

#### "Estudio de las características electrónicas en base a la fotoconductividad en películas de silicio-germanio"

Por

Francisco Temoltzi Avila

Tesis sometida como requisito parcial para obtener el grado de

#### MAESTRO EN CIENCIAS EN LA ESPECIALIDAD DE ELECTRONICA

en el

Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica

> Noviembre 2009 Tonantzintla, Puebla

Supervisada por:

Dr. Andrey Kosarev Investigador titular de INAOE

#### **©INAOE 2009**

**Derechos Reservados** 

El autor otorga al INAOE el permiso de reproducir y distribuir copias de esta tesis en su totalidad o en partes.



### Resumen

En la actualidad, se ha desarrollado un gran interés en aleaciones de SiGe:H debido a que el ancho de la banda óptica  $(E_g)$  puede ser ajustado variando el contenido de germanio en la aleación. Las aleaciones de SiGe:H son muy atractivas en el desempeño de la tecnología de celdas solares ya que el ancho de su banda óptica permite absorber longitudes de onda larga y mejora la eficiencia de las celdas en configuración Tándem.

Este trabajo ha sido enfocado hacia el estudio de las características electrónicas de las películas de Ge:H y Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H (x = 96%). Las películas fueron depositadas mediante la técnica de LF-PECVD. La fotoconductividad de las películas de Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H y Ge:H han mostrado una dependencia aproximadamente lineal con la intensidad.

En las películas de Ge:H se ha observado que al incrementar la razón de dilución de hidrogeno de  $R_H = 20$  hasta  $R_H = 70$ , la fotoconductividad es reducida por un orden de magnitud. En las películas de Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H, la variación de la razón de dilución hidrogeno dentro del rango de  $R_H = 40$  hasta  $R_H = 80$ , reduce la fotoconductividad por un orden de magnitud.

La energía Urbach obtenida en la curva de la respuesta espectral de la fotoconductividad mostro un valor más alto que el valor obtenido por espectroscopia de deflexión fototérmica (PDS) o por mediciones de transmisión óptica.

En las películas de Ge:H dopadas con boro, se ha observado que una pequeña concentración de boro  $[B/Ge]_{sol} = 0.004$  mejora la calidad de las películas ya que reduce la densidad de estados en la banda prohibida.

iii

Sin embargo, conforme aumenta la concentración de boro, la densidad de defectos aumenta y la fotoconductividad se reduce por dos órdenes de magnitud. La fotoconductividad más baja fue obtenida en la muestra compensada, en la cual la magnitud de la fotoconductividad redujo por casi tres órdenes de magnitud.

### **Agradecimientos**

Estoy agradecido con mi asesor el Dr. Andrey Kosarev por haberme aceptado como estudiante de maestría en el departamento de electrónica del INAOE.

Del mismo modo, mis agradecimientos al comité supervisor: Dr. Alfonso Torres, Dra. Svetlana Mansurova y al Dr. Pedro Rosales, por haber revisado este trabajo de tesis y por arbitrarlo.

Quiero agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por la beca otorgada durante mi maestría.

A mis padres y hermanos por su apoyo incondicional.

De igual manera quedo muy agradecido con todo el personal del INAOE en general y en especial con todos mis profesores: Dr. Javier de la Hidalga, Dr. Edmundo Gutiérrez, Dr. Reydezel Torres, Dr. Roberto Murphy, Dr. Peter Haleví, Dr. Alejandro Díaz, Dr. Alexander Malik, Dr. Carlos Zúñiga, Dr. Zhenrui Yu, Dra. Claudia Reyes y Dr. Andrey Kosarev.

A mis amigos: Orlando Cortázar, Jesús Humberto Abundis, Luis Carlos Álvarez, Arturo Navarro, Alfredo Gonzales, Germán Andrés Álvarez, Fernando Julián Quiñones, Ana Luz Muñoz, Ismael Cosme, Héctor Yair Gonzales, Roberto Reyes, Paul Alonso Rubio.

Y en especial a mi amigo Nery Delgadillo Checa por su recomendación para estudiar la maestría en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.

### Dedicado a:

Mis padres Gloria Juana Avila Salaus, Francisco Luis Temoltzi Pilotzi, a mis hermanos y hermanas, y en especial a mi hermosa Miri (Miriam Paredes Hernández)

# Lista de Acrónimos

LF-PECVD	Depósito químico de vapor activado por plasma de baja frecuencia	
a-SiGe:H	Aleación de Silicio-Germanio amorfo hidrogenado	
a-Ge:H	Germanio amorfo hidrogenado	
a-Si	Silicio amorfo	
a-Ge:H (B)	Germanio amorfo hidrogenado dopado con boro	
a-SiC:H	Carburo de Silicio amorfo hidrogenado	
LTMP	Sistema de micro pruebas a baja temperatura	
RF	Radiofrecuencia	
AC	Corriente alterna	
DC	Corriente directa	
ТСР	Fotocapacitancia transitoria	
СРМ	Método de fotocorriente constante	
PDS	Espectroscopia de deflexión fototérmica	
CTL-CVD	Depósito de vapor químico catalítico	
AFM	Microscopio de fuerza atómica	
GPIB	Bus de interfaz de propósito general	
HWCVD	Depósito químico de vapor filamento caliente	

# Lista de Símbolos

J <sub>Dark</sub>	Densidad de corriente en obscuro	$A/cm^2$
$I_{Dark}$	Corriente en obscuro	A
$\sigma_{Dark}$	Conductividad en obscuro	$(\Omega * cm)^{-1}$
V <sub>DC</sub>	Voltaje de corriente directa	V
I <sub>0</sub>	Intensidad de la luz	$mW/cm^2$
hv	Energía del fotón	eV
$I_{Light}$	Corriente medida bajo iluminación	Α
$I_{ph}$	Fotocorriente	Α
$\sigma_{\!\scriptscriptstyle Light}$	Conductividad obtenida bajo iluminación	$(\Omega * cm)^{-1}$
$\sigma_{ph}$	Fotoconductividad	$(\Omega * cm)^{-1}$
$\alpha(hv)$	Coeficiente de absorción	$cm^{-1}$
E <sub>f otón</sub>	Energía del fotón	eV
$E_{opt}$	Ancho de la banda óptica	eV
$E_U$	Energía Urbach	eV
$\mu_{D_n}$	Movilidad de arrastre para electrones	$cm^2/(V*s)$
$\mu_{D_p}$	Movilidad de arrastre para huecos	$cm^2/(V*s)$
$n_{ph}$	Densidad de electrones fotogenerados	$cm^{-3}$
$p_{ph}$	Densidad de huecos fotogenerados	$cm^{-3}$
G	Razón de generación de pares electrón-hueco	$(s * cm^3)^{-1}$
$\tau_n$	Tiempo de vida de los electrones	S

9	Carga elemental del electrón	С
λ	Longitud de onda	$\mu m$
η	Eficiencia cuántica	
E <sub>04</sub>	Ancho de la banda óptica obtenida en $\alpha = 10^4 cm^{-1}$	εV
$N_D$	Densidad de defectos	$cm^{-3}$
$E_{C}$	Orilla de movilidad de la banda de conducción	eV
$E_F$	Nivel de la energía de Fermi	eV
$E_{v}$	Orilla de movilidad de la banda de valencia	eV
E <sub>a</sub>	Energía de activación	eV
$E_g$	Ancho de la banda óptica	εV
$n(\lambda)$	Índice de refracción	
$\vec{E}$	Campo eléctrico	V/cm
L	Longitud de la muestra	<b>c</b> m
d	Grosor de la muestra	<b>c</b> m
A	Área de sección transversal	$cm^2$
W	Ancho de la muestra	$\mu m$

## Contenido

Resumeniii		
Agradecimientosv		
Lista de Ac	rónimosix	
Lista de Sí	mbolosxi	
1. Introduc	ción1	
1.1 Ant	ecedentes y justificación1	
1.2 Ob	jeti vos y tareas3	
1.3 Org	ganización de la tesis4	
2. Análisis	de literatura5	
2.1 Intr	oducción5	
2.2 Ca	racterísticas principales de la fotoconductividad6	
2.2.1	Absorción óptica7	
2.2.2	Dependencia de la fotoconductividad con la intensidad 10	
2.2.3	Respuesta espectral de la fotoconductividad12	
2.2.4	Cinética de la fotoconductividad 13	
2.3 Da y G	tos reportados sobre fotoconductividad en películas de Ge <sub>x</sub> Si <sub>1-x</sub> :H Se:H preparadas por plasma16	
2.3.1	Fotoconductividad relacionada con transiciones entre colas y defectos	

2.3	3.2	Dependencia de la fotoconductividad con la intensidad24
2.3	3.3	Propiedades electrónicas de las películas fabricadas en el INAOE. 26
2.4	Со	nclusiones sobre el análisis de literatura30
3. Mete	odolo	ogía y Técnicas de Caracterización31
3.1	Intro	oducción31
3.2	Pro	cesos de fabricación de las muestras32
3.2	2.1	Fabricación de las películas de SiGe por LF-PECVD 32
3.3	Met	todología de Mediciones36
3.3	3.1	Mediciones de I-V en obscuridad y con iluminación 36
3.3	3.2	Respuesta espectral de la fotoconductividad 42
3.3	3.3	Cinética de la fotoconductividad 49
3.3	3.4	Dependencia de la fotoconductividad con la intensidad 54
4. Res	ultad	os Experimentales61
4.1	Intro	oducción61
4.2	Me	dición de I-V en obscuro y con iluminación61
4.3	Cai	racterísticas de la fotoconductividad63
4.3	3.1	Dependencia de la fotoconductividad con la intensidad 63
4.3	3.2	Característica temporal de la fotoconductividad 64
4.3	3.3	Características espectrales de las muestras de Ge-Si:H y Ge:H con variación en la dilución de hidrogeno
4.3	3.4	Características espectrales obtenidas en las películas de Ge:H dopado con boro

4.3.5	Efecto de la dilución de Hidrogeno	71
4.3.6	Efecto de la incorporación de boro	75

#### 5. Discusión de resultados ......81

5.1	Intr	oducción	81
5.2	De	pendencia de la fotoconductividad con la intensidad	82
5.3	Ca	racterística temporal de la fotoconductividad	83
5.4	Fot	toconductividad de las muestras de Ge <sub>x</sub> Si <sub>1-x</sub> :H y Ge:H	83
5.5	Ca	racterísticas espectrales de la fotoconductividad	84
5.5	.1	Películas de $Ge_xSi_{1-x}$ :H con variación en la dilución de hidroge	no
			90
5.5	.2	Películas de Ge:H con variación en la dilución de hidrogeno	91

#### 

Conclusiones	95
Lista de Figuras	97
Lista de Tablas	
Bibliografía	

### Capítulo 1

### Introducción

#### 1.1 Antecedentes y justificación

En la actualidad, se está desarrollando una intensa investigación sobre las aleaciones de los semiconductores amorfos. Principalmente sobre silicio amorfo hidrogenado (a-Si:H), debido a que este material puede ser preparado bajo condiciones de depósito bien controladas, con buenas propiedades eléctricas y es sensible al dopado. Las propiedades de las películas de a-Si:H han abierto la puerta a una extensa variedad de aplicaciones, por ejemplo: celdas solares, transistores de película delgada y dispositivos de memoria.

Uno de los principales problemas en la industria de fabricación de celdas solares basadas en a-Si:H, es que el ancho de la banda óptica del a-Si:H, es demasiado grande ( $E_g \approx 1.7 eV$ ) para optimizar una celda solar en configuración simple. Para solucionar este problema, en la industria de celdas solares se utilizan aleaciones de silicio-germanio hidrogenado (a-SiGe:H) y se fabrican celdas solares en configuración Tándem. El ancho de la banda óptica de las aleaciones de a-SiGe:H puede reducirse desde 1.7 eV hasta 0.9 eV variando el contenido de germanio. Una banda óptica más

angosta permite absorber la energía de longitudes de onda más largas del espectro solar y así mejorar la eficiencia de una celda solar de unión simple de a-Si:H.

Por otra parte, en la literatura no se han estudiado sistemáticamente las características de las películas de Ge:H y Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H con alto contenido de germanio (x > 0.5). Por ejemplo, en nuestro análisis de literatura se ha encontrado muy poca información sobre la dependencia de la fotoconductividad con la intensidad, y no se ha encontrado información sobre la cinética de la fotoconductividad. Por este motivo, en este trabajo se realizaron mediciones de la respuesta espectral de la fotoconductividad considerando estas características de la fotoconductividad.

Para obtener las características espectrales de la fotoconductividad es necesario utilizar una metodología que considere la dependencia de la fotoconductividad con la intensidad y la cinética de la fotoconductividad. En el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) no se ha desarrollado una metodología tomando en cuenta estas características. Por tal motivo, en este trabajo se ha desarrollado correctamente dicha metodología.

Finalmente, en el INAOE se ha reportado que en las películas de Ge:H y  $Ge_xSi_{1-x}$ :H (x = 0.96) la razón de dilución de hidrogeno reduce significativamente la absorción relacionada con defectos y la absorción relacionada con estados localizados en la cola de la banda de conducción. En las películas de Ge:H se observo anteriormente por Sánchez *et al.* [1], que para una razón de dilución de hidrogeno de  $R_H = 70$  la energía Urbach obtuvo un valor mínimo de  $E_U = 45meV$  y el coeficiente de absorción un valor de  $\alpha_D = 5x10^2 cm^{-1}$ . En las películas de Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H (x = 0.96) se observo que para una razón de dilución de hidrogeno de  $R_H = 75$ , la energía Urbach

obtuvo un valor mínimo de  $E_U = 30 meV$  y el coeficiente de absorción un valor de  $\alpha_D = 4x 10^2 cm^{-1}$ .

#### 1.2 Objetivos y tareas

El objetivo de esta investigación es estudiar las características electrónicas obtenidas en base a la fotoconductividad, en películas de germanio-silicio, con alto contenido de germanio, depositadas por plasma de baja frecuencia, con variación en la dilución de hidrogeno y en el dopado de boro.

#### Tareas

Para alcanzar el objetivo planteado en esta investigación, se han realizado las siguientes tareas:

- Desarrollar una metodología para obtener la respuesta espectral de la fotoconductividad en películas de Germanio-Silicio.
- Realizar las mediciones de fotoconductividad y obtener las características electrónicas de las películas de Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H y Ge:H con variación en la razón de dilución de hidrogeno y Ge:H dopado con boro.
- Procesar y analizar los datos obtenidos en las mediciones de las características electrónicas.
- Finalmente, desarrollar conclusiones.

#### 1.3 Organización de la tesis

En el capítulo 2 se presentan los conceptos relacionados con la fotoconductividad y el análisis de literatura realizado durante la elaboración de este trabajo de investigación.

En el capítulo 3 se describe el equipo de fabricación y el equipo de mediciones utilizado en la caracterización de las películas. En este capítulo también se describe la configuración experimental y la metodología empleada para obtener las características electrónicas de las películas en base a la fotoconductividad.

En el capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos en base a la fotoconductividad, en películas de SiGe:H y Ge:H con variación en la dilución de hidrogeno, y en películas de Ge:H (B) con variación en la concentración del dopado con boro.

En el capítulo 5 se hace la comparación y la discusión de los resultados obtenidos en este trabajo con los reportados en la literatura. Finalmente, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones de esta investigación.

### Capítulo 2

### Análisis de literatura

#### 2.1 Introducción

En este capítulo se presenta el análisis realizado a la literatura, sobre las películas de Ge:H y Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H con alto contenido de germanio. En la sección 2.2, se muestran las características principales de la fotoconductividad. De las cuales podemos mencionar: la absorción óptica, la dependencia de la fotoconductividad con la intensidad, la respuesta espectral de la fotoconductividad y la cinética de la fotoconductividad.

En la sección 2.3, se presenta el análisis de literatura realizado en esta investigación. Finalmente en la sección 2.4, se muestran los resultados obtenidos anteriormente por L. Sánchez [1] en las películas de Ge:H y  $Ge_xSi_{1-x}$ :H (x = 0.96). Las características ópticas principales y la estructura morfológica de las muestras se muestra en esta sección.

#### 2.2 Características principales de la fotoconductividad

En la figura 2.1 se muestra el esquema de una barra de semiconductor  $(L \gg d)$ , con contactos óhmicos en cada extremo y un voltaje de polarización  $(V_{DC})$  aplicado entre las dos terminales.



Figura 2.1 Esquema de una barra de semiconductor ( $L \gg d$ ) con contactos óhmicos en cada extremo de la placa.

Si consideramos que el semiconductor mostrado en la figura 2.1 es lineal, isotrópico y homogéneo. El campo eléctrico  $(\vec{E})$  aplicado sobre el semiconductor y la conductividad en obscuridad  $(\sigma_{Dark})$  no tendrán dependencia espacial, ni dependencia temporal. Con estas condiciones, la densidad de corriente  $(\vec{J}_{Dark})$  medida sobre la barra del semiconductor será constante y se podrá obtener utilizando la ley de ohm:

$$\vec{J}_{\text{Dark}} = \sigma_{\text{Dark}} * \vec{E}$$
(2.1)

De igual forma, la corriente medida será constante y se podrá obtener utilizando la siguiente ecuación:

$$\vec{I}_{Dark} = \vec{J}_{Dark} * A = \frac{\sigma_{Dark} * V_{DC}}{L}$$
(2.2)

En la ecuación 2.2, *A* representa el área de sección transversal,  $V_{DC}$  el voltaje de polarización y *L* la longitud del semiconductor mostrado en la figura 2.1.

Si ahora iluminamos la superficie del semiconductor con una intensidad constante ( $I_0 = cte$ .), la corriente medida bajo iluminación ( $I_{Light}$ ) será la corriente medida en obscuridad ( $I_{Dark}$ ) más la corriente fotogenerada ( $I_{ph}$ ).

$$I_{Light} = I_{Dark} + I_{ph} \tag{2.3}$$

En condiciones de estado estacionario, la fotoconductividad de la muestra también será constante y se podrá obtener utilizando la relación 2.3. En este caso, la diferencia obtenida entre la conductividad del semiconductor bajo iluminación ( $\sigma_{Light}$ ) y la conductividad en obscuridad ( $\sigma_{Dark}$ ) es llamada fotoconductividad ( $\sigma_{ph}$ ).

$$\sigma_{ph} = \sigma_{Light} - \sigma_{Dark} \tag{2.4}$$

En las siguientes subsecciones se describe brevemente: la absorción óptica del material, la dependencia de la fotoconductividad con la intensidad, la respuesta espectral de la fotoconductividad y la cinética de la fotoconductividad.

#### 2.2.1 Absorción óptica

Si colocamos a un material semiconductor bajo un haz de luz, tendremos sobre la superficie del semiconductor (x = 0),  $N_0$  fotones incidiendo por unidad de área y por unidad de tiempo (ver figura 2.2). Dentro del semiconductor, el número de fotones disminuirá debido a la absorción del material. Por lo tanto, el coeficiente de absorción puede ser considerado como una medida cuantitativa de este efecto. Entre más grande es el valor

del coeficiente de absorción,  $\alpha$ , más rápido disminuye el número de fotones que van penetrando desde la superficie hacia el cuerpo del material.

Si despreciamos los efectos de interferencia y la reflexión superficial del semiconductor. De acuerdo a la ley de Beer, el numero de fotones reducirá exponencialmente desde la superficie hacia el cuerpo del semiconductor. Dentro del semiconductor, la distribución de los fotones depende del valor del coeficiente de absorción ( $\alpha$ ) y del grosor de la muestra (d) como se aprecia en la siguiente relación:

$$N(x) = N_0 e^{-\alpha x} \tag{2.5}$$

En la ecuación 2.5, la variable *x* representa la dirección de propagación (ver figura 2.2). De la ecuación 2.5 y de la figura 2.2, podemos esperar que el número de fotones que logra traspasar la muestra y evitan la absorción, esta dado por la siguiente relación:  $N_1 = N_0 \exp(-\alpha d)$ . El número de fotones que será absorbido por la muestra está determinado por la siguiente relación:

$$N_2 = N_0 - N_1 = N_0 (1 - e^{-\alpha d})$$
(2.6)

De la ecuación 2.6 podemos observar que si el coeficiente de absorción es pequeño o la muestra es muy delgada ( $\alpha d \ll 1$ ), en este caso  $e^{-\alpha d} \approx 1$  y por consiguiente  $N_1 \approx N_0$ . En estas condiciones, la distribución de los fotones sobre el grosor de la muestra es prácticamente uniforme y casi todos los fotones que entran a la muestra salen de ella sin ser absorbidos. Por el contrario si  $\alpha d \approx 1$ , una parte considerable del flujo de fotones es absorbido por la muestra ( $\approx 63\%$ ). Finalmente si  $\alpha d \gg 1$ , el flujo de fotones será completamente absorbido por la muestra. Bajo esta condición, todo el flujo de fotones es absorbido muy cerca de la superficie (ver figura 2.2).

En la figura 2.2 se muestra un diagrama esquemático de la reducción exponencial del número de fotones dentro del material semiconductor. En la

figura 2.2(b) las tres curvas representan la distribución de los fotones cuando: (1)  $\alpha d \ll 1$ , (2)  $\alpha d \approx 1$  y (3)  $\alpha d \gg 1$ .



Figura 2.2 Representación esquemática de la absorción de fotones por un material semiconductor. Las tres curvas representan: (1)  $\alpha d \ll 1$ , (2)  $\alpha d \approx 1$  y (3)  $\alpha d \gg 1$  [2].

Por otra parte, si el coeficiente de absorción de un semiconductor amorfo es  $\alpha > 10^4 cm^{-1}$ , la absorción ocurrirá por transiciones entre estados extendidos (transiciones electrónicas entre estados de la banda de conducción y de la banda de valencia). Esta región es comúnmente descrita por la relación de Tauc:

$$(\alpha * hv)^{1/2} = R(hv - E_{opt})$$
(2.7)

En la ecuación 2.7,  $E_{\delta pt}$  es el ancho de la banda óptica,  $\alpha$  es el coeficiente de absorción, hv es la energía del fotón y R es una constante de proporcionalidad. Si el coeficiente de absorción es  $\alpha < 10^{4} cm^{-1}$ , la absorción ocurrirá por transiciones electrónicas entre estados localizados en la cola de la banda de valencia y la cola de la banda de conducción. En esta región la absorción disminuye exponencialmente y se describe comúnmente por la relación de Urbach:

$$\alpha(h\nu) = \alpha_0 exp\left(\frac{h\nu - E_g}{E_U}\right) \tag{2.8}$$

En la ecuación 2.8,  $E_v$  es la energía característica de Urbach. Finalmente en la región de baja energía, la absorción es ocasionada por transiciones electrónicas desde niveles localizados en la mitad de la banda óptica, hasta niveles extendidos en la banda de conducción. Para este último caso, se utiliza la siguiente expresión:

$$\alpha(h\nu) = \frac{c}{h\nu} \int_{-\infty}^{\infty} N_{U} (E_{U} - E)^{p\nu} N_{C} (E + h\nu - E_{C})^{pc} dE$$
(2.9)

En la ecuación 2.9, *C* es una constante,  $N_{tr}$  es la densidad de estados en la banda de valencia y  $N_c$  es la densidad de estados en la banda de conducción.

#### 2.2.2 Dependencia de la fotoconductividad con la intensidad

Anteriormente, la fotoconductividad fue definida como la diferencia entre la conductividad bajo iluminación y la conductividad en ambiente oscuro. Por lo tanto, en términos de la densidad de los portadores fotogenerados ( $n_{ph}$  y  $p_{ph}$ ), la fotoconductividad se puede expresar utilizando la siguiente relación:

$$\sigma_{ph} = q(\mu_n n_{ph} + \mu_p p_{ph}) \tag{2.10}$$

En la ecuación 2.10,  $\mu_n$  es la movilidad de arrastre para electrones y  $\mu_p$  es la movilidad de arrastre para huecos. Si el transporte de carga está dominado por electrones, y en condiciones de estado estacionario  $n_{ph} =$  $\eta G \tau_n$ , podemos definir a la fotoconductividad en términos de la razón de generación  $G[cm^{-3} * s^{-1}]$  y del tiempo de vida de los portadores fotogenerados  $\tau_n$  usando la siguiente relación:

$$\sigma_{ph} = q\mu_n G\tau \tag{2.11}$$

De la ecuación 2.11, podemos observar que si el tiempo de vida de los portadores fotogenerados ( $\tau_n$ ) es constante, la fotoconductividad será

proporcional a la razón de generación (*G*) y una gráfica de  $log(\sigma_{ph}) vs log(G)$ mostrará una pendiente igual a 1. Sin embargo, si el tiempo de vida de los portadores fotogenerados es función de la razón de generación:

$$\sigma_{ph} = q\mu_n \tau(G)G \tag{2.12}$$

La fotoconductividad será proporcional a la raíz cuadrada de la razón de generación,  $G^{1/2}$ , y una gráfica de  $\log(\sigma_{ph})$   $vs \log(G)$  mostrará una pendiente de 0.5.

Para explicar la dependencia del tiempo de vida de los portadores fotogenerados con la razón de generación ( $\tau(G)$ ), consideremos los siguientes aspectos: un electrón localizado en un estado conocido como trampa, tiene mayor probabilidad de ser reenviado térmicamente a la banda de conducción, que de ser recombinado por un hueco en la banda de valencia. Por el contrario, un electrón localizado en un estado conocido como centro de recombinación, tiene mayor probabilidad de ser recombinado de ser recombinado con un hueco, que de ser reenviado térmicamente a la banda de conducción.

En un material intrínseco bajo iluminación, los cuasi-niveles de Fermi se desplazan hacía sus respectivas orillas de movilidad. Este desplazamiento de los cuasi-niveles de Fermi produce que algunos estados conocidos trampas se comporten como centros de recombinación. Es decir, al incrementar la razón de generación (aumento de la intensidad de luz), la densidad de los centros de recombinación incrementa y como resultado se produce una variación sublineal de la fotoconductividad con la intensidad.

Cuando analizamos la respuesta espectral de la fotoconductividad, Hegedus *et al.* [3] menciona que si iluminamos a la muestra con una intensidad constante mayor que la intensidad del rayo de prueba, podemos minimizar la dependencia de la fotoconductividad con la intensidad. De esta forma, fijamos los cuasi-niveles de Fermi y el tiempo de recombinación. Otra solución sería la normalización de todos los valores a una razón de generación constante. Esto producirá resultados auto-consistentes para todas las mediciones normalizadas al mismo valor.

#### 2.2.3 Respuesta espectral de la fotoconductividad

Para producir fotoconductividad, se debe absorber luz en el proceso de generación de pares electrón-hueco. Por lo tanto, existe una estrecha relación entre el espectro de absorción óptica  $\alpha vs hv$  y la respuesta espectral de la fotoconductividad  $\sigma_{ph} vs hv$ . En la figura 2.3 se muestra un ejemplo de la forma general de la respuesta espectral de la fotoconductividad y del coeficiente de absorción en función de la longitud de onda.



Figura 2.3 Comparación ilustrativa entre la respuesta espectral de la fotoconductividad y el coeficiente de absorción del material [4].

En la región I ( $\alpha d \gg 1$ ), existe fuerte absorción y todo el flujo de fotones es absorbido en una capa muy delgada cerca de la superficie del semiconductor. En este caso, la fotoconductividad está controlada por la velocidad de recombinación superficial y el tiempo de vida de los portadores fotogenerados en la superficie del semiconductor. En el rango intermedio de la región II aún existe fuerte absorción, pero ahora la fotoconductividad es controlada por el tiempo de vida de los portadores fotogenerados en el cuerpo del material. En esta región ocurre un máximo cuando el coeficiente de absorción es aproximadamente igual al reciproco del grosor de la muestra ( $\alpha = 1/d$ ).

En la región III, la absorción es débil y la fotoconductividad también es controlada por el tiempo de vida de los portadores fotogenerados en el cuerpo del material, pero disminuye con el aumento de la longitud de onda porque la absorción también disminuye en esta región.

#### 2.2.4 Cinética de la fotoconductividad

Para describir la cinética de la fotoconductividad consideremos el diagrama mostrado en la figura 2.4. En la región I (equilibrio térmico) la razón de generación térmica es igual a la razón de recombinación de los pares electrón-hueco.

$$G_{th} = R_{th} \tag{2.13}$$

Región II: Cuando iluminamos la muestra pares electrón-hueco son fotogenerados. Para describir el incremento de la concentración de portadores podemos utilizar la ecuación de balance de carga:

$$\frac{d \, n_{light}}{dt} = G_{Tot} - R_{Tot} = (G_{th} + G) - (R_{th} + R) \tag{2.14}$$

Si la razón de generación térmica  $(G_{th})$  y la razón de recombinación  $(R_{th})$  no cambian cuando iluminamos la superficie del material, podemos obtener la variación de portadores para un tiempo  $t > t_{on}$ , utilizando la siguiente relación:

$$\frac{d\,n_{\rm ph}}{dt} = G - R \tag{2.15}$$

Si consideramos que en estado estacionario  $n_{ph} = \eta G \tau$  y además que  $\Delta n(t)|_{t \to t_{on}} = 0$  y  $\Delta n(t)|_{t \to t_{off}} = n_{ph}$ , obtenemos la variación de los portadores fotogenerados de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\Delta n(t) = n_{ph} (1 - \exp(-t/\tau))$$
(2.16)

Región III: Si la razón de recombinación en el tiempo  $t = t_{off}$  es proporcional a  $R = n_{ph}/\tau$ , y la generación de portadores G = 0, obtenemos la variación de los portadores fotogenerados de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\Delta n(t) = n_{ph} * \exp\left(-t/\tau\right) \tag{2.17}$$

En la ecuación 2.17,  $n_{ph}$  es la concentración de los portadores fotogenerados en un tiempo  $t = t_{off}$ .



Figura 2.4 Cinética de la fotoconductividad cuando incidimos un pulso de luz.

De la ecuación 2.16 y 2.17, podemos observar que la concentración de los portadores fotogenerados varía exponencialmente. Este caso sólo es posible si  $\tau_n$  es una función constante y no presenta dependencia con el tiempo,  $\tau(t) = t$ , o la razón de generación,  $\tau(G) \approx G^{1/2}$ .

#### 2.2.4.1 Disminución en la velocidad de respuesta

En un material semiconductor con trampas, durante el aumento y la disminución de la fotoconductividad, existen proceso adicionales involucrados en la ocupación y desocupación de trampas. En este caso, el tiempo de vida de los portadores fotogenerados ( $\tau_0$ ) será mayor o igual al tiempo de vida de los portadores libres  $(r_n)$ . Bajo estas condiciones, la razón de  $\tau_0/\tau$  tendrá una fuerte dependencia con la razón de generación (G), si la densidad de los portadores fotogenerados que permanecen libres es mucho mayor que la densidad de portadores fotogenerados que están atrapados. El tiempo de vida de los portadores fotogenerados tiende al tiempo de vida de los portadores libres ( $\tau_0 \rightarrow \tau_n$ ). Esta declaración puede ser escrita de la siguiente manera:

$$\tau_0 = \tau_n * \theta_t \; ; \; \theta_t \ge 1 \tag{2.18}$$

En la ecuación 2.18,  $\theta_t$  es el tiempo promedio que un portador de la banda de conducción pasa entre trampas, dividido por el tiempo promedio que tarda en escapar de esas trampas [4].

#### 2.2.4.2 Disminución en la movilidad de arrastre

En un material semiconductor sin trampas, los portadores de carga son libres y la movilidad de arrastre es igual a la movilidad de la conductividad ( $\mu_0$ ). Si existen trampas en el semiconductor podemos esperar que:

$$\mu_n = \theta_t * \mu_0; \ \theta_t \ge 1 \tag{2.19}$$

En la ecuación 2.19,  $\theta_t$  es el tiempo promedio que un portador de la banda de conducción pasa entre trampas, dividido por el tiempo promedio que tarda en escapar de esas trampas [4].

# 2.3 Datos reportados sobre fotoconductividad en películas de Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H y Ge:H preparadas por plasma.

Las películas de Ge:H y Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H son de gran interés debido a sus posibles aplicaciones en diferentes dispositivos. Por ejemplo: celdas solares, fotodetectores de IR, fotodiodos, fotoresistores, microbolómetros, etc. En la literatura se ha reportado que una celda solar en configuración tándem, con películas de a-Si:H y Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H, mejora la eficiencia en comparación con un modulo simple de a-Si:H [5]. Esto es debido a que el ancho de la banda óptica de las películas de a-SiGe:H y a-Ge:H es más angosta que el ancho de la banda optica de las películas de a-Si:H. La absorción en la región de onda larga del rango visible es mejor en películas de a-SiGe:H y a-Ge:H que en películas de a-Si:H [6].

Sin embargo, la densidad de estados en las películas de a-Ge:H no se ha podido reducir a valores menores de  $5x10^{16}cm^2$ . Este valor sigue siendo por lo menos dos órdenes de magnitud más grande que la densidad de estados en las películas de a-Si:H con calidad dispositivo [7]. Esto es un obstáculo muy importante para la aplicación de a-Ge:H en dispositivos electrónicos.

# 2.3.1 Fotoconductividad relacionada con transiciones entre colas y defectos.

En cristales de Ge<sub>1-x</sub>Si<sub>x</sub> (con x = 0.05, 0.10, 0.12, 0.15) crecidos con la técnica de "Czochralski", Bakirov *et al.* [8] reporta que la fotoconductividad está controlada por huecos (muestra tipo-p). Al introducir antimonio (Sb) en la aleación, la fotoconductividad es controlada por electrones (muestra tipo-n). En estas películas se observaron dos tipos de niveles en la banda prohibida: centros que actúan como trampas y centros de recombinación. En las películas tipo-n se observo que al aumentar el contenido de silicio desde

x = 0.05 hasta x = 0.15, la profundidad de los centros de recombinación incrementó desde 0.34eV hasta 0.41eV y su sección transversal de captura también aumentaba desde  $5x10^{-16}cm^2$  hasta  $10^{-15}cm^2$ . Mientras que, la profundidad de las trampas aumentó desde 0.15eV hasta 0.31eV y su sección transversal de captura aumentó desde  $3x10^{-22}cm^2$  hasta  $2.5x10^{-20} cm^2$ . La fotoconductividad redujo desde  $\sigma_{ph} = 1.7 \times 10^{-4} (\Omega * cm)^{-1}$  para x = 0.05, hasta  $\sigma_{ph} = 1 \times 10^{-5} (\Omega * cm)^{-1}$  para x = 0.15. Por otro lado, en las películas tipo-p al aumentar la concentración de silicio desde x = 0.05 hasta x = 0.15, la profundidad de las trampas incrementó desde 0.06eV hasta 0.13eV y su sección transversal de captura incrementó desde  $4.5 \times 10^{-18} cm^2$  hasta  $1.4x10^{-16}$  cm<sup>2</sup>. Mientras que, la profundidad de los centros de recombinación aumentó desde 0.12eV hasta 0.29eV y su sección transversal de captura aumentó desde  $10^{-13} cm^2$  hasta  $4x 10^{-12} cm^2$ . La fotoconductividad redujo desde  $\sigma_{ph} = 1.9 x 10^{-4} (\Omega * cm)^{-1}$  para x = 0.05 hasta  $\sigma_{ph} = 1.6 x 10^{-5} (\Omega * cm)^{-1}$  $(cm)^{-1}$  para x = 0.15. En la tabla 2.1 se muestran la fotoconductividad de las películas de  $Ge_{1-x}Si_x$  y el contenido de silicio en cada película.

Tabla 2.1 Fotoconductividad de las películas de Ge<sub>1-x</sub>Si<sub>x</sub> obtenida a temperatura ambiente por Bakirov *et al.* [8]. La intensidad utilizada durante la medición fue de  $I_0 \approx 50 mW/cm^2$ .

$Ge_{1-x}Si_x$			
Tipo-n			Тіро-р
x	$\sigma_{ph} * 10^{-5}$	x	$\sigma_{ph} * 10^{-5}$
0.05	17.0	0.10	19.0
0.10	2.8	0.12	7.5
0.15	1	0.15	1.6

En películas de a-Ge<sub>1-x</sub>Si<sub>x</sub>:H ( $10^{-3} < x < 10^{-1}$ ) depositadas por la técnica de "Sputtering", Drüsedau *et al.* [9] reporta que el aumento de la presión parcial de silano ( $P_{SiH_4}$ ) reduce la fotoconductividad, pero no afecta considerablemente a la energía de Urbach ( $E_U$ ) o a la densidad de estados ( $N_D$ ) dentro de un error experimental de  $\Delta E_U = 2meV$  y  $\Delta N_D = 0.4N_D$ . En la figura 2.5 se muestran los parámetros extraídos por Drüsedau *et al.* [9] en sus películas de a-Ge<sub>1-x</sub>Si<sub>x</sub>:H. En la figura 2.6 podemos observar que la fotoconductividad y la conductividad en obscuridad reducen al aumentar la presión parcial de silano. El contenido de hidrogeno y en ancho de la banda óptica aumentan con el aumento de la presión parcial de silano. El contenido de silicio en las películas se obtiene utilizando:  $x = 0.8 * P_{SiH_a}/mTor$ .



Figura 2.5 Conductividad en obscuro, fotoconductividad, contenido de hidrogeno y banda prohibida en función de la presión parcial de silano [9].

Dong *et al.* [10] declara que al aumentar el contenido de germanio en las aleaciones de  $a-Si_{1-x}Ge_x$ :H (depositada por "Sputtering"), la fotoconductividad reduce debido a un aumento de la densidad de los estados localizados en la cola de las bandas y a un aumento en la densidad de defectos. En la tabla 2.2, se muestra el contenido de germanio y la fotoconductividad obtenida por Dong *et al.* [10].

Tabla 2.2 Fotoconductividad obtenida por Dong *et al.* [10]. El flujo de fotones fue de  $\phi_0 \approx 10^{15} cm^{-1} * s^{-1}$  y la longitud de onda fue de  $\lambda = 0.62 \mu m$ .

$a - Si_{1-x}Ge_x$		
x	$\sigma_{ph} * 10^{-8} \ (\Omega * cm)^{-1}$	
0.65	4	
0.85	2	

En películas de a-Si<sub>1-X</sub>Ge<sub>X</sub>:H (1 >  $x \ge 0.57$ ) depositadas por PECVD, Wickboldt *et al.* [11] reportó que la energía Urbach ( $E_u$ ) de a-Ge:H presentó un valor de 41 ± 2*meV*, y la energía de Urbach de a-Si<sub>1-X</sub>Ge<sub>X</sub>:H (1 >  $x \ge$ 0.57) presentó un valor de 45 ± 2*meV*. La energía Urbach en las películas de a-Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H se obtuvo por "transient photocapacitance" (TCP), y en las películas de Ge:H se obtuvo por fotocorriente constante (CPM) y espectroscopia de deflexión fototérmica (PDS).

Skumanich *et al.* [12] y Boshta *et al.* [13] reportan que en las películas de a-Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H ( $x \le 0.53$ ) depositadas por PECVD, la fotoconductividad reduce conforme el contenido de germanio aumenta, debido a que la movilidad de arrastre ( $\mu_d$ ) y el tiempo de vida de los portadores en exceso ( $\tau_n$ ) reducen. Boshta *et al.* [13] reporta que en sus muestras de a-Si<sub>x</sub>Ge<sub>1-x</sub>:H, la fotoconductividad redujo con el aumento de germanio desde  $\sigma_{ph} \approx 7.5 \times 10^{-4} (\Omega * cm)^{-1}$  para x = 0, hasta  $\sigma_{ph} \approx 8 \times 10^{-5} (\Omega * cm)^{-1}$  para x = 0.4. La movilidad de arrastre redujo desde  $\mu_n = 0.325 \ cm^2/(V * s)$  hasta  $\mu_n = 0.08 \ cm^2/(V * s)$ . Mientras que el tiempo de vida aumentó ligeramente. En la figura 2.6 se muestran los parámetros obtenidos por Boshta *et al.* [13]. La movilidad de arrastre y el tiempo de vida fueron obtenidos utilizando la técnica "photomixing" con  $I_0 = 10 \ mW/cm^2$ .



Figura 2.6 Muestra la fotoconductividad, la movilidad de arrastre y el tiempo de vida en función del contenido de germanio obtenido por Boshta *et al.* [13].

En la figura 2.7 se muestra la conductividad en obscuridad, la fotoconductividad, la energía de activación, el ancho de la banda prohibida y la razón de depósito de las películas de a-SiGe:H depositadas por RF-PECVD. Las películas fueron depositadas por Tahir *et al.* [14] en función de  $R = [GeH_4]/([GeH_4] + [SiH_4])$ . En esta figura se puede observar que la fotoconductividad decrementa y la conductividad en obscuro aumenta casi por dos órdenes de magnitud conforme *R* incrementa. Por otra parte, la energía de activación redujo cuando *R* aumento desde 0.5 hasta 10%, después se mantiene casi constante cuando R > 10%.



Figura 2.7 Muestra la fotoconductividad, la conductividad en ambiente obscuro, la energía de activación, la banda prohibida y la razón de depósito como una función de R [14].

En películas depositadas por descarga luminiscente (glow discharge), Stutzmann [15] menciona que los átomos de hidrogeno poseen un apego preferencial con los átomos de silicio y no con los átomos de germanio. Esto fue observado en aleaciones de a-SiGe:H por Stutzmann [15] y Kosarev *et al.* [16] en películas depositadas por LF-PECVD. Rudder *et al.* [17] sugiere que esto puede ser una consecuencia de las reacciones químicas que compiten en la fase plasma. Para minimizar este apego preferencial, Rudder *et al.* [17] utilizó un sistema de depósito con el plasma de silicio aislado del plasma de germanio y ambos separados del substrato. Estas condiciones
mejoraron la fotoconductividad de la películas e incrementan la incorporación de hidrogeno debido al control independiente de la presión parcial de hidrogeno. En la figura 2.8, se muestra la fotoconductividad de una muestra de a-Si<sub>0.47</sub>Ge<sub>0.53</sub>:H en función de la presión parcial de hidrogeno. La fotoconductividad obtuvo su valor más alto con una presión parcial de hidrogeno de  $P_{H_2} = 1.4mTorr$ , y la conductividad en obscuro redujo con el aumento de la presión parcial de hidrogeno.



Figura 2.8 Se muestra la fotoconductividad, obtenida con un flujo de fotones de  $\phi_0 = 10^{15} (cm^2 * s)^{-1}$  (círculos) y  $\phi_0 = 10^{15} (cm^2 * s)^{-1}$  (cuadros), y la conductividad en obscuridad (sólidos) en función de  $P_{H2}$  para a-Si<sub>0.47</sub>Ge<sub>0.53</sub>:H [17].

En la figura 2.9, se muestra el coeficiente de absorción y la energía Urbach ( $E_u$ ) obtenida en las películas de a-Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>:H por Mackenzie *et al.* [18] en función de la concentración de germanio. Las películas fueron depositadas por la técnica de descarga luminiscente. En estas películas la energía Urbach ( $E_0$ ) aumentó con el aumento del contenido de germanio desde x = 0.3 hasta x = 0.5. La respuesta espectral del coeficiente de absorción fue obtenida usando el método de fotocorriente constante (CPM). El ancho de la banda óptica ( $E_{04}$  y  $E_g$ ) fue deducida de la respuesta espectral del coeficiente de absorción.



Figura 2.9 Espectro de absorción óptica para aleaciones de  $a-Si_{1-x}Ge_x$  producidas de hydrides y fluorides y variación de  $E_U$ ,  $E_g$  y  $E_{04}$  [18].

Por otra parte y en contraste con los trabajos analizados anteriormente, Matsumura [19] declara que si es posible variar la banda prohibida de las películas de a-SiGe:H fabricadas mediante la técnica de CTL CVD, desde significativamente  $E_{\sigma} = 1.7 eV$ hasta  $E_a = 1.4 eV$ sin modificar la fotoconductividad. En la figura 2.10 se muestra la conductividad en obscuro y la fotoconductividad de las películas de a-SiGe:H, depositadas con diferentes técnicas: descarga luminiscente convencional y de alta calidad, plasma de microondas y CTL CVD en función de la banda óptica prohibida. En la misma figura se muestra la variación del ancho de la banda óptica y la razón del contenido de germanio al contenido de silicio en función de la razón de la mezcla de  $GeH_4$  y SiH<sub>4</sub>.

En la figura 2.10 se muestra que la fotoconductividad obtenida en las películas de a-SiGe:H, fabricadas mediante CTL CVD, es equivalente o ligeramente más alta que la fotoconductividad de las películas fabricadas por plasma de alta calidad. La fotoconductividad obtenida por el método de CTL CVD estuvo dentro del rango de  $\sigma_{ph} = 10^{-5} - 10^{-4} (\Omega * cm)^{-1}$ .



Figura 2.10 Conductividad en obscuro y fotoconductividad de CTL CVD a-SiGe:H, descarga luminiscente (GD) a-SiGe:H, y a-SiGe:H depositado por microondas ( $\mu W$ ) en función de la banda prohibida óptica. Razón de Ge/Si y banda prohibida óptica de CTL CVD a-SiGe:H en función de la razón de la mezcla de GeH<sub>4</sub> y SiH<sub>4</sub>. La intensidad utilizada fue de 100mW/cm<sup>2</sup> [19].



Figura 2.11 Espectro de absorción de las películas de a-Ge:H dopadas con (a) fosforo y (b) boro. El orden del espectro (en 0.85eV) es idéntico a la concentración de dopante dada en la figura [20].

Finalmente, Ebersberger *et al.* [20] reporta que en a-Ge:H el aumento de la concentración de dopado (dopado con boro) aumenta el desorden en la red amorfa y aumenta el valor de la energía Urbach. La figura 2.11(a) se

muestra el espectro de absorción de las películas de a-Ge:H dopado con fosforo, y en la figura 2.11(b) el espectro de absorción de las películas de a-Ge:H dopado con boro. El ancho de la banda óptica es de 1.1*eV*.

#### 2.3.2 Dependencia de la fotoconductividad con la intensidad.

En esta sección se presenta el análisis de la dependencia de la fotoconductividad con la intensidad. En la literatura se ha reportado mucha información sobre las características ópticas, estructurales y electrónicas de las películas de a-Si:H y a-Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>:H con x < 0.5. Pero no se ha prestado suficiente atención a la dependencia de la fotoconductividad con la intensidad en películas de Ge:H y Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H con x > 0.5.

En películas de a-Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H, Dong *et al.* [10] observó que para un contenido de germanio de 0 < x < 85%, la fotoconductividad de las películas de a-Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H no presentaba una dependencia lineal con la intensidad ( $\sigma_{ph} \propto \Phi^{\gamma}$ ;  $\gamma \neq 1$ ). Para un contenido de germanio de 0 < x < 85%, el factor obtenido fue de  $\gamma = 0.85$  y para un contenido de germanio de x = 0.85, el factor obtenido fue de  $\gamma = 0.5$ . En la figura 2.12 se muestra la dependencia de la fotoconductividad con la intensidad en función de la concentración de germanio.



Figura 2.12 Dependencia de la fotoconductividad con la intensidad ( $\sigma_{ph} \propto \phi^{\gamma}$ ) en función del contenido de germanio [10].

Chambouleyron *et al.* [21] observó que en sus películas de a-Ge:H (depositadas por la técnica de "Sputtering") la fotoconductividad no presenta una dependencia lineal con la intensidad ( $\sigma_{ph} \propto \Phi^{\gamma}$ ;  $\gamma \neq 1$ ). Para una frecuencia f = 4.6Hz, la dependencia de la fotoconductividad con la intensidad mostro un factor de  $\gamma = 0.75$ , y para una frecuencia de f = 108Hz, la dependencia do la intensidad mostro un factor de  $\gamma = 0.75$ , y para una frecuencia de f = 108Hz, la dependencia de la fotoconductividad con la intensidad mostro un factor de  $\gamma = 0.75$  para una frecuencia de 4.6Hz a  $\gamma = 0.85$ . El incremento obtenido de  $\gamma = 0.75$  para una frecuencia de 4.6Hz a  $\gamma = 0.85$  para una frecuencia de 108Hz, fue atribuido a un tiempo de respuesta relativamente largo.

En la figura 2.13 se muestra la fotoconductividad obtenida por Chambouleyron *et al.* [21] en función de la intensidad incidida sobre las muestras. La intensidad de 0.5mW fue obtenida con un laser He-Ne. Los triángulos sólidos representan la dependencia de la fotoconductividad con la intensidad modulada a una frecuencia de f = 108Hz, y los triángulos abiertos, la dependencia de la fotoconductividad con la intensidad modulada a una frecuencia de f = 4.6Hz.



Figura 2.13 Fotoconductividad obtenida en películas de *a-Ge:H* en función del flujo de fotones ( $h\nu = 1.96eV$ ) modulado a una frecuencia de 4.6 y 108Hz [21].

#### 2.3.3 Propiedades electrónicas de las películas fabricadas en el INAOE.

Esta subsección se describen algunas propiedades electrónicas reportadas por Sánchez [1] y Kosarev *et al.* [16] en películas de Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H y Ge:H fabricadas en el laboratorio del INAOE. En primer lugar se muestran las características ópticas principales obtenidas en las películas estudiadas: la energía de la banda prohibida,  $E_g$ , la energía Urbach,  $E_U$ , entre otros. Posteriormente se muestra la estructura morfológica de todas las muestras.

#### 2.3.3.1 Características ópticas principales.

Las propiedades ópticas de las películas de a-Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H y a-Ge:H fueron obtenidas por transmisión y elipsometría espectroscópica. En la figura 2.14, se muestra la dependencia espectral del coeficiente de absorción ( $\alpha(h\nu)$ ) de las películas de a-Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H y a-Ge:H. La razón de dilución de hidrogeno se varió dentro del rango de R = 20 a 80. En las curvas  $\alpha(h\nu)$  se muestran tres regiones de absorción principales: a) absorción banda a banda que corresponde a transiciones de la banda de valencia a la banda de conducción; b) absorción relacionada con transiciones de la cola de la banda de conducción y c) absorción relacionada con transiciones entre defectos.

El parámetro  $E_g^*$  fue extraído de las mediciones de transmisión espectral. Este parámetro fue determinado como una frontera entre la región relacionada con la absorción de Urbach, la cual es caracterizada por  $E_U$ , y transiciones banda-banda para absorción fuerte ( $\alpha = 10^* cm^{-1}$ ). Los valores de  $E_g^*$  fueron cercanos a  $E_{04}$  y ambos mostraron características similares con respecto a *R* como se muestra en la figura 2.15.



Figura 2.14 Dependencia espectral del coeficiente de absorción óptica,  $\alpha(h\nu)$ , para diferentes diluciones de hidrogeno, R, para películas de A) Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H y B) Ge:H [1].



Figura 2.15 Ancho de la banda óptica (Eg, Eg<sup>\*</sup> y  $E_{04}$ ) en función de la razón de dilución de hidrogeno para películas de a) SiGe:H y b) Ge:H [1]

#### 2.3.3.2 Estructura morfológica de las muestras.

Los cambios en la morfología de las muestras seleccionadas fueron estudiados mediante imágenes AFM. Las imágenes AFM de las películas de  $Ge_xSi_{1-x}$  con variación en la dilución de hidrogeno se muestran en la figura 2.16. En ellas se puede verificar que la morfología de los granos cambia conforme la dilución de hidrogeno varia de R = 20 a 80.



Figura 2.16 Imágenes AFM de la superficie de las películas de  $a-Ge_xSi_{1-x}$ :H, depositadas con razón de alta dilución de hidrogeno, R = 20 a 80 [18].

En la figura 2.17 se muestran las imágenes AFM de las películas de Ge:H con variación en la dilución de hidrogeno. En estas imágenes se muestra como cambia la morfología de los granos conforme la dilución de hidrogeno varía de R = 20 a 80.



Figura 2.17 Imágenes AFM de la superficie de las películas de a-Ge:H, depositadas con razón de alta dilución de hidrogeno, R = 20 a 80 [18].

## 2.4 Conclusiones sobre el análisis de literatura

- En la literatura se ha reportado muy poca información sobre la dependencia de la fotoconductividad con la intensidad. Las referencias más directas reportan una valor de γ = 0.75 para Ge:H
   [21] y un valor de γ = 0.5 para Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H con x = 0.85 [10].
- En este análisis de literatura no se encontrado información sobre la respuesta temporal de la fotoconductividad en películas de Ge:H y Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H con alto contenido de germanio x > 0.5.
- ✤ En aleaciones de Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H con muy bajo contenido de silicio 10<sup>-3</sup> < (1 - x) < 10<sup>-1</sup>, la presión parcial de silano reduce la fotoconductividad, pero no afecta considerablemente al parámetro de Urbach.
- En aleaciones de SiGe:H, el incremento del contenido de germanio reduce la movilidad y el tiempo de vida de los portadores debido a un incremento en la densidad de estados localizados.
- En películas de SiGe:H depositadas por descarga luminiscente y por PECVD, se ha observado que los átomos de hidrogeno muestran un apego preferencial hacia los átomos de silicio.
- La incorporación de átomos de boro a la red de germanio incrementa la densidad de defectos y el valor de la energía Urbach.

# Capítulo 3

# Metodología y Técnicas de Caracterización

# 3.1 Introducción

En este capítulo se presentan las condiciones utilizadas durante el depósito de las películas de  $Ge_xSi_{1-x}$ :H y Ge:H, la configuración experimental del equipo de fabricación, la configuración experimental del equipo de mediciones y las metodologías empleadas para obtener las características electrónicas de las películas de  $Ge_xSi_{1-x}$ :H y Ge:H en base a la fotoconductividad. En la sección 3.2, se muestra un esquema del sistema de depósito de plasma y se describen las condiciones utilizadas durante la preparación de las muestras. En la sección 3.3, se describen las metodologías empleadas para obtener las características y la configuración experimental del equipo de mediciones.

#### 3.2 Procesos de fabricación de las muestras

En esta sección se describe la configuración experimental del equipo de fabricación y las condiciones utilizadas durante el depósito de las películas. En la subsección 3.2.1, se presenta un esquema del sistema de depósito LF-PECVD, las partes que integran dicho sistema de depósito, las condiciones de depósito utilizadas durante la preparación de las muestras y las películas seleccionadas para el estudio de sus características electrónicas.

#### 3.2.1 Fabricación de las películas de SiGe por LF-PECVD

El proceso de depósito químico de vapor activado por plasma, está determinado por las reacciones que ocurren dentro del plasma y sobre la superficie de la muestra. Las reacciones químicas que ocurren dentro del plasma son: excitación por colisiones de moléculas con electrones, ionización y disociación de moléculas. Por lo tanto, el plasma utilizado durante el depósito PECVD está compuesto por electrones, moléculas ionizadas, moléculas neutras y radicales libres.

Durante el proceso de depósito, las moléculas neutras se mueven hacia el substrato por difusión, los iones positivos bombardean el crecimiento de la película, los iones negativos son atrapados dentro de la cámara y pueden eventualmente formar pequeñas partículas o polvo. Cuando los productos creados en el plasma llegan a la superficie del material, la película se forma mediante reacciones superficiales y otros procesos. Por ejemplo: absorción, desorción y difusión de hidrogeno, difusión de radicales, bombardeo iónico y electrónico.

El depósito por LF-PECVD es un proceso complicado, debido a que las interacciones físicas y químicas que ocurren dentro del plasma y en el crecimiento de la película superficial son dependientes de la potencia de RF;

de la frecuencia de operación; de la temperatura del substrato; de la presión y composición del gas; de la magnitud y del patrón del flujo de gas; de la geometría del electrodo, etcétera [1].

#### 3.2.1.1 Arreglo Experimental

El depósito de las películas de  $Ge_xSi_{1-x}$ :H y Ge:H se realizó en un sistema de depósito de plasma de "APPLIED MATERIALS" (Modelo AMP 3300). En la figura 3.1 se muestra la configuración experimental del equipo de fabricación.



Figura 3.1 Esquema del sistema de depósito de plasma utilizado para fabricar las muestras [1].

En el reactor del sistema (la parte central del equipo) las moléculas son disociadas y los productos son depositados sobre el substrato caliente para formar una capa. Las placas del reactor tienen un diámetro de 66*cm* y están separadas por una distancia de 5*cm*. La fuente de radiofrecuencia (RF) le proporciona la potencia al reactor del sistema. La potencia de la fuente de RF

se puede variar dentro del rango de 0 a 500*W*. La frecuencia de operación de la fuente de RF esta dentro del rango de f = 90*KHz* hasta f = 469*KHz* con un error del 0.1%. La potencia de la fuente de RF se aplica al electrodo superior y la tierra se conecta al electrodo inferior. Durante el proceso del depósito, las muestras se colocan sobre el electrodo inferior. El electrodo inferior puede alcanzar temperaturas dentro del rango de temperatura ambiente hasta 400°C. Los controles para el flujo de masa (incluidos en el sistema de control de los gases) miden y controlan los gases (GeH, SiH, NH, Argón, H, PH, BH) que son suministrados a la cámara. El sistema de vacio está compuesto por la bomba mecánica y el control de presión. La presión se puede variar dentro del rango de 0.3 a 4Torrs [1].

#### 3.2.1.2 Preparación de las películas.

Durante el depósito de las muestras, la temperatura del substrato fue de  $T_s = 300$  °C y la frecuencia de descarga fue de f = 110 KHz. Las películas fueron depositadas sobre un substrato de vidrio (Corning 1737). Para el depósito de las películas de Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H, se utilizo silano (*SiH*<sub>4</sub>), germano (*GeH*<sub>4</sub>) e hidrogeno (*H*<sub>2</sub>). El flujo total de los gases de silano y germano fue de  $Q_{(SiH_4+GeH_4)} = 50 sccm$ . Para el depósito de las películas de Ge:H, se utilizo germano (*GeH*<sub>4</sub>) e hidrogeno (*H*<sub>2</sub>). El flujo total de los gases de germano fue de  $Q_{GeH_4} = 50 sccm$ . Para el depósito de las películas de Ge:H, se utilizo germano (*GeH*<sub>4</sub>) e hidrogeno (*H*<sub>2</sub>). El flujo del gas de germano fue de  $Q_{GeH_4} = 50 sccm$ . Las películas de Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H y Ge:H fueron depositadas en un amplio rango de dilución de hidrogeno (*R*<sub>H</sub> =  $Q_{H_2}/Q_{(SiH_4+GeH_4)} = 20, 40, 50, 60, 70, 75, 80$  y *R*<sub>H</sub> =  $Q_{H_2}/Q_{GeH_4} = 20, 40, 45, 50, 60, 70, 80$ ) [1].

#### 3.2.1.3 Selección de las muestras a medir.

Para realizar el estudio de las características electrónicas en base a la fotoconductividad, se seleccionaron películas de Ge:H y Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H con

variación en la razón de dilución de hidrogeno, y películas de Ge:H con variación en la concentración del dopado con boro. La estructura, composición y propiedades ópticas de las muestras fueron estudiadas sistemáticamente en las referencias [16] y [22]. En la tabla 3.1, se muestran las películas de Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H y Ge:H con variación en la razón de dilución de hidrogeno. En la tabla 3.2, se muestran las películas de Ge:H con variación en la concentración de dopado con boro.

Tabla 3.1 Propiedades eléctricas de las películas ( $Ge_xSi_{1-x}$ :H y Ge:H) seleccionadas para el estudio de las características electrónicas en base a la fotoconductividad [16].

Película	Razón de dilución	Ea	$E_F^{RT}$	$\sigma_{Dark}^{RT}$				
	$(R_{\mathcal{H}})$	(eV)	(eV)	$(\Omega * cm)^{-1}$				
SiGe:H								
P447	40	0.20	0.139	5.87E-03				
P448	50	0.31	0.269	2.23E-04				
P453	70	0.30	0.265	3.90E-04				
P468	75	0.28	0.210	2.50E-04				
P454	80	0.34	0.316	1.52E-04				
Ge:H								
P455	20	0.22	0.176	4.84E-03				
P470	45	0.28	0.218	3.47E-04				
P457	50	0.28	0.262	1.03E-03				
P458	60	0.29	0254	6.65E-04				
P459	70	0.32	0.316	4.74E-04				

Tabla 3.2 Propiedades eléctricas de las películas (Ge:H (B)) seleccionadas para el estudio de las características electrónicas de base a la fotoconductividad [22].

Película	[B/Ge] <sub>Sol</sub> (%)	E <sub>a</sub> (eV)	E <sub>F</sub> <sup>RT</sup> (eV)	σ <sub>RT</sub> (Ω*cm) <sup>-1</sup>			
a-GeB:H							
P589	0	0.22	0.20	3.5E-03			
P590	0.004	0.27	0.24	2.1E-03			
P591	0.013	0.29	0.26	9.7E-04			
P592	0.029	0.39	0.38	4.9E-05			
P593	0.060	0.47	0.47	3.5E-06			
P594	0.070	0.42	0.39	1.9E-05			
P595	0.087	0.37	0.33	4.5E-05			
P596	0.088	0.33	0.26	8.7E-05			
P597	0.120	0.27	0.15	1.0E-04			
P598	0.140	0.32	0.27	1.2E-04			

Los parámetros eléctricos en la tabla 3.1 y en la tabla 3.2, fueron calculados por Sánchez [16] y Kosarev *et al.* [22]. El grosor de las películas de Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H y Ge:H estuvo dentro del rango de  $d = 0.38 \mu m$  a  $d = 0.85 \mu m$ . Las condiciones del depósito y el proceso de fabricación de las muestras se han descrito en la sección 3.2.1.2.

### 3.3 Metodología de Mediciones

En esta sección se describe la configuración experimental del equipo de mediciones y las metodologías utilizadas para obtener las características electrónicas de las películas de Ge:H y Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H en base a la fotoconductividad. En la subsección 3.3.1, se presenta la metodología empleada para obtener la conductividad en obscuridad y con iluminación. En la subsección 3.3.2, se muestra la metodología empleada para obtener la respuesta espectral de la fotoconductividad y el procesamiento de datos para obtener: la energía Urbach, la razón de defectos y la fotoconductividad. La metodología empleada para obtener la cinética de la fotoconductividad y obtener el tiempo de relajación de los portadores fotogenerados se describe en la subsección 3.3.3. Finalmente en la subsección 3.3.4, se describe la metodología empleada para obtener la dependencia de la fotoconductividad con la intensidad de la luz incidente sobre las muestras.

#### 3.3.1 Mediciones de I-V en obscuridad y con iluminación

Las curvas de I-V en obscuridad y con iluminación, fueron medidas en el régimen de DC. Para medir las curvas I-V, se utilizó un sistema de micro pruebas de "MMR-Technologies Inc." (Modelo LTMP-2) a temperatura ambiente y un electrómetro de "Keithley Instrument Inc." (Modelo 6517A). La fuente de luz fue un diodo emisor de luz infrarroja de "Everlight Electronics

Co., Ltd." (Modelo IR383). La longitud de onda incidente fue de  $\lambda = 0.94 \mu m$  y la intensidad fue de  $I_0 = (1.06 \pm 0.01) * 10^{-2} W/cm^2$ .

#### 3.3.1.1 Equipo de medición e instalación para obtener las curvas I-V

En la figura 3.2 se muestra la configuración experimental del equipo de mediciones. La configuración experimental contiene: un electrómetro "Keithley"; una interfaz GPIB del electrómetro a la computadora; un software desarrollado en LabView para controlar al electrómetro; un diodo emisor de luz y un sistema de micro pruebas a temperatura ambiente para colocar la muestra.



Figura 3.2 Instalación utilizada para obtener las curvas I-V en obscuridad y con iluminación.

El electrómetro Keithley está configurado como fuente de voltaje y medidor de corriente. El voltaje puede ser variado de 0 a  $\pm 100V$ , con un error de  $\pm (0.15\% \ del \ valor \ ajustado + 10mV)$ , y/o de 0 a  $\pm 1000V$ , con un error de  $\pm (0.15\% \ del \ valor \ ajustado + 100mV)$ . El medidor de corriente tiene una sensibilidad que va desde 20pA hasta 20mA. La medición se realizó con nula iluminación del entorno. El equipo de mediciones fue montado sobre una mesa óptica con protección contra vibraciones. En la figura 3.3, se muestra el esquema de las conexiones internas del electrómetro Keithley.



Figura 3.3 Esquema de las conexiones internas del electrómetro Keithley.

Para obtener las curvas de I-V se realizaron dos mediciones de corriente: la primera fue variando el voltaje de 0V a 15V, y la segunda fue variando el voltaje de 0V a –15V. En la tabla 3.3, se muestran los ajustes del electrómetro Keithley durante la obtención de las curvas I-V.

Tabla 3.3 Ajustes realizados al electrómetro Keithley mediante su interfaz con LabView.

Polarización	V <sub>Inisio</sub> (Volts)	V <sub>Paro</sub> (Volts)	V <sub>paso</sub> (Volts)	Retardo (5)	T <sub>Integración</sub> (NPLC)	No. de Muestras
Positiva	0	15	0.5	0.5	10	30
Negativa	0	-15	-0.5	0.5	10	30

Para acceder a la muestra durante las mediciones fotoeléctricas, antes del depósito de la película, se depositaron sobre el substrato de vidrio dos electrodos de titanio en configuración coplanar. El grosor de los electrodos fue de  $0.5\mu m$ . En la figura 3.4 se muestra la película depositada sobre el substrato de vidrio con electrodos de titanio en configuración coplanar.



Figura 3.4 Película depositada sobre un substrato de vidrio con electrodos de Titanio para realizar mediciones fotoeléctricas.

El grosor de la película (*d*) fue medido utilizando un perfilómetro de "Tencor Instrument" (Modelo Alpha-step 200). El error del equipo fue  $\approx 2\%$ .

#### 3.3.1.2 Procesamiento de datos

Para medir las curvas de I-V bajo iluminación, las muestras fueron iluminadas 5 minutos antes de realizar la medición de corriente. En la figura 3.5, se muestra la corriente eléctrica (medida en obscuridad) en función del voltaje de polarización a) positivo y b) negativo. De la figura 3.5 podemos observar que la corriente eléctrica tiene un comportamiento lineal con el voltaje de polarización. Para verificar si esta suposición es correcta se realizó un ajuste en escala lineal, usando la siguiente ecuación:

$$I = \frac{v^b}{R} \tag{3.1}$$

En la ecuación 3.1, R es una variable de proporcionalidad y un valor de b = 1 representa un comportamiento lineal. En la figura 3.6, se muestra el ajuste realizado para verificar si la corriente eléctrica tiene un comportamiento lineal con el voltaje de polarización a) positivo y b) negativo.



Figura 3.5 Curvas de I-V medidas en obscuridad con polarización a) positiva y b) negativa.



Figura 3.6 Ajuste realizado a las curvas I-V (de la figura 3.5) para verificar si existe un comportamiento lineal.

En la figura 3.6 podemos observar que la corriente eléctrica si es función lineal del voltaje de polarización a) positivo y b) negativo. Para verificar si las curvas pueden ser ajustadas con la relación de la ley de ohm, se tomaron las dos regiones y se realizo un ajuste utilizando la siguiente ecuación:

$$I = \frac{v}{R} \tag{3.2}$$

En la ecuación 3.2, *R* representa la resistencia de la película medida. La figura 3.7 muestra el ajuste realizado a las curvas I-V medidas en a) obscuridad y b) con iluminación ( $I_0 = (1.06 \pm 0.01) * 10^{-2} W/cm^2$ ).



Figura 3.7 Ajuste realizado a las curvas I-V para obtener el valor de la resistencia en a) obscuridad y b) con iluminación.

Para obtener la conductividad eléctrica en obscuridad y con iluminación, se utilizo la siguiente relación:

$$\sigma[\Omega^{-1} * cm^{-1}] = \frac{L[cm]}{W[cm] * d[cm] * R[\Omega]}$$
(3.3)

En la ecuación 3.3, *L*, *W* y *d* son los parámetros geométricos mostrados en la figura 3.4. En la ecuación 3.3, *R* toma los valores obtenidos en la figura 3.7. La razón de la fotoconductividad a la conductividad en obscuridad, fue extraída usando la siguiente relación:

$$\frac{\sigma_{ph}}{\sigma_{Dark}} = \frac{\sigma_{Light}}{\sigma_{Dark}} - 1$$
(3.4)

En la ecuación 3.4, la conductividad eléctrica bajo iluminación ( $\sigma_{Light}$ ), está definida como la suma de la conductividad eléctrica en obscuridad ( $\sigma_{Darh}$ ) y la fotoconductividad ( $\sigma_{ph}$ ) respectivamente.

#### 3.3.2 Respuesta espectral de la fotoconductividad

La respuesta espectral de la fotoconductividad en las películas de Ge:H y Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H, fue medida en el régimen de AC a temperatura ambiente usando un sistema amplificador Lock-In de "Stanford Research Systems Inc." (Modelo "SR530"), un sistema de micro pruebas ("LTMP-2") para colocar la muestra y un monocromador "TRIAX320" para seleccionar la longitud de onda incidente.

# 3.3.2.1 Equipo de medición e instalación para medir la dependencia espectral de la fotoconductividad

En la figura 3.8 se muestra la configuración experimental del equipo de mediciones. La configuración experimental contiene: una lámpara de Halógeno de 100W; una fuente de alimentación programable (Modelo "PSP-2010"); un sistema Optical Chopper (Modelo "C996"); un equipo monocromador de "Jovin Yvon Inc." (Modelo "TRIAX320"); un sensor

Thermopile de "Thermo Oriel Instruments" (Modelo "71938"); un electrómetro "Keithley"; un sistema amplificador Lock-In; 4 lentes de Ca<sub>2</sub>F y un sistema de micro pruebas "LTMP-2" a temperatura ambiente.



Figura 3.8 Configuración experimental utilizada para realizar las mediciones de la respuesta espectral de la fotoconductividad.

La lámpara de halógeno es una fuente de luz policromática de P = 100W. La fuente de alimentación programable "PSP-2010" tiene una precisión de  $\pm 5\%$ , y fue utilizada para alimentar a la lámpara de halógeno. El monocromador "TRIAX320" tiene una resolución de 0.06nm (microstep option), una dispersión de 2.64nm/mm y una distancia focal de 32cm. El monocromador fue usado para seleccionar la longitud de onda incidente. Con el electrómetro "Keithley" se polarizo a las muestras en el régimen DC. El sistema "Optical Chopper C996" modulo al haz de luz a una frecuencia de f = 4Hz. La respuesta del sensor "Thermopile 71938" es de  $(260 \pm 40)\mu A/W$ (dentro del rango de  $\lambda = 0.13 \mu m$  a  $\lambda = 11 \mu m$ ) y su área actica de  $2.8 \times 10^{-3} cm^2$ . El sensor "Thermopile" fue utilizado para medir la intensidad del haz de luz. El amplificador Lock-In "SR530", en la configuración medidor de corriente, tiene una ganancia de  $10^{6}A/V$  con una precisión del 1%, El rango de operación del amplificador Lock-In esta dentro del rango de f = 2Hz a f = 10kHz; su corriente de sobrecarga en DC es de  $1\mu A$ ; su impedancia de entrada es de  $1k\Omega$  (conectada a tierra virtual) y puede medir

corriente dentro del rango de 100 fA a  $0.5 \mu A$ . El amplificador Lock-In fue utilizado para obtener la respuesta espectral de la fotoconductividad.

#### 3.3.2.2 Procesamiento de datos

Durante las mediciones, las películas fueron colocadas en el sistema de micro pruebas a temperatura ambiente. La corriente eléctrica en el régimen de DC fue de  $I_{DC} \approx 0.9 \mu A$ . La longitud de onda se vario dentro del rango de  $\lambda = 700 nm$  a  $\lambda = 1600 nm$  con un paso de  $\Delta \lambda = 20 nm$ . En la figura 3.9, se muestra la foto-respuesta medida en función de la longitud de onda incidente. La radiación espectral emitida por la parte óptica de la instalación de mediciones se muestra en la figura 3.10.



Figura 3.9 Foto-respuesta de una muestra medida en función de la longitud de onda incidente.

Para obtener la fotoconductividad en función de la longitud de onda incidente, se tomaron los datos mostrados en la figura 3.9 y se obtuvo la fotoconductividad para cada longitud de onda usando la siguiente relación:

$$\sigma_{ph}[\Omega^{-1} * cm^{-1}] = \frac{l_{ph} * L}{W * d * V_{DC}}$$
(3.5)

En la ecuación 3.5, *L*, *W* y *d* son los parámetros geométricos mostrados en la figura 3.4. Para obtener la respuesta espectral de la fotoconductividad normalizada a una intensidad constante, es necesario verificar si la fotoconductividad de las muestras presenta una dependencia lineal con la intensidad ( $\sigma_{ph} \propto I^{\gamma}, \gamma = 1$ ). Los resultados de la sección 4.3.1, muestran que la fotoconductividad medida en estas muestras tiene una dependencia casi lineal con la intensidad. Por lo tanto, podemos obtener la respuesta espectral utilizando la siguiente relación:

$$\sigma_{ph}(\lambda)_{I_0 = Cte.} = \frac{\sigma_{ph-Datos \ primarios}(\lambda)}{s_{Equipo}^{I_0} de \ mediciones}(\lambda)}$$
(3.6)

En la ecuación 3.6,  $S_{Equipo \ de \ mediciones}^{I_0}(\lambda)$  es la radiación espectral emitida por la parte óptica de la instalación de mediciones. En la figura 3.10, se muestra la radiación espectral emitida por la parte óptica de la instalación de mediciones en función de la longitud de onda.



Figura 3.10 Radiación espectral emitida por la parte óptica de la instalación de mediciones. La intensidad se midió con el sensor "Thermopile 71938".

La parte óptica de la instalación de mediciones estuvo conformada por: una lámpara de halógeno de P = 100W; 4 lentes de Ca<sub>2</sub>F; un espejo; el equipo monocromador "TRIAX320" y sus 4 filtros correspondientes para suprimir las dos primeras armónicas. La radiación espectral de la parte óptica se midió con el sensor "Thermopile 71938". En la figura 3.11 se muestra la respuesta espectral de la fotoconductividad (normalizada a una intensidad constante de  $I_0 = (1.64 \pm 0.01) * 10^{-3} W/cm^2)$  en función de la longitud de onda. La línea punteada representa la longitud de onda que corresponde a la energía de la banda óptica de la muestra.



Figura 3.11 Respuesta espectral de la fotoconductividad normalizada a una intensidad constante de  $I_0 = (1.64 \pm 0.01) * 10^{-3} W/cm^2$ . Muestra de Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H.

De la curva  $\sigma_{ph}(\lambda)$  podemos observar que para valores de  $\lambda > 1120 nm$  la respuesta espectral de la película presenta máximos y mínimos ocasionados a) por interferencia o b) por extremos en la densidad de estados. Para verificar si los máximos y mínimos son ocasionados por interferencia, se tomó la longitud de onda para cada máximo (o mínimo) observado, y se calculó el grosor de la película de acuerdo a la siguiente relación [25]:

$$d = \frac{\lambda_{z} * \lambda_{1}}{2(\lambda_{z} * n_{1} - \lambda_{1} * n_{z})}$$
(3.7)

Donde  $n_1 y n_2$  son los índices de refracción de dos máximos (o mínimos) consecutivos, ubicados en las longitudes de onda  $\lambda_1 y \lambda_2$  respectivamente. Los espesores obtenidos en las diferentes parejas de máximos y/o mínimos se promedian para obtener un valor aceptable del espesor de la muestra (*d*). Finalmente, los valores obtenidos con la ecuación 3.7 se comparan con los valor medidos con el perfilómetro "Alpha-Step 200". Si la desviación del valor calculado con respecto al valor medido es mayor al 10%, el máximo corresponde a la densidad de estados. Si la desviación es menor al 10%, el máximo corresponde a interferencia. En la figura 3.12 se muestra la respuesta espectral de la fotoconductividad en función de la energía del fotón. La línea punteada representa la energía de la banda óptica. La energía del fotón se calculo para cada longitud de onda utilizando la siguiente relación:

$$E_{Fotion}[hv, eV] = \frac{1.24}{\lambda}$$
(3.8)

Donde  $\lambda[\mu m]$  es la longitud de onda. La energía Urbach fue extraída en la región de  $h\nu < E_g$ , donde la fotoconductividad puede ser descrita como:

$$\sigma_{ph}(hv) = \sigma_{ph_0} e^{(hv - E_g)/E_U}$$
(3.9)

En la ecuación 3.9,  $E_{U}$  representa la energía Urbach,  $E_{g}$  es el ancho de la banda óptica,  $\sigma_{ph_{0}}$  es la fotoconductividad en  $hv = E_{g}$  y hv es la energía del fotón. Para extraer la energía Urbach, la respuesta espectral se grafico en escala  $\ln(\sigma_{ph}) vs E_{fotón}$ , y se realizó un ajuste utilizando la siguiente relación:

$$Ln(\sigma_{ph}) = Ln(A) + \frac{h\nu}{E_U}$$
(3.10)

En la figura 3.13 se muestra el ajuste realizado a la respuesta espectral para obtener la energía Urbach.



Figura 3.12 Respuesta espectral de la fotoconductividad normalizada a una intensidad constante de  $I_0 = (1.64 \pm 0.01) * 10^{-3} W/cm^1$ . Muestra de Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H.



Figura 3.13 Ajuste lineal realizado a la respuesta espectral de la fotoconductividad para obtener la energía Urbach.

Para obtener la razón de defectos de las películas de  $Ge_xSi_{1-x}$ :H y Ge:H, se utilizo la siguiente relación:

$$R_{defectos} = \frac{\sigma_{ph}(0.8eV)}{\sigma_{ph}(1.1eV)}$$
(3.11)

La respuesta espectral de la fotoconductividad, se normalizo a la intensidad de la energía del fotón que corresponde al ancho de la banda óptica (hv = 1.18eV).

#### 3.3.3 Cinética de la fotoconductividad

Para obtener la cinética de la fotoconductividad en las películas de  $Ge_xSi_{1-x}$ :H y Ge:H, se utilizó un osciloscopio de "Agilent Technologies" (Modelo DSO3152A); un generador de funciones de "Stanford Research Systems" (Modelo DS345); un pre-amplificador de "Spectra Physics" (Modelo 70710) y un sistema de micro pruebas "LTMP-2" a temperatura ambiente.

# 3.3.3.1 Equipo de medición e instalación para medir la cinética de la fotoconductividad

En la figura 3.14 se muestra la configuración experimental del equipo de mediciones. La configuración experimental contiene: un generador de funciones "DS345"; un diodo emisor de luz infrarroja "IR383"; una fuente de alimentación de voltaje "BR-1204"; un pre-amplificador de corriente "Oriel 70710"; un osciloscopio "DSO3152A" y un sistema de micro pruebas "LTMP-2". Para medir la intensidad emitida por el diodo emisor de luz, se utilizo el sensor Thermopile "Oriel 71938".



Figura 3.14 Configuración experimental del equipo de mediciones utilizado para medir el tiempo de relajación de fotoconductividad.

El diodo emisor de luz "IR383" es una fuente de luz policromática. El máximo de la intensidad emitida por el diodo IR383 se encuentra en  $\lambda$  = 940*nm* y tiene un ancho de banda de  $\Delta \lambda = 40$ *nm*. El rango de operación del generador de funciones "DS345" va desde va desde  $f = 0.1 \mu Hz$  hasta f = 30.2 MHz, el tiempo de subida/bajada es < 15ns y su asimetría es el 1% del periodo + 4ns. Con el generador de funciones DS345 se alimentó al diodo IR383 con una onda cuadrada. El osciloscopio "Agilent DSO3152A" tiene una resolución vertical que va de 2mV/div a 5V/div y una resolución horizontal de 2ns/div a 50s/div. Con el osciloscopio se muestreo el tiempo de relajación de la fotocorriente en tiempo real. El preamplificador "Oriel 70710" es un amplificador de corriente de bajo ruido, su capacitancia de entrada se puede variar de  $C_{equipo} = 0.015 \mu F$  a  $C_{equipo} = 2pF$ , su ganancia se encuentra dentro del rango de  $10^4 V/A$  a  $10^9 V/A$  y su impedancia de entrada es de  $R_{equipo} = 35\Omega$  para una ganancia de  $10^7 V/A$ . La constante de tiempo del preamplificador para una ganancia de  $10^7 V/A$  es de  $\tau_{equipo} = 20 \mu s$ . La fuente de voltaje (Modelo "BR-1204") fue utilizada para alimentar al preamplificador de corriente y a la muestra en turno durante la medición.

#### 3.3.3.2 Procesamiento de datos

Durante las mediciones, las muestras fueron colocadas en el sistema de micro pruebas a temperatura ambiente. La longitud de onda fue de  $\lambda = 0.94 \mu m (hv [eV] = 1.3 eV)$  y la intensidad de  $I_0 = (1.41 \pm 0.01) * 10^{-2} W/cm^2$ . La muestra fue polarizada con 25.2V. El equipo fue encendido 30 minutos antes de comenzar las mediciones. En la figura 3.15, se muestran los datos obtenidos en la medición del tiempo de relajación de la fotocorriente.



Figura 3.15 Relajación de la fotocorriente generada con una intensidad de  $I_0 = (1, 41 \pm 0.01) * 10^{-1} W/cm^2$ .

Para determinar si la relajación de la fotocorriente presenta un comportamiento exponencial, se realizó un ajuste utilizando la siguiente ecuación de prueba:

$$I_{ph}(t) = \Delta I_{SS} \exp\left(-t/\tau_n\right) \tag{3.12}$$

En la ecuación 3.12,  $\Delta I_{ss}$  es la fotocorriente en estado estacionario y  $\tau_n$  es el tiempo de vida de los portadores fotogenerados. En la figura 3.16, la línea solida representa el ajuste exponencial realizado a la relajación de la fotocorriente. De la figura 3.16, podemos observar que el coeficiente de correlación obtenido con el ajuste exponencial (Adj. R - Square = 0.862) no representa un ajuste confiable (Adj. R - Square > 0.99). Las flechas indican los puntos considerados en el ajuste.



Figura 3.16 Ajuste exponencial realizado a la relajación de la fotocorriente, para verificar si el tiempo de vida de los portadores fotogenerados es constante con el tiempo (muestra de Ge:H).

Para determinar si la relajación de la fotocorriente presenta un comportamiento hiperbólico, se realizó un ajuste hiperbólico usando la siguiente relación de prueba:

$$I_{ph}(t) = \frac{A}{(b+t^{n})}$$
(3.13)

En la figura 3.17, la lineal solida representa el ajuste hiperbólico realizado a la relajación de la fotocorriente. Las flechas indican los puntos considerados en el ajuste.



Figura 3.17 Ajuste parabólico realizado a la relajación de la fotocorriente, para verificar si el tiempo de vida de los portadores fotogenerados es función del tiempo (muestra de Ge:H).

En la figura 3.17 podemos observar que el ajuste realizado con la función hiperbólica, presenta un coeficiente de correlación más alto (Adj.R - Square = 0.994) que el coeficiente de correlación obtenido con el ajuste de la función exponencial (Adj.R - Square = 0.862).

#### 3.3.4 Dependencia de la fotoconductividad con la intensidad

Para realizar correctamente el procedimiento y el procesamiento de datos durante la medición y obtención de la respuesta espectral, es necesario conocer la dependencia de la fotoconductividad con la intensidad. La fotoconductividad en función de la intensidad, fue obtenida en el régimen de AC utilizando un sistema amplificador Lock-In "SR530"; un generador de funciones "DS345"; un sensor Thermopile "Oriel 71938" y un sistema de micro pruebas "LTMP-2" a temperatura ambiente.

# 3.3.4.1 Equipo de medición e instalación para medir la dependencia de la fotoconductividad con la intensidad

En la figura 3.18 se muestra la configuración experimental del equipo de mediciones. La configuración experimental contiene: un diodo emisor de luz "IR383"; una fuente de voltaje "BR-1204"; un sensor "Thermopile 71938"; un pre-amplificador de corriente "Oriel 70710"; un amplificador Lock-In "SR530"; un generador de funciones "DS345"; un electrómetro "Keithley"; un osciloscopio "Agilent DSO3152A" y un sistema de micro pruebas "LTMP-2".



Figura 3.18 Configuración experimental utilizada para obtener la dependencia de la fotoconductividad con la intensidad.

Durante la obtención de  $\sigma_{ph}(I_0)$ , el generador de funciones polarizo al diodo "IR383" con una onda cuadrada de f = 4Hz. El amplificador Lock-In midió la fotocorriente de las muestras en función de la intensidad. El sensor "Thermopile 71938" midió la intensidad emitida por el diodo "IR383" y el electrómetro Keithley la corriente eléctrica. El preamplificador de corriente midió la señal del sensor Thermopile. La ganancia del pre-amplificador fue de  $10^9$  V/A. El osciloscopio midió el voltaje entregado por el preamplificador de corriente.

#### 3.3.4.2 Procesamiento de datos

Durante la medición de las curvas  $\sigma_{ph}(I_0)$ , la longitud de onda fue de  $\lambda = 0.94 \mu m$  (hv [eV] = 1.3 eV) y la intensidad se vario dentro del rango de  $I_0 = (1.08 \pm 0.01) * 10^{-2} W/cm^2$  a  $I_0 = (3.85 \pm 0.1) * 10^{-4} W/cm^2$ . En la figura 3.19, se muestra la intensidad emitida por el diodo "IR383" ( $I_0$ ) en función de la corriente de polarización ( $I_{DC}$ ).



Figura 3.19 Intensidad emitida por el diodo "IR383" en función de la corriente de polarización. La intensidad fue obtenida con el sensor "Thermopile 71938".

Para verificar si la intensidad emitida por el diodo "IR383" es función lineal de la corriente, los datos de la figura 3.19 fueron graficados en escala  $\ln(I_0) vs \ln(I_{DC})$ . Posteriormente, se realizo un ajuste utilizando la siguiente relación:

$$Ln(I_0) = Ln(A) + b * Ln(I_{DC})$$
(3.14)

En la ecuación 3.14, *A* es una variable de proporcionalidad y un valor de b = 1 representa un comportamiento lineal. En la figura 3.20, podemos observar que la intensidad emitida por el diodo "IR383" no es función lineal de la corriente ( $b = (1.128 \pm 0.008)$  dentro del rango medido. Este factor debe ser considerado al obtener la dependencia de la fotoconductividad con la intensidad.



Figura 3.20 Ajuste lineal realizado a la intensidad emitida por el diodo "IR383", para verificar si esta es función lineal de la corriente de polarización.

En la figura 3.21, se muestra la fotoconductividad de una muestra de Ge:H en función de la corriente de polarización del diodo "IR383".


Figura 3.21 Fotocorriente medida en una muestra de a-Ge:H, en función de la corriente de polarización del LED IR383.

En la figura 3.22, se muestra la fotoconductividad en función de la intensidad emitida por el diodo IR383 ( $\sigma_{ph} \approx I_0^{\gamma}$ ). Para obtener los datos mostrados en la figura 3.22, se utilizaron los datos presentados en la figura 3.19, y los datos presentados en la figura 3.21.

Para verificar si la fotoconductividad tiene un comportamiento lineal con la intensidad, se realizo un ajuste en escala  $\ln(I_{ph}) vs \ln(I_0)$  usando la siguiente relación:

$$ln(I_{vh}) = ln(A) + b * ln(I_0)$$
(3.15)

En la ecuación 3.15, *A* es una constante de proporcionalidad y un valor de b = 1 representa un comportamiento lineal. En la figura 3.23, la línea solida representa el ajuste realizado a los datos de la figura 3.22.



Figura 3.22 Fotocorriente medida en una muestra de Ge:H en función de la intensidad.



Figura 3.23 Ajuste realizado para verificar si la fotocorriente tiene un comportamiento lineal con la intensida.

En la figura 3.23 podemos observar que la fotoconductividad presenta un comportamiento casi lineal con la intensidad ( $\sigma_{ph} = I_0^{\gamma}$ ;  $\gamma = 0.9$ ). Con un factor  $\gamma = 0.9$ , debemos analizar cuidadosamente el procedimiento utilizado para obtener la características espectrales de la fotoconductividad (ver sección 3.3.2).

Si la fotoconductividad en términos de la razón de generación, se puede escribir de la siguiente manera:

$$\sigma_{ph} = q\mu_0 \tau(G) G \propto G^{\gamma} \tag{3.16}$$

La foto-respuesta medida en las películas de Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H y Ge, también se puede escribir utilizando la siguiente relación:

$$I_{foto-respuesta} \propto G^{\gamma} \tag{3.17}$$

Debido a que la razón de generación es función del flujo de fotones  $G = \alpha(\lambda) \Phi_0(\lambda) [1 - R(\lambda)] e^{-\alpha(\lambda)x}$ , podemos normalizar la foto-respuesta medida en la muestra a una intensidad constante usando la siguiente relación:

$$I_{foto-respuesta} = \frac{R_{Muestra+equipo}}{\Phi_{Equipo}^{V}}$$
(3.18)

En la ecuación 3.18,  $\gamma$  toma el valor de 0.9,  $R_{Muestra+equipo}$  es la fotorespuesta medida en la muestra y  $\Phi_{Equipo}^{\gamma}$  es la radiación espectral emitida por la parte óptica de la instalación de mediciones.

En la figura 3.24, los símbolos rellenos representan la respuesta espectral de la fotoconductividad considerando  $\gamma = 1$ , y los símbolos no rellenos representan la respuesta espectral de la fotoconductividad considerando  $\gamma = 0.9$ .



Figura 3.24 Muestra desviación generada considerando una dependencia lineal ( $\gamma = 1$ ) y una dependencia casi lineal ( $\gamma = 0.9$ ).

En la figura 3.24 podemos observar que la desviación generada por un factor de  $\gamma = 0.9$ , no afecta considerablemente la respuesta espectral de la fotoconductividad, ni los parámetros obtenidos de ella.

# Capítulo 4

# **Resultados Experimentales**

## 4.1 Introducción

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos en base a la fotoconductividad en las películas de Ge:H y SiGe:H. En la sección 4.2, se presentan los resultados obtenidos en la medición de las curvas de I-V en obscuridad y con iluminación. En la sección 4.3, la fotoconductividad en función de la intensidad; la característica temporal de la fotoconductividad; las características espectrales de las películas de Ge:H y SiGe:H con variación en la dilución de Hidrogeno; las características espectrales de las películas de Ge:H dopado con boro; el efecto de la dilución de Hidrogeno y finalmente la incorporación de boro en las películas de Ge:H.

# 4.2 Medición de I-V en obscuro y con iluminación

Durante la medición de las curvas de I-V, el voltaje de polarización ( $V_{DC}$ ) se varió dentro del rango de -15V a 15V. La longitud de onda fue  $\lambda = 0.94 \mu m$  (hv = 1.3 eV) y la intensidad fue de  $I_0 = (1.06 \pm 0.01) * 10^{-2} W/cm^2$ . La medición se realizó en el sistema de micro pruebas "LTMP-2", a temperatura

ambiente y con nula iluminación del entorno. El equipo de mediciones fue montado sobre una mesa antivibraciones.

En la figura 4.1, se muestran las curvas medidas en la muestra P589 (Ge:H). La curvas I-V fueron medidas en condiciones de a) obscuridad ( $I_{Dark}$ ) y b) con iluminación ( $I_{Light}$ ). La línea solida representa el ajuste realizado para obtener la magnitud de la resistencia, y posteriormente, la conductividad a) en obscuro ( $\sigma_{Dark}$ ) y b) con iluminación ( $\sigma_{Light}$ ).



Figura 4.1 Ajuste lineal realizado a las curvas I-V para verificar si la respuesta obtenida cumple con la ley de Ohm. Muestra P589 (a-Ge:H).

La curvas I-V mostraron que la corriente medida en las muestras de Ge:H y Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H, además de presentar una dependencia lineal con el voltaje de polarización, poseen simetría dentro del rango de polarización medido y un cruce por cero como lo requiere la ley de ohm. La razón de la fotoconductividad a la conductividad en obscuridad ( $\sigma_{ph}/\sigma_{dark}$ ), en la muestra P589 (a-Ge:H), fue del 6.1% dentro del rango de -15V a 15V.

### 4.3 Características de la fotoconductividad

En esta sección se presentan los resultados y las conclusiones obtenidas en el estudio de las características electrónicas en base a la fotoconductividad. Todas las características electrónicas fueron medidas en el régimen de AC utilizando las metodologías descritas en el capítulo 3.

#### 4.3.1 Dependencia de la fotoconductividad con la intensidad

La frecuencia de operación del equipo de mediciones fue de f = 4Hz y la energía del flujo de fotones de 1.3eV. La intensidad se varió dentro del rango de  $I_0 = (3.85 \pm 0.01) * 10^{-4} W/cm^2$  a  $I_0 = (1.06 \pm 0.01) * 10^{-2} W/cm^2$ . En la figura 4.2, la línea sólida representa el ajuste realizado a la curva  $I_{ph}(I_0)$  para verificar si existe un comportamiento lineal. Antes de realizar el ajuste, los datos fueron graficados en escala  $ln(I_{ph}) vs ln(I_0)$ .



Figura 4.2 Ajuste realizado a la fotoconductividad de la muestra P589 en función de la intensidad emitida por el LED (Modelo IR383).

En la figura 4.2, podemos observar que la fotoconductividad de la muestra P589 (Ge:H) tiene una dependencia casi lineal con la intensidad ( $\gamma = 0.9$ ) dentro del rango de intensidad utilizado. La respuesta espectral de la fotoconductividad, la energía Urbach y la razón de defectos no son afectados considerablemente por un valor de  $\gamma = 0.9$  (ver sección 3.3.4).

#### 4.3.2 Característica temporal de la fotoconductividad

Para obtener el tiempo de relajación de la fotocorriente, la longitud de onda fue de  $\lambda = 0.94 \mu m$  (hv [eV] = 1.3 eV) y la intensidad de  $I_0 = (1.41 \pm 0.01) * 10^{-2} W/cm^2$ . En la figura 4.3, la línea sólida representa el ajuste exponencial realizado al tiempo de relajación de la fotocorriente para verificar si  $\tau_n(t) = constant$ .



Figura 4.3 Ajuste exponencial realizado para determinar si el tiempo de relajación es constante con el tiempo,  $\tau(t) = cte$ . Muestra de Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H (P447).

En la figura 4.4 la línea sólida representa el ajuste hiperbólico realizado al tiempo de relajación de la fotocorriente para verificar si  $\tau_n = f(t)$  o  $\tau_n = f(G)$ .



Figura 4.4 Ajuste parabólico realizado para determinar si el tiempo de relajación es función del tiempo ( $\tau_{ph} = f(t) \ o \ f(G)$ ). Muestra de Ge:H (P589).

De las figuras 4.3 y 4.4 podemos observar que el ajuste hiperbólico presentó un mejor coeficiente de correlación.

# 4.3.3 Características espectrales de las muestras de Ge-Si:H y Ge:H con variación en la dilución de hidrogeno

La respuesta espectral de la fotoconductividad ( $\sigma_{ph}(hv)$ ) en las películas de Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H y Ge:H, fue normalizada a una intensidad constante de  $I_0 = (1.64 \pm 0.01) * 10^{-3} W/cm^2$  La intensidad fue medida con el sensor "Thermopile 71938". Durante la fabricación de las películas seleccionadas, la razón de dilución de hidrogeno se varió dentro del rango de  $R_H = 20$  a 70 para las películas de a-Ge:H, y dentro del rango de  $R_H = 40$  a 80 para las películas de Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H. En la figura 4.5 se muestra la respuesta espectral de la fotoconductividad, en las películas de a) Ge:H y b) Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H, con variación en la razón de dilución de hidrogeno.



Figura 4.5 Respuesta espectral de la fotoconductividad ( $\sigma(h\nu)$ ) con diferente dilución de hidrogeno (R) para a) Ge:H y b) Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H (x = 0.96).

En las curvas  $\sigma_{ph}(hv)$  de la figura 4.5, podemos observar que la razón de dilución de hidrogeno tiene un efecto significativo sobre la dependencia espectral de la fotoconductividad, este efecto puede estar relacionado con la densidad de estados de las películas. En la figura 4.5 podemos observar que las curvas  $\sigma_{ph}(hv)$  presentan máximos y mínimos. Estos máximos y mínimos pueden estar relacionados con la densidad de estados localizados en la banda óptica o estar relacionados con interferencia.

En la tabla 4.1 se muestran los resultados del análisis de interferencia, realizado a las curvas  $\sigma_{ph}(hv)$  de las películas de Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H y Ge:H. Para suponer que los máximos localizados en  $hv = (0.92 \pm 0.01)eV$  representan interferencia, el grosor calculado con la ecuación 3.7 deberá ser d =

 $d_{perfilometro} \pm 10\%$ . Si el error es mayor al 10% consideramos que los máximos corresponden a la densidad de estados localizados dentro de la banda óptica. Los cuadros sombreados representan los máximos que corresponden a la densidad de estados.

Polícula	$\lambda_1$	$\lambda_2$	hv	n(1)	$n(\lambda)$	$d_{\lambda_2,\lambda_1}$	$d_{perfilometro}$
i encula	(nm)	(nm)	( <i>eV</i> )	$n(n_1)$	$n(n_{\underline{1}})$	(µm)	$(\mu m)$
				Ge <sub>x</sub> Si	$h_{1-x}$ : <b>H</b>		
P447	1140	1350	0.92	4.55	4.35	0.65	0.67
P448	1180	1360	0.91	5.11	4.94	0.72	0.85
P453	1180			4.65			0.70
P468	1120	1480	0.83	5.02	4.7	0.38	0.40
P454	1140	1340	0.93	5.44	5.18	0.58	0.66
				Ge	r: H		
P455	1180			4.53	4.34		0.64
P470	1120	1340	0.93	4.67	4.47	0.56	0.52
P457	1140	1380	0.90	5.3	5.06		0.53
P458	1150	1340	0.93	5.47	5.23	0.59	0.64
P459	1100	1340	0.93	5.32	4.97	0.44	0.49

Tabla 4.1 Análisis de interferencia realizado a las películas de  $Ge_xSi_{1-x}$ :H y Ge:H con variación en la razón de dilución de hidrogeno.

En la figura 4.6 se muestra la región de la respuesta espectral de la fotoconductividad, relacionada con transiciones entre las colas de las bandas y la densidad de defectos localizados en la mitad de la banda prohibida.

Las curvas  $\sigma_{ph}(hv \leq 1.1 eV)$  muestran que la razón de dilución de hidrogeno afecta considerablemente la densidad de estados localizados en la banda prohibida. Esto se ve reflejado en una reducción en la magnitud de la fotoconductividad conforme la razón de dilución aumenta de  $R_H = 20$  a 80.



Figura 4.6 Fotoconductividad relacionada con la densidad de estados localizados. La flechas indican los máximos relacionados con la densidad de estados.

Las características electrónicas obtenidas en las curvas  $\sigma_{ph}(h\nu)$  de las figuras 4.5 y 4.6 se muestran en la sección 4.3.5. Las flechas en la figura 4.6 representan los máximos relacionados con la densidad de estados.

# 4.3.4 Características espectrales obtenidas en las películas de Ge:H dopado con boro

La respuesta espectral de la fotoconductividad ( $\sigma_{ph}(hv)$ ) en las películas de Ge:H (B) fue normalizada a una intensidad constante de  $I_0 = (2.40 \pm 0.01) * 10^{-3}W/cm^2$ . La concentración del dopado con boro fue obtenido en estado sólido y se encuentra dentro del rango de  $[B/Ge]_{sol} = 0$  a  $[B/Ge]_{sol} = 0.14\%$ . En la figura 4.7 se muestra la respuesta espectral de la fotoconductividad ( $\sigma_{ph}(hv)$ ) de las películas de a-Ge:H dopado con boro.



Figura 4.7 Respuesta espectral de la fotoconductividad  $(\sigma_{ph}(h\nu))$  de las películas de *a-Ge:H* con variación en la concentración del dopado con Boro,  $[B/Ge]_{sol(\%)}$ .

Las curvas  $\sigma_{ph}(hv)$  de la figura 4.7 muestran que la variación de la concentración del dopado con boro tiene un fuerte efecto sobre la dependencia espectral de la fotoconductividad. Efecto relacionado con el aumento en la densidad de defectos localizados en la banda óptica. En la figura 4.7, podemos observar que la respuesta espectral de la fotoconductividad ( $\sigma_{ph}(hv)$ ) también presenta máximos y mínimos. En la figura 4.8 se muestra la región de la respuesta espectral de la fotoconductividad relacionada con los estados localizados en la banda óptica. Las flechas representan los máximos relacionados con interferencia o con la densidad de estados en la banda prohibida de movilidad.



Figura 4.8 Fotoconductividad relacionada con la densidad de estados localizados en la banda óptica. Las fechas representan los máximos relacionados con la densidad de estados.

En la figura 4.8 también podemos observar que las curvas  $\sigma_{ph}(h\nu \le 1.1 eV)$  de las películas de Ge:H dopadas con boro, presentan máximos y mínimos como se observo en las películas de Ge:H y Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H con variación en la dilución de hidrogeno. Estos máximos y mínimo también han sido atribuidos a interferencia y a la densidad de estados en la banda prohibida. En la tabla 4.2 se muestran los resultados obtenidos en el análisis de interferencia. Los cuadros sombreados representan los máximos que corresponden a la densidad de estados.

Película	λ	$\lambda_2$	hν	m(1)	n(1)	$d_{\lambda_2,\lambda_1}$	$d_{perfilometro}$
T Chodia	(nm)	(nm)	(eV)	<i>n(n</i> <sub>1</sub> )	$n(n_{\underline{1}})$	(µm)	$(\mu m)$
				Ge	: H	•	
P589							0.60
P590	1280			4,56			0.52
P591	1150	1360	0.91	4,725	4,5	0.63	0.50
P592							0.58
P593	1100	1260	0.98	4,7	4,49	0.71	0.52
P594	1120	1340	0.93	4,67	4,42	0.58	0.55
P595	1380			4,34			0.45
P596	1280	1600	0.78	4,52	4,35	0.62	0.60
P597	1180	1380	0.90	4,615	4,435	0.72	0.47
P598	1140	1360	0.91	4,69	4,47	0.60	0.52

Tabla 4.2 Análisis de interferencia realizado a las películas de Ge:H (B).

En la sección 4.3.6 se muestran las características electrónicas obtenidas en las curvas  $\sigma_{ph}(hv)$  de las figuras 4.7 y 4.8.

#### 4.3.5 Efecto de la dilución de Hidrogeno

Para estudiar el efecto ocasionado por la variación de la dilución de hidrogeno, en esta sección se muestra: la energía Urbach  $(E_U)$ , la razón de defectos  $(R_{def})$  y la fotoconductividad  $(\sigma_{ph}(hv = 1.1eV))$  función de la razón de dilución de hidrogeno  $(R_H)$ .

#### Películas de SiGe:H

El contenido de silicio en las películas de Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H es x = 0.04. En la figura 4.9 se muestran: a) la energía Urbach ( $E_U$ ); b) razón de defectos ( $R_{def}$ ) y c) la fotoconductividad ( $\sigma_{ph}(hv = 1.1eV)$ ) de las películas de Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H en función de la razón de dilución de hidrogeno.



Figura 4.9 a) Energía Urbach  $(E_U)$  b) razón de defectos  $(R_{def})$  y c) fotoconductividad  $(\sigma_{ph}(h\nu = 1.1eV))$  de las películas de a-Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H en función de la razón de dilución de Hidrogeno  $(R_H)$ .Las líneas solidas son guías para los ojos.

En las películas de Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H podemos observar que para una razón de dilución de  $R_H = 40$ , la fotoconductividad obtuvo la magnitud más alta de  $\sigma_{ph} = 3.8 \times 10^{-7}$  y la razón de defectos obtuvo un valor de  $R_{def} = 78$ . En seguida, la fotoconductividad reduce hasta un valor de  $\sigma_{ph} = 8 \times 10^{-8}$  para un razón de dilución de  $R_H = 50$ , en correlación con el valor más alto de la razón de defectos  $R_{def} = 99$ . Posteriormente la fotoconductividad incrementa hasta alcanzar una magnitud de  $\sigma_{ph} = 2.1 \times 10^{-7}$ , para una dilución de  $R_H = 75$ , y la razón de defectos reduce hasta un valor de  $R_{def} = 49,1$ . Finalmente, la

fotoconductividad reduce hasta obtener su magnitud más baja  $\sigma_{ph} = 5 \times 10^{-8}$ para una dilución de  $R_H = 80$ , acompañada por otro decremento de la razón de defectos hasta un valor de  $R_{def} = 32.4$ .

De la curva  $E_U$ , obtenida en las películas de Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H, en función de la razón de dilución de hidrogeno ( $R_H$ ), podemos observar que conforme la razón de dilución aumenta de  $R_H = 40$  a 70, la energía Urbach reduce de forma lineal de  $E_U = 127meV$  hasta 89meV. En seguida la energía Urbach aumenta ligeramente a  $E_U = 93meV$  para una razón de dilución de  $R_H = 75$  y permanece casi sin cambio hasta llegar a una razón de dilución de  $R_H = 80$ . En la tabla 4.3 se muestran las características electrónicas obtenidas en las películas de a-Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H en base a la fotoconductividad.

Tabla 4.3 Parámetros obtenidos de las películas de a-Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H en función de la razón de dilución de Hidrogeno.

Muestra	Razón de dilución (R <sub>H</sub> )	R <sub>def</sub> (u.a.)	E <sub>v</sub> (meV)	E <sub>a</sub> (eV)	$E_F^{RT}$ (eV)	$\sigma_{RT} * 10^{-4}$ $(\Omega * cm)^{-1}$	$\sigma_{ph} * 10^{-8}$ (1.1eV) ( $\Omega * cm$ ) <sup>-1</sup>
			a-G	eSi:H			
P447	40	78	127	0.20	0.139	58.7	38,02
P448	50	99	114	0.31	0.269	2.23	8
P453	70	77,5	89	0.30	0.265	3.90	9,45
P468	75	49,1	93	0.28	0.210	2.50	21,37
P454	80	32,38	91	0.34	0.316	1.52	4,57

#### Películas de Ge:H

En la figura 4.10 se muestra: a) la energía Urbach  $(E_U)$ , b) la razón de defectos  $(R_{def})$  y c) la fotoconductividad  $(\sigma_{ph}(hv = 1.1eV))$  de las muestras de a-Ge:H en función de la razón de dilución de hidrogeno  $(R_H)$ .

En las películas de a-Ge:H podemos observar que la fotoconductividad decrementa desde su valor más alto  $\sigma_{ph} = 6.1 \times 10^{-7}$  para una razón de dilución de  $R_H = 20$  hasta  $\sigma_{ph} = 1 \times 10^{-7}$  para una dilución de  $R_H = 45$ , este decremento fue acompañado por un reducción en la razón de defectos de

 $R_{def} = 123$  a  $R_{def} = 29$ . Posteriormente, la fotoconductividad presenta un ligero incremento  $\sigma_{ph} = 2.3 \times 10^{-7}$ , seguido por un aumento en la razón de defectos  $R_{def} = 52,9$ , para un razón de dilución de  $R_H = 50$ . Y finalmente, la fotoconductividad decrementa hasta alcanzar su valor más bajo de  $\sigma_{ph} = 9 \times 10^{-8}$  para una razón de dilución  $R_H = 70$ , acompañada por una reducción en la razón de defectos hasta alcanzar un valor de  $R_{def} = 27$ .



Figura 4.10 a) Energía Urbach  $(E_U)$ , b) razón de defectos  $(R_{def})$  y c) fotoconductividad  $(\sigma_{ph}(hv = 1.1eV))$  de las películas de *a-Ge:H* en función de la razón de dilución de Hidrogeno (*R*). Las líneas solidas son guías para los ojos.

La energía Urbach, por otro lado, obtuvo su valor más alto  $E_U = 116 meV$ para una razón de dilución de  $R_H = 20$ , y posteriormente reduce de forma lineal conforme la razón de dilución de hidrogeno aumenta hasta alcanzar su valor mínimo de  $E_U = 89meV$ , para una dilución de  $R_H = 50$ . Finalmente la energía Urbach incrementa ligeramente hasta alcanzar un valor de  $E_U = 93meV$ , y se mantiene casi constante dentro del rango de dilución que va desde  $R_H = 60$  hasta 70. En la tabla 4.4, se muestran los valores de las características electrónicas de las películas de a-Ge:H en base a la fotoconductividad. Los valores del nivel de la energía de Fermi y de la energía de activación, fueron obtenidos anteriormente por Sánchez *et al.* [16].

Muestra	Razón de dilución (R <sub>H</sub> )	R <sub>dɛf</sub> (u.a.)	E <sub>v</sub> (meV)	E <sub>a</sub> (eV)	E <sub>F</sub> <sup>RT</sup> (eV)	$\sigma_{RT} * 10^4$ $(\Omega * cm)^{-1}$	$\sigma_{ph} * 10^{8}$ $(1.1eV)$ $(\Omega * cm)^{-1}$	$\frac{\sigma_{ph}}{\sigma_{RT}} * 10^4$
				a-Ge	e:H			
P455	20	123	116	0.22	0.176	48.4	60,76	1.26
P470	45	29,44	94	0.28	0.218	3.47	9,68	2.79
P457	50	52,9	89	0.28	0.262	10.3	23,06	2.24
P458	60	39,45	100	0.29	0254	6.65	15,69	2.36
P459	70	26,99	99	0.32	0.316	4.74	9,15	1.93

Tabla 4.4 Características Electrónicas obtenidas en las películas de a-Ge:H en base a la fotoconductividad.

#### 4.3.6 Efecto de la incorporación de boro

Para determinar cuál es el efecto ocasionado al introducir átomos de boro en la red de germanio. En esta subsección se han utilizado los siguientes parámetros: la energía Urbach  $(E_U)$ , la razón de defectos  $(R_{def})$  y la fotoconductividad  $(\sigma_{ph}(hv = 1.1eV))$  en función de la concentración de dopado. La concentración de dopado fue determinada en estado sólido y se encuentra dentro del rango de  $[B/Ge]_{sol} = 0$  a 0.14%. En la figura 4.11 se muestran los resultados obtenidos de: a) la energía Urbach  $(E_U)$ , b) la razón de defectos  $(R_{def})$  y c) la fotoconductividad  $(\sigma_{ph}(hv = 1.1eV))$  en función de la concentración de dopado. En las películas de Ge:H se puede observar que la fotoconductividad obtuvo su valor más alto ( $\sigma_{ph} = 6.3 \times 10^{-7}$ ) y la razón de defectos su valor más bajo ( $R_{def} = 39.5$ ) en la muestra que no contiene dopado de boro ( $[B/Ge]_{sol} = 0\%$ ). Conforme la concentración de boro aumenta hasta  $[B/Ge]_{sol} = 0.029\%$ , la fotoconductividad reduce hasta alcanzar un valor de  $\sigma_{ph} = 6 \times 10^{-9}$ , acompañada por un incremento en la razón de defectos hasta obtener un valor de  $R_{def} = 64.2$ . El valor más bajo de la fotoconductividad ( $\sigma_{ph} = 4 \times 10^{-9}$ ) fue obtenido en la muestra que contenía una concentración de dopado de  $[B/Ge]_{sol} = 0.06\%$  y una razón de defectos de  $R_{def} = 46.7$ .



Figura 4.11 Muestra a) la energía Urbach  $(E_U)$ , b) la razón de defectos  $(R_{def})$  y c) la fotoconductividad  $(\sigma_{ph}(h\nu = 1.1eV))$  de las películas de Ge:H en función de la concentración de dopado con boro  $([B/Ge]_{sol})$ . Las líneas solidas son guías para los ojos.

Finalmente, para concentraciones de dopado que van desde  $[B/Ge]_{sol} = 0.07$  hasta 0.14%, la fotoconductividad incrementa ligeramente hasta un valor de  $\sigma_{ph} = 1.2 \times 10^{-8}$ , y permanece casi sin cambio dentro de este rango de dopado. Subsecuentemente, la razón de defectos incrementa hasta obtener su máximo valor de  $R_{def} = 113.3$  para una concentración de dopado de  $[B/Ge]_{sol} = 0.12\%$  y finalmente reduce hasta obtener un valor de  $R_{def} = 99.6$  para una concentración de  $[B/Ge]_{sol} = 0.14\%$ .

Por otro lado, en las películas de Ge:H dopado con boro la energía Urbach  $(E_U)$  incrementa su valor mostrando pequeñas oscilaciones conforme la concentración de boro incrementa desde  $[B/Ge]_{sol} = 0\%$  hasta 0.14%. En la tabla 4.5 se muestran las características electrónicas de las películas de a-Ge:H dopadas con boro obtenidas en base a la fotoconductividad.

Muestra	$\left[\frac{B}{Ge}\right]_{sol}$	R <sub>def</sub> (u a )	E <sub>U</sub> (1neV)	Е <sub>а</sub> (eV)	E <sub>F</sub> <sup>RT</sup> (eV)	$\sigma_{RT} \ (\Omega* cm)^{-1}$	$\sigma_{ph_{1.1cV}}*10^9\ (\Omega*cm)^{-1}$	$\frac{\sigma_{ph}}{\sigma_{RI}} * 10^4$
				a-C	GeB:H			
P589	0	39,49	91	0.22	0.20	3.5E-03	628,16	1.79
P590	0.004	40,95	80	0.27	0.24	2.1E-03	246,63	1.17
P591	0.013	51,15	96	0.29	0.26	9.7E-04	139,09	1.43
P592	0.029	64,22	89	0.39	0.38	4.9E-05	6,12	1.25
P593	0.060	46,68	88	0.47	0.47	3.5E-06	3,77	10.8
P594	0.070	56,52	109	0.42	0.39	1.9E-05	9,66	5.08
P595	0.087	69,77	123	0.37	0.33	4.5E-05	8,27	1.84
P596	0.088	77,65	103	0.33	0.26	8.7E-05	15,97	1.84
P597	0.120	113,3	136	0.27	0.15	1.0E-04	12,62	1.26
P598	0.140	99.64	123	0.32	0.27	1.2E-04	13.95	1.16

Tabla 4.5 Parámetros obtenidos de las películas de a-Ge:H con diferente concentración en el dopado con Boro.

En la figura 4.12 se muestra a) la energía Urbach  $(E_U)$ ; b) la razón de defectos  $(R_{def})$  y c) la fotoconductividad  $(\sigma_{ph}(hv = 1.1eV))$  de las películas de Ge:H dopado con boro en función del nivel de la energía de Fermi.

En función del nivel de la energía de Fermi ( $E_F$ ), la fotoconductividad decrementa desde su valor más grande  $\sigma_{ph} = 6.3 \times 10^{-7}$ , para una energía de  $|E_C - E_F| = 0.2 eV$  (muestra tipo-n), hasta obtener su valor más bajo  $\sigma_{ph} = 4 \times 10^{-9}$  para una energía de  $|E_C - E_F| = 0.47 eV$  (muestra aproximadamente intrínseca). Posteriormente, conforme el nivel de la energía de Fermi se aleja de la mitad de la banda prohibida de movilidad hacia la orilla de movilidad de la banda de valencia, la fotoconductividad muestra un ligero incremento y permanece casi sin cambio con un valor de  $\sigma_{ph} = 1.3 \times 10^{-8}$  para una energía de  $|E_V - E_F| = 0.15 eV$  (muestra tipo-p).



Figura 4.12 a) Energía Urbach  $(E_U)$ , b) Razón de defectos  $(R_{def})$  y c) fotoconductividad  $(\sigma_{ph}(h\nu = 1.1eV))$  de las películas de a-Ge:H dopadas con boro en función del nivel de la energía de Fermi  $(E_F)$ .

La razón de defectos  $(R_{def})$  en las películas de Ge:H dopadas con boro, incremento desde su valor más bajo  $R_{def} = 39.5$  para una energía de  $|E_C - E_F| = 0.2eV$  (muestra tipo-n), hasta  $R_{def} = 46.7$  para una energía de  $|E_C - E_F| = 0.47eV$  (muestra casi intrínseca), posteriormente incrementó hasta  $R_{def} = 113.3$  para una energía de  $|E_V - E_F| = 0.15eV$  (muestra tipo-p). La energía Urbach  $(E_U)$  por su parte, incremento conforme las películas pasaban de ser tipo-n ( $|E_C - E_F| = 0.2eV$ ) a tipo-p ( $|E_V - E_F| = 0.15eV$ ).

# Capítulo 5

# Discusión de resultados

# 5.1 Introducción

En este capítulo se presenta la discusión de los resultados obtenidos experimentalmente en las películas de  $Ge_xSi_{1-x}$ :H y Ge:H. Como se ha escrito en el capítulo 2, la fotoconductividad de las películas de  $Ge_xSi_{1-x}$ :H depositadas por plasma ha sido menos estudiada que la fotoconductividad de las películas de a-Si:H. Para comenzar con la discusión de resultados, en la segunda sección se realiza un análisis de las características electrónicas en base a la fotoconductividad. Las características mencionadas en esta sección siguen la misma cronología mostrada en el capítulo 4. En la tercera sección se muestra una discusión de las películas de Ge:H en función de la concentración del dopado con boro. Finalmente, en la cuarta sección se presenta la discusión de los resultados obtenidos sobre el efecto ocasionado por la razón de dilución de hidrogeno, en las características electrónicas electrónicas en la respuesta espectral de la respuesta espectral de la películas de Ge:H y Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H.

### 5.2 Dependencia de la fotoconductividad con la intensidad

Los resultados obtenidos en la medición de la dependencia de la fotoconductividad con la intensidad,  $\sigma_{ph} \approx I_0^{\gamma}$ , se muestran en la sección 4.3.1. En la tabla 5.1, se muestra la comparación de los resultados obtenidos en las películas de Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H y Ge:H fabricadas por LF-PECVD con los resultados reportados en literatura.

Tabla 5.1 Comparación de la dependencia de la fotoconductividad con la intensidad ( $\sigma_{ph} \approx I_0^{\gamma}$ ) en películas de Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H (x > 0.85).

	$Ge_{x}Si_{1-x}$ : H								
~		f	Ι <sub>0</sub>	hν	Técnica de	Pofononcia			
x	Ŷ	(Hz)	(mW/cm)	( <i>eV</i> )	fabricación	Kej erencia			
1	0.9	4	(0.39 - 10.8)	1.32	LF-PECVD	Este trabajo			
0.97	0.86	4	(0.39 – 10.8)	1.1	LF-PECVD	Este trabajo			
0.85	0.5		≈ 0.32	2	DC-Sputtering	[10]			
1	0.75	4.6	(0.006 - 0.79)	1 96	RE-Sputtering	[1]			
1	0.85	108	(0.000 - 0.79)	1.30	Ni Opattering	[']			

De la tabla 5.1, podemos mencionar que las películas de Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H y Ge:H depositadas por la técnica de LF-PECVD, mostraron un valor de  $\gamma$  más alto ( $\gamma \approx 0.86$  y  $\gamma \approx 0.9$ ) que las películas depositadas por la técnica de RF-Sputtering ( $\gamma = 0.75$ ), y DC-Sputtering ( $\gamma = 0.5$ ).

No obstante, en las películas depositadas por LF-PECVD, la fotoconductividad en función de la intensidad fue medida utilizando un rango de  $I_0 = (1.08 \pm 0.01) * 10^{-2} W/cm^2$  a  $I_0 = (3.85 \pm 0.1) * 10^{-4} W/cm^2$ , y en las películas depositadas por RF-Sputtering la intensidad fue variada dentro del rango de  $I_0 = 6x10^{-6}W/cm^2$  a  $I_0 = 7.9x10^{-4}W/cm^2$ . Esta diferencia de rangos puede estar relacionada con la discrepancia obtenida en el valor de  $\gamma$ .

## 5.3 Característica temporal de la fotoconductividad

El estudio de las características temporales de la fotoconductividad no ha sido comúnmente reportado en la literatura. Por lo tanto, no ha sido posible comparar los resultados reportados en la sección 4.3.2 con el análisis de literatura mostrado en el capítulo 2. Los resultados obtenidos en la sección 4.3.2, mostraron que el tiempo de relajación de la fotoconductividad es largo y no presenta un comportamiento exponencial. El coeficiente de correlación ha mostrado que la función hiperbólica presenta un mejor ajuste del tiempo de relajación. En la sección 2.2.4 se menciona que la interacción de los portadores de carga con los estados localizados en la banda prohibida de movilidad incrementa el tiempo de transito en la muestra y reduce el tiempo de respuesta de la fotoconductividad.

## 5.4 Fotoconductividad de las muestras de Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H y Ge:H

En la tabla 5.2, se muestra la magnitud de la fotoconductividad obtenida en las películas de Ge:H y Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H en comparación con la magnitud de la fotoconductividad reportada en literatura. Para comparar la magnitud de la fotoconductividad obtenida en las películas de Ge:H y Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H con los datos reportados en la literatura, en la tabla 5.2, se normalizaron todos los valores mostrados a una intensidad constante de  $I_0 = 100 mW/cm^2$ .

	$Ge_{x}Si_{1-x}$								
x	$\sigma_{ph}$ $(\Omega * cm)^{-1}$	Técnica de fabricación	$I_{\mathfrak{o}}$ (mW/cm)	$\sigma_{ph}^{l_0=100mW/sm}$ $(\Omega * cm)^{-1}$	λ (μm)	Referencia			
0.95	$17x10^{-5}$			$3.27 x 10^{-4}$					
0.90	2.8x10 <sup>-5</sup>	Czochralski	50	5.38x10 <sup>-5</sup>		[8]			
0.85	$1x10^{-5}$			$1.92 \times 10^{-5}$					
0.85	2x10 <sup>-8</sup>	Sputtering	0.32	$6.25 \times 10^{-6}$	0.62	[10]			
0.64	$4x10^{-8}$	opullening	0.52	$1.25 \times 10^{-5}$	0.02	[10]			

Tabla 5.2 Muestra la magnitud de la fotoconductividad obtenida en aleaciones de  $Ge_xSi_{1-x}$ :H y Ge:H reportadas en la literatura y en este trabajo.

1	$3.7x10^{-7}$	PECVD	0.5	7.4x10 <sup>-5</sup>	0.63	[1]
≈ 0.3	$\approx 1x10^{-5}$	CTL-CVD	100	$\approx 1x10^{-5}$		[23]
0.99	$7x10^{-5}$	Sputtering	6	7.78x10 <sup>-4</sup>	0.63	[14]
0.97	1.19x10 <sup>-4</sup>	LF-PECVD	14.1 ± 0.1	$8.44 \times 10^{-4}$	1.14	Este trabajo
1	7.52x10 <sup>-5</sup>	LF-PECVD	14.1 ± 0.1	5.33x10 <sup>-4</sup>	1.14	Este trabajo

En la tabla 5.2 se muestra que la magnitud de la fotoconductividad obtenida en las películas depositadas por LF-PECVD ( $\sigma_{ph} = 5.33 \times 10^{-4}$  para Ge:H y  $\sigma_{ph} = 8.44 \times 10^{-4}$  para Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H) es del mismo orden que la magnitud de la fotoconductividad obtenida en las películas crecidas por la técnica Czochralski ( $\sigma_{ph} = 3.27 \times 10^{-4}$ ).

# 5.5 Características espectrales de la fotoconductividad

Los resultados obtenidos en la medición de la respuesta espectral de la fotoconductividad ( $\sigma_{ph}(hv)$ ) en las películas de Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H y Ge:H, se presentan en la sección 4.3.3. En la figura 5.1 se muestra la respuesta espectral del coeficiente de absorción ( $\alpha(hv)$ ) y la respuesta espectral de la fotoconductividad ( $\sigma_{ph}(hv)$ ) en función de la energía de fotón, de la muestra P468 de Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H. La respuesta espectral del coeficiente de absorción fue obtenido anteriormente por Sánchez *et al.* [18]. La línea punteada representa la energía de la banda prohibida de movilidad ( $E_{p_{t}}$ ).

En la figura 5.1 podemos observar que para energías de  $h\nu < E_{04}$ , el coeficiente de absorción decrementa más rápido que la fotoconductividad de la muestra. Esto puede ser atribuido a una dependencia del producto  $\eta \mu_n \tau$  en función de la energía del fotón.



Figura 5.1 Comparación de la respuesta espectral del coeficiente de absorción [18] y de la fotoconductividad para una muestra de  $Ge_xSi_{1-x}$ :H (P468).

Para verificar si el producto  $\eta \mu_n \tau$  es función de la energía del fotón para  $\alpha d \ll 1$ , se ha extraído el producto  $\eta \mu_n \tau$  de la figura 5.1 utilizando la siguiente relación:

$$\sigma_{ph}(hv) \approx \eta \alpha(hv) \mu_n(hv) \tau(hv) \approx \eta \alpha(hv) \mu_n \tau(hv)$$

En la figura 5.2 se muestran el producto  $\eta \mu_n \tau$  de la muestra P468 de Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H en función de la energía del fotón,  $h\nu$ . Los valores presentados en la figura 5.2 no corresponden al valor real del producto  $\eta \mu_n \tau$ , pero si a la tendencia observada en función de la energía del fotón. La línea punteada representa la energía de la banda prohibida de movilidad de la muestra.



Figura 5.2 Muestra el producto  $\eta \mu_n \tau$  de la muestra P468 de Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H en función de la energía del fotón (*hv*). La línea solida es guía para los ojos.

De la figura 5.2 se puede apreciar que el producto  $\eta \mu_{n1} \tau_1$  obtenido en la región donde  $h\nu < E_g$ , es mayor que el producto  $\eta \mu_{n2} \tau_2$  obtenido en  $h\nu = E_g$ . Para tratar de explicar la tendencia mostrada en la figura 5.2, podríamos considerar las siguientes suposiciones:

1. La movilidad de los portadores en la banda de conducción,  $\mu_2$ , siempre es mayor que la movilidad de los portadores en la banda de prohibida,  $\mu_1$ . Por lo tanto, para que el producto  $\eta \mu_{n1} \tau_1 > \eta \mu_{n2} \tau_2$ , es necesario que el tiempo de vida de un electrón que ha sido excitado desde la banda de valencia hacía la banda de conducción  $(\tau_2)$  sea menor que el tiempo de vida de un electrón que ha sido excitado desde la banda de valencia a un estado dentro de la banda prohibida de movilidad  $(\tau_1)$ .

- 2. Un electrón en la banda de conducción puede recombinarse directamente con un hueco en la banda de valencia o en un centro de recombinación, y un electrón localizado en un estado en la banda óptica, antes de recombinarse, debe ser emitido desde el estado localizado en la banda óptica hasta la banda de conducción por algún mecanismo de excitación, posteriormente, el electrón puede recombinarse con un hueco en la banda de valencia.
- 3. El tiempo que le toma a un electrón ser excitado desde un estado localizado en la banda prohibida hacia la banda de conducción puede ser definido como  $\tau_{excitación} = \tau_0 * \exp{(E/kT)}$ . Por lo tanto  $\tau_1 = \tau_2 * \exp{(E/kT)}$ , donde *E* es la energía de la banda de conducción menos la energía del estado en la cual el electrón está atrapado.

Estas 3 hipótesis no han sido comprobadas en este trabajo, por este motivo, se consideran especulaciones razonables. En la literatura no se ha encontrado información sobre las observaciones presentadas anteriormente.

La dependencia del producto  $\eta \mu_n \tau$  con la energía del fotón (*hv*), ocasiona que la magnitud de la fotoconductividad sea ligeramente más alta dentro del rango de energía relacionada con la absorción por defectos, y como resultado, el valor de la energía Urbach obtenido en este trabajo podría ser ligeramente más alto que el obtenido por Sánchez *et al.* [18] para las mismas películas de Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H y Ge:H.

En la sección 4.3.4, se muestran los resultados de la respuesta espectral de la fotoconductividad (películas de Ge:H (B)). En la figura 5.3, se muestra la respuesta espectral de la fotoconductividad ( $\sigma_{ph}(hv)$ ) y la respuesta espectral del coeficiente de absorción ( $\alpha(hv)$ ) obtenido en la muestra P589 (Ge:H (B)). y la respuesta espectral del coeficiente de absorción ( $\alpha(hv)$ ), obtenido mediante PDS [2] y mediante transmisión óptica [11].



Figura 5.3 Muestra el valor de la energía Urbach obtenida en este trabajo en comparación con la obtenida en la referencia [2] y en la referencia [11] para una muestra de Ge:H a) intrínseco y b) dopado con boro. La línea punteada muestra el valor de la energía Urbach.

En la figura 5.3, podemos observar que el valor de la energía Urbach obtenido en base a la fotoconductividad es más alto que los valores reportados en las referencias [11] y [2]. Esto puede ser atribuido a la dependencia del producto  $\eta\mu_n\tau$  con la energía del fotón ( $h\nu$ ). En la figura 5.3, también podemos observar que las películas de Ge:H dopadas con boro muestran la misma tendencia observada en las películas de Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H y Ge:H con diferente dilución de hidrogeno. Esto explicaría porque en la referencia [2] la energía Urbach, obtenida por PDS, presento un valor más bajo que el valor de la energía Urbach obtenida en este trabajo, en base a la fotoconductividad. La línea punteada representa la energía Urbach obtenida en las películas de Ge:H dopado con boro, con la energía Urbach reportada en las películas de Jurbach obtenida en las películas de Ge:H dopado con boro, con la energía Urbach reportada en las referencias [2] y [11].

Ge:H									
EU	Técnica de	En hago a	$[P/C_{n}]$	Técnica de	Pof				
(meV)	depósito	en oase a:		medición	nej .				
49.8	RF Glow discharge	$\alpha(h\nu)$	0%	PDS	[2]				
71	LF-PECVD	$\alpha(h\nu)$	0%	Transmisión óptica	[11]				
91	LF-PECVD	$\sigma_{ph}(h\nu)$	0%	Fotoconductividad	Este trabajo				
71,7	RF Glow discharge	$\alpha(h\nu)$	0.10%	PDS	[2]				
100	LF-PECVD	$\alpha(h\nu)$	0.12%	Transmisión óptica	[11]				
136	LF-PECVD	$\sigma_{ph}(h\nu)$	0.12%	Fotoconductividad	Este trabajo				

Tabla 5.3 Comparación de la energía Urbach obtenida en este trabajo con la reportada en las referencias [2],[11].

Observamos que el valor de la energía Urbach obtenida en la referencia [11] es menor que el valor obtenido en este trabajo. Sin embargo, el valor reportado en la referencia [11] no es menor que el valor reportado en la referencia [2].

En la figura 5.4 se muestran el producto  $\eta \mu_n \tau$  de las películas P589 y P590 de Ge:H (B) en función de la energía del fotón (*hv*). Los valores presentados en la figura 5.4 no corresponden al valor real del producto  $\eta \mu_n \tau$ pero si a la tendencia observada en función de la energía del fotón.



Figura 5.4 Muestra el producto  $\eta \mu_n \tau$  de las muestra P589 y P590 en función de la energía del fotón (*hv*).

En la figura 5.4 podemos observar que el producto  $\eta \mu_n \tau$ , en las películas de Ge:H (B), también presenta dependencia con la energía del fotón. En la figura 5.5, podemos observar que dentro del rango de hv = 0.9eV a hv = 1.2eV, el producto  $\eta \mu_n \tau$  no cambia considerablemente. En algunas muestras se observó que el producto  $\eta \mu_n \tau$  presenta máximos y mínimos relacionados con interferencia y con la densidad de estados en la banda óptica, como se observó en la respuesta espectral de la fotoconductividad.

#### 5.5.1 Películas de Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>: H con variación en la dilución de hidrogeno

En la figura 5.5, se comparan los resultados mostrados en la sección 4.3.5.1, con los reportados en la referencia [18]. La energía Urbach en la referencia [18], se obtuvo de la respuesta espectral del coeficiente de absorción. En la figura 5.5 podemos observar que en las películas de  $Ge_xSi_{1-x}$ :H, la razón de dilución reduce el valor de la energía Urbach en ambos casos.



Figura 5.5 Energía Urbach, de las películas de  $Ge_xSi_{1-x}$ :H, en función de la razón de dilución de hidrogeno. La energía Urbach fue obtenida a) del coeficiente de absorción [18] y b) de la fotoconductividad.

En base a la fotoconductividad, la energía Urbach redujo desde  $E_U = 127meV$  hasta  $E_U = 89meV$  conforme la razón de dilución de hidrogeno incrementa desde  $R_H = 40$  hasta  $R_H = 70$ . Mientras que en la referencia [18], la energía Urbach permanece casi sin cambio ( $E_U \approx 60meV$ ) dentro del mismo rango de dilución. Por lo tanto, de la figura 5.5 podemos concluir que la razón de dilución, también reduce la dependencia del producto  $\eta \mu_n \tau$  con la energía del fotón en las películas de Ge:H.

#### 5.5.2 Películas de Ge: H con variación en la dilución de hidrogeno

En la figura 5.6 se muestra la comparación de los datos obtenidos en las películas de Ge:H de la sección 4.3.5.2 con los reportados en la referencia [18]. En las películas de Ge:H también podemos observar que la razón de dilución de hidrogeno reduce el valor de la energía Urbach.



Figura 5.6 Muestra la energía Urbach, de las películas de Ge:H, en función de la razón de dilución de hidrogeno. La energía fue obtenida a) del coeficiente de absorción [18] y b) de la fotoconductividad. Las líneas solidas son guías para los ojos.

De la figura 5.6 podemos declarar que la razón de dilución de hidrogeno también reduce la dependencia del producto  $\eta \mu_n \tau$  en las películas de Ge:H.

No obstante, igual que en las películas de  $Ge_xSi_{1-x}$ :H, la energía Urbach obtenida en base a la fotoconductividad redujo desde  $E_U = 116meV$  hasta  $E_U = 89meV$ , para un rango de dilución de hidrogeno de  $R_H = 20$  hasta  $R_H = 50$ , pero incrementa hasta  $E_U = 100meV$ , y después permanece casi sin cambio para el rango de dilución comprendido entre  $R_H = 60$  y  $R_H = 70$ .

#### 5.5.3 Películas de Ge: H con variación en el dopado de boro

En la literatura prácticamente no se ha encontrado información sobre la fotoconductividad de las películas de Ge:H dopado con boro. Por lo tanto, no ha sido posible realizar una comparación del efecto que el dopado de boro ocasiona sobre la fotoconductividad de las muestras. En la figura 5.7 se muestra la comparación de los resultados obtenidos en la sección 4.3.6 con los datos reportados en la referencia [11]. En la referencia [11] la energía Urbach fue obtenida de la respuesta espectral del coeficiente de absorción  $(\alpha(hv))$ .



Figura 5.7 Muestra la energía Urbach, obtenida de la respuesta espectral del coeficiente de absorción y de la fotoconductividad, en función de la concentración del dopado de boro. Las líneas solidas son guías para los ojos.
En la figura 5.7, se puede apreciar que los datos obtenidos en la sección 4.3.6 presentan una clara correlación con la tendencia observada en la referencia [11]. Por lo tanto, podemos declarar que la incorporación de boro a la red de germanio. no afecta considerablemente la dependencia del producto  $\eta \mu_n \tau$ .

## Capítulo 6

### Conclusiones

Durante la investigación efectuada en este trabajo, se analizaron las características temporales de la fotoconductividad y su dependencia con la intensidad. Para determinar el efecto ocasionado en la fotoconductividad por la variación en la razón de dilución de hidrogeno, se obtuvo la respuesta espectral de la fotoconductividad y se extrajeron los siguientes parámetros: la energía Urbach ( $E_U$ ); la razón de defectos ( $R_{def}$ ) y la fotoconductividad ( $\sigma_{ph}$ ) de las películas de Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H y Ge:H para una energía de hv = 1.1eV. En este trabajo, aunque con menor énfasis, también se ha incluido el efecto de la incorporación de boro en las películas de Ge:H. Se obtuvo la respuesta espectral de la fotoconductividad y se extrajeron los parámetros mencionados anteriormente en función de la concentración de boro. De los resultados obtenidos se concluye lo siguiente:

- Se desarrolló una metodología para obtener la respuesta espectral de la fotoconductividad considerando la dependencia con la intensidad y la cinética de la fotoconductividad.
- 2) La magnitud de la fotoconductividad obtenida en las películas de  $Ge_xSi_{1-x}$ :H ( $\sigma_{ph} = 8.44x10^{-4}$ ) y Ge:H ( $\sigma_{ph} = 5.33x10^{-4}$ ), depositadas

por LF-PECVD, es más alta que la magnitud de la fotoconductividad obtenida en cristales de Ge<sub>1-x</sub>Si<sub>x</sub> ( $\sigma_{ph} = 3.27 \times 10^{-4}$ ), crecidos por la técnica de Czochralski, y más alta que la reportada en la literatura.

- 3) La energía Urbach obtenida en base a la fotoconductividad  $E_{U} = 93meV$  (Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H con  $R_{H} = 75$ ), es más alta que la energía Urbach obtenida en base al coeficiente de absorción  $E_{U} = 30meV$  (obtenido por PDS) [24]. Esto puede ser atribuido a que el producto  $\eta \mu_{n} \tau$  tiene dependencia con la energía del fotón, y su dependencia afecta considerablemente el valor de la energía Urbach.
- 4) El valor de la energía Urbach redujo desde  $E_U = 127 meV$  hasta  $E_U = 89 meV$  conforme la razón de dilución de hidrogeno aumento desde  $R_H = 40$  hasta  $R_H = 70$ . Probablemente, esto es ocasionado porque la razón de dilución de hidrogeno reduce la dependencia del producto  $\eta \mu_n \tau$  con la energía del fotón.
- 5) La fotoconductividad redujo desde  $\sigma_{ph} = 3.8 \times 10^{-7}$  hasta  $\sigma_{ph} = 5 \times 10^{-8}$ para Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H, conforme la razón de dilución aumentó de  $R_H = 40$  a 80, y desde  $\sigma_{ph} = 6.1 \times 10^{-7}$  hasta  $\sigma_{ph} = 9 \times 10^{-8}$  para Ge:H, conforme la razón de dilución aumentó de  $R_H = 20$  a 75.
- 6) En las películas de Ge:H, el aumento de la concentración de dopado con boro  $[B/Ge]_{sol} = 0$  a 0.12%, aumenta el valor de la energía Urbach desde  $E_U = 91meV$  hasta  $E_U = 136meV$ , y reduce la fotoconductividad desde  $\sigma_{ph} = 6.3 \times 10^{-7}$  hasta  $\sigma_{ph} = 1.3 \times 10^{-8}$ , conforme el nivel de Fermi se desplaza desde la muestra pasa de ser tipo-n a ser tipo-p.

# Lista de Figuras

Figura 2.1 Esquema de una barra de semiconductor $(L \gg d)$ con contactos
óhmicos en cada extremo de la placa6
Figura 2.2 Representación esquemática de la absorción de fotones por un
material semiconductor. Las tres curvas representan: (1) $\alpha d \ll 1$ , (2) $\alpha d \approx 1$
y (3) $\alpha d \gg 1$ [2]
Figura 2.3 Comparación ilustrativa entre la respuesta espectral de la
fotoconductividad y el coeficiente de absorción del material [4]12
Figura 2.4 Cinética de la fotoconductividad cuando incidimos un pulso de luz.
14
Figura 2.5 Conductividad en obscuro, totoconductividad, contenido de
Figura 2.6 Muestra la fotoconductividad, la movilidad de arrastre y el tiempo
de vida en función del contenido de germanio obtenido por Boshta et al. [13].
Figura 2.7 Muestra la fotoconductividad, la conductividad en ambiente
obscuro, la energía de activación, la banda prohibida y la razón de depósito
como una función de R [14]20
Figura 2.8 Se muestra la fotoconductividad, obtenida con un flujo de fotones
de $\phi_0 = 10^{15} (cm2 * s)^{-1}$ (círculos) y $\phi_0 = 10^{15} (cm2 * s)^{-1}$ (cuadros), y la
conductividad en obscuridad (sólidos) en función de P <sub>H2</sub> para a-Si <sub>0.47</sub> Ge <sub>0.53</sub> :H
conductividad en obscuridad (sólidos) en función de P <sub>H2</sub> para a-Si <sub>0.47</sub> Ge <sub>0.53</sub> :H [17]21
conductividad en obscuridad (sólidos) en función de P <sub>H2</sub> para a-Si <sub>0.47</sub> Ge <sub>0.53</sub> :H [17]21 Figura 2.9 Espectro de absorción óptica para aleaciones de a-Si <sub>1-x</sub> Ge <sub>x</sub>
conductividad en obscuridad (sólidos) en función de $P_{H2}$ para a-Si <sub>0.47</sub> Ge <sub>0.53</sub> :H [17]
conductividad en obscuridad (sólidos) en función de $P_{H2}$ para a-Si <sub>0.47</sub> Ge <sub>0.53</sub> :H [17]
conductividad en obscuridad (sólidos) en función de $P_{H2}$ para a-Si <sub>0.47</sub> Ge <sub>0.53</sub> :H [17]
conductividad en obscuridad (sólidos) en función de $P_{H2}$ para a-Si <sub>0.47</sub> Ge <sub>0.53</sub> :H [17]
conductividad en obscuridad (sólidos) en función de $P_{H2}$ para a-Si <sub>0.47</sub> Ge <sub>0.53</sub> :H [17]
conductividad en obscuridad (sólidos) en función de P <sub>H2</sub> para a-Si <sub>0.47</sub> Ge <sub>0.53</sub> :H [17]

Figura 2.11 Espectro de absorción de las películas de a-Ge:H dopadas con (a) fosforo y (b) boro. El orden del espectro (en 0.85eV) es idéntico a la concentración de dopante dada en la figura [20]......23 Figura 2.12 Dependencia de la fotoconductividad con la intensidad ( $\sigma_{nh} \propto \phi^{\gamma}$ ) en función del contenido de germanio [10]. .....24 Figura 2.13 Fotoconductividad obtenida en películas de a-Ge:H en función del flujo de fotones (hv = 1.96eV) modulado a una frecuencia de 4.6 y Figura 2.14 Dependencia espectral del coeficiente de absorción óptica,  $\alpha(h\nu)$ , para diferentes diluciones de hidrogeno, R, para películas de A) Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H y B) Ge:H [1].....27 Figura 2.15 Ancho de la banda óptica (Eg, Eg\* y  $E_{04}$ ) en función de la razón de dilución de hidrogeno para películas de a) SiGe:H y b) Ge:H [1] ......27 Figura 2.16 Imágenes AFM de la superficie de las películas de a-Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H, depositadas con razón de alta dilución de hidrogeno, R = 20 a 80 [18]. ......28 Figura 2.17 Imágenes AFM de la superficie de las películas de a-Ge:H, depositadas con razón de alta dilución de hidrogeno, R = 20 a 80 [18]. ......29 Figura 3.1 Esquema del sistema de depósito de plasma utilizado para Figura 3.2 Instalación utilizada para obtener las curvas I-V en obscuridad y Figura 3.3 Esquema de las conexiones internas del electrómetro Keithley. ..38 Figura 3.4 Película depositada sobre un substrato de vidrio con electrodos de Figura 3.5 Curvas de I-V medidas en obscuridad con polarización a) positiva y b) negativa......40 Figura 3.6 Ajuste realizado a las curvas I-V (de la figura 3.5) para verificar si existe un comportamiento lineal......40 Figura 3.7 Ajuste realizado a las curvas I-V para obtener el valor de la resistencia en a) obscuridad y b) con iluminación. ......41

Figura 3.8 Configuración experimental utilizada para realizar las mediciones de la respuesta espectral de la fotoconductividad......43 Figura 3.9 Foto-respuesta de una muestra medida en función de la longitud de onda incidente......44 Figura 3.10 Radiación espectral emitida por la parte óptica de la instalación de mediciones. La intensidad se midió con el sensor "Thermopile 71938"....45 Figura 3.11 Respuesta espectral de la fotoconductividad normalizada a una intensidad constante de  $I_0 = (1.64 \pm 0.01) * 10^{-3} W/cm^2$ . Muestra de Figura 3.12 Respuesta espectral de la fotoconductividad normalizada a una constante de  $I_0 = (1.64 \pm 0.01) * 10^{-3} W/cm^2$ . Muestra de intensidad Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H......48 Figura 3.13 Ajuste lineal realizado a la respuesta espectral de la Figura 3.14 Configuración experimental del equipo de mediciones utilizado para medir el tiempo de relajación de fotoconductividad......50 Figura 3.15 Relajación de la fotocorriente generada con una intensidad de Figura 3.16 Ajuste exponencial realizado a la relajación de la fotocorriente, para verificar si el tiempo de vida de los portadores fotogenerados es Figura 3.17 Ajuste parabólico realizado a la relajación de la fotocorriente, para verificar si el tiempo de vida de los portadores fotogenerados es función del tiempo (muestra de Ge:H). .....53 Figura 3.18 Configuración experimental utilizada para obtener la dependencia de la fotoconductividad con la intensidad......54 Figura 3.19 Intensidad emitida por el diodo "IR383" en función de la corriente de polarización. La intensidad fue obtenida con el sensor "Thermopile 

Figura 3.20 Ajuste lineal realizado a la intensidad emitida por el diodo "IR383", para verificar si esta es función lineal de la corriente de polarización.

Figura 3.21 Fotocorriente medida en una muestra de a-Ge:H, en función de la corriente de polarización del LED IR383.....57 Figura 3.22 Fotocorriente medida en una muestra de Ge:H en función de la intensidad......58 Figura 3.23 Ajuste realizado para verificar si la fotocorriente tiene un comportamiento lineal con la intensida......58 Figura 3.24 Muestra desviación generada considerando una dependencia lineal ( $\gamma = 1$ ) y una dependencia casi lineal ( $\gamma = 0.9$ ).....60 Figura 4.1 Ajuste lineal realizado a las curvas I-V para verificar si la respuesta obtenida cumple con la ley de Ohm. Muestra P589 (a-Ge:H). .....62 Figura 4.2 Ajuste realizado a la fotoconductividad de la muestra P589 en función de la intensidad emitida por el LED (Modelo IR383). ......63 Figura 4.3 Ajuste exponencial realizado para determinar si el tiempo de relajación es constante con el tiempo,  $\tau(t) = cte$ . Muestra de Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H (P447).....64 Figura 4.4 Ajuste parabólico realizado para determinar si el tiempo de

relajación es función del tiempo ( $\tau_n = f(t) \ o \ f(G)$ ). Muestra de Ge:H (P589).

Figura 4.8 Fotoconductividad relacionada con la densidad de estados localizados en la banda óptica. Las fechas representan los máximos relacionados con la densidad de estados.....70 Figura 4.9 a) Energía Urbach  $(E_U)$  b) razón de defectos  $(R_{def})$  y c) fotoconductividad ( $\sigma_{vh}(hv = 1.1eV)$ ) de las películas de a-Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H en función de la razón de dilución de Hidrogeno  $(R_{H})$ .Las líneas solidas son guías para los ojos......72 Figura 4.10 a) Energía Urbach  $(E_{u})$ , b) razón de defectos  $(R_{def})$  y c) fotoconductividad ( $\sigma_{\nu\Box}(\Box \nu = 1.1 eV)$ ) de las películas de a-Ge:H en función de la razón de dilución de Hidrogeno (R). Las líneas solidas son guías para los Figura 4.11 Muestra a) la energía Urbach  $(E_U)$ , b) la razón de defectos  $(R_{def})$ y c) la fotoconductividad ( $\sigma_{vh}(hv = 1.1 eV)$  de las películas de Ge:H en función de la concentración de dopado con boro ([B/Ge]sol). Las líneas solidas son guías para los ojos. .....76 Figura 4.12 a) Energía Urbach  $(E_{U})$ , b) Razón de defectos  $(R_{def})$  y c) fotoconductividad ( $\sigma_{ph}(h\nu = 1.1 eV)$ ) de las películas de a-Ge:H dopadas con Figura 5.1 Comparación de la respuesta espectral del coeficiente de absorción [18] y de la fotoconductividad para una muestra de Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H Figura 5.2 Muestra el producto  $\eta \mu_n \tau$  de la muestra P468 de Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H en función de la energía del fotón (hv). La línea solida es guía para los ojos. ...86 Figura 5.3 Muestra el valor de la energía Urbach obtenida en este trabajo en comparación con la obtenida en la referencia [2] y en la referencia [11] para una muestra de Ge:H a) intrínseco y b) dopado con boro. La línea punteada muestra el valor de la energía Urbach......88 Figura 5.4 Muestra el producto  $\eta \mu_n \tau$  de las muestra P589 y P590 en función  

## Lista de Tablas

Tabla 2.1 Fotoconductividad de las películas de Ge<sub>1-x</sub>Si<sub>x</sub> obtenida a temperatura ambiente por Bakirov et al. [8]. La intensidad utilizada durante la medición fue de  $I_0 \approx 50 mW/cm2$ .....17 Tabla 2.2 Fotoconductividad obtenida por Dong et al. [10]. El flujo de fotones fue de  $\phi_0 \approx 10^{15} cm^{-2} * s^{-1}$  y la longitud de onda fue de  $\lambda = 0.62 \mu m$ ......18 Tabla 3.1 Propiedades eléctricas de las películas (Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H y Ge:H) seleccionadas para el estudio de las características electrónicas en base a la fotoconductividad [16]......35 Tabla 3.2 Propiedades eléctricas de las películas (Ge:H (B)) seleccionadas para el estudio de las características electrónicas de base a la fotoconductividad [22]......35 Tabla 3.3 Ajustes realizados al electrómetro Keithley mediante su interfaz con Tabla 4.1 Análisis de interferencia realizado a las películas de Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H y Tabla 4.2 Análisis de interferencia realizado a las películas de Ge:H (B). .....71 Tabla 4.3 Parámetros obtenidos de las películas de a-Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H en función de la razón de dilución de Hidrogeno......73 Tabla 4.4 Características Electrónicas obtenidas en las películas de a-Ge:H en base a la fotoconductividad......75 Tabla 4.5 Parámetros obtenidos de las películas de a-Ge:H con diferente concentración en el dopado con Boro. .....77 Tabla 5.1 Comparación de la dependencia de la fotoconductividad con la intensidad ( $\sigma_{vh} \approx I_0^{\gamma}$ ) en películas de Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>:H (x > 0.85)......82

Tabla	5.2	Muestra	la	magnitud	de	la	fotoconductividad	obtenida	en	
aleaciones de $Ge_xSi_{1-x}$ :H y Ge:H reportadas en la literatura y en este trabajo.										
									83	
Tabla 5.3 Comparación de la energía Urbach obtenida en este trabajo con la										
reportada en las referencias [2],[11]										

## Bibliografía

- Liborio Sánchez Morales. "Growth and Characterization of Nanostructured Silicon-Germanium Films deposited by LF PE CVD" [Tesis doctoral]. INAOE, Puebla, 2007.
- [2]. M. E. Levinshtein, G. S. Simin, "Getting to know semiconductors". World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 1992.
- [3]. Steven S. Hegedus and James M. Cebulka, "Steady-state mobility lifetimes and photoconductivity in a-SiGe:H thin films". J. Appl. Phys. Vol. 67 (8), pp. 3885-3888, (1990).
- [4]. Richard H. Bube. *"Photoelectronic properties of semiconductors"*. Cambridge University Press 1992.
- [5]. D. Tahir and R.A.C.M.M. van Swaaij, "High Quality Hydrogenated Amorphous Silicon-Germanium Alloys for Grading Purposes at the intrinsic Layer Tandem Solar Cells". Laboratory of ECTM-DIMES, Delf University of Technology.
- [6]. B. A. Najafov and G. I. Isakov. *"Electrical properties of amorphous Si<sub>0.60</sub>Ge<sub>0.40</sub>:H<sub>x</sub> films". Inorganic materials, vol. 41 (7), pp. 685-689, (2005).*
- [7]. B. Ebersberger and W. Krühler, "Equilibrium defect density in hydrogenated amorphous germanium". Appl. Phys. Lett. Vol. 65 (13), pp. 1683-1685, (1994).
- [8]. M. Ya. Bakirov and R. V. Shakhbazova, "*Photoconductivity of Ge<sub>1-x</sub>Si<sub>x</sub> single Crystals in the Range 115-300K*". Inorganic materials, Vol. 36 (2), pp. 94-96, (2000).
- [9]. T. Drüsedau and B. Schröder. "Influence of silicon on the properties of reactively sputtered hydrogenated amorphous germanium". Appl. Phys. Lett. Vol. 61 (5), pp. 566-568, (1992).

- [10]. Nguyen Van Dong, Tran Huu Danh, and J. Y. Leny, "Dark conductivity and photoconductivity of hydrogenated amorphous Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> alloys". J. Appl. Phys. Vol. 52(1), pp. 338-341, (1981).
- [11]. Paul Wickboldt, Dawen Pang, William Paul, Joseph H. Chen, Fan Zhong, J. David Cohen, Yan Chen, Don L. Williamson, "Improved a-Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>:H of large x deposition by PECVD". Journal of Non-Crystalline Solids, pp. 567-571, (1996).
- [12]. A. Skumanich, A. Frova and N. M. Amer, "Urbach Tail and Gap States in Hydrogenated a-SiC and a-SiGe alloys". Solid State Communications, Vol. 54 (7), pp. 597-601, (1985).
- [13]. M. Boshta, R. Braunstein, G. Ganguly, "Electronic transport properties of low band gap a-SiGe:H alloys prepared by PECVD technique". Journal of Non-Crystalline Solids, pp. 223-227, (2003).
- [14]. D. Tahir and R.A.C.M.M. van Swaaij, "High Quality Hydrogenated Amorphous Silicon-Germanium Alloys for Grading Purposes at the intrinsic Layer Tandem Solar Cells". Laboratory of ECTM-DIMES, Delf University of Technology.
- [15]. M. Stutzmann. "Structural, optical, and spin properties of hydrogenated amorphous silicon germanium alloys". J. Appl. Phys. Vol. 66 (2), pp. 569-591, (1989).
- [16]. L. Sanchez, A. Kosarev. A.Torres, A. Ilinskii, Y. Kudriavtsev, R. Asomoza, P. Roca I. Cabarrocas, A. Abramov. "Study of GeSi:H films deposited by low frequency plasma". Thin Solid Films, Vol. 515, pp. 7603-7606, (2007).
- [17]. R. A. Rudder, J. W. Cook, Jr., and G. Lucovsky. "High photoconductivity in dual magnetron sputtered amorphous hydrogenated silicon and germanium alloy films". Appl. Phys. Lett. Vol. 45 (8), pp. 887-889, (1984).
- [18]. K. D. Mackenzie, J. H. Burnett, J. R. Eggert, Y. M. Li, and W. Paul. "Comparison of the structural, electrical, and optical properties of

amorphous silicon-germanium alloys produced from hydrides and fluorides". Physical Review B, Vol. 38 (9), pp. 6120-6136, (1988).

- [19]. Hideki Matsumura. "High-quality amorphous silicon germanium produced by catalytic chemical vapor deposition". Appl. Phys. Lett. Vol. 51 (11), pp. 804-805, (1987).
- [20]. B. Ebersberger and W. Krühler, "Equilibrium defect density in hydrogenated amorphous germanium". Appl. Phys. Lett. Vol. 65 (13), pp. 1683-1685, (1994).
- [21]. G. Marcano, A. R. Zanatta and I. Chambouleyron, "Photoconductivity of intrinsic and nitrogen-doped hydrogenated amorphous germanium thin films". J. Appl. Phys. Vol. 75 (9), pp. 4662-4667, (1994).