



**INAOE**

**“Estudio de las características  
electrónicas de las películas de a-SiGe:H y  
pm-SiGe:H depositadas por plasma sobre  
sustratos de plástico”**

Por

**Carlos Alberto Ospina Ocampo**

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**

Diciembre 2013

Tonantzintla, Puebla

Supervisada por:

**Dr. Andrey Kosarev, INAOE**

**Dr. Mario Moreno Moreno, INAOE**

**Dr. Alfonso Torres Jácome, INAOE**

©INAOE 2013

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



## Resumen

El principal objetivo del presente trabajo es estudiar y analizar las propiedades eléctricas, ópticas y morfológicas en películas delgadas de  $a - Si_{1-x}Ge_x:H$  y  $pm - Si_{1-x}Ge_x:H$  cuando  $x = 0.5$  (fase gaseosa) fabricadas a diferentes temperaturas y sobre distintos sustratos, incluyendo sustratos plásticos.

En cada proceso de fabricación se incluyeron los sustratos PEN DuPont Teijin TEONEX Q51, teflón DuPont PTFE, Polyimide DuPont Kapton, Corning glass 1737 y silicio <100> tipo P.

Diferentes métodos de caracterización se utilizan tales como: Espectroscopía en el rango del infrarrojo cercano (NIR) (mediciones de transmitancia)  $T_\alpha(\lambda)$ , dependencias de temperatura de conductividad oscura  $\sigma_{dark}(T)$ , mediciones de fotoconductividad  $\sigma_{ph}$ , espectroscopía por medio de la transformada de Fourier para analizar los enlaces químicos y la determinación de líneas de absorción y finalmente caracterización de la rugosidad superficial por microscopía de fuerza atómica AFM.

De las mediciones realizadas una serie de parámetros se calculan: gap óptico  $E_g$ , Energía de Urbach  $E_0$ , coeficiente de absorción  $\alpha(\lambda)$ , conductividad a temperatura ambiente  $\sigma_{RT}(T)$ , energía de activación  $E_a$ , altura promedio de grano  $\langle H \rangle$ , diámetro promedio de grano  $\langle D \rangle$ , fotoconductividad  $\sigma_{ph}$ , entre otros.

Los parámetros se analizan principalmente en función de las distintas temperaturas de depósito para todas las muestras. Se encontraron correlaciones entre los parámetros de fabricación y los parámetros eléctricos, morfológicos y ópticos.

Teorías analíticas que explican el comportamiento de los principales parámetros de transporte para materiales amorfos, así como la teoría estadística en el caso de la morfología se aplicaron al análisis del comportamiento observado en los resultados de este trabajo. Finalmente se presentan las conclusiones.

## Abstract

The main objective of this paper is to study and to analyze electrical, optical and morphological properties in  $a - Si_{1-x}Ge_x:H$  and  $pm - Si_{1-x}Ge_x:H$  thin films when  $x = 0.5$ , these films were deposited at different temperatures and on different substrates, including plastic substrates.

In each deposition process the substrates Corning glass 2947, PEN DuPont Teijin TEONEX Q51, teflón DuPont PTFE, Polyimide DuPont Kapton, Corning glass 1737 and p-type silicon <100> were included.

Different characterization methods were employed such as: Spectroscopy in the near-infrared range (NIR) (transmittance measurements)  $T_\alpha(\lambda)$ , temperature dependences of dark conductivity  $\sigma_{dark}(T)$ , measurements of photoconductivity  $\sigma_{ph}$ , characterization of surface roughness by atomic force microscopy AFM and IR spectroscopy using the Fourier transform to analyze the chemical bonds and determination of absorption lines.

From the measurements several parameters were calculated as: optical band gap  $E_g$ , Urbach energy  $E_0$ , absorption coefficient  $\alpha(\lambda)$ , room temperature conductivity  $\sigma_{RT}(T)$ , activation energy  $E_a$ , average height of grain  $\langle H \rangle$ , average grain diameter, photoconductivity  $\sigma_{ph}$ , among other parameters.

Parameters were analyzed mainly depending on the different deposition temperatures for all samples. Correlations were found between the deposition parameters and electrical, morphological and optical parameters.

Analytical theories that explain the behavior of the main transport parameters for amorphous materials and statistical theory in the case of morphology were applied to the analysis of behavior observed in the results of this work. Finally we present our conclusions.



## **Dedicado**

*A Jehová Dios porque cuando todo parecía perdido, oré y Él me escuchó...y realmente por más...mucho más.*

*A mi familia: mi madre Emilsen Ocampo, mi hermana Lucero, mis sobrinas Jessica y Mayra, mi abuela Lucila Arenas, mi cuñado Cesar Arbeláez y a mis tíos. Porque si el amor tuviese magnitud, la suma del amor de ellos sería mucho mayor que todo aquello que pudiera hacerme desfallecer.*

## **Agradecimientos**

Quiero agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca que me otorgó para poder realizar la maestría.

A SENER-CONACYT por hacerme parte del proyecto Número 152244.

Al Dr. Andrey Kosarev por la paciencia que tuvo para conmigo, le agradezco también porque en cada reunión yo estuve aprendiendo más y más de sus correcciones y finalmente por darme la oportunidad de ser su alumno.

Me siento agradecido con el Dr. Mario Moreno también por su paciencia, por sus enseñanzas, por que aprendí de él muchas cosas, no sólo en el trabajo de tesis, también en su materia...realmente le considero una persona noble y sencilla.

Agradezco al Dr. Alfonso Torres el tiempo que dispuso para atenderme, doy gracias por el conocimiento que obtuve estando en sus clases y cuando pase el tiempo me gustaría ser como él...aún siento que nunca podré ver lo que él en las gráficas.

También estoy agradecido con aquellas personas que de una u otra forma me ayudaron para que este trabajo se pudiera terminar. Adrian Itzmoyotl del laboratorio de microelectrónica quien me ayudó con el sistema PECVD. Ignacio Juárez quien me ayudó en los laboratorios de técnicas de medición. A la licenciada en diseño gráfico Leticia Tecuapetla Quechol por enseñarme a manejar el sistema AFM. A Manuel Escobar Aguilar quien estuvo allí en prácticas de laboratorio. Gracias al técnico de laboratorio de microelectrónica Armando Hernández quien me colaboró con los depósitos de metal en las evaporadoras. A Ismael quien me ayudó con su experiencia y me dio instrucciones sobre mediciones de conductividad.

Finalmente doy gracias a todos mis profesores de maestría: Dr. Reydezel Torres, Dr. Roberto Murphy, Dr. Peter Halevi, Dr. Javier de la Hidalga, Dra. Claudia Reyes, Dr. Carlos Zúñiga, Dr. Wilfrido Calleja y si alguno no está en esta lista...pido disculpas.

# 1 Tabla de contenido

Lista de Símbolos.....	11
2 Introducción.....	13
2.1 Antecedentes y justificación .....	13
2.2 Objetivo .....	14
2.3 Tareas .....	14
3 Sólidos Amorfos: Algunas definiciones .....	16
3.1 Depósito Químico en Fase Vapor Asistido por Plasma (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition - <i>PECVD</i> ).....	16
3.2 Estructura de los materiales no cristalinos .....	19
3.2.1 Estructura cristalina y amorfa .....	19
3.2.2 Estructura Electrónica.....	21
3.2.3 La densidad de estados electrónicos.....	22
3.2.4 Las bandas de conducción y valencia .....	23
3.2.5 Hidrógeno en silicio amorfo y en silicio cristalino.....	24
3.3 Propiedades ópticas de películas de materiales semiconductores amorfos	25
3.3.1 Absorción óptica y su relación con la densidad de estados.....	25
3.3.2 Técnica de caracterización por Transmisión óptica $T(\lambda)$ .....	27
3.4 Propiedades de transporte de las películas de semiconductores amorfos	31
3.4.1 Movilidad.....	32
3.4.2 Conductividad y su relación con la densidad de estados .....	33
3.4.3 Caracterización de la dependencia de conductividad con temperatura en oscuridad.....	34

3.5	Fotoconductividad .....	35
3.6	Caracterización por Espectroscopía infrarroja por medio de la transformada de Fourier (FTIR) .....	38
3.7	Microscopía de Fuerza Atómica AFM .....	41
3.7.1	Función de distribución de altura superficial .....	41
3.7.2	Rugosidad RMS.....	42
3.7.3	Rugosidad media.....	42
3.7.4	La asimetría (“ <i>Skewness</i> ”) .....	42
3.7.5	Curtosis.....	43
3.7.6	Longitud de correlación lateral.....	44
3.8	Silicio polimorfo hidrogenado .....	44
3.9	Sustratos Plásticos.....	45
4	Trabajo experimental.....	47
4.1	Introducción.....	47
4.2	Sistema de depósito.....	47
4.3	Condiciones de Pre-Depósito PECVD. ....	48
4.4	Preparación de los sustratos y condiciones de depósito.....	50
4.5	Métodos de Caracterización.....	54
4.5.1	Medición del grosor de las películas.....	54
4.5.2	Caracterización por medio de Espectroscopía Infrarroja por medio de la Transformada de Fourier (FTIR).....	55
4.5.3	Medidas de la dependencia con temperatura de la Conductividad....	56
4.5.4	Caracterización por medio de Microscopio de Fuerza Atómica (AFM)	

4.5.5	Caracterización por medio de Transmitancia en el rango del infrarrojo cercano NIR .....	64
4.5.6	Determinación de la energía de Urbach .....	66
4.5.7	Caracterización de Fotoconductividad .....	68
5	Resultados .....	71
5.1	Introducción.....	71
5.2	Resultados de caracterización de espectroscopía infrarroja por medio de la transformada de Fourier (FTIR) .....	72
5.3	Resultados de caracterización eléctrica, curvas I(U) con temperatura y conductividad en oscuridad .....	84
5.4	Resultados de Caracterización de morfología superficial por medio de Microscopía de Fuerza Atómica (AFM).....	107
5.5	Resultados de Caracterización por medio de Transmitancia en el rango del infrarrojo cercano NIR.....	138
5.6	Resultados de Caracterización de Fotoconductividad.....	146
6	Conclusiones.....	160
	Apéndice A. Tutorial de PUMA.....	162
	Bibliografía .....	170

## Lista de Símbolos

Símbolo	Nombre	Unidades
$\langle D \rangle$	Diámetro promedio	nm
$\langle H \rangle$	Altura promedio	nm
$R_q$	Rugosidad cuadrática media	nm
$L_c$	Longitud de correlación	nm
$\gamma_3$	Skewness	
$\gamma_4$	Curtosis	
$T_s$	Temperatura del sustrato	°C
$Q_{H_2}$	Flujo de gas hidrógeno	sccm
$Q_{SiH_4}$	Flujo de gas silano	sccm
$Q_{GeH_4}$	Flujo de gas germano	sccm
$P$	Presión	Torr
$W$	Potencia	Watt
$f$	Frecuencia	Hertz
$A$	Absorbancia	a.u.
$\alpha$	Coefficiente de absorción	$cm^{-1}$
$k$	Número de onda	$cm^{-1}$
$n(\lambda)$	Índice de refracción	
$k(\lambda)$	Coefficiente de atenuación	
$h\nu$	Energía del fotón	eV
$\lambda$	Longitud de onda	$\mu m$
$\chi$	Coefficiente de temperatura de la posición del nivel de Fermi	$eVK^{-1}$

$E_a$	Energía de activación determinada a temperatura cero	$eV$
$E_c(T)$	Borde de banda de conducción a temperatura T	$eV$
$E_F(T)$	Nivel de Fermi a temperatura T	$eV$
$t$	Tiempo	$s$
$d$	Grosor de película	$cm$
$w$	Ancho de película	$cm$
$\sigma(T)$	Dependencia con la temperatura de la conductividad	$Ohm^{-1}cm^{-1}$
$\sigma_0$	Conductividad extrapolada a temperatura cero	$Ohm^{-1}cm^{-1}$
$\sigma_{min}$	Conductividad metálica mínima	$Ohm^{-1}cm^{-1}$

## 2 Introducción

### 2.1 Antecedentes y justificación

Los semiconductores amorfos se usan ampliamente en la industria electrónica actual debido a varias ventajas. Tienen un proceso de fabricación a bajas temperaturas, tienen compatibilidad con la tecnología basada en silicio con sustratos de bajo costo; es posible con ellos el escalamiento (*scaling up*) de procesos de depósito y la fabricación de dispositivos de área grande como lo son pantallas, sensores, celdas solares, etc. A estos semiconductores se les controla sus propiedades electrónicas en un amplio rango gracias a la variación de la estructura, al dopado (sea este tipo n o tipo p) y a la aleación con otros materiales.

Las películas de silicio amorfo y de silicio microcristalino depositadas por la técnica de depósito químico en fase vapor (PECVD) han llegado a ser importantes en aplicaciones de dispositivos de la industria electrónica, como por citar algunos ejemplos, las pantallas de cristal líquido y las celdas solares. En la actualidad la frecuencia más usada en PECVD es  $f = 13.56 \text{ MHz}$  aunque existan otras frecuencias de depósito. Las relaciones existentes entre las condiciones de depósito de películas de silicio (mediante la técnica PECVD) y sus propiedades electrónicas han sido ampliamente estudiadas y reportadas.

En cuanto a publicaciones realizadas sobre trabajos a baja frecuencia (LF – *low frequency*), es posible decir que se han ido incrementando en número, en el INAOE ha habido extenso trabajo en la última década por parte de los doctores Andrey Kosarev, Alfonso Torres, Mario Moreno, por mencionar sólo algunos de un extenso número de personas. Budaguan et al. [1] reportaron altas velocidades de depósito, así como buenas propiedades electrónicas en depósito realizado a baja frecuencia.

La incorporación del gas diluyente en la mezcla de gases durante el depósito por plasma es importante para controlar el crecimiento y las propiedades electrónicas como se ha mostrado en muchas publicaciones.

El proceso de crecimiento de las películas basadas en silicio y en particular la mezcla Silicio-Germanio así como el efecto de las condiciones de depósito en las propiedades electrónicas ha sido estudiado, pero aleaciones Silicio-Germanio sobre sustratos plásticos y flexibles no han sido estudiadas en el INAOE.

Así, el depósito mediante plasma de las películas de Si-Ge a bajas frecuencias y el efecto de los diluyentes en las propiedades electrónicas se ha reportado debido a que hay altas razones de depósito a bajas frecuencias y que esta descarga es más simple en cuanto a su realización técnica comparada con las descargas de radiofrecuencia (*RF*) y muy alta frecuencia (*VHF*).

## **2.2 Objetivo**

El objetivo del presente trabajo es estudiar la fabricación y caracterización de películas de silicio germanio amorfo  $a-SiGe:H$  y silicio germanio polimorfo  $pm-SiGe:H$  depositadas por plasma a baja frecuencia sobre distintos sustratos plásticos que pueden ser usados en dispositivos electrónicos. Caracterizarlas óptica, eléctrica y estructuralmente para encontrar diferencias o similitudes entre los distintos sustratos y regímenes de fabricación.

## **2.3 Tareas**

1. Depósito de películas de  $a-SiGe:H$  y  $pm-SiGe:H$  a diferentes temperaturas y sobre diferentes sustratos plásticos.
2. Caracterización por espectroscopía infrarroja por medio de la transformada de Fourier.
3. Mediciones de conductividad en oscuridad como una función de la temperatura y así determinar la energía de activación y la conductividad a temperatura ambiente.
4. Estudio de la transmisión óptica en el rango NIR como una función de la energía de los fotones y posterior determinación de los parámetros de los espectros electrónicos de las películas.

5. Caracterización morfológica de las películas por medio de microscopía de fuerza atómica AFM con el fin de hallar diferencias en las películas cuando se tienen distintos sustratos.
6. Caracterización de la fotoconductividad.
7. Análisis de los resultados como una función de la temperatura de depósito.

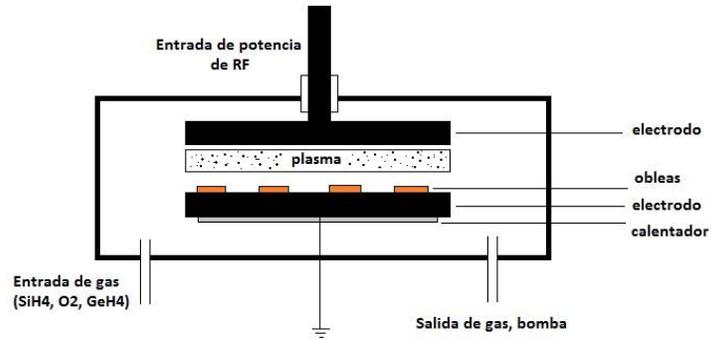
### 3 Sólidos Amorfos: Algunas definiciones

#### 3.1 Depósito Químico en Fase Vapor Asistido por Plasma (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition - PECVD)

El depósito químico en fase vapor asistido por plasma o *PECVD* por sus siglas en inglés, es una técnica de depósito que provee aceptables razones de depósito, buena calidad de película, conformalidad y bajas temperaturas de depósito. Una fuente de plasma se usa junto con una fuente térmica para dar la energía que se necesita para que las reacciones químicas ocurran durante el depósito. Cuando se habla de plasma, se hace referencia a gases parcialmente ionizados. Mediante el suministro de energía adicional del plasma a los gases, las reacciones requeridas para el depósito pueden ocurrir a temperaturas mucho más bajas que aquellas que se necesitan cuando se proporciona solamente energía térmica, como en el caso de CVD. Con este método también es posible lograr depósitos a temperatura ambiente, pero lo común es que los depósitos por *PECVD* sean hechos en el rango 200-350°C [2]. La técnica *PECVD* además de lo anterior, permite alterar las propiedades de la película (densidad, composición, tensión, etc.) y la adaptación de estas propiedades para aplicaciones particulares. Esto se debe principalmente a la naturaleza fuera del equilibrio de este proceso de depósito. Sin embargo, esto también puede llevar a composiciones indeseables o propiedades en las películas, tales como la incorporación de subproductos o moléculas de gas en la película.

*PECVD* es una variante de CVD (Chemical Vapor Deposition en inglés). CVD permite formar una película sólida sobre un sustrato gracias a la reacción de especies químicas en fase vapor. En una cámara se introducen gases reactivos que son descompuestos o reaccionan entre sí sobre sustratos calientes formando así una película.

Una configuración típica de equipo para *PECVD* se muestra en la Figura 3-1. En el



**Figura 3-1. Representación esquemática de un sistema PECVD.**

depósito asistido por plasma, las especies energéticas son usadas para ayudar a formar las películas en la parte superior del sustrato. Los sustratos están localizadas en el electrodo de la placa inferior. A través de un calentador posicionado debajo del electrodo, el calor se transfiere a las muestras. Los gases reactantes, por ejemplo, silano y oxígeno son introducidos a través de líneas de entrada. Una descarga luminosa o plasma, se mantiene entre los electrodos inferior y superior. El plasma se forma por aplicar un alto campo eléctrico a un gas a baja presión (entre 50 mTorr y 5 Torr), creando iones y electrones libres. El plasma se mantiene cuando electrones de alta energía colisionan y también ionizan átomos y moléculas.

Los gases reactantes se disocian y ionizan en una variedad de especies debido a interacciones con los electrones de alta energía en el plasma. Entre las especies mencionadas están moléculas (o átomos) ionizadas y excitadas, moléculas neutras y fragmentos ionizados y neutros de moléculas separadas o disociadas, incluyendo radicales libres. Estos últimos son especies eléctricamente neutras que tienen enlaces incompletos; es decir, los radicales tienen electrones desapareados.  $SiO$  y  $SiH_3$  son ejemplos de dichos radicales en la depósito por plasma. Tales especies son muy reactivas y con otras especies son absorbidas sobre la superficie de las muestras, migran, interactúan, se acomodan y se recombinan químicamente para formar la película. También existe bombardeo de iones y electrones desde el plasma sobre la superficie de las muestras. Una diferencia de potencial existe entre el plasma y la superficie de las muestras en los

sistemas de plasma por RF, estando la superficie de la muestra eléctricamente negativa con respecto al plasma. Así, se aceleran iones positivos a la superficie de las muestras. Tal bombardeo de iones y electrones transfiere más energía a las especies en la superficie, rompiendo enlaces químicos, lo cual contribuye con los diferentes procesos y reacciones en la superficie. El resultado de la fragmentación inducida por el plasma, la generación de radicales libres y el bombardeo de iones es que los procesos y el depósito en la superficie pueden producirse a temperaturas mucho más bajas que en sistemas sin plasma. Al final, los subproductos de las reacciones de depósito son desorbidos y retirados a través de la línea de vacío.

Los depósitos por PECVD pueden resultar en buena cobertura y llenado de topografía no planar, similar a depósitos realizados a mayor temperatura en sistemas sin plasma. Esto se atribuye a la difusión superficial de largo alcance, asistida por las especies más energéticas y por el bombardeo de iones.

## **3.2 Estructura de los materiales no cristalinos**

### **3.2.1 Estructura cristalina y amorfa**

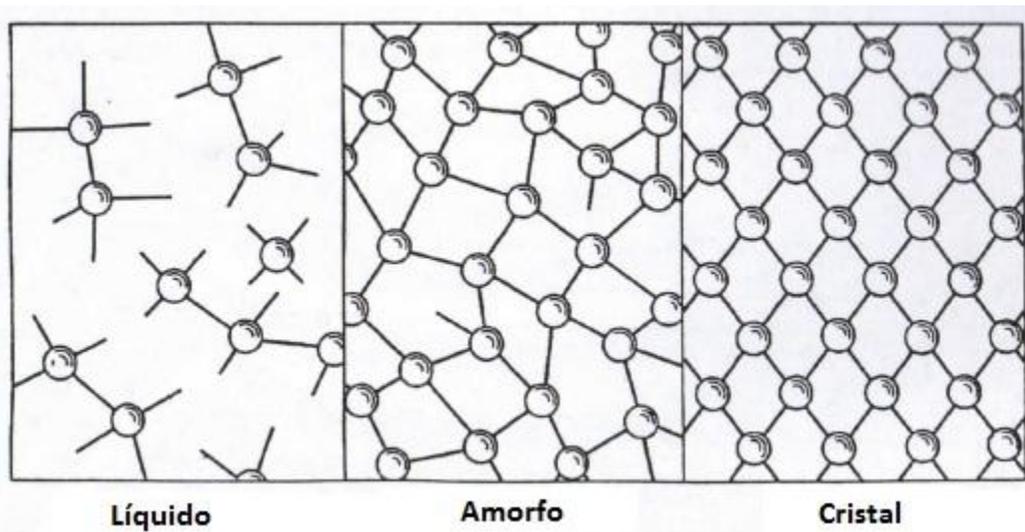
Un material no cristalino puede ser también un líquido, en este trabajo se hace hincapié únicamente en los materiales sólidos no cristalinos, que son comúnmente llamados amorfos.

En la Figura 3-2 se observan las diferencias que existen entre los materiales cristalinos y los materiales amorfos a través de una representación bidimensional. La estructura cristalina exhibe un orden estructural sobre toda su extensión, es decir, el arreglo de un grupo de átomos se repite periódicamente en todas direcciones. En estos materiales, la longitud de enlace y el ángulo de enlace es exactamente el mismo entre los átomos más cercanos de cada arreglo, por ello al repetir el arreglo primario en cualquier dirección, ese orden no se altera.

Los materiales amorfos a ser estudiados en el presente trabajo poseen un número de coordinación 4, es decir su arreglo primario es tetraédrico. En un material amorfo se dice que los átomos tienen un orden de corto alcance (Short Range Order, SRO) ya que las variaciones en los ángulos y distancias interatómicas tienen pequeñas variaciones en unas cuantas distancias interatómicas. En los cristalinos además de existir el orden de corto alcance, también existe el llamado orden de largo alcance (LRO) en el que el orden se mantiene a distancias mayores que en SRO.

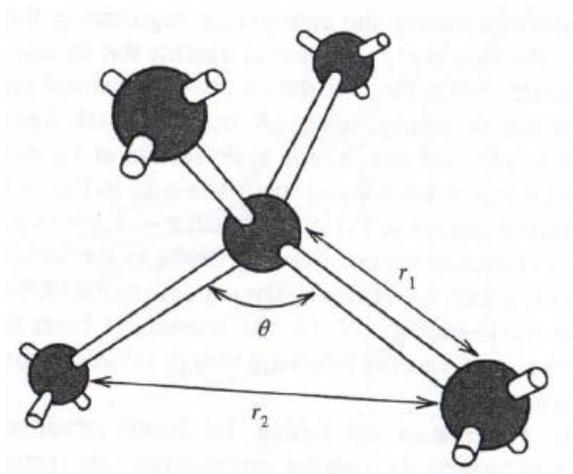
Por otra parte se observa que el material amorfo carece de un arreglo periódico que se repita en toda su extensión, carece de periodicidad traslacional, dicho de otra forma no tiene el orden de rango largo que caracteriza al material cristalino. Sin embargo, el orden de corto alcance (SRO) se sigue conservando a pesar de ser amorfo, esto se debe a las constantes físicas y químicas del material, tales como el número de coordinación. Estos materiales conservan su arreglo tetraédrico y son casi idénticos a los cristalinos, sin embargo, las variaciones en la longitud de los enlaces y los ángulos de enlace en algunos de los arreglos hacen

que a una distancia grande la periodicidad traslacional se pierda como se mencionó antes.



**Figura 3-2. Representación de los estados líquido, amorfo y cristalino que pueden poseer los materiales [5].**

La Figura 3-3 aprovechando que los materiales con los que se trata en este trabajo son silicio y germanio, sirve para incluir cualquiera de estos elementos en



**Figura 3-3. Ilustración del orden estructural de rango corto, mostrando los parámetros que se deben considerar en un material amorfo.**

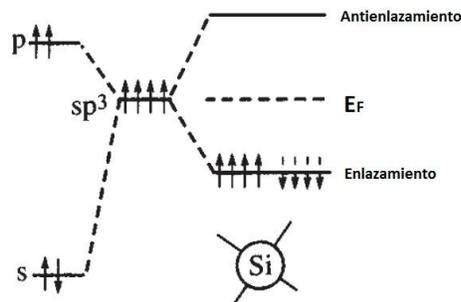
un modelo de red en tres dimensiones para considerar lo que ocurre en el orden de corto alcance de sólidos amorfos. El silicio y el germanio tienen una estructura enlazada covalentemente y cada átomo tiene cuatro enlaces covalentes basados

en orbitales hibridizados  $sp^3$  que forman una red tridimensional. Para determinar el SRO se toma en cuenta:

- 1)  $r_1 = 2.35 \text{ Angstroms}, r_2 = 3.5 \text{ Angstroms}$
- 2) Energías de enlace:  $\text{Si} - \text{Si} \rightarrow 222 \text{ KJ/mol}, \text{Ge} - \text{Ge} \rightarrow 188 \text{ KJ/mol}$
- 3) Rango de variación:  $r_1 \rightarrow <10\%, \theta \rightarrow \pm 10^\circ$

### 3.2.2 Estructura Electrónica

La existencia de una banda prohibida separando los estados de banda de valencia ocupados de los estados de banda de conducción vacíos, es una cualidad esencial de un semiconductor. La banda prohibida se describe por la división de los estados de enlazamiento y antienlazamiento del enlace covalente. Figura 3-4. El orden de corto alcance, que de hecho es el mismo en silicio amorfo y silicio cristalino afecta fuertemente las bandas y la carencia de periodicidad se muestra como una mínima perturbación en un semiconductor amorfo.



**Figura 3-4. Ilustración de la configuración de enlazamiento de átomos de silicio construida de orbitales moleculares hibridizados.**

La estructura de semiconductores amorfos tiene tres características esenciales:

- El orden de corto alcance de la red ideal.
- El desorden en el largo alcance (LRO).
- Defectos de coordinación.

En un cristal los bordes de banda son abruptos, mientras en un material amorfo se tiene una cola de estados ampliada que se expande dentro de la banda prohibida,

la cual se origina de las desviaciones de la longitud de enlace y ángulo de enlace. Las colas de banda son importantes pese a su concentración relativamente pequeña, debido a que el transporte electrónico ocurre en el borde de banda. Los defectos de coordinación que se encuentran dentro de la banda prohibida surgen de las desviaciones de la red ideal. Tales defectos establecen ciertas propiedades electrónicas mediante el control de la recombinación y el atrapamiento. Las colas de banda, los estados de defectos y las bandas conforman la estructura electrónica de un semiconductor amorfo (Figura 3-5). La correspondencia entre características de la estructura atómica y las propiedades electrónicas resultantes se resume a continuación:

- Desorden de enlazamiento → Colas de banda, localización de estados electrónicos y dispersión (scattering).
- Defectos estructurales → Estados electrónicos en la banda prohibida (*band gap*).
- Configuraciones de enlazamiento alternativo → Estados metaestables inducidos electrónicamente.

### **3.2.3 La densidad de estados electrónicos**

La distribución de energía de los estados electrónicos permite describir las propiedades electrónicas de los materiales semiconductores amorfos. Debido al desorden en el material amorfo sobre los estados electrónicos es posible encontrar efectos como:

- Ensanchamiento de la distribución de la densidad de estados si se compara con el cristal para formar las colas de banda.
- Localización de los estados de la cola de banda.
- La pérdida de conservación de momento en las transiciones electrónicas.

La estructura de banda Energía-Momento de un semiconductor cristalino debe ser sustituida por una distribución de densidad de estados dependiente de la energía  $N(E)$  debido a la pérdida de conservación de momento ya mencionada [6]. En la Figura 3-5 se muestra la distribución de  $N(E)$  en tres diferentes rangos de energía;

las bandas de conducción y valencia, la región de cola de banda y los estados de defectos en la banda prohibida.

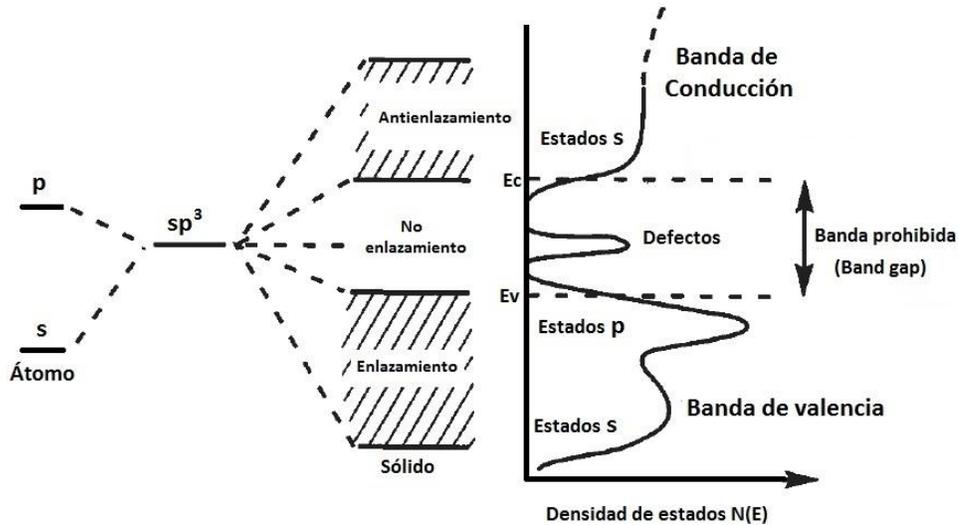


**Figura 3-5. Distribución de la densidad de estados para un semiconductor amorfo mostrando las bandas, las colas de banda y estados de defectos en la banda prohibida. Las líneas a trazos son el equivalente de la densidad de estados en un cristal [6].**

Las fases cristalinas y amorfas se diferencian en los bordes de banda donde el desorden crea una cola de estados localizados que se extienden en la banda prohibida. El ancho de las colas depende del grado de desorden y de la naturaleza del enlace de los estados y los estados de cola localizados se encuentran separados de los estados de banda extendidos por el borde de movilidad.

### **3.2.4 Las bandas de conducción y valencia**

La Figura 3-6 es una representación de las bandas de conducción y valencia de a-Si:H. En la Figura 3-6 los orbitales híbridos  $sp^3$  del enlace tetraédrico de silicio son formados por combinar los estados  $s$  y  $p$ . En la banda de conducción los estados  $s$  yacen en el borde de la banda. Los orbitales de silicio de no enlazamiento, como por ejemplo enlaces sueltos (*dangling bonds*), no se separan por la interacción de enlace y resultan en estados en la banda prohibida.



**Figura 3-6. Esquema del modelo orbital molecular de la estructura electrónica de silicio amorfo y su correspondiente distribución de la densidad de estados.**

El modelo en la Figura 3-6 es útil para revelar características generales de la distribución de la densidad de estados.

### 3.2.5 Hidrógeno en silicio amorfo y en silicio cristalino

Se puede decir que hay similitudes entre los efectos del hidrógeno en ambos materiales. El hidrógeno pasiva defectos puntuales, por ejemplo en la terminación de enlaces de silicio y también causa la pasivación de dopantes [7]. En silicio cristalino el hidrógeno rompe enlaces Si-Si. Después de exponer la superficie a hidrógeno atómico, defectos extendidos se encuentran en la región superficial, generalmente a una profundidad de alrededor de 1000 Angstroms [8].

La difusión de hidrógeno en silicio cristalino se activa térmicamente y ocurre por movimiento entre sitios centrales de enlace, la difusión se interrumpe por procesos de atrapamiento en los cuales se enlaza hidrógeno a silicio o a los dopantes. La magnitud del coeficiente de difusión de hidrógeno es mayor en silicio cristalino que en a-Si:H y además depende del dopaje, porque el atrapamiento y la liberación de energía se relaciona con la ocupación de estados electrónicos en el gap y así al dopaje [6].

La pasivación de enlaces sueltos es el efecto benéfico principal del hidrógeno en a-Si:H. El hidrógeno también causa una reconstrucción de la red rompiendo y removiendo enlaces Si-Si débiles, principalmente durante el crecimiento [6].

### **3.3 Propiedades ópticas de películas de materiales semiconductores amorfos**

Las propiedades ópticas de los materiales ofrecen información acerca de la interacción de la luz con el material. Las principales aplicaciones de las películas semiconductoras amorfas se enfocan en dispositivos optoelectrónicos, por lo que es necesario conocer sus propiedades ópticas. La propiedad óptica de mayor interés es la dependencia espectral del coeficiente de absorción  $\alpha(h\nu)$ , la cual se relaciona con el ancho de banda óptico ( $E_g$ ), también es de interés la densidad de estados y sobre ella se hablará un poco más adelante en el texto. Otras propiedades ópticas son el índice de refracción ( $n$ ) y el coeficiente de absorción ( $\alpha$ ).

#### **3.3.1 Absorción óptica y su relación con la densidad de estados**

El coeficiente de absorción óptico,  $\alpha(h\nu)$ , caracteriza la pérdida de fotones conforme la luz se propaga a lo largo de una cierta dirección en un medio. En la ecuación 3.1 se define al coeficiente de absorción.  $\delta I$  es el cambio fraccional en la intensidad de luz (a lo largo de la dirección de propagación) por unidad de distancia  $\delta x$  y donde  $I$  es la intensidad de la radiación.

$$\alpha = -\frac{\delta I}{I\delta x} \quad 3.1$$

La absorción de la luz está relacionada con la transición del electrón desde los estados ocupados hacia los estados electrónicos vacíos, en consecuencia este proceso es proporcional a las concentraciones de los estados vacíos y de los ocupados. En los materiales cristalinos la absorción fundamental que determina el ancho de banda prohibido de los materiales se debe a la transición electrónica entre los estados ocupados en la banda de valencia y los estados vacíos en la banda de conducción. A diferencia de los materiales cristalinos, la estructura de la

densidad de estados de los materiales no cristalinos es más compleja: los estados extendidos en las bandas de valencia y de conducción existen y son muy similares a los de los cristalinos con sus correspondientes transiciones extendido a extendido, sin embargo, en los materiales no cristalinos aparecen estados localizados dentro de la banda “prohibida”. Los estados localizados también están ocupados por electrones siguiendo una distribución de probabilidad de ocupación de Fermi. Como resultado, aparecen nuevas transiciones electrónicas posibles: la primera se efectúa desde estados localizados ocupados hacia estados extendidos, la segunda es desde estados extendidos ocupados hacia estados localizados, por último es posible que haya transiciones entre los estados localizados [6].

Estos tipos de absorciones se reflejan en la dependencia espectral del coeficiente de absorción,  $\alpha(h\nu)$ , ya que está conectado a la densidad de estados y puede ser descrita por la siguiente ecuación 3.2 [12]:

$$\alpha(h\nu) = C \int_{-\infty}^{+\infty} M(E)N(E - h\nu)F(E - h\nu)N(E)[1 - F(E)]dE \quad 3.2$$

En donde  $C$  es una constante de proporcionalidad independiente de la frecuencia de un fotón absorbido,  $M(E)$  es la probabilidad que ocurra una transición desde estados ocupados  $N(E - h\nu)$  hacia estados vacíos  $N(E)[1 - F(E)]$ ,  $N(E)$  es la densidad de estados,  $F(E)$  es la función de Fermi y  $h\nu$  es la energía del fotón.  $M(E)$  es diferente dependiendo del tipo de transición y el espectro de los datos experimentales del coeficiente de absorción se divide en tres regiones en las que domina algún tipo de transición, se supone que para cada una de tales regiones  $M(E)$  es constante. La primera región corresponde a la transición entre estados extendidos, en la segunda región las transiciones se dan entre un estado extendido a uno localizado o de localizado a extendido, por último en la región tres se dan las transiciones entre estados localizados [12].

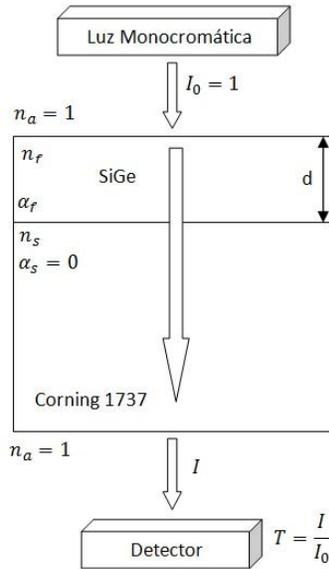
La técnica convencional utilizada para obtener  $\alpha(h\nu)$  es midiendo la dependencia espectral de la transmitancia  $T(h\nu)$  o absorbancia  $A(h\nu)$  y la reflectancia  $R(h\nu)$  en algunas combinaciones y el cálculo posterior de  $\alpha(h\nu)$  tomando en cuenta la

interferencia en las películas delgadas. Existen muchas maneras para efectuar este tipo de cálculos difiriendo únicamente en las aproximaciones y los procedimientos utilizados para procesar los datos. Una vez que se obtiene  $\alpha(h\nu)$  es posible determinar el valor del ancho de banda óptico,  $E_g$ , como se mostrará más adelante en el capítulo de metodología.

### 3.3.2 Técnica de caracterización por Transmisión óptica $T(\lambda)$

Las mediciones de transmitancia permiten la obtención de valores de constantes ópticas. La transmitancia óptica da información del rango en el espectro donde la película tiene un porcentaje de transparencia u opacidad. El índice refractivo  $n(\lambda)$ , band gap óptico  $E_g$  y el coeficiente de absorción  $\alpha(\lambda)$  son parámetros que se extraen como función de la longitud de onda [13]. El modelo óptico para el estudio de las muestras fabricadas se muestra en la Figura 3-7.

La película posee índice refractivo complejo  $n = n_f + ik$ , en donde  $n_f$  es el índice de refracción de la película y  $k$  el coeficiente de extinción. El grosor de la película se denota en la Figura 3-7 por la letra “d”. De la relación  $k = \frac{\alpha\lambda}{4\pi}$  se puede calcular el coeficiente de absorción de la película  $\alpha_f$ . El índice de refracción del substrato es  $n_s$  y su coeficiente de absorción es  $\alpha_s \approx 0$ . El índice de refracción del aire es  $n_a = 1$ .



**Figura 3-7. Sistema de película delgada depositada sobre sustrato transparente de espesor finito**

La Figura 3-8 muestra un ejemplo típico del espectro de absorción obtenido después de las mediciones de transmisión de luz. La región A es la región de Tauc, donde la forma espectral puede ser aproximada por la ecuación 3.3 y es atribuida a la transición electrónica óptica entre la banda de valencia extendida y la banda de conducción. En un modelo de Tauc:

$$\alpha(h\nu)h\nu \propto (h\nu - E_g)^2 \quad 3.3$$

Donde  $E_g$  es el gap de energía óptica (o Tauc). El modelo de Tauc muestra de forma conveniente el espectro de absorción óptico de un material, este gráfico muestra la cantidad  $h\nu$  sobre el eje horizontal y la cantidad  $(\alpha h\nu)^r$  sobre el eje vertical, en donde  $\alpha$  es el coeficiente de absorción del material. El valor del exponente  $r$  denota la naturaleza de la transición, por ejemplo  $r = 0.5$  es para transiciones indirectas en semiconductores cristalinos. El gráfico de Tauc tiene un régimen lineal distintivo el cual muestra el principio de la absorción. Así, extrapolando esta región lineal al eje x se obtiene la energía del band gap óptico del material. En la Figura 3-8 se puede ver que  $E_g$  cambia hacia energías más bajas conforme la temperatura de depósito se incrementa. Este cambio puede

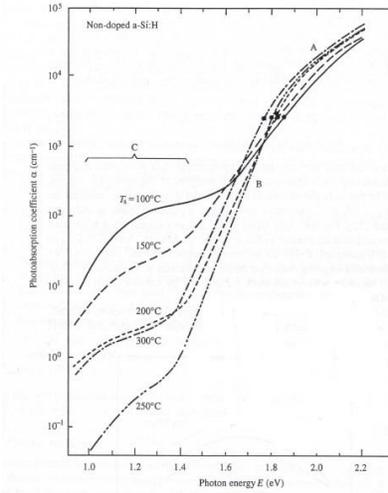
estar correlacionado con la disminución en el contenido de hidrógeno enlazado de la película [5]. La región B se conoce como la región de Urbach y tiene una forma exponencial dada por la ecuación 3.4

$$\alpha(h\nu) = \alpha_g \exp \left[ \frac{h\nu - E_g}{E_0} \right] \quad 3.4$$

En donde  $E_0$  es llamada la energía de Urbach. Esta región se puede describir en términos de una transición entre un estado de cola de banda y una banda extendida. La región C puede ser atribuida a transiciones ópticas involucrando defectos estructurales.

Los valores de transmitancia están entre 0 y valores cercanos a la unidad ( $0 \leq T < 1$ ). Como se puede apreciar en la Figura 3-7, la transmitancia es el cociente entre la intensidad transmitida y la de la fuente, lógicamente hay pérdidas debido a la luz que se absorbe en la película y en el sustrato (se busca que el sustrato absorba lo menos posible). También hay pérdidas por reflexiones ocurridas en las interfaces aire – vidrio, vidrio – aire. No es común que los valores de transmitancia en sus máximos alcancen la unidad, la transmisión máxima se puede aproximar como lo muestra la ecuación 3.5

$$T_M \approx (1 - R)^2 \quad 3.5$$

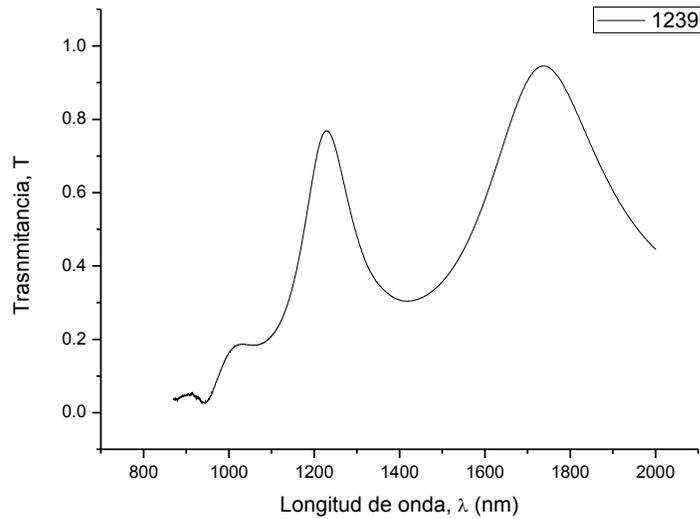


**Figura 3-8. Espectro de absorción de luz de a-Si:H no dopado preparado a diferentes temperaturas de sustrato [5].**

Siendo  $R$  el término de reflectancia o coeficiente de reflexión, dado por el índice de refracción del sustrato y del medio que lo rodea como se muestra en la ecuación 3.6.

$$R = \left( \frac{n_s - n_{medio}}{n_s + n_{medio}} \right)^2 \quad 3.6$$

Como ejemplo, el Corning 1737 tiene el índice de refracción en un rango entre 1.5023 y 1.5247 entre las longitudes de onda 1541 nm y 435.8 nm respectivamente. El índice del medio circundante, que para este caso es aire tiene el valor de 1, así  $T_M$  tendrá los valores entre 0.9155 y 0.9210.



**Figura 3-9. Gráfico real de Transmitancia (pm-SiGe:H) en el rango de infrarrojo cercano (NIR), proceso 1239 del presente trabajo.**

La Figura 3-9 muestra la transmitancia perteneciente a una película de silicio-germanio polimorfo hidrogenado. Se puede ver en la figura que la absorción es fuerte a menores longitudes de onda y se va haciendo débil a medida que la longitud de onda incrementa. Los máximos corresponden a transmisión máxima.

### **3.4 Propiedades de transporte de las películas de semiconductores amorfos**

La conductividad eléctrica es una de las propiedades más importantes que poseen los materiales semiconductores dentro de los muchos fenómenos electrónicos que resultan de su estructura. Antes de concentrarnos en la conductividad se hará referencia a algunos tópicos que también están comprendidos dentro de lo que es el transporte electrónico. Entre los tópicos que se pretende abordar están la movilidad y tiempo de vida de los portadores.

### 3.4.1 Movilidad

Es la velocidad promedio de arrastre por unidad de campo eléctrico aplicado. Si  $\mu_d$  es la movilidad, entonces la ecuación de definición es  $\langle v_d \rangle = \mu_d E$ , donde  $\langle v_d \rangle$  es la velocidad promedio de arrastre y  $E$  es el campo. Hay que decir que  $\mu_d = \frac{e\tau}{m_e}$ , en donde  $m_e$  corresponde a la masa del electrón y  $e$  es la carga del electrón. La última ecuación relaciona a la movilidad de arrastre de los electrones con su tiempo medio de dispersión y este  $\tau$  que también puede ser llamado tiempo de relajación se relaciona con procesos microscópicos que causan la dispersión de electrones en el material, es decir, vibraciones en la red, imperfecciones cuando el material es un cristal e impurezas [18], y finalmente se debe decir que la movilidad depende de la temperatura y del dopaje.

La movilidad se obtiene de mediciones de tiempo de vuelo. La movilidad de arrastre alrededor de la temperatura ambiente en a-Si:H es del orden de  $1 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  para electrones y  $(10^{-3} - 10^{-2}) \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  para huecos [5].

La movilidad de arrastre depende de la distribución de trampas y de la movilidad libre. La movilidad de arrastre en un material con trampas, según la ecuación 3.7 es

$$\mu_D = \frac{\mu_0}{1 + f_{trap}} \quad 3.7$$

En donde  $f_{trap}$  es la razón del tiempo que el portador permanece en trampas localizadas entre el tiempo que tarda en estados móviles y  $\mu_0$  es la movilidad del portador en  $E_C$ .

### 3.4.2 Conductividad y su relación con la densidad de estados

La conductividad es el producto de la densidad de portadores y la movilidad como lo muestra la ecuación 3.8.

$$\sigma = ne\mu \quad 3.8$$

En el caso en que la conducción tome lugar lejos de  $E_f$  y sólo esté involucrado un solo tipo de portador, se tiene la siguiente ecuación:

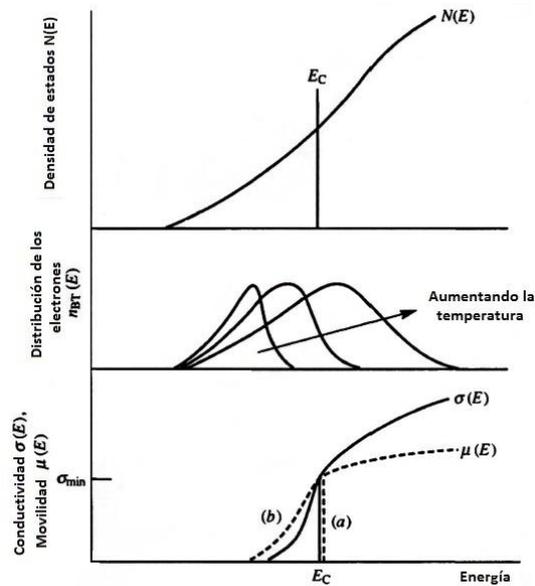
$$\sigma(E) = N(E)e\mu(E)kT \quad 3.9$$

$\sigma(E)$  es la conductividad cuando  $E_f = E$ , donde  $E_f$  es la energía de Fermi la cual se define como el nivel de energía “hipotético” de un electrón, tal que en equilibrio termodinámico este nivel de energía tendría una probabilidad del 50% de ocuparse en un tiempo dado.

La conducción dominante es determinada por la densidad de estados y la movilidad del portador y se ilustran en la Figura 3-10, para estados cerca al borde de la banda.

$\sigma(E)$  tiene la forma mostrada en la Figura 3-10, incrementa monotónicamente con la energía. Si  $\sigma(E)$  incrementa abruptamente de cero a un valor finito  $\sigma_{min}$  en  $E_c$ , entonces la evaluación de la ecuación 3.10 produce la siguiente ecuación.

$$\sigma = \sigma_{min} \exp \left[ \frac{-(E_c - E_f)}{kT} \right] \quad 3.10$$



**Figura 3-10. Ilustración de la densidad de estados en el borde de banda, junto con la distribución de los electrones  $n_{BT}(E)$ , la conductividad  $\sigma(E)$  y movilidad  $\mu(E)$ :  $\sigma(E)$  y  $\mu(E)$  pueden cambiar abruptamente (a) o gradualmente (b) en el borde de movilidad  $E_c$ .**

$\sigma_{min}$  se conoce como la conductividad metálica mínima y es dada por la ecuación 3.11.

$$\sigma_{min} = N(E_c)e\mu_0kT \quad 3.11$$

Siendo  $\mu_0$  la movilidad del portador en  $E_c$ .

### 3.4.3 Caracterización de la dependencia de conductividad con temperatura en oscuridad

La conductividad  $\sigma(T)$  en las películas amorfas tiene en general una dependencia con la temperatura alrededor de la temperatura ambiente, que se basa en el transporte en la vecindad del borde de movilidad, como se expresa en la ecuación 3.12

$$\sigma(T) = \sigma_0^* \exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right) \quad 3.12$$

$\sigma_0^*$  y  $E_a$  corresponden a el prefactor de la conductividad y la energía de activación respectivamente. Las ecuaciones 3.13 y 3.14 muestran las expresiones para  $\sigma_0^*$  y  $E_a$ .

$$\sigma_0^* = \sigma_0 \exp \left[ \frac{\gamma_F + \gamma_G + \gamma_T}{k} \right] \quad 3.13$$

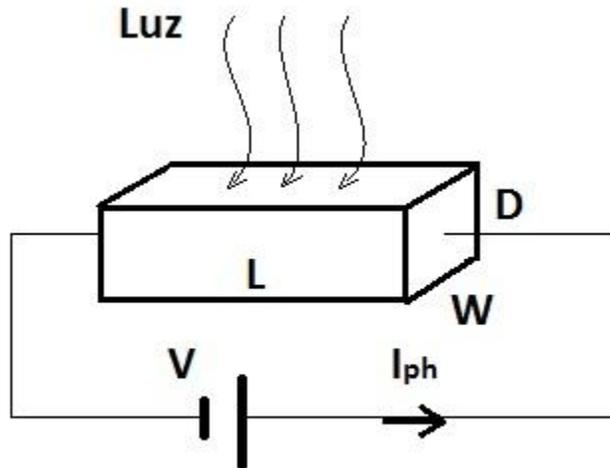
Y

$$E_a = (E_C - E_F)_{T \rightarrow 0} \quad 3.14$$

En la ecuación 3.13 los tres parámetros en la exponencial son factores de proporcionalidad para un nivel de Fermi asumido ( $\gamma_F$ ), el intervalo de energía relativo entre el nivel de transporte y el nivel de Fermi ( $\gamma_G$ ) y la energía de transporte ( $\gamma_T$ ), como funciones lineales de la temperatura. La dependencia con la temperatura del nivel de Fermi siempre existe a no ser que la densidad de estados sea simétrica a través de este nivel o que la densidad de estados esté fijada en niveles localizados de alta densidad [16]. La ecuación 3.14 sugiere que la energía de activación de la conductividad  $E_a$ , corresponde a la posición del nivel de Fermi extrapolando a  $T=0$ .

### 3.5 Fotoconductividad

Por definición la fotoconductividad es el cambio que se da al pasar de conductividad en oscuro a conductividad con iluminación,  $\sigma_{light} - \sigma_{dark}$  [18]. La fotoconductividad ocurre cuando los portadores son ópticamente excitados de estados no conductores a conductores. La Figura 3-11 será de mucha ayuda para



**Figura 3-11.** Un bloque semiconductor de longitud  $L$ , ancho  $W$  y profundidad  $D$  es iluminado.  $I_{ph}$  es la fotocorriente.

explicar mejor lo que es la fotoconductividad. En la figura, el bloque o rebanada de material semiconductor se ilumina con luz de intensidad  $I(\lambda)$  y longitud de onda  $\lambda$  y debido a ello habrá fotogeneración. El área de iluminación es  $A = L \times W$  y el grosor es  $D$ . En este tipo de pruebas se debe tener en cuenta la eficiencia cuántica  $\eta$ , que corresponde al número de pares electrón–huevo generados por fotón absorbido. Otro valor a tener en cuenta es el tiempo de vida de recombinación de los portadores fotogenerados  $\tau$ .

Al inicio de esta sección fue escrito que la fotoconductividad podría representarse como en la ecuación 3.15

$$\sigma_{ph} = \sigma_{light} - \sigma_{dark} \quad 3.15$$

Esta forma de expresar a la fotoconductividad no muestra mucha información y se tratará de dar explicación por pasos hasta llegar a una ecuación que describa la fotoconductividad de una mejor manera.

Se comienza por tener en cuenta el flujo de fotones  $\Gamma_{ph}$ , como lo muestra la ecuación 3.16

$$\Gamma_{ph} = \frac{I}{h\nu} \quad 3.16$$

En donde  $I$  es la intensidad de luz y  $h\nu$  es la energía por fotón. Ahora se determinará la razón de fotogeneración por unidad de volumen  $G_{ph}$ , para el caso en que todos los fotones son absorbidos y cuya expresión es dada en la ecuación 3.17

$$G_{ph} = \frac{\eta A \Gamma_{ph}}{AD} = \frac{\eta I}{h\nu D} = \frac{\eta I \lambda}{hcD} \quad 3.17$$

En donde  $c$  es la velocidad de la luz. El paso siguiente es considerar el balance que se muestra en la siguiente ecuación 3.18

$$\frac{d\Delta n}{dt} = G_{ph} - \frac{\Delta n}{\tau} = 0 \quad 3.18$$

El término  $\frac{\Delta n}{\tau}$  en la ecuación anterior corresponde a la recombinación al suponer que es proporcional a  $\Delta n$  de una forma lineal, pero realmente puede depender cuadráticamente de  $\Delta n$  o incluso ser función de la generación de portadores, así el presente ejemplo ha sido mostrado en su caso más simple.

Esta última ecuación es equivalente a tener la ecuación 3.19

$$\Delta n = \tau G_{ph} = \frac{\tau \eta I \lambda}{hcD} \quad 3.19$$

El paso siguiente es considerar la conductividad, como se muestra en la ecuación 3.20

$$\sigma_{dark} = en\mu_e + ep\mu_h \quad 3.20$$

La ecuación 3.20 es válida para todos los semiconductores,  $n$  y  $p$  son las concentraciones de electrones y huecos en banda de conducción y banda de valencia respectivamente. Debido a que en la ecuación 3.19 se tiene  $\Delta n$  es

pertinente que en la ecuación 3.20 también se tenga  $\Delta n$ , lo cual produce que se tenga un  $\Delta\sigma$ , como es mostrado en la ecuación 3.21

$$\Delta\sigma = e\Delta n(\mu_e + \mu_h) \quad 3.21$$

En pruebas de iluminación como la que describe la Figura 3-11, electrones y huecos se generan en pares, es decir,  $\Delta n = \Delta p$  [18]. Se sustituye por tanto  $\Delta n$  de la ecuación 3.19 en la ecuación 3.21 resultando en la ecuación 3.22

$$\sigma_{ph} = \Delta\sigma = \frac{e\eta I\lambda\tau(\mu_e + \mu_h)}{hcD} \quad 3.22$$

En donde  $e$  es la carga del electrón,  $\eta$  es la eficiencia cuántica e  $I$  es la intensidad de luz.  $\mu_e, \mu_h$  Corresponden a las movilidades de electrón y hueco respectivamente,  $\tau$  es el tiempo de vida de recombinación de los portadores fotogenerados y que puede ser más complejo al tener en cuenta a los portadores involucrados, y  $D$  es el grosor de la muestra. Finalmente como ya había sido mencionado con anterioridad,  $\lambda$  corresponde a la longitud de onda,  $c$  es la velocidad de la luz y  $h$  es la constante de Planck.

### **3.6 Caracterización por Espectroscopía infrarroja por medio de la transformada de Fourier (FTIR)**

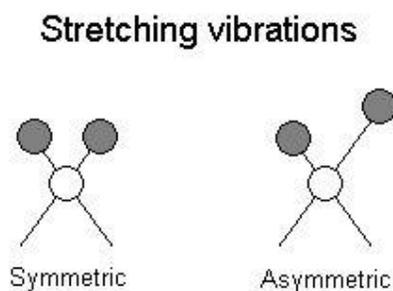
La espectroscopía infrarroja por medio de la transformada de Fourier (*Fourier Transform Infra Red - FTIR*) es una técnica que permite la determinación de enlaces químicos. Antes de proseguir hay que recordar que en un sólido los átomos constituyentes se mantienen juntos por enlaces los cuales se pueden modelar como resortes. Según la teoría cinética molecular, los átomos en un sólido están en constante vibración alrededor de sus posiciones de equilibrio estirando y comprimiendo sus resortes. Tales oscilaciones son asumidas como armónicos simples de forma que la energía cinética y la potencial promedio sean las mismas [18].

A temperaturas mayores al cero absoluto, los osciladores armónicos que conforman una molécula están vibrando. En el mismo rango de frecuencias en que

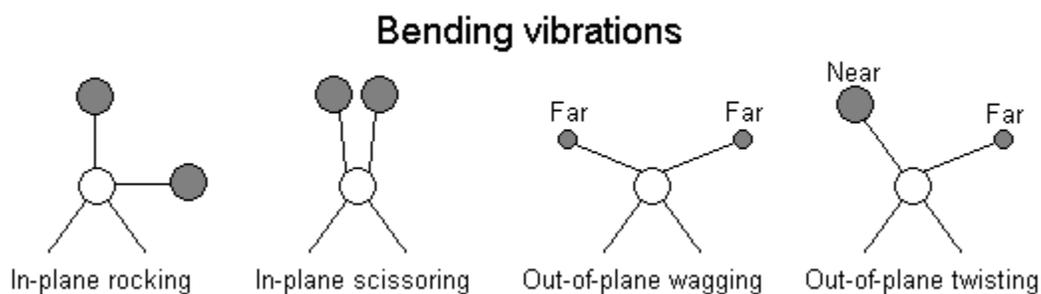
la molécula vibra se encuentra la luz infrarroja. La absorción de la luz infrarroja afecta a los modos “*stretching*” y “*bending*” de los enlaces de átomos. El modo de vibración “*stretching*” se refiere al cambio en la distancia interatómica a lo largo del eje del enlace y en la Figura 3-12 se esbozan dos vibraciones “*stretching*”. El modo de vibración “*bending*” se refiere al cambio del ángulo entre dos enlaces y en la Figura 3-13 se muestran cuatro tipos de vibraciones “*bending*”.

La absorción de la luz infrarroja por parte de una molécula requiere que el enlace a estimular posea un momento dipolar (el momento dipolar se define como el producto de la carga por la distancia de separación). Para que un modo de vibración en una molécula se active debido a la radiación infrarroja, una vibración debe causar un cambio en el momento dipolar de la misma.

La radiación infrarroja no tiene suficiente energía para inducir transiciones electrónicas como es visto con UV [19]. La absorción de IR se restringe a compuestos con pequeñas diferencias de energía en los posibles estados vibracionales y rotacionales. El campo eléctrico alternante de la radiación interactúa con fluctuaciones en el momento dipolar de la molécula. Si la frecuencia de la radiación se acopla a la frecuencia vibracional de la molécula entonces la radiación se absorbe (como fue dicho antes), causando un cambio en la amplitud de la vibración molecular.



**Figura 3-12. Vibraciones Stretching (tomado de [19]).**

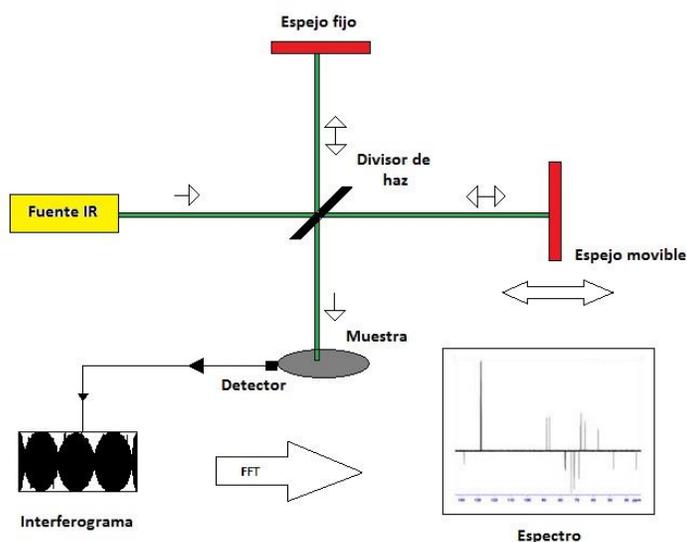


**Figura 3-13. Vibraciones Bending (tomado de [19]).**

Ahora, el número de onda para el cual una molécula absorberá luz se determina por la constante de fuerza de enlace químico y la masa de los átomos, para el caso de una molécula diatómica la ecuación 3.23 describe la situación anterior [13].

$$k = \frac{1}{2\pi C} \sqrt{\frac{(m_1 + m_2)F}{m_1 m_2}} \quad 3.23$$

$k$  es el número de onda en ( $cm^{-1}$ ),  $F$  es la constante de fuerza del enlace en ( $\frac{dinas}{cm}$ ),  $C$  es la velocidad de la luz en ( $\frac{cm}{s}$ ) y  $m_1, m_2$  son las masas de los átomos que conforman la molécula.



**Figura 3-14. Interferómetro de Michelson adaptado como espectrómetro de Transformada de Fourier.**

La Figura 3-14 ilustra la operación de un espectrómetro de transformada de Fourier, el espectrómetro FTIR trabaja de la siguiente manera: La luz infrarroja va de la fuente de radiación a un divisor de haz que está puesto a un ángulo de 45 grados. Parte de la luz atraviesa el divisor de haz hacia un espejo móvil y parte se refleja en ángulo de 90 grados hacia un espejo fijo. En los espejos la luz se refleja y se recombina en el divisor de haz generando un interferograma debido a la interferencia de la luz. Entonces la luz que resulta de la interferencia es guiada a la muestra y registrada por el detector. Un interferograma se da en el dominio del tiempo. Para que se pueda detectar y analizar la absorción como función de la frecuencia, se debe pasar del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. La conversión es posible con la transformada de Fourier. Después se puede trazar un espectro de transmitancia o absorbancia, el cual muestra las longitudes de onda en que la muestra absorbe IR y permite descubrir los enlaces presentes.

### **3.7 Microscopía de Fuerza Atómica AFM**

A continuación se explicarán los parámetros que serán de gran utilidad en la determinación de la morfología de las películas.

#### **3.7.1 Función de distribución de altura superficial**

El significado de la función de distribución de altura  $p(h)$  es que la probabilidad de que una altura entre  $h$  y  $h + dh$  en cualquier punto en la superficie sea  $p(h)dh$ . La distribución  $p(h)$  está normalizada y se muestra en la ecuación 3.24

$$\int_{-\infty}^{+\infty} p(h)dh = 1 \quad 3.24$$

Esta función de distribución provee una completa especificación de  $h(r)$  en una posición  $r$ . La distribución más usada es la Gaussiana y es mostrada en la ecuación 3.25

$$p(h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\omega}} \exp\left(-\frac{h^2}{2\omega^2}\right) \quad 3.25$$

Donde  $\omega$  se da en unidades de longitud y depende de la técnica utilizada para la determinación de los parámetros de rugosidad.

### 3.7.2 Rugosidad RMS

También conocido como momento de orden 2 se muestra en la ecuación 3.26

$$R_q = \omega^2 = m_2 = \int_{-\infty}^{+\infty} h^2 p(h) dh \quad 3.26$$

Donde  $R_q$  es la rugosidad RMS o el ancho de la interfaz. En este caso es igual a la desviación estándar ya que  $\bar{h} = m_1 = 0$ .  $R_q$  describe las fluctuaciones de alturas de superficie alrededor de una altura superficial media. Generalmente a medida que  $R_q$  se hace más grande, más rugosa es la superficie en tanto que los demás parámetros de rugosidad no cambien.

### 3.7.3 Rugosidad media

Se define como el promedio aritmético de  $h$  y su ecuación es la 3.27

$$R_a = \int_{-\infty}^{+\infty} |h - \bar{h}| p(h) dh \quad 3.27$$

Para una misma distribución de altura  $R_a \propto R_q$ . Tomando como ejemplo la distribución de altura Gaussiana  $R_a = R_q \sqrt{\frac{2}{\pi}}$ .

Con  $\bar{h}$  y  $R_q$  es suficiente para caracterizar la rugosidad superficial para la mayoría de casos.

### 3.7.4 La asimetría (“Skewness”)

Este parámetro define la “falta de simetría” de la altura superficial, su símbolo es  $\gamma_3$  y se muestra en la ecuación 3.28

$$\gamma_3 = \frac{1}{\omega^3} \int_{-\infty}^{+\infty} h^3 p(h) dh \quad 3.28$$

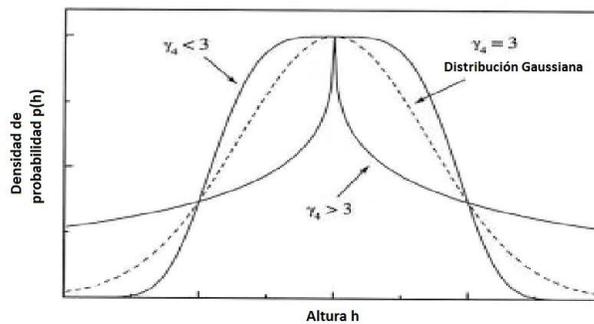
El valor de Skewness es adimensional. Es una medida de la simetría de una distribución alrededor de un nivel superficial medio. Si su signo es positivo, significa que los puntos más lejanos se encuentran hacia arriba del nivel superficial medio y si el signo de “skewness” es negativo, entonces dichos puntos se encuentran hacia abajo del nivel medio.

### 3.7.5 Curtosis

Se le conoce como momento de cuarto orden y define la curtosis de la altura superficial ( $\gamma_4$ ), su fórmula matemática se da a continuación:

$$\gamma_4 = \frac{1}{\omega^4} \int_{-\infty}^{+\infty} h^4 p(h) dh \quad 3.29$$

La curtosis es adimensional. Es una medida de la agudeza de la función de distribución de altura. La curtosis describe la aleatoriedad del perfil superficial relativa a aquella de una superficie de distribución Gaussiana, la cual posee una curtosis de 3.0. Para  $\gamma_4 < 3$ , la distribución presenta picos suaves, y para  $\gamma_4 > 3$  la distribución presenta picos agudos, como es mostrado en la Figura 3-15.



**Figura 3-15. Funciones de distribución de altura superficial con diferentes valores de curtosis.**

### 3.7.6 Longitud de correlación lateral

O simplemente conocida como longitud de correlación,  $\xi$ , se define como el valor de la longitud de desfase a la cual la función de autocorrelación cae a  $1/e$  de su valor a desfase 0 y que se muestra en la ecuación 3.30

$$R(\xi) = \frac{1}{e} \quad 3.30$$

Donde  $\xi$  define una dimensión lateral representativa de una superficie rugosa. Cuando la distancia entre dos puntos en la superficie es igual o menor a  $\xi$ , las alturas en estos dos puntos se consideran correlacionadas. Pero si tal separación es mucho mayor que  $\xi$ , entonces es posible afirmar que las alturas en tales puntos son independientes una de otra.

### 3.8 Silicio polimorfo hidrogenado

En 1988 se publicó el primer reporte sobre silicio polimorfo hidrogenado pm-Si:H [20]. Roca i Cabarrocas et al. reportaron que la estructura de las películas de silicio puede consistir de regiones ordenadas de tamaño nanométrico de aproximadamente 2 nm en una matriz desordenada cuando era preparada bajo condiciones particulares de descarga lumínica de RF. Tal condición se da en la transición entre a-Si:H a  $\mu$ c-Si:H. La transición entre los dos regímenes de descarga lumínica fue controlada por incrementar la presión del proceso a un voltaje de RF constante, después de lo cual un abrupto incremento en la disociación y una reducción en  $V_{dc}$  se observó, un fenómeno cual ha sido correlacionado con la aparición de formación de polvos en la descarga [21].

La microscopía electrónica de transmisión de alta resolución HRTEM revela que un número de dominios ordenados de unos pocos nanómetros nm están embebidos en la matriz a-Si:H. Los correspondientes patrones de difracción de electrones verifican que las regiones ordenadas son nanocristales. Absorción infrarroja en el modo “*stretching*” Si-H en pm-Si:H se caracteriza por la presencia de una banda en  $2030 \text{ cm}^{-1}$ , mostrando que la microestructura en pm-Si:H ha sido considerablemente modificada con respecto a a-Si:H. La concentración de

pequeños cristallitos es aproximadamente menor que 10% [22]. Mediciones por elipsometría espectroscópica demostraron que películas de pm-Si:H son más densas que a-Si:H, a pesar de su alto contenido de hidrógeno, en el rango de 15 a 20%. Esta estructura de pm-Si:H resulta en una baja densidad de defectos (por debajo de  $10^{14} \text{cm}^{-3}$  al nivel de Fermi como fue medido por corriente limitada por carga espacial SCLC y fotocorriente modulada) y mayor resistencia a la absorción de luz (light soaking) que a-Si:H [23].

Películas delgadas de a-Si:H fabricadas por PECVD se han utilizado en la industria fotovoltaica porque se ha considerado que tienen un aceptable coeficiente de absorción y un bajo costo de producción comparado con materiales cristalinos [24]. Una desventaja del a-Si:H es su degradación inducida por luz [25]. Con películas de  $\mu\text{c} - \text{Si}$  obtenidas por la misma técnica PECVD se encuentran mejores propiedades de transporte de portadores de carga y estabilidad a la exposición prolongada a la radiación solar [26], pero las películas de  $\mu\text{c} - \text{Si}$  tienen menor absorción que las películas de a-Si:H [27]. Sabiendo lo anterior se busca pues tener un material que posea las propiedades ópticas del a-Si:H a la vez que las propiedades de transporte como la del  $\mu\text{c} - \text{Si}$ . Para obtener un material como el que se pretende, se han obtenido en PECVD y con el uso de  $\text{SiH}_4$  como gas precursor de silicio en altas diluciones de hidrógeno, nuevos materiales constituidos por una matriz de silicio amorfo con inclusiones nanométricas de silicio cristalino embebidas. A estos materiales se les ha denominado como silicio nanocristalino nc-Si:H o silicio polimorfo pm-Si:H [28]. Se les dice polimorfo por el hecho de tener una mezcla de fases amorfa, nanocristalina y cristalina. Con este material se mejoran las propiedades de transporte con respecto a a-Si:H, incluso después de prolongada exposición a la radiación solar [29].

### **3.9 Sustratos Plásticos**

Los sustratos usados en el presente trabajo son: Dupont Teijin Teonex Q51, que en adelante se encontrará en el texto nombrado como PEN (Polietileno Naftalato). Dupont Kapton Polyimide y Dupont Teflon PTFE (Politetrafluoroetileno). Algunas características que deben poseer los sustratos, los cuales deben ser compatibles

con el proceso de manufactura, deben tener alta estabilidad térmica de forma que conserven su forma. Su constante dieléctrica en lo posible debe ser uniforme e isotrópica y que además tenga una baja magnitud de forma que permita baja retención de carga. Deben tener una alta resistividad química. En lo posible sus superficies deben estar libres de defectos. Algo deseable es que posean buena adhesión con conductores y también que pudiesen ser de bajo costo.

Dupont Kapton Polyimide es un polímero muy resistente al calor. Se ha usado ya como dieléctrico y como fotoresina. Polyimide ha encontrado aplicaciones en el campo aeroespacial, defensa, optoelectrónica y también se usa en dispositivos electroluminiscentes. Es posible decir para este material que posee buenas propiedades eléctricas, buena resistencia mecánica y es resistente a los solventes. Es un polímero estable hasta una temperatura de 440°C en una atmósfera de nitrógeno.

Dupont Teijin Teonex Q51 es un plástico con una alta temperatura de transición vítrea y permeabilidad al agua. Ha encontrado uso en aplicaciones de radiografía digital, pantallas para telefonía celular, dentro de la industria automovilística en tableros y stops y también en celdas solares que van en prendas de vestir. Los plásticos permiten libertad de diseño y el PEN tiene otras características como el poder someterse a múltiples ciclos térmicos hasta 200°C, ciclos de vacío hasta  $1 \times 10^{-8}$  Torr, ser expuestos a solventes como acetona, ser usados en procesos de plasma con varios químicos como  $O_2, O_3, Cl, NH_3, H_2$ . Es preferible que el PEN sea usado a temperaturas menores que 240 °C.

Dupont Teflon PTFE es resistente químicamente, resiste a casi todos los productos agresivos, posee una temperatura de trabajo en el rango -200 - +260°C, no lo afecta estar al aire libre, ni la exposición al sol y no absorbe humedad.

## 4 Trabajo experimental

### 4.1 Introducción

El trabajo experimental que se presenta en este capítulo describe la fabricación y caracterización de las películas de a-SiGe:H y pm-SiGe:H preparadas por el método PECVD.

La sección 4.2 está dedicada a explicar el sistema de depósito que se usó. La sección 4.3 muestra cuales fueron las condiciones anteriores al depósito. En la sección 4.4 se especifican los requisitos de depósito y cómo los sustratos fueron preparados. La sección 4.5 presenta algunos métodos de caracterización aplicados a las películas fabricadas, entre los cuales se tiene espectroscopía infrarroja por la transformada de Fourier (FTIR) para analizar los enlaces de hidrógeno en las películas. También en este capítulo se trata sobre las mediciones de la dependencia de la conductividad con temperatura con la cual es posible determinar la energía de activación  $E_a$ . La caracterización de la rugosidad por medio de microscopía de fuerza atómica (AFM) será vista hacia el final. En la penúltima subsección se muestra la caracterización por transmitancia que permite obtener los valores del band gap óptico y energía de Urbach y por último se estudiará la caracterización por fotoconductividad.

### 4.2 Sistema de depósito

El depósito de las películas se realizó en un PECVD de baja frecuencia comercial de la empresa *Applied Materials*, modelo AMP 3300. El sistema se compone de varios subsistemas. El reactor es la parte central donde las moléculas se disocian y los productos se depositan sobre sustratos calentados para formar una capa. El reactor tiene una configuración de electrodos tipo capacitor con diámetro de placa de 66 cm y distancia de separación de 5 cm. La potencia para el reactor se da por medio de una fuente de RF conectada a través de la red de acoplamiento. La fuente de RF opera en el rango de frecuencias 90 a 460 KHz con error de 0.1% y el rango de potencia está entre 0 y 500 W. Las muestras se cargan en el electrodo inferior, que puede calentarse hasta 400°C. La temperatura se suministra por un

calentador de 3 zonas. El sistema de control de gases incluye controladores de flujo de masa. El sistema de vacío lo compone la bomba mecánica y el controlador de presión. La presión de depósito puede ser controlada de 0.3 a 4 Torr. En la sección 3.1 se mostró en la Figura 3-1 una representación esquemática de un sistema PECVD, ahora una vista esquemática del sistema utilizado se muestra en la Figura 4-1.

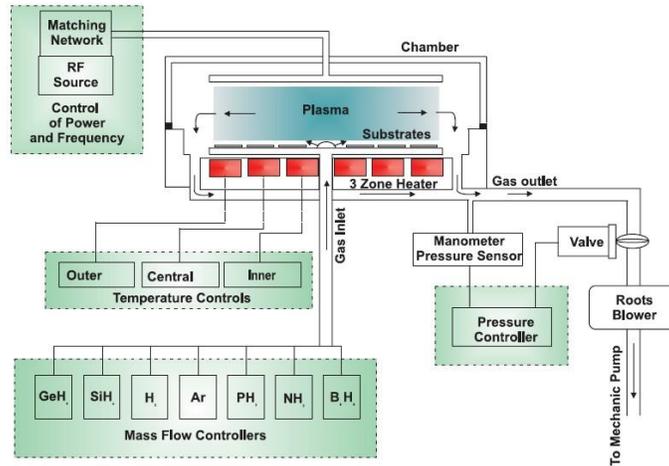


Figura 4-1. Representación esquemática del reactor utilizado en este trabajo (tomada de [13]).

### 4.3 Condiciones de Pre-Depósito PECVD.

- 1) Limpieza de la cámara del sistema PECVD con propanol.
- 2) Antes de comenzar cada depósito se midió la fuga de la cámara  $R_{leak}$ , ver Tabla 4-1.

La fuga es determinada a través de la ecuación 4.1.

$$R_{leak} = \frac{\Delta P V_{cam}}{\Delta T} \quad 4.1$$

$$\Delta P = P_2 - P_1 \quad 4.2$$

En donde  $\Delta P$  es la diferencia de presiones tomadas a diferentes tiempos.  $\Delta T$  es igual al tiempo que separa los momentos en que se registran las presiones en la cámara  $P_2$  y  $P_1$ , en segundos. El Volúmen de la cámara  $V_{cam}$  es igual a 30.265 L. La Tabla 4-1 muestra los valores de fuga para ocho diferentes procesos de depósitos de películas los cuales serán mejor explicados más adelante en el texto.

**Tabla 4-1. Fuga en la cámara medida antes de cada proceso.**

Proceso	Fuga $R_{leak} \left[ \frac{Torr \times L}{s} \right]$	Fuga $R_{leak}$ [sccm]
1235	$5.04 \times 10^{-4}$	$3.9 \times 10^{-2}$
1236	$1.85 \times 10^{-3}$	$1.5 \times 10^{-1}$
1237	$1.01 \times 10^{-3}$	$8.0 \times 10^{-2}$
1238	$1.68 \times 10^{-3}$	$1.3 \times 10^{-1}$
1239	$5.04 \times 10^{-4}$	$3.9 \times 10^{-2}$
1240	$6.73 \times 10^{-4}$	$5.3 \times 10^{-2}$
1241	$1.01 \times 10^{-3}$	$8.0 \times 10^{-2}$
1242	$1.35 \times 10^{-3}$	$1.1 \times 10^{-1}$
Valor óptimo	$5.04 \times 10^{-4}$	$3.9 \times 10^{-2}$

Antes de cada depósito se realizó un tratamiento de plasma de Argón en los sustratos para mejorar la adherencia de las películas depositadas sobre los sustratos flexibles (en particular en teflón). Este proceso se basó en un procedimiento desarrollado con anterioridad en un trabajo en el laboratorio de microelectrónica [30]. Los parámetros para realizar el plasma de Argón son:

- Flujo de Argón de 300 sccm (centímetros cúbicos estándar por minuto).

- La temperatura fue la temperatura correspondiente al depósito (80, 120, 160 o 200 °C).
- Presión = 300 mTorr.
- Potencia = 250 W.
- Tiempo = 4 minutos.
- Frecuencia = 110 KHz.

#### **4.4 Preparación de los sustratos y condiciones de depósito**

Para cada proceso de depósito se utilizaron los siguientes sustratos:

##### **Para medir conductividad eléctrica y obtener la energía de activación $E_a$ :**

- 1 Corning glass (2947) con Electrodo de Ti
- 2 sustratos de PEN DuPont Teijin TEONEX Q51 con electrodos de Ti
- 2 sustratos de teflón DuPont PTFE con electrodos de Ti
- 1 sustrato de Polyimide DuPont Kapton con electrodos de Ti

##### **Para caracterizar la rugosidad por medio de microscopía de fuerza atómica AFM :**

- 1 Corning glass (1737)
- 2 sustratos de PEN DuPont Teijin TEONEX Q51
- 2 sustratos de teflón DuPont PTFE
- 1 sustrato de polyimide DuPont Kapton

##### **Para conocer los tipos de enlaces presentes por medio de FTIR:**

- 1 sustrato de silicio <100> tipo P de resistividad (**5.4  $\Omega$  cm**).

##### **Para mediciones de transmitancia y obtención de band gap:**

- 1 sustrato corning glass (1737)

## **Las limpiezas de los diferentes sustratos consistieron en:**

### **Limpieza de Corning glass:**

- 1) 10 minutos en Tricloroetileno, en sistema ultrasónico.
- 2) 10 minutos en Acetona, en sistema ultrasónico.
- 3) Enjuague con agua desionizada y secado.

### **Limpieza de obleas:**

- 1) 10 minutos en Tricloroetileno, en sistema ultrasónico.
- 2) 10 minutos en Acetona, en sistema ultrasónico.
- 3) Solución 7:1. (Agua desionizada H<sub>2</sub>O, Acido Fluorhídrico HF, Fluoruro de Amonio NH<sub>4</sub>F).
- 4) Enjuague con Isopropanol y secado.

### **Limpieza de PEN y polyimide:**

- 1) Solución 7:1. (Agua desionizada H<sub>2</sub>O, Acido Fluorhídrico HF, Fluoruro de Amonio NH<sub>4</sub>F). La muestra se introducía 3 veces y en cada ocasión con un movimiento de la mano agitando la muestra pero sin tenerla mucho tiempo inmersa (5 segundos aproximadamente).
- 2) Enjuague con agua desionizada y secado.

## **Evaporación de electrodos de Titanio en los diferentes sustratos:**

Grosor de 3000 Å.

Antes de empezar los procesos de depósito, se hizo un depósito de a-Si:H intrínseco de 1 hora en la cámara de vacío sin muestras.

La Tabla 4-2 corresponde al programa de fabricación de películas de a-SiGe:H. Se ideó para observar qué ocurre cuando la temperatura de depósito es variada, así se tienen cuatro diferentes películas de a-SiGe:H correspondiendo a las temperaturas 80- 120- 160 y 200°C. Este material amorfo ha encontrado cabida en aplicaciones de detección térmica en donde se vio que era adecuado para ser

usado como elemento termosensor en microbolómetros [3.3 – 3.4]. La Tabla 4-3 muestra las condiciones para depositar películas de pm-SiGe:H, el cual no habrá de diferir mucho en cuanto a la estructura del pm-Si:H. Este último formado de una matriz de silicio amorfo con nanocristales ( $\sim 2 - 3 \text{ nm}$ ) que se distribuyen a través del material. Estos nanocristales permiten una reducción en la densidad de estados y mejora las propiedades de transporte y la estabilidad de las películas [3.5 – 3.8], para este material se tienen las mismas temperaturas que aplican en la Tabla 4-2 para el a-SiGe:H. Para los dos tipos de películas la razón silano a germano es igual ( $\frac{SiH_4}{GeH_4} = 1$ ). Entre ambos materiales se observa que la presión en la cámara es mayor al depositar pm-SiGe:H que cuando se deposita a-SiGe:H. Ambas películas tienen dilución de  $H_2$  y para el material amorfo el flujo es mayor si le comparamos a aquel de pm-SiGe:H. Estas diferencias específicas en los parámetros de depósito para los dos materiales fabricados en el presente trabajo son bien conocidas y parte del presente programa de fabricación fue tomado en base a resultados obtenidos en trabajos anteriores en el INAOE [34, 35]. Mario Moreno et al. estudiaron de forma sistemática el efecto de los parámetros de depósito como la temperatura del sustrato, la presión de depósito y las razones de flujo de gas sobre las características eléctricas de pm-Si:H (y otros materiales amorfos [37]) con el objetivo de mejorar las características que importan en detección de IR, como  $E_a$ , TCR,  $\sigma_{RT}$  y la responsividad con radiación IR [36], sirviendo en parte como guía de este trabajo al aprovechar sus resultados y así saber que se fabrican películas con buenas características, al menos para ser usadas como material termosensor, aunque no es el propósito principal de este trabajo.

**Tabla 4-2. Serie 1 - Parámetros del depósito de películas de Silicio-Germanio amorfo: a-SiGe:H**

	proceso	1235	1236	1237	1238
parámetros	unidades				
<b>presión</b>	mTorr	760	760	760	760
<b>potencia</b>	W	300	300	300	300
<b>H<sub>2</sub></b>	sccm	3550	3550	3550	3550
<b>GeH<sub>4</sub> al 10%</b>	sccm	250	250	250	250
<b>SiH<sub>4</sub> al 10 %</b>	sccm	250	250	250	250
<b>Temperatura</b>	°C	80	120	160	200
<b>Tiempo</b>	min	40	40	40	40

**Tabla 4-3. Serie 2 - Parámetros del depósito de películas de Silicio-Germanio polimorfo: pm-SiGe:H**

	proceso	1239	1240	1241	1242
parámetros	unidades				
<b>presión</b>	mTorr	1200	1200	1200	1200
<b>potencia</b>	W	300	300	300	300
<b>H<sub>2</sub></b>	sccm	1100	1100	1100	1100
<b>GeH<sub>4</sub> al 10%</b>	sccm	500	500	500	500
<b>SiH<sub>4</sub> al 10 %</b>	sccm	500	500	500	500
<b>Temperatura</b>	°C	80	120	160	200
<b>Tiempo</b>	min	40	40	40	40

## 4.5 Métodos de Caracterización

Para caracterizar las películas fabricadas se realizarán las siguientes mediciones:

Espectroscopía por la transformada de Fourier (FTIR).

Obtención de curvas de conductividad en función de la temperatura, para obtener la energía de activación de las películas, así como su conductividad a temperatura ambiente.

Caracterización de la rugosidad de la superficie de las películas usando microscopía de fuerza atómica (Atomic Force Microscope – AFM).

Mediciones de Transmitancia para la obtención de la banda prohibida del material.

Mediciones de Fotoconductividad.

### 4.5.1 Medición del grosor de las películas

El grosor de las películas fue determinado con el sistema de medida de perfil superficial (perfilómetro) “DEKTAK V 200 - Si”. Previo a la medición del espesor se realizaron procesos litográficos y de grabado por plasma para hacer patrones geométricos sobre las películas. En la Figura 4-2 se puede apreciar el perfilómetro que fue usado en la medición del grosor.



Figura 4-2. Perfilómetro Dektak V 200-Si usado para la medición del grosor de las películas.

En adelante se hará mención a los sustratos PEN, así como de Teflón1 y Teflón2. El grosor de los sustratos fue medido con un micrómetro digital de la marca *Starrett* modelo 733MEXFL-25 con una resolución de 0.001 mm y una precisión de +/- 0.003 mm. A continuación se muestran los grosores de los sustratos mencionados:

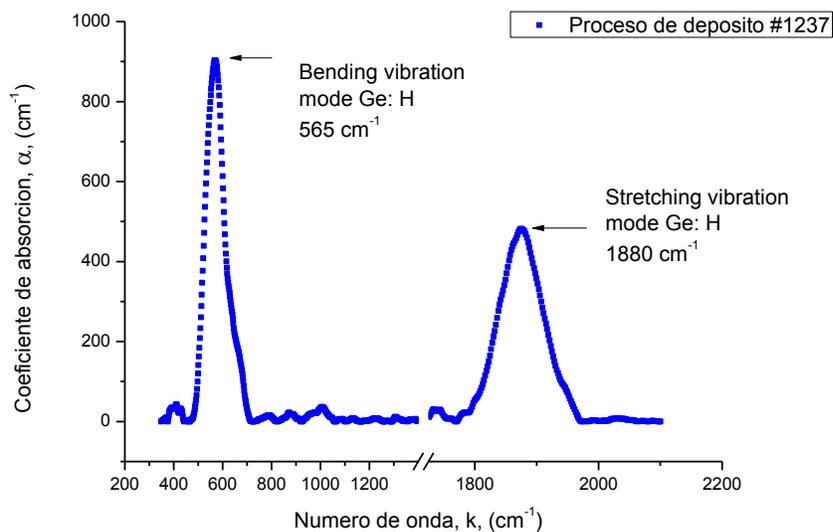
PEN → 0.14 mm +/- 0.02 mm

Teflón1 → 0.406 mm +/- 0.007 mm

Teflón2 → 1.667 mm +/- 0.002 mm

#### 4.5.2 Caracterización por medio de Espectroscopía Infrarroja por medio de la Transformada de Fourier (FTIR)

Con la espectroscopía IR es posible monitorear impurezas como oxígeno en la forma SiO, GeO y determinar la concentración de hidrógeno enlazado con Si y Ge. La información correspondiente a la absorción de IR se presenta en la forma de un espectro con número de onda en el eje X y la intensidad de la absorción sobre el eje Y, como lo muestra la siguiente figura.



**Figura 4-3. Espectro infrarrojo de la película a-SiGe:H del proceso 1237 medido por FTIR.**

En la sección 2.5 hay información detallada sobre los aspectos de la espectroscopía FTIR.

El espectro de absorbancia de las películas fue medido con el equipo FT-IR BRUKER Vector 22MR. El rango cubierto fue desde  $K=400 \text{ cm}^{-1}$  hasta  $2500 \text{ cm}^{-1}$ . Antes de realizar las mediciones el equipo estuvo encendido por 3 horas y en un ambiente de  $N_2$  30 minutos justo antes de comenzar las mediciones. El tiempo para la medición de los espectros fue 5 minutos con resolución de  $5 \text{ cm}^{-1}$ .

La ecuación que relaciona a la absorbancia y al coeficiente de absorción es:

$$\alpha (\text{cm}^{-1}) = -\frac{\ln(1 - A(K))}{t} \quad 4.3$$

En donde  $t$  es el grosor de la película en cm y  $A(K)$  es el valor de absorbancia en unidades arbitrarias.

Para cada medida IR hay 3 regiones principales:

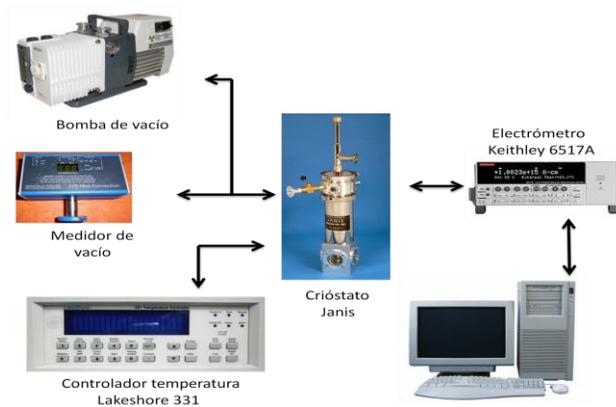
- 1)  $K=400 \text{ cm}^{-1}$  hasta  $700 \text{ cm}^{-1}$  (modos “*bending*” Ge:H, Si:H)
- 2)  $K=800 \text{ cm}^{-1}$  hasta  $1100 \text{ cm}^{-1}$  (Ge:O, Si:O)
- 3)  $K=1800 \text{ cm}^{-1}$  hasta  $2100 \text{ cm}^{-1}$  (modos “*stretching*” Ge:H, Si:H)

Los picos principales son: modo “*bending*” Ge:H  $K \approx 565 \text{ cm}^{-1}$ , modo “*bending*” Si-H  $K \approx 630 \text{ cm}^{-1}$ , modo “*stretching*” Ge-H  $K \approx 1880 \text{ cm}^{-1}$  y modo “*stretching*” Si-H  $K \approx 2000 \text{ cm}^{-1}$ .

#### 4.5.3 Medidas de la dependencia con temperatura de la Conductividad

Se midieron curvas  $I(U)$  en las diferentes películas en vacío, usando un criostato marca JANIS a presión de 60 mTorr, un electrómetro (6517A marca Keithley) y un controlador de temperatura Lakeshore modelo 331, como es mostrado en la Figura 4-4. El electrómetro está conectado al criostato de forma que por un conector BNC hacemos un barrido en voltaje sobre la muestra de -10 a 10 V con pasos de 0.5 V y a través de otro conector BNC dispuesto en el criostato, recibimos los valores respectivos de corriente. Lo anterior es equivalente a decir que el electrómetro está configurado como fuente de voltaje y medidor de corriente. Para el registro de los datos se hace uso de un programa realizado con el software LabView que lleva el nombre del modelo del electrómetro y fue

desarrollado por personal del laboratorio de microelectrónica del INAOE. También en la figura es posible ver la bomba de vacío que se utilizó, se aprecia el medidor de presión para llevar el control de vacío y el controlador de temperatura. Cuando se alcanzaba una temperatura deseada, se esperaba cinco minutos para que la muestra estuviera estabilizada en ese valor y minimizar de esa manera errores posteriores al momento de la presentación de los resultados.



**Figura 4-4. Ajuste experimental para las mediciones de conductividad en oscuro.**

Las curvas  $I(U)$  se midieron en un rango de temperatura de 300 – 410 °K con pasos de 10 °K (con pendiente de 1°K/min). Cada curva  $I(U)$  se midió en un rango de -10 V a 10 V con pasos de 0.5 V.

Se ha observado que la temperatura y el stress eléctrico durante la caracterización de la dependencia de la conductividad con la temperatura en películas de materiales semiconductores amorfos afectan las propiedades como la energía de activación y la conductividad. Así pues, para evitar reportar errores en los valores de  $E_a$  y conductividad, esta caracterización se repite 2 o 3 veces de la siguiente forma: **1.** Temperatura subida 300 – 410°K, en pasos de 10°K. **2.** Temperatura de bajada 410 – 300°K con pasos de -10°K, y **3.** Temperatura de subida 300 – 410°K, en pasos de 10°K. Generalmente después de la segunda medición, se ha observado que el material se estabiliza en términos de conductividad y  $E_a$ .

Así pues en este trabajo, cada muestra fue medida 2 veces: **1)** Temperatura de subida: Medición incrementando la temperatura de 300 a 410 °K en pasos de

10°K. **2)** Temperatura de bajada: Medición a medida que la temperatura decrece de 410 a 300 °K en pasos de -10°K.

**Nota:** En una sola muestra (Corning glass – proceso 1240) se midió una 3ª vez: Segunda vez de Temperatura de Subida (temperatura de 300 a 410 °K en pasos de 10°K), sin embargo se observó que la tercera medición es muy similar a la segunda, por lo que para el resto de las muestras sólo se realizó 2 veces.

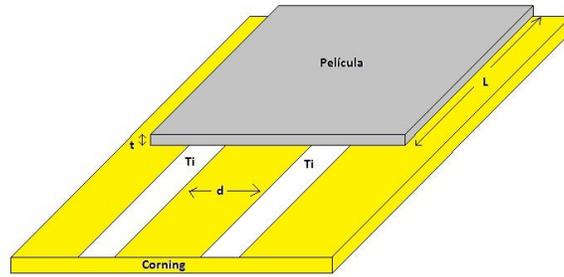
Ya que en total se tienen 48 muestras y la caracterización de la dependencia de conductividad lleva demasiado tiempo por muestra, primeramente se midieron las 6 muestras del proceso 1240 (**1.** Teflón delgado (de ahora en adelante teflón 1), **2.**teflón grueso (de ahora en adelante teflón 2), **3.** PEN, **4.** Polyimide, **5.** Corning glass 2947), con el objetivo de observar si hay un efecto del sustrato en la conductividad y la energía de activación de la película.

Como se verá más adelante, no se observó un efecto del sustrato en la conductividad y energía de activación de las películas depositadas sobre los sustratos de Dupont PEN Teijin TEONEX Q51, Dupont Polyimide Kapton, y Corning glass, sin embargo sí se vio una diferencia en las muestras depositadas sobre teflón 2 y teflón 1. Por lo que para los demás procesos se midieron las muestras en Corning glass, teflón 1 y teflón 2.

La conductividad fue calculada para valores de voltaje de 3 V usando la siguiente ecuación:

$$\sigma = d/(R \cdot L \cdot t) \quad 4.4$$

Donde L es la longitud del electrodo en cm que está en medio de la película amorfa y el sustrato, d es la longitud en cm que separa a los electrodos, t es el grosor en cm de la película y R es la resistencia de la película obtenida de los valores experimentales de corriente y voltaje. Las longitudes fueron tomadas con un calibrador vernier el cual tiene una mínima división de 0.05 mm. Los valores geométricos se muestran en la Tabla 4-4 y en la Figura 4-5 se ilustra la configuración de las muestras para las mediciones de conductividad en oscuro.



**Figura 4-5. Película depositada sobre Corning con electrodos de Titanio para medidas de conductividad.**

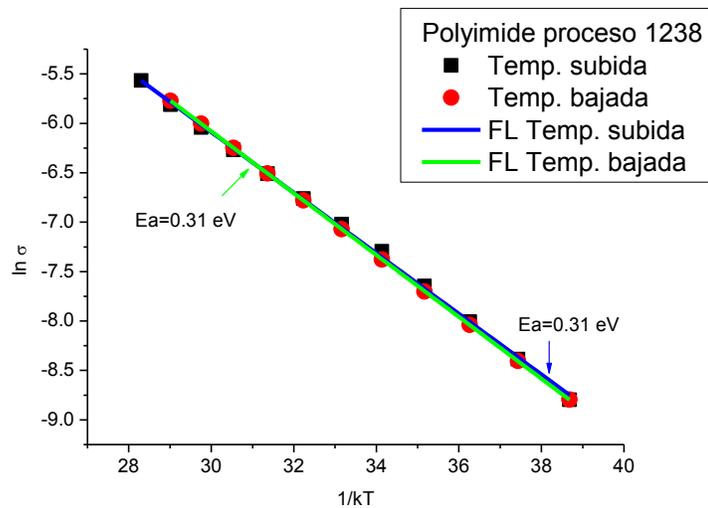
**Tabla 4-4. Parámetros geométricos de la configuración del electrodo para muestras 1235 a 1242**

Proceso	Largo en teflón 2 ( $L$ ) [cm]	Largo en teflón 1 ( $L$ ) [cm]	Largo en Corning ( $L$ ) [cm]	Distancia entre electrodos ( $d$ ) [cm]	Grosor película ( $t$ ) [nm]
1235	1.600	1.620	1.500	0.200	$280 \pm 30$
1236	1.525	1.290	1.575	0.200	$300 \pm 30$
1237	1.225	0.970	1.350	0.200	$310 \pm 30$
1238	1.475	1.340	1.550	0.200	$310 \pm 30$
1239	1.500	1.200	1.700	0.200	$330 \pm 30$
1240	1.350	1.510	1.575	0.200	$340 \pm 30$
1241	1.125	1.490	1.650	0.200	$350 \pm 40$
1242	1.500	0.810	1.400	0.200	$310 \pm 30$

La conductividad es calculada usando la ecuación 4.4. La energía de activación es extraída de la ecuación 4.5:

$$\sigma = \sigma_0 e^{\frac{-E_a}{kT}} \quad 4.5$$

Una vez obtenidos los datos de conductividad a distintas temperaturas,  $\sigma(T)$  fue graficada siendo el eje Y el logaritmo natural de  $\sigma$  y el eje X es  $1/kT$ , como lo muestra la Figura 4-6.



**Figura 4-6. Ajuste lineal a los datos experimentales de  $\sigma(T)$  para obtener  $E_a$  y  $\sigma_0$ , muestra de Polyimide proceso 1238.**

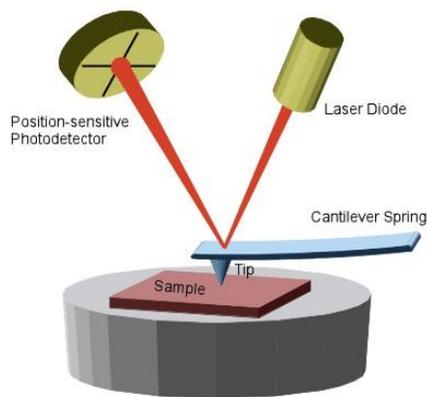
En la ecuación 4.5 se toma el logaritmo natural resultando en:

$$\ln \sigma = \ln \sigma_0 - \frac{E_a}{kT} \quad 4.6$$

En la Figura 4-6 es posible determinar  $\ln \sigma_0$  extrapolando los datos para  $1/kT=0$  y la pendiente de el ajuste lineal da como resultado la energía de activación  $E_a$ .

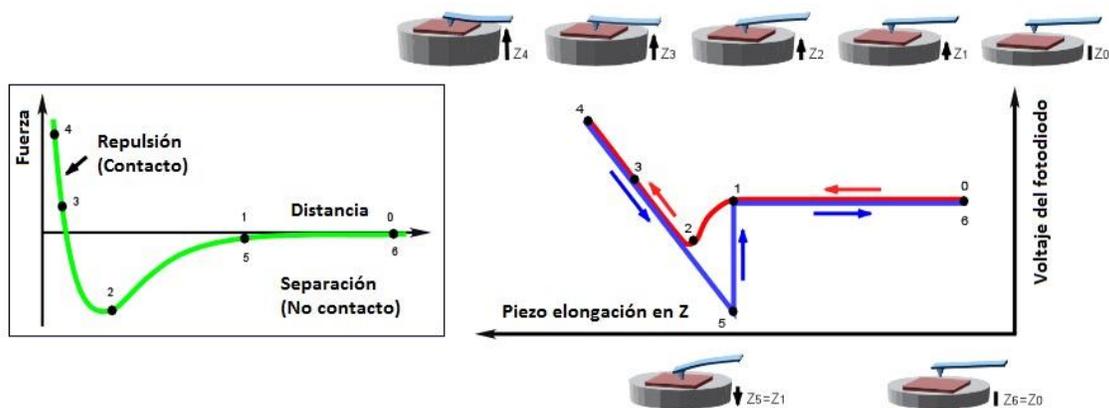
#### 4.5.4 Caracterización por medio de Microscopio de Fuerza Atómica (AFM)

*Atomic Force Microscope* AFM, en español microscopía de fuerza atómica. Es una técnica que permite obtener imágenes de la superficie de una muestra a través del seguimiento de la deflexión de un cantiléver o trampolín el cual posee una punta en posición vertical. El cantiléver interactúa con los átomos de la superficie de la muestra. La deflexión de la punta es monitoreada mediante un sistema óptico que envía un haz de luz láser hacia el extremo del cantiléver en donde se encuentra la punta y la reflexión del haz llega a un sensor (fotodiodo) que registra el cambio de la posición vertical del cantiléver como una variación de la posición del haz láser sobre el sensor de posicionamiento. Cuando la punta se acerca a la muestra, la punta deja de estar en su posición de equilibrio gracias a la fuerza que experimentan los átomos de la punta más cercanos a la muestra. La punta es curvada hacia la muestra cuando la fuerza es de atracción y se curva en dirección opuesta cuando la fuerza es de repulsión. Un esquema del equipo AFM se muestra en la siguiente figura.



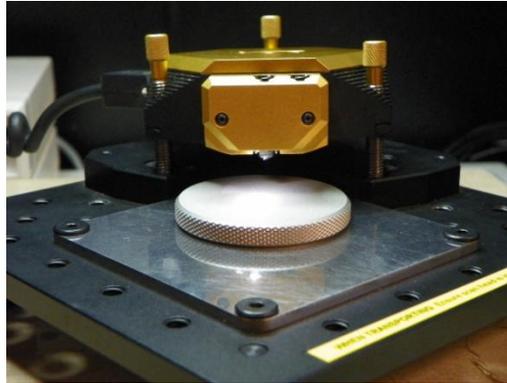
**Figura 4-7. Esquema mostrando los elementos más importantes que componen AFM (tomado de [38]).**

La relación entre fuerza y distancia en la interacción entre átomos de la muestra y átomos de la punta es descrita por una curva fuerza-distancia, tal cual lo muestra la Figura 4-8.



**Figura 4-8. Curva de fuerza contra distancia para la interacción punta-muestra en la técnica AFM (tomado de [38]).**

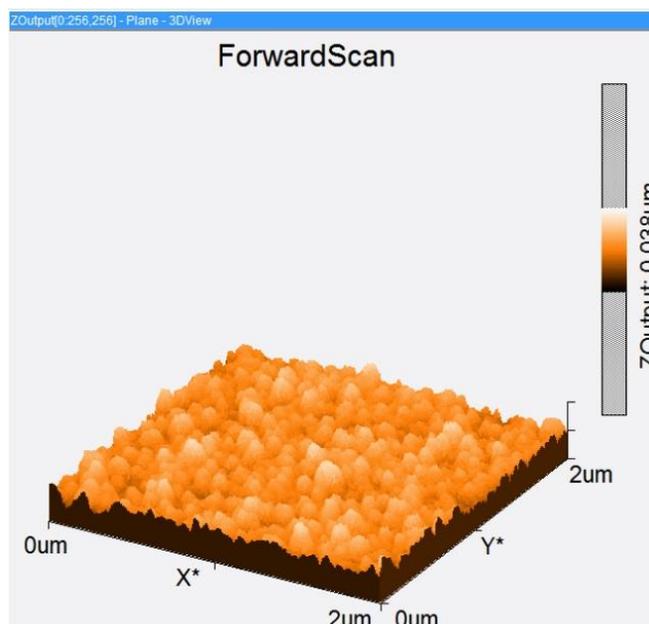
A la izquierda de la figura se aprecia la gráfica de potencial de Lennard Jones con la cual se asume es posible recrear la interacción entre la punta del microscopio y la superficie de las películas. Siendo así se describen los pasos mostrados a la derecha de la Figura 4-8. En la posición 0 la punta se encuentra lejos de la superficie y no hay fuerzas que actúen allí. Lo que ocurre entre las posiciones 1 y 2 es que la punta entra en el rango de las fuerzas atractivas en la superficie y se defleca hacia abajo. Entre los puntos 2 y 4 la punta está en contacto con la superficie y ejerce presión mientras se defleca hacia arriba. En el punto 4 la punta comienza a retroceder, pero las fuerzas de adhesión mantienen la punta en contacto con la superficie hasta que la fuerza elástica ejercida sobre la punta pueda superar a la de adhesión en el punto 5. Acá la punta regresa otra vez a su posición inicial y el ciclo comienza de nuevo en el punto 6 que es el mismo punto 0. Las medidas fueron hechas en un microscopio de fuerza atómica Easy Scan - Nano surf, a temperatura ambiente. Los parámetros de medición fueron: Modo contacto, área de exploración de  $2 \times 2 \mu m$  y resolución de  $512 \times 512$  pixeles.



**Figura 4-9. Microscopio de fuerza atómica Nano Surf usado en el presente trabajo.**

Ya que los valores de rugosidad son afectados por la punta y el tamaño de exploración, los parámetros de medida fueron mantenidos iguales para todas las muestras.

La Figura 4-10 muestra una película de pm-SiGe:H depositada sobre Polyimide. La imagen muestra la estructura granular, a la cual se le realizan posteriores cálculos y análisis estadístico. Para la rugosidad se extrajeron los datos de rugosidad promedio ( $S_a$ ).



**Figura 4-10. Imagen AFM de una película pm-SiGe:H del proceso 1241 depositada sobre Polyimide.**

En cuanto a los datos para el análisis de grano fueron determinados: Diámetro, la altura media y la desviación estándar. El software utilizado para rugosidad y análisis de grano es el SPIP (Scanning Probe Image Processor) versión 5.0.6. La rugosidad promedio por área  $S_a$  se define como lo muestra la ecuación 4.7.

$$S_a = \frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} |z(x_k, y_l) - \mu| \quad 4.7$$

Donde  $M$  y  $N$  corresponden a la cantidad de datos en los puntos X y Y de los costados de la imagen rectangular (ver Figura 4-10) y  $\mu$  es la altura media que se define como

$$\mu = \frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} z(x_k, y_l) \quad 4.8$$

**Sa** es la representación de la rugosidad de la superficie de las películas fabricadas y se obtuvo por análisis estadístico del área explorada de  $2 \times 2 \mu m^2$ . En las tablas de análisis de grano que se mostrarán en el capítulo 4 (Resultados),  $\langle H \rangle$  corresponde a  $\mu$  de la ecuación 4.8. SPIP define granos desde un valor umbral, por arriba de tal umbral el programa considera que hay un grano y entonces la altura y diámetro del grano se pueden reportar estadísticamente.

#### 4.5.5 Caracterización por medio de Transmitancia en el rango del infrarrojo cercano NIR

Para las mediciones de transmitancia en el rango del infrarrojo cercano se utilizó el espectrómetro de la marca Bruker modelo Vector-22. La fuente de NIR utilizada actúa sobre un rango de longitudes de onda desde 0.870 micras hasta 5 micrómetros o equivalentemente  $K=11500 - 2000 \text{ cm}^{-1}$ . Los parámetros utilizados al momento de las mediciones fueron: Resolución  $5 \text{ cm}^{-1}$ , scans 25, rango  $11500 \text{ cm}^{-1}$  a  $2000 \text{ cm}^{-1}$ .

El equipo estuvo encendido durante 3 horas antes que se comenzaran las mediciones y con un flujo de gas de nitrógeno. El software OPUS guarda los datos

como pares número de onda, transmitancia ( $k, T$ ) en formato filename.dat y tales archivos son procesados con el software PUMA (*Pointwise Unconstrained Minimization Approach*). Puma resuelve el problema de estimación bajo un método de llamadas repetitivas (tres en total), en las cuales el usuario tiene que proporcionarle al software información acerca de las características de la película y el sustrato, así como datos relacionados con el archivo de las mediciones de transmitancia [39].

Antes de comenzar con el análisis de los datos hay que poner atención y pasar los valores de número de onda a longitudes de onda, esto puede ser realizado en Origin. La ecuación que se utilizó fue la 4.9:

$$\lambda(nm) = \frac{10 \times 10^6}{k(cm^{-1})} \quad 4.9$$

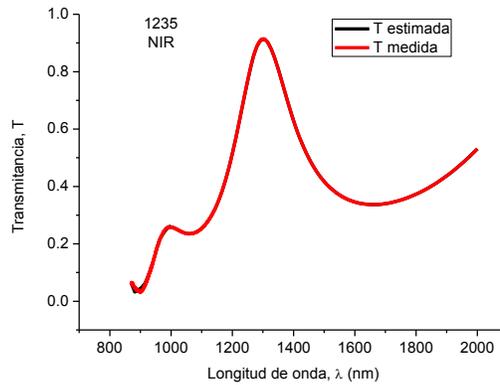
El coeficiente de extinción está relacionado con el coeficiente de absorción  $\alpha$  ( $cm^{-1}$ ) mediante la ecuación 4.10

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad 4.10$$

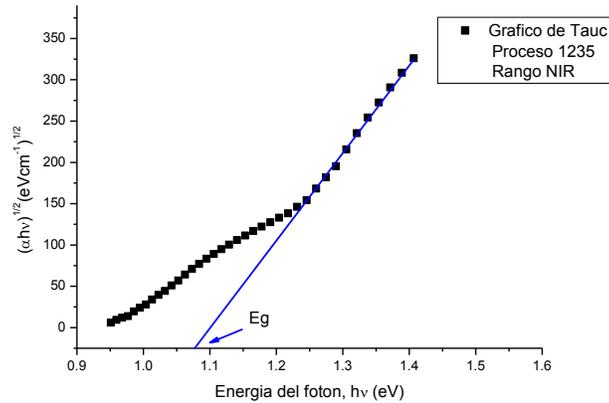
Después que con PUMA se obtiene el coeficiente de extinción  $k$ , se puede calcular el coeficiente de absorción sin mayor problema. Para hallar el coeficiente de absorción del material se requiere que el eje X sea el eje de energía del fotón que también podemos calcular ya que se tienen los valores de longitudes de onda y se aplica la siguiente ecuación.

$$E = hv = \frac{1.24}{\lambda(\mu m)} eV \quad 4.11$$

Después de realizar todo el procedimiento con el software PUMA (ver apéndice A), se comparan las transmitancias (real y estimada) para así comprobar que los datos del coeficiente de extinción serán útiles en los procesos subsiguientes (ver Figura 4-11).



**Figura 4-11. Comparación transmittancias medida y estimada, proceso 1235 NIR correspondiente a a-SiGe:H.**

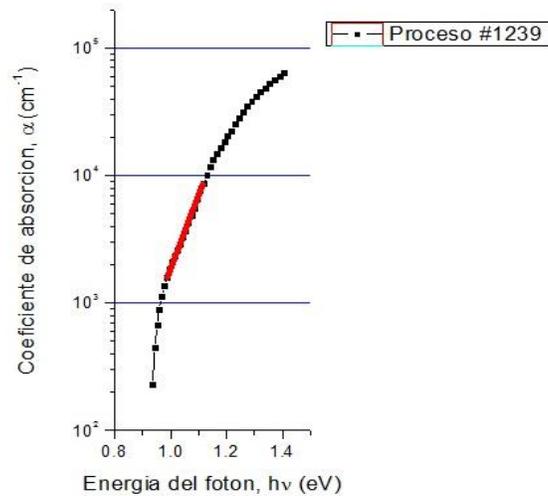


**Figura 4-12. Ilustración que muestra como se determina  $E_g$  en el proceso 1235.**

La Figura 4-12 muestra la extrapolación de la parte lineal de la gráfica y el punto donde interseca al eje de energías es el band gap óptico  $E_g$ , lo anterior se puede realizar al analizar la ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** ya que el lado de la mano izquierda corresponde al eje vertical y en la figura el eje horizontal es el primer término de la parte derecha de la misma ecuación, es decir,  $h\nu$ .  $E_g$  representa la separación de energía de los estados extendidos de banda de valencia y banda de conducción.

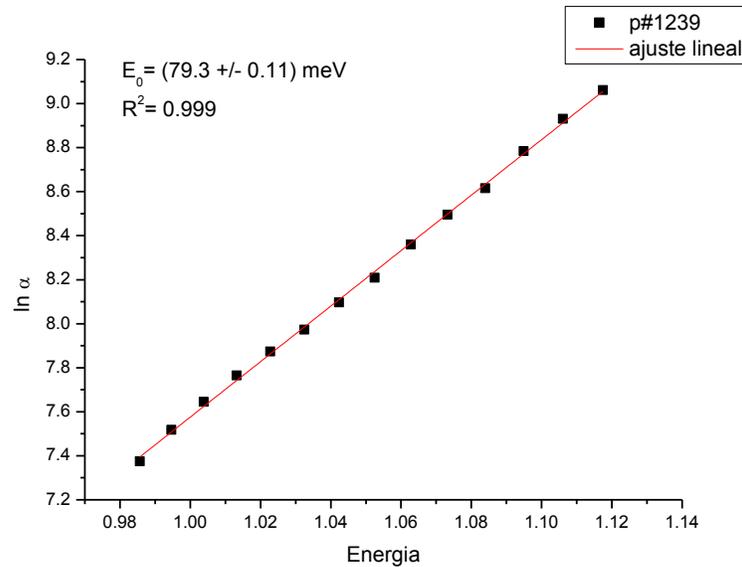
#### 4.5.6 Determinación de la energía de Urbach

Para determinar el valor de la energía de Urbach,  $E_0$ , se debe contar con los datos experimentales del espectro del coeficiente de absorción, un gráfico de este tipo se ilustra en la Figura 4-13, en dicha figura se toman los datos de la zona de Urbach, los cuales están resaltados con una línea de color rojo y que usualmente se ubican en el rango  $10^3 - 10^4 \text{ cm}^{-1}$ .



**Figura 4-13. Coeficiente de absorción de una película pm-SiGe:H. La línea roja muestra la zona escogida para determinar la energía de Urbach.**

Con anterioridad se había dado explicación sobre esta zona en la sección 3.3.2 y un gráfico típico también es mostrado en la Figura 3-8. Se realiza un ajuste lineal sobre estos puntos y el inverso de la pendiente es la energía de Urbach.

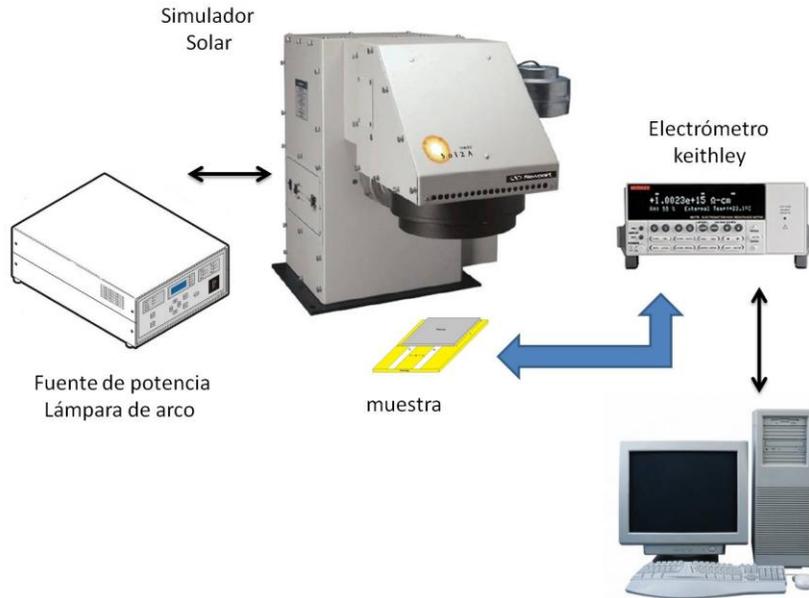


**Figura 4-14. Mejor ajuste lineal realizado por computadora para la determinación de la energía de Urbach.**

Es importante que el coeficiente de correlación esté muy cercano a la unidad, ya que eso nos indica un ajuste realizado con mucha precisión.

#### 4.5.7 Caracterización de Fotoconductividad

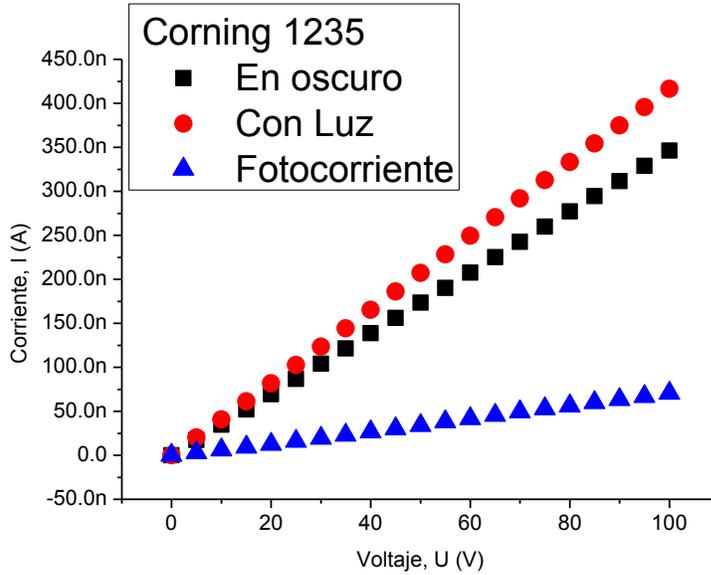
El experimento realizado en el presente trabajo fue hecho con una intensidad de luz AM 1.5 con potencia de  $100 \frac{mW}{cm^2}$ . Se realizan mediciones de Corriente-Voltaje  $I(U)$  en oscuro y con iluminación de un simulador solar marca *Oriol instruments* de la empresa *Newport* modelo 94042A. Con estas mediciones se pretende hallar la fotoconductividad. El voltaje usado para este experimento comprende el rango de 0 – 100 V en pasos de 5 V.



**Figura 4-15. Diagrama esquemático de las medidas de fotoconductividad.**

La Figura 4-15 es un diagrama que muestra por bloques la forma en que se realizaron las pruebas. El simulador solar incluye también la fuente de potencia, así el simulador se encarga de iluminar la muestra. El electrómetro Keithley es el modelo 6517A, el cual se conecta a la muestra como fuente de voltaje y medidor de corriente y se comunica con el software Labview en donde fue elaborado el programa y de esta forma son registrados y almacenados los datos de forma digital en un computador. La fuente de potencia para la lámpara de arco es modelo 69922. El sistema posee un controlador de exposición digital modelo 68950. El equipo fue calibrado para que la lámpara tuviese una intensidad igual a 1 sol.

La Figura 4-16 muestra las curvas corriente-voltaje pertenecientes al material a-SiGe:H depositado sobre Corning glass 1737 del proceso 1235.



**Figura 4-16. Curvas I(U) Corning proceso 1235 con iluminación, en oscuro y fotocorriente.**

En la Figura 4-16 se muestra que la curva con cuadros (negra) es la respuesta obtenida en oscuro. La curva con círculos (roja) corresponde a aquella con iluminación. La curva en la parte inferior a triángulos (azul) es la diferencia entre la corriente con iluminación y la corriente en oscuro, equivalente a decir que es la fotocorriente  $i_{ph} = i_{ill} - i_{dark}$ . La fotoconductividad es la diferencia entre la conductividad bajo iluminación y la conductividad en oscuro como se muestra en la siguiente ecuación  $\sigma_{ph} = \sigma_{ill} - \sigma_{dark}$ .

## 5 Resultados

### 5.1 Introducción

El presente capítulo presenta los resultados experimentales obtenidos en esta tesis, los cuales proporcionan información sobre las características electrónicas, ópticas y morfológicas de las películas de a-SiGe:H y pm-SiGe:H depositadas sobre sustratos plásticos en base a diferentes técnicas de caracterización. Para comenzar, en la sección 5.2 se muestran los resultados obtenidos de la caracterización por espectroscopía infrarroja por medio de la transformada de Fourier (FTIR). Posteriormente en la sección 5.3 se muestran los resultados de la caracterización eléctrica, que consiste en la realización de curvas  $I(U)$  con temperatura y la obtención de la energía de activación y la conductividad en oscuridad. Más adelante en la sección 5.4 se presentan los resultados de caracterización por medio de microscopía de fuerza atómica (AFM) y de dichos resultados se pretende realizar correlación con las condiciones de depósito, principalmente con un enfoque hacia las diferentes temperaturas de depósito. En la sección 5.5 son mostrados los resultados ópticos obtenidos gracias a la técnica de transmitancia. Finalmente, en la sección 5.6 se presentan los resultados de fotoconductividad con los cuales se quiere determinar si los sustratos poliméricos usados en el presente trabajo pueden llegar a ser útiles en el campo de las celdas solares.

## 5.2 Resultados de caracterización de espectroscopía infrarroja por medio de la transformada de Fourier (FTIR)

En esta sección se muestran los resultados de las mediciones FTIR en las películas de a-SiGe:H y de pm-SiGe:H depositadas por LF PECVD para revelar los efectos de las diferentes temperaturas de depósito en enlaces SiH<sub>x</sub>, GeH<sub>x</sub>, SiO<sub>x</sub> y también GeO<sub>x</sub>.

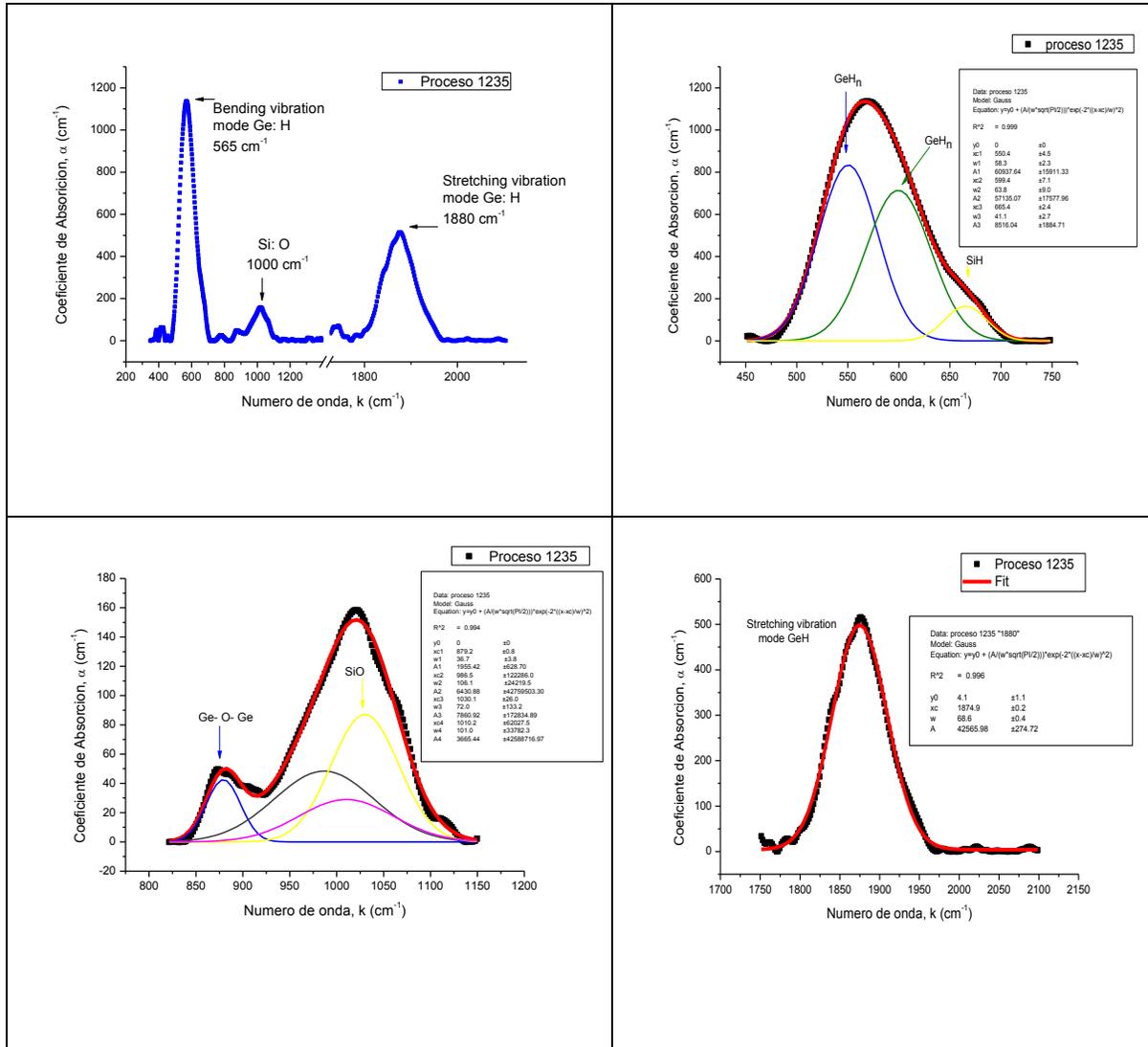
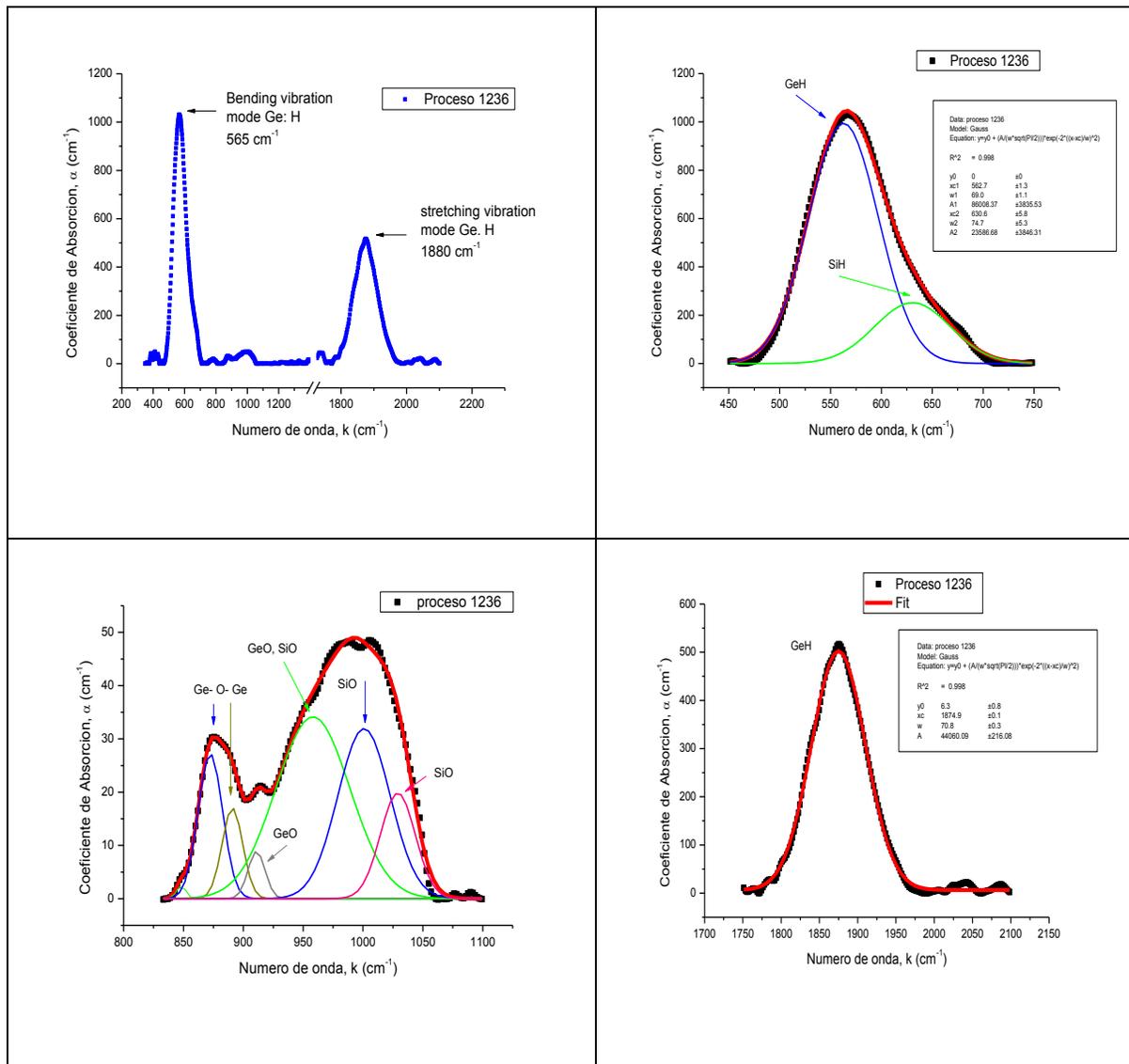


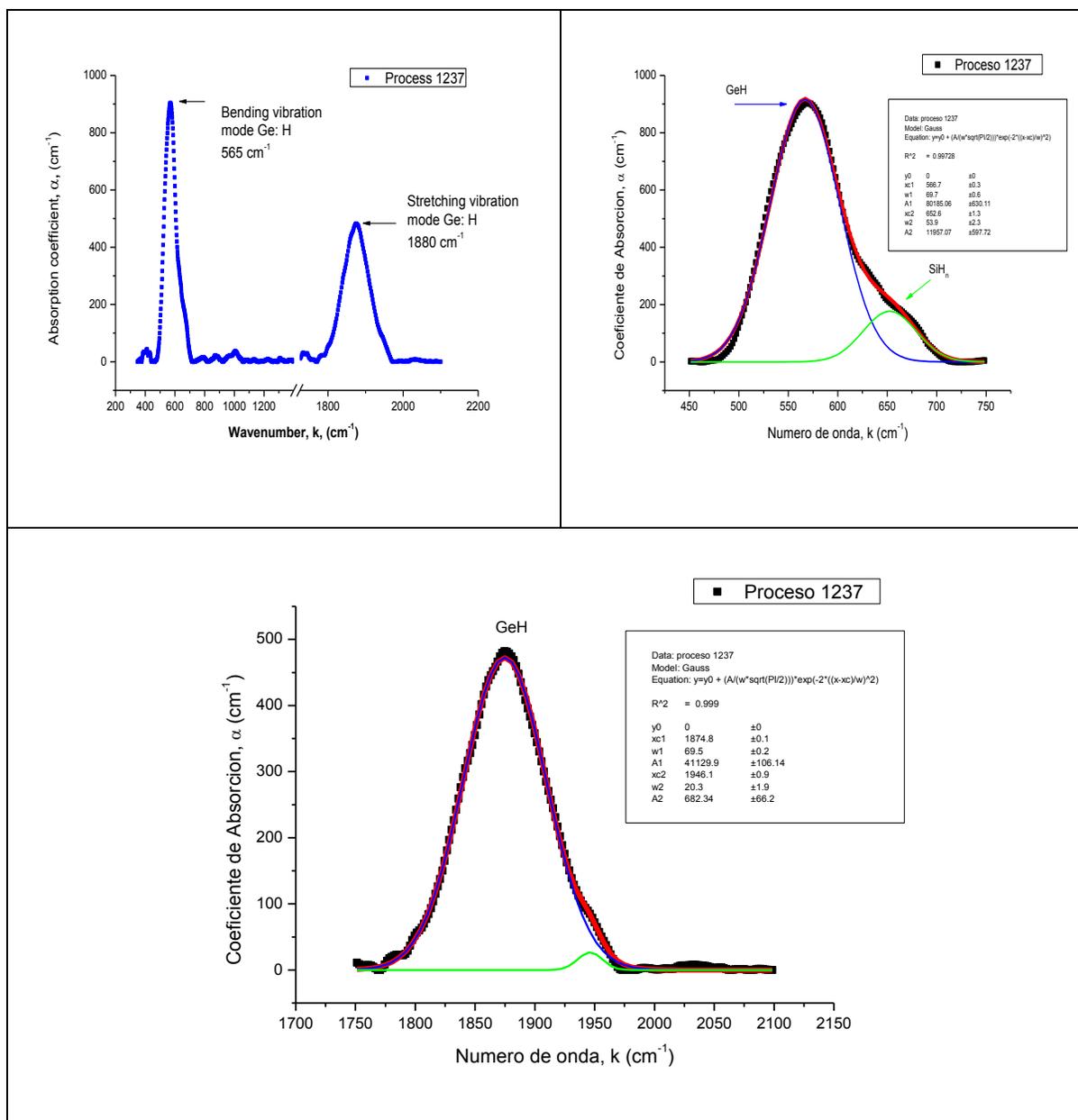
Figura 5-1. Medidas FTIR para el proceso 1235, rango cubierto de  $k = 400\text{cm}^{-1}$  a  $k = 2100\text{cm}^{-1}$ , coeficiente de absorción (superior izquierda), pico  $k = 565\text{cm}^{-1}$  modo bending Ge: H (superior derecha), pico  $k = 1000\text{cm}^{-1}$  de enlaces SiO y GeO (inferior izquierda), pico  $k = 1880\text{cm}^{-1}$  modo stretching Ge: H (inferior derecha).

En las figuras 5-1 a 5-8 se muestran las gráficas del coeficiente de absorción entre  $k = 400\text{cm}^{-1}$  y  $k = 2100\text{cm}^{-1}$ . En estas gráficas principalmente destacan las líneas de absorción cercanas a  $k = 565\text{cm}^{-1}$  y  $k = 1880\text{cm}^{-1}$ , correspondiendo a los modos “*bending*” y “*stretching*” de Ge:H respectivamente. En muchas de estas gráficas es notoria la existencia de otras líneas de absorción, y pueden ser atribuidas principalmente a enlaces indeseados con oxígeno.



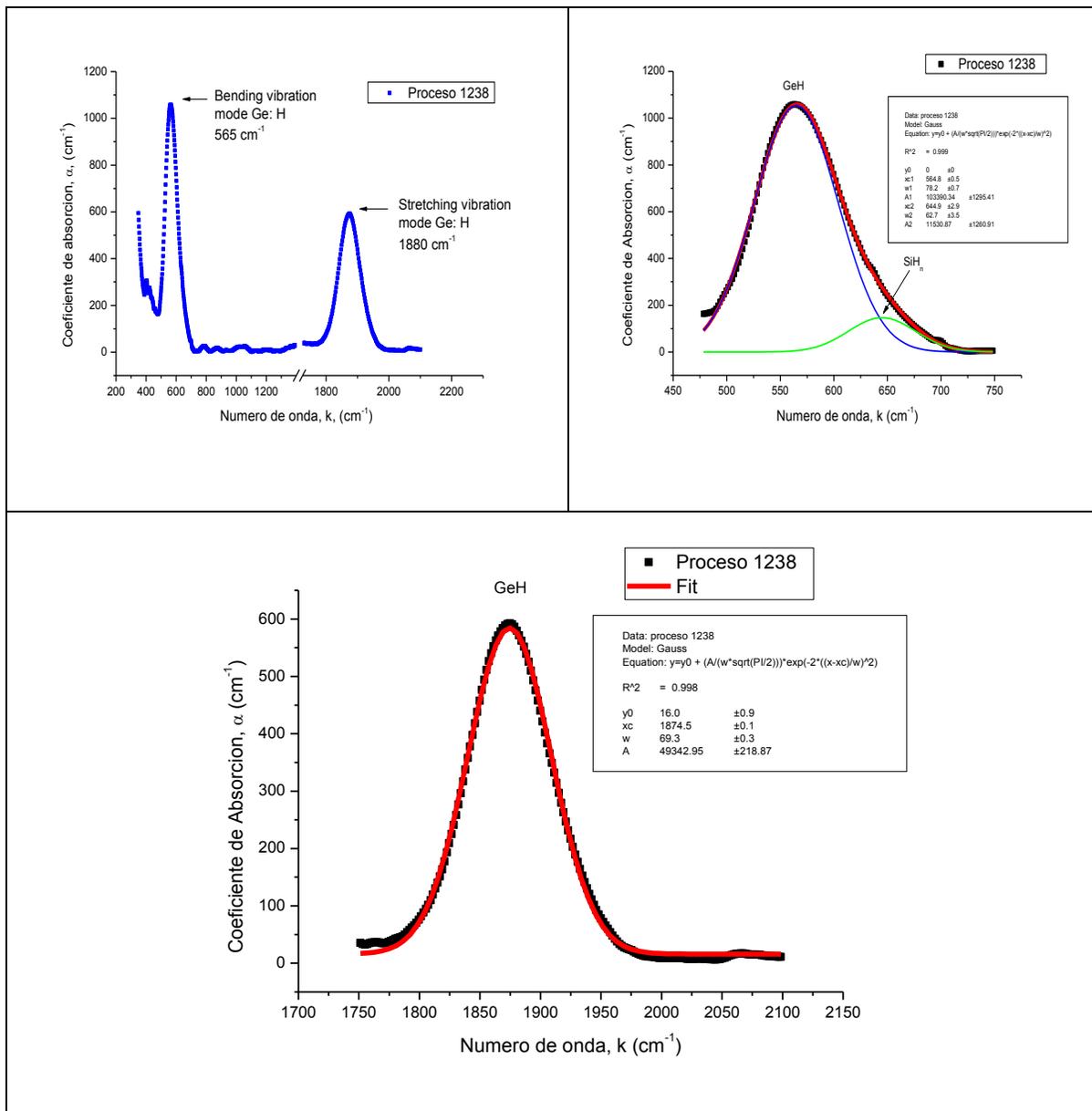
**Figura 5-2. Medidas FTIR para el proceso 1236, rango cubierto de  $k = 400\text{cm}^{-1}$  a  $k = 2100\text{cm}^{-1}$ , coeficiente de absorción (superior izquierda), pico  $k = 565\text{cm}^{-1}$  modo bending Ge: H (superior derecha), pico  $k = 1000\text{cm}^{-1}$  de enlaces SiO y GeO (inferior izquierda), pico  $k = 1880\text{cm}^{-1}$  modo stretching Ge: H (inferior derecha).**

Para una mejor interpretación del espectro de absorción se realizó análisis del mismo en 3 regiones o rangos. El primero entre  $450$  y  $750\text{ cm}^{-1}$ . El segundo entre  $800$  y  $1150\text{ cm}^{-1}$  y el último entre  $1750$  y  $2100\text{ cm}^{-1}$ .

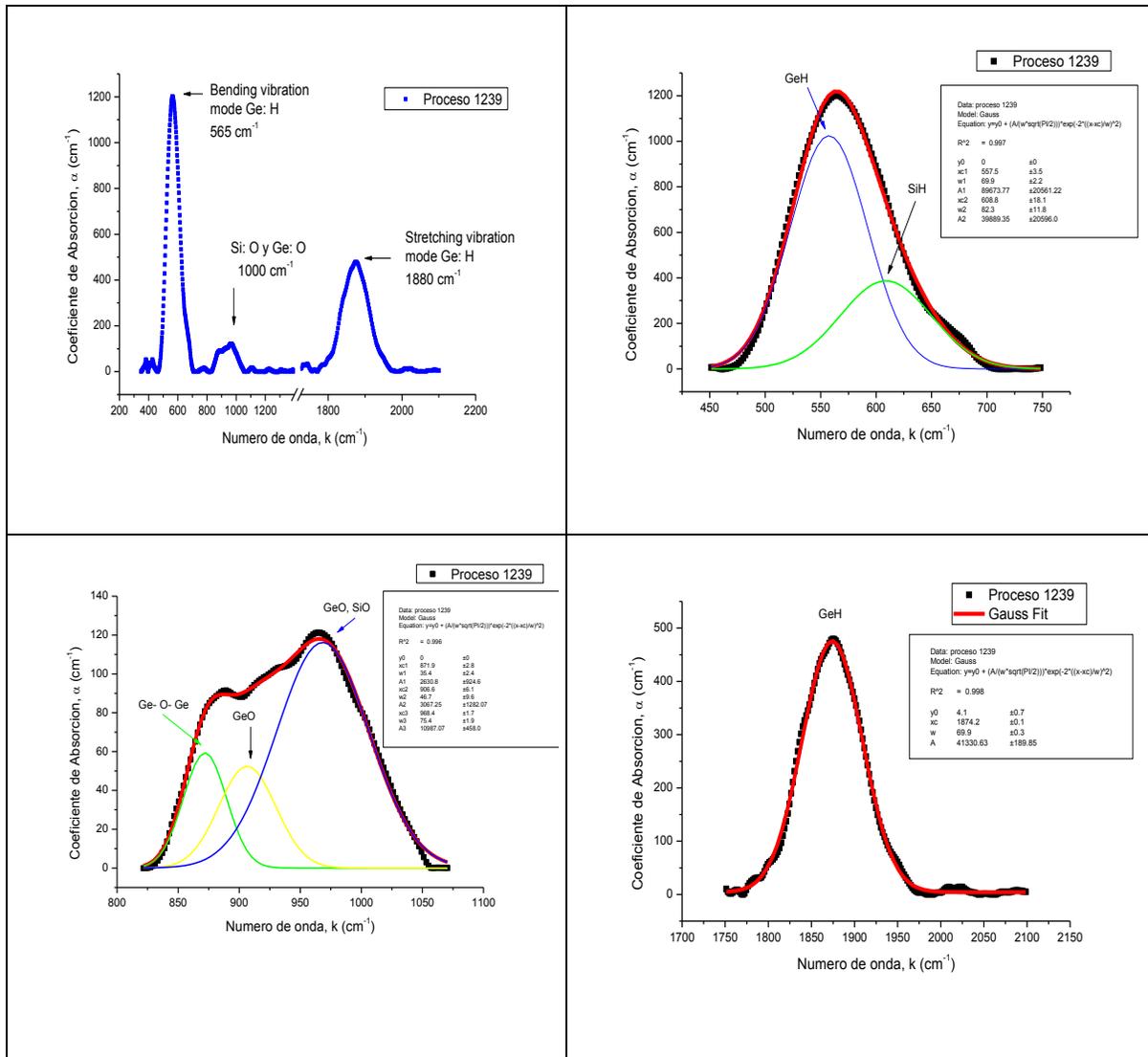


**Figura 5-3. Medidas FTIR para el proceso 1237, rango cubierto de  $k = 400\text{ cm}^{-1}$  a  $k = 2100\text{ cm}^{-1}$ , coeficiente de absorción (superior izquierda), pico  $k = 565\text{ cm}^{-1}$  modo bending Ge: H (superior derecha), pico  $k = 1880\text{ cm}^{-1}$  modo stretching Ge: H (inferior).**

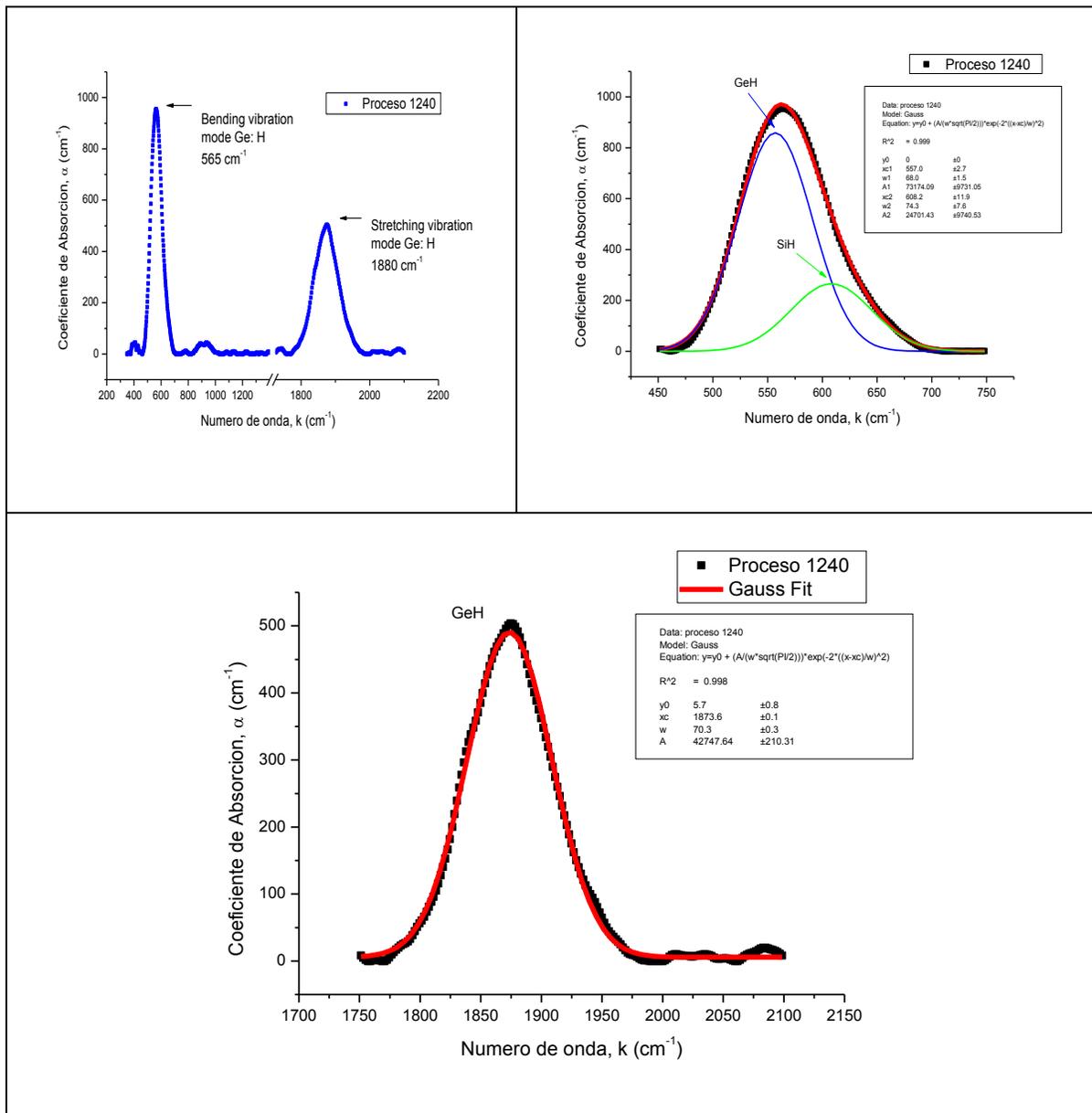
En cada una de estas regiones se realizó la deconvolución del espectro para determinar los tipos de enlaces allí presentes.



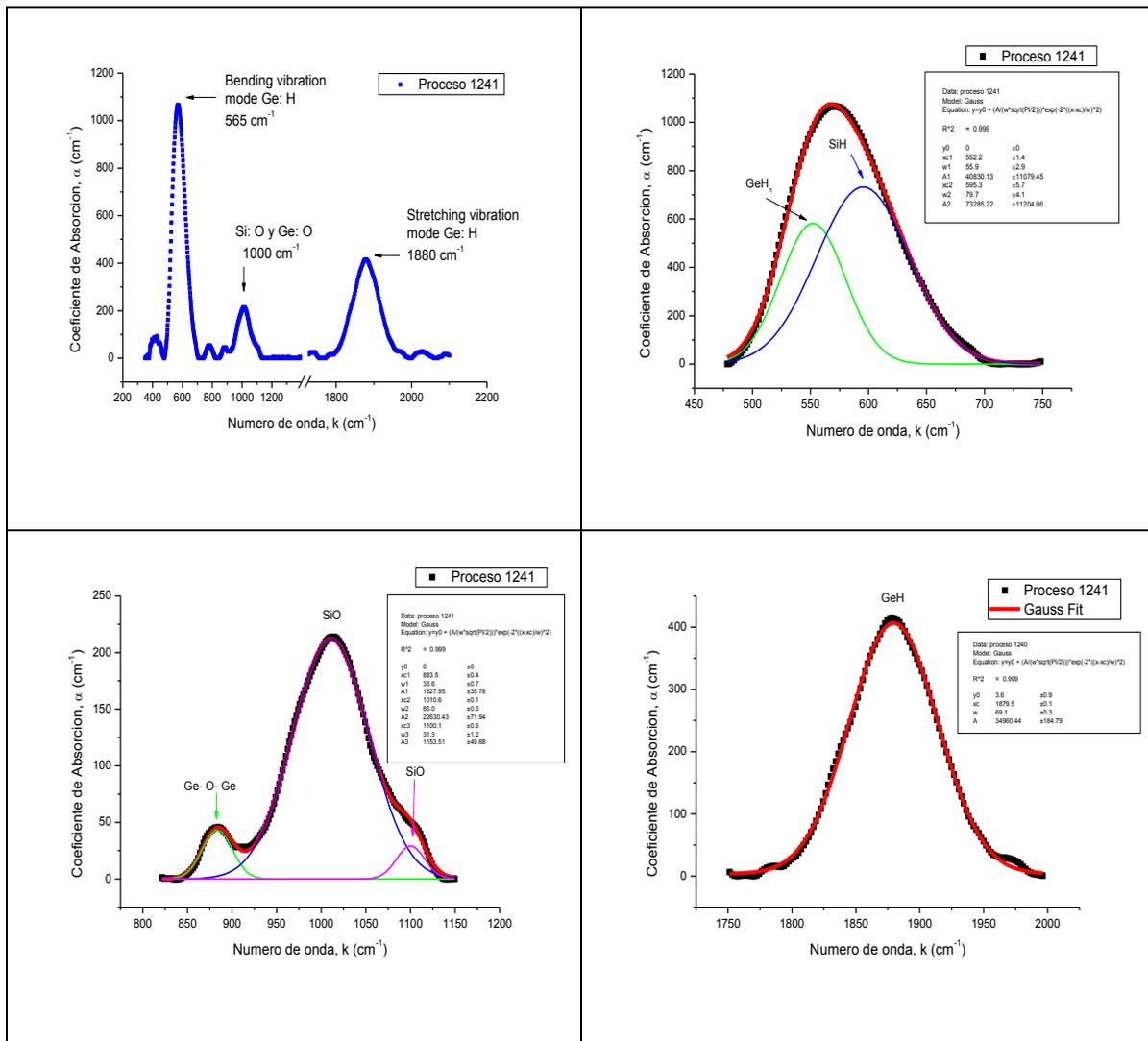
**Figura 5-4. Medidas FTIR para el proceso 1238, rango cubierto de  $k = 400\text{cm}^{-1}$  a  $k = 2100\text{cm}^{-1}$ , coeficiente de absorción (superior izquierda), pico  $k = 565\text{cm}^{-1}$  modo bending Ge: H (superior derecha), pico  $k = 1880\text{cm}^{-1}$  modo stretching Ge: H (inferior).**



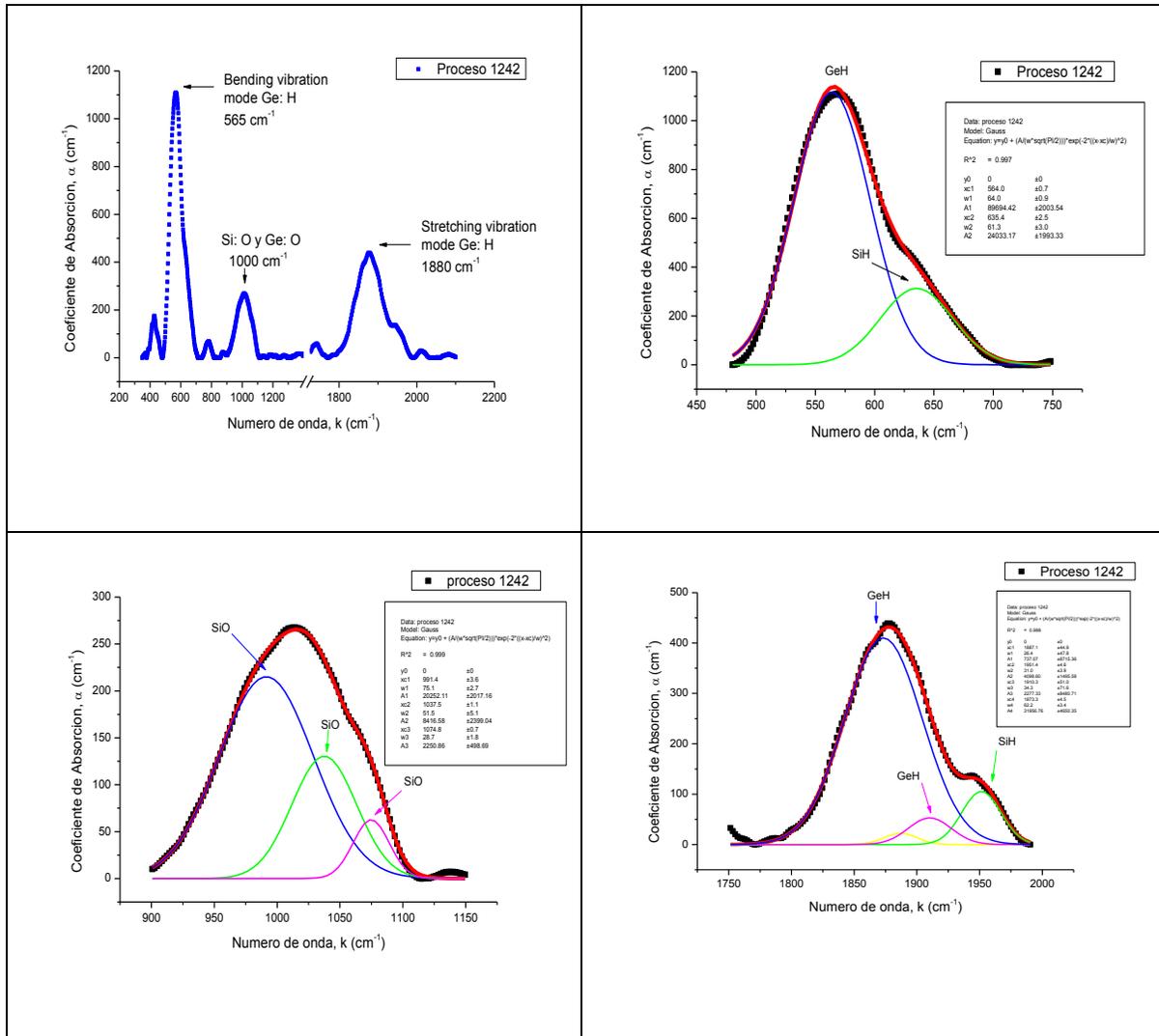
**Figura 5-5. Medidas FTIR para el proceso 1239, rango cubierto de  $k = 400\text{cm}^{-1}$  a  $k = 2100\text{cm}^{-1}$ , coeficiente de absorción (superior izquierda), pico  $k = 565\text{cm}^{-1}$  modo bending Ge: H (superior derecha), pico  $k = 1000\text{cm}^{-1}$  de enlaces SiO y GeO (inferior izquierda), pico  $k = 1880\text{cm}^{-1}$  modo stretching Ge: H (inferior derecha).**



**Figura 5-6. Medidas FTIR para el proceso 1240, rango cubierto de  $k = 400\text{cm}^{-1}$  a  $k = 2100\text{cm}^{-1}$ , coeficiente de absorción (superior izquierda), pico  $k = 565\text{cm}^{-1}$  modo bending Ge: H (superior derecha), pico  $k = 1880\text{cm}^{-1}$  modo stretching Ge: H (inferior).**

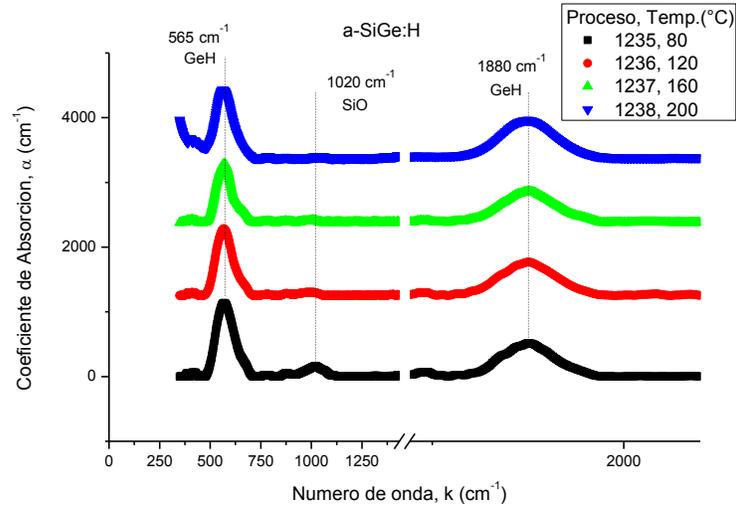


**Figura 5-7. Medidas FTIR para el proceso 1241, rango cubierto de  $k = 400 \text{ cm}^{-1}$  a  $k = 2100 \text{ cm}^{-1}$ , coeficiente de absorción (superior izquierda), pico  $k = 565 \text{ cm}^{-1}$  modo bending Ge: H (superior derecha), pico  $k = 1000 \text{ cm}^{-1}$  de enlaces SiO y GeO (inferior izquierda), pico  $k = 1880 \text{ cm}^{-1}$  modo stretching Ge: H (inferior derecha).**



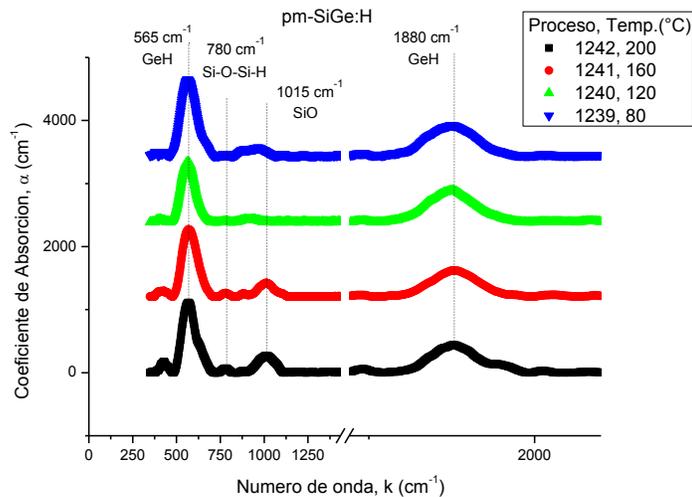
**Figura 5-8. Medidas FTIR para el proceso 1242, rango cubierto de  $k = 400\text{cm}^{-1}$  a  $k = 2100\text{cm}^{-1}$ , coeficiente de absorción (superior izquierda), pico  $k = 565\text{cm}^{-1}$  modo bending Ge: H (superior derecha), pico  $k = 1000\text{cm}^{-1}$  de enlaces SiO y GeO (inferior izquierda), pico  $k = 1880\text{cm}^{-1}$  modo stretching Ge: H (inferior derecha).**

El conjunto de espectros FTIR para las muestras de a-SiGe:H (procesos 1235 al 1238) y pm-SiGe:H (procesos 1239 al 1242) son mostrados en la Figura 5-9 y Figura 5-10 respectivamente.



**Figura 5-9. Espectro de absorción IR de las películas de a-SiGe:H fabricadas a diferentes temperaturas.**

Los espectros contienen líneas que corresponden al modo “*stretching*” en aproximadamente  $1880\text{ cm}^{-1}$  para enlaces de Ge-H. El modo “*bending*” es visto cerca a  $565\text{ cm}^{-1}$  para Ge-H. La absorción relacionada a enlaces Si-O y Ge-O fue observada en el rango de  $990 - 1050\text{ cm}^{-1}$  y  $690 - 840\text{ cm}^{-1}$  respectivamente.



**Figura 5-10. Espectro de absorción IR de las películas de pm-SiGe:H fabricadas a diferentes temperaturas.**

Lukovsky et al. [42] asignaron para la absorción en  $860 - 870\text{ cm}^{-1}$  al modo “*stretching*” resultante de la incorporación de oxígeno durante el crecimiento en

plasma. La posición de las líneas **K**, sus anchos **W** y areas **A**, obtenidas después de analizar los espectros se listan en la Tabla 5-1. El valor de K para las líneas de absorción se explica en la sección 3.6 con la ecuación 3.23. En cuanto al ancho W, se determina por el número de ambientes químicos, lo cual está relacionado a la fuerza de interacciones moleculares tales como enlaces con hidrógeno. Por lo tanto al querer enlazar dos moléculas que con anterioridad pertenecían a distintos ambientes químicos, pasará que la constante de fuerza variará y el número de onda será diferente al que estas moléculas absorben la luz infrarroja normalmente. El área A es para análisis cuantitativo.

**Tabla 5-1. Líneas de absorción en el espectro IR de películas SiGe.**

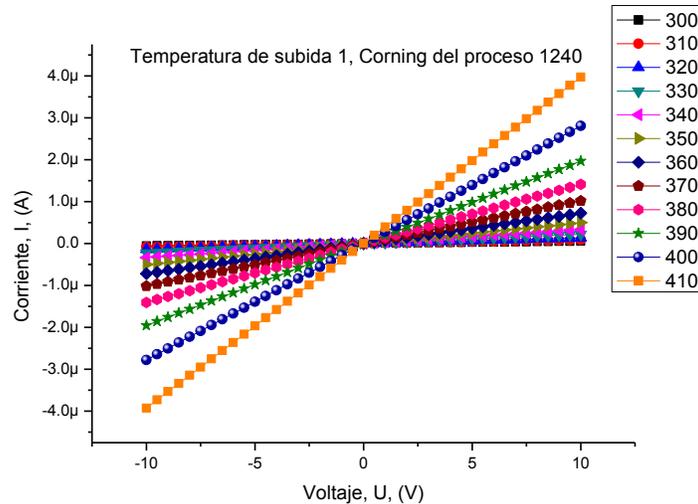
Proceso	K [ $cm^{-1}$ ]	W [ $cm^{-1}$ ]	A [ $cm^{-2}$ ]	Enlace
1235	$550 \pm 5$	$58 \pm 2$	$(6.09 \pm 1.59) \times 10^4$	GeHn
	$879.2 \pm 0.8$	$37 \pm 4$	$(1.96 \pm 0.63) \times 10^3$	Ge-O-Ge
	$1874.9 \pm 0.2$	$68.6 \pm 0.4$	$(4.26 \pm 0.03) \times 10^4$	GeH
1236	$563 \pm 1$	$69 \pm 1$	$(8.60 \pm 0.38) \times 10^4$	GeH
	$872 \pm 4$	$21 \pm 4$	$(6.99 \pm 2.83) \times 10^2$	Ge-O-Ge
	$1009 \pm 7$	$44 \pm 25$	$(1.75 \pm 3.28) \times 10^3$	SiO, *
	$1874.9 \pm 0.1$	$70.8 \pm 0.3$	$(4.41 \pm 0.02) \times 10^4$	GeH
1237	$567 \pm 0.3$	$69.7 \pm 0.6$	$(8.02 \pm 0.06) \times 10^4$	GeH
	$1874.8 \pm 0.1$	$69.5 \pm 0.2$	$(4.11 \pm 0.01) \times 10^4$	GeH
1238	$564.8 \pm 0.5$	$78.2 \pm 0.7$	$(1.03 \pm 0.01) \times 10^5$	GeH
	$1874.5 \pm 0.1$	$69.3 \pm 0.3$	$(4.93 \pm 0.02) \times 10^4$	GeH
1239	$558 \pm 4$	$70 \pm 2$	$(8.97 \pm 2.06) \times 10^4$	GeH
	$872 \pm 3$	$35 \pm 2$	$(2.63 \pm 0.92) \times 10^3$	Ge-O-Ge
	$968 \pm 2$	$75 \pm 2$	$(1.10 \pm 0.05) \times 10^4$	GeO, SiO
	$1874.2 \pm 0.1$	$69.9 \pm 0.3$	$(4.13 \pm 0.02) \times 10^4$	GeH
1240	$557 \pm 3$	$68 \pm 2$	$(7.32 \pm 0.97) \times 10^4$	GeH
	$1873.6 \pm 0.1$	$70.3 \pm 0.3$	$(4.28 \pm 0.02) \times 10^4$	GeH
1241	$552 \pm 1$	$56 \pm 3$	$(4.08 \pm 1.11) \times 10^4$	GeH
	$595 \pm 6$	$80 \pm 4$	$(7.33 \pm 1.12) \times 10^4$	SiH

	$884 \pm 0.4$	$33.6 \pm 0.7$	$(1.83 \pm 0.04) \times 10^3$	Ge-O-Ge
	$1010.6 \pm 0.1$	$85.0 \pm 0.3$	$(2.26 \pm 0.01) \times 10^4$	SiO
	$1879.5 \pm 0.1$	$69.1 \pm 0.3$	$(3.50 \pm 0.02) \times 10^4$	GeH
1242	$564.0 \pm 0.7$	$64.0 \pm 0.9$	$(8.97 \pm 0.20) \times 10^4$	GeH
	$991 \pm 4$	$75 \pm 3$	$(2.03 \pm 0.20) \times 10^4$	SiO
	$1038 \pm 1$	$52 \pm 5$	$(8.42 \pm 2.40) \times 10^3$	SiO
	$1887 \pm 45$	$26 \pm 48$	$(7.37 \pm 87.15) \times 10^2$	GeH, *

En la última columna hay un símbolo \* para 3 líneas indicando que sus errores son demasiado altos, del mismo orden de la magnitud de la medición e incluso mayor.

### 5.3 Resultados de caracterización eléctrica, curvas I(U) con temperatura y conductividad en oscuridad

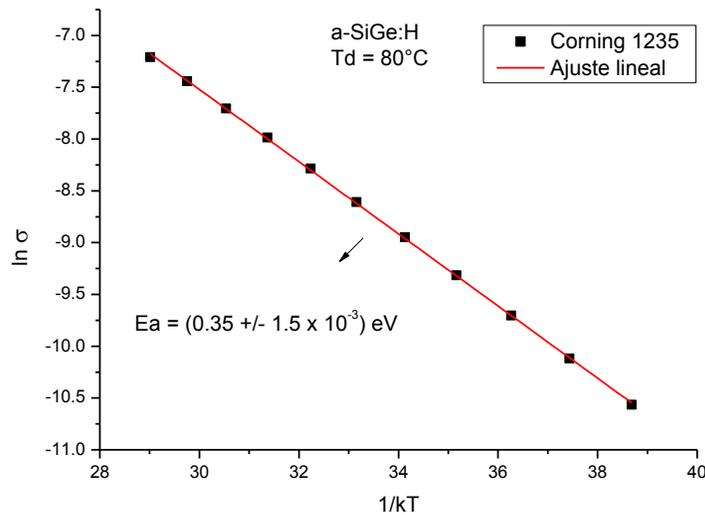
En esta sección se presentan los resultados de las mediciones de corriente-voltaje y las mediciones de la dependencia de temperatura de la conductividad para estudiar los efectos de diferentes sustratos y diferentes temperaturas de depósito.



**Figura 5-11. Curva I(U) en el primer incremento de temperatura para la muestra Corning 1737 proceso 1240.**

La Figura 5-11 muestra las curvas de corriente contra voltaje a diferentes temperaturas del proceso 1240. A medida que la temperatura se incrementa, la pendiente también incrementa proporcionalmente. Se puede decir que existe una relación lineal entre la corriente y el voltaje. En los demás sustratos se puede apreciar un comportamiento similar, pudiendo ser diferente para el teflón PTFE.

Una vez que se obtuvieron las curvas corriente-voltaje, se procedió a hallar la conductividad, para ello es necesario la obtención de los valores geométricos en las muestras (el grosor, el largo del contacto y la separación entre contactos).



**Figura 5-12. Curva ln(conductividad) Corning 1235. Nota: las líneas corresponden al mejor ajuste lineal.**

De las mediciones corriente – voltaje a diferentes temperaturas es posible realizar gráficas de Arrhenius. Reescribiendo la ecuación 3.12 como la ecuación 5.1 y al

$$\sigma(T) = \sigma_0^* \exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right) \quad 5.1$$

aplicarle logaritmo natural a ambos lados de la ecuación se tiene la ecuación 5.2.

$$\ln(\sigma(T)) = \ln(\sigma_0^*) \times \left(\frac{-E_a}{kT}\right) \quad 5.2$$

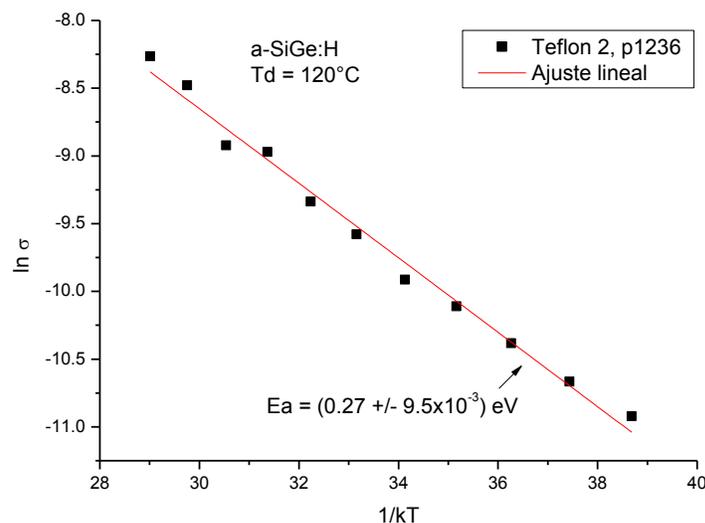
Al graficar  $\ln(\sigma(T))$  vs  $1/kT$  se tiene que la pendiente de la curva es la energía de activación ( $E_a$ ).

Las figuras 5-12 a 5-14 muestran las curvas de Arrhenius para una película de a-SiGe:H depositada en diferentes sustratos (Corning 1737, teflón 2 y teflón 1). La Figura 5-12 muestra un ajuste lineal el cual da una  $E_a = 0.35 \text{ eV}$ , con un error de  $\pm 1.5 \times 10^{-3} \text{ eV}$ , por lo que se puede tomar como satisfactorio el valor de energía de activación obtenido.

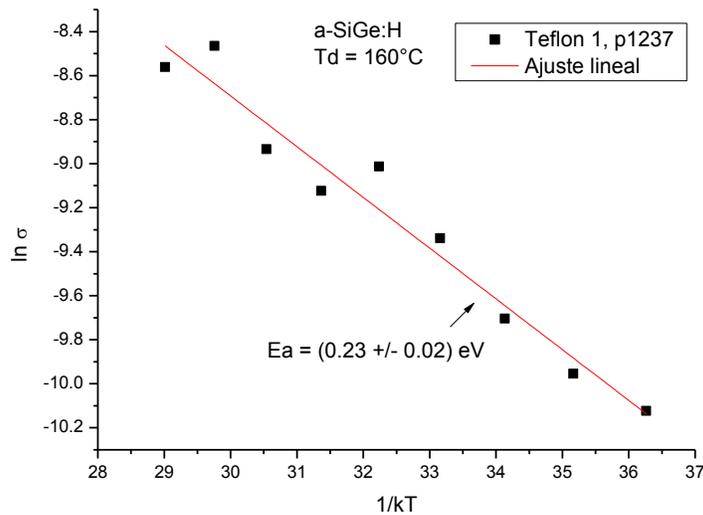
Por su parte la Figura 5-13, que corresponde a una película de a-SiGe:H depositada sobre sustrato teflón 2, muestra un ajuste lineal con un error de  $\pm 9.5 \times 10^{-3}$  eV. En este caso también se considera que el ajuste tiene un error muy bajo, por lo que el valor de  $E_a$  se toma como correcto.

Sin embargo la Figura 5-14 muestra la curva de Arrhenius de una película de a-SiGe:H depositada sobre sustrato teflón 1. Se puede ver que el ajuste lineal tiene un error muy grande, por lo que el valor de  $E_a$  se toma como incorrecto.

La razón posible es que el sustrato de teflón no permite una transferencia adecuada del calefactor a la película, por lo que esta última no llega a la temperatura deseada. Cabe aclarar que los sustratos de polyimide y PEN presentaron resultados muy similares a los obtenidos en películas depositadas sobre sustratos de Corning glass, por lo que para los diferentes procesos de depósito (8), esta caracterización sólo se realizó en las películas depositadas sobre Corning glass, teflón 1 (delgado) y teflón 2 (grosso).



**Figura 5-13. Curva ln(conductividad) Teflón 2 1236. Nota: las líneas corresponden al mejor ajuste lineal.**



**Figura 5-14. Curva ln(conductividad) Teflón 1 1237. Nota: las líneas corresponden al mejor ajuste lineal.**

En la Figura 5-15 para el proceso 1238 que corresponde a a-SiGe:H sobre sustrato de Polyimide se muestra la curva  $\sigma(T)$ , trazada como  $\ln(\sigma)$  versus  $1/kT$  y para la Figura 5-16 se muestran las curvas  $\sigma(T)$  para todos los procesos sobre sustratos plásticos y Corning.

En la ecuación 5.1,  $E_a$  es la energía de activación la cual se expresa como  $E_a = E_C(0) - E_F(0)$ , y de ahí se determina el nivel de energía de Fermi  $E_F(0)$  y la energía de la banda de conducción  $E_C(0)$  a temperatura cero.  $\sigma_0$  es la conductividad extrapolada a  $\frac{1}{KT} = 0$  y  $k$  es la constante de Boltzmann.

La dependencia con la temperatura de  $E_C$  y  $E_F$  puede ser escrita como en la ecuación 5.3

$$E_C(T) - E_F(T) = E_C(0) - E_F(0) - \chi T \quad 5.3$$

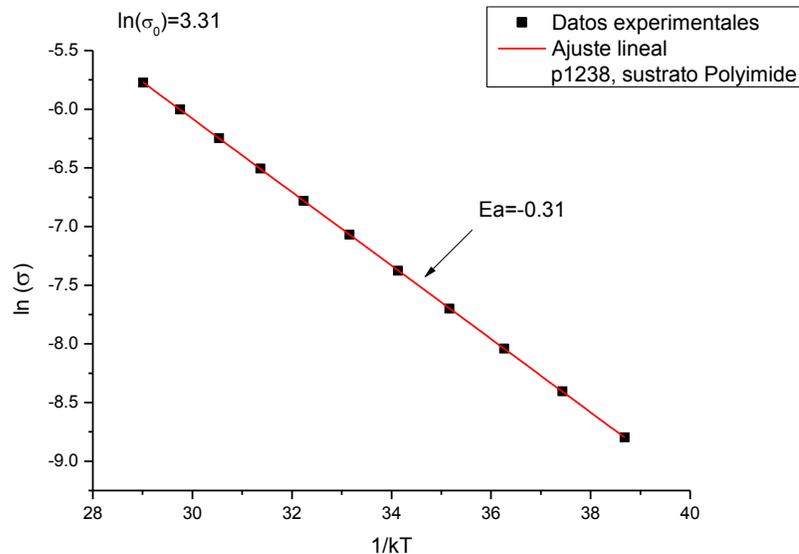
En donde  $E_C(T)$  y  $E_F(T)$  son las posiciones de banda de conducción y nivel de Fermi a la temperatura T y  $\chi$  es el coeficiente de temperatura. La dependencia con la temperatura teórica de la conductividad puede escribirse como en la ecuación 5.4

$$\sigma(T) = \sigma_{min} \exp\left(\frac{\chi}{k}\right) \exp\left(\frac{E_C(0) - E_F(0)}{kT}\right) \quad 5.4$$

En donde  $\sigma_{min}$  es la conductividad metálica mínima y un valor aceptado para esta conductividad es  $200 \text{ Ohm}^{-1}\text{cm}^{-1}$  [41]. Al comparar la ecuación 5.1 con la ecuación 5.4, los parámetros extraídos desde las mediciones de conductividad son como se muestran en las siguientes ecuaciones

$$\sigma_0 = \sigma_{min} \exp\left(\frac{\chi}{k}\right) \quad 5.5$$

$$E_a = E_C(0) - E_F(0) \quad 5.6$$



**Figura 5-15. Ajuste lineal a los datos experimentales. Los parámetros  $E_a$  y  $\sigma_0$  se pueden extraer de  $\sigma(T)$ . El material de la película es a-SiGe:H. Nota: la línea corresponde al mejor ajuste lineal.**

La Figura 5-15 sirve para ilustrar la forma en que se determinan los parámetros  $E_a$  y  $\sigma_0$ . Los cuadros son los valores obtenidos experimentalmente, la línea es un ajuste lineal realizado en el software Origin. Con los valores del ajuste se

determina que la pendiente es la energía de activación,  $E_a = -0.31 \text{ eV}$  y  $\ln(\sigma_0) = 3.31$  (intercepto con el eje de ordenadas).

De la ecuación 5.5 es posible calcular el coeficiente de temperatura  $\chi$  resultando en la ecuación

$$\chi = k \cdot \ln\left(\frac{\sigma_0}{\sigma_{min}}\right) = 1.71 \times 10^{-4} \text{ eV} \cdot \text{K}^{-1} \quad 5.7$$

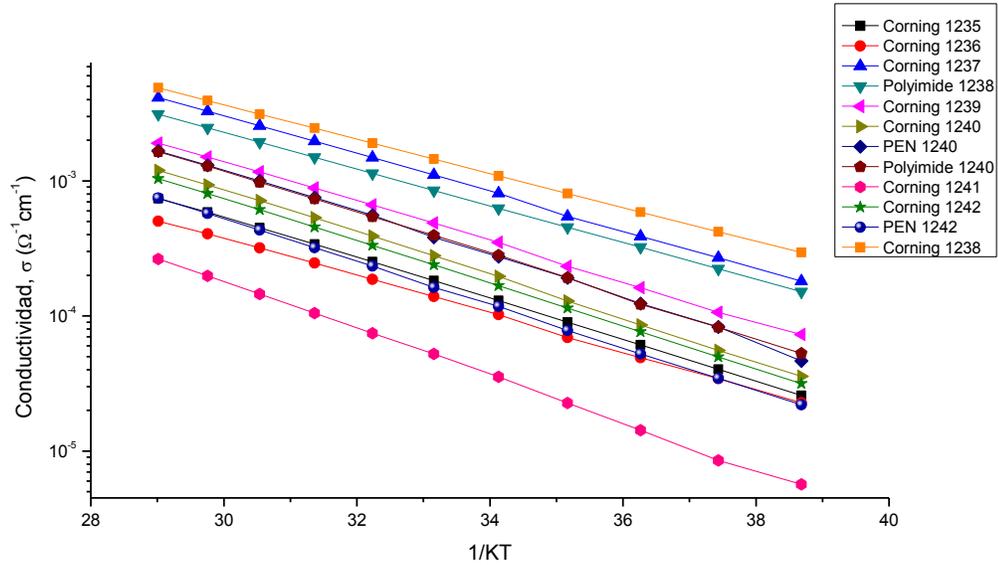
En donde  $\sigma_{min} = 200 \text{ Ohm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$  [13]. El nivel de Fermi a temperatura ambiente se calcula con la ecuación 5.3. Aquí se toma en cuenta que  $E_c(T) = 0$  es la energía de referencia para que  $E_a = -0.31 \text{ eV}$  y la expresión queda como se muestra a continuación en la ecuación 5.8

$$E_F(300\text{K}) = E_a - \chi \cdot 300\text{K} = 0.26 \text{ eV} \quad 5.8$$

Otro parámetro que es hallado a través de las pruebas de la dependencia con temperatura de la conductividad, es el *TCR* o coeficiente de temperatura de la resistencia.

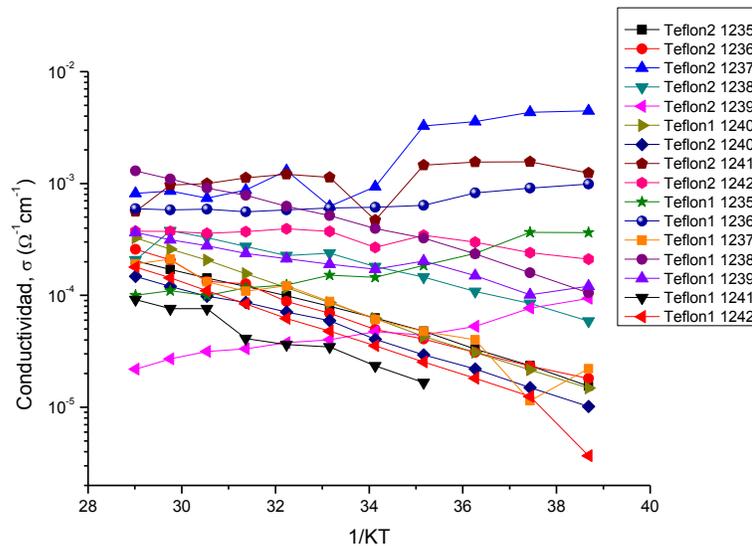
$$TCR = \frac{-E_a}{kT^2} \quad 5.9$$

El TCR es el cambio de la resistencia debido a la absorción de radiación IR. El TCR se define en la ecuación 5.9, donde  $E_a$  es la energía de activación,  $k$  es la constante de Boltzmann y  $T$  es temperatura. Si el valor del TCR es alto significa que un pequeño cambio en temperatura en el material sensor resultará en un gran cambio en la resistencia. La ecuación 5.9 muestra que el TCR y la  $E_a$  se relacionan directamente, así el tener una alta energía de activación en el material es algo muy deseado.



**Figura 5-16. Dependencia con temperatura de la conductividad  $\sigma(T)$  para las películas de *SiGe* depositadas a diferentes temperaturas sobre sustratos plásticos y Corning 1737. Nota: en la figura las líneas son sólo guías para los ojos.**

La Figura 5-16 permite visualizar la conductividad de los materiales a-SiGe:H y pm-SiGe:H que para los diferentes sustratos Corning 1737, PEN y Polyimide.



**Figura 5-17. Dependencia con temperatura de la conductividad  $\sigma(T)$  para las películas de *SiGe* depositadas a diferentes temperaturas sobre Teflón. Nota: en la figura las líneas son sólo guías para los ojos.**

La Figura 5-17 corresponde a la conductividad de a-SiGe:H y pm-SiGe:H sobre sustratos de teflón PTFE, es posible apreciar un comportamiento errático, debido a la transferencia de temperatura que es inadecuada. En la Figura 5-17 se tiene un total de 16 mediciones de las cuales 7 tienen tendencia a un comportamiento esperado, en tanto que de las otras 9 no es posible realizar cálculos y es por esta razón que en las siguientes tablas se encontrará el símbolo \* indicando que para tales muestras de Dupont Teflon PTFE el error al obtener  $E_a$  es alto y no se tomarán en cuenta tales resultados.

Las características de transporte extraídas desde los datos de conductividad en función de la temperatura son listadas desde la Tabla 5-2 hasta la Tabla 5-6. La Tabla 5-2 muestra los valores de energía de activación, coeficiente térmico de resistencia, conductividad a temperatura ambiente, pre-exponencial de conductividad, coeficiente de temperatura y energía de Fermi para los procesos 1235 y 1236. Se puede ver que para los sustratos de teflón 1 no se pudo obtener de manera adecuada las características eléctricas debido a problemas de transporte de temperatura y piezoeléctricos. En esta tabla se encuentra que la energía de activación más alta corresponde a películas sobre Corning 1737 del proceso 1235 que en otras palabras es lo mismo que decir a-SiGe:H fabricado a 80°C. En cuanto a TCR, este parámetro siempre estará ubicado en los análisis de las presentes tablas en donde se encuentre  $E_a$  gracias a la proporcionalidad directa que relaciona a ambas. La conductividad a temperatura ambiente de películas a-SiGe:H depositadas a 120°C sobre sustrato teflón 2 presenta un valor de  $2.76 \times 10^{-5} (\Omega \text{ cm})^{-1}$  que es el mayor visto en la tabla. Al observar los valores del pre-exponencial de conductividad, películas de silicio germanio amorfo depositadas sobre Corning poseen valores mayores que los de las películas depositadas sobre otros sustratos con una magnitud de  $19 (\Omega \text{ cm})^{-1}$ , mientras que para este parámetro películas sobre sustrato de teflón 2 tienen  $\sigma_0 = 1 (\Omega \text{ cm})^{-1}$ . Se encuentra que  $\chi$  presenta magnitudes más altas en las películas del proceso 1236 que en las del proceso 1235 al compararse para los mismos sustratos. Se observan mayores energías de Fermi en películas depositadas a 80°C que en las

depositadas a 120°C al cotejar los resultados cuando los sustratos son los mismos.

**Tabla 5-2. Parámetros obtenidos de la dependencia de la temperatura de la conductividad para los procesos 1235 y 1236, a-SiGe:H.**

Proceso	1235, $T_d = 80^\circ C$			1236, $T_d = 120^\circ C$		
Material	Corning 1737	Teflón2	Teflón1	Corning 1737	Teflón2	Teflón1
$E_a (eV)$	$0.35 \pm 2 \times 10^{-3}$	$0.33 \pm 0.01$	*	$0.32 \pm 2 \times 10^{-3}$	$0.27 \pm 0.01$	*
$TCR (K^{-1})$	0.045	0.034	*	0.042	0.036	*
$\sigma_{RT} \times 10^{-5} (\Omega \cdot cm)^{-1}$	2.58	1.54	*	2.28	2.76	*
$\sigma_0 (\Omega \cdot cm)^{-1}$	19	5	*	6	1	*
$\chi \times 10^{-4} (eV/K)$	2.04	3.15	*	3.02	4.91	*
$E_F (eV)$	0.29	0.24	*	0.23	0.12	*

La Tabla 5-3 muestra los valores de energía de activación  $E_a$ , coeficiente térmico de resistencia ( $TCR$ ), conductividad a temperatura ambiente  $\sigma_{RT}$ , pre-exponencial de conductividad  $\sigma_0$ , coeficiente de temperatura  $\chi$  y energía de Fermi  $E_F$  para los procesos 1237 y 1238. Son resultados eléctricos de películas de a-SiGe:H fabricadas a 160 y 200°C respectivamente. Para el proceso 1237 no fue posible obtener resultados en películas sobre teflón 1 y teflón 2, solamente con sustrato Corning se obtuvieron los valores de los parámetros. En contraste para el proceso 1238 se tienen resultados completos sobre cuatro sustratos. La  $E_a$  es mayor en películas sobre sustrato de Corning a  $T_d = 160^\circ C$  y por ende ocurre lo mismo con el  $TCR$ . La conductividad a temperatura ambiente más alta es encontrada en películas fabricadas a 200°C sobre Corning. Películas fabricadas a 160°C sobre sustrato Corning poseen un valor alto del pre-exponencial de conductividad. El menor coeficiente de temperatura es observado en el proceso 1237 sobre sustrato

Corning y un alto valor para  $\chi$  se aprecia en películas sobre sustrato de teflón 2 en el proceso 1238.

**Tabla 5-3. Parámetros obtenidos de la dependencia de la temperatura de la conductividad para los procesos 1237 y 1238, a-SiGe:H.**

Proceso	1237, $T_d = 160^\circ C$			1238, $T_d = 200^\circ C$			
	Corning 1737	Teflón2	Teflón1	Corning 1737	Polyimide	Teflón2	Teflón1
$E_a (eV)$	$0.33 \pm 2 \times 10^{-3}$	*	*	$0.29 \pm 5 \times 10^{-4}$	$0.31 \pm 3 \times 10^{-4}$	$0.21 \pm 4 \times 10^{-3}$	$0.25 \pm 0.01$
$TCR (K^{-1})$	0.042	*	*	0.037	0.040	0.027	0.033
$\sigma_{RT} \times 10^{-5} (\Omega \cdot cm)^{-1}$	18.12	*	*	29.5	15.14	5.9	10.55
$\sigma_0 (\Omega \cdot cm)^{-1}$	54	*	*	22	27	0.2	2
$\chi \times 10^{-4} (eV/K)$	1.14	*	*	1.89	1.71	6.16	3.92
$E_F (eV)$	0.3	*	*	0.23	0.26	0.03	0.13

En cuanto a la energía de Fermi, en películas sobre Corning y Polyimide se encuentran valores más altos si se les compara con la  $E_F$  de películas de a-SiGe:H depositadas a  $200^\circ C$  sobre sustratos de teflón.

La Tabla 5-4 muestra los valores de  $E_a$ ,  $TCR$ ,  $\sigma_{RT}$ ,  $\sigma_0$ ,  $\chi$  y  $E_F$  para el proceso 1239 que es una película de pm-SiGe:H fabricada a  $80^\circ C$ . Para este proceso ocurrió de la misma manera que en el proceso 1237 en cuanto a que no hay datos de los parámetros de películas sobre sustratos de teflón. Los valores eléctricos conseguidos para este proceso serán comparados con los de la Tabla 5-5 del proceso 1240 y así continuar con la manera de comparar que se traía con los resultados de las películas de a-SiGe:H.

**Tabla 5-4. Parámetros obtenidos de la dependencia de la temperatura de la conductividad para el proceso 1239, pm-SiGe:H.**

Proceso	1239, $T_d = 80^\circ C$		
Material	Corning 1737	Teflón2	Teflón1
$E_a (eV)$	$0.34 \pm 2 \times 10^{-3}$	*	*
$TCR (K^{-1})$	0.044	*	*
$\sigma_{RT} \times 10^{-5} (\Omega \cdot cm)^{-1}$	7.29	*	*
$\sigma_0 (\Omega \cdot cm)^{-1}$	40	*	*
$\chi \times 10^{-4} (eV/K)$	1.39	*	*
$E_F (eV)$	0.3	*	*

La Tabla 5-5 muestra los valores de energía de activación, coeficiente térmico de resistencia, conductividad a temperatura ambiente, pre-exponencial de conductividad, coeficiente de temperatura y energía de Fermi para el proceso 1240. La mayor energía de activación (y TCR) es vista en el proceso 1240 sobre sustrato Corning. Se encuentra que la más alta conductividad a temperatura ambiente pertenece a películas del proceso 1239 sobre sustrato Corning. Películas de pm-SiGe:H depositadas sobre sustratos PEN, Corning y Polyimide poseen valores del pre-exponencial de conductividad muy similares y son mayores que los que se tienen para las películas depositadas sobre los sustratos de teflón. Se aprecia una similitud en los resultados del coeficiente de temperatura cuando los sustratos son Corning, PEN y Polyimide y también similitud en cuanto a sus bajas magnitudes, que contrastan con los resultados cuando el sustrato es teflón 2, el cual muestra valores de  $\chi$  más elevados. Las energías de Fermi más altas se visualizan en películas depositadas sobre PEN, Polyimide y Corning, con sustratos de teflón, la  $E_F$  puede caer a valores incluso menores a la mitad de aquellos valores que se tienen con los otros sustratos.

**Tabla 5-5. Parámetros obtenidos de la dependencia de la temperatura de la conductividad para el proceso 1240, pm-SiGe:H.**

Proceso	1240, $T_d = 120^\circ\text{C}$				
	Corning	Teflón2	Teflón1	PEN	Polyimide
$E_a(eV)$	$0.37 \pm 2 \times 10^{-3}$	$0.28 \pm 0.01$	$0.32 \pm 2 \times 10^{-3}$	$0.36 \pm 2 \times 10^{-3}$	$0.36 \pm 3 \times 10^{-3}$
$TCR(K^{-1})$	0.047	0.036	0.042	0.046	0.046
$\sigma_{RT} \times 10^{-5}(\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$	3.57	1.5	1.48	5.65	5.29
$\sigma_0(\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$	51	0.5	4	55	54
$\chi \times 10^{-4}(eV/K)$	1.17	5.21	3.36	1.11	1.13
$E_F(eV)$	0.33	0.12	0.22	0.33	0.33

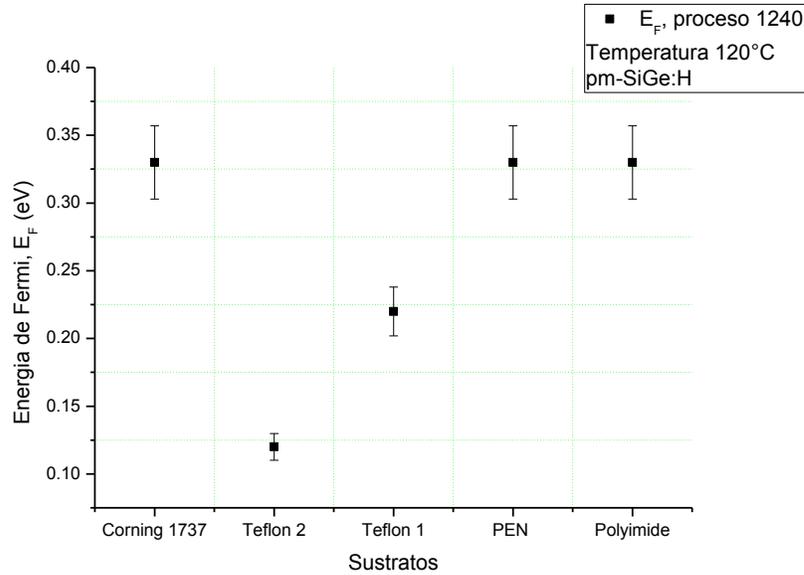
La Tabla 5-6 muestra los valores de energía de activación, coeficiente térmico de resistencia, conductividad a temperatura ambiente, pre-exponencial de conductividad, coeficiente de temperatura y energía de Fermi para los procesos 1241 y 1242. Para el proceso 1242 se obtuvieron los valores de los parámetros para películas depositadas sobre sustrato teflón 1, no así con el sustrato de teflón 2. En el proceso 1241 no es posible apreciar valor alguno en los sustratos de teflón. La energía de activación más alta se encuentra en películas depositadas a  $160^\circ\text{C}$  sobre Corning. En películas pm-SiGe:H depositadas a  $200^\circ\text{C}$  sobre sustrato Corning se observó la más alta conductividad a temperatura ambiente. El comportamiento para el pre-exponencial de conductividad parece no cambiar, ya que analizando lo encontrado en procesos anteriores sigue ocurriendo que cuando el sustrato es teflón, la magnitud de  $\sigma_0$  es pequeña, y para las películas depositadas sobre los demás sustratos se halla que  $\sigma_0$  es mayor y con sus magnitudes casi iguales. La tendencia del coeficiente de temperatura en general para las películas pm-SiGe:H es hacia magnitudes pequeñas para los sustratos PEN, Corning y Polyimide y más altas cuando el sustrato es teflón. Con la energía de Fermi también se puede afirmar que las magnitudes más altas están en

películas depositadas sobre los sustratos Corning, PEN y Polyimide y disminuyen en películas sobre sustratos de teflón.

**Tabla 5-6. Parámetros obtenidos de la dependencia de la temperatura de la conductividad para los procesos 1241 y 1242, pm-SiGe:H.**

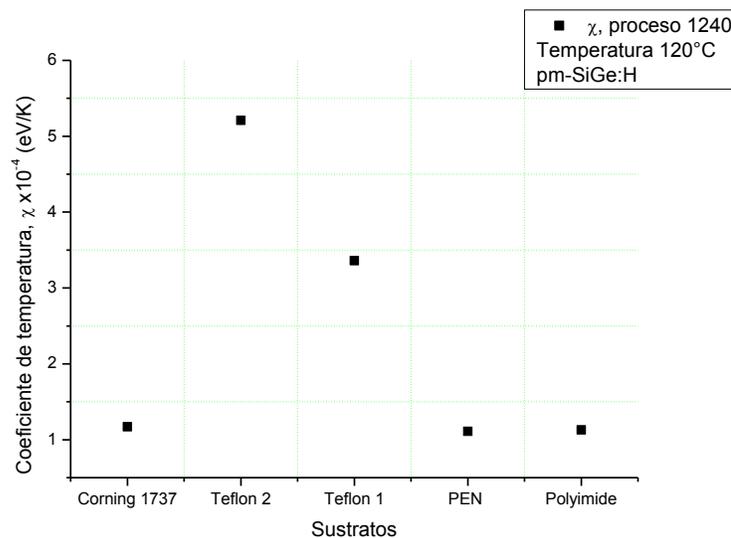
Proceso	1241, $T_d = 160^\circ\text{C}$			1242, $T_d = 200^\circ\text{C}$			
	Corning	Teflón 2	Teflón 1	Corning	Teflón 2	PEN	Teflón 1
$E_a(eV)$	$0.410 \pm 0.003$	*	*	$0.360 \pm 0.001$	*	$0.370 \pm 0.001$	$0.320 \pm 0.002$
$TCR(K^{-1})$	0.052	*	*	0.047	*	0.047	0.041
$\sigma_{RT} \times 10^{-5}(\Omega \cdot cm)^{-1}$	0.57	*	*	3.15	*	2.2	0.86
$\sigma_0(\Omega \cdot cm)^{-1}$	35	*	*	39	*	31	2
$\chi \times 10^{-4}(eV/K)$	1.51	*	*	1.4	*	1.62	4.11
$E_F(eV)$	0.36	*	*	0.32	*	0.32	0.2

La Figura 5-18 muestra la dependencia de la energía de Fermi con el sustrato para películas de pm-SiGe:H fabricadas a  $120^\circ\text{C}$ . Los valores más altos son vistos cuando los sustratos son Corning 1737, PEN y Polyimide. Los valores más bajos de  $E_F$  se encuentran en sustrato teflón 2 y en un nivel intermedio se posiciona el sustrato de teflón 1.



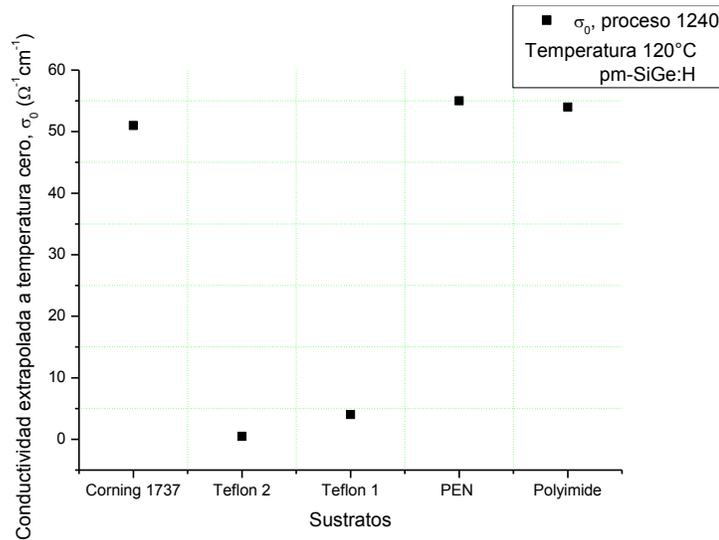
**Figura 5-18. Energía de Fermi de las películas de Silicio Germanio polimorfo hidrogenado pm-SiGe:H sobre sustratos Corning 1737, Teflon, PEN y Polyimide.**

La Figura 5-19 muestra los resultados del coeficiente de temperatura ( $\chi$ ), en ella las magnitudes más bajas corresponden a Corning, PEN y Polyimide, de nuevo las muestras sobre Teflón 1 permanecen en valores intermedios y las magnitudes mayores corresponden a muestras sobre Teflón 2.



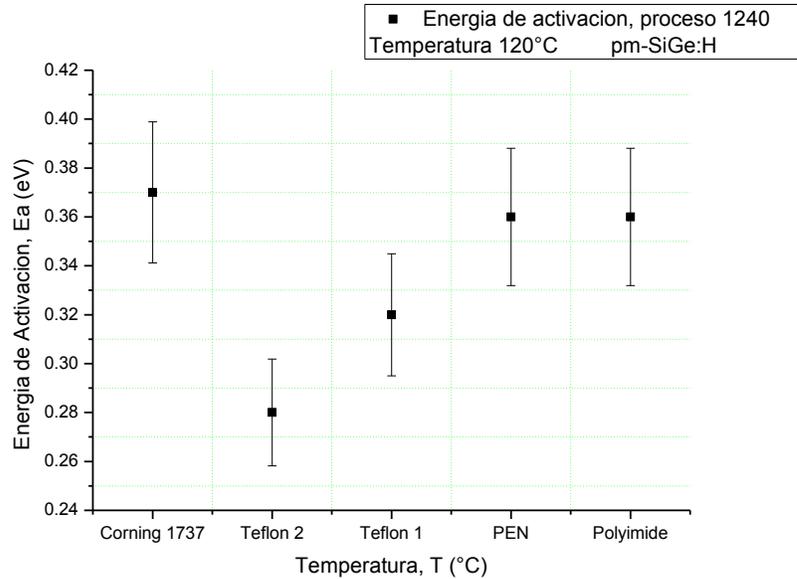
**Figura 5-19. Coeficiente de temperatura de las películas de Silicio Germanio polimorfo hidrogenado pm-SiGe:H sobre sustratos Corning 1737, Teflon, PEN y Polyimide.**

La Figura 5-20 muestra la dependencia del pre exponencial de conductividad con los sustratos para películas pm-SiGe:H fabricadas a 120°C. Se puede notar en esta gráfica que los valores más altos y con magnitudes muy cercanas están con los sustratos Corning 1737, PEN y Polyimide. Cuando los sustratos son teflón 1 y teflón 2 se aprecian los valores más bajos de  $\sigma_0$ .



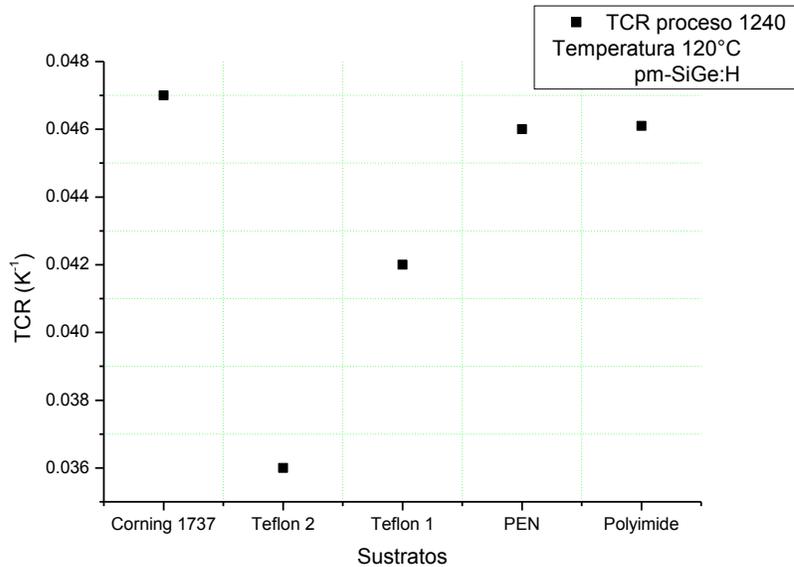
**Figura 5-20. Conductividad extrapolada a temperatura cero de las películas de Silicio Germanio polimorfo hidrogenado pm-SiGe:H sobre sustratos Corning 1737, Teflon, PEN y Polyimide.**

La Figura 5-21 es un gráfico de la dependencia de la energía de activación con los diferentes sustratos para películas pm-SiGe:H pertenecientes al proceso 1240. La  $E_a$  más baja es vista en películas sobre sustrato teflón 2. La mayor  $E_a$  se encuentra cuando el sustrato es Corning 1737 aunque su valor no está muy por arriba de los encontrados con los sustratos de PEN y Polyimide. La  $E_a$  encontrada en películas sobre sustrato teflón 1 posee un valor intermedio.



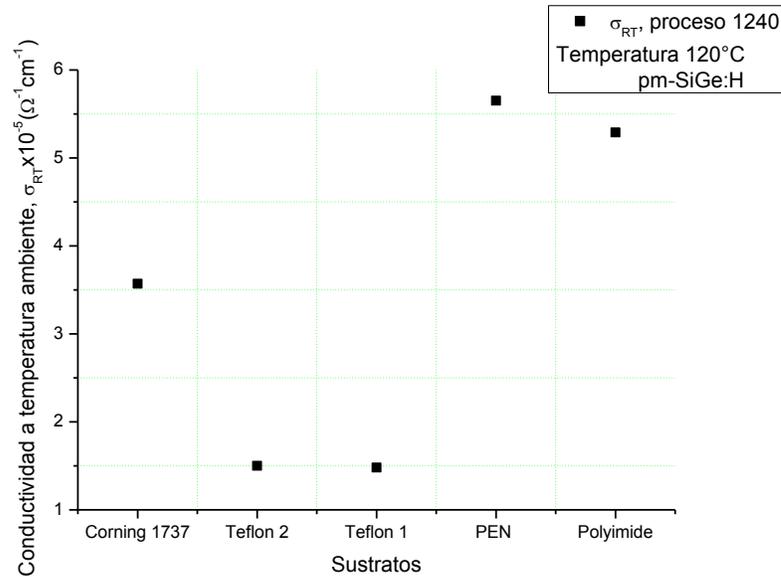
**Figura 5-21. Energía de activación de las películas de Silicio Germanio polimorfo hidrogenado pm-SiGe:H sobre sustratos Corning 1737, Teflon, PEN y Polyimide.**

La Figura 5-22 muestra la dependencia del coeficiente térmico de resistencia con los sustratos para películas de pm-SiGe:H del proceso 1240. Este gráfico no difiere mucho del ya visto para la energía de activación. El TCR más alto es observado cuando el sustrato es Corning 1737 y ligeramente por debajo se encuentran los valores de TCR para las películas sobre los sustratos de PEN y Polyimide. En la zona intermedia están los resultados para películas sobre Teflón 1 y las magnitudes más bajas están en películas depositadas sobre sustrato teflón 2.



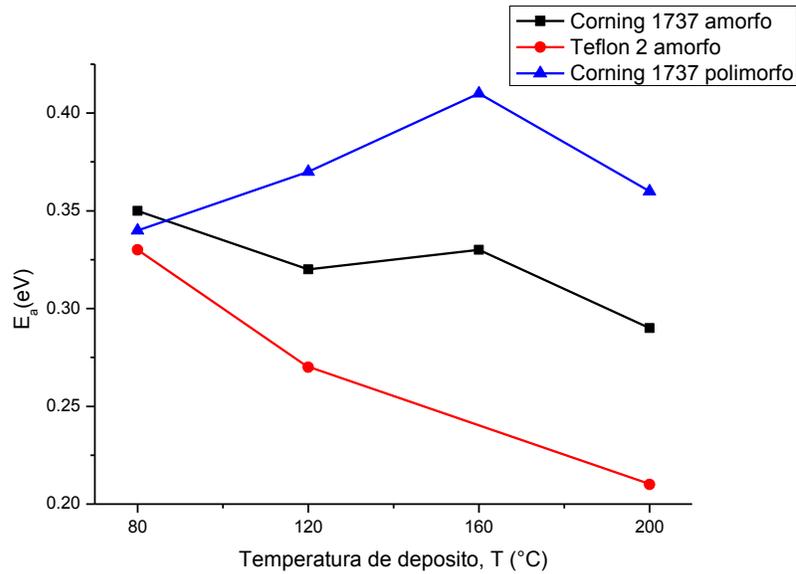
**Figura 5-22. Coeficiente térmico de resistencia de las películas de Silicio Germanio polimorfo hidrogenado pm-SiGe:H sobre sustratos Corning 1737, Teflon, PEN y Polyimide.**

En la Figura 5-23 se aprecia que la magnitud de la conductividad a temperatura ambiente ( $\sigma_{RT}$ ) más baja la poseen las muestras sobre Teflón, sobre Corning los resultados pasaron a encontrarse en valores intermedios y los valores más altos de conductividad son para PEN y Polyimide. Después de que se realizaron los procesos de depósito y al inicio de las caracterizaciones fueron realizadas mediciones  $I(U)$  sobre las películas de pm-SiGe:H pertenecientes al proceso 1240 ( $T_d=120^\circ\text{C}$ ) sin que faltase sustrato alguno. Al analizar las seis gráficas anteriores se pudo apreciar un patrón muy similar en los resultados correspondientes a las películas de pm-SiGe:H sobre sustratos de Corning 1737, PEN y Polyimide. Debido a la gran cantidad de muestras y al tiempo que cada medición requería, las mediciones  $I(U)$  para los restantes siete procesos se llevaron a cabo sobre Corning glass dejando a un lado las muestras con sustratos de PEN y Polyimide. Dicho lo anterior, se realizaron mediciones  $I(U)$  para las muestras sobre Corning glass 1737, Teflon 1 y Teflon 2 para cada proceso.



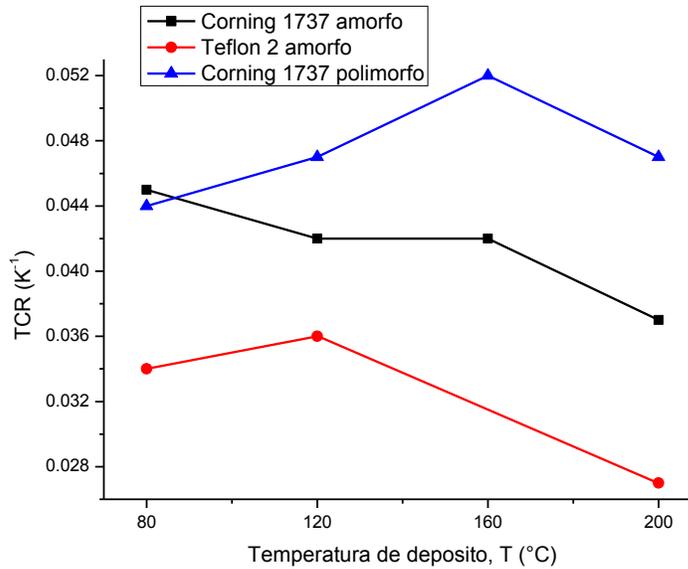
**Figura 5-23. Conductividad a temperatura ambiente de las películas de Silicio Germanio polimorfo hidrogenado pm-SiGe:H sobre sustratos Corning 1737, Teflon, PEN y Polyimide.**

La Figura 5-24 muestra la energía de activación en función de la temperatura de depósito de las películas depositadas sobre sustratos de Corning 1737 y Teflón 2 de los procesos 1235 a 1238, es decir material a-SiGe:H, y también películas depositadas sobre sustratos de Corning 1737 de los procesos 1239 a 1242 que corresponden al material pm-SiGe:H. Para las películas de a-SiGe:H sobre sustrato Teflón 2 conforme incrementa la temperatura, la energía de activación se hace menor, así a  $80^\circ\text{C}$   $E_a = 0.33 \text{ eV}$  y cuando la temperatura es  $200^\circ\text{C}$ ,  $E_a = 0.21 \text{ eV}$  que a su vez es la más baja de todas las energías obtenidas. El valor más alto de  $E_a$  es encontrado en películas de pm-SiGe:H fabricadas a  $160^\circ\text{C}$  sobre sustrato Corning 1737 y es  $E_a = 0.41 \text{ eV}$ . La energía de activación en las muestras de pm-SiGe:H sobre Corning incrementa en el rango  $80\text{-}160^\circ\text{C}$  y decrece entre  $160$  y  $200^\circ\text{C}$ . Para las muestras de a-SiGe:H sobre Corning 1737, la magnitud de  $E_a$  es mayor que en las muestras de a-SiGe:H sobre Teflón 2 aunque menores a las de pm-SiGe:H sobre Corning y su tendencia es que a mayor temperatura, menor es el valor de  $E_a$ , su valor más alto se encuentra cuando  $T_d = 80^\circ\text{C}$  siendo  $E_a = 0.35 \text{ eV}$  y cuando  $T_d = 200^\circ\text{C}$  entonces  $E_a = 0.29 \text{ eV}$ .



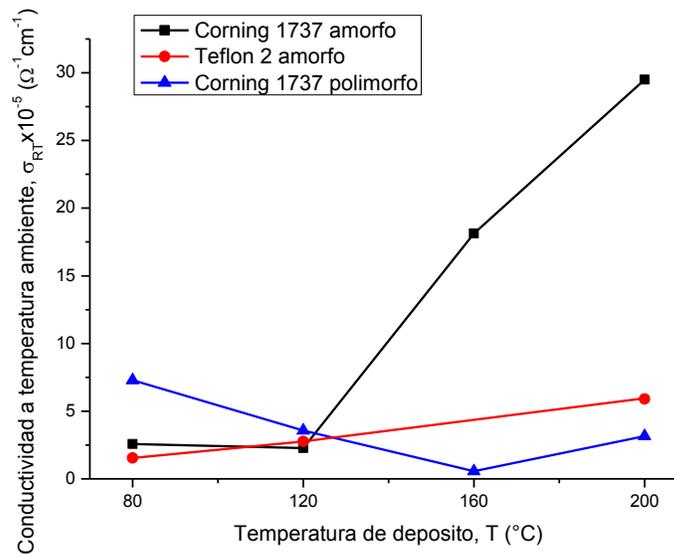
**Figura 5-24. Energía de activación de a-SiGe:H (sobre sustratos de Corning 1737 y Teflon) y pm-SiGe:H (sobre sustrato Corning 1737) para los procesos 1235 a 1242. En la figura las líneas son sólo guías para la vista.**

La Figura 5-25 muestra el cambio del coeficiente térmico de resistencia (TCR) con la temperatura de depósito para todos los procesos (1235 a 1242). El valor más alto encontrado es  $0.052 K^{-1}$  en  $T = 160^{\circ}C$  en muestras de pm-SiGe:H sobre sustrato Corning 1737. La tendencia del TCR con este sustrato es a incrementar, visto así hasta  $T = 160^{\circ}C$ . Entre 160 y  $200^{\circ}C$  el TCR disminuye. El valor más bajo fue hallado en películas de a-SiGe:H sobre Teflón 2 en  $T = 200^{\circ}C$  con una magnitud de  $0.027 K^{-1}$ . En general en las películas amorfas el TCR disminuye al incrementar  $T_d$ . En las películas a-SiGe:H sobre Corning 1737 cuando  $T = 80^{\circ}C$ ,  $TCR = 0.045 K^{-1}$  decreciendo a  $TCR = 0.037 K^{-1}$  cuando  $T = 200^{\circ}C$ .



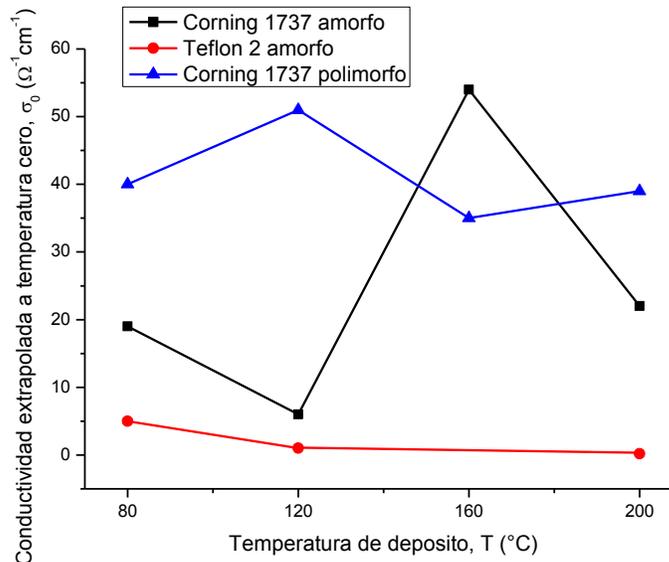
**Figura 5-25. Coeficiente térmico de resistencia de a-SiGe:H (sobre sustratos de Corning 1737 y Teflon) y pm-SiGe:H (sobre sustrato Corning 1737) para los procesos 1235 a 1242. En la figura las líneas son sólo guías para la vista**

La Figura 5-26 es un gráfico de  $\sigma_{RT}$  vs  $T_d$  para los procesos 1235 a 1242. La conductividad a temperatura ambiente de películas a-SiGe:H tienden a incrementar con la temperatura, mientras que con películas pm-SiGe:H la tendencia es a disminuir al incrementar la temperatura. La conductividad más alta es  $\sigma_{RT} = 2.95 \times 10^{-4} \Omega^{-1} cm^{-1}$  y se encuentra en películas de a-SiGe:H sobre Corning 1737 a una temperatura de 200°C. La conductividad más baja es  $\sigma_{RT} = 5.7 \times 10^{-6} \Omega^{-1} cm^{-1}$  y es obtenida para las películas pm-SiGe:H sobre Corning 1737 cuando  $T_d = 160^\circ C$ . La mayoría de los valores de  $\sigma_{RT}$  son menores a  $\sigma_{RT} = 7.29 \times 10^{-5} \Omega^{-1} cm^{-1}$ .



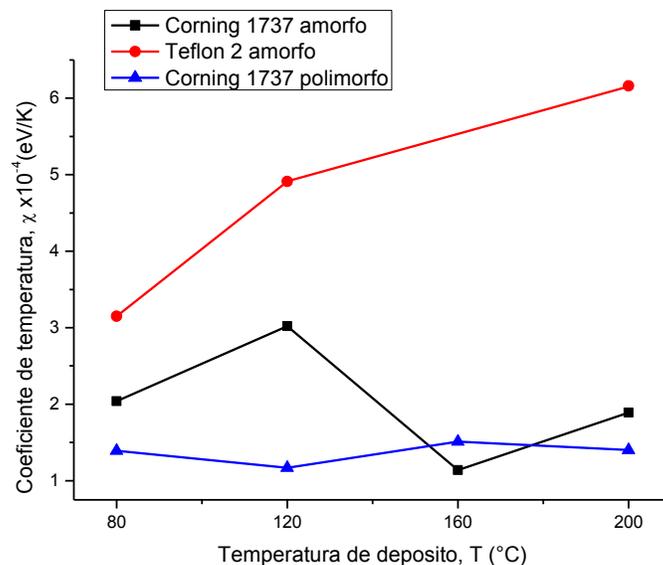
**Figura 5-26. Conductividad a temperatura ambiente de a-SiGe:H (sobre sustratos de Corning 1737 y Teflon) y pm-SiGe:H (sobre sustrato Corning 1737) para los procesos 1235 a 1242. En la figura las líneas son sólo guías para la vista**

La Figura 5-27 esboza el cambio del pre-exponencial de conductividad  $\sigma_0$  con  $T_d$  para los procesos 1235 a 1242. Es claramente observado que los valores más bajos corresponden a películas a-SiGe:H sobre sustrato Teflón 2, hallándose un mínimo en  $\sigma_0 = 0.2 \Omega^{-1}cm^{-1}$  cuando  $T = 200^\circ C$ . En estas mismas películas sobre el mismo sustrato de Teflón la conductividad disminuye con la temperatura. Para las películas amorfas y polimorfas sobre Corning 1737 no es posible determinar una tendencia definida, lo que sí es claro es que en conjunto los valores más altos para  $\sigma_0$  corresponden a películas pm-SiGe:H sobre Corning 1737. Las mayores fluctuaciones son observadas en a-SiGe:H sobre Corning 1737 y cuando  $T = 160^\circ C$ ,  $\sigma_0 = 54 \Omega^{-1}cm^{-1}$  y este último valor es el más alto de todos los puntos sobre la gráfica.

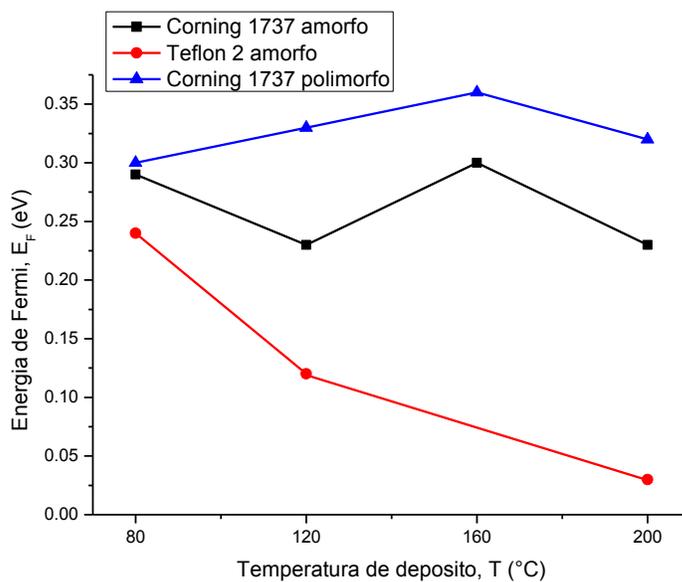


**Figura 5-27. Conductividad extrapolada a temperatura cero de a-SiGe:H (sobre sustratos de Corning 1737 y Teflon) y pm-SiGe:H (sobre sustrato Corning 1737) para los procesos 1235 a 1242. En la figura las líneas son sólo guías para la vista**

La Figura 5-28 es un gráfico coeficiente de temperatura vs temperatura de depósito para los procesos 1235 a 1242. En la figura los resultados son mostrados para películas de a-SiGe:H sobre los sustratos Corning 1737 y teflón 2 y también los resultados para pm-SiGe:H sobre sustrato Corning 1737. Para a-SiGe:H sobre sustrato Teflón 2,  $\chi$  incrementa con  $T_d$ , teniendo un máximo de  $\chi = 6.16 \times 10^{-4} \text{ eVK}^{-1}$  en  $T_d = 200^\circ\text{C}$ , y un mínimo de  $\chi = 3.15 \times 10^{-4} \text{ eVK}^{-1}$  en  $T_d = 80^\circ\text{C}$ . Las películas pm-SiGe:H sobre Corning 1737 muestran valores con poca variación para las diferentes temperaturas, poseen su valor más alto a  $T_d = 160^\circ\text{C}$  y su magnitud es  $\chi = 1.51 \times 10^{-4} \text{ eVK}^{-1}$  y su valor más pequeño  $\chi = 1.17 \times 10^{-4} \text{ eVK}^{-1}$  es encontrado en  $T_d = 120^\circ\text{C}$ . Las películas a-SiGe:H sobre Corning 1737 poseen un máximo  $\chi = 3.02 \times 10^{-4} \text{ eVK}^{-1}$  cuando  $T_d = 120^\circ\text{C}$  y valor mínimo  $\chi = 1.14 \times 10^{-4} \text{ eVK}^{-1}$  en  $T_d = 160^\circ\text{C}$ .



**Figura 5-28. Coeficiente de temperatura de a-SiGe:H (sobre sustratos de Corning 1737 y Teflon) y pm-SiGe:H (sobre sustrato Corning 1737) para los procesos 1235 a 1242. En la figura las líneas son sólo guías para la vista**



**Figura 5-29. Energía de Fermi de a-SiGe:H (sobre sustratos de Corning 1737 y Teflon) y pm-SiGe:H (sobre sustrato Corning 1737) para los procesos 1235 a 1242. En la figura las líneas son sólo guías para la vista**

La Figura 5-29 muestra el cambio de la energía de Fermi con la temperatura de depósito para películas de a-SiGe:H sobre sustratos Corning 1737 y teflón 2, y también para películas de pm-SiGe:H depositadas sobre Corning 1737. En películas a-SiGe:H sobre sustrato Teflón 2 la energía de Fermi disminuye cuando la temperatura aumenta. En  $T_d = 80^\circ\text{C}$ ,  $E_F = 0.24\text{ eV}$  y cuando  $T_d = 200^\circ\text{C}$ ,  $E_F = 0.03\text{ eV}$  y este valor de  $E_F$  es el menor de todos los puntos sobre la gráfica. La  $E_F$  no tiene una tendencia definida en películas a-SiGe:H sobre Corning 1737, poseen su máximo valor  $E_F = 0.3\text{ eV}$  en  $T_d = 160^\circ\text{C}$  y su mínimo  $E_F = 0.23\text{ eV}$  a las temperaturas  $T_d = 120^\circ\text{C}$  y  $200^\circ\text{C}$ . La  $E_F$  en las películas de pm-SiGe:H exhibe un aumento con  $T_d$  entre  $T_d = 80^\circ\text{C}$  y  $160^\circ\text{C}$  y una disminución entre  $T_d = 160^\circ\text{C}$  y  $200^\circ\text{C}$ . El máximo para estas películas polimorfas es  $E_F = 0.36\text{ eV}$  en  $T_d = 160^\circ\text{C}$  y su mínimo es  $E_F = 0.3\text{ eV}$  cuando  $T_d = 80^\circ\text{C}$ .

#### **5.4 Resultados de Caracterización de morfología superficial por medio de Microscopía de Fuerza Atómica (AFM)**

En esta sección se presentan los resultados de las mediciones hechas por medio de la microscopía de fuerza atómica para estudiar las diferencias en cuanto a rugosidad de los distintos sustratos y también la diferencia en otros parámetros de la morfología de la superficie. Si es posible, se revelará diferencias en la morfología debidas a las diferentes temperaturas de depósito usadas en la fabricación hacia el final de la sección.

Las figuras (Figura 5-30 a Figura 5-33) corresponden a vistas en tres dimensiones de las superficies de las películas de a-SiGe:H y de pm-SiGe:H sobre los sustratos Corning 1737, PEN, Polyimide, Teflón 1, Teflón 2 y c-Si. Las dos primeras figuras corresponden a a-SiGe:H, en las filas son puestos los valores de la temperatura de depósito. Son puestas las imágenes de los sustratos de referencia ya que las películas depositadas comúnmente pueden tener superficies que se ven directamente afectadas por la forma de su respectiva referencia. Observando las gráficas del material a-SiGe:H es posible decir que cuando el sustrato es Teflón 1 con el incremento de la temperatura de fabricación, la superficie tiende a ser más rugosa. Ahora de la Figura 5-32 y Figura 5-33 que son vistas en tres dimensiones

que corresponden a películas de pm-SiGe:H, cuando los sustratos son Corning 1737 y c-Si al incrementar la temperatura de depósito, se encuentra que las superficies se hacen menos rugosas. Para los restantes sustratos a simple vista es difícil determinar una tendencia.

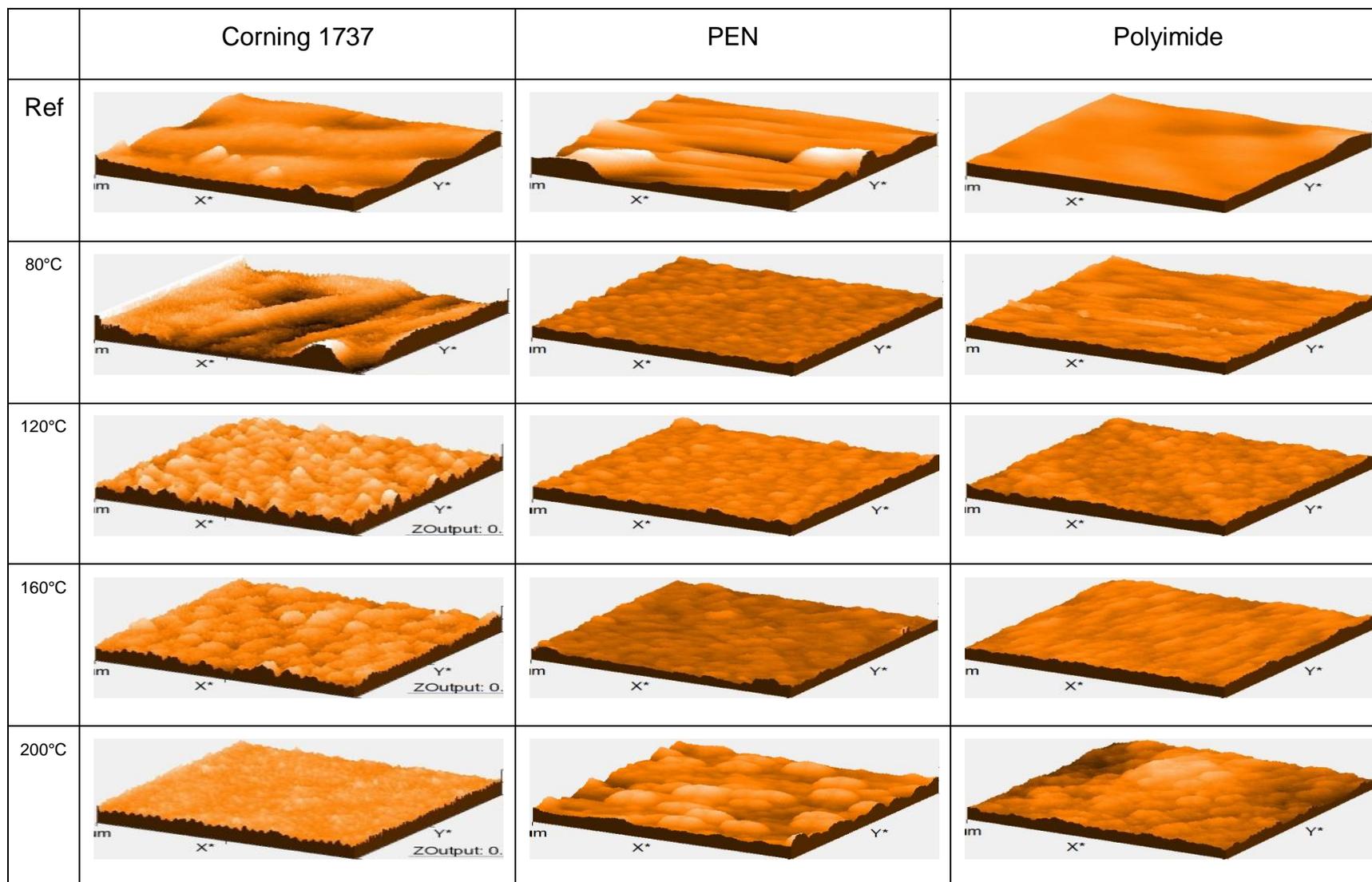


Figura 5-30. Vistas 3D obtenidas por AFM de a-SiGe:H sobre sustratos Corning, PEN y Polyimide.

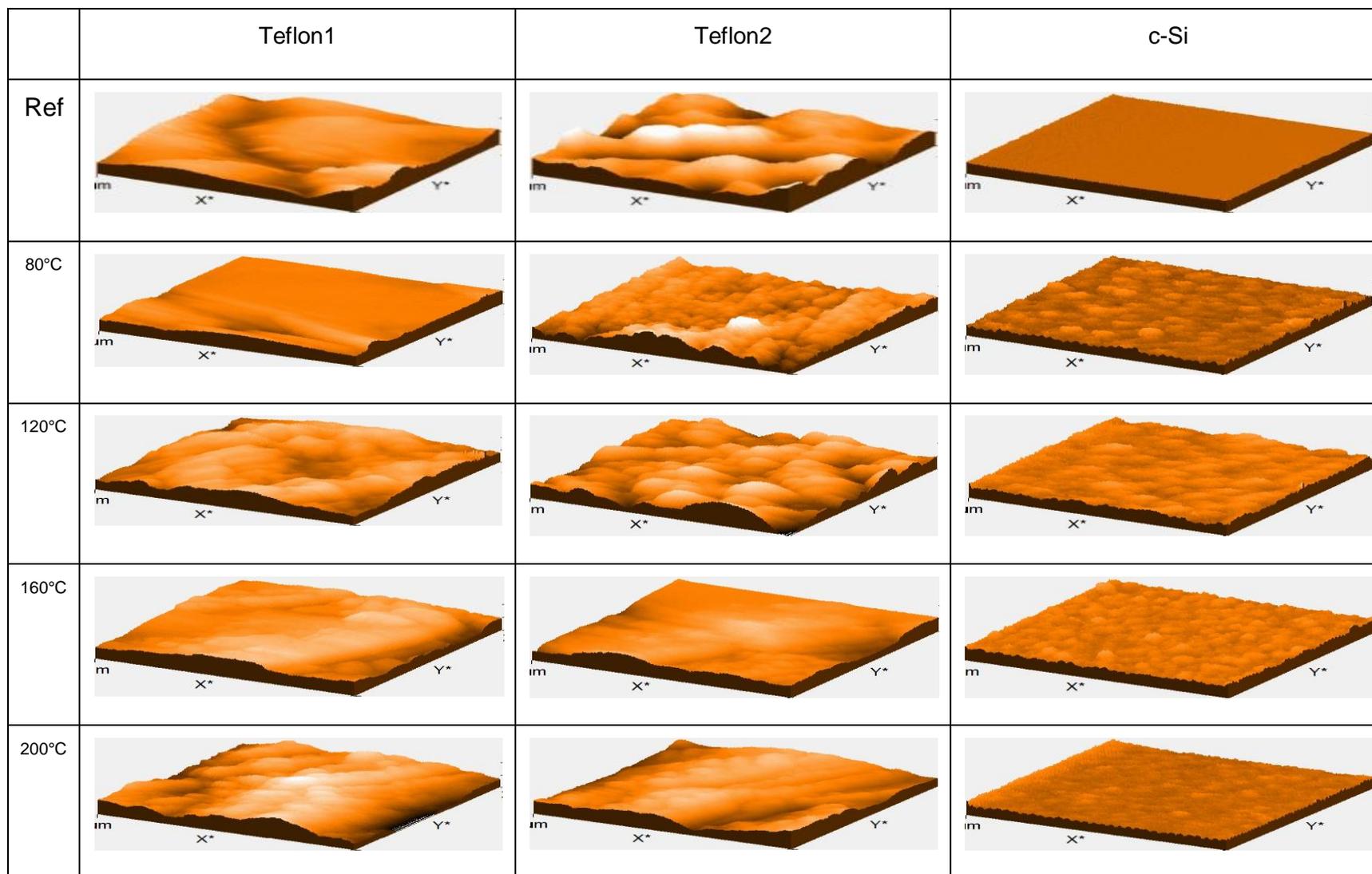


Figura 5-31. Vistas 3D obtenidas por AFM de a-SiGe:H sobre sustratos Teflon y c-Si.

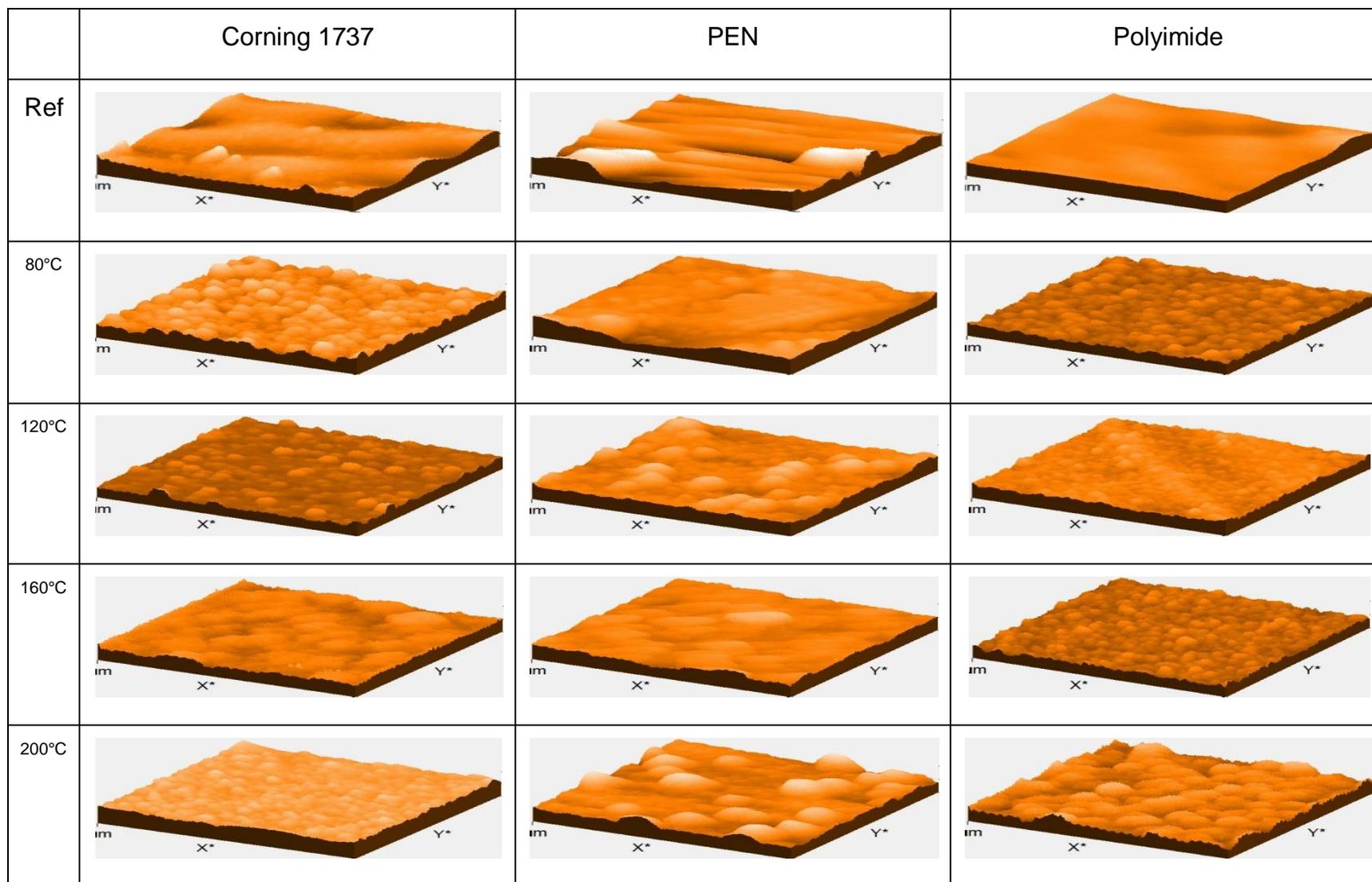


Figura 5-32. Vistas 3D obtenidas por AFM de pm-SiGe:H sobre sustratos Corning, PEN y Polyimide.

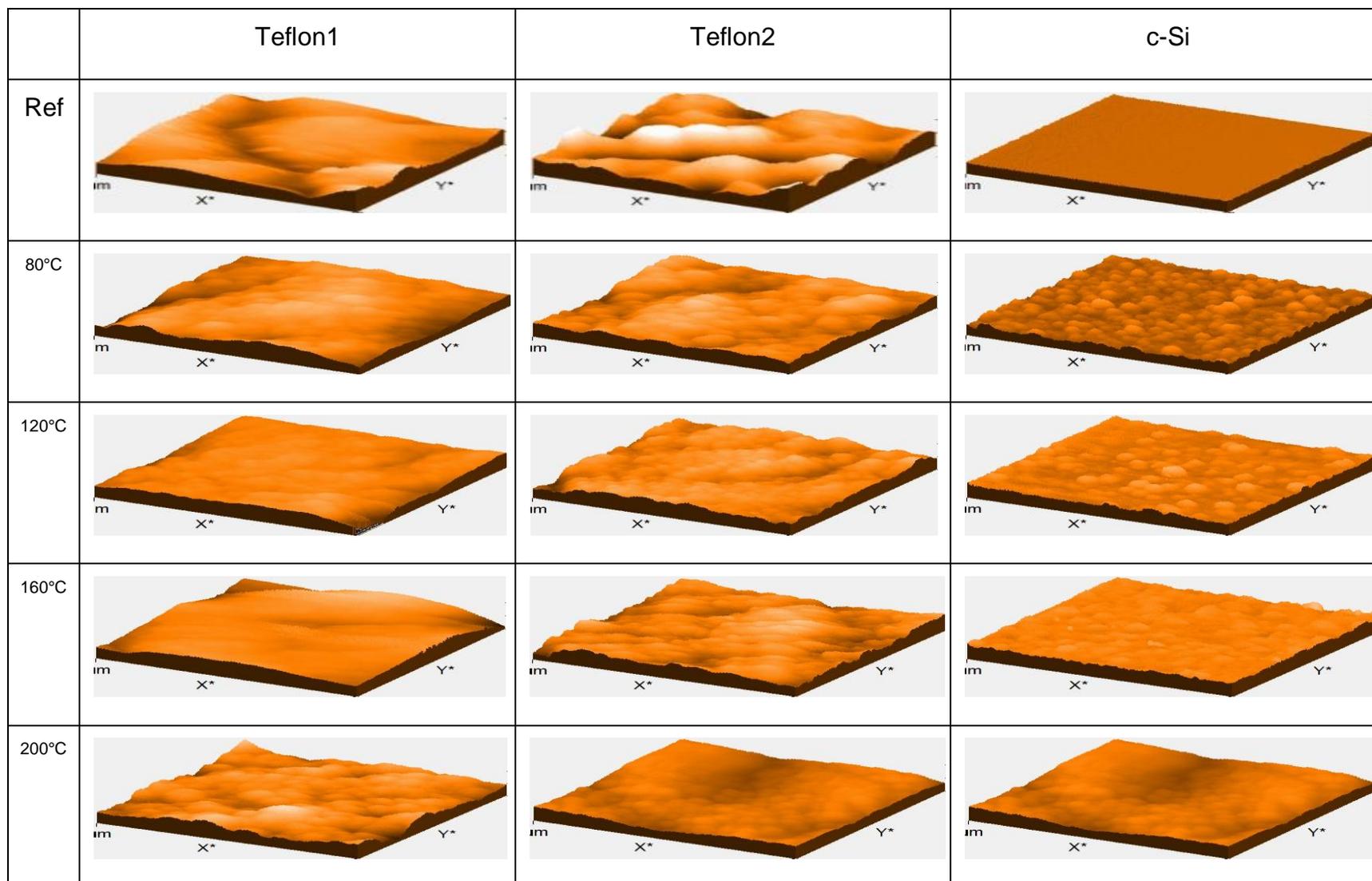


Figura 5-33. Vistas 3D obtenidas por AFM de pm-SiGe:H sobre sustratos Teflon y c-Si.

La Tabla 5-7 muestra los valores de los parámetros morfológicos de interés en el presente trabajo para cada uno de los sustratos de referencia utilizados. Los parámetros son: rugosidad rms, *skewness* que en español se asemeja más a falta de simetría y da la medida de la simetría de una distribución alrededor de un nivel superficial medio. La *curtosis* también fue hallada y describe la aleatoriedad del perfil superficial relativa a aquella de una superficie de distribución Gaussiana. También están las magnitudes en la tabla para los diámetros y alturas promedio de grano. Los sustratos son: Corning 1737, PEN, Polyimide, Teflón 1 y 2, así como c-Si.

**Tabla 5-7. Parámetros de la morfología superficial de los sustratos de referencia. Obtenidos de mediciones AFM.**

<b>Sustratos de Referencia</b>	<b>Rq[nm]</b>	<b>Skewness</b>	<b>Curtosis</b>	<b>Lc[nm]</b>	<b>&lt;H&gt; [nm]</b>	<b>&lt;D&gt; [nm]</b>
Corning 1737	5.1	-0.1	5.1	159	7.4	144
PEN Dupont Teijin Teonex Q51	18.1	3.8	3.2	127	8.6	88
Polyimide Dupont kapton	3.9	0.4	5.8	127	4.29	209
Teflon1 Dupont Teflon PTFE	20.1	0.7	5.9	223	26.4	222
Teflon2 Dupont Teflon PTFE	20.4	0.03	4.9	159	21.1	242
Silicio tipo P <100>	4.5	1.5	3.0	32	6.3	65

En la Tabla 5-7 se aprecian altas rugosidades de los sustratos teflón y PEN y poca rugosidad en los sustratos Corning 1737, Polyimide y c-Si. En cuanto a los resultados de *curtosis* se puede decir que las superficies más suaves son PEN y c-Si. El sustrato con menor longitud de correlación es el silicio cristalino. Los sustratos de teflón poseen las alturas promedio más altas y la más baja corresponde a c-Si.

La Tabla 5-8 comprende los resultados de mediciones de rugosidad para películas de a-SiGe:H fabricadas a 80°C (proceso 1235) y a 120°C (proceso 1236). Las rugosidades más bajas son encontradas en el proceso 1236 cuando los sustratos

son Corning 1737 y c-Si. En general los valores de “*skewness*” no difieren mucho para los diferentes sustratos y sólo hay valores negativos para películas del proceso 1236 sobre sustrato de teflón 1. El valor de curtosis en películas del proceso 1235 depositadas sobre sustrato teflón 2 es de 10.3, mientras que en películas del proceso 1235 sobre sustrato PEN junto con películas del proceso 1236 depositadas sobre sustrato Polyimide la curtosis vale 3.4. La mayor longitud de correlación es vista en el proceso 1236 cuando el sustrato corresponde a teflón 1 y la menor longitud de correlación se aprecia en el proceso 1235 sobre sustrato c-Si.

**Tabla 5-8. Parámetros de rugosidad para los procesos 1235 y 1236 (a-SiGe:H)**

Material	1235, $T_d = 80^\circ\text{C}$				1236, $T_d = 120^\circ\text{C}$			
	Rq[nm]	Skewness	Curtosis	Lc[nm]	Rq[nm]	Skewness	Curtosis	Lc[nm]
Corning 1737	3.4	1.2	6.1	127	1.7	0.4	3.5	64
PEN Dupont Teijin Teonex Q51	2.5	0.4	3.4	63	3.0	0.9	4.9	63
Polyimide Dupont kapton	2.9	0.1	5.8	63	2.6	0.4	3.4	64
Teflon1 Dupont Teflon PTFE	9.1	0.2	8.1	127	14.8	-0.7	4.4	222
Teflon2 Dupont Teflon PTFE	11.6	1.0	10.3	127	17.2	0.5	5.5	127
Silicio tipo P <100>	3.0	0.8	4.5	32	1.5	0.4	3.8	63

La Tabla 5-9 muestra los valores de los parámetros obtenidos del análisis de grano en películas a-SiGe:H depositadas a temperaturas 80 y 120°C que corresponden a los procesos 1235 y 1236 respectivamente. La altura media más baja es encontrada en el proceso 1236 en películas sobre sustrato c-Si. La altura más baja encontrada en sustratos plásticos pertenece a películas del proceso 1235 depositadas sobre sustrato teflón 1 y la mayor altura media es vista cuando el sustrato es teflón 2 del proceso 1235. En películas sobre PEN del proceso 1235 se encuentra el diámetro promedio más bajo, en tanto que el más alto se logra apreciar en películas del proceso 1236 depositadas sobre teflón 1.

**Tabla 5-9. Resultados de análisis de grano para los procesos 1235 y 1236 (a-SiGe:H)**

Material	1235, $T_d = 80^\circ C$		1236, $T_d = 120^\circ C$	
	<H> [nm]	<D> [nm]	<H> [nm]	<D> [nm]
Corning 1737	3.2	156	2.2	101
PEN Dupont Teijin Teonex Q51	4.8	88	3.9	105
Polyimide Dupont kapton	2.8	140	4.3	115
Teflon1 Dupont Teflon PTFE	2.6	168	6.6	184
Teflon2 Dupont Teflon PTFE	8.2	120	7.2	166
Silicio tipo P <100>	5.1	99	2.0	130

La Tabla 5-10 muestra los resultados de mediciones de rugosidad para películas de a-SiGe:H fabricadas a 160°C (proceso 1237) y a 200°C (proceso 1238) para varios sustratos. La rugosidad más baja es vista cuando el sustrato es Corning 1737 del proceso 1238 y la rugosidad con menor magnitud cuando el sustrato es plástico es encontrada en el proceso 1237 cuando el sustrato es Polyimide.

**Tabla 5-10. Parámetros de rugosidad para los procesos 1237 y 1238 (a-SiGe:H)**

Material	1237, $T_d = 160^\circ C$				1238, $T_d = 200^\circ C$			
	Rq[nm]	Skewness	Curtosis	Lc[nm]	Rq[nm]	Skewness	Curtosis	Lc[nm]
Corning 1737	1.4	0.6	3.7	64	0.9	0.3	3.2	32
PEN Dupont Teijin Teonex Q51	2.7	1.0	7.4	64	14.1	0.9	3.2	127
Polyimide Dupont kapton	2.3	0.1	3.1	63	3.8	-0.2	3.8	158
Teflon1 Dupont Teflon PTFE	9.0	-0.4	3.8	158	11.4	0.3	3.3	159
Teflon2 Dupont Teflon PTFE	16.4	-0.3	5.5	254	14.2	0.5	5.0	158
Silicio tipo P <100>	1.2	0.8	4.6	64	1.1	0.4	3.5	32

En general los valores de skewness permiten establecer que estos dos procesos poseen superficies que tienen buena simetría alrededor de la altura media. Al analizar la curtosis se aprecia que en películas del proceso 1237 depositadas sobre PEN, se tiende a una superficie dominada por picos agudos.

La Tabla 5-11 muestra los valores de los parámetros obtenidos del análisis de grano en películas a-SiGe:H de los procesos 1237 (160°C) y 1238 (200°C). Las rugosidades más bajas son observadas cuando los sustratos son Corning glass 1737 y c-Si para ambos procesos y la mayor rugosidad es vista en películas del proceso 1238 cuando el sustrato es PEN. La mejor rugosidad hallada sobre sustratos plásticos es vista cuando el sustrato es polyimide en ambos procesos. Los valores del diámetro promedio para estos dos procesos están muy dispersos, el menor diámetro se encuentra en películas fabricadas a 200°C depositadas sobre Corning glass 1737 y el mayor diámetro corresponde a películas del proceso 1238 depositadas sobre teflón 1.

**Tabla 5-11. Resultados de análisis de grano para los procesos 1237 y 1238 (a-SiGe:H)**

Material	1237, $T_d = 160^\circ C$		1238, $T_d = 200^\circ C$	
	<H> [nm]	<D> [nm]	<H> [nm]	<D> [nm]
Corning 1737	2.0	140	1.0	98
PEN Dupont Teijin Teonex Q51	3.9	120	20.8	197
Polyimide Dupont kapton	3.0	116	2.3	171
Teflon1 Dupont Teflon PTFE	6.5	184	8.1	214
Teflon2 Dupont Teflon PTFE	13.0	174	11.6	177
Silicio tipo P <100>	1.4	119	1.0	102

La Tabla 5-12 comprende los resultados de mediciones de rugosidad para películas de pm-SiGe:H fabricadas a  $80^\circ C$  (proceso 1239) y a  $120^\circ C$  (proceso 1240) para varios sustratos. En la tabla es visto que la longitud de correlación posee valores más altos cuando los sustratos son teflón 1, teflón 2 y PEN. En películas depositadas sobre los sustratos teflón 1 y Corning 1737 del proceso 1240 es supuesto (debido a sus valores de curtosis) que tienen una superficie dominada por picos más agudos que no serían apreciados en las películas depositadas sobre los demás sustratos. El comportamiento de la rugosidad parece no tener variación en todos los procesos ya que las rugosidades más bajas corresponden a los sustratos de Corning y c-Si, mientras que las rugosidades más altas pertenecen a películas sobre sustratos de teflón 1. Al analizar los valores de skewness en esta tabla se puede decir que los extremos de poros (valles) y granos están más alejados del nivel superficial medio en el proceso 1240 que lo que están en el proceso 1239.

**Tabla 5-12. Parámetros de rugosidad para los procesos 1239 y 1240 (pm-SiGe:H)**

Material	1239, $T_d = 80^\circ C$				1240, $T_d = 120^\circ C$			
	Rq[nm]	Skewness	Curtosis	Lc[nm]	Rq[nm]	Skewness	Curtosis	Lc[nm]
Corning 1737	3.2	0.6	3.5	63	1.7	2.0	9.2	64
PEN Dupont Teijin Teonex Q51	10.1	0.9	5.6	190	13.1	1.5	4.6	127
Polyimide Dupont kapton	3.6	0.3	3.2	63	3.7	0.7	3.8	95
Teflon1 Dupont Teflon PTFE	29.3	-0.2	4.7	222	18.2	-0.7	8.4	159
Teflon2 Dupont Teflon PTFE	14.1	0.1	3.1	190	11.4	0.0	3.6	158
Silicio tipo P <100>	2.7	0.8	3.7	63	2.3	1.8	6.7	64

La Tabla 5-13 muestra los valores de los parámetros obtenidos del análisis de grano en películas pm-SiGe:H de los procesos 1239 (80°C) y 1240 (120°C). En películas depositadas sobre sustrato Corning 1737 del proceso 1240 es vista la altura media de menor valor. En cuanto a los sustratos plásticos que poseen menor rugosidad, los sustratos PEN y Polyimide del proceso 1240 comparten un valor de 7.3 nm. En cuanto al diámetro medio, los sustratos Polyimide y c-Si se encuentra que tienen el menor diámetro con una magnitud de 99 nm. Los valores de diámetro que son mayores, corresponden a películas depositadas sobre teflón 2 en ambos procesos.

**Tabla 5-13. Resultados de análisis de grano para los procesos 1239 y 1240 (pm-SiGe:H)**

Material	1239, $T_d = 80^\circ C$		1240, $T_d = 120^\circ C$	
	<H> [nm]	<D> [nm]	<H> [nm]	<D> [nm]
Corning 1737	5.1	127	2.3	121
PEN Dupont Teijin Teonex Q51	8.5	140	7.3	132
Polyimide Dupont kapton	6.2	99	7.3	102
Teflon1 Dupont Teflon PTFE	11.6	150	12.0	163
Teflon2 Dupont Teflon PTFE	10.5	169	8.0	184
Silicio tipo P <100>	4.8	99	3.8	122

La Tabla 5-14 exhibe las magnitudes de los parámetros de morfología de los procesos 1241 y 1242 que corresponden a películas de pm-SiGe:H fabricadas a temperaturas 160 y 200°C respectivamente, para varios sustratos. Las rugosidades más altas son observadas en películas sobre teflón 1 para ambos procesos y las más bajas corresponden a aquellas películas depositadas sobre c-Si. Las rugosidades más bajas en sustratos plásticos, corresponden a Polyimide para los dos procesos con magnitudes 3.6 y 3.2 nm. En películas depositadas sobre teflón 1 pertenecientes al proceso 1241 se encuentra que dominan los poros. En sustratos PEN y teflón 1 del proceso 1241 se hallan valores muy alejados del nivel superficial medio lo cual sería indicación de una superficie en la que se encuentran principalmente picos agudos. La longitud de correlación más alta es para sustrato teflón 1 del proceso 1241 y la menor longitud de correlación es apreciada cuando los sustratos son c-Si, Polyimide y Corning 1737.

**Tabla 5-14. Parámetros de rugosidad para los procesos 1241 y 1242 (pm-SiGe:H)**

Material	1241, $T_d = 160^\circ C$				1242, $T_d = 200^\circ C$			
	Rq[nm]	Skewness	Curtosis	Lc[nm]	Rq[nm]	Skewness	Curtosis	Lc[nm]
Corning 1737	3.8	0.4	3.7	127	3.5	0.5	3.5	63
PEN Dupont Teijin Teonex Q51	4.2	1.3	7.4	127	16.4	1.6	5.0	95
Polyimide Dupont kapton	3.6	0.4	3.3	63	3.2	0.5	3.7	95
Teflon1 Dupont Teflon PTFE	93.2	-2.3	10.4	254	18.2	0.5	4.3	127
Teflon2 Dupont Teflon PTFE	14.7	0.2	3.8	127	15.0	-0.2	4	190
Silicio tipo P <100>	2.6	0.5	3.6	63	2.0	1.2	5.0	64

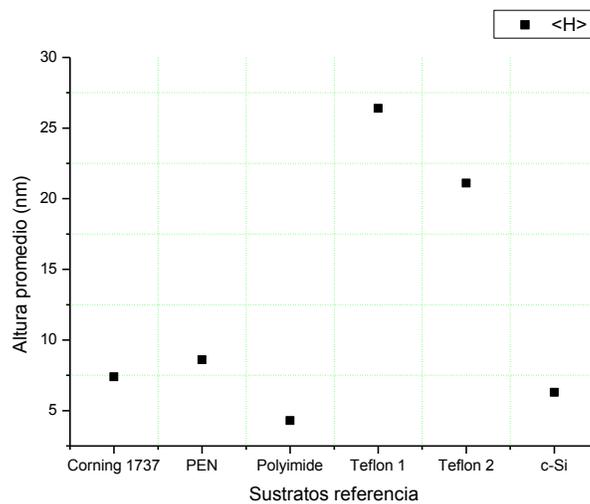
La

Tabla 5-15 muestra los resultados de los parámetros de altura media y diámetro medio para los procesos 1241 y 1242 (que son películas de pm-SiGe:H depositadas a 160 y 200°C) para varios sustratos. Los valores de altura media cuando el sustrato es PEN varían mucho entre procesos, pasando de 1.8 nm cuando la temperatura de depósito es 160°C a 11.4 nm cuando la temperatura de depósito es 200°C. En sustratos Corning, Polyimide y c-Si son hallados los valores de altura media más bajos. El diámetro medio no varía considerablemente entre procesos para un mismo sustrato. El mayor diámetro es visto cuando el sustrato es PEN que pertenece al proceso 1241. En el proceso 1241 también se encuentra el más bajo de los valores para el diámetro medio y se aprecia en películas depositadas sobre Polyimide con una magnitud de 106 nm.

**Tabla 5-15. Resultados de análisis de grano para los procesos 1241 y 1242 (pm-SiGe:H)**

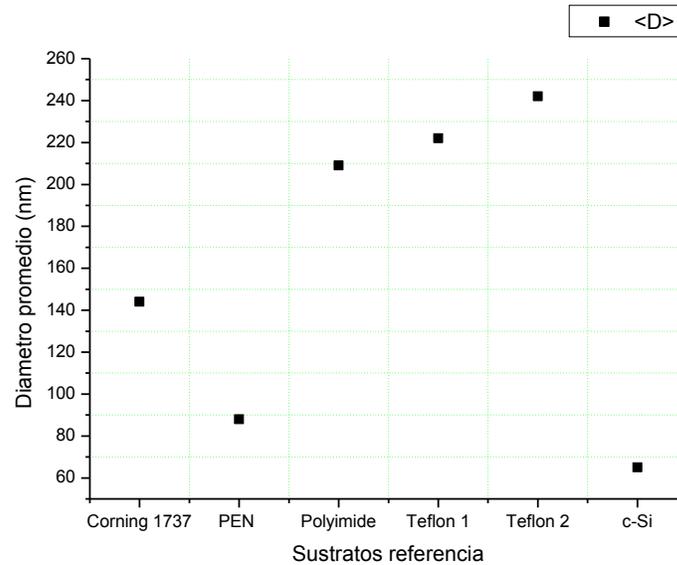
Material	1241, $T_d = 160^\circ C$		1242, $T_d = 200^\circ C$	
	<H> [nm]	<D> [nm]	<H> [nm]	<D> [nm]
Corning 1737	5.7	151	4.3	108
PEN Dupont Teijin Teonex Q51	1.8	181	11.4	159
Polyimide Dupont kapton	5.3	106	5.6	127
Teflon1 Dupont Teflon PTFE	19.0	136	9.3	164
Teflon2 Dupont Teflon PTFE	17.1	146	10.4	171
Silicio tipo P <100>	2.7	127	3.6	115

A continuación se hará análisis de las características morfológicas de los sustratos de referencia sin películas depositadas. La Figura 5-34 muestra la altura promedio en nanómetros para cada uno de los sustratos. La mayor altura promedio corresponde a el sustrato Teflón 1 con una magnitud  $\langle H \rangle = 26.4 \text{ nm}$ , la altura más baja es vista en Polyimide  $\langle H \rangle = 4.29 \text{ nm}$ . En la figura se ve que la altura superficial promedio de Teflón es mayor que la de los sustratos restantes y que Corning, PEN, Polyimide y c-Si poseen alturas muy similares entre sí.



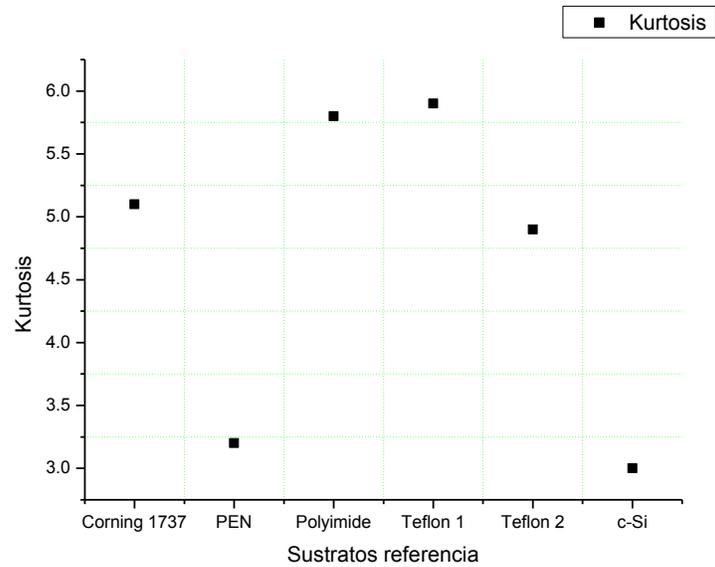
**Figura 5-34. Altura media de los sustratos de referencia, obtenida por AFM.**

La Figura 5-35 muestra los valores de diámetro medio hallados con el software SPIP para los diferentes sustratos. El diámetro medio más pequeño en magnitud es encontrado en c-Si  $\langle D \rangle = 65 \text{ nm}$ . El mayor diámetro es observado para Teflón 2  $\langle D \rangle = 242 \text{ nm}$ .



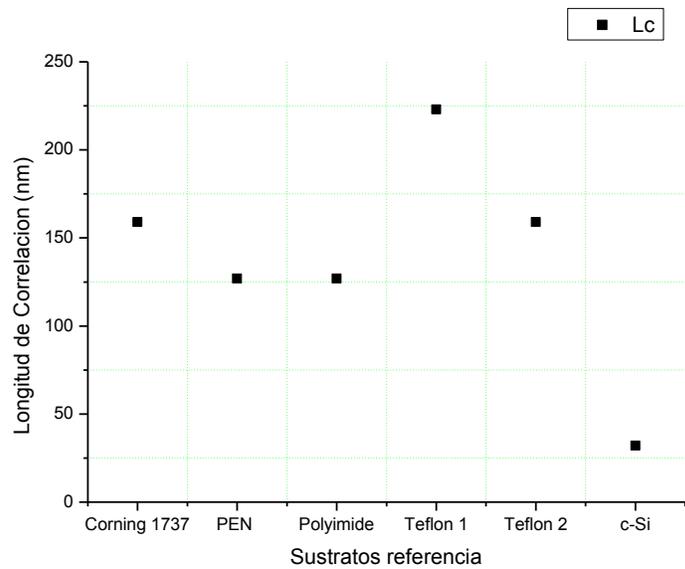
**Figura 5-35. Diámetro medio de los sustratos de referencia, obtenido por AFM.**

La Figura 5-36 corresponde a la curtosis de los sustratos de referencia. Las magnitudes más altas de curtosis son encontradas en Polyimide y Teflón 1 con valores  $curtosis = 5.8$  y  $5.9$ , respectivamente. Los valores de curtosis más bajos son halladas en PEN y c-Si resultando en  $curtosis = 3.2$  y  $3.0$ , respectivamente.



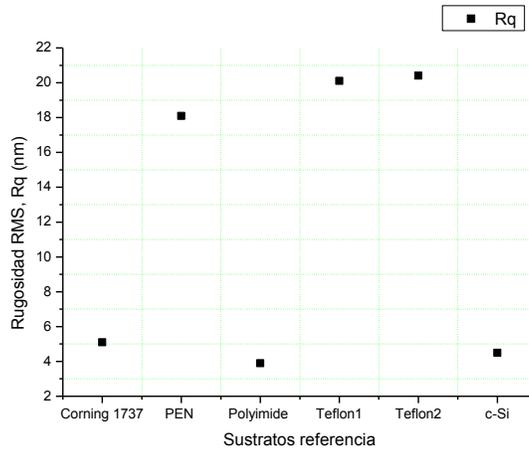
**Figura 5-36. Curtosis de los sustratos de referencia, obtenida por AFM.**

La Figura 5-37 muestra la longitud de correlación de los sustratos de referencia usados. Para este parámetro lo deseado es tener valores pequeños, el valor más bajo hallado corresponde al sustrato c-Si  $L_C = 32 \text{ nm}$ . La mayor longitud de correlación es vista en Teflón 1  $L_C = 223 \text{ nm}$ . Los sustratos PEN y Polyimide tienen la misma longitud de correlación  $L_C = 127 \text{ nm}$ .



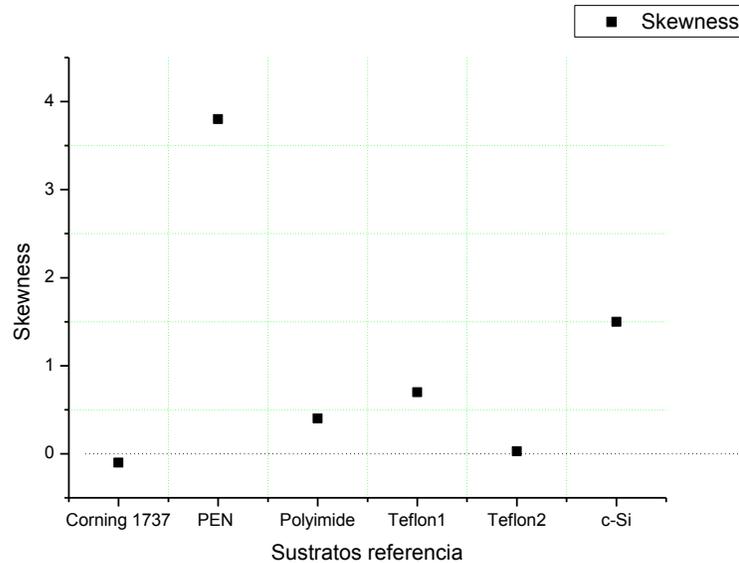
**Figura 5-37. Longitud de correlación de los sustratos de referencia, obtenida por AFM.**

La Figura 5-38 representa la rugosidad de los sustratos sin películas. Algo que se pretende al realizar estas mediciones es encontrar la menor rugosidad en la superficie. Se puede apreciar que tres sustratos tienen valores muy bajos y los otros tres son muy altos. La menor rugosidad corresponde a Polyimide  $R_q = 3.9 \text{ nm}$ . Para c-Si  $R_q = 4.5 \text{ nm}$  y Corning 1737  $R_q = 5.1 \text{ nm}$ . La rugosidad más alta la posee el Teflón 2  $R_q = 20.4 \text{ nm}$ , Teflón 1  $R_q = 20.1 \text{ nm}$  y en PEN  $R_q = 18.1 \text{ nm}$ .



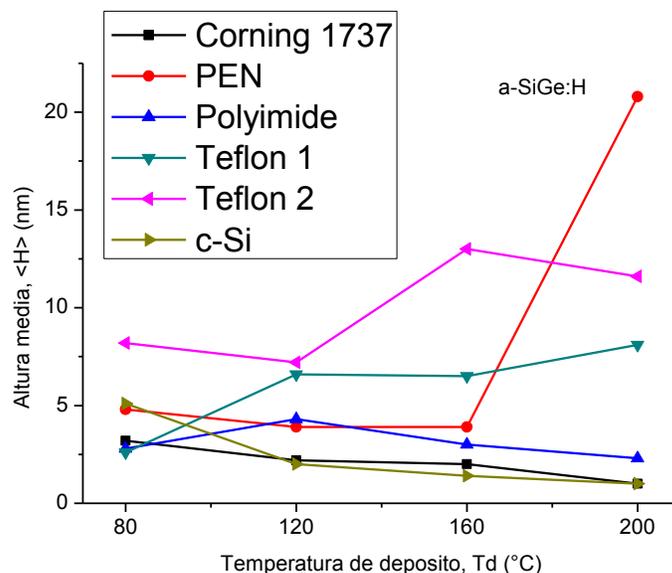
**Figura 5-38. Rugosidad RMS de los sustratos de referencia, obtenida por AFM.**

La Figura 5-39 muestra los valores de “Skewness” de los sustratos de referencia. Lo que se desea es tener valores de “Skewness” cercanos al cero. En el sustrato PEN, se tiene que  $skewness = 3.8$  significando que la mayoría de los picos sobre la superficie están por arriba del valor medio de altura. En Teflón 2 se tiene que  $skewness = 0.03$  y en Corning 1737 se tiene que  $skewness = -0.1$ . El signo menos significa que dominan más los poros que las partículas.



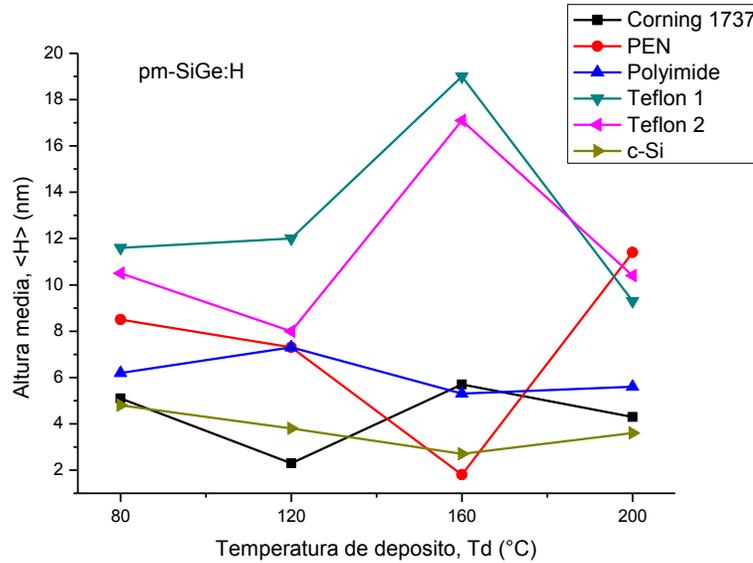
**Figura 5-39. “Skewness” de los sustratos de referencia, obtenida por AFM.**

Ahora desde la Figura 5-40 a la Figura 5-51 serán mostrados los resultados para todos los procesos de fabricación sobre todos los sustratos, en dichas gráficas, ya no estarán los datos de los sustratos de referencia. Para un mismo parámetro se realizará el análisis enfatizando en las diferentes temperaturas de depósito. La Figura 5-40 corresponde a la variación de la altura media con la temperatura de depósito en películas de a-SiGe:H en todos los sustratos. En los sustratos Si y Corning la altura promedio decrece con el incremento de la temperatura de depósito. En el sustrato teflón 1, a mayor temperatura de depósito, mayor es la altura promedio en la película. En el sustrato teflón 2 no es posible identificar una tendencia, pero es claro que en conjunto posee los valores más altos de  $\langle H \rangle$ . En PEN  $\langle H \rangle$  decrece en el rango 80 – 160°C y crece bruscamente a un máximo de  $\langle H \rangle = 20.8 \text{ nm}$  en  $T_d = 200^\circ\text{C}$ . Con el sustrato Polyimide  $\langle H \rangle$  crece en el rango 80 – 120°C y después decrece en el intervalo 120 – 200°C. Los valores de altura promedio más bajos de  $\langle H \rangle = 1 \text{ nm}$  son hallados en muestras con sustratos de Si y Corning cuando  $T_d = 200^\circ\text{C}$ .



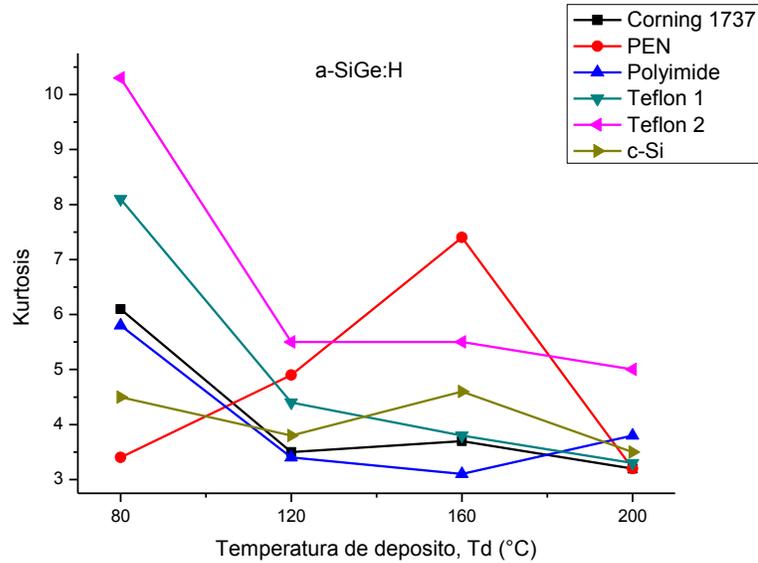
**Figura 5-40. Altura media de las películas a-SiGe:H sobre sustratos Corning, PEN, Polyimide, Teflon y c-Si a diferentes temperaturas de depósito. En la figura las líneas son sólo guías para la vista.**

La Figura 5-41 corresponde a la variación de la altura media con la temperatura de depósito en películas de pm-SiGe:H en todos los sustratos. No es posible visualizar en esta gráfica tendencia clara del comportamiento de la altura media en la mayoría de los sustratos, siendo sólo el c-Si el que permite ver que la altura promedio se hace menor con el incremento de la temperatura, comportamiento que también se muestra en las películas a-SiGe:H sobre este mismo sustrato. En el rango de temperaturas 80 – 120 °C en la mayoría de las muestras,  $\langle H \rangle$  decrece. El valor de  $\langle H \rangle$  más alto es  $\langle H \rangle = 19 \text{ nm}$  a una  $T_d = 160^\circ\text{C}$  cuando el sustrato es Teflón 1. Cuando el sustrato es PEN y a una  $T_d = 160^\circ\text{C}$  es encontrado el menor valor de  $\langle H \rangle$ , igual a  $\langle H \rangle = 1.8 \text{ nm}$ . Teflón 1 y Teflón 2 son los sustratos que tienen los valores de  $\langle H \rangle$  más altos comparados con los otros sustratos.



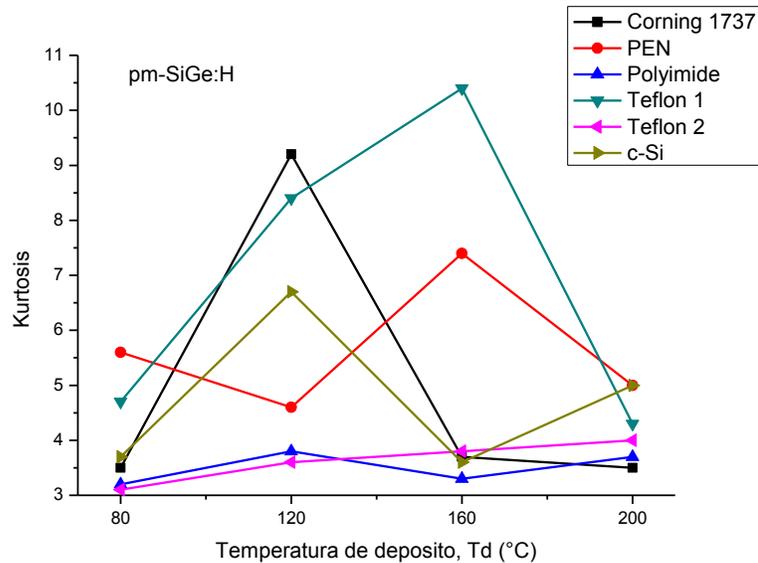
**Figura 5-41. Altura media de las películas pm-SiGe:H sobre sustratos Corning, PEN, Polyimide, Teflon y c-Si a diferentes temperaturas de depósito. En la figura las líneas son sólo guías para la vista**

La Figura 5-42 corresponde al cambio de curtosis con la temperatura de depósito en películas de a-SiGe:H en todos los sustratos. En las muestras con los sustratos Corning 1737, Teflón 1 y 2 la curtosis decrece con el incremento en la temperatura. Si la magnitud de curtosis es mayor que 3 quiere decir que los granos en la superficie son agudos en vez que suaves [44], así valores mucho mayores que 3 son más agudos aún. Los valores menores que 3 serían indicadores de superficies suaves, tendientes a ser más redondas. En las muestras sobre Si no es posible observar una tendencia. En PEN la curtosis crece en el rango 80 – 160°C y decrece en el intervalo 160 – 200°C. En Polyimide la curtosis disminuye en el rango 80 – 160°C y aumenta en el intervalo 160 – 200°C. Es de notar que la mayoría de los valores de curtosis están en el rango 3 – 5, la curtosis es adimensional. El valor de curtosis más alto hallado es  $\gamma_4 = 10.3$  a una  $T_d = 80^\circ\text{C}$  cuando el sustrato es Teflón 2. El valor de curtosis más pequeño encontrado es  $\gamma_4 = 3.1$  a  $T_d = 160^\circ\text{C}$  en películas sobre sustrato Polyimide.



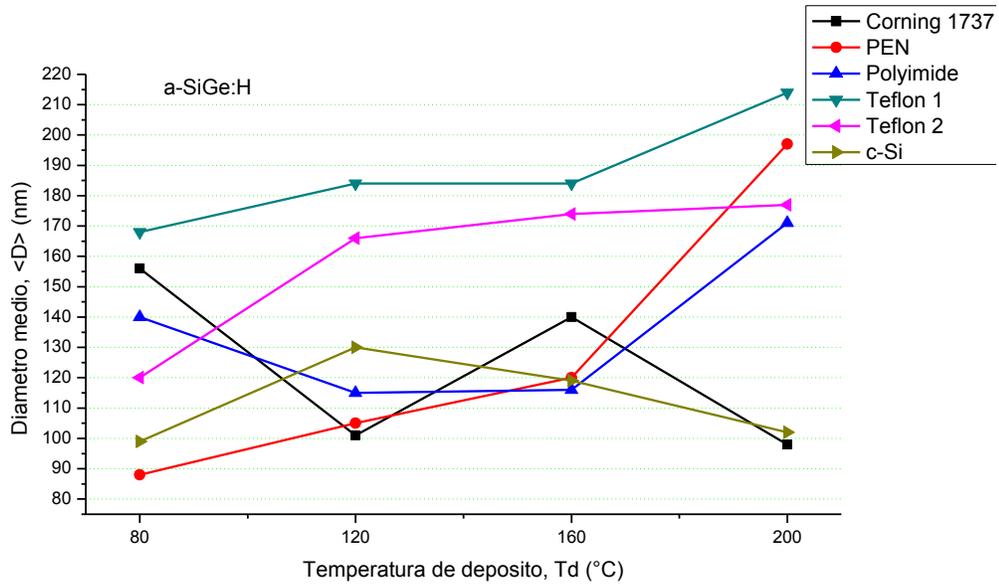
**Figura 5-42. Curtosis de las películas a-SiGe:H sobre sustratos Corning, PEN, Polyimide, Teflon y c-Si a diferentes temperaturas de depósito. En la figura las líneas son sólo guías para la vista.**

La Figura 5-43 corresponde al cambio de curtosis con la temperatura de depósito en películas de pm-SiGe:H en todos los sustratos. En las muestras sobre sustratos Corning, PEN, Teflón 1 y Si no es posible determinar una tendencia del comportamiento de curtosis. Aunque en Polyimide tampoco se encuentre una tendencia, sí es necesario hablar sobre sus valores ya que tienen poca variación,  $\gamma_4 = 3.2, 3.8, 3.3$  y  $3.7$  para las diferentes temperaturas. En Teflón 2 a medida que aumenta la temperatura, la curtosis aumenta. Cuando  $T_d = 80^\circ\text{C}$ ,  $\gamma_4 = 3.1$  y este valor de curtosis es el más pequeño para las películas polimorfos. Cuando  $T_d = 200^\circ\text{C}$  entonces  $\gamma_4 = 4$ . El mayor valor de curtosis es  $\gamma_4 = 10.4$  a una  $T_d = 160^\circ\text{C}$  en Teflón 1. La curtosis de las películas pm-SiGe:H tiene en común con la curtosis de a-SiGe:H que la mayoría de los valores están en el rango 3 -5.



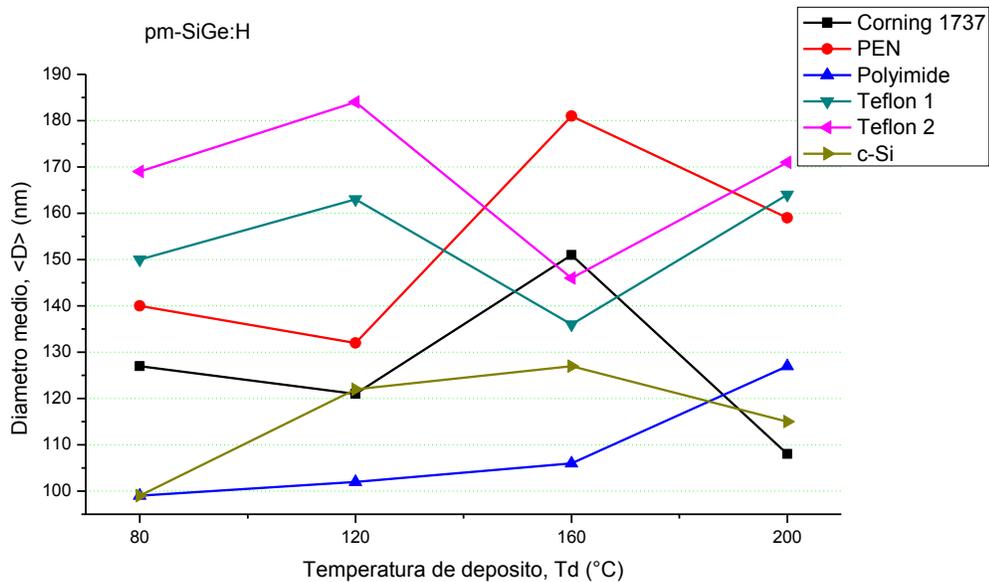
**Figura 5-43. Curtosis de las películas pm-SiGe:H sobre sustratos Corning, PEN, Polyimide, Teflon y c-Si a diferentes temperaturas de depósito. En la figura las líneas son sólo guías para la vista.**

La Figura 5-44 es un gráfico del diámetro promedio vs temperatura de depósito en películas de a-SiGe:H en todos los sustratos. Muestras sobre Corning glass y Polyimide no muestran una tendencia definida. En películas sobre PEN, Teflón 1 y Teflón 2 el diámetro se hace mayor con la temperatura. En PEN a  $T_d = 80^\circ\text{C}$ ,  $\langle D \rangle = 88\text{nm}$  y a su vez es el valor más bajo del diámetro hallado en las películas a-SiGe:H y cuando  $T_d = 200^\circ\text{C}$  entonces  $\langle D \rangle = 197\text{nm}$ . En Teflón 1 a  $T_d = 80^\circ\text{C}$ ,  $\langle D \rangle = 168\text{nm}$  y cuando  $T_d = 200^\circ\text{C}$  entonces  $\langle D \rangle = 214\text{nm}$ , siendo este último valor el mayor visto en las películas amorfas. En Teflón 2 a  $T_d = 80^\circ\text{C}$ ,  $\langle D \rangle = 120\text{nm}$  y cuando  $T_d = 200^\circ\text{C}$  entonces  $\langle D \rangle = 177\text{nm}$ . Para el sustrato Si entre  $80 - 120^\circ\text{C}$   $\langle D \rangle$  crece hasta llegar a  $\langle D \rangle = 130\text{nm}$  y luego en el rango  $120 - 200^\circ\text{C}$  decrece hasta obtenerse  $\langle D \rangle = 102\text{nm}$ .



**Figura 5-44. Diámetro medio de las películas a-SiGe:H sobre sustratos Corning, PEN, Polyimide, Teflon y c-Si a diferentes temperaturas de depósito. En la figura las líneas son sólo guías para la vista.**

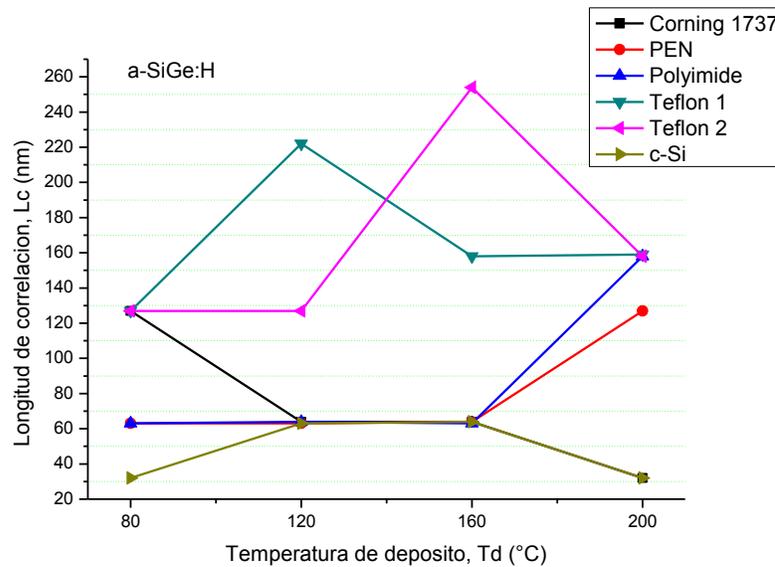
La Figura 5-45 es un gráfico del diámetro promedio vs temperatura de depósito en películas de pm-SiGe:H para todos los sustratos. En esta gráfica sólo es posible determinar la tendencia de la muestra sobre sustratos de Polyimide. El diámetro medio crece con la temperatura, cuando  $T_d = 80^\circ\text{C}$ ,  $\langle D \rangle = 99\text{nm}$ , éste valor es el más pequeño visto en las películas polimorfas. Luego en  $T_d = 200^\circ\text{C}$ ,  $\langle D \rangle = 127\text{nm}$ . Los valores del diámetro más altos son encontrados en Teflón 2 a una  $T_d = 120^\circ\text{C}$  con magnitud  $\langle D \rangle = 184\text{nm}$  y en PEN a una  $T_d = 160^\circ\text{C}$  con magnitud  $\langle D \rangle = 181\text{nm}$ . Se puede decir que el rango de valores para el diámetro promedio entre películas amorfas y polimorfas es muy similar.



**Figura 5-45. Diámetro medio de las películas pm-SiGe:H sobre sustratos Corning, PEN, Polyimide, Teflon y c-Si a diferentes temperaturas de depósito. En la figura las líneas son sólo guías para la vista.**

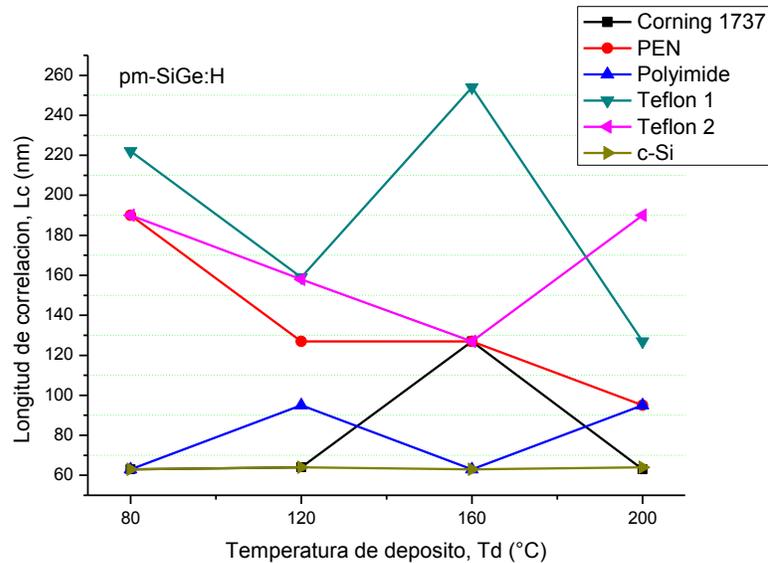
La Figura 5-46 es un gráfico longitud de correlación vs temperatura de depósito en películas de a-SiGe:H para todos los sustratos. En sustratos PEN y Polyimide, la longitud de correlación crece con la temperatura. A una temperatura  $T_d = 80^\circ\text{C}$ ,  $L_C = 63\text{ nm}$  cuando el sustrato es Polyimide y cuando  $T_d = 200^\circ\text{C}$  entonces  $L_C = 158\text{ nm}$ . Para las muestras sobre PEN a  $T_d = 80^\circ\text{C}$ ,  $L_C = 63\text{ nm}$  y en  $T_d = 200^\circ\text{C}$ ,  $L_C = 127\text{ nm}$ . En las películas depositadas sobre sustrato Corning 1737  $L_C$  disminuye con el incremento en temperatura. A  $T_d = 80^\circ\text{C}$ ,  $L_C = 127\text{ nm}$  y cuando  $T_d = 200^\circ\text{C}$  entonces  $L_C = 32\text{ nm}$ . Es curioso que en el rango de temperaturas 120 – 160° la longitud de correlación es una constante para las películas a-SiGe:H sobre los sustratos Corning glass, PEN, Polyimide y c-Si  $L_C \approx 63\text{ nm}$ ,  $L_C \approx 64\text{ nm}$ . El valor más bajo de longitud de correlación es encontrado en muestras sobre c-Si,  $L_C = 32\text{ nm}$  cuando  $T_d = 80^\circ\text{C}$  y  $200^\circ\text{C}$ . La longitud de correlación mayor es vista en muestras sobre Teflón 2,  $L_C = 254\text{ nm}$  a una  $T_d = 160^\circ\text{C}$ . En muestras sobre Teflón 1 no es observada una secuencia ya que en el rango 80 – 120°C  $L_C$  aumenta hasta llegar a un máximo de  $L_C = 222\text{ nm}$ ,

luego en el intervalo 120 – 160°C disminuye hasta alcanzar  $L_C = 158 \text{ nm}$  y entre 160 – 200°C  $L_C$  permanece sin variación.



**Figura 5-46. Longitud de correlación de las películas a-SiGe:H sobre sustratos Corning, PEN, Polyimide, Teflon y c-Si a diferentes temperaturas de depósito. En la figura las líneas son sólo guías para la vista.**

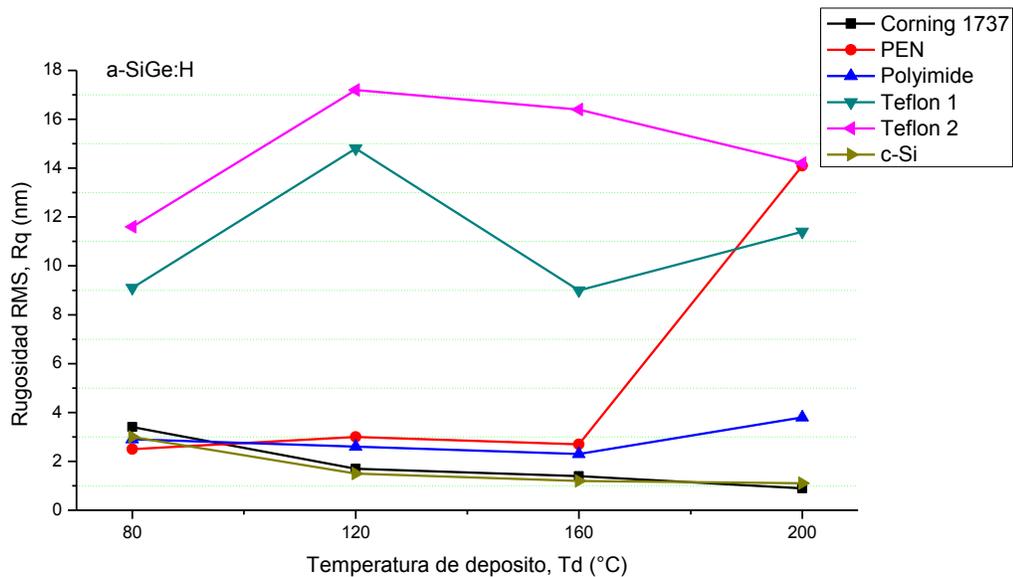
La Figura 5-47 es un gráfico longitud de correlación vs temperatura de depósito en películas de pm-SiGe:H para todos los sustratos. Para muestras polimorfas sobre sustratos Corning, Polyimide y Teflón 1 no es posible encontrar una tendencia. Cuando el sustrato es PEN, es visto que  $L_C$  disminuye al aumentar la temperatura. En  $T_d = 80^\circ\text{C}$ ,  $L_C = 190 \text{ nm}$  y en  $T_d = 200^\circ\text{C}$ ,  $L_C = 95 \text{ nm}$ . En sustrato de silicio  $L_C$  permanece casi constante para las diferentes temperaturas oscilando entre 63 y 64 nm y estos valores de  $L_C$  son los más bajos encontrados. La  $L_C$  más alta tiene una magnitud  $L_C = 254 \text{ nm}$  en muestras sobre Teflón 1 a  $T_d = 160^\circ\text{C}$ . Para muestras sobre Teflón 2  $L_C$  disminuye en el rango 80 – 160°C alcanzando un mínimo de  $L_C = 127 \text{ nm}$  y luego aumenta entre 160 y 200°C alcanzando a esa temperatura  $L_C = 190 \text{ nm}$ .



**Figura 5-47. Longitud de correlación de las películas pm-SiGe:H sobre sustratos Corning, PEN, Polyimide, Teflon y c-Si a diferentes temperaturas de depósito. En la figura las líneas son sólo guías para la vista.**

La Figura 5-48 es un gráfico de rugosidad vs temperatura de depósito en películas de a-SiGe:H para todos los sustratos. En muestras sobre sustratos de Corning y c-Si la rugosidad es menor al aumentar la temperatura. En Corning a  $T_d = 80^\circ\text{C}$ ,  $R_q = 3.4 \text{ nm}$  y cuando  $T_d = 200^\circ\text{C}$   $R_q = 0.9 \text{ nm}$ , este último valor de rugosidad es el más bajo encontrado en la gráfica. Con sustrato de c-Si cuando  $T_d = 80^\circ\text{C}$ ,  $R_q = 3.0 \text{ nm}$  y para  $T_d = 200^\circ\text{C}$ ,  $R_q = 1.1 \text{ nm}$ . Con sustrato PEN se aprecia un comportamiento de la rugosidad en el que a mayor temperatura, la rugosidad incrementa. Cuando  $T_d = 80^\circ\text{C}$ ,  $R_q = 2.5 \text{ nm}$  y cuando  $T_d = 200^\circ\text{C}$ ,  $R_q = 14.1 \text{ nm}$ , en las muestras sobre PEN en el rango 80 – 160°C no se ve una variación considerable, pero entre 160 y 200°C se logra apreciar el crecimiento más brusco en la gráfica. Películas depositadas sobre Teflón 2 no exhiben un comportamiento definido pero es visto que poseen los valores más altos de rugosidad sobre el rango completo de temperaturas. Cuando  $T_d = 120^\circ\text{C}$ , es encontrada la mayor rugosidad  $R_q = 17.2 \text{ nm}$ . Con el sustrato de Polyimide se aprecia una disminución de la rugosidad en el intervalo 80 – 160°C, comenzando con  $R_q = 2.9 \text{ nm}$  y alcanzando un mínimo de  $R_q = 2.3 \text{ nm}$ . Después el incremento de la rugosidad es

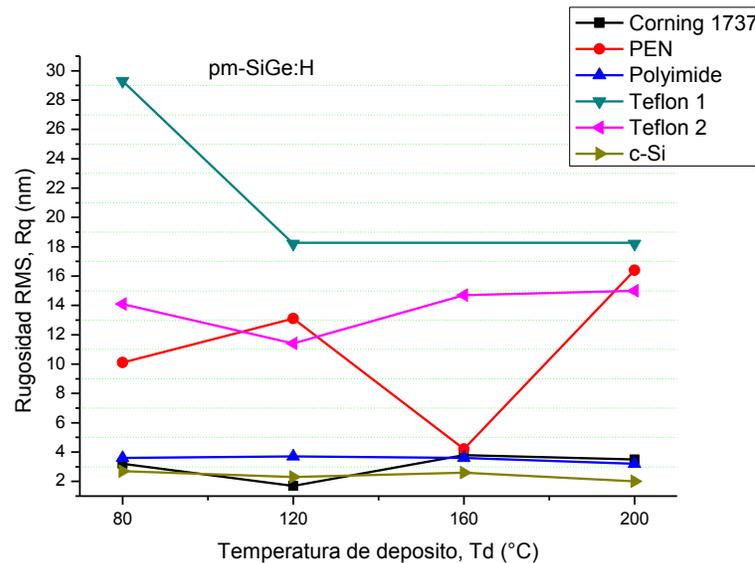
observado entre 160 y 200°C encontrándose una rugosidad  $R_q = 3.8 \text{ nm}$ . Para las muestras sobre sustrato Teflón 1 no se aprecia tendencia alguna pero es de destacar que sus valores son altos y cercanos a los del sustrato Teflón 2, su mayor rugosidad es  $R_q = 14.8 \text{ nm}$  en  $T_d = 120^\circ\text{C}$  y su menor valor es  $R_q = 9 \text{ nm}$  cuando  $T_d = 160^\circ\text{C}$ .



**Figura 5-48. Rugosidad RMS de las películas a-SiGe:H sobre sustratos Corning, PEN, Polyimide, Teflon y c-Si a diferentes temperaturas de depósito. En la figura las líneas son sólo guías para la vista.**

La Figura 5-49 es un gráfico de rugosidad vs temperatura de depósito en películas de pm-SiGe:H para todos los sustratos. Cuando los sustratos son c-Si y Teflón 1 la rugosidad disminuye con el aumento de temperatura. En Si a  $T_d = 80^\circ\text{C}$ ,  $R_q = 2.7 \text{ nm}$  y cuando  $T_d = 200^\circ\text{C}$ ,  $R_q = 2.0 \text{ nm}$ . En películas sobre Teflón 1 se encuentra la rugosidad más alta  $R_q = 29.3 \text{ nm}$  en  $T_d = 80^\circ\text{C}$  y cuando  $T_d = 200^\circ\text{C}$  la rugosidad es  $R_q = 18.2 \text{ nm}$ . En muestras sobre Polyimide la rugosidad permanece casi constante para todas las temperaturas con su mínimo de  $R_q = 3.2 \text{ nm}$  en  $T_d = 200^\circ\text{C}$  y su máximo en  $T_d = 120^\circ\text{C}$  siendo  $R_q = 3.7 \text{ nm}$ . Cuando el sustrato es Corning no se puede determinar una tendencia, lo que sí es observado con este material es poca variación en la magnitud de la rugosidad, posee un

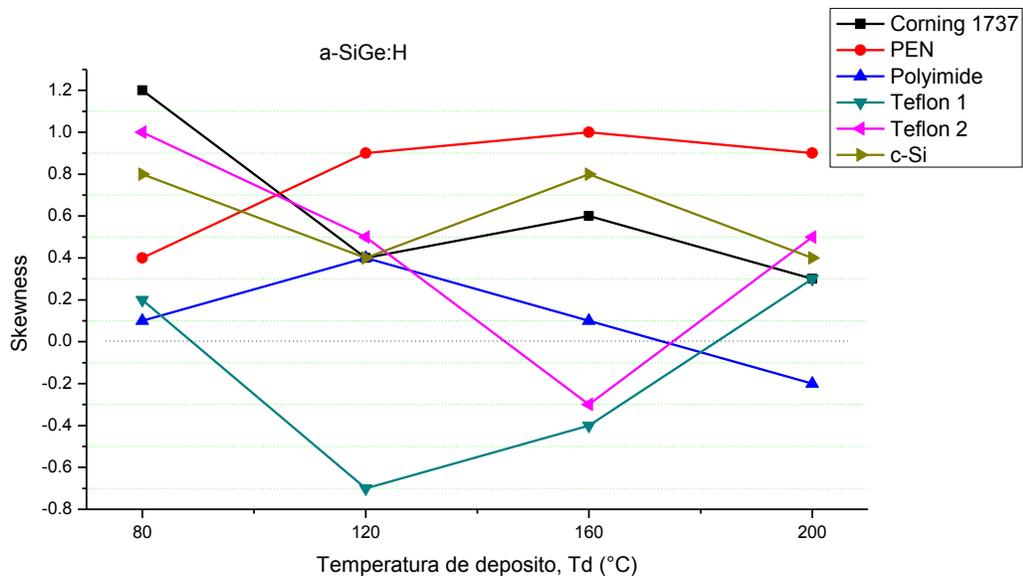
mínimo de  $R_q = 1.7 \text{ nm}$  en  $T_d = 120^\circ\text{C}$  que corresponde a la menor rugosidad vista para las películas polimorfas, luego es encontrado el valor máximo  $R_q = 3.8 \text{ nm}$  cuando  $T_d = 160^\circ\text{C}$ . En películas sobre PEN no se halla un comportamiento marcado claramente y sobre Teflón 2 en el rango  $80 - 120^\circ\text{C}$  la rugosidad decrece hasta un mínimo de  $R_q = 11.4 \text{ nm}$ , después en el intervalo  $120 - 200^\circ\text{C}$  la rugosidad incrementa y llega a  $R_q = 15 \text{ nm}$ . Después de cotejar las gráficas de rugosidad de películas amorfas y polimorfas es evidente que en ambas las rugosidades más bajas son encontradas en las películas sobre sustratos Corning, Polyimide y c-Si, en ninguna de las muestras sobre estos materiales la rugosidad superó los  $4 \text{ nm}$ .



**Figura 5-49. Rugosidad RMS de las películas pm-SiGe:H sobre sustratos Corning, PEN, Polyimide, Teflon y c-Si a diferentes temperaturas de depósito. En la figura las líneas son sólo guías para la vista.**

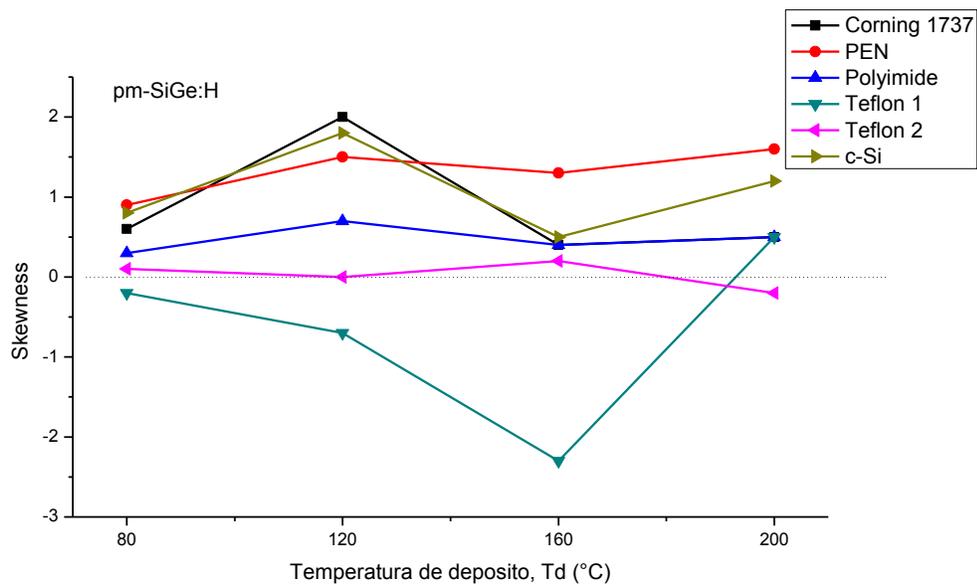
La Figura 5-50 muestra los valores del parámetro “skewness” cuyo significado más adecuado en español sería asimetría, los cuales cambian con la temperatura de depósito en películas de a-SiGe:H para todos los sustratos. Con películas sobre sustrato Corning 1737 la tendencia de skewness es a disminuir con el aumento de la temperatura. Cuando  $T_d = 80^\circ\text{C}$ ,  $\gamma_3 = 1.2$  y este valor de skewness es el más alto encontrado en las películas amorfas, después en  $T_d = 200^\circ\text{C}$  la asimetría

decae a  $\gamma_3 = 0.3$ . En muestras sobre PEN skewness incrementa con la temperatura, así cuando  $T_d = 80^\circ\text{C}$ ,  $\gamma_3 = 0.4$  y para  $T_d = 200^\circ\text{C}$  skewness es  $\gamma_3 = 0.9$ . El valor más bajo de skewness es visto cuando el sustrato es Teflón 1 a una  $T_d = 120^\circ\text{C}$  con una magnitud de  $\gamma_3 = -0.7$ , en Teflón 1 no se aprecia una tendencia definida del comportamiento de skewness, podría decirse en general que las muestras sobre Teflón PTFE poseen más poros que partículas ya que cuando  $\gamma_3 < 0$  precisamente eso es lo que acontece y la mayoría de los valores negativos observados en la gráfica corresponden a este material. Con c-Si skewness no tiene un comportamiento claro, sus valores son  $\gamma_3 = 0.4$  y  $\gamma_3 = 0.8$ . En muestras sobre Polyimide  $\gamma_3$  incrementa con temperatura en el rango 80 – 120°C hasta  $\gamma_3 = 0.4$  y después decrece con el aumento de la temperatura en el intervalo 120 - 200°C hasta alcanzar un valor  $\gamma_3 = -0.2$ . En películas depositadas sobre Teflón 2,  $\gamma_3$  disminuye con el aumento de temperatura entre 80 y 160°C obteniéndose un mínimo  $\gamma_3 = -0.3$  y después  $\gamma_3$  aumenta con la temperatura en el rango 160 – 200°C alcanzando  $\gamma_3 = 0.5$ .



**Figura 5-50. “Skewness” de las películas a-SiGe:H sobre sustratos Corning, PEN, Polyimide, Teflon y c-Si a diferentes temperaturas de depósito. En la figura las líneas son sólo guías para la vista.**

La Figura 5-51 es un gráfico “skewness” vs temperatura de depósito en películas de pm-SiGe:H para todos los sustratos. En muestras sobre PEN es visto que skewness incrementa con la temperatura. Cuando  $T_d = 80^\circ\text{C}$ ,  $\gamma_3 = 0.9$  y cuando  $T_d = 200^\circ\text{C}$  entonces  $\gamma_3 = 1.6$ . En películas sobre Polyimide se observa un comportamiento de  $\gamma_3$  casi constante en todo el rango de temperaturas con magnitudes  $\gamma_3 = 0.3, 0.7, 0.4$  y  $0.5$ . Con Teflón 2 también es observado un comportamiento con poca variación para las diferentes temperaturas para skewness, a saber  $\gamma_3 = 0.1, 0.0, 0.2$  y  $-0.2$ .



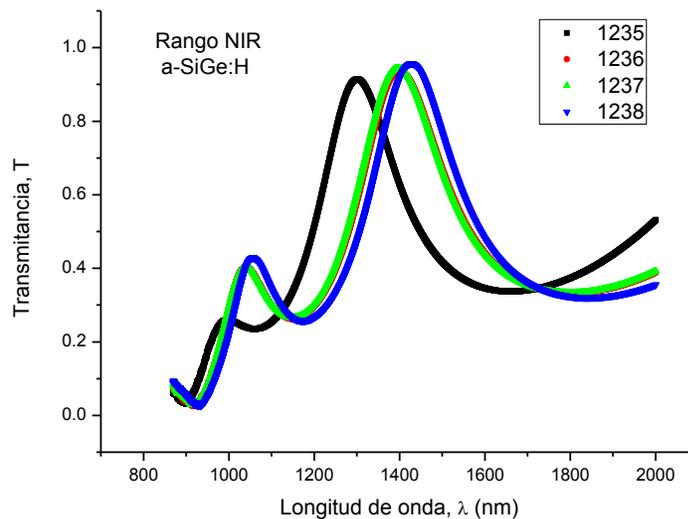
**Figura 5-51. “Skewness” de las películas pm-SiGe:H sobre sustratos Corning, PEN, Polyimide, Teflon y c-Si a diferentes temperaturas de depósito. En la figura las líneas son sólo guías para la vista.**

En la gráfica las muestras sobre c-Si no muestran una tendencia, su mayor valor de skewness es  $\gamma_3 = 1.8$  cuando  $T_d = 120^\circ\text{C}$  y su mínimo está ubicado en  $T_d = 160^\circ\text{C}$  con un valor  $\gamma_3 = 0.5$ . Con el sustrato Corning glass 1737 no se aprecia un claro comportamiento de  $\gamma_3$ , para el rango  $80 - 120^\circ\text{C}$   $\gamma_3$  aumenta con temperatura llegando a un valor  $\gamma_3 = 2$  el cual es el más alto observado en películas polimorfos. Después en el intervalo  $120 - 160^\circ\text{C}$   $\gamma_3$  disminuye al aumentar la temperatura alcanzando  $\gamma_3 = 0.4$ , valor que permanece constante hasta  $T_d = 200^\circ\text{C}$ . En películas sobre Teflón 1 es visto que entre  $80$  y  $160^\circ\text{C}$   $\gamma_3$

decrece con la temperatura llegando a un valor mínimo de  $\gamma_3 = -2.3$ , el cual es el más pequeño de todos en la gráfica y luego crece hasta 200°C alcanzando  $\gamma_3 = 0.5$ . Comparando esta gráfica con la anterior se encuentra que los valores más altos de  $\gamma_3$  corresponden a películas sobre Corning glass 1737 y que los más bajos pertenecen a muestras sobre Teflón 1.

### 5.5 Resultados de Caracterización por medio de Transmitancia en el rango del infrarrojo cercano NIR

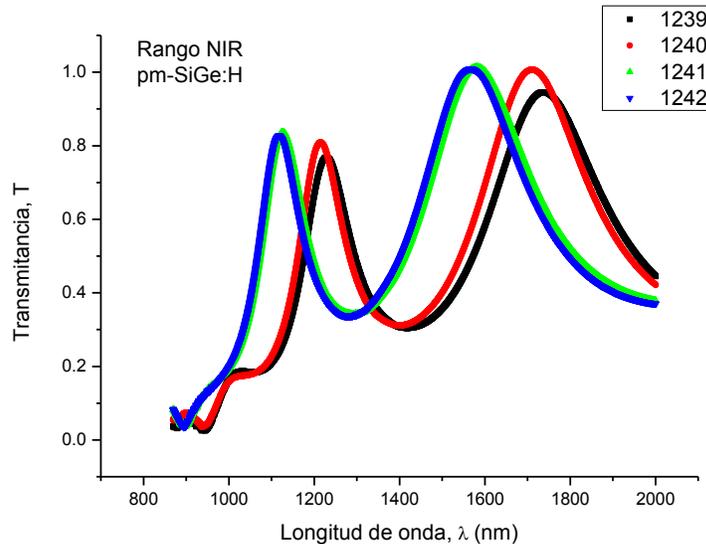
Las propiedades ópticas son determinadas gracias a las mediciones de transmisión espectral realizadas sobre las películas de a-SiGe:H y pm-SiGe:H. Las temperaturas de depósito se establecieron en 80, 120, 160 y 200°C para ambas películas (a-SiGe:H y pm-SiGe:H).



**Figura 5-52. Transmitancia estimada por el software PUMA, procesos 1235 a 1238 (a-SiGe:H) en el rango NIR.**

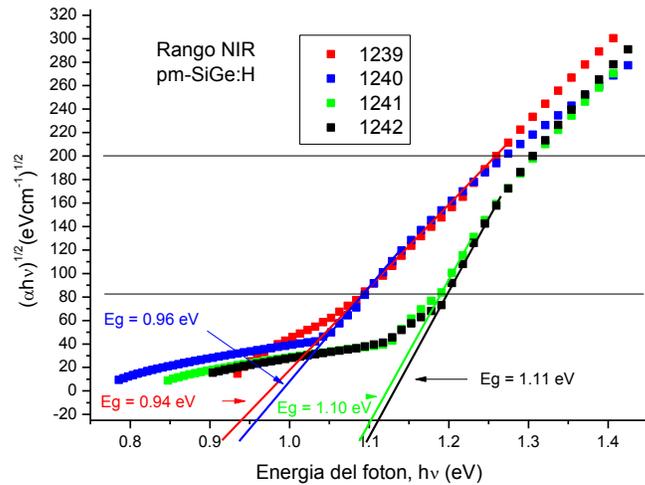
La Figura 5-52 presenta el espectro de transmisión para cada película delgada de a-SiGe:H en el rango del infrarrojo cercano, se obtuvieron experimentalmente y con el software PUMA se procesan para reproducir el espectro de transmitancia y además obtener valores de parámetros ópticos que permitirán la determinación de

energías como la del band gap  $E_g$  y gráficos como el de absorción y Tauc. Los máximos y mínimos de cada espectro se encuentran en longitudes de onda diferentes pero con magnitudes de transmitancia muy parecidos.



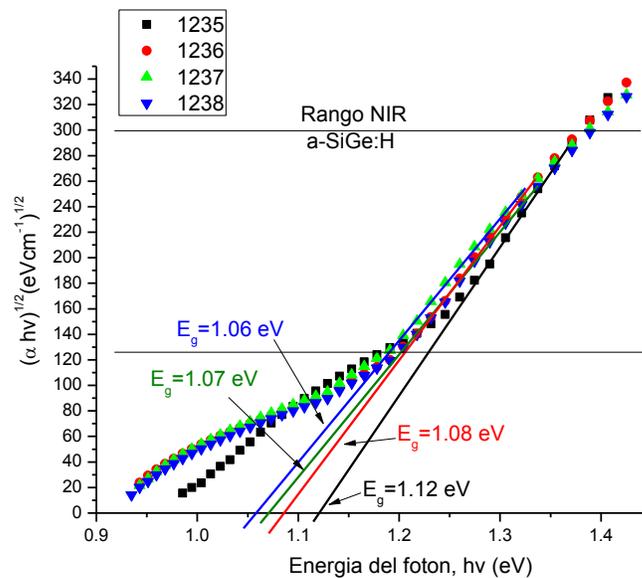
**Figura 5-53. Transmitancia estimada por el software PUMA, procesos 1239 a 1242 (pm-SiGe:H) en el rango NIR.**

La Figura 5-53 presenta el espectro de transmisión para cada película delgada de pm-SiGe:H en el rango del infrarrojo cercano. Se puede apreciar que para los procesos 1239 y 1240 su primer máximo están muy cercanos uno de otro, pero su segundo máximo cambia. Los espectros de los procesos 1241 y 1242 realmente son muy idénticos para todo el rango de longitudes de onda.



**Figura 5-54. Gráficos de Tauc para las películas de pm-SiGe:H en el rango NIR.**

La Figura 5-54 es un gráfico de Tauc de las películas pm-SiGe:H en el rango de infrarrojo cercano. En la sección 4.5.5 se explica en detalle el procedimiento para la determinación del band gap óptico en el que la extrapolación de la región lineal de Tauc permite hallar el band gap óptico de las películas fabricadas, la magnitud se determina del punto de cruce con el eje de energía, similar procedimiento es visto en la Figura 5-55 para las películas de a-SiGe:H.



**Figura 5-55. Gráficos de Tauc para las películas de a-SiGe:H en el rango NIR.**

La Figura 5-56 describe la dependencia espectral del coeficiente de absorción,  $\alpha(h\nu)$ , de las películas de a-SiGe:H depositadas a diferentes temperaturas.

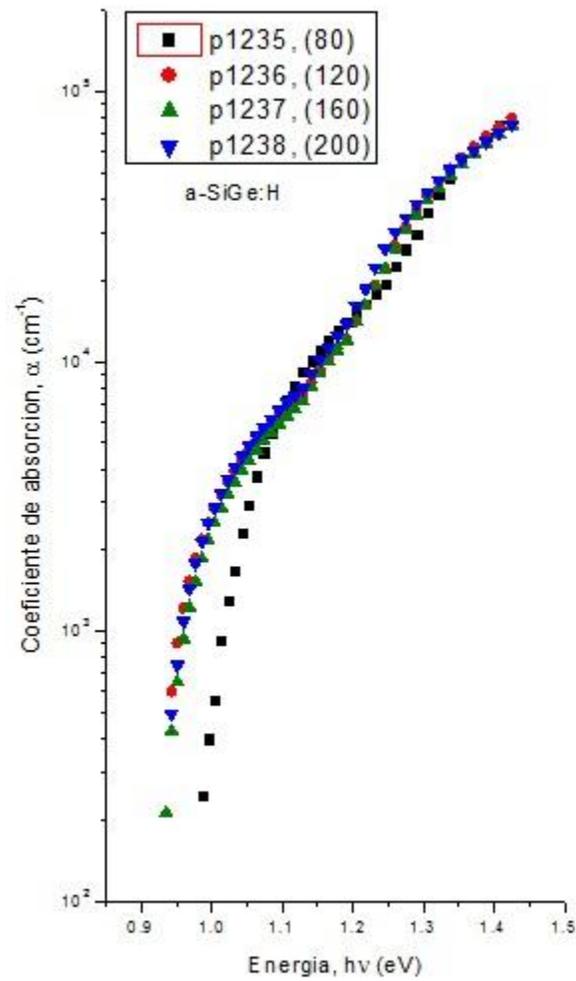
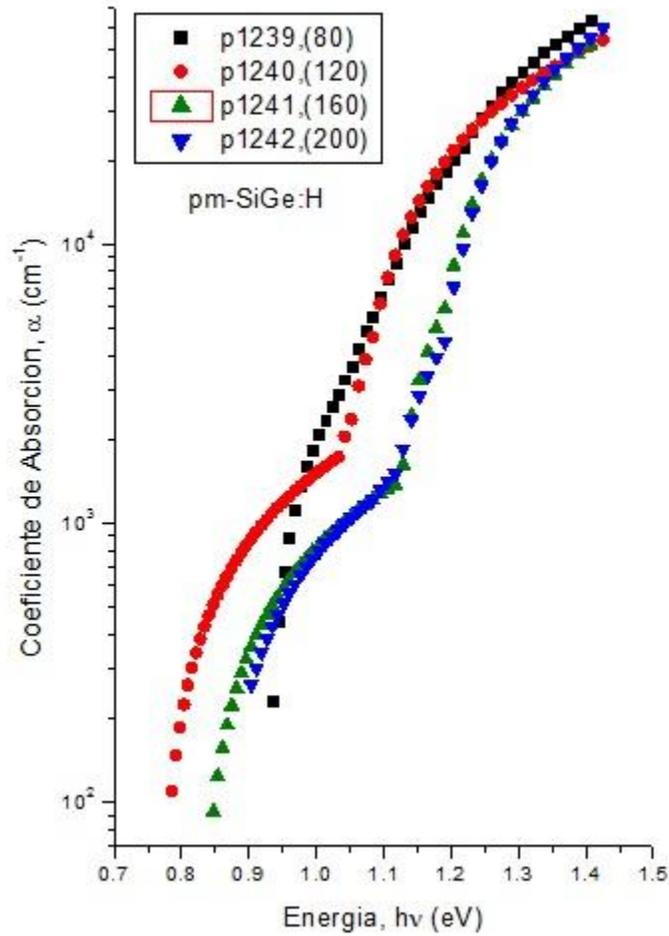


Figura 5-56. Dependencia espectral del coeficiente de absorción  $\alpha(h\nu)$  para a-SiGe:H a las diferentes temperaturas de depósito.



**Figura 5-57. Dependencia espectral del coeficiente de absorción  $\alpha(h\nu)$  para pm-SiGe:H a las diferentes temperaturas de depósito.**

En la Tabla 5-16, Tabla 5-17 y Tabla 5-18 se listan los valores experimentales de  $E_{04}$ ,  $E_{03}$ , band gap óptico  $E_g$  y energía de Urbach  $E_0$  en películas de a-SiGe:H y pm-SiGe:H, respectivamente.

**Tabla 5-16. Band gap óptico,  $E_{04}$  y  $E_{03}$  para a-SiGe:H NIR.**

Proceso	Temperatura (°C)	$E_{04}$ (eV)	$E_{03}$ (eV)	$E_g$ (eV)
1235	80	1.14	1.02	$1.12 \pm 0.05$
1236	120	1.16	0.95	$1.08 \pm 0.05$
1237	160	1.17	0.96	$1.07 \pm 0.05$
1238	200	1.15	0.96	$1.06 \pm 0.05$

Nota: El error de los valores  $E_{04}$  y  $E_{03}$  es menor que 0.02 eV.

**Tabla 5-17. Band gap óptico,  $E_{04}$  y  $E_{03}$  para pm-SiGe:H NIR.**

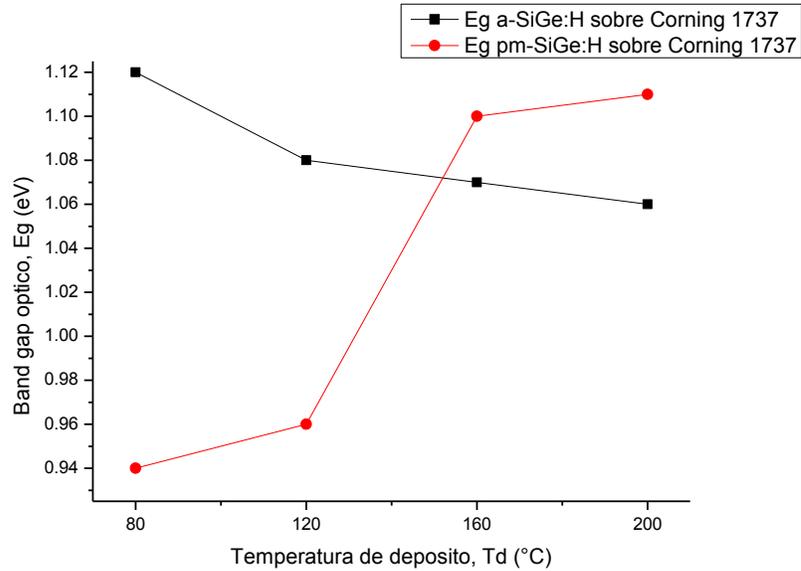
Proceso	Temperatura (°C)	$E_{04}$ (eV)	$E_{03}$ (eV)	$E_g$ (eV)
1239	80	1.13	0.96	$0.94 \pm 0.04$
1240	120	1.12	0.92	$0.96 \pm 0.04$
1241	160	1.21	1.04	$1.10 \pm 0.05$
1242	200	1.22	1.04	$1.11 \pm 0.05$

Nota: El error de los valores  $E_{04}$  y  $E_{03}$  es menor que 0.02 eV.

**Tabla 5-18.** Energías de Urbach para los procesos 1235 a 1242.

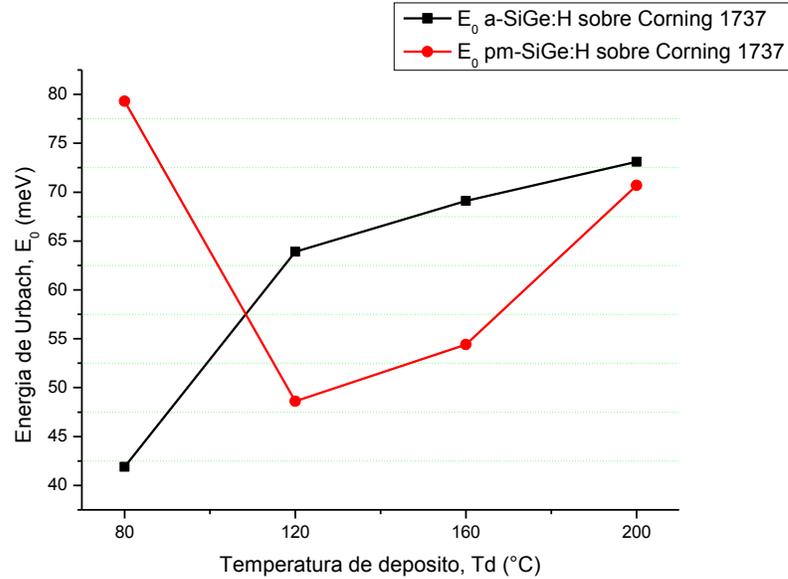
Proceso		Temperatura (°C)	Energía de Urbach, $E_0$ (meV)
a-SiGe:H	1235	80	$41.9 \pm 1.1$
	1236	120	$63.9 \pm 1.0$
	1237	160	$69.1 \pm 0.9$
	1238	200	$73.1 \pm 0.7$
Pm-SiGe:H	1239	80	$79.3 \pm 0.1$
	1240	120	$48.6 \pm 0.4$
	1241	160	$54.4 \pm 1.0$
	1242	200	$70.7 \pm 0.9$

La Figura 5-58 muestra el cambio del band gap óptico para las películas amorfas y polimorfos de SiGe con la temperatura de depósito. En películas a-SiGe:H  $E_g$  disminuye al aumentar la temperatura, así en  $T_d = 80^\circ\text{C}$   $E_g = 1.12 \text{ eV}$  que a su vez es la energía más alta encontrada en la gráfica, luego cuando  $T_d = 200^\circ\text{C}$   $E_g = 1.06 \text{ eV}$ . En las muestras de pm-SiGe:H es observado un comportamiento en que  $E_g$  crece con la temperatura, por lo tanto a  $T_d = 80^\circ\text{C}$   $E_g = 0.94 \text{ eV}$  y a una temperatura  $T_d = 200^\circ\text{C}$   $E_g = 1.11 \text{ eV}$ .



**Figura 5-58. Band gaps ópticos de películas a-SiGe:H y pm-SiGe:H a diferentes temperaturas de depósito. Nota: Las líneas en la gráfica son sólo guías para los ojos.**

Los valores más bajos de  $E_g$  son encontrados en pm-SiGe:H a bajas temperaturas de depósito. Cuando  $T_d = 80^\circ\text{C}$ ,  $E_g = 0.94\text{ eV}$  y con  $T_d = 120^\circ\text{C}$ ,  $E_g = 0.96\text{ eV}$ . Del análisis de la anterior figura se puede decir que es más fácil que electrones puedan ganar suficiente energía para saltar desde la banda de valencia hasta la banda de conducción al absorber un fotón (asumiendo que la energía de los fotones que incide en las películas analizadas en la figura 4-59 es la misma) en una película de pm-SiGe:H fabricada entre 80 y 120°C que aquellas películas de pm-SiGe:H fabricadas a mayores temperaturas o que en películas de a-SiGe:H. La Figura 5-59 es un gráfico de la energía de Urbach vs temperatura de depósito para las películas a-SiGe:H y pm-SiGe:H. La tendencia de  $E_0$  en a-SiGe:H es a incrementar con la temperatura de depósito, así cuando  $T_d = 80^\circ\text{C}$ ,  $E_0 = 41.9\text{ meV}$ , este valor de  $E_0$  es el más bajo encontrado en la gráfica. Ahora en  $T_d = 200^\circ\text{C}$ ,  $E_0 = 73.1\text{ meV}$ . En cuanto a las películas de pm-SiGe:H entre 80 y 120°C  $E_0$  disminuye llegando a un valor mínimo  $E_0 = 48.6\text{ meV}$ . Después en el intervalo 120-200°C  $E_0$  aumenta con temperatura alcanzando  $E_0 = 70.7\text{ meV}$ . La mayor energía de Urbach es hallada en películas pm-SiGe:H a una  $T_d = 80^\circ\text{C}$  con una magnitud  $E_0 = 79.3\text{ meV}$ .



**Figura 5-59. Energía de Urbach de películas a-SiGe:H y pm-SiGe:H fabricadas a diferentes temperaturas de depósito. En la figura las líneas son sólo guías para la vista.**

## 5.6 Resultados de Caracterización de Fotoconductividad

Esta breve sección está dedicada a mostrar los resultados obtenidos de la caracterización de la fotoconductividad. El equipo usado para esta finalidad es un simulador solar y por tal motivo no comprende una sola longitud de onda, más bien comprende varias longitudes de onda que componen el espectro electromagnético del sol. Las tablas 5-19 a 5-23 muestran la conductividad bajo iluminación  $\sigma_{ill}$ , la conductividad en oscuridad  $\sigma_{dark}$ , la fotoconductividad  $\sigma_{ph}$  y la razón fotoconductividad a conductividad en oscuridad  $\frac{\sigma_{ph}}{\sigma_{dark}}$  para los diferentes películas fabricadas sobre los sustratos Corning 1737, PEN, Polyimide y Teflón PTFE.

**Tabla 5-19. Conductividad bajo iluminación, conductividad en oscuridad, fotoconductividad y razón fotoconductividad a conductividad en oscuridad a 100 V para muestras con sustrato Corning 1737.**

Corning 1737						
Proceso		Temperatura (°C)	$\sigma_{ill}(\Omega^{-1}cm^{-1})$	$\sigma_{dark}(\Omega^{-1}cm^{-1})$	$\sigma_{ph} = \sigma_{ill} - \sigma_{dark}$ ( $\Omega^{-1}cm^{-1}$ )	$\frac{\sigma_{ph}}{\sigma_{dark}}$
a-SiGe:H	1235	80	$1.87 \times 10^{-5}$	$1.55 \times 10^{-5}$	$3.16 \times 10^{-6}$	0.2
	1236	120	-	-	-	-
	1237	160	$2.69 \times 10^{-4}$	$2.38 \times 10^{-4}$	$3.14 \times 10^{-5}$	0.13
	1238	200	$4.16 \times 10^{-4}$	$3.54 \times 10^{-4}$	$6.17 \times 10^{-5}$	0.17
Pm-SiGe:H	1239	80	$1.2 \times 10^{-4}$	$1.03 \times 10^{-4}$	$1.68 \times 10^{-5}$	0.16
	1240	120	$8.14 \times 10^{-5}$	$6.08 \times 10^{-5}$	$2.05 \times 10^{-5}$	0.34
	1241	160	$1.08 \times 10^{-5}$	$9.19 \times 10^{-6}$	$1.6 \times 10^{-6}$	0.17
	1242	200	$6.48 \times 10^{-5}$	$5.02 \times 10^{-5}$	$1.46 \times 10^{-5}$	0.29

**Tabla 5-20. Conductividad bajo iluminación, conductividad en oscuridad, fotoconductividad y razón fotoconductividad a conductividad en oscuridad a 100 V para muestras con sustrato PEN.**

PEN						
Proceso		Temperatura (°C)	$\sigma_{ill}(\Omega^{-1}cm^{-1})$	$\sigma_{dark}(\Omega^{-1}cm^{-1})$	$\sigma_{ph} = \sigma_{ill} - \sigma_{dark}$ ( $\Omega^{-1}cm^{-1}$ )	$\frac{\sigma_{ph}}{\sigma_{dark}}$
a-SiGe:H	1235	80	$5.94 \times 10^{-5}$	$4.38 \times 10^{-5}$	$1.56 \times 10^{-5}$	0.36
	1236	120	$1.16 \times 10^{-4}$	$7.06 \times 10^{-5}$	$4.57 \times 10^{-5}$	0.65
	1237	160	$2.01 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.01 \times 10^{-4}$	1.01
	1238	200	*	*	*	*
Pm-SiGe:H	1239	80	$1.17 \times 10^{-4}$	$5.42 \times 10^{-5}$	$6.3 \times 10^{-5}$	1.16
	1240	120	$1.71 \times 10^{-4}$	$8.26 \times 10^{-5}$	$8.79 \times 10^{-5}$	1.06
	1241	160	$1.68 \times 10^{-5}$	$8.11 \times 10^{-6}$	$8.7 \times 10^{-6}$	1.07
	1242	200	$8.93 \times 10^{-5}$	$3.91 \times 10^{-5}$	$5.02 \times 10^{-5}$	1.29

**Tabla 5-21. Conductividad bajo iluminación, conductividad en oscuridad, fotoconductividad y razón fotoconductividad a conductividad en oscuridad a 100 V para muestras con sustrato Polyimide.**

Polyimide						
Proceso		Temperatura (°C)	$\sigma_{ill}(\Omega^{-1}cm^{-1})$	$\sigma_{dark}(\Omega^{-1}cm^{-1})$	$\sigma_{ph} = \sigma_{ill} - \sigma_{dark}$ ( $\Omega^{-1}cm^{-1}$ )	$\frac{\sigma_{ph}}{\sigma_{dark}}$
a-SiGe:H	1235	80	*	*	*	*
	1236	120	$1.13 \times 10^{-5}$	$8.27 \times 10^{-6}$	$2.99 \times 10^{-6}$	0.36
	1237	160	$3.39 \times 10^{-7}$	$3.01 \times 10^{-7}$	$3.8 \times 10^{-8}$	0.13
	1238	200	$1.0 \times 10^{-5}$	$6.97 \times 10^{-6}$	$3.06 \times 10^{-6}$	0.44
Pm-SiGe:H	1239	80	$4.4 \times 10^{-5}$	$2.87 \times 10^{-5}$	$1.53 \times 10^{-5}$	0.53
	1240	120	*	*	*	*
	1241	160	*	*	*	*
	1242	200	$4.15 \times 10^{-5}$	$2.08 \times 10^{-5}$	$2.07 \times 10^{-5}$	0.99

**Tabla 5-22. Conductividad bajo iluminación, conductividad en oscuridad, fotoconductividad y razón fotoconductividad a conductividad en oscuridad a 100 V para muestras con sustrato Teflon 1.**

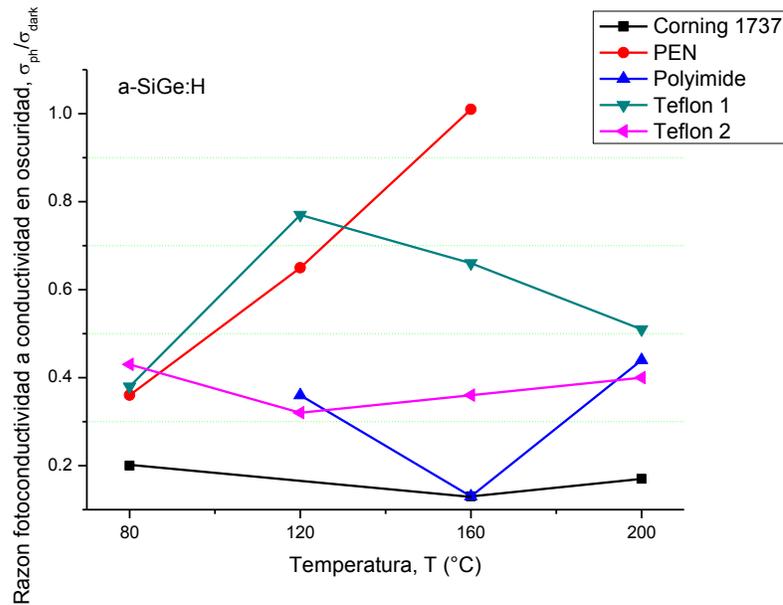
Teflón 1						
Proceso		Temperatura (°C)	$\sigma_{ill}(\Omega^{-1}cm^{-1})$	$\sigma_{dark}(\Omega^{-1}cm^{-1})$	$\sigma_{ph} = \sigma_{ill} - \sigma_{dark}$ ( $\Omega^{-1}cm^{-1}$ )	$\frac{\sigma_{ph}}{\sigma_{dark}}$
a-SiGe:H	1235	80	$3.28 \times 10^{-5}$	$2.39 \times 10^{-5}$	$8.96 \times 10^{-6}$	0.38
	1236	120	$6.6 \times 10^{-5}$	$3.73 \times 10^{-5}$	$2.87 \times 10^{-5}$	0.77
	1237	160	$1.3 \times 10^{-4}$	$7.79 \times 10^{-5}$	$5.16 \times 10^{-5}$	0.66
	1238	200	$1.74 \times 10^{-4}$	$1.15 \times 10^{-4}$	$5.85 \times 10^{-5}$	0.51
Pm-SiGe:H	1239	80	$2.31 \times 10^{-5}$	$1.95 \times 10^{-5}$	$3.57 \times 10^{-6}$	0.18
	1240	120	$6.12 \times 10^{-5}$	$3.41 \times 10^{-5}$	$2.71 \times 10^{-5}$	0.79
	1241	160	$5.53 \times 10^{-6}$	$3.68 \times 10^{-6}$	$1.85 \times 10^{-6}$	0.5
	1242	200	$4.05 \times 10^{-5}$	$2.13 \times 10^{-5}$	$1.93 \times 10^{-5}$	0.91

**Tabla 5-23. Conductividad bajo iluminación, conductividad en oscuridad, fotoconductividad y razón fotoconductividad a conductividad en oscuridad a 100 V para muestras con sustrato Teflon 2.**

Teflón 2						
Proceso		Temperatura (°C)	$\sigma_{ill}(\Omega^{-1}cm^{-1})$	$\sigma_{dark}(\Omega^{-1}cm^{-1})$	$\sigma_{ph} = \sigma_{ill} - \sigma_{dark}$ ( $\Omega^{-1}cm^{-1}$ )	$\frac{\sigma_{ph}}{\sigma_{dark}}$
a-SiGe:H	1235	80	$3.02 \times 10^{-5}$	$2.12 \times 10^{-5}$	$9.03 \times 10^{-6}$	0.43
	1236	120	$3.4 \times 10^{-5}$	$2.58 \times 10^{-5}$	$8.2 \times 10^{-6}$	0.32
	1237	160	$7.66 \times 10^{-5}$	$5.62 \times 10^{-5}$	$2.04 \times 10^{-5}$	0.36
	1238	200	$1.15 \times 10^{-4}$	$8.24 \times 10^{-5}$	$3.26 \times 10^{-5}$	0.4
Pm-SiGe:H	1239	80	$1.79 \times 10^{-5}$	$1.44 \times 10^{-5}$	$3.49 \times 10^{-6}$	0.24
	1240	120	$4.14 \times 10^{-5}$	$2.82 \times 10^{-5}$	$1.32 \times 10^{-5}$	0.47
	1241	160	$9.48 \times 10^{-6}$	$7.19 \times 10^{-6}$	$2.3 \times 10^{-6}$	0.32
	1242	200	$3.05 \times 10^{-6}$	$1.51 \times 10^{-5}$	$5.1 \times 10^{-6}$	0.34

La Figura 5-60 muestra la variación de la razón fotoconductividad a conductividad en oscuridad  $\left(\frac{\sigma_{ph}}{\sigma_{dark}}\right)$  con la temperatura de depósito en muestras a-SiGe:H sobre todos los sustratos usados en el presente trabajo. En muestras sobre Corning glass 1737  $\frac{\sigma_{ph}}{\sigma_{dark}}$  disminuye al aumentar la temperatura, en  $T_d = 80^\circ C$ ,  $\frac{\sigma_{ph}}{\sigma_{dark}} = 0.2$  y a  $T_d = 200^\circ C$ ,  $\frac{\sigma_{ph}}{\sigma_{dark}} = 0.17$  aunque es claro que el cambio no es muy alto. Cuando el sustrato es PEN,  $\frac{\sigma_{ph}}{\sigma_{dark}}$  incrementa con la temperatura iniciando a  $T_d = 80^\circ C$  con  $\frac{\sigma_{ph}}{\sigma_{dark}} = 0.36$  y alcanzando el valor más alto en la gráfica a  $T_d = 160^\circ C$  con una

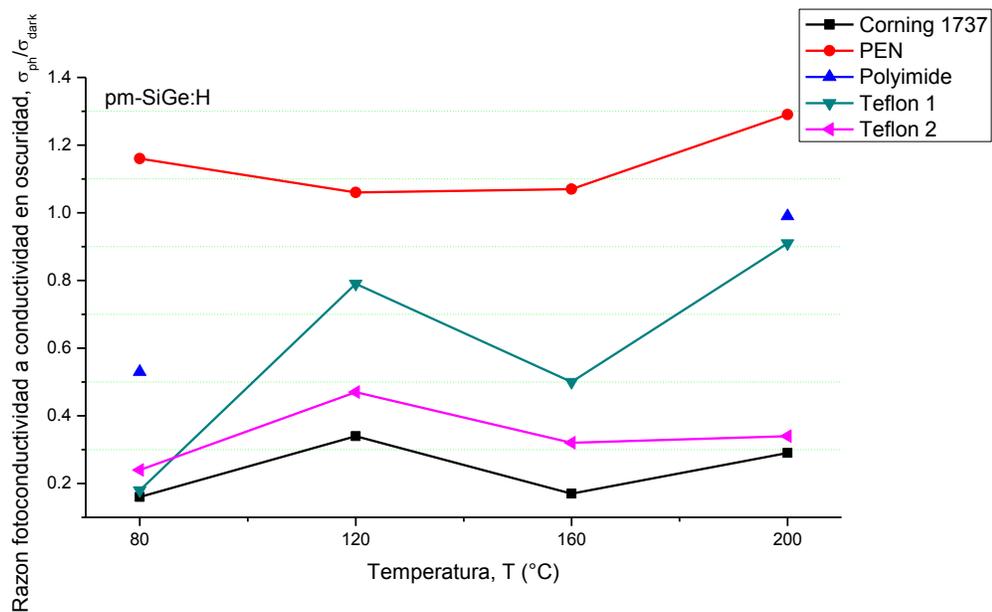
magnitud  $\frac{\sigma_{ph}}{\sigma_{dark}} = 1.01$ . Ya que sólo se tienen dos puntos de datos en películas sobre Polyimide, no es posible hablar de una tendencia para dicho sustrato. Muestras sobre Teflón 1 presentan dos comportamientos, primero en el rango 80 - 120°C  $\frac{\sigma_{ph}}{\sigma_{dark}}$  aumenta con la temperatura llegando a un valor  $\frac{\sigma_{ph}}{\sigma_{dark}} = 0.77$  y en el intervalo 120 – 200°C  $\frac{\sigma_{ph}}{\sigma_{dark}}$  disminuye hasta llegar a  $\frac{\sigma_{ph}}{\sigma_{dark}} = 0.51$ . No se halla una tendencia en películas sobre Teflón 2, pero sobre este material  $\frac{\sigma_{ph}}{\sigma_{dark}}$  no tiene variación significativa en el rango que acá se tiene de temperaturas. Su valor mínimo es  $\frac{\sigma_{ph}}{\sigma_{dark}} = 0.32$  cuando  $T_d = 120^\circ C$  y su valor máximo está en  $T_d = 80^\circ C$  siendo  $\frac{\sigma_{ph}}{\sigma_{dark}} = 0.43$ .



**Figura 5-60. Razón fotoconductividad a conductividad en oscuridad para películas a-SiGe:H sobre sustratos Corning 1737, PEN, Polyimide y Teflon PTFE fabricadas a distintas temperaturas de depósito. En la figura las líneas son sólo guías para la vista.**

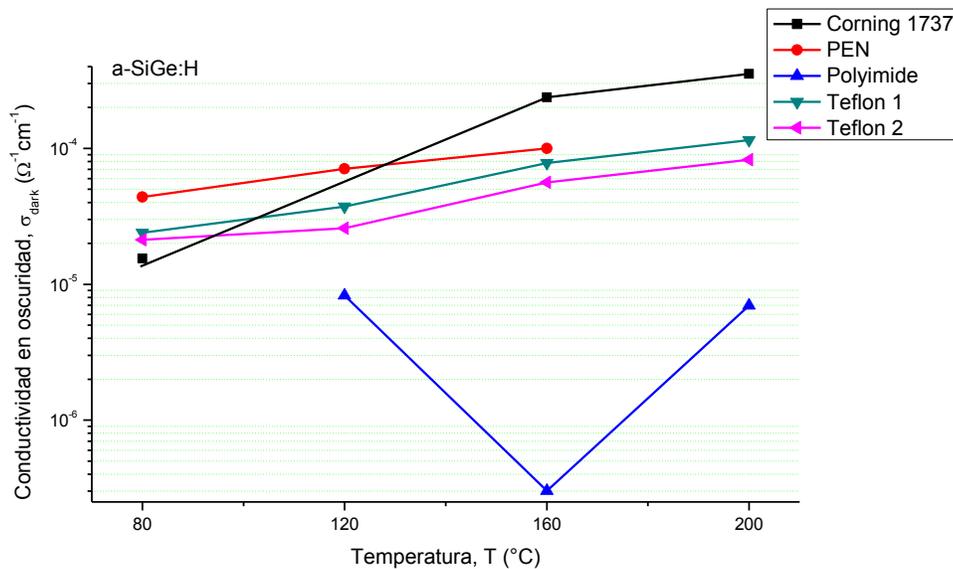
La Figura 5-61 muestra la variación de la razón fotoconductividad a conductividad en oscuridad  $\frac{\sigma_{ph}}{\sigma_{dark}}$  con la temperatura de depósito en muestras pm-SiGe:H sobre todos los sustratos. En películas sobre Corning 1737 no es visto un comportamiento definido, lo que se aprecia es poca variación de la razón a las

distintas temperaturas. Su valor mínimo, y que es el menor en toda la gráfica tiene una magnitud  $\frac{\sigma_{ph}}{\sigma_{dark}} = 0.16$  a  $T_d = 80^\circ C$  y su máximo está en  $T_d = 120^\circ C$ ,  $\frac{\sigma_{ph}}{\sigma_{dark}} = 0.34$ . Para las muestras sobre PEN se observan los valores más altos hallados, poseen su valor más bajo en  $T_d = 120^\circ C$  con una magnitud  $\frac{\sigma_{ph}}{\sigma_{dark}} = 1.06$  y el más alto en  $T_d = 200^\circ C$  alcanzando  $\frac{\sigma_{ph}}{\sigma_{dark}} = 1.29$ . De nuevo en Polyimide no se puede observar un comportamiento por tan solo poseer dos datos pero a  $T_d = 80^\circ C$   $\frac{\sigma_{ph}}{\sigma_{dark}} = 0.53$  y cuando  $T_d = 200^\circ C$ ,  $\frac{\sigma_{ph}}{\sigma_{dark}} = 0.99$ . En películas sobre Teflón 1  $\frac{\sigma_{ph}}{\sigma_{dark}}$  incrementa con la temperatura de depósito, pasa de tener  $\frac{\sigma_{ph}}{\sigma_{dark}} = 0.18$  en  $T_d = 80^\circ C$  a tener  $\frac{\sigma_{ph}}{\sigma_{dark}} = 0.91$  en  $T_d = 200^\circ C$ . Con el sustrato de Teflón no se aprecia un comportamiento definido de  $\frac{\sigma_{ph}}{\sigma_{dark}}$  aunque sí se observa que poco cambia la razón en magnitud a las diferentes temperaturas y que sus magnitudes son muy bajas.



**Figura 5-61. Razón fotoconductividad a conductividad en oscuridad para películas pm-SiGe:H sobre sustratos Corning 1737, PEN, Polyimide y Teflon PTFE fabricadas a distintas temperaturas de depósito. En la figura las líneas son sólo guías para la vista.**

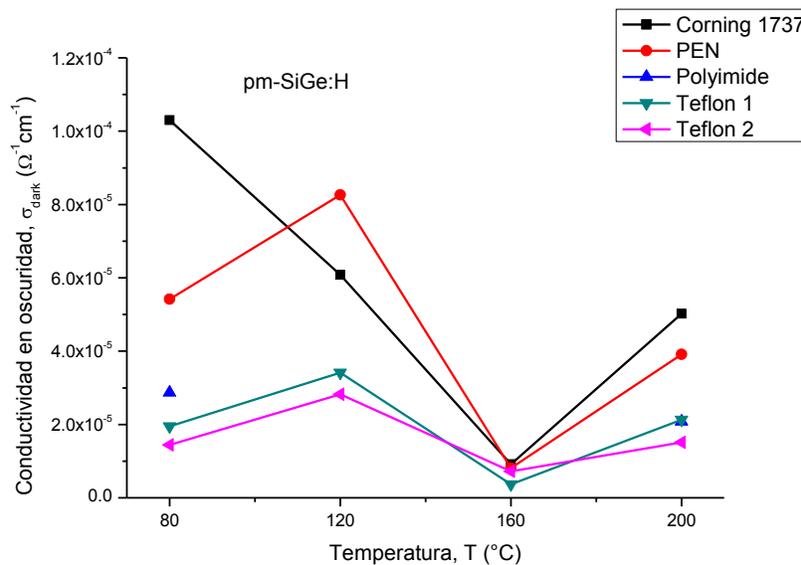
La Figura 5-62 es un gráfico Conductividad en oscuridad  $\sigma_{dark}$  vs temperatura de depósito  $T_d$  de películas a-SiGe:H sobre todos los sustratos. Lo normal en esta gráfica es encontrar que  $\sigma_{dark}$  incremente con la temperatura, así se nota cuando los sustratos son Corning, PEN, Teflón 1 y Teflón 2. Cuando se analiza  $\sigma_{dark}$  en películas sobre Polyimide se encuentra que sus valores son muy bajos, en el caso de  $T_d = 160^\circ C$ ,  $\sigma_{dark} = 3.01 \times 10^{-7} \Omega^{-1}cm^{-1}$  y sin tendencia alguna. El mayor valor de  $\sigma_{dark}$  es hallado en muestras sobre Corning 1737 a una  $T_d = 200^\circ C$  con una magnitud  $\sigma_{dark} = 3.54 \times 10^{-4} \Omega^{-1}cm^{-1}$ . El comportamiento para los sustratos de Teflón PTFE es muy similar y sus magnitudes muy cercanas entre sí.



**Figura 5-62. Conductividad en oscuridad para películas a-SiGe:H sobre sustratos Corning 1737, PEN, Polyimide y Teflón PTFE fabricadas a distintas temperaturas de depósito. En la figura las líneas son sólo guías para la vista.**

La Figura 5-63 es un gráfico Conductividad en oscuridad  $\sigma_{dark}$  vs temperatura de depósito  $T_d$  de películas pm-SiGe:H sobre todos los sustratos. En películas sobre Corning 1737 en el rango de temperaturas 80 – 160°C,  $\sigma_{dark}$  disminuye con el aumento de temperatura, comenzando con una magnitud  $\sigma_{dark} = 1.03 \times 10^{-4} \Omega^{-1}cm^{-1}$  ( $\sigma_{dark}$  más alto de toda la gráfica) a  $T_d = 80^\circ C$ . Llega a su mínimo  $\sigma_{dark} = 9.19 \times 10^{-6} \Omega^{-1}cm^{-1}$  en  $T_d = 160^\circ C$  para luego incrementar y alcanzar  $\sigma_{dark} = 5.02 \times 10^{-5} \Omega^{-1}cm^{-1}$  cuando  $T_d = 200^\circ C$ . En muestras sobre PEN no se

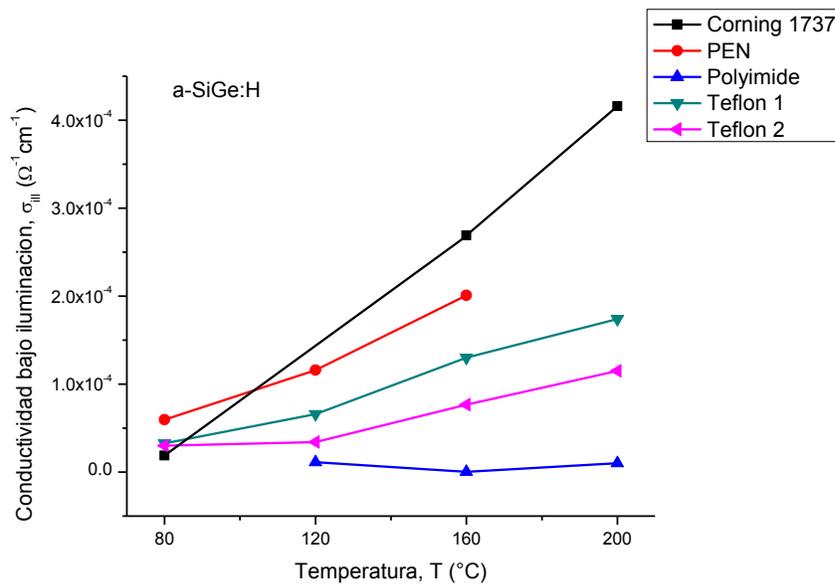
observa una tendencia aunque sí destaca un alto valor de  $\sigma_{dark}$  a  $T_d = 120^\circ C$  con magnitud  $\sigma_{dark} = 8.26 \times 10^{-5} \Omega^{-1}cm^{-1}$ . En teflón 1 no se aprecia comportamiento claro para  $\sigma_{dark}$ , su valor máximo es  $\sigma_{dark} = 3.41 \times 10^{-5} \Omega^{-1}cm^{-1}$  cuando  $T_d = 120^\circ C$  y tiene el valor más bajo de todos en la gráfica a  $T_d = 160^\circ C$  siendo  $\sigma_{dark} = 3.68 \times 10^{-6} \Omega^{-1}cm^{-1}$ . Como en el caso del material a-SiGe:H, de nuevo Teflón 1 y Teflón 2 poseen similar comportamiento y valores casi iguales en magnitud. El valor de  $\sigma_{dark}$  más alto con sustrato Teflón 2 es  $\sigma_{dark} = 2.82 \times 10^{-5} \Omega^{-1}cm^{-1}$  en  $T_d = 120^\circ C$  y su mínimo  $\sigma_{dark} = 7.19 \times 10^{-6} \Omega^{-1}cm^{-1}$  cuando  $T_d = 160^\circ C$ . En esta gráfica se puede apreciar que a una temperatura de depósito de  $160^\circ C$  casi todos los valores de  $\sigma_{dark}$  tiendan a converger, la conductividad en oscuridad para cada sustrato encontró su mínimo a esta temperatura.



**Figura 5-63. Conductividad en oscuridad para películas pm-SiGe:H sobre sustratos Corning 1737, PEN, Polyimide y Teflon PTFE fabricadas a distintas temperaturas de depósito. En la figura las líneas son sólo guías para la vista.**

La Figura 5-64 muestra el comportamiento de la conductividad bajo iluminación  $\sigma_{ill}$  ante la temperatura de depósito  $T_d$  en películas a-SiGe:H para los sustratos Corning, PEN, Polyimide y Teflón PTFE.  $\sigma_{ill}$  aumenta con la temperatura para las películas sobre Corning, PEN, Teflón 1 y Teflón 2, a excepción del sustrato Polyimide. En Corning 1737 cuando  $T_d = 80^\circ C$ ,  $\sigma_{ill} = 1.87 \times 10^{-5} \Omega^{-1}cm^{-1}$  y

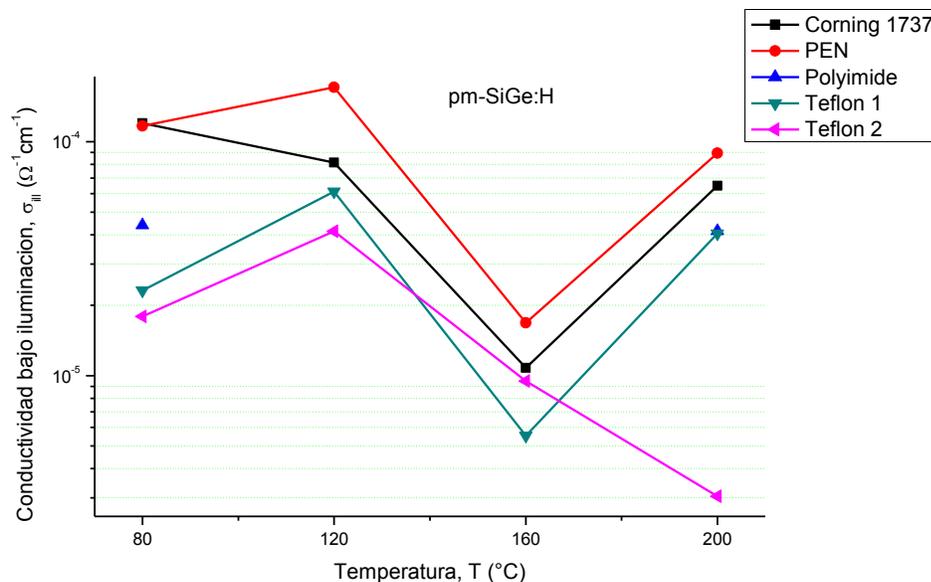
cuando la temperatura es  $200^{\circ}\text{C}$ ,  $\sigma_{ill} = 4.16 \times 10^{-4} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ , este valor de conductividad es el más alto encontrado en la gráfica. Con PEN, su mínimo valor es  $\sigma_{ill} = 5.94 \times 10^{-5} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$  cuando  $T_d = 80^{\circ}\text{C}$  y cuando se alcanza  $T_d = 160^{\circ}\text{C}$ , entonces  $\sigma_{ill} = 2.01 \times 10^{-4} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ . La menor magnitud de  $\sigma_{ill}$  es encontrada en muestras sobre Polyimide a una temperatura de  $160^{\circ}\text{C}$  y es  $\sigma_{ill} = 3.39 \times 10^{-7} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ . Cuando el sustrato es Teflón 1 a  $T_d = 80^{\circ}\text{C}$ ,  $\sigma_{ill} = 3.28 \times 10^{-5} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$  y alcanza su valor máximo en  $T_d = 200^{\circ}\text{C}$ ,  $\sigma_{ill} = 1.74 \times 10^{-4} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ . Finalmente películas sobre Teflón 2 poseen un valor  $\sigma_{ill} = 3.02 \times 10^{-5} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$  en  $80^{\circ}\text{C}$  alcanzando  $\sigma_{ill} = 1.15 \times 10^{-4} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$  cuando  $T_d = 200^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 5-64. Conductividad bajo iluminación para películas a-SiGe:H sobre sustratos Corning 1737, PEN, Polyimide y Teflon PTFE fabricadas a distintas temperaturas de depósito. En la figura las líneas son sólo guías para la vista.**

La Figura 5-65 muestra el comportamiento de la conductividad bajo iluminación  $\sigma_{ill}$  ante la temperatura de depósito  $T_d$  en películas pm-SiGe:H para los sustratos Corning, PEN, Polyimide y Teflón PTFE. En muestras sobre PEN no es posible determinar una tendencia para  $\sigma_{ill}$ , pero es evidente que los valores más altos corresponden a estas muestras, a temperatura de depósito  $120^{\circ}\text{C}$   $\sigma_{ill} = 1.71 \times 10^{-4} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ . En películas depositadas sobre Corning 1737 en el rango  $80 -$

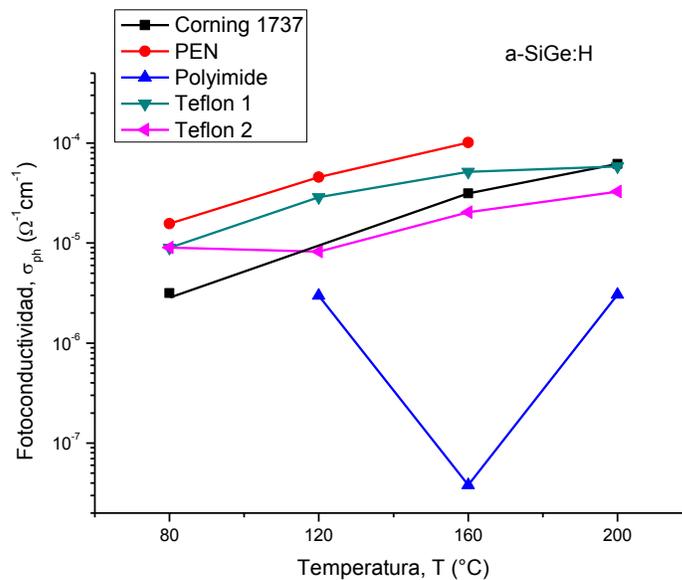
160°C  $\sigma_{ill}$  disminuye obteniéndose un mínimo de  $\sigma_{ill} = 1.08 \times 10^{-5} \Omega^{-1} cm^{-1}$ , después en el intervalo 160 – 200°C  $\sigma_{ill}$  aumenta y llega a tener una magnitud  $\sigma_{ill} = 6.48 \times 10^{-5} \Omega^{-1} cm^{-1}$ . Con sustrato Polyimide se tiene la mala fortuna de contar con tan sólo dos puntos, cuando  $T_d = 80^\circ C$  entonces  $\sigma_{ill} = 4.4 \times 10^{-5} \Omega^{-1} cm^{-1}$  y con  $T_d = 200^\circ C$   $\sigma_{ill} = 4.15 \times 10^{-5} \Omega^{-1} cm^{-1}$  que no difieren mucho pero no es posible saber qué ocurre con estas muestras a 120 y 160°C. Con sustrato Teflón 1 no se observa una tendencia pero tiene un mínimo notable a 160°C en donde su conductividad toma un valor  $\sigma_{ill} = 5.53 \times 10^{-6} \Omega^{-1} cm^{-1}$ . En muestras sobre Teflón 2 se aprecian dos comportamientos diferentes para  $\sigma_{ill}$ . En el intervalo 80 - 120°C  $\sigma_{ill}$  aumenta y alcanza un valor  $\sigma_{ill} = 4.14 \times 10^{-5} \Omega^{-1} cm^{-1}$ . Después entre 120 – 200°C  $\sigma_{ill}$  disminuye hasta alcanzar el menor valor de conductividad en la gráfica  $\sigma_{ill} = 3.05 \times 10^{-6} \Omega^{-1} cm^{-1}$ .



**Figura 5-65. Conductividad bajo iluminación para películas pm-SiGe:H sobre sustratos Corning 1737, PEN, Polyimide y Teflon PTFE fabricadas a distintas temperaturas de depósito. En la figura las líneas son sólo guías para la vista.**

La Figura 5-66 es un gráfico de fotoconductividad  $\sigma_{ph}$  vs temperatura de depósito  $T_d$  en películas a-SiGe:H para los sustratos Corning, PEN, Polyimide y Teflón PTFE. Esta gráfica tiene un comportamiento muy parecido al de la conductividad en oscuridad para el mismo material. Cuando se analizan los datos de películas

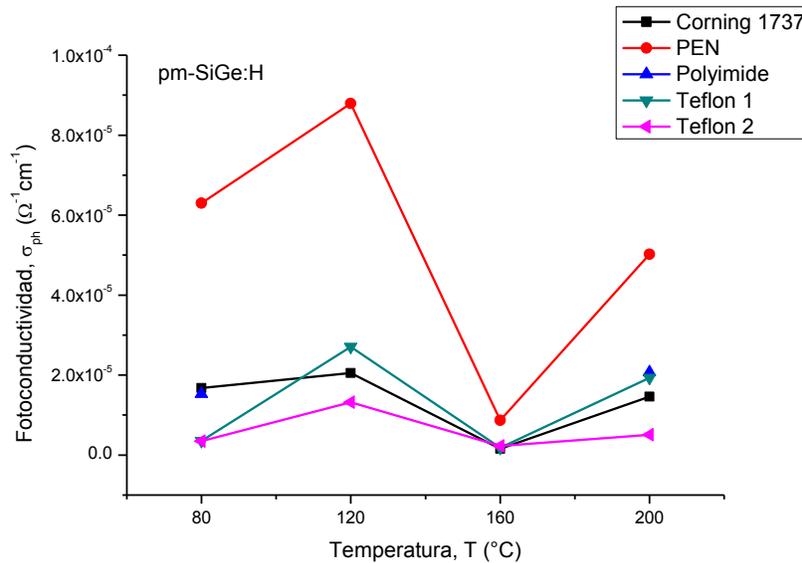
sobre Corning 1737, es visto que  $\sigma_{ph}$  aumenta con  $T_d$ . Así en  $T_d = 80^\circ C$ ,  $\sigma_{ph} = 3.16 \times 10^{-6} \Omega^{-1} cm^{-1}$  y cuando  $T_d = 200^\circ C$ ,  $\sigma_{ph} = 6.17 \times 10^{-5} \Omega^{-1} cm^{-1}$ . De nuevo es visto para las muestras sobre PEN los valores más altos de  $\sigma_{ph}$  con su máximo en  $T_d = 160^\circ C$  y una magnitud  $\sigma_{ph} = 1.01 \times 10^{-4} \Omega^{-1} cm^{-1}$ . La fotoconductividad en películas depositadas sobre Polyimide es muy baja llegando a  $\sigma_{ph} = 3.8 \times 10^{-8} \Omega^{-1} cm^{-1}$  a una temperatura de  $160^\circ C$ . Con el sustrato Teflón 1 se aprecia un incremento en  $\sigma_{ph}$  con  $T_d$ , cuando  $T_d = 80^\circ C$  entonces  $\sigma_{ph} = 8.96 \times 10^{-6} \Omega^{-1} cm^{-1}$  y con  $T_d = 200^\circ C$  incrementa a  $\sigma_{ph} = 5.85 \times 10^{-5} \Omega^{-1} cm^{-1}$ . En muestras sobre Teflón 2 también se aprecia incremento en  $\sigma_{ph}$  con  $T_d$ , así a temperatura de  $80^\circ C$ ,  $\sigma_{ph} = 9.03 \times 10^{-6} \Omega^{-1} cm^{-1}$  y va aumento su magnitud hasta llegar a  $\sigma_{ph} = 3.26 \times 10^{-5} \Omega^{-1} cm^{-1}$  a  $T_d = 200^\circ C$ .



**Figura 5-66. Fotoconductividad de películas a-SiGe:H sobre sustratos Corning 1737, PEN, Polyimide y Teflón PTFE fabricadas a distintas temperaturas de depósito. En la figura las líneas son sólo guías para la vista.**

La Figura 5-67 es un gráfico de fotoconductividad  $\sigma_{ph}$  vs temperatura de depósito  $T_d$  en películas pm-SiGe:H para los sustratos Corning, PEN, Polyimide y Teflón PTFE. Para todos los sustratos involucrados no es posible hallar un comportamiento definido. Muestras sobre PEN poseen los valores más altos de

$\sigma_{ph}$  en el rango completo de temperaturas, el máximo valor hallado en la gráfica está a una temperatura de 120°C con una magnitud  $\sigma_{ph} = 8.79 \times 10^{-5} \Omega^{-1} cm^{-1}$ , el mínimo valor de  $\sigma_{ph}$  visto en estas muestras se aprecia a una temperatura de 160°C,  $\sigma_{ph} = 8.7 \times 10^{-6} \Omega^{-1} cm^{-1}$ .



**Figura 5-67. Fotoconductividad de películas pm-SiGe:H sobre sustratos Corning 1737, PEN, Polyimide y Teflon PTFE fabricadas a distintas temperaturas de depósito. En la figura las líneas son sólo guías para la vista.**

Como aconteció con la gráfica de conductividad en oscuridad para pm-SiGe:H vista anteriormente, en la presente gráfica es posible ver que en  $T_d = 160^\circ C$  se encuentran los valores mínimos de  $\sigma_{ph}$  para todas las muestras sin importar el sustrato. Con Corning 1737 se tiene el valor más pequeño hallado en toda la gráfica  $\sigma_{ph} = 1.6 \times 10^{-6} \Omega^{-1} cm^{-1}$  a  $T_d = 160^\circ C$ . Muestras sobre Teflón 1 poseen su máximo a una temperatura de 120°C con magnitud  $\sigma_{ph} = 2.71 \times 10^{-5} \Omega^{-1} cm^{-1}$  y su valor mínimo es  $\sigma_{ph} = 1.85 \times 10^{-6} \Omega^{-1} cm^{-1}$ . Películas depositadas sobre Teflón 2 incrementan su  $\sigma_{ph}$  en los intervalos 80 – 120°C y 160 – 200°C y su  $\sigma_{ph}$  disminuye entre 120 y 160°C. Su fotoconductividad máxima se encuentra a una  $T_d = 120^\circ C$ ,  $\sigma_{ph} = 1.32 \times 10^{-5} \Omega^{-1} cm^{-1}$  y su mínima es  $\sigma_{ph} = 2.3 \times 10^{-6} \Omega^{-1} cm^{-1}$  en  $T_d = 160^\circ C$ .

## 6 Conclusiones

En este trabajo de tesis se realizó una investigación experimental detallada de propiedades ópticas, electrónicas y morfológicas de películas de a-SiGe:H y pm-SiGe:H depositadas sobre sustratos plásticos PEN, Polyimide y Teflón PTFE. En particular, la influencia de la temperatura de depósito y de los diferentes sustratos sobre los espectros electrónicos, la superficie de las películas y propiedades de transporte del material se estudiaron a través de mediciones de espectros de absorción óptica, dependencia con la temperatura de la conductividad en oscuridad, caracterización de fotoconductividad, así como también se hizo uso de la técnica de microscopía de fuerza atómica.

Los resultados principales de este estudio se pueden resumir como sigue:

Las características morfológicas cambiaron con la temperatura de depósito ( $T_d$ ) no monotónicamente y mostraron algunos extremos en 160°C. Fue observado en películas a-SiGe:H y pm-SiGe:H que la altura de grano promedio  $\langle H \rangle$  tiene una menor variación cuando se tiene sustrato de polyimide. Los mayores valores de  $\langle H \rangle$  siempre se encontraron en películas depositadas sobre sustratos de teflón. El diámetro de grano promedio ( $\langle D \rangle$ ) decrece con  $T_d$  en las películas depositadas sobre sustrato PEN, mientras que en las películas que poseen sustratos de teflón y polyimide,  $\langle D \rangle$  incrementa con  $T_d$ . El parámetro “*skewness*” ( $\gamma_3$ ) en las películas depositadas sobre teflón posee una magnitud negativa. En las películas depositadas sobre polyimide, valores de  $\gamma_3$  están muy cercanos a cero. Los valores de curtosis ( $\gamma_4$ ) cercanos a 3 fueron observados en las películas depositadas sobre polyimide (con picos dominando en su morfología superficial) indicando que la forma de los picos se acerca a la forma de una Gaussiana. Un comportamiento diferente de  $\gamma_4$  se aprecia en películas a-SiGe:H y pm-SiGe:H fabricadas sobre teflón:  $\gamma_4$  incrementa con  $T_d$  en pm-SiGe:H y reduce en películas a-SiGe:H.

Las características de conductividad (energía de activación  $E_a$ , conductividad a temperatura ambiente  $\sigma_{RT}$ ) medidas sobre sustrato Corning 1737 son diferentes para las películas a-SiGe:H y pm-SiGe:H. La energía de activación  $E_a$  en películas a-SiGe:H depositadas sobre teflón decrece con  $T_d$ . En películas pm-SiGe:H  $E_a$  es mayor que en películas a-SiGe:H. Las películas pm-SiGe:H exhiben mínimos de conductividad a temperatura ambiente ( $\sigma_{RT}$ ) a  $T_d=160^\circ\text{C}$ . La energía de Fermi ( $E_F$ ) para películas a-SiGe:H sobre teflón se reduce monotónicamente con  $T_d$ , mientras que películas pm-SiGe:H muestran un máximo de  $E_F$  en  $T_d=160^\circ\text{C}$ .

El band gap óptico ( $E_g$ ) para películas a-SiGe:H disminuye con  $T_d$ , mientras que para películas pm-SiGe:H  $E_g$  aumenta con  $T_d$ . La energía de Urbach  $E_U$  incrementa con  $T_d$  en películas a-SiGe:H. La energía de Urbach en las películas pm-SiGe:H disminuye en el rango de temperaturas entre  $80^\circ\text{C}$  a  $120^\circ\text{C}$  y entonces incrementa para el rango  $T_d=120^\circ\text{C}$  a  $200^\circ\text{C}$ .

Valores altos de fotoconductividad ( $\sigma_{ph}$ ) se observaron en películas a-SiGe:H sobre sustrato PEN a  $T_d=160^\circ\text{C}$  y los valores con menor magnitud de  $\sigma_{ph}$  sobre sustrato polyimide. Máximos de  $\sigma_{ph}$  en películas pm-SiGe:H fueron revelados a  $T_d=120^\circ\text{C}$ .  $\sigma_{ph}$  aumenta con  $T_d$  en aquellas películas depositadas sobre sustrato PEN. Películas depositadas sobre sustratos de polyimide tienen menor  $\sigma_{ph}$  que aquellas muestras que se depositaron sobre los otros sustratos. Para películas fabricadas sobre sustrato teflón,  $\sigma_{ph}$  incrementa con  $T_d$ . En películas pm-SiGe:H hay un máximo de  $\sigma_{ph}$  cuando  $T_d=120^\circ\text{C}$  y un mínimo cuando  $T_d=160^\circ\text{C}$  en los sustratos estudiados.

## Apéndice A. Tutorial de PUMA

En esta sección se quiere dar una breve guía al lector en la determinación del espesor y constantes ópticas de películas de a-SiGe:H y pm-SiGe:H por medio de mediciones de transmitancia usando el software PUMA, el cual es de uso libre no comercial [43]. Mayor información puede ser encontrada en el sitio web de los creadores: <http://www.ime.usp.br/~egbirgin/puma/>.

### Procesamiento de datos de las medidas de Transmitancia en el rango de 190 nm a 900 nm.

Una vez se realizan las mediciones ópticas en el rango UV-Vis, se tienen los archivos con los datos de transmitancia. Las mediciones de Transmitancia en el rango UV-Vis (190 – 900 nm) fueron realizadas en un espectrofotómetro Perkin – Elmer Lambda 3B. En la tabla A1 se describen los parámetros del software PUMA.

El procesamiento de los datos es realizado por el software PUMA (*Pointwise Unconstrained Minimization Approach*), el cual resuelve el problema de estimación bajo un método de llamadas repetitivas (tres en total), en las cuales el usuario tiene que proporcionarle al software información acerca de las características de la película y el sustrato, así como datos relacionados con el archivo de las mediciones de transmitancia [39]. En la tabla A2 se muestran los datos ingresados al software en cada una de las tres llamadas. Después que fueron culminadas las tres llamadas, se procede a hacer una verificación entre la transmitancia hecha en el laboratorio y aquella transmitancia que recientemente fue estimada con ayuda del software PUMA.

Tabla A.1. Descripción de los parámetros del software PUMA.

Parámetro	Descripción
Fname (nombre de archivo)	El formato del nombre del archivo es: <b>nombre-dat.txt</b>
Nlayers (número de capas)	<b>4</b> ; a saber: sustrato, película, rodeados por aire( inferior y superior)
Slayer (capa del sustrato)	<b>2</b> ; aire superior (0), película (1), sustrato (2) y aire inferior (3)
Substrate (tipo de sustrato)	<b>10</b> ; CG (10), c-Si (20), c-quartz (30), glass slides (40), borosilicate (50)
DataType (tipo de datos)	<b>T</b> ; Transmitancia (T), Reflectancia (R), Ambos (B)
Nobs (barrido)	<b>100</b> ; número de puntos utilizados en el proceso de optimización
Lambda-min, Lambda-max	<b>200 - 900</b> ; Intervalo en el que las constantes ópticas serán determinadas
MaxIT (número máximo de iteraciones)	<b>3000, 5000 o 50000</b> ; dependiendo de la primera, segunda o tercera llamada
Quad (error cuadrático)	<b>1e+100 – 1e-05</b> ; se almacenan los valores con menor <b>QUAD</b>
Init (seleccionar estimado)	<b>0 o 9</b> ; se realiza un estimado inicial (0), se utiliza la estimación previa (9)
Thickness-min, Thickness-max, Thickness-step	Rango del espesor esperado Paso del espesor esperado
Infle-min, Infle-max, Infle-step	Rango del punto de inflexión Paso del punto de inflexión esperado
N0-ini, N0-fin, N0-step	Rango del índice de refracción en la longitud de onda mínima Paso del índice de refracción esperado en <b>LAMBDAmin</b>
Nf-ini, Nf-fin, Nf-step	Rango de índice de refracción en la longitud de onda máxima Paso del índice de refracción esperado en <b>LAMBDAmax</b>
K0-ini, K0-fin, K0-step	Rango del coeficiente de extinción Paso del coeficiente de extinción esperado

Así en el archivo *-inf* resultante de la tercera llamada, se extraen solo los datos de transmitancia junto con sus datos de longitudes de onda. A este nuevo archivo se le lleva a un software matemático (en el presente trabajo se hizo uso de Origin). La figura A1 muestra el resultado de hacer la comparación.

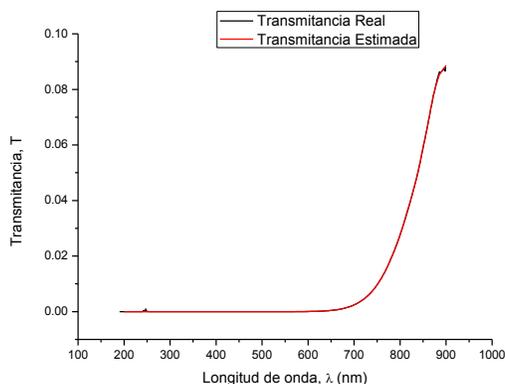
Tabla A.2. Incorporación de parámetros al software PUMA en las tres llamadas rango UV-Vis para proceso 1235.

Parámetro	Llamada 1	Llamada 2	Llamada 3
Fname	1235t	1235t	1235t
Nlayers	4	4	4
Slayer	2	2	2
Substrate	10	10	10
DataType	T	T	T
Nobs	100	100	100
Lambda-min, Lambda-max	190, 900	190, 900	190, 900
Max IT	3000	5000	50000
Quad	1e+100	3.974718e-004	2.939722e-006
Init	0	9	9
Thickness-min, Thickness-max, Thickness-step	178.8, 378.8, 10	198.8, 298.8, 1	198.80, 198.80, 1
Infle-min, Infle- max, Infle-step	500, 900, 50	550, 550, 50	550, 550, 50
N0-ini, N0-fin, N0-step	3, 5, 1	-	-
Nf-ini, Nf-fin, Nf-step	3, 5, 1	-	-
K0-ini, K0-fin, K0-step	0.1, 0.1, 0.05	-	-
<b>Grosor estimado de la película</b>	<b>248.80 nm</b>	<b>198.80 nm</b>	<b>198.80 nm</b>
<b>Punto de</b>	<b>550.00 nm</b>	<b>550.00 nm</b>	<b>550.00 nm</b>

<b><i>inflexión estimado</i></b>			
<b><i>Error cuadrático</i></b>	<b>3.974718e-004</b>	<b>2.939722e-006</b>	<b>2.759929e-006</b>

**Nota 1.** En la tabla anterior en las columnas 2 y 3 cuando aparece un guión, quiere decir que tales datos de índices de refracción y de extinción ya no deben ser suministrados al software.

**Nota 2.** En la tabla (A2) las últimas 3 filas (con negrita) corresponden a valores de salida del software PUMA.



**Figura A.1. Comparación transmitancias calculada y medida proceso 1235.**

Se puede así verificar que los resultados arrojados por el software PUMA están en buen acuerdo.

### **Procesamiento de datos de las medidas de Transmitancia en el rango de 870 nm a 2000 nm**

Para las mediciones de transmitancia en el rango del infrarrojo cercano se utilizó el espectrómetro de la marca Bruker modelo Vector-22. La fuente de NIR utilizada actúa sobre un rango de longitudes de onda desde 0.870 micras hasta 5 micrómetros o equivalentemente  $K=11500 - 2000 \text{ cm}^{-1}$ . Los parámetros utilizados al momento de las mediciones fueron: Resolución  $5 \text{ cm}^{-1}$ , scans 25, rango  $11500 \text{ cm}^{-1}$  a  $2000 \text{ cm}^{-1}$ .

El equipo estuvo encendido durante 3 horas antes que se comenzaran las mediciones y con un flujo de gas de nitrógeno. El software OPUS guarda los datos como pares número de onda, transmitancia ( $k, T$ ) en formato filename.dat y tales

archivos son procesados con el software PUMA (*Pointwise Unconstrained Minimization Approach*).

Antes de comenzar con el análisis de los datos hay que poner atención y pasar los valores de número de onda a longitudes de onda, esto puede ser realizado en Origin. La ecuación que se utilizó fue:

$$\lambda(nm) = \frac{10 \times 10^6}{k(cm^{-1})} \quad (A.1)$$

El coeficiente de extinción está relacionado con el coeficiente de absorción  $\alpha$  ( $cm^{-1}$ ) mediante:

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (A.2)$$

Así ya que PUMA permitió la obtención del coeficiente de extinción  $k$ , se puede calcular el coeficiente de absorción sin mayor problema. Para hallar el coeficiente de absorción del material se requiere que el eje X sea el eje de energía del fotón que también podemos calcular ya que se tienen los valores de longitudes de onda y se aplica la siguiente ecuación.

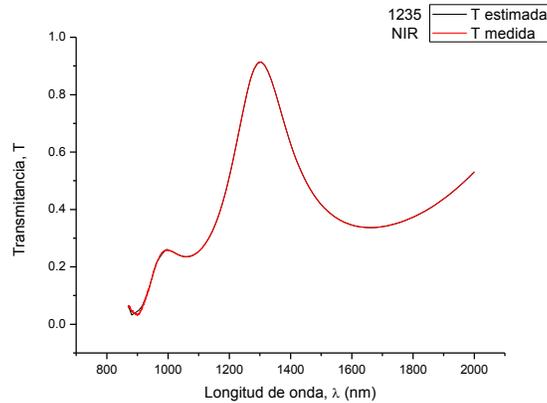
$$E = h\nu = \frac{1.24}{\lambda(\mu m)} eV \quad (A.3)$$

Así como en el rango UV-Vis explicado con anterioridad, con NIR después de realizar todo el procedimiento con el software PUMA, también se comparan las transmitancias para así comprobar que los datos del coeficiente de extinción serán útiles en los procesos subsiguientes (ver figura A.2).

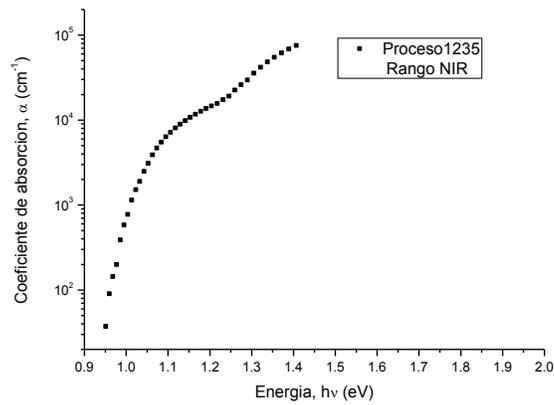
En la figura A3 se muestra el coeficiente de absorción para la muestra del proceso 1235 de ejemplo en el rango NIR.

Tabla A.3. Incorporación de parámetros al software PUMA en las tres llamadas rango NIR.

Parámetro	Llamada 1	Llamada 2	Llamada 3
Fname	1235N	1235N	1235N
Nlayers	4	4	4
Slayer	2	2	2
Substrate	10	10	10
DataType	T	T	T
Nobs	100	100	100
Lambda-min, Lambda-max	870, 2000	190, 900	190, 900
Max IT	3000	5000	50000
Quad	1e+100	2.313642e-003	6.086900e-004
Init	0	9	9
Thickness-min, Thickness-max, Thickness-step	178.8, 378.8, 10	278.8, 378.8, 1	327.8, 327.8, 1
Infle-min, Infle- max, Infle-step	500, 900, 50	900, 900, 50	900, 900, 50
N0-ini, N0-fin, N0-step	3, 5, 1	-	-
Nf-ini, Nf-fin, Nf-step	3, 5, 1	-	-
K0-ini, K0-fin, K0-step	0.1, 0.1, 0.05	-	-
<b>Grosor estimado de la película</b>	<b>328.80 nm</b>	<b>327.80 nm</b>	<b>327.80 nm</b>
<b>Punto de inflexión estimado</b>	<b>900.00 nm</b>	<b>900.00 nm</b>	<b>900.00 nm</b>
<b>Error cuadrático</b>	<b>2.313642e-003</b>	<b>6.086900e-004</b>	<b>5.408001e-004</b>



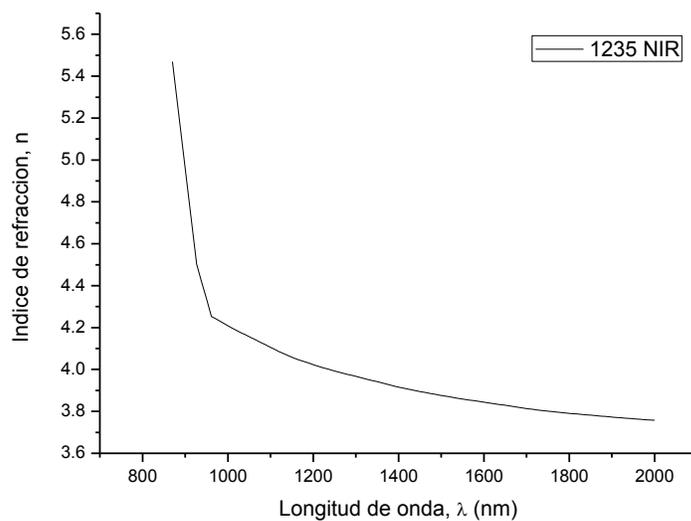
**Figura A.2. Comparación transmitancias medida y estimada, proceso 1235 NIR.**



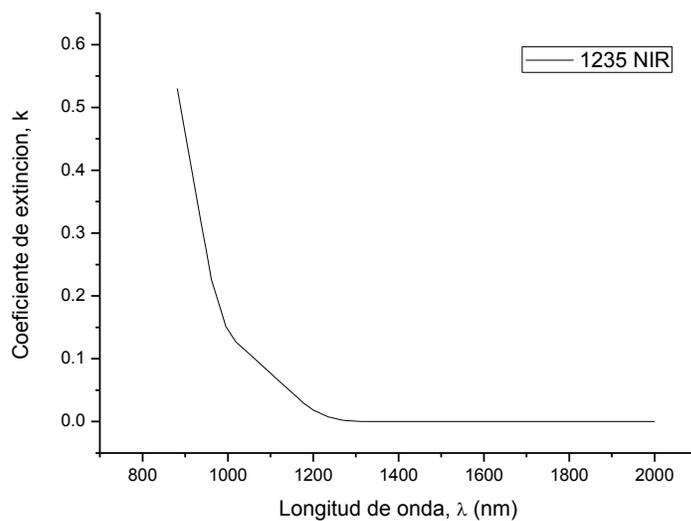
**Figura A.3. Coeficiente de absorción proceso 1235 NIR.**

Posteriormente con los datos obtenidos gracias al software PUMA es posible hallar energías de interés como el band gap óptico y la energía de Urbach. Acá no se repetirá el proceso para hallarlas porque en el capítulo de metodología se explicó la manera de hallar las características ópticas más importantes de este trabajo. Este apéndice tiene un propósito más específico en el manejo del software.

A continuación se muestran las curvas correspondientes a índice de refracción y coeficiente de extinción, las gráficas A.4 y A.5 las esbozan respectivamente.



**Figura A.4. Índice de refracción proceso 1235 NIR.**



**Figura A.5. Coeficiente de extinción proceso 1235 NIR.**

Las anteriores vistas son dadas para que el lector aprecie la manera en que PUMA despliega el índice de refracción estimado y el coeficiente de extinción estimado.

## Bibliografía

- [1] B. G. Budaguan, A. A. Sherchenkov, G. L. Gorbulin. *The Properties of a-SiGe:H Films Deposited by 55 Khz PECVD*. Journal of Non Crystalline Solids Issue 297, 2002, pages 205-209.
- [2] James D. Plummer, Michael D. Deal, Peter B. Griffin “Silicon VLSI Technology. Fundamentals, practice and modeling”; Prentice Hall, (2000).
- [3] V. L. Dalal, “Fundamental Considerations Regarding the Growth of Amorphous and Microcrystalline Silicon and Alloy Films”, *J. Non-Cryst. Solids*, 395, 173 (2000)
- [4] Yong Liu “High growth rate deposition of hydrogenated amorphous silicon-germanium films and devices using ECR-PECVD” PhD. Thesis, Iowa State University, 2002.
- [5] K. Tanaka, E. Maruyama, T. Shimada, H. Okamoto, T. Sato. *Amorphous Silicon*. John Wiley & Sons 1999.
- [6] R. A. Street “Hydrogenated amorphous silicon”; Cambridge University Press, (1991).
- [7] Pankove, J. I., Carlson, D.E., Berkeyheiser, J. E., and Wance, R. O. (1983) *Phys. Rev. Lett.* **51**, 2224.
- [8] Johnson, N. M., Ponce, F.A., Street, R. A., and Nemanich, R. J. (1987) *Phys. Rev.* **B35**, 4166.
- [9] M. Capitelli, C. Gorse, R. Winkler, and J. Wilhelm, “Plasma Chem. Plasma process”. 8, 399 (1988).

- [10] S. Veprek, "Chimia" 34, 489 (1981).
- [11] N. Shibata, K. Fukuda, H. Ohtoshi, J. Hanna, S. Oda, and I. Shimizu, "Mater. Res. Soc. Symp. Proc" 95, 225 (1987).
- [12] Y. Hernandez "Estudio de las propiedades electrónicas de películas de Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> depositadas por plasma a bajas frecuencias" Tesis de Maestria, INAOE, 2003.
- [13] Sánchez Morales, Liborio "Growth and Characterization of Nano-structured Silicon-Germanium Films deposited by LF PE CVD", [Tesis de doctorado], INAOE, Puebla, 2007.
- [14] W. E. Spear and C. S. Cloude, *Phil. Mag.*, B58 (1988) 467.
- [15] W. E. Spear, H. L. Steemers and H. Mannsperger, *Phil. Mag.*, B48 (1983) L49.
- [16] H. Overhof, *Disordered Semiconductors*, editado por M. A. Kastner, Plenum Press, New York (1987) 713.
- [17] A. Street (ed.) *Technology and Applications of Amorphous Silicon*. Springer, Germany, 2000.
- [18] S. O. Kasap "*Principles of electronic materials and devices*", Second edition, Mc Graw Hill (2000).

[19] Tutorials, Faculty of Health and Wellbeing Biosciences Division Chemistry Resources, Sheffield Hallam University

[20] P. Roca i Cabarrocas, S. Hamma, S. N. Sharma, G. Viera, E. Bertran, and J. Costa, *J. Non-Cryst. Solids* 227-230, 871 (1998).

[21] C. Bohm and J. Perrin, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 24, 865 (1991).

[22] A. Fontcuberta i Morral, P. Roca i Cabarrocas, and C. Clerc, *Phys. Rev. B* 69, 125307 (2004).

[23] M. Meaudre, R. Meaudre, R. Butte, S. Vignoli, C. Longeaud, J.P. Kleider, P. Roca i Cabarrocas, *J. Appl. Phys.* 86, 946 (1999).

[24] K. Ohkawa et al., *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 66 (2001) 297.

[25] P. Roca i Cabarrocas, A. Fontcuberta i Morral y Y. Poissant, *Thin Solid Films* 403–404 (2002) 39.

[26] S. Guha, J. Yang, A. Banerjee, B. Yan y K. Lord, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 78 (2003) 329.

[27] C.R. Wronski *et al.*, *NCPV and Solar Program Review Meeting* NREL/CD-520-33586 (2003) 789.

[28] S. Thomson, C.R. Perrey y T.J. Belich, *J. Appl. Phys.* 97 (2005) 034310.

[29] R. Butte *et al.*, *J. Non-Cryst. Solids* 266-269 (2000) 263.

[30] Chávez Velázquez, Rosa Angelina, “Análisis del potencial del PTFE como sustrato para la fabricación de circuitos impresos en alta frecuencia” [Tesis de maestría], INAOE, Puebla, 2007.

[31] M. Moreno, A. Kosarev, A. Torres, R. Ambrosio, *J. Non-Cryst. Solids* 354 (2008) 2598–2602.

[32] M. Moreno, A. Kosarev, A. Torres, R. Ambrosio, *Thin Solid Films* 515 (2007) 7607–7610

[33] P. Roca i Cabarrocas, *J. Non-Cryst. Solids* 266–269 (2000) 31–37

[34] W. Bronner, J.P. Kleider, R. Bruggemann, D. Mencaraglia, M. Mehring, *J. Non-Cryst. Solids* 299–302 (2002) 551–555

[35] A. Fontcuberta iMorrà, R. Brenot, E.A.G. Hamers, R. Vanderhaghen, *J. Non-Cryst. Solids* 266–269 (2000) 48–53

[36] Moreno, M., Torres, A., Ambrosio, R., Torres, E., Rosales, P., Zuñiga, C., & Monfil, K. (2012). Study of polymorphous silicon as thermo-sensing film for infrared detectors. *Materials Science and Engineering: B*, 177(10), 756-761.

[37] Moreno, M., Torres, A., Ambrosio, R., Rosales, P., Heredia, A., Kosarev, A., & Zuñiga, C. (2012). Study of polymorphous silicon and germanium as thermosensing films for infrared detectors. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 358(17), 2336-2339.

[38] <http://www3.physik.uni-greifswald.de/method/afm/eafm.htm>

[39] Hernández Montero, William Wenceslao “*Diseño y Fabricación de Guías de Onda Ópticas con Películas de Silicio-Germanio Amorfo*”, [Tesis de maestría], INAOE, Puebla, Febrero 2011.

[40] J. Singh, *Optical properties of condensed matter and applications*. John Wiley & Sons, 2006.

[41] Arun Madam, Melvin P. Shaw “The Physics and Applications of Amorphous Semiconductors”; *Academic Press Inc.*. pp. 73-74, (1988).

[42] G.Lukovsky, S.S. Chao, J.Yang, J.E.Tyler, R.C.Ross, and W. Czubytyj: Chemical bonding of hydrogen and oxygen in glow-discharge-deposited thin films of a-Ge:H and a-Ge(H,O). *Phys. Rev. B* 31, 2190 (1985)

[43] <http://www.ime.usp.br/~egbirgin/puma/>

[44] Y. Zhao, G-C. Wang, and T-M. Lu: *Characterization of Amorphous and Crystalline Rough surface: Principle and applications* (Academic Press Inc., Reading, MA 2001), pp, 7-16

## Lista de figuras

Figura 3-1. Representación esquemática de un sistema PECVD. ....	17
Figura 3-2. Representación de los estados líquido, amorfo y cristalino que pueden poseer los materiales [5]. ....	20
Figura 3-3. Ilustración del orden estructural de rango corto, mostrando los parámetros que se deben considerar en un material amorfo. ....	20
Figura 3-4. Ilustración de la configuración de enlazamiento de átomos de silicio construida de orbitales moleculares hibridizados. ....	21
Figura 3-5. Distribución de la densidad de estados para un semiconductor amorfo mostrando las bandas, las colas de banda y estados de defectos en la banda prohibida. Las líneas a trazos son el equivalente de la densidad de estados en un cristal [6]. ....	23
Figura 3-6. Esquema del modelo orbital molecular de la estructura electrónica de silicio amorfo y su correspondiente distribución de la densidad de estados. ....	24
Figura 3-7. Sistema de película delgada depositada sobre sustrato transparente de espesor finito ....	28
Figura 3-8. Espectro de absorción de luz de a-Si:H no dopado preparado a diferentes temperaturas de sustrato [5]. ....	30
Figura 3-9. Gráfico real de Transmitancia (pm-SiGe:H) en el rango de infrarrojo cercano (NIR), proceso 1239 del presente trabajo. ....	31
Figura 3-10. Ilustración de la densidad de estados en el borde de banda, junto con la distribución de los electrones $n_{BTE}$ , la conductividad $\sigma E$ y movilidad $\mu E$ : $\sigma E$ y $\mu E$ pueden cambiar abruptamente (a) o gradualmente (b) en el borde de movilidad $EC$ . ....	34
Figura 3-11. Un bloque semiconductor de longitud L, ancho W y profundidad D es iluminado. $I_{ph}$ es la fotocorriente. ....	36
Figura 3-12. Vibraciones Stretching (tomado de [19]). ....	39

Figura 3-13. Vibraciones Bending (tomado de [19]).	40
Figura 3-14. Interferómetro de Michelson adaptado como espectrómetro de Transformada de Fourier.	41
Figura 3-15. Funciones de distribución de altura superficial con diferentes valores de curtosis.	43
Figura 4-1. Representación esquemática del reactor utilizado en este trabajo (tomada de [13]).	48
Figura 4-2. Perfilómetro Dektak V 200-Si usado para la medición del grosor de las películas.	54
Figura 4-3. Espectro infrarrojo de la película a-SiGe:H del proceso 1237 medido por FTIR.	55
Figura 4-4. Ajuste experimental para las mediciones de conductividad en oscuro.	57
Figura 4-5. Película depositada sobre Corning con electrodos de Titanio para medidas de conductividad.	59
Figura 4-6. Ajuste lineal a los datos experimentales de $\sigma(T)$ para obtener $Ea$ y $\sigma_0$ , muestra de Polyimide proceso 1238.	60
Figura 4-7. Esquema mostrando los elementos más importantes que componen AFM (tomado de [38]).	61
Figura 4-8. Curva de fuerza contra distancia para la interacción punta-muestra en la técnica AFM (tomado de [38]).	62
Figura 4-9. Microscopio de fuerza atómica Nano Surf usado en el presente trabajo.	63
Figura 4-10. Imagen AFM de una película pm-SiGe:H del proceso 1241 depositada sobre Polyimide.	63
Figura 4-11. Comparación transmitancias medida y estimada, proceso 1235 NIR correspondiente a a-SiGe:H.	66

Figura 4-12. Ilustración que muestra como se halla $E_g$ en el proceso 1235. ....	66
Figura 4-13. Coeficiente de absorción de una película pm-SiGe:H. La línea roja muestra la zona escogida para determinar la energía de Urbach. ....	67
Figura 4-14. Mejor ajuste lineal realizado por computadora para la determinación de la energía de Urbach. ....	68
Figura 4-15. Diagrama esquemático de las medidas de fotoconductividad. ....	69
Figura 4-16. Curvas $I(U)$ Corning proceso 1235 con iluminación, en oscuro y fotocorriente. ....	70
Figura 5-1. Medidas FTIR para el proceso 1235, rango cubierto de $k = 400\text{cm}^{-1}$ a $k = 2100\text{cm}^{-1}$ , coeficiente de absorción (superior izquierda), pico $k = 565\text{cm}^{-1}$ modo bending Ge: H (superior derecha), pico $k = 1000\text{cm}^{-1}$ de enlaces SiO y GeO (inferior izquierda), pico $k = 1880\text{cm}^{-1}$ modo stretching Ge: H (inferior derecha). ....	72
Figura 5-2. Medidas FTIR para el proceso 1236, rango cubierto de $k = 400\text{cm}^{-1}$ a $k = 2100\text{cm}^{-1}$ , coeficiente de absorción (superior izquierda), pico $k = 565\text{cm}^{-1}$ modo bending Ge: H (superior derecha), pico $k = 1000\text{cm}^{-1}$ de enlaces SiO y GeO (inferior izquierda), pico $k = 1880\text{cm}^{-1}$ modo stretching Ge: H (inferior derecha). ....	73
Figura 5-3. Medidas FTIR para el proceso 1237, rango cubierto de $k = 400\text{cm}^{-1}$ a $k = 2100\text{cm}^{-1}$ , coeficiente de absorción (superior izquierda), pico $k = 565\text{cm}^{-1}$ modo bending Ge: H (superior derecha), pico $k = 1880\text{cm}^{-1}$ modo stretching Ge: H (inferior). ....	74
Figura 5-4. Medidas FTIR para el proceso 1238, rango cubierto de $k = 400\text{cm}^{-1}$ a $k = 2100\text{cm}^{-1}$ , coeficiente de absorción (superior izquierda), pico $k = 565\text{cm}^{-1}$ modo bending Ge: H (superior derecha), pico $k = 1880\text{cm}^{-1}$ modo stretching Ge: H (inferior). ....	75
Figura 5-5. Medidas FTIR para el proceso 1239, rango cubierto de $k = 400\text{cm}^{-1}$ a $k = 2100\text{cm}^{-1}$ , coeficiente de absorción (superior izquierda), pico $k =$	

565cm <sup>-1</sup> modo bending Ge: H (superior derecha), pico k = 1000cm <sup>-1</sup> de enlaces SiO y GeO (inferior izquierda), pico k = 1880cm <sup>-1</sup> modo stretching Ge: H (inferior derecha). .....	76
Figura 5-6. Medidas FTIR para el proceso 1240, rango cubierto de k = 400cm <sup>-1</sup> a k = 2100cm <sup>-1</sup> , coeficiente de absorción (superior izquierda), pico k = 565cm <sup>-1</sup> modo bending Ge: H (superior derecha), pico k = 1880cm <sup>-1</sup> modo stretching Ge: H (inferior). .....	77
Figura 5-7. Medidas FTIR para el proceso 1241, rango cubierto de k = 400cm <sup>-1</sup> a k = 2100cm <sup>-1</sup> , coeficiente de absorción (superior izquierda), pico k = 565cm <sup>-1</sup> modo bending Ge: H (superior derecha), pico k = 1000cm <sup>-1</sup> de enlaces SiO y GeO (inferior izquierda), pico k = 1880cm <sup>-1</sup> modo stretching Ge: H (inferior derecha). .....	78
Figura 5-8. Medidas FTIR para el proceso 1242, rango cubierto de k = 400cm <sup>-1</sup> a k = 2100cm <sup>-1</sup> , coeficiente de absorción (superior izquierda), pico k = 565cm <sup>-1</sup> modo bending Ge: H (superior derecha), pico k = 1000cm <sup>-1</sup> de enlaces SiO y GeO (inferior izquierda), pico k = 1880cm <sup>-1</sup> modo stretching Ge: H (inferior derecha). .....	79
Figura 5-9. Espectro de absorción IR de las películas de a-SiGe:H fabricadas a diferentes temperaturas.....	80
Figura 5-10. Espectro de absorción IR de las películas de pm-SiGe:H fabricadas a diferentes temperaturas.....	80
Figura 5-11. Curva I(U) en el primer incremento de temperatura para la muestra Corning 1737 proceso 1240. ....	84
Figura 5-12. Curva ln(conductividad) Corning 1235. Nota: las líneas corresponden al mejor ajuste lineal.....	85
Figura 5-13. Curva ln(conductividad) Teflón 2 1236. Nota: las líneas corresponden al mejor ajuste lineal.....	86

Figura 5-14. Curva $\ln(\text{conductividad})$ Teflón 1 1237. Nota: las líneas corresponden al mejor ajuste lineal.....	87
Figura 5-15. Ajuste lineal a los datos experimentales. Los parámetros $E_a$ y $\sigma_0$ se pueden extraer de $\sigma T$ . El material de la película es a-SiGe:H. Nota: la línea corresponde al mejor ajuste lineal.....	88
Figura 5-16. Dependencia con temperatura de la conductividad $\sigma(T)$ para las películas de <i>SiGe</i> depositadas a diferentes temperaturas sobre sustratos plásticos y Corning 1737. Nota: en la figura las líneas son sólo guías para los ojos. ....	90
Figura 5-17. Dependencia con temperatura de la conductividad $\sigma(T)$ para las películas de <i>SiGe</i> depositadas a diferentes temperaturas sobre Teflón. Nota: en la figura las líneas son sólo guías para los ojos. ....	90
Figura 5-18. Energía de Fermi de las películas de Silicio Germanio polimorfo hidrogenado pm-SiGe:H sobre sustratos Corning 1737, Teflon, PEN y Polyimide. ....	97
Figura 5-19. Coeficiente de temperatura de las películas de Silicio Germanio polimorfo hidrogenado pm-SiGe:H sobre sustratos Corning 1737, Teflon, PEN y Polyimide.....	97
Figura 5-20. Conductividad extrapolada a temperatura cero de las películas de Silicio Germanio polimorfo hidrogenado pm-SiGe:H sobre sustratos Corning 1737, Teflon, PEN y Polyimide.....	98
Figura 5-21. Energía de activación de las películas de Silicio Germanio polimorfo hidrogenado pm-SiGe:H sobre sustratos Corning 1737, Teflon, PEN y Polyimide. ....	99
Figura 5-22. Coeficiente térmico de resistencia de las películas de Silicio Germanio polimorfo hidrogenado pm-SiGe:H sobre sustratos Corning 1737, Teflon, PEN y Polyimide.....	100

Figura 5-23. Conductividad a temperatura ambiente de las películas de Silicio Germanio polimorfo hidrogenado pm-SiGe:H sobre sustratos Corning 1737, Teflon, PEN y Polyimide.....	101
Figura 5-24. Energía de activación de a-SiGe:H (sobre sustratos de Corning 1737 y Teflon) y pm-SiGe:H (sobre sustrato Corning 1737) para los procesos 1235 a 1242. En la figura las líneas son sólo guías para la vista.....	102
Figura 5-25. Coeficiente térmico de resistencia de a-SiGe:H (sobre sustratos de Corning 1737 y Teflon) y pm-SiGe:H (sobre sustrato Corning 1737) para los procesos 1235 a 1242. En la figura las líneas son sólo guías para la vista.....	103
Figura 5-26. Conductividad a temperatura ambiente de a-SiGe:H (sobre sustratos de Corning 1737 y Teflon) y pm-SiGe:H (sobre sustrato Corning 1737) para los procesos 1235 a 1242. En la figura las líneas son sólo guías para la vista.....	104
Figura 5-27. Conductividad extrapolada a temperatura cero de a-SiGe:H (sobre sustratos de Corning 1737 y Teflon) y pm-SiGe:H (sobre sustrato Corning 1737) para los procesos 1235 a 1242. En la figura las líneas son sólo guías para la vista .....	105
Figura 5-28. Coeficiente de temperatura de a-SiGe:H (sobre sustratos de Corning 1737 y Teflon) y pm-SiGe:H (sobre sustrato Corning 1737) para los procesos 1235 a 1242. En la figura las líneas son sólo guías para la vista .....	106
Figura 5-29. Energía de Fermi de a-SiGe:H (sobre sustratos de Corning 1737 y Teflon) y pm-SiGe:H (sobre sustrato Corning 1737) para los procesos 1235 a 1242. En la figura las líneas son sólo guías para la vista .....	106
Figura 5-30. Vistas 3D obtenidas por AFM de a-SiGe:H sobre sustratos Corning, PEN y Polyimide.....	109
Figura 5-31. Vistas 3D obtenidas por AFM de a-SiGe:H sobre sustratos Teflon y c-Si.....	110
Figura 5-32. Vistas 3D obtenidas por AFM de pm-SiGe:H sobre sustratos Corning, PEN y Polyimide.....	111

Figura 5-33. Vistas 3D obtenidas por AFM de pm-SiGe:H sobre sustratos Teflon y c-Si. ....	112
Figura 5-34. Altura media de los sustratos de referencia, obtenida por AFM. ....	121
Figura 5-35. Diámetro medio de los sustratos de referencia, obtenido por AFM.	122
Figura 5-36. Curtosis de los sustratos de referencia, obtenida por AFM. ....	123
Figura 5-37. Longitud de correlación de los sustratos de referencia, obtenida por AFM. ....	123
Figura 5-38. Rugosidad RMS de los sustratos de referencia, obtenida por AFM.	124
Figura 5-39. “Skewness” de los sustratos de referencia, obtenida por AFM. ....	125
Figura 5-40. Altura media de las películas a-SiGe:H sobre sustratos Corning, PEN, Polyimide, Teflon y c-Si a diferentes temperaturas de depósito. En la figura las líneas son sólo guías para la vista. ....	126
Figura 5-41. Altura media de las películas pm-SiGe:H sobre sustratos Corning, PEN, Polyimide, Teflon y c-Si a diferentes temperaturas de depósito. En la figura las líneas son sólo guías para la vista. ....	127
Figura 5-42. Curtosis de las películas a-SiGe:H sobre sustratos Corning, PEN, Polyimide, Teflon y c-Si a diferentes temperaturas de depósito. En la figura las líneas son sólo guías para la vista. ....	128
Figura 5-43. Curtosis de las películas pm-SiGe:H sobre sustratos Corning, PEN, Polyimide, Teflon y c-Si a diferentes temperaturas de depósito. En la figura las líneas son sólo guías para la vista. ....	129
Figura 5-44. Diámetro medio de las películas a-SiGe:H sobre sustratos Corning, PEN, Polyimide, Teflon y c-Si a diferentes temperaturas de depósito. En la figura las líneas son sólo guías para la vista. ....	130
Figura 5-45. Diámetro medio de las películas pm-SiGe:H sobre sustratos Corning, PEN, Polyimide, Teflon y c-Si a diferentes temperaturas de depósito. En la figura las líneas son sólo guías para la vista. ....	131

Figura 5-46. Longitud de correlación de las películas a-SiGe:H sobre sustratos Corning, PEN, Polyimide, Teflon y c-Si a diferentes temperaturas de depósito. En la figura las líneas son sólo guías para la vista. ....	132
Figura 5-47. Longitud de correlación de las películas pm-SiGe:H sobre sustratos Corning, PEN, Polyimide, Teflon y c-Si a diferentes temperaturas de depósito. En la figura las líneas son sólo guías para la vista. ....	133
Figura 5-48. Rugosidad RMS de las películas a-SiGe:H sobre sustratos Corning, PEN, Polyimide, Teflon y c-Si a diferentes temperaturas de depósito. En la figura las líneas son sólo guías para la vista. ....	134
Figura 5-49. Rugosidad RMS de las películas pm-SiGe:H sobre sustratos Corning, PEN, Polyimide, Teflon y c-Si a diferentes temperaturas de depósito. En la figura las líneas son sólo guías para la vista. ....	135
Figura 5-50. “Skewness” de las películas a-SiGe:H sobre sustratos Corning, PEN, Polyimide, Teflon y c-Si a diferentes temperaturas de depósito. En la figura las líneas son sólo guías para la vista. ....	136
Figura 5-51. “Skewness” de las películas pm-SiGe:H sobre sustratos Corning, PEN, Polyimide, Teflon y c-Si a diferentes temperaturas de depósito. En la figura las líneas son sólo guías para la vista. ....	137
Figura 5-52. Transmitancia estimada por el software PUMA, procesos 1235 a 1238 (a-SiGe:H) en el rango NIR. ....	138
Figura 5-53. Transmitancia estimada por el software PUMA, procesos 1239 a 1242 (pm-SiGe:H) en el rango NIR. ....	139
Figura 5-54. Gráficos de Tauc para las películas de pm-SiGe:H en el rango NIR. ....	140
Figura 5-55. Gráficos de Tauc para las películas de a-SiGe:H en el rango NIR. ....	140
Figura 5-56. Dependencia espectral del coeficiente de absorción $\alpha(h\nu)$ para a-SiGe:H a las diferentes temperaturas de depósito. ....	141

Figura 5-57. Dependencia espectral del coeficiente de absorción $\alpha(h\nu)$ para pm-SiGe:H a las diferentes temperaturas de depósito. ....	142
Figura 5-58. Band gaps ópticos de películas a-SiGe:H y pm-SiGe:H a diferentes temperaturas de depósito. Nota: Las líneas en la gráfica son sólo guías para los ojos.....	145
Figura 5-59. Energía de Urbach de películas a-SiGe:H y pm-SiGe:H fabricadas a diferentes temperaturas de depósito. En la figura las líneas son sólo guías para la vista.....	146
Figura 5-60. Razón fotoconductividad a conductividad en oscuridad para películas a-SiGe:H sobre sustratos Corning 1737, PEN, Polyimide y Teflon PTFE fabricadas a distintas temperaturas de depósito. En la figura las líneas son sólo guías para la vista.....	152
Figura 5-61. Razón fotoconductividad a conductividad en oscuridad para películas pm-SiGe:H sobre sustratos Corning 1737, PEN, Polyimide y Teflon PTFE fabricadas a distintas temperaturas de depósito. En la figura las líneas son sólo guías para la vista. ....	153
Figura 5-62. Conductividad en oscuridad para películas a-SiGe:H sobre sustratos Corning 1737, PEN, Polyimide y Teflon PTFE fabricadas a distintas temperaturas de depósito. En la figura las líneas son sólo guías para la vista. ....	154
Figura 5-63. Conductividad en oscuridad para películas pm-SiGe:H sobre sustratos Corning 1737, PEN, Polyimide y Teflon PTFE fabricadas a distintas temperaturas de depósito. En la figura las líneas son sólo guías para la vista. ..	155
Figura 5-64. Conductividad bajo iluminación para películas a-SiGe:H sobre sustratos Corning 1737, PEN, Polyimide y Teflon PTFE fabricadas a distintas temperaturas de depósito. En la figura las líneas son sólo guías para la vista. ..	156
Figura 5-65. Conductividad bajo iluminación para películas pm-SiGe:H sobre sustratos Corning 1737, PEN, Polyimide y Teflon PTFE fabricadas a distintas temperaturas de depósito. En la figura las líneas son sólo guías para la vista. ..	157

Figura 5-66. Fotoconductividad de películas a-SiGe:H sobre sustratos Corning 1737, PEN, Polyimide y Teflon PTFE fabricadas a distintas temperaturas de depósito. En la figura las líneas son sólo guías para la vista. .... 158

Figura 5-67. Fotoconductividad de películas pm-SiGe:H sobre sustratos Corning 1737, PEN, Polyimide y Teflon PTFE fabricadas a distintas temperaturas de depósito. En la figura las líneas son sólo guías para la vista. .... 159

### Lista de Tablas

Tabla 4-1. Fuga en la cámara medida antes de cada proceso..... 49

Tabla 4-2. Serie 1 - Parámetros del depósito de películas de Silicio-Germanio amorfo: a-SiGe:H ..... 53

Tabla 4-3. Serie 2 - Parámetros del depósito de películas de Silicio-Germanio polimorfo: pm-SiGe:H..... 53

Tabla 4-4. Parámetros geométricos de la configuración del electrodo para muestras 1235 a 1242..... 59

Tabla 4-1. Líneas de absorción en el espectro IR de películas *SiGe*. .... 82

Tabla 5-2. Parámetros obtenidos de la dependencia de la temperatura de la conductividad para los procesos 1235 y 1236, a-SiGe:H..... 92

Tabla 5-3. Parámetros obtenidos de la dependencia de la temperatura de la conductividad para los procesos 1237 y 1238, a-SiGe:H..... 93

Tabla 5-4. Parámetros obtenidos de la dependencia de la temperatura de la conductividad para el proceso 1239, pm-SiGe:H. .... 94

Tabla 5-5. Parámetros obtenidos de la dependencia de la temperatura de la conductividad para el proceso 1240, pm-SiGe:H. .... 95

Tabla 5-6. Parámetros obtenidos de la dependencia de la temperatura de la conductividad para los procesos 1241 y 1242, pm-SiGe:H..... 96

Tabla 5-7. Parámetros de la morfología superficial de los sustratos de referencia. Obtenidos de mediciones AFM. .... 113

Tabla 5-8. Parámetros de rugosidad para los procesos 1235 y 1236 (a-SiGe:H)	114
Tabla 5-9. Resultados de análisis de grano para los procesos 1235 y 1236 (a-SiGe:H)	115
Tabla 5-10. Parámetros de rugosidad para los procesos 1237 y 1238 (a-SiGe:H)	116
Tabla 5-11. Resultados de análisis de grano para los procesos 1237 y 1238 (a-SiGe:H)	117
Tabla 5-12. Parámetros de rugosidad para los procesos 1239 y 1240 (pm-SiGe:H)	118
Tabla 5-13. Resultados de análisis de grano para los procesos 1239 y 1240 (pm-SiGe:H)	119
Tabla 5-14. Parámetros de rugosidad para los procesos 1241 y 1242 (pm-SiGe:H)	120
Tabla 5-15. Resultados de análisis de grano para los procesos 1241 y 1242 (pm-SiGe:H)	121
Tabla 5-16. Band gap óptico, E04 y E03 para a-SiGe:H NIR	143
Tabla 5-17. Band gap óptico, E04 y E03 para pm-SiGe:H NIR	143
Tabla 5-18. Energías de Urbach para los procesos 1235 a 1242	144
Tabla 5-19. Conductividad bajo iluminación, conductividad en oscuridad, fotoconductividad y razón fotoconductividad a conductividad en oscuridad a 100 V para muestras con sustrato Corning 1737	147
Tabla 5-20. Conductividad bajo iluminación, conductividad en oscuridad, fotoconductividad y razón fotoconductividad a conductividad en oscuridad a 100 V para muestras con sustrato PEN	148
Tabla 5-21. Conductividad bajo iluminación, conductividad en oscuridad, fotoconductividad y razón fotoconductividad a conductividad en oscuridad a 100 V para muestras con sustrato Polyimide	149

Tabla 5-22. Conductividad bajo iluminación, conductividad en oscuridad, fotoconductividad y razón fotoconductividad a conductividad en oscuridad a 100 V para muestras con sustrato Teflon 1. .... 150

Tabla 5-23. Conductividad bajo iluminación, conductividad en oscuridad, fotoconductividad y razón fotoconductividad a conductividad en oscuridad a 100 V para muestras con sustrato Teflon 2. .... 151