realizo sobre una oblea de silicio epitaxial, la cual consiste en una oblea de silicio dopada de un material, y una alta concentración de ese mismo material dopante en una de sus caras.

4.5 Aplicaciones

Entre las aplicaciones, que se pueden realizar con los resultados de este trabajo, se encuentra en primer lugar el dispositivo como sensor y como dosímetro de radiación UV, semáforos de radiación solar (UV) nociva para la piel, como los que existen en la Patagonia en Argentina. Entre las aplicaciones del Sensor de UV podemos mencionar aplicaciones para la lectura de CDs y DVDs, actualmente sabemos que ya existe en el mercado la tecnología Blue Ray, el sensor serviría si así lo determina el mercado para trabajar como parte de la tecnología UV Ray, ya que este tipo de luz permitiría incrementar la concentración de pixeles y con ello aumentar la capacidad de almacenamiento. Otra aplicación que se está desarrollando en la UNISON y en la cual participé, es la caracterización de agua

contaminada con iones de metales pesados, en el cual mediante la introducción de iones de un metal pesado, como por ejemplo cadmio, zinc, plomo o cobre, a una muestra de agua desionizada, al pasar luz de diferentes longitudes de onda a muestras con diferentes partes por millón (*ppm*) de iones del metal, se puede crear una base de datos donde se puede obtener una grafica que corresponde a cada una de las concentraciones de los iones en la muestra, esto mediante la absorción óptica que tendrá la muestra, el cual en estos momentos se encuentra en proceso, hasta el momento este tipo de caracterización se está realizando en el equipo Perkin Elmer UV/VIS/NIR Lambda 19.

Referencias

- 1.- Andres Trinidad Medel de Gante. "Optimizacion de diodos PIN usando técnicas estadísticas", Tesis de Maestría INAOE, (2000)
- 2.- Optoelectronics and Photonics. S.O Kasap, Prentice-Hall (2001).
- 3.- Semiconductor Devices, S.M Zse, Jonh Weley & Sons. 1985
- 4.- Analysis and Desing of Analog Integrated Circuits. Gray, Hurts, Lewys, Meyer. Jonh Weley & Sons. Fourth Edition
- 5.-VWF Interactive Tools. Usre's Manual, Volume 1, Silvaco International (1998)
- 6.-Atlas user's manual, Silvaco Intyernational (2005)

Capítulo 5

Conclusiones y trabajos a futuro

5.1 Conclusiones

Se realizó el desarrollo de un sensor de silicio con rango mejorado en el UV con una película de SRO que cubre el diseño y simulación del proceso de fabricación. Este dispositivo es totalmente compatible con la tecnología de silicio.

En este trabajo se ha presentado un estudio de las características del óxido de silicio rico en silicio (SRO), así como algunas de sus diferentes formas de fabricación, todo esto para poder ser integrada en un fotodetector, de los cuales se hizo un análisis de los diferentes tipos de sensores. Para este fotodetector se tomó en cuenta el depósito de una película de SRO=30 ya que ésta cuenta con la mayor fotoluminiscencia de las tres películas de mayor estudio.

También se realizó un estudio de los diferentes tipos de dispositivos fotodetectores que hay, y de dos métodos de fabricación de éstos, para lograr el incremento de su eficiencia, estos métodos son la difusión y la implantación de iones. El diseño anterior que se realizó de este detector se dedicó a obtener la mayor fotoluminiscencia posible de la película de SRO, dejando a un lado el dispositivo fotodetector. Por esta razón, se volvió a diseñar el fotodetector, pero en lugar de usar un diodo de unión pn se procedió en realizarlo por un fotodiodo PIN, para así lograr una mayor cantidad de fotones que incidan en la unión sean absorbidos en la región de agotamiento y así crear una mayor cantidad de pares electrón-hueco, y de esta forma tener una mayor contribución en la generación de la fotocorriente.

De los dos procesos mencionados, se uso el de implantación iónica, ya que se considera el más eficiente, ya que se puede tener un mayor control de la profundidad de las impurezas y al solo dar un tratamiento térmico como apoyo se pueden lograr las características deseadas del dispositivo.

Se obtuvieron las características eléctricas que muestran que la propuesta de esta tesis, incrementa la eficiencia del Sensor.

5.2 Trabajo a futuro

Una propuesta es la fabricación del sensor desarrollado en esta tesis. Es posible que durante el proceso de fabricación del sensor, en algunas de sus etapas como el encapsulamiento al realizársele nuevos tratamientos térmicos estos influyan en forma beneficiosa o contraproducente para su funcionamiento.

Una de las características de hacer un sensor UV es que sea compatible con CMOS para integrarlo monolíticamente con esta tecnología. La propuesta es implementar el transistor de transimpedancia, para así lograr señales que se puedan medir con mucha mayor facilidad y de esta forma la eliminación de cualquier circuitería externa. Este amplificador debería ser fabricado con tecnología CMOS.

De las mediciones de la Transmitancia óptica que realizamos con películas de SRO y que demuestran que existe una alta reflectancia, proponemos agregar una película antirrefleitora al dispositivo para incrementar la eficiencia del mismo, ya que este filtro óptico solo dejaría pasar la radiación UV y con esto poder mejorar la respuesta del sensor.

También el diseño de otro fotodetector, pero esta vez usando un fotodiodo de avalancha, usando SRO, ya que este dispositivo presenta una mayor sensibilidad que los demás fotodiodos, su única desventaja es que tiene un mayor

costo, pero sería una investigación que podría arrojar resultados interesantes, sobre todo si consideramos que los tubos fotomultiplicante costosos.

Apéndice A.

Programa completo del proceso de implantación realizado.

```
go athena
```

```
# Declaracion de la oblea de silicio
```

```
line x loc=0.00 spacing=0.1
```

```
line x loc=12.00 spacing=0.1
```

```
line y loc=0.00 spacing=0.1
```

```
line y loc=3.00 spacing=1.0
```

```
line y loc=12.00 spacing=0.1
```

```
init silicon phosphor resistivity=4000 orientation=100
```

```
#Oxidacion inicial
```

```
method compress init.time=0.10 fermi
```

```
diffus time=15 temp=950 nitro press=0.78
```

```
#
```

```
method compress init.time=0.10 fermi
```

```
diffus time=15 temp=950 dryo2 press=0.78 hcl.pc=0
```

```
#
```

```
method compress init.time=0.10 fermi
```

```
diffus time=125 temp=950 dryo2 press=0.78 hcl.pc=0
```

```
#
```

```
method compress init.time=0.10 fermi
```

```
diffus time=180 temp=1100 dryo2 press=0.78 hcl.pc=0
```

```
#
```

```
method compress init.time=0.10 fermi
```

diffus time=5 temp=1100 dryo2 press=0.78 hcl.pc=0

#Proceso de grabado del oxido

etch oxide start x=3.00 y=-3.00

etch cont x=9.00 y=-3.00

etch done x=9.00 y=3.00

etch done x=3.00 y=3.00

#Deposito de SRO

deposit oxide thick=0.530 divisions=20

#Implantacion

implant boron dose=1.2e21 energy=180 gauss tilt=0 rotation=0 crystal

lat.ratio1=0.1 lat.ratio2=0.1

#Tratamiento termico

diffus time=180 temp=1100 nitro press=10.00

#Salvado y graficado de la estructura final

structure outfile=sruv.str

tonyplot sruv.str -set sruv.set

Apéndice B.

Programa con anexo para obtener la simulación eléctrica:

```
go athena
# Declaracion de la oblea de silicio

line x loc=0.00 spacing=0.1
line x loc=12.00 spacing=0.1

line y loc=0.00 spacing=0.1
line y loc=3.00 spacing=1.0
line y loc=12.00 spacing=0.1

init silicon phosphor resistivity=4000 orientation=100

#Oxidacion inicial

method compress init.time=0.10 fermi
diffus time=15 temp=950 nitro press=0.78
#
method compress init.time=0.10 fermi
diffus time=15 temp=950 dryo2 press=0.78 hcl.pc=0
#
method compress init.time=0.10 fermi
diffus time=125 temp=950 dryo2 press=0.78 hcl.pc=0
#
method compress init.time=0.10 fermi
diffus time=180 temp=1100 dryo2 press=0.78 hcl.pc=0
#
method compress init.time=0.10 fermi
```

diffus time=5 temp=1100 dryo2 press=0.78 hcl.pc=0

#Proceso de grabado del oxido

etch oxide start x=3.00 y=-3.00

etch cont x=9.00 y=-3.00

etch done x=9.00 y=3.00

etch done x=3.00 y=3.00

#Deposito de SRO

deposit oxide thick=0.530 divisions=20

#Implantacion

implant boron dose=1.2e21 energy=180 gauss tilt=0 rotation=0 crystal

lat.ratio1=0.1 lat.ratio2=0.1

#Tratamiento termico

diffus time=180 temp=1100 nitro press=10.00

#Salvado y graficado de la estructura final

structure outfile=sruv.str

tonyplot sruv.str -set sruv.set

go atlas

elec num=1 name=anode x.min=0.0 x.max=12.0 y.max=0.1

elec num=2 name=cathode bottom

solve init outf=sruv.str master

tonyplot sruv.str -set sruv.set

```
beam  num=1 x.origin=6.0 y.origin=-1.0 angle=90.0 wavel.start=0.5  
wavel.end=0.8 wavel.num=5
```

```
method  newton trap
```

```
solve  init
```

```
solve  vcathode=5.0
```

```
log    outf=sruv1.log master
```

```
#Caracterisacion en D.C.
```

```
solve  b1=0.1 lit.step=0.1 nstep=9 outf=sruv1_1.str master
```

```
tonyplot sruv1.log -set sruv2.set
```

```
quit
```