



INAOE

**Instituto Nacional de Astrofísica,
Óptica y Electrónica.**

**Estudio, fabricación y caracterización de sensores
infrarrojos basados en películas de silicio-
germanio amorfo con nano-cristales embebidos**

por

M. C. Cesar Manuel Calleja Gómez

**Tesis sometida como requisito
parcial para obtener el grado de**

**DOCTOR EN CIENCIAS EN LA
ESPECIALIDAD
EN ELECTRÓNICA**

En el

**Instituto Nacional de Astrofísica,
Óptica y Electrónica
Tonantzintla, Puebla
Febrero 2016**

Supervisado por:

**Dr. Alfonso Torres Jacome
Dr. Mario Moreno Moreno**

©INAOE 2016

Derechos Reservados

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



Para ti, mamita.

Agradecimientos

Quiero agradecer el apoyo económico brindado por el CONACyT durante mi trabajo de tesis de doctorado. Agradezco al instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) por el apoyo brindado durante los años de mi estancia en estas instalaciones. Agradezco profundamente a mis asesores, los Drs. Alfonso Torres Jacome y Mario Moreno Moreno por su invaluable apoyo y dirección durante este trabajo. A mis sinodales los Drs. María Teresa, Pedro Rosales, Javier De la Hidalga, Carlos Zúñiga y Roberto Ambrosio por las opiniones y correcciones para este trabajo. Agradezco a los compañeros con quienes hemos luchado por alcanzar nuestros objetivos, al Dr. Luis Antonio Carrillo Martínez; Los Drs. David Moro Frías y Julio Cesar Vázquez Hernández, al M. en C. Oscar Addiel Seseña quienes además de retroalimentarnos acerca de nuestros trabajos, siempre hubo un trato de nobles caballeros. Agradezco a los técnicos de los laboratorios de fabricación, a Oscar Aponte quién dedicó mucho tiempo de su trabajo para ayudar a terminar el proceso de fabricación, a Ignacio Juárez, Adrián Itzmoyotl, Oscar Pestaña, Gabriel Santiago, David Tecuítl, Alfonso Cortes, Israel Ledesma, Rosa Tecuatl, Leticia Tecuapetla, Marino Conde, Armando, Víctor, Juan Manuel, Manuel Escobar y en especial a Mauro Landa quien fue de quien adquirí mis conocimientos en fabricación. Agradezco a demás compañeros con quienes compartí algunas experiencias y debatimos acerca del trabajo, Ricardo Jiménez, Dulce Murias, Abel, Chepe, etc. A los compañeros del laboratorio de instrumentación astrofísica. Agradezco al personal académico y administrativo de quien siempre recibí un trato amable. Agradezco a mi papá, a mis hermanos. familia y mis sobrinas Katy, Sol, Itzel y Sofi por el apoyo y comprensión durante tantos años. A mi mamá, Catita, que ahora es una estrellita en el cielo que guiaste y seguirás guiando mi camino. Te agradezco mi amor, Faty, por apoyarme e impulsarme a seguir luchando por mis metas. Y finalmente agradezco a los amigos de toda la vida, poyo, Martha, pato, Gus, Rosa, cosa, por no haber intervenido en este trabajo.

A todos, muchas gracias.

Resumen

Los detectores y arreglos de detectores de imágenes de radiación infrarroja (IR), también conocidos como detectores térmicos, son utilizados en una amplia variedad de aplicaciones, que van desde las aplicaciones militares hasta comerciales, incluyendo imágenes térmicas, aplicaciones médicas, detección de fuego, visión nocturna, y seguridad.

En un detector térmico la radiación IR incidente es absorbida por el dispositivo y esto cambia la temperatura del material termo-sensible lo que resulta en el cambio de algunas de sus propiedades físicas, esto es aprovechado para obtener una señal eléctrica de salida que varía con el incremento de temperatura. Los micro-bolómetros son detectores térmicos, que fabricados por la técnica de micromaquinado superficial, pueden operar a temperatura ambiente. Esta característica les brinda ventajas operativas y resultan en detectores de bajo costo de manufactura y operación.

En este trabajo se fabricaron y caracterizaron micro-bolómetros con áreas de $50 \times 50 \mu\text{m}^2$, $30 \times 30 \mu\text{m}^2$ y $25 \times 25 \mu\text{m}^2$, con dimensiones de hasta $1 \mu\text{m}$. El proceso de fabricación es simple y de pocos pasos de proceso. De tal proceso se obtienen micro-bolómetros con una estructura muy sencilla y de baja masa térmica. El proceso de fabricación se realizó en el laboratorio de innovación en MEMS (LI-MEMS) y la película termo-sensible fue depositada mediante de la técnica depósito químico en fase vapor asistido por plasma (PECVD) a una frecuencia RF de 13.56 MHz y la temperatura del sustrato a $200 \text{ }^\circ\text{C}$. El proceso es totalmente compatible con el proceso CMOS de fabricación de circuitos integrados. Se utilizó una película de $\text{pm-Si}_x\text{Ge}_y\text{:H}$ como película termo-sensible con un alto Coeficiente Térmico de Resistencia ($\text{TCR} = 8 \text{ \%K}^{-1}$) y que en combinación con el diseño de los micro-bolómetros, resultaron en sensores con una detectividad en el rango de $10^7\text{-}10^9 \text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ y respuesta en corriente tan alta como 15.5 A/W y respuesta en voltaje de hasta $1.15 \times 10^6 \text{ V/W}$, y la gran mayoría de los dispositivos mostraron un diferencia de temperatura equivalente al ruido (NETD) menor a 50 mK .

Abstract

Detectors and detector arrays for infrared radiation (IR) imaging, also known as thermal detectors, are used in a wide variety of applications like military and commercial, including thermal imaging, medical, fire detection, night vision, and security purposes.

In a thermal detector, incident IR radiation is absorbed by the device and it changes the temperature of the thermo-sensitive material, resulting in change some of physical properties, this is used to obtain an electrical output signal that varies with the temperature increase. Micro-bolometers are thermal detectors manufactured by the surface micromachining technique, and can operate at room temperature. This feature gives operational advantages detectors and result in low manufacturing cost and operation.

In this work we have realized fabrication and characterization of microbolometers with $50 \times 50 \mu\text{m}^2$, $30 \times 30 \mu\text{m}^2$ and $25 \times 25 \mu\text{m}^2$ areas, the smallest dimension in the design of microbolometer structures was $1 \mu\text{m}$. We have obtained a fabrication process simple and with a reduced number of fabrication steps. Fabricated microbolometes has a simple and reduced thermal mass structure.

Fabrication process was performed in MEMS innovation laboratory (LI-MEMS) and thermo-sensitive film were deposited by Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD) technique at 13.56 RF frequency and $200 \text{ }^\circ\text{C}$ substrate temperature. Fabrication process is fully compatible with CMOS integrated circuit post-process. We have studied deposition conditions and optical, electrical and thermal characteristics of amorphous semiconductor films based on silicon and germanium for use as thermo-sensitive films. $\text{pm-Si}_x\text{Ge}_y\text{:H}$ has a thermal coefficient of resistance ($\text{TCR} = 8\% \text{ K}^{-1}$), which resulted in microbolometers with a detectivity (D^*) in $10^7\text{-}10^9 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ range and current response as high as 15.5 A/W and voltage response of $1.15 \times 10^6 \text{ V/W}$, and most of the devices show a noise equivalent temperature difference (NETD) less than 50 mK .

Lista de acrónimos

Acrónimo	Descripción
AFM	Microscopia de Fuerza Atómica
a-Ge:H	Germanio amorfo Hidrogenado
a-Si:H	Silicio amorfo Hidrogenado
a-Si:H,B	Silicio amorfo Hidrogenado dopado con Boro
a-Si _x Ge _y :H	Silicio-Germanio amorfo Hidrogenado
BaSrTiO	Titanato de Bario-Estroncio
BPSG	Vidrio de Borofosfosilicato
CI's	Circuitos Integrados
CMOS	Metal-Óxido-Semiconductor Complementario
CMP	Pulido Químico Mecánico
DIP	Dual In-Line Package
FTIR	Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier
HgCdTe	Cadmio telurio de mercurio
IR	Infrarrojo
IRFPA	Arreglo Plano Focal Infrarrojo
KOH	Hidróxido de Potasio
LF-PECVD	Low Frequency Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition
LWIR	Long Wavelength Infrared
MEMS	Sistema MicroElectroMecánico
MWIR	Mid-Wavelength Infrared
NIR	Near Infrared
NSD	Densidad Espectral de Ruido
PbSnTe	Teluro de Estaño-Plomo
pm-Ge:H	Germanio polimorfo Hidrogenado
pm-Si:H	Silicio polimorfo Hidrogenado
pm-Si _x Ge _y :H	Silicio-Germanio polimorfo Hidrogenado
poly-SiGe	Silicio-Germanio policristalino
PSG	Vidrio de Fosfosilicato
PtSi	Silisuro de Platino

QWIP	Fotodetector de Pozo Cuántico
RF	Radio Frecuencia
RIE	Grabado por Iones Reactivos
SEM	Microscopia Electrónica de Barrido
Si ₃ N ₄	Nitruro de Silicio estequiométrico
SiC	Carburo de Silicio
SiN _x	Nitruro de Silicio fuera de estequiometria
SiO ₂	Óxido de Silicio
SOG	Spin-On Glass
SWIR	Short Wavelength
T _c	Temperatura de Curie
TEM	Microscopia de Transmisión de Electrones
TMAH	Hidróxido de Tetrametil Amonia
VLWIR	Very Long Wavelength Infrared
VO _x	Óxido de Vanadio

Lista de símbolos

Símbolo	Unidades	Cantidad
α	K^{-1}	Coefficiente Térmico de Resistencia (TCR)
β	—	Factor de llenado
C_{th}	J/K	Capacitancia térmica
σ_{TR}	$\Omega^{-1} \cdot cm^{-1}$	Conductividad eléctrica a temperatura ambiente
D^*	$cm \cdot Hz^{1/2}/W$	Detectividad
$\epsilon(T, \lambda)$	—	Emisividad
E_a	eV	Energía de activación
E_g	eV	Energía de la banda prohibida
G_{th}	W/K	Conductancia térmica
N_I	A	Ruido en corriente rms
N_V	V	Ruido en voltaje rms
I_0	W/cm^2	Intensidad de radiación infrarroja
$M(\lambda, T)$	$W/m^2 \mu m$	Exitancia espectral
η	—	Coefficiente de absorción
NETD	K	Diferencia de temperatura equivalente de ruido
P_{inc}	W	Potencia de la radiación incidente sobre el micro-bolómetro
\mathfrak{R}_I	A/W	Responsividad en corriente
\mathfrak{R}_V	V/W	Responsividad en voltaje

Índice

Agradecimientos	III
Resumen.....	V
Abstract	VI
Lista de acrónimos	VII
Lista de símbolos.....	IX
Índice.....	X
Capítulo 1 Introducción.....	1
1.1 Micro-bolómetros para detección de radiación infrarroja (IR).....	1
1.2 Radiación infrarroja y reseña histórica.	3
1.3 Justificación de la tesis	7
1.4 Objetivos	9
1.5 Organización de la tesis.....	10
Referencias.....	11
Capítulo 2. Análisis de la literatura	14
2.1 Radiación infrarroja.....	14
2.2 Detectores infrarrojos de fotones.....	18
2.3 Detectores infrarrojos térmicos	20
2.3.1 Efecto piroeléctrico	22
2.3.2 Efecto termoeléctrico.....	22
2.3.3 Efecto bolométrico resistivo	23
2.4 Micro-bolómetros no enfriados	23
2.5 Materiales absorbentes de radiación IR	26
2.5.1 Película termo-sensible	27
2.5.2 Silicio polimorfo (pm-Si:H)	29
2.6 Figuras de mérito de los micro-bolómetros.....	30
2.7 Ruido en micro-bolómetros	33
2.7.1 Ruido johnson	34
2.7.2 Ruido $1/f$	34

2.7.3 Ruido por fluctuación de temperatura	34
2.7.4 Ruido por fluctuación de temperatura del medio (Background fluctuation noise).....	35
2.8 Detectividad D^*	36
2.9 Diferencia de temperatura equivalente al ruido (NETD)	36
Referencias.....	38
Capítulo 3. Diseño de los micro-bolómetros y proceso de fabricación	42
3.1 Diseño de los micro-bolómetros	42
3.1.1 Layout.....	46
3.2 Proceso de fabricación	48
3.2.1 Oxidación térmica	49
3.2.2 Electrodo de polarización y espejo reflector	50
3.2.3 Depósito de la película de poliamida	50
3.2.4 Depósito de la película termo-sensible.....	51
3.2.5 Depósito de película de titanio y definición de contactos	54
3.3.6 Liberación de las estructuras	54
Referencias.....	55
Capítulo 4. Métodos de caracterización	57
4.1 Caracterización de la película termo-sensible	57
4.2 Caracterización de la estructura y composición de las películas de pm-Si _x Ge _y :H.....	60
4.2.1 Caracterización por la técnica FTIR	60
4.2.2 AFM	60
4.2.3 Transmitancia UV-Visible	61
4.3 caracterización eléctrica de los micro-bolómetros.....	61
4.3.1 Caracterización $I(U)$ en condiciones de oscuridad	61
4.3.2 Caracterización $I(U)$ en condiciones de oscuridad y bajo iluminación.....	62
4.4 Caracterización de ruido	65
4.5 Detectividad de los micro-bolómetros.....	67
4.6 Diferencia de temperatura equivalente al ruido (NETD)	67
Referencias.....	69

Capítulo 5. Caracterización de las películas de pm-Si _x Ge _y :H y micro-bolómetros fabricados.	71
5.1 Caracterización de las películas de pm-Si _x Ge _y :H	71
5.1.1 Espesor y razón de depósito de las películas de pm-Si _x Ge _y :H.....	72
5.1.2 Mediciones de la rugosidad superficial.....	72
5.1.2 Mediciones FTIR	76
5.1.3 Transmitancia UV-Vis	77
5.1.4 Característica corriente-voltaje I(U) en función de la temperatura.....	77
5.2 Caracterización eléctrica de las películas de pm-Si _x Ge _y :H utilizadas en el proceso de fabricación de los micro-bolómetros.	81
5.3 Caracterización de micro-bolómetros.....	84
5.3.1 Respuesta en corriente (\mathfrak{R}_i) a la radiación IR incidente.....	84
5.3.2 Respuesta en voltaje (\mathfrak{R}_v) a la radiación incidente	89
5.3.3 Mediciones de ruido en micro-bolómetros	93
5.3.4 Detectividad	95
5.3.5 NETD.....	97
5.4 Discusión de resultados.....	99
5.4.1 Películas de pm-Si _x Ge _y :H	99
5.4.2 Micro-bolómetros basados en pm-Si _x Ge _y :H.....	100
Referencias.....	103
Capítulo 6. Conclusiones	106
6.1 Conclusiones.....	106
6.2 Trabajo a futuro.....	108
Lista de tablas.....	110
Lista de figuras.....	111

Capítulo 1 Introducción

Los dispositivos de detección de imágenes de radiación infrarroja (IR) en el rango cercano a los 10 μm de longitud de onda (λ), también conocidos como detectores térmicos, son utilizados en una amplia variedad de aplicaciones, pero la principal de ellas, es mejorar la visión de una escena en condiciones de oscuridad. En este capítulo presentamos una descripción básica acerca de los micro-bolómetros y el desarrollo histórico de los detectores de radiación infrarroja. En la segunda parte, presentamos la justificación y los objetivos de este trabajo. En la última parte describimos la organización de este trabajo.

1.1 Micro-bolómetros para detección de radiación infrarroja (IR)

Los micro-bolómetros no enfriados son sensores de radiación infrarroja que generalmente están formados de un material absorbente en el rango del IR y que está en contacto con una película delgada de un material que varía su resistencia eléctrica con el aumento de temperatura. Ambos materiales se encuentran suspendidos sobre un sustrato ($\sim 3 \mu\text{m}$) que les provee aislamiento térmico. Así pues, un micro-bolómetro es básicamente un resistor sensible a la variación de temperatura.

Al ser un micro-bolómetro un sensor térmico, es importante considerar la transferencia de calor que ocurre entre éste y el medio circundante. El flujo de calor por convección ocurre en la presencia de una atmósfera que rodee al dispositivo. La transferencia de calor por radiación se presenta por el hecho de que el micro-bolómetro radia a sus alrededores y otros más radian hacia este. Cuando los micro-bolómetros son encapsulados en un ambiente al vacío, con una ventana de transmisión sólo para el rango IR, la convección y radiación son minimizados. Por lo tanto, es importante considerar la conducción de calor en el micro-bolómetro, ya que esto ocurre cuando el calor fluye de la película termo-sensible, a lo largo de los brazos de suspensión y postes de anclaje hacia el sustrato que es un disipador de

calor. Este mecanismo es crítico cuando los pixeles en un arreglo de micro-bolómetros se encuentran muy cercanos, ya que el calor puede fluir hacia los pixeles adyacentes [1.1]. La estructura de soporte es una parte muy importante para cualquier tipo de detector térmico. La estructura del micro-bolómetro cumple con tres importantes funciones, primero da el soporte mecánico, además, define las trayectorias de las líneas de conducción por donde viaja la señal eléctrica, y tercero, también ocurre el flujo de calor por conducción a través de la estructura hacia el sustrato. Para reducir las pérdidas de calor es necesario tener un buen aislamiento térmico, para esto, es necesario usar materiales de baja conductividad térmica, además de estructuras térmicamente aisladas por medio de técnicas de micromaquinado superficial o de volumen. El largo, ancho y forma de los brazos de suspensión y postes de anclaje de la membrana suspendida pueden ser definidas de tal modo que sean lo suficientemente largos y estrechos, pero siempre hay un compromiso con el factor de llenado. Más aún, la conductividad térmica y la conductividad eléctrica de las líneas de señal en contacto con el material termosensible también deben ser considerados. Las líneas de señal más utilizadas en micro-bolómetros son cromo, níquel, o una aleación de níquel-cromo, ya que estas líneas metálicas tienen baja conductividad térmica y una conductividad eléctrica media para obtener las menores pérdidas de calor y menor ruido $1/f$ [1.2].

Hay una necesidad en reducir el tamaño del pixel en los arreglos de micro-bolómetros para lograr importantes beneficios. El rango de detección de algunos sistemas de detección de imágenes IR es limitado por la resolución del pixel más que en su sensibilidad. El desarrollo de pixeles pequeños para arreglos de micro-bolómetros de alta resolución (de hasta $17\mu\text{m}$), presenta retos significativos tanto en el proceso de fabricación como en el diseño de pixeles. La respuesta a la radiación IR incidente en un pixel escalado puede mejorarse incrementando el factor de llenado, la absorción de radiación IR, usando materiales con coeficiente térmico de resistencia (TCR) alto, reduciendo la conductancia térmica o la resistencia del micro-bolómetro. En el estado actual de la tecnología, el factor de llenado y la absorción de radiación IR están cerca de valores ideales y solo se puede esperar un mínimo beneficio al optimizar estos dos parámetros [1.1, 1.3]. Un mayor beneficio puede obtenerse mejorando el material termo-sensible, es decir su resistencia eléctrica y el TCR. Una aproximación prometedora es el desarrollo de películas delgadas de

baja resistencia de a-Si ó a-SiGe que próximamente pueden ser los materiales más utilizados en esta tecnología [1.4, 1.5]

1.2 Radiación infrarroja y reseña histórica.

La radiación IR forma parte del espectro electromagnético, está situada entre la luz visible y las ondas de radio. Las longitudes de onda comprendidas en el rango del IR son mayores que las del espectro visible y más cortas que las ondas de radio. En consecuencia, su energía es menor que a longitudes de onda del espectro visible. En el año 1800, El astrónomo Germano-Inglés William Herschel descubrió la radiación infrarroja. Herschel estaba interesado en determinar la cantidad de calor que pasaba a través de diferentes filtros de color con los que observaba el sol, ya que había notado que la cantidad de calor dependía del color del filtro. Herschel pensó que los filtros de color en sí podían filtrar distintas cantidades de calor. Para esto diseñó un experimento para comprobar su hipótesis. Herschel hizo pasar la luz solar a través de un prisma de cristal para obtener el espectro visible en partes divididas, es decir, obtuvo luz de diversos colores. A grandes rasgos, el experimento de Herschel se muestra en la figura 1.1.

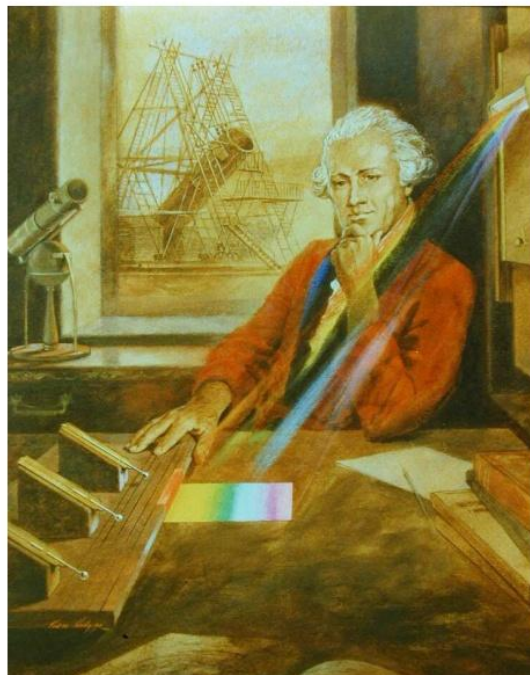


Figura 1.1 Experimento de Herschel con el cual realiza el descubrimiento de la radiación infrarroja.

Posteriormente midió la temperatura en cada color, para ello utilizó tres termómetros ennegrecidos para absorber mejor el calor. Colocó un termómetro en cada color, mientras que otros dos fueron colocados fuera del espectro como medida de control. Al medir las temperaturas en los diversos colores notó que cada color tenía una temperatura mayor que los termómetros de control, y que la temperatura de los colores aumentaba al ir del violeta al rojo. Después de realizar este experimento, Herschel decidió medir la temperatura en la zona ubicada un poco más allá de la luz roja del espectro, al parecer desprovista de luz. Herschel descubrió que esta región tenía la temperatura más alta de todas. Herschel hizo otros experimentos con lo que llamo *rayos caloríficos*, que existían más allá de la región roja del espectro. Encontró que eran reflejados, refractados, absorbidos y transmitidos igual que la luz visible. William Herschel había descubierto una forma de luz (o bien, radiación) ubicada más allá del espectro visible. El experimento de Herschel es importante no sólo por el descubrimiento de la radiación infrarroja, también porque fue la primera vez que se demostró que había formas de luz (o más bien radiación) que no era posible percibir a simple vista.

Después del descubrimiento de Herschel, muy poco avance se realizó en el estudio de la radiación IR, el más significativo, fue establecer que la radiación IR obedecía a las leyes más simples de la óptica. Este lento progreso obedeció, principalmente, a la falta de detectores lo suficientemente sensitivos y precisos, ya que los experimentos subsecuentes se realizaron con termómetros ordinarios. En 1821 Thomas Johann Seebeck descubrió que podía fluir corriente eléctrica en un circuito cerrado consistente de dos conductores metálicos distintos, cuando sus uniones se mantenían a diferentes temperaturas [1.4, 1.5]. Debido a que las primeras uniones Seebeck tenían voltajes de salida demasiado bajos, sólo algunos $\mu\text{V}/\text{K}$, la medición de variaciones muy pequeñas de temperatura no podían llevarse a cabo. En 1829 Leopoldo Nobili hizo el primer termopar perfeccionando el primer termómetro eléctrico basado en el efecto termoeléctrico descubierto por Seebeck. M. Melloni quien trabajó con Nobili, tuvo la idea de conectar varios termopares de bismuto-cobre en serie, obteniendo un mayor voltaje de salida. Este invento fue más sensitivo que los mejores termómetros disponibles en ese momento y podía detectar el calor de una persona a una distancia cercana a los diez metros [1.6]. Para 1880, Samuel Langley utilizó dos cintas delgadas de lámina de platino conectadas a fin de formar dos ramas de un puente

de Wheatstone. Este instrumento permitió el estudio de la radiación solar en el espectro del infrarrojo lejano y medir la intensidad de la radiación solar a varias longitudes de onda. Langley continuó el desarrollo de su invento por más de 20 años (logrando hasta 400 veces más sensibilidad que en sus primeros esfuerzos diseños). Su último diseño, podía detectar el calor irradiado por el cuerpo de una res a una distancia cercana a los 400 metros. Prácticamente el primer detector de radiación IR por efecto foto-conductivo, fue descubierto en 1873 por Smith cuando realizó experimentos con selenio como aislante para cables submarinos. Esto abrió un campo a la investigación por varias décadas, aunque muchos de los esfuerzos no dieron resultados de gran calidad. Para el año de 1930 había una gran cantidad de artículos y patentes respecto al selenio foto-sensitivo. El interés en el estudio de la radiación IR en varios campos, vio un impulso desde 1900, dando grandes avances y solución a numerosos problemas. El periodo entre la primera y segunda guerra mundial, marcó el desarrollo de los detectores de fotones y convertidores de imágenes, por el surgimiento de la espectroscopía de infrarrojo como una de las técnicas analíticas disponibles para el estudio de la materia, en especial para la rama de la química. Los convertidores de imágenes aplicados a detectores del infrarrojo desarrollados antes del inicio de la segunda guerra mundial, fueron de gran interés para la milicia, ya que esto mejoraba las condiciones de visión en el campo de batalla para ver en la oscuridad.

El desarrollo de arreglos de detectores de imágenes térmicas surgió después de la segunda guerra mundial. Estos arreglos de detectores consistieron de un solo detector, o bien, un arreglo lineal de unos pocos detectores y contaba con un sistema mecánico de escaneo bidimensional. En principio, estos arreglos de detectores fueron manufacturados a base de sales de plomo [1.7]. Al inicio de los años 70s en los programas de investigación de los Estados Unidos se inició el desarrollo de arreglos de detectores infrarrojos sin enfriar para aplicaciones militares. También, esta década, vio el surgimiento de módulos que contenía números cada vez mayores de detectores, tantos como 60, 120 o 180 detectores basados en HgCdTe, escaneados en una dimensión. Esto permitió fabricar dispositivos de detección de imágenes a gran escala y más económicos, permitiendo a una gran cantidad de ejércitos a nivel mundial contar con estos sistemas de detección. Los mismos diseños fueron producidos por varios fabricantes en Estados Unidos y Europa. Aunque estos diseños tuvieron éxito para los productos militares, sólo tuvieron un limitado éxito en los sistemas

civiles, debido principalmente al costo, el tamaño del sistema completo y al surgimiento de otras tecnologías. Por el contrario, arreglos de plano focal (FPA) basados en Silisuro de platino (Pt:Si), si bien no habían encontrado espacio para ser usados en aplicaciones militares, encontró grandes aplicaciones comerciales. A principios de la década de 1990, arreglos de 256 x 256 detectores basados en Pt:Si ya eran comercializados. La configuración de detectores como una matriz bidimensional, permitió a estos sistemas eliminar el mecanismo de escaneo. Nuevamente, debido a su tamaño, costo y la competencia con otras tecnologías, su adaptación comercial era muy limitada. Por lo mismo, sus aplicaciones y altos costos de mantenimiento, se limitan a aplicaciones militares. El desarrollo de foto-detectores de infrarrojo de pozo cuántico (QWIP) se inició en la década de 1980 y llegaron a estar disponibles comercialmente en la década de 1990. Estos vieron un moderado éxito comercial y militar. Hasta principios de 1980 todos los detectores de infrarrojos de alto rendimiento fueron enfriados criogénicamente, esto era una gran limitación para la tecnología de detección térmica debido a los altos costos del sistema de enfriamiento y las aplicaciones comerciales en que podían usarse. Bajo la financiación de DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency, de los EE.UU.), los esfuerzos por desarrollar sistemas de captación de imágenes térmicas se centraron principalmente por Texas Instruments y la tecnología de bolómetros micromaquinados sin enfriar por Honeywell. Durante las décadas de los 80s y 90s algunas otras compañías desarrollaron dispositivos basados en diversos principios térmicos, y se inició la segunda revolución de captación de imágenes térmicas en la última década del siglo 20 [1.5]. A finales de 1990, esta tecnología había sido desclasificada por Honeywell, y autorizó a varios fabricantes para su producción. El proceso de fabricación de estos arreglos fue posteriormente mejorado para la producción de alto volumen a bajo costo. Estos arreglos tuvieron otra reducción en los costos al eliminar el sistema de enfriamiento. A diferencia de cualquier otra tecnología de arreglos de detectores de IR, los micro-bolómetros han proporcionado una puerta de entrada para el uso de esta tecnología para el público en general, tanto en automóviles, control de procesos industriales y aplicaciones de seguridad. No se puede enfatizar demasiado la cantidad de aplicaciones que los han encontrado en todo el mundo. Los arreglos de micro-bolómetros sin enfriar, han ganado atención para aplicaciones de detección de imágenes térmicas y a diferencia de los detectores de fotones, no requieren de

equipos de enfriamiento que permiten operar a temperaturas criogénicas. Esto permite diseños compactos, ligeros y que finalmente resultan en dispositivos menos costosos [1.8, 1.9]. Actualmente los detectores basados en micro-bolómetros son producidos en grandes volúmenes, incluso más que cualquier otra tecnología de arreglos de detectores térmicos. Los costos de producción se han reducido y es esperado que las aplicaciones comerciales aumenten dentro de algunos años [1.10]. El desarrollo de arreglos de micro-bolómetros es la tecnología dominante de detectores de IR sin enfriar con más del 95% del mercado hasta el 2010. En la actualidad, arreglos de micro-bolómetros basados en óxido de vanadio (VOx) y silicio amorfo hidrogenado (a-Si:H) son las tecnologías más utilizadas. En un futuro próximo, estos materiales tendrán una gran competencia con nuevos materiales a base de silicio, gracias a su estructura, bajo costo y fácil manufactura [1.6].

1.3 Justificación de la tesis

Los micro-bolómetros son dispositivos muy demandantes y estos tienen que ser capaces de responder a radiación térmica incidente de muy baja intensidad. Numerosas características tienen que llevarse casi al punto de la perfección como la absorción IR, aislamiento térmico, tiempo de respuesta del micro-bolómetro y la integración con el circuito integrado de lectura.

En la actualidad el mercado de los arreglos de micro-bolómetros sin enfriar sigue siendo dominado por el VOx, que no es un material completamente compatible con la tecnología de fabricación de circuitos integrados basados en silicio, además, este material debe ser obtenido bajo condiciones muy específicas para poder ser utilizados como elemento termo-sensible en micro-bolómetros [1.11, 1.12]. VOx tiene un coeficiente térmico de resistencia (TCR) relativamente alto, y su bajo valor en resistividad permite tener un buen acoplamiento con el circuito de lectura. Por otro lado el a-Si y materiales amorfos basados en silicio (a-SiGe:H, a-Si:H,B, etc.), están ganando terreno para usarse como el material termo-sensible. Estos semiconductores amorfos tienen valores de TCR mayores que del VOx, pero en desventaja, sufren de baja estabilidad con la radiación y tienen alta resistividad eléctrica que complica el acoplamiento con el circuito de lectura [1.8, 1.14, 1.15]. En la tabla 1.1 se muestran algunos de los arreglos de micro-bolómetros

de los principales fabricantes comerciales de esta tecnología. En esta tabla podemos observar que el VOx es el material más utilizado para la fabricación de estos dispositivos. Los semiconductores amorfos basados en silicio empiezan a ser empleados para la fabricación de arreglos de micro-bolómetros comerciales. El tamaño de los micro-bolómetros es de hasta 17 μm y los arreglos incorporan una gran cantidad de detectores.

Compañía	Material termosensible	Tamaño del arreglo	Tamaño de pixel (μm)	NETD (mK) (f/1, 20-60Hz)
L-3 (USA) ^[1.16]	VOx	320X240	37.5	50
	a-Si	160X120 – 640X480	30	50
	a-Si/a-SiGe	320X240 – 1024X768	17	30 – 50
BAE (USA) ^[1.17]	VOx	320X240 – 640X480	28	30 – 50
	VOx (U.D.)	160X120 – 640X480	17	50
	VOx (U.D.)	1024X768	17	
DRS (USA) ^[1.18]	VOx	320X240	25	35
	VOx (U.D.)	320X240	17	50
	VOx (U.D.)	640X480, 1024X768	17	
Raytheon (USA) ^[1.19]	VOx	320X240, 640X480	25	30 – 40
	VOx (U.D.)	320X240, 640X480	17	50
	VOx (U.D.)	1024X480, 2048X1536	17	
ULIS (Francia) ^[1.20, 1.21]	a-Si	160X120 – 640X480	25	<60
	a-Si	640X480, 1024X768	17	<60
SCD (Israel) ^[1.22]	VOx	384X288	17	35
	VOx	640X480	25	50
NEC (Japón) ^[1.23]	VOx	320X240	23.5	<75
	VOx	640X480	23.5	<75

Tabla 1.1 Arreglos de micro-bolómetros sin enfriar comerciales (U.D. Umbrella Design).

En el presente trabajo proponemos el uso de semiconductores polimorfos (semiconductores amorfos con nano-cristales embebidos) para ser usados como películas termo-sensibles en micro-bolómetros, que prometen traer consigo mejoras en el campo de la detección térmica. El uso de semiconductores polimorfos como el silicio polimorfo hidrogenado (pm-Si:H) y el silicio-germanio polimorfo hidrogenado (pm-Si_xGe_y:H) pueden mejorar la respuesta de los micro-bolómetros, ya que los semiconductores polimorfos tienen mayor conductividad, valores de TCR muy altos, y estabilidad mejorada contra la radiación incidente; en comparación a los semiconductores amorfos basados en silicio [1.24-1.27]. El pm-Si:H y

pm-Ge:H tienen un TCR de $10 \%K^{-1}$ y $5 \%K^{-1}$ respectivamente, la sensibilidad usando estos materiales mejorará cerca de 5 y 3.5 veces respecto a Vox, hasta 3.5 y 1.8 veces respecto a α -Si:H,B (TCR $\approx 2.8 \%K^{-1}$). El pm-Si:H tiene un TCR similar al α -Si:H pero con una conductividad mayor hasta de 2 órdenes de magnitud. El pm-Ge:H tiene una conductividad mayor al α -Si:H de 4 órdenes de magnitud. Así que con los semiconductores polimorfos aplicados en micro-bolómetros, se pueden dspositivos de alta sensibilidad y mejor estabilidad de sus características a la radiación incidente.

Hoy en día, la tendencia global de los sistemas de captaciones de imágenes, incluyendo la detección de imágenes térmicas, es contar con arreglos con una gran cantidad de pixeles y reducir las dimensiones de cada detector. En la tecnología de micro-bolómetros sin enfriar, las dimensiones de los detectores son de $25 \times 25 \mu m^2$ e incluso menores (hasta $17 \times 17 \mu m^2$) [1.28, 1.29]. De esta manera se busca tener sistemas de detección de imágenes IR más sensitivos y de mayor resolución.

1.4 Objetivos

El objetivo general de este trabajo es fabricar micro-bolómetros sin enfriar con áreas de $50 \times 50 \mu m^2$, $30 \times 30 \mu m^2$ y hasta $25 \times 25 \mu m^2$; y dimensión mínima de $1 \mu m$. Realizar el depósito y la caracterización de películas delgadas de semiconductores polimorfos basados en Si y Ge como material termos-sensible que tiene un alto valor de TCR aunado a una conductividad mejorada con respecto a sus contrapartes amorfas, y estas películas serán utilizadas como el elemento termosensible de los micro-bolómetros. El proceso de fabricación debe ser totalmente compatible con el proceso de fabricación CMOS.

Los objetivos particulares son:

1. Diseñar la estructura del micro-bolómetro utilizando dimensiones de $1 \mu m$ y con áreas de hasta $25 \times 25 \mu m^2$. Mostrar las mejoras de algunas características del dispositivo entre ellas el aislamiento térmico y su impacto en la respuesta del micro-bolómetro al usar tales dimensiones. Se toma como referencia el trabajo

previo realizado en el laboratorio de microelectrónica del INAOE en la fabricación de micro-bolómetros.

2. Depósito y caracterización de películas delgadas de semiconductores polimorfos (pm-Si:H, pm-Ge:H, pm-Si_xGe_y:H, etc.) con TCR alto. Las películas serán obtenidas por la técnica de depósito químico en fase vapor asistido por plasma (PECVD) trabajando a 13.56 MHz de radio frecuencia (RF), que serán empleadas como película termo-sensible en los micro-bolómetros fabricados.
3. Caracterizar los micro-bolómetros fabricados y mostrar que la combinación del diseño y el uso de pm-Si_xGe_y:H resulta en dispositivos con alta respuesta. Mostrar que las películas delgadas de semiconductores polimorfos empleadas como material termo-sensible son una excelente alternativa a VO_x y a-Si:H que son los materiales más utilizados actualmente en sistemas de detección de imágenes IR.

1.5 Organización de la tesis

El capítulo 1 es la introducción y trata acerca del descubrimiento de la radiación IR y del desarrollo de los dispositivos de detección térmica. Se plantean las metas y objetivos de este trabajo para obtener micro-bolómetros sin enfriar de alta respuesta, que se basan en películas delgadas de silicio-germanio polimorfo hidrogenado (pm-Si_xGe_y:H) que tienen un valor alto de TCR.

En el capítulo 2 se describen las características de la radiación infrarroja, se aborda un estudio de los diferentes tipos de detectores térmicos y de los semiconductores polimorfos basados en silicio, para centrar la atención en los micro-bolómetros sin enfriar, describiendo sus características y figuras de merito.

El capítulo 3 describe el diseño de los micro-bolómetros y el proceso de fabricación. En el capítulo 4 se describen las técnicas de caracterización de los semiconductores polimorfos y también las técnicas de caracterización de los micro-bolómetros.

En el capítulo 5 se presentan y discuten los resultados de la caracterización tanto de los depósitos de las películas de $\text{pm-Si}_x\text{Ge}_y\text{:H}$, como de los micro-bolómetros.

Finalmente, las conclusiones de este trabajo se presentan en el capítulo 6.

Referencias

- [1.1] Ciupa R. and Rogalski A., Performance limitations of photon and thermal infrared detectors, *Optoelectronic review*, Vol. 5, No. 4, 257-267, 1997.
- [1.2] Sharma UC, M. Tech Credit Seminar Report, Electronic Group, EE Dept. IIT Bombay, *Infrared detectors*, 2004.
- [1.3] Rogalski A., Infrared detectors: an overview, *Infrared Physics and technology*, No. 43, 187-210, 2002.
- [1.4] Rogalski A., Recent progress in infrared detector technologies, *Infrared Physics & Technology*, No. 54, 136-154, 2011.
- [1.5] Rogalski A., History of infrared detectors, *Optoelectronics review*, Vol. 20, No. 3, 297-308, 2012.
- [1.6] L. Nobili, M. Melloni, Recherches sur plusiers phenomenes calorifiques, enterprises au moyen du thermo-multiplcateur. *Ann de chimie et de physique*, XLVIII, 198-218, 1831.
- [1.7] C. L. Oxley, Characteristics of cooled lead sulfide photo-conductive cells, *J. Opt. soc.*, 36, 365, 1946.
- [1.8] Syllaios A.J., Schimert T.R, Gooch R.W., McCardel W.L., Ritchey B.A, Tregilas J.H., Amorphous silicon microbolometer technology, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* Vol. 609, A14.4.1-A14.4.6, 2000.
- [1.9] Kow-Ming Chang, Ren-Jie Lin, Fabrication of high performance CMOS compatible surface-micromachined bolometer arrays.
- [1.10] Becker L., Influence of IR sensor technology on the military and civil defense, *Proc. Of SPIE*, Vol. 6127, 1-15, 2006.

- [1.11] M. Henini and M. Razeghi, Handbook of Infrared Detection Technologies, Elsevier, New York, 2002, p. 450.
- [1.12] A. Gaitas, Weibin Zhu, N. Gulari, E. Covington, C. Kurdak, Characterization of room temperature metal microbolometers near the metal-insulator transition regime for scanning thermal microscopy, Appl. Phys. Lett. 95, 153108, 2009.
- [1.13] Xing-Ming Liu, Hua-Jun Fang, Li-Tian Liu, Study on new structure uncooled a-Si microbolometer for infrared detection, Microelectron. J., 38, 735–739, 2007.
- [1.14] D. Liang, Y. Rui-Feng, LIU Li-Tian, Characterization of Uncooled Poly-SiGe Microbolometer for Infrared Detection, Chinese Phys. Lett. 20, 770, (2003).
- [1.15] Syllaios A.J., Schimert T.R, Gooch R.W., McCardel W.L., Ritchey B.A, Tregilas J.H., Amorphous silicon microbolometer technology, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 609, A14.4.1-A14.4.6, 2000.
- [1.16] <http://www.insighttechnology.com/irp>
- [1.17] <http://www.baesystems.com>
- [1.18] <http://www.drsinfrared.com/thermal-detectors.aspx>
- [1.19] <http://www.raytheon.com>
- [1.20] <http://www.ulis-ir.com/index.php?infrared-detector=products>
- [1.21] <http://www-leti.cea.fr/en>
- [1.22] <https://www.scd.co.il/>
- [1.23] <http://www.nec.co.jp/geo/en/index.html>
- [1.24] Roca i Cabarrocas P., Fontcuberta i Morral A., Poissant Y., Growth and optoelectronic properties of polymorphous silicon thin films, Thin Solid Films, 403-404, 39-46, 2002.

- [1.25] Moreno M., Torres A., Ambrosio R., Rosales P., Heredia A., Kosarev A., Torres E., Reyes-Betanzo C., Zuñiga C., Study of polymorphous silicon and germanium as thermo-sensing film for infrared detectors, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2012.
- [1.26] J.P. Kleider, R. Chouffot, A.S. Gudovskikh, P. Roca i Cabarrocas, M. Labrune, P. J. Ribeyron, R. Brüggemann, Electronic and structural properties of the amorphous/crystalline silicon interface, *Thin Solid Films* 517, 6386–6391, 2009.
- [1.27] Nong-Moon Hwang and Dong-Kwon Lee, Charged nanoparticles in thin film and nanostructure growth by chemical vapour deposition, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 43. (2010), 483001.
- [1.28] Mottin E., Bain A., Martin J.L., Ouvrier-Buffet J.L., Bisotto S., Yon J.J., Tissot J.L., Uncooled amorphous silicon technology enhancement for 25 μ m pixel pitch achievement, *Infrared Technology and applications XXVIII*, SPIE Vol.4820, 2002.
- [1.29] Niklaus F., Decharat A., Jansson C., Stemme G., Performance model for uncooled infrared bolometer arrays and performance predictions of bolometers operating at atmospheric pressure, *Infrared physics & technology*, Vol. 51, 168-177, 2008.

Capítulo 2. Análisis de la literatura

La luz, es una parte de los diferentes tipos de ondas electromagnéticas que viajan a través del espacio. El espectro electromagnético cubre un rango extremadamente amplio, desde las ondas de radio con longitudes de onda de un metro o más, hacia los rayos-x con longitudes de onda menores a los nanómetros. La radiación óptica se encuentra justo entre las ondas de radio y los rayos-x del espectro electromagnético, exhibiendo una particular mezcla de propiedades cuánticas, de rayos y ondas. En este capítulo abordamos el estudio de la radiación IR y los tipos de detectores para este rango del espectro electromagnético poniendo énfasis en los micro-bolómetros y sus características para la detección de radiación IR.

2.1 Radiación infrarroja

En el espectro electromagnético, la radiación infrarroja está situada entre la luz visible y las ondas de radio. Las longitudes de onda comprendidas en el rango del infrarrojo son mayores que las del espectro visible y más cortas que las ondas de radio. La radiación infrarroja contiene el menor valor de energía por fotón que cualquier otra banda del espectro óptico (visible). Debido a esto, un fotón de radiación IR muchas veces carece de energía requerida para superar el umbral de detección de un detector cuántico.

La radiación infrarroja es medida usualmente por un detector térmico tal como una termopila, que mide el cambio en la temperatura por la energía absorbida. Además, la radiación IR está dividida en diferentes bandas, el infrarrojo cercano (NIR) que comprende el rango de 0.7-1.1 μm , el infrarrojo corto (SWIR) en el rango 1.1-2.5 μm , el medio infrarrojo (MWIR) de 2.5-7 μm , el lejano infrarrojo (LWIR) de 7-15 μm , y el muy lejano infrarrojo (VLWIR) que es el rango más grande que comprende 15-1000 μm , donde comienzan las ondas milimétricas [2.1].

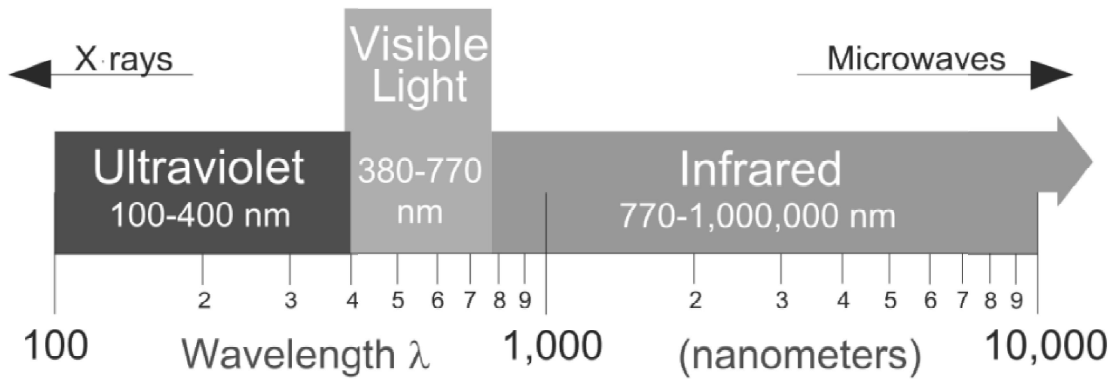


Figura 2.1 Espectro electromagnético óptico donde se encuentra la radiación UV, la luz visible y la radiación IR.

Todos los objetos cuya temperatura sea mayor a la del cero absoluto (0 K) absorben y emiten energía en forma de radiación, donde la intensidad y longitud de onda dependen de la temperatura a la que se encuentre dicho objeto [2.2]. El mecanismo de emisión está relacionado a la energía liberada como resultado de las oscilaciones o transiciones de algunos electrones que constituyen la materia. Estas oscilaciones son, a su vez, mantenidas por la energía interna del objeto, es decir, por su temperatura. La cantidad de energía radiada y la distribución sobre el espectro electromagnético dependerá principalmente en dos factores: la temperatura del objeto y las condiciones superficiales para poder emitir radiación, es decir, de la emisividad ϵ .

La radiación emitida por un cuerpo puede ser descrita por la teoría de la emisión de cuerpo negro derivada por Max Plank [2.2]. La emisividad espectral de un cuerpo negro es calculada por la ecuación 2.1:

$$\frac{dE_{\lambda}}{dA dt d\lambda} = \epsilon_{\lambda} \frac{2\pi^5 k^4}{15\pi^3 c^3} \frac{1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (2.1)$$

Donde h y k son las constantes de Plank y Boltzmann respectivamente, C es la velocidad de la luz en el vacío y T es la temperatura absoluta del cuerpo negro (K). La figura 2.2 muestra graficas de la ecuación 2.1 a temperaturas selectas. Algunas características importantes deben notarse de esta teoría:

1. La radiación emitida varía continuamente con la longitud de onda.
2. A cualquier valor de longitud de onda la magnitud de la radiación emitida se incrementa con el aumento en la temperatura.
3. La región espectral en la cual la radiación se concentra depende de la temperatura, comparativamente más radiación en longitudes de onda más cortas aparece como un aumento en la temperatura.
4. Una fracción significativa emitida por el sol, la cual puede aproximarse a una temperatura de cuerpo negro de 5800 K, está en la región visible del espectro. En contraste, para temperaturas menores de 800 K, la emisión predomina en la región infrarroja del espectro y no es visible al ojo humano.

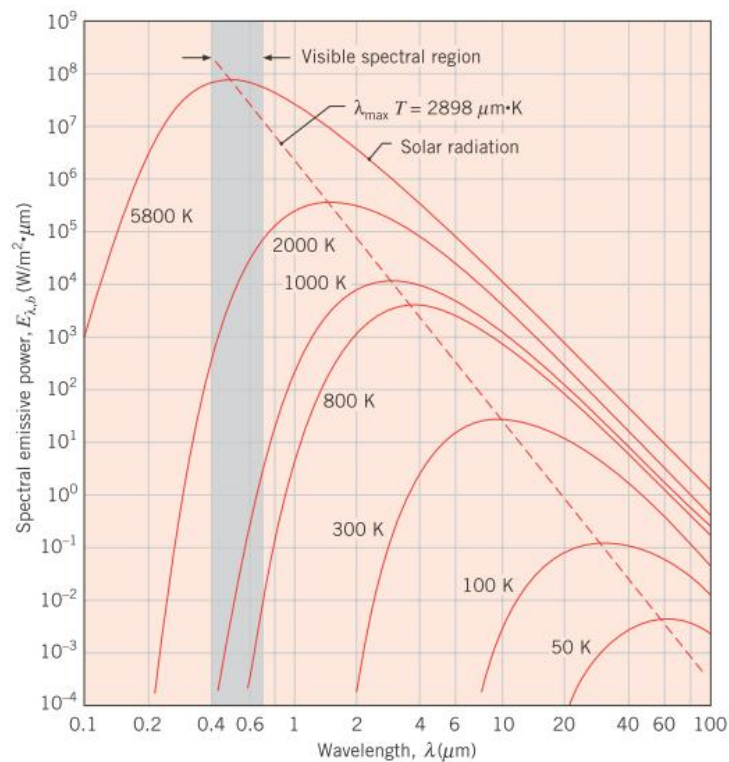


Figura 2.2 Espectro de potencia de emisión de un cuerpo negro a diferentes temperaturas.

Un cuerpo negro es un objeto capaz de absorber toda la radiación incidente, a su vez, es un radiador perfecto. La energía emitida por un cuerpo negro representa el máximo valor teórico que un objeto puede emitir para una temperatura específica. La emisividad está definida como la razón entre la excitancia espectral de un cuerpo negro calculado a la misma temperatura. La emisividad de los materiales puede tener valores entre 0 y 1, mientras más cercano a la unidad, el material es mejor radiador. El valor de la emisividad depende de varios factores como la longitud de onda, temperatura, forma del objeto, rugosidad superficial y el ángulo de observación. Los objetos que se encuentran a temperatura ambiente cercana a los 300 K, emiten en el rango de 3-14 μm con un pico de emisión a una longitud de onda de 10 μm , como puede verse en la figura 2.2. Al viajar la radiación IR de la fuente de emisión y antes de llegar al detector, la radiación viaja por la atmósfera. La atmósfera está compuesta principalmente por nitrógeno (N_2), Oxígeno (O_2), ozono, metano, óxido nítrico y vapor de agua. La radiación IR es absorbida por la atmósfera. En la figura 2.3 se muestra el espectro de absorción de la radiación IR por la atmósfera. En esta figura se puede ver que hay tres ventanas de transmisión en el rango de 1-2.5 μm , 3-5 μm y 8-14 μm . Los objetos terrestres, tienen temperaturas alrededor de los 300 K, con una emisión en IR centrada en 10 μm justo en medio de una de las ventanas de transmisión.

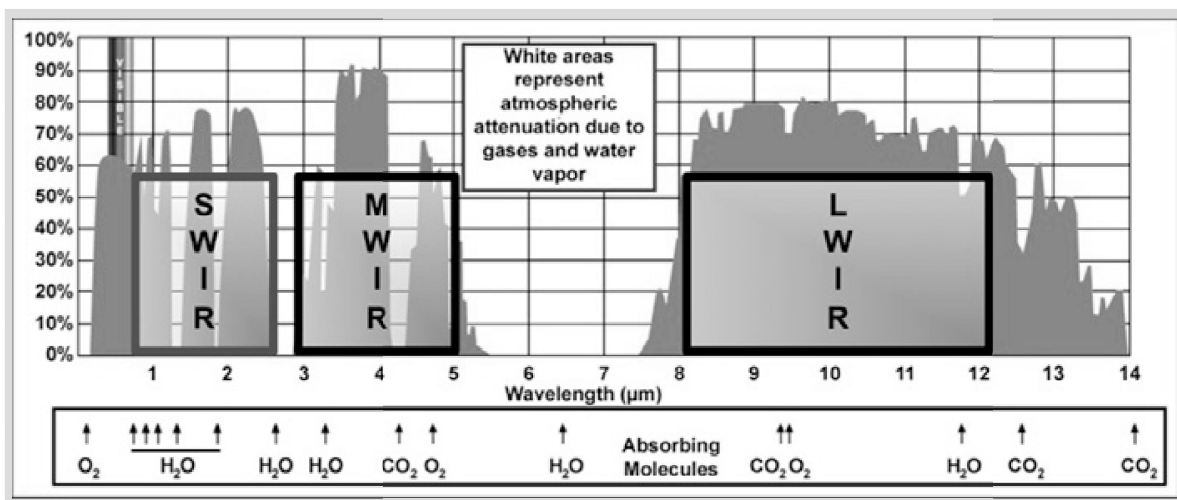


Figura 2.3 Espectro de transmisión de radiación IR por la atmósfera terrestre, se ven las ventanas de transmisión más utilizadas en la detección de radiación IR 3-5 μm y 8-14 μm [2.3].

Dado que la atmósfera presenta regiones de fuerte absorción de la radiación, los detectores de radiación IR se diseñan para trabajar en una o varias de las ventanas de transmisión. Los detectores utilizados en aplicaciones espaciales o en ambientes controlados no se ven afectados por la absorción en la atmósfera.

Los métodos de detección de radiación IR se pueden clasificar en dos grupos: los detectores de fotones, y los detectores térmicos [2.4]. En los detectores fotónicos, los fotones interactúan directamente con los electrones dentro del material produciendo transiciones electrónicas. En los detectores térmicos, la radiación calienta el detector, y lo que se mide es la variación de alguna propiedad física con la variación de la temperatura [2.5, 2.6]. La respuesta de un detector de fotones dependerá del número de fotones absorbidos, mientras que en el detector térmico la respuesta depende de la cantidad de energía absorbida.

2.2 Detectores infrarrojos de fotones

La detección de fotones ocurre cuando un fotón incidente es absorbido por el material detector, interactuando con los electrones dentro del material. En muchos casos, el material es un semiconductor caracterizado por una banda prohibida de energía. Luego, la energía que reciben los electrones al interactuar con los fotones de radiación IR les permite hacer una transición de energía. Esta interacción puede dar lugar a pares electrón-hueco libres, conocido como excitación intrínseca, o a electrones y huecos que son liberados de los átomos dopantes, conocido como excitación extrínseca. Así, aumenta el número de portadores de carga y en consecuencia la conductividad del material también lo hace. La interacción de un fotón con un electrón enlazado requiere que la energía del fotón supere un valor determinado.

Dependiendo de la interacción, esta energía puede ser la de la banda prohibida de energía o de la energía de ionización de los electrones de los átomos donadores o aceptores. Esto se puede visualizar en la figura 2.4.

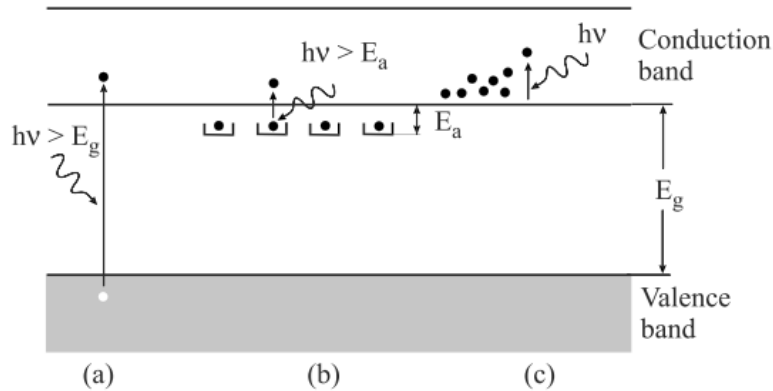


Figura 2.4 Procesos fundamentales de excitación óptica en materiales semiconductores, (a) absorción intrínseca, (b) absorción extrínseca, (c) absorción por portadores libres [2.7].

En un detector de fotones que responde a la radiación IR, que tenga respuesta en el rango de 8-14 μm , se requiere que el material semiconductor tenga una banda prohibida o energía de excitación de alrededor de 0.09 eV. En caso de responder en el rango de 3-5 μm el ancho de la banda prohibida o energía de excitación será de alrededor de 0.25 eV. Para este tipo de materiales, los portadores excitados por la radiación de fondo a temperatura ambiente son mayores a la de los portadores foto excitados que deben ser detectados. El problema con este tipo de detectores es causado por fluctuaciones en las razones de generación y recombinación, esto es llamado ruido g-r (g-r noise).

Existen tres tipos de detectores térmicos de fotones: los fotoconductores, los fotovoltaicos y los foto-emisores. Los fotoconductores son dispositivos que generalmente aumentan su conductividad eléctrica por la generación de portadores de carga debido a la absorción de fotones. Son dispositivos pasivos, no generan una diferencia de potencial por sí solos. Se fabrican principalmente de Si y Ge dopados de sales de plomo, y de materiales ternarios como mercurio-cadmio-telurio (HgCdTe) o plomo-estaño-telurio (PbSnTe). Los detectores fotovoltaicos son diodos semiconductores, generalmente de Si, InSb o HgCdTe [2.7]. La radiación IR es absorbida en región de carga espacial, dándole energía suficiente a un electrón para llegar a banda de conducción, dejando un hueco en banda de valencia. Este par electrón-hueco contribuye a la conducción, modificando la relación corriente-voltaje en el diodo. En los detectores foto-emisores cuando un fotón incide producen una excitación

electrónica fuerte, y el electrón se desprende del material. Generalmente el material es puesto en vacío y cumple la función de un cátodo, el electrón desprendido viaja hacia el ánodo través del vacío acelerado por un campo eléctrico. Los materiales empleados en este tipo de detectores son aleaciones como Ag-O-Cs, Cs-Na-K-Sb y GaAsP que, generalmente, no son compatibles con el proceso de fabricación CMOS. Además, como no permiten un proceso de fabricación monolítico se necesitan métodos complejos para su integración con el circuito de control, lo que agrega un número extra de pasos de fabricación.

El problema de los detectores de fotones de radiación IR radica en el uso de materiales con energía de banda prohibida o energía de ionización pequeñas y esto agrega ruido de fondo a la señal a detectar. La solución a este problema es utilizar sistemas de enfriamiento a temperaturas criogénicas disminuyendo la excitación de portadores de carga por la radiación de fondo, pero haciendo a los detectores de este tipo más caros para poder mantenerlos en funcionamiento, y poco prácticos en cuestión de portabilidad. Para el rango de longitud de onda entre 0.7-7 μm (NIR, SWIR y MWIR), los foto-detectores deben ser enfriados a temperaturas entre 195-77 K. Para lograr enfriar a esas temperaturas es necesario contar con un sistema que sea capaz de operar con Nitrógeno líquido (77 K). Para el rango de 1-1000 μm (LWIR y VLWIR) los foto-detectores deben ser enfriados a temperaturas de hasta 4.2 K. Para enfriar hasta tal temperatura se utilizan sistemas capaces de manejar Helio líquido (4.2 K). En general, los detectores de fotones ofrecen mayor sensibilidad y frecuencia de operación, son utilizados en aplicaciones donde los dispositivos tengan que responder de manera rápida y con mucha precisión. Su desventaja, es que tienen que ser enfriados con sistemas de enfriamiento criogénico que por lo general son de costo elevado y de grandes dimensiones.

2.3 Detectores infrarrojos térmicos

Los mecanismos de detección térmica son definidos como los mecanismos donde cambia alguna propiedad física medible de un material, debido a un aumento en la temperatura causado por la absorción de radiación. La medición del cambio de dicha propiedad, permite estimar la cantidad de radiación absorbida por el sensor. En la práctica, los sensores térmicos son anclados a un sustrato conductor de calor mediante una resistencia térmica.

Cuando la radiación incide sobre el detector, la temperatura aumenta; cuando se retira la excitación, los sensores vuelven a la temperatura del sustrato. La respuesta temporal de los detectores térmicos está asociada a su masa y con su conductividad térmica. En general, sensores más grandes tienen mayor respuesta, pero también presentan tiempos de respuesta más prolongados. En los detectores térmicos, la señal a detectar no depende en la naturaleza fotónica de la radiación incidente, esto es, los efectos térmicos son generalmente independientes de la longitud de onda. La señal a detectar depende de la potencia radiante (o su razón de cambio) pero no de su contenido espectral. Un ejemplo de esto se aprecia en la figura 2.5.

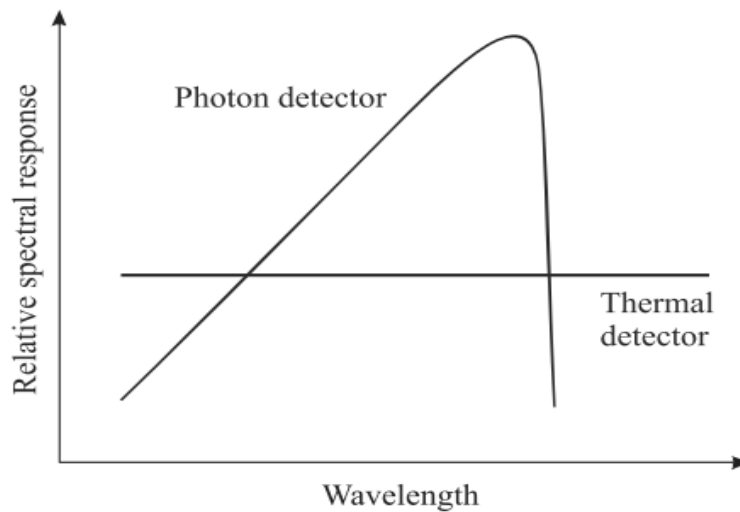


Figura 2.5 Respuesta espectral relativa para un detector térmico y un detector de fotones [1.4].

Debido a la respuesta térmica, la velocidad de detección es baja, por lo tanto las señales de salida se limitan a bajas frecuencias. Aunque este no es el caso de detectores piroeléctricos que pueden trabajar a frecuencias altas [2.8]. Por lo general, los detectores térmicos se aplican a la parte del lejano IR (LWIR) y muy lejano IR (VLWIR). Debido a la pequeña energía de los fotones no existen apropiados detectores de fotones para este rango, puesto que es el calor y no la energía de los fotones lo que es relevante en estos detectores. Los mecanismos de detección térmica donde ocurre un cambio en las propiedades eléctricas son el efecto piroeléctrico, el efecto termoeléctrico y el bolométrico resistivo.

2.3.1 Efecto piroeléctrico

El efecto piroeléctrico se muestra en ciertos materiales, usualmente en materiales ferroeléctricos, que exhiben una polarización eléctrica espontánea que puede medirse como un transiente de carga eléctrica en las caras opuestas de una barra de material ferroeléctrico. La neutralización de la carga superficial ocurre automáticamente por el flujo interno de carga. Si la temperatura del material cambia rápidamente, la carga superficial reaparece. Si la radiación infrarroja absorbida es modulada, una corriente alterna fluirá en un circuito externo conectado en caras opuestas del material. La amplitud de la corriente depende de la intensidad y razón de cambio de la radiación absorbida. Las propiedades ferroeléctricas de estos materiales desaparecen por encima de una temperatura dada para cada material, que se conoce como la temperatura de Curie. Debido a que la razón de cambio con temperatura de la polarización ferroeléctrica es mayor justo por debajo de la temperatura de Curie, los detectores piroeléctricos muchas veces emplean estabilizadores de temperatura para mantenerse justo por debajo de esta temperatura. Los arreglos monolíticos generalmente emplean materiales ferroeléctricos cuya temperatura de Curie está por encima de la temperatura ambiente. En este caso, no se requieren estabilizadores de temperatura.

2.3.2 Efecto termoeléctrico

Este efecto ocurre cuando dos alambres de metales diferentes son conectados por sus extremos, uno de estos alambres es cortado y se conecta un medidor de voltaje, cuando una de las uniones es calentada respecto a la otra, se genera una diferencia de potencial entre las uniones. Esta diferencia de potencial será medida y su magnitud es proporcional a la diferencia de temperatura entre las uniones. Las propiedades termoeléctricas de las uniones se expresan en términos del coeficiente Seebeck de los materiales empleados. Los semiconductores exhiben propiedades termoeléctricas y sus coeficientes Seebeck, en general, son mayores que de los metales. Las propiedades termoeléctricas de los semiconductores tienen dependencia en el tipo de semiconductor, además del tipo y concentración de dopantes. Aunque el voltaje termoeléctrico de una sola unión es generalmente pequeño, muchos de los detectores termoeléctricos consisten da varias uniones conectadas en serie incrementando el voltaje en proporción al número de uniones.

2.3.3 Efecto bolométrico resistivo

En este tipo de detector, su resistencia eléctrica varía si su temperatura aumenta debido a la absorción de radiación electromagnética. En la práctica, se trata de una película delgada de metal o un semiconductor que tiene sobre esta una película que absorbe la radiación térmica. Por lo general, ambas películas están suspendidas sobre una cavidad, o por encima de un sustrato para proveer el aislamiento térmico. Este aislamiento es para minimizar el flujo de calor de la película termo-sensible hacia sus alrededores. Cuando la radiación incidente es absorbida por la película absorbente, su temperatura aumenta, esta transfiere su temperatura hacia la película termo-sensible. La variación en la resistencia eléctrica de la película termo-sensible es monitoreada. Si la película termo-sensible de los micro-bolómetros es una película delgada de un metal la variación de la resistencia eléctrica registra un aumento. Por otro lado, si la película termo-sensible es una película delgada de algún semiconductor, por lo general la variación en la resistencia eléctrica registra un decremento. Hoy en día, los bolómetros se construyen sobre un sustrato de silicio, donde yace el circuito de lectura previamente fabricado. Para lograr una alta respuesta se debe tener una película termo-sensible con un valor alto del coeficiente térmico de la resistencia (TCR) y un alto aislamiento térmico entre la estructura suspendida y el sustrato.

2.4 Micro-bolómetros no enfriados

Los micro-bolómetros son sensores de radiación con un material absorbente en el rango del IR en contacto con un material termo-sensible, esto hace básicamente un resistor sensible a la variación de temperatura. El material termo-sensible responde a un amplio ancho de banda, pero cuando es implementado en forma de membrana suspendida se optimiza su respuesta para una cierta región del espectro electromagnético. El principio de operación de los micro-bolómetros está basado en el aumento de temperatura de la película termo-sensible por la absorción de radiación IR incidente. El cambio en la temperatura causa una variación de la resistencia eléctrica, la que es medida por un circuito externo. La sensibilidad de un micro-bolómetro es controlada por varios factores incluyendo al coeficiente térmico de resistencia (TCR) del material termo-sensible, la geometría y dimensiones del elemento sensor, la masa térmica del detector, eficiencia de absorción, y el grado de aislamiento térmico, entre los más importantes [2.9-2.12].

En micro-bolómetros sin enfriar existen dos configuraciones que proporciona el aislamiento térmico del dispositivo: la estructura suspendida sobre una cavidad y la estructura suspendida por encima del sustrato, vistas en la figura 2.6.

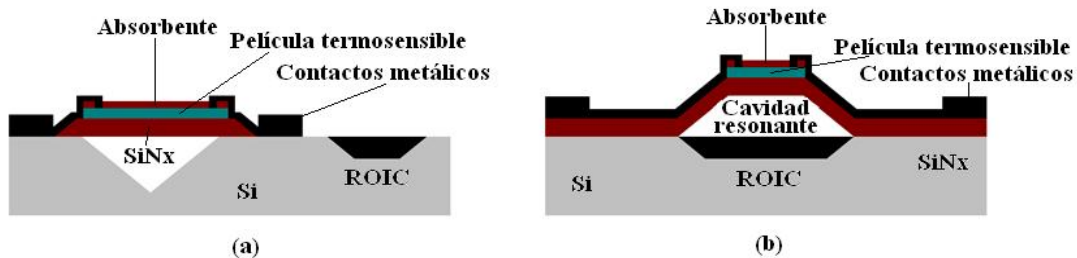


Figura 2.6 Configuraciones básicas de micro-bolómetros sin enfriar, (a) estructura suspendida sobre una cavidad, y (b) suspendida encima del sustrato.

En la configuración donde el micro-bolómetro está suspendido sobre una cavidad, la fabricación del micro-bolómetro se realiza mediante la técnica de micro-maquinado en volumen. Esta técnica consiste en depositar una capa aislante en la superficie del sustrato, después se definen los electrodos de polarización y el material termo-sensible. También se puede depositar una película que tenga una buena absorción de la radiación IR. Finalmente, se abre una cavidad en el sustrato de silicio por debajo del micro-bolómetro que quedará suspendido consumiendo área útil. Esta cavidad puede extenderse en el espesor del sustrato o únicamente ser una pequeña cavidad justo por debajo de la membrana aislante. Para definir la cavidad en sustratos de silicio, puede emplearse la técnica de grabado húmedo (KOH, TMAH, etc.). Este método de fabricación de micro-bolómetros es poco conveniente, ya que el circuito de control que forma parte del circuito de lectura es fabricado junto al sensor consumiendo área también, esto se traduce en un pobre factor de llenado. Existe otro proceso donde el micro-bolómetro se fabrica en un sustrato de silicio y en un sustrato diferente se fabrica el circuito de control (ROIC), el cual debe ser unido de alguna manera al sustrato donde se encuentra el micro-bolómetro. Este es el caso de un dispositivo híbrido, y esta técnica resulta en dispositivos con altas razones de factor de llenado ya que se puede optimizar el área del arreglo de los micro-bolómetros y de forma separada se optimiza el diseño del ROIC. Estos procesos de fabricación resultan por lo general más caros y complicados de elaborar [2.11].

Otra forma de fabricar micro-bolómetros es por la técnica de micro-maquinado superficial, que a diferencia del micro-maquinado en volumen, los sensores se pueden fabricar justo por encima del circuito de lectura previamente fabricado en el sustrato, obteniendo el micro-bolómetro como un estructura suspendida o micro-puente. La fabricación del micro-bolómetro debe realizarse en un post-proceso a baja temperatura sobre la electrónica de control, utilizando técnicas de micro-maquinado superficial. En esta configuración se aprovecha de mejor manera el área del sustrato, y además, se pueden alcanzar altos valores del factor de llenado de los dispositivos. La estructura de micro-puente, generalmente, emplea dos postes anclaje hacia el sustrato, y brazos de suspensión de la membrana. Encima de esta estructura, sobre la membrana, se encuentran suspendidas la película termo-sensible y la capa absorbente. Los postes de anclaje y brazos de suspensión cumplen la función de aislar térmicamente a la película termo-sensible con el sustrato. Además se utiliza como guías de las líneas de interconexión con el circuito de control en el sustrato. El área del pixel considerada para los postes de anclaje y brazos de suspensión reduce el factor de llenado. Los esfuerzos para incrementar el factor de llenado incluyen: reducir el área utilizada por los postes de anclaje y el uso de unos brazos de suspensión sujetos en una capa intermedia entre la película termo sensible y el sustrato. No obstante, el diseño de los postes de anclaje y brazos de suspensión no deben interferir con la absorción de radiación IR. La absorción de radiación IR que puede mejorarse por medio de la cavidad resonante formada entre la membrana suspendida y el sustrato [2.13].

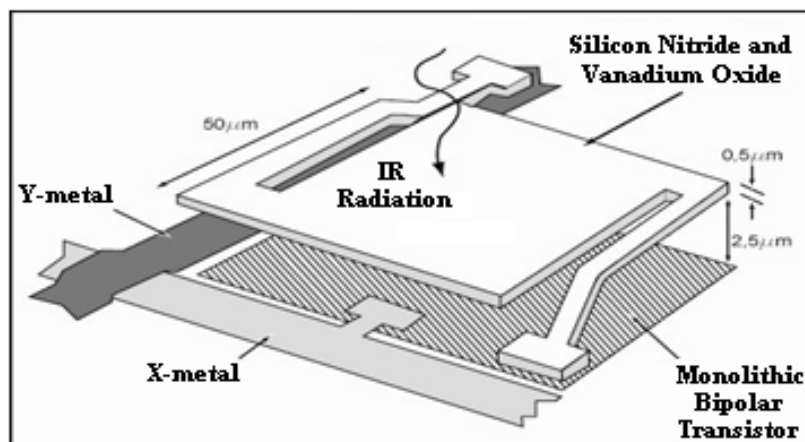


Figura 2.7 Esquema básico de un micro-bolómetro sin enfriar de membrana suspendida [2.14].

La figura 2.7 muestra el esquema básico de un micro-bolómetro sin enfriar que es construido en una membrana suspendida usualmente hecha de SiN_x , que cumple la función de estructura de soporte. Otros materiales que se utilizan para cumplir este propósito son: SiO_x , poliamidas, etc [2.14]. Además de servir como estructura de soporte estos materiales también cumplen la función de aislamiento térmico, por lo que se busca que estos tengan baja conductividad térmica para evitar perder calor hacia el sustrato. Sobre esta membrana se deposita el material termo-sensible y una capa delgada del material que va a absorber la radiación IR.

En la actualidad, la fabricación de micro-bolómetros busca contar con un proceso más simple y con menos pasos de proceso. El desarrollo de nuevos procesos ha simplificado la fabricación de micro-bolómetros, en estos procesos se utiliza la misma película delgada de material termo-sensible como la estructura de soporte. Con esto se reduce la masa térmica del micro-bolómetro aumentando la frecuencia de operación de estos [2.15-2.17].

2.5 Materiales absorbentes de radiación IR

Con el fin de obtener un micro-bolómetro con una alta respuesta hay tres importantes factores a considerar: la capacidad del dispositivo de absorber la radiación IR; la estructura de aislamiento térmico del dispositivo; y el TCR el cual tiene que ser lo más alto posible para que pequeñas variaciones de temperatura tengan como resultado variaciones significativas en la resistencia del micro-bolómetro [2.18, 2.19].

Una película delgada de material absorbente de radiación IR es una parte muy importante para estos dispositivos, su función se basa en la absorción de radiación IR y la transferencia de calor a la película termo-sensible. Los principales requerimientos de materiales absorbentes para bolómetros es que tengan una alta absorción en el rango de la radiación IR, una fabricación simple y la compatibilidad con el proceso estándar de fabricación de circuitos integrados basados en silicio. Diversos materiales han sido utilizados como absorbente de radiación IR. Los materiales utilizados para esta aplicación son películas metálicas (Ni, Cr, Au, etc.) donde la absorción de radiación ocurre bajo ciertas condiciones

específicas determinadas por el espesor de la película metálica, o bien utilizando películas metálicas altamente porosas (Pt negro, oro negro, bismuto negro, etc.) [2.20, 2.26].

El método general para mejorar la eficiencia de la absorción de radiación IR en micro-bolómetros es formar una cavidad resonante con la estructura del micro-puente y el sustrato. Ajustando las dimensiones de la cavidad resonante, se puede ajustar la longitud de onda de absorción para tener una mejor respuesta. Por tanto, con el fin de optimizar la absorción en el rango 8-14 μm , se forma una cavidad de un cuarto de longitud de onda depositando una delgada película metálica en la superficie de la capa aislante que sirve como un espejo y la estructura suspendida a una altura de 2.5 μm por encima de la película metálica [2.19].

2.5.1 Película termo-sensible

El rendimiento de los detectores de IR sin enfriar puede ser mejorado a través del desarrollo de materiales altamente sensibles a la radiación infrarroja (materiales con altos valores de TCR), baja resistividad, una efectiva absorción de la radiación IR, un tiempo de respuesta térmico (τ_{th}) rápido, una conductancia térmica alta (G_{th}) lograda con eficientes estructuras de aislamiento térmico y bajo nivel de ruido [2.17]. El material activo utilizado como material termo-sensible del micro-bolómetro debe tener una alta sensibilidad a la temperatura, tener bajos niveles de ruido, y ser compatible con el proceso estándar de fabricación CMOS para una manufacturación de bajo costo e integración con el circuito de control (ROIC).

Los materiales más utilizados como película termo-sensible en micro-bolómetros son: óxido de vanadio (VOx), Itrio-bario-cobre-oxígeno (YBCO) en fase semiconductor [2.27]; películas metálicas tales como titanio, niobio y platino; o semiconductores tal como poly-Si, aleaciones poly-SiGe, además de silicio y germanio en su fase amorfa (a-SiGe) [2.28]. El VOx ha sido el material termo-sensible más estudiado y utilizado para micro-bolómetros sin enfriar, tiene un moderado TCR de 2 %K⁻¹ a 300 K, haciendo de este material una excelente opción para usarlos en sensores de radiación IR a temperatura ambiente. Sin embargo este material presenta algunas desventajas, ya que VOx tiene una transición de fase de semiconductor con absorción de radiación IR a un metal altamente reflejante

alrededor de los 70 °C, con la consecuente caída en su resistencia eléctrica. Más aún, depositar la fase deseada de este material es un reto debido a lo estrecho en la estabilidad de su rango de óxidos [2.29]. Películas de YBCO han alcanzado un TCR alto ($\sim -3 \text{ \%K}^{-1}$), pero YBCO y VOx no son compatibles con el proceso estándar CMOS, por tanto resultan en altos costos de manufactura y en mayor número de pasos de fabricación para su integración con el proceso CMOS. Películas metálicas delgadas utilizadas como material termo-sensible tienen valores de TCR bajos, lo que resulta en micro-bolómetros con baja respuesta. Pero lo atractivo de su uso es que su resistencia eléctrica es baja y pueden acoplarse fácilmente al circuito de lectura. En el poly-Si y las aleaciones de Si-Ge, la resistividad debe mantenerse lo suficientemente baja mediante el control del nivel de dopado, pero el depósito de materiales poli-cristalinos requiere el uso de temperaturas iguales o mayores a los 650 °C [2.28].

En los últimos años, han surgido micro-bolómetros basados en semiconductores amorfos. Las ventajas de estos micro-bolómetros son más bien tecnológicas que de rendimiento, ya que estos micro-bolómetros son compatibles con la tecnología de fabricación CMOS, y no es necesario equipo de fabricación adicional. Los semiconductores amorfos son relativamente fáciles de crecer por la técnica de depósito químico en fase vapor asistido por plasma (PECVD) a temperaturas menores o iguales a los 300 °C. La compatibilidad con la integración monolítica del micro-bolómetro y el circuito de control es de gran importancia. Esto es debido al uso de materiales del micro-bolómetro los cuales son completamente compatibles con la tecnología convencional del silicio usando procesos de baja temperatura. En contraste a los materiales poli-cristalinos, los semiconductores amorfos permiten alcanzar altos valores de TCR ($> 2.8 \text{ \%K}^{-1}$) y mantienen la resistividad dentro de un rango de valores útiles (10^4 - $10^8 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$). En la fabricación de micro-bolómetros sin enfriar en un post-proceso compatible con el proceso de fabricación CMOS, es necesario utilizar procesos a bajas temperaturas. Empleando depósito químico en fase vapor asistido por plasma (PECVD) es posible crecer películas delgadas a temperaturas relativamente bajas (100-350 °C) [2.30, 2.31]. El silicio amorfo es un material apto para la detección de radiación del rango espectral UV-visible y cercano infrarrojo. Micro-bolómetros basados en películas de silicio amorfo han sido desarrollados para aplicaciones de sensado y en la detección de imágenes en el rango del infrarrojo. El costo en su fabricación es bajo porque

se usan procesos de fabricación compatibles con la tecnología del silicio. Los micro-bolómetros basados en a-Si:H operan a temperatura ambiente sin la necesidad de ser enfriados.

El silicio amorfo hidrogenado (a-Si:H) depositado por PECVD es muy atractivo para ser utilizado como película termo-sensible en micro-bolómetros sin enfriar debido a su alta energía de activación ($E_a \approx 0.8-1$ eV), un alto TCR ($\alpha(T) \approx 10 \%K^{-1}$) y su compatibilidad con la tecnología de fabricación estándar CMOS. Sin embargo, tienen también muy alta resistividad ($\sim 10^9 \Omega \cdot cm$), que resulta en desacoplamiento con la impedancia de entrada de los circuitos de lectura, además que sensores basados en silicio amorfo sufren de altos niveles de ruido $1/f$.

A mediados de la década de 1990, se desarrolló la tecnología del silicio amorfo en varios países alrededor del mundo, pero el trabajo más importante se dio en los Estados Unidos y en Francia [1.2-1.4]. Durante este tiempo, la gran ventaja de usar silicio amorfo fue que su depósito se puede hacer en un proceso compatible con el silicio. En la actualidad la integración a gran escala, la reducción en las dimensiones de los detectores combinado con el micro-maquinado superficial ha sido utilizado para fabricar grandes arreglos bidimensionales de sensores IR sin enfriar. Esto permite la fabricación de sistemas de detección de imagen térmica sin enfriar de alta calidad (alta definición) y de bajo costo.

2.5.2 Silicio polimorfo (pm-Si:H)

Se ha mostrado que variando las condiciones de depósito por PECVD de semiconductores amorfos hidrogenados, es posible producir nano-cristales embebidos en la red amorfa. Tales materiales son conocidos como semiconductores polimorfos [2.32-2.34].

Cuando las condiciones de depósito por PECVD del a-Si:H son modificadas usando SiH_4 con alta dilución de hidrógeno (H_2) y mayor presión en la cámara de depósito, se obtiene un tipo de película delgada de silicio conocido como silicio polimorfo hidrogenado (pm-Si:H), el cual básicamente es a-Si:H con nanocristales embebidos en la matriz amorfa. La presencia de los nanocristales dentro de la matriz amorfa se puede apreciar en la figura 2.8. El tamaño de los cristales embebidos en la matriz amorfa están en el rango de 3-5 nm, y la

fracción cristalina es $< 10\%$. El pm-Si:H tiene mayor estabilidad a la radiación y mejores propiedades de conductividad eléctrica con respecto al a-Si:H [2.35].

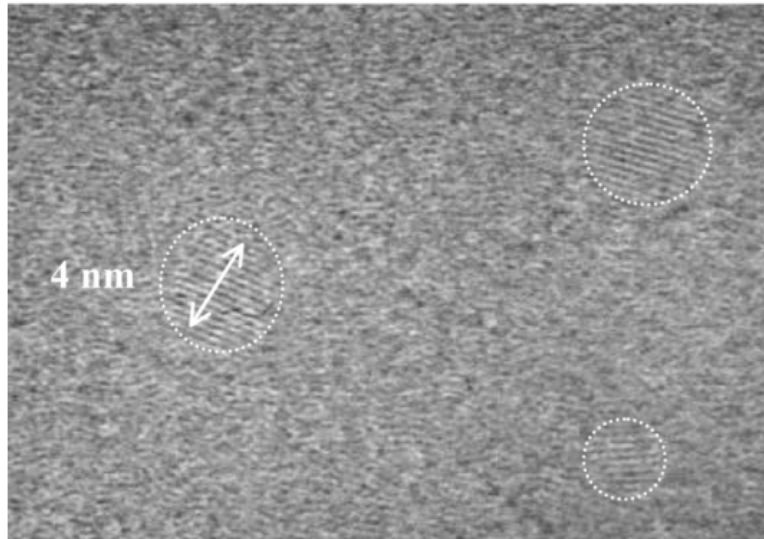


Figura 2.8. Imagen de HRTEM de una película de silicio polimorfo de 10 nm de espesor en la cual se puede distinguir las partículas de silicio nanocristalino [2.36].

La naturaleza heterogénea de la micro-estructura no tiene efectos negativos en las propiedades electrónicas y de transporte de estas películas respecto a las de a-Si:H. Estas propiedades sugieren al silicio polimorfo como una excelente alternativa al silicio amorfo [2.28]. La presencia de los nano-cristales tiene impacto en las propiedades del material relajando la red amorfa, reduciendo la densidad de estados y mejorando las propiedades de transporte y estabilidad del material [2.37]. Es importante notar que el pm-Si:H intrínseco aun conserva las características de a-Si:H, tal como una banda prohibida directa ($\sim 1.6\text{-}1.8$ eV), una energía de activación grande (E_a) de alrededor de 0.8 eV y TCR de hasta $10\%K^{-1}$, que son valores por encima de los reportados en la literatura para materiales utilizados como películas termo-sensibles en micro-bolómetros.

2.6 Figuras de mérito de los micro-bolómetros

La capacitancia, conductancia; y por tanto, la respuesta térmica del dispositivo son características inherentes a la conducción de calor por parte de la estructura de aislamiento

térmico que consiste a los micro-bolómetros. La representación general de un micro-bolómetro y de cualquier dispositivo de detección térmica se muestra en la figura 2.9.

El micro-bolómetro tiene una capacitancia térmica, C_{th} , que está acoplada al sustrato el cual es un disipador de calor por una conductancia térmica, G_{th} , que tiene una trayectoria hacia el sustrato por los brazos de suspensión y los postes de anclaje.

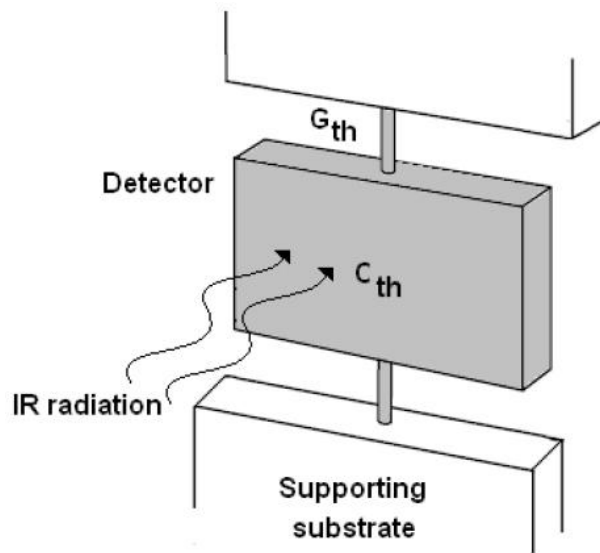


Figura 2.9 Representación básica de un micro-bolómetro sin enfriar [2.30].

Cuando al micro-bolómetro se hace incidir radiación IR modulada, el aumento en la temperatura tiene que ser resuelto por una ecuación de balance, esta está representada en la ecuación (2.1)

$$C_{th} \frac{d(\Delta T)}{dt} + G_{th}(\Delta T) = \eta \beta A_{cell} P_0 \exp(j\omega t) \quad (2.1)$$

donde C_{th} [JK^{-1}] es la capacitancia térmica de la estructura de soporte que sostiene a la película termo-sensible, G_{th} [WK^{-1}] la conductancia térmica de los brazos de suspensión y los postes de anclaje que es la principal vía por donde se pierde calor. ΔT es la diferencia de temperatura de la película termo-sensible y el sustrato, A_{cell} el área del detector, β el factor

de llenado, η el coeficiente de absorción óptica que es la fracción de la potencia óptica incidiendo en el área termo-sensible que es absorbida. P_0 es la intensidad de la radiación IR modulada, ω la frecuencia angular de modulación y t el tiempo. La solución a la ecuación de balance es dada en la ecuación 2.2:

$$\Delta T = \frac{\eta\beta A_{cell}P_0}{G(1+\omega^2\tau_{th}^2)^{1/2}} \quad (2.2)$$

donde, τ_{th} [s] es la respuesta térmica del dispositivo, y se define como la razón entre C_{th} y G_{th} , en la ecuación 2.3:

$$\tau_{th} = \frac{C_{th}}{G_{th}} \quad (2.3)$$

Valores típicos de la constante de tiempo térmica están en el rango de milisegundos, que son mucho mayores que el típico tiempo de respuesta de los detectores de fotones.

Para radiación IR incidente no modulada, la ecuación (2.1) se reduce a la ecuación (2.4):

$$\Delta T(\omega = 0) = \frac{\eta\beta A_{cell}P_0}{G_{th}} \quad (2.4)$$

De esta última ecuación se muestra que la variación de temperatura es inversamente proporcional a la conductancia térmica de los brazos de suspensión y los postes de anclaje. Así que con la finalidad de alcanzar un alto rendimiento del dispositivo ΔT debe ser lo suficientemente grande y G_{th} tan pequeño como sea posible. Esto puede lograrse haciendo los brazos y postes de anclaje lo suficientemente delgados tanto como el proceso de fabricación lo permita.

La respuesta, \mathfrak{R} , se define como la razón de la señal de salida entre la potencia óptica incidente en el micro-bolómetro. La señal de salida es una señal eléctrica que puede ser corriente o voltaje según sea polarizado el dispositivo. \mathfrak{R} se puede expresar en Volts/Watt (respuesta de voltaje, \mathfrak{R}_V) o Amperes/Watt (respuesta de corriente, \mathfrak{R}_I). La respuesta es dada por las siguientes ecuaciones

$$\mathfrak{R}_V = \frac{\eta\beta I_b \alpha R_{cell}}{G_{th}(1+\omega^2\tau_{th}^2)^{1/2}} \quad (2.5)$$

$$\mathfrak{R}_V = \frac{\eta\beta I_b \alpha R_{cell}}{G_{th}} \quad (2.6)$$

Donde (2.5) es la respuesta para radiación IR modulada y (2.6) es para radiación IR sin modular. Cuando el micro-bolómetro es excitado por voltaje, las ecuaciones (2.5) y (2.6) cambian por las ecuaciones (2.7) y (2.8).

$$\mathfrak{R}_I = \frac{\eta\beta V_b \alpha}{G_{th} R_{cell}(1+\omega^2\tau_{th}^2)^{1/2}} \quad (2.7)$$

$$\mathfrak{R}_I = \frac{\eta\beta \alpha V_b}{G_{th} R_{cell}} \quad (2.8)$$

2.7 Ruido en micro-bolómetros

El ruido es uno de los problemas más grandes que afectan a los sistemas electrónicos. En micro-bolómetros hay 4 fuentes principales de ruido. Estas fuentes de ruido son el ruido johnson, $1/f$ (flicker), por fluctuación de temperatura y fluctuación en la temperatura del medio (background fluctuation noise). Estos tipos de ruido no están correlacionados y se describen brevemente a continuación:

2.7.1 Ruido johnson

El componente de ruido johnson, V_j es descrito por la ecuación (2.9), donde T_{cell} es la temperatura del micro-bolómetro, R_{cell} la resistencia del micro-bolómetro y Δf el ancho de banda del tiempo de integración.

$$V_j = (4kT_{cell}R_{cell}\Delta f)^{1/2} \quad (2.9)$$

2.7.2 Ruido 1/f

Este ruido es caracterizado por un espectro que depende de forma inversa con la frecuencia. Este ruido es descrito por la ecuación (2.10), donde V es el producto de la corriente de excitación y la resistencia eléctrica del micro-bolómetro ($V = I_b \cdot R_{cell}$), f es la frecuencia a la cual el ruido es medido, y n un parámetro de ruido $1/f$ el cual depende del material del detector.

$$V_{1/f} = \left(\frac{V^2 n}{f}\right)^{1/2} \quad (2.10)$$

Este ruido es dominante a bajas frecuencias y cae debajo del ruido johnson a frecuencias mayores.

2.7.3 Ruido por fluctuación de temperatura

Un detector térmico que está en contacto con su ambiente (por conducción y radiación), exhibe fluctuaciones aleatorias de temperatura, ya que el intercambio de calor con sus alrededores tiene una naturaleza estadística. Esto se conoce como ruido por fluctuación de temperatura.

El ruido de voltaje RMS por fluctuación de temperatura es descrito por la siguiente ecuación.

$$\overline{V_{TF}^2} = \frac{4kT_{cell}^2\Delta f}{G_{th}(1+\omega^2\tau_{th}^2)} V^2 \alpha^2 \quad (2.11)$$

2.7.4 Ruido por fluctuación de temperatura del medio (Background fluctuation noise)

Cuando el intercambio de calor por conducción entre el detector y sus alrededores es despreciable, en comparación con el intercambio por radiación, el ruido por fluctuación de temperatura se identifica como ruido por fluctuación de temperatura del medio.

El voltaje RMS de ruido por fluctuación de temperatura del medio es dado por la ecuación (2.12), donde T_{cell} es la temperatura del micro-bolómetro y T_B es la temperatura del medio donde se encuentra el micro-bolómetro.

$$\overline{V_{BF}^2} = 8A_{cell}\eta\sigma k(T_{cell}^5 + T_B^5)R_{cell}^2 \quad (2.12)$$

Finalmente, como cada fuente de ruido que afecta el rendimiento de los micro-bolómetros no están correlacionados, el ruido de voltaje total es obtenido sumando las 4 contribuciones de ruido

$$\overline{V_N^2} = \overline{V_J^2} + \overline{V_{1/f}^2} + \overline{V_{TF}^2} + \overline{V_{BF}^2} \quad (2.13)$$

El ruido total obtenido en la ecuación (2.13) es el ruido de voltaje RMS. Para obtener el ruido de corriente, es posible dividir el ruido de voltaje por la resistencia del bolómetro.

$$\overline{I_N^2} = \frac{\overline{V_N^2}}{R_{cell}} = \frac{\overline{V_J^2}}{R_{cell}} + \frac{\overline{V_{1/f}^2}}{R_{cell}} + \frac{\overline{V_{TF}^2}}{R_{cell}} + \frac{\overline{V_{BF}^2}}{R_{cell}} \quad (2.14)$$

2.8 Detectividad D^*

La detectividad D^* [$\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$] es una figura de mérito comparativa para todo tipo de detectores, y está normalizada por unidad de área y por unidad de frecuencia. La detectividad se define como la razón de la señal de salida a la razón de ruido por unidad de potencia óptica radiante incidiendo en el detector medido en un ancho de banda de 1 Hz. En otras palabras, D^* es la razón señal-ruido normalizada en el detector y su comportamiento se describe en la siguiente ecuación:

$$D^* = \frac{\Re_V(A_{cell}\Delta f)^{1/2}}{V_N} \quad (2.15)$$

Donde \Re_V es la respuesta de voltaje, A_{cell} el área del micro-bolómetro, Δf es el ancho de banda de frecuencia y V_N es la contribución del ruido descrito anteriormente. Es claro que para obtener una alta detectividad, es necesario alcanzar una alta respuesta y bajo ruido tanto como sea posible.

2.9 Diferencia de temperatura equivalente al ruido (NETD)

Se define como el cambio en la temperatura de un cuerpo negro que causa un cambio en la razón señal-ruido igual a la unidad en la salida eléctrica del micro-bolómetro. Las ecuaciones (2.16) y (2.17) describen el comportamiento de esta figura de mérito para los detectores que son excitados por corriente y voltaje respectivamente

$$NETD = \frac{(4(f/D)^2 + 1)V_N}{\tau_0 A_{cell} \Re_V(\Delta P/\Delta T)_{\lambda_1 - \lambda_2}} \quad (2.16)$$

$$NETD = \frac{(4(f/D)^2+1)I_N}{\tau_0 A_{cell} \mathfrak{R}_I (\Delta P/\Delta T)_{\lambda_1-\lambda_2}} \quad (2.17)$$

En las expresiones de NETD, f es la longitud focal y D el diámetro de entrada del sistema óptico, \mathfrak{R}_V y \mathfrak{R}_I la respuesta de voltaje y corriente respectivamente, A_{cell} el área del detector, V_N e I_N el ruido total del sistema, τ_0 es la transmitancia del sistema óptico. $(\Delta P/\Delta T)_{\lambda_1-\lambda_2}$ es una función de cuerpo negro, la cual da el cambio en potencia por unidad de área radiado por un cuerpo negro a una temperatura T , con respecto a T , medido dentro de la banda espectral de λ_1 a λ_2 .

El ruido en los micro-bolómetros es inherente a su naturaleza física, es decir, depende de las características de los materiales con los que se fabrican, en especial de la película termo-sensible. El ruido no se puede evitar en su totalidad, sólo se puede reducir el efecto que este tiene en el rendimiento del micro-bolómetro. Como puede verse en las ecuaciones (2.10)-(2.17), reduciendo la resistencia del micro-bolómetro se disminuye la aportación de ruido, esto se puede lograr con materiales con baja resistividad como los metales, pero estos tienen bajo TCR. En nuestro caso hay un compromiso entre un TCR alto, pero también una alta resistividad con los semiconductores amorfos. El problema con micro-bolómetros que presentan un ruido moderadamente alto puede ser compensado con el circuito integrado de lectura, ya que existen diversas configuraciones que pueden adaptarse según las necesidades. Entre las que mayor aplicación tiene son sistemas que compensan la variación de temperatura y variaciones en la resistencia de los micro-bolómetros que componen el arreglo.

Como vemos de las ecuaciones anteriores, para incrementar el rendimiento de los micro-bolómetros es necesario mejorar ciertos aspectos desde el diseño del dispositivo y los materiales empleados en la fabricación. Se busca que los micro-bolómetros sean dispositivos que tengan una resistencia eléctrica lo suficientemente baja, mejorando así la respuesta ante el ruido. Además, optimizando el diseño de la estructura de soporte se puede obtener el uso eficiente del área del dispositivo, es decir, un factor de llenado lo suficientemente grande y disminuir las pérdidas de calor. En general esto hace posible incrementar las figuras de mérito.

Referencias

- [2.1] A. D. Ryer, "The Light Measurement Handbook", International Light, pp. 5-8, 1997.
- [2.2] Theodor L. Bergman, Adrienne S. Lavine, Frank P. Incropera, David P. Dewitt, INTRODUCTION TO HEAT TRANSFER, Sixth edition, John Wiley & Sons, Inc., 748-751, 2002
- [2.3] <http://www.sensorsinc.com/U2Power.html>
- [2.4] Syllaios A.J., Schimert T.R, Gooch R.W., McCardel W.L., Ritchey B.A, Tregilas J.H., Amorphous silicon microbolometer technology, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 609, A14.4.1-A14.4.6, 2000.
- [2.5] A. Rogalski. Infrared detectors. Boca Raton, CRC Press, 2011
- [2.6] D. Würfel, M. Ruß, R. Lerch, D. Weiler, P. Yang, H. Vogt. An uncooled VGA-IRFPA with novel readout architecture. Adv. Radio Sci., 9, 107-110, 2011
- [2.7] Rogalski A., History of infrared detectors, Optoelectronics review, Vol. 20, No. 3, 297-308, 2012.
- [2.8] C. M. Hanson, H. R. Beratan, D.L. Arbuthnot. Uncooled Thermal Imaging with Thin-Film Ferroelectric Detectors. Infrared Technology and Applications XXXIV, Proc. of SPIE, 6940, 2008
- [2.9] Sharma UC, M. Tech Credit Seminar Report, Electronic Group, EE Dept. IIT Bombay, Infrared detectors, 2004.
- [2.10] Jahanzeb A., Travers A. M., Çelik-Butler Z., Butler D. P. and Tan S. G., A semiconductor YBaCuO microbolometer room temperature IR imaging, IEEE transactions on electron devices, Vol. 44, No. 10, 1795-1801, 1997.
- [2.11] Eminoglu S., Tezcan D. S., M Y. Tanrikulu, Akin T., Low-cost uncooled infrared detectors in CMOS Process, Sensors and actuators A, No 109, 102-113, 203.

- [2.12] Xing-Ming Liu, Hua-Jun Fang, Li-Tian Liu, Study on new structure uncooled a-Si microbolometer for infrared detection, *Microelectronics journal*, No. 38, 735-739, 2007.
- [2.13] Kruse W. P., *Uncooled thermal imaging arrays: systems and applications*, SPIE PRESS, Tutorial text in optical engineering, Volume TT51.
- [2.14] Mottin E., Bain A., Martin J.L., Ouvrier-Buffet J.L., Bisotto S., Yon J.J., Tissot J.L., Uncooled amorphous silicon technology enhancement for 25 μ m pixel pitch achievement, *Infrared Technology and applications XXVIII*, SPIE Vol.4820, 2002.
- [2.15] Mottin E., Bain A., Martin J.L., Ouvrier-Buffet J.L., Bisotto S., Yon J.J., Tissot J.L., Uncooled amorphous silicon technology enhancement for 25 μ m pixel pitch achievement, *Infrared Technology and applications XXVIII*, SPIE Vol.4820, 2002.
- [2.16] Syllaios A.J., Schimert T.R., Gooch R.W., McCardel W.L., Ritchey B.A., Tregilas J.H., Amorphous silicon microbolometer technology, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* Vol. 609, A14.4.1-A14.4.6, 2000.
- [2.17] Xu X., Yang Z., Wang Z., Chen C., Zhou D., Yang Y. and Jiang Y., Advanced design of microbolometers for uncooled infrared detectors, *International Conference on Information Science and Technology*, Nanjing, Jiangsu, China, 745-747, March 2011.
- [2.18] Xing-Ming Liu, Hua-Jun Fang, Li-Tian Liu, Study on new structure uncooled a-Si microbolometer for infrared detection, *Microelectron. J.* 38, 735-739, 2007.
- [2.19] B. Fiéque, J.L. Tissot, C. Trouilleau, A. Crastes, O. Legras, Uncooled microbolometer detector: Recent developments at Ulis, *Infrared Phys. & Tech.* 49, 187–191, 2007
- [2.20] Lang W., Absorbing layers for thermal infrared detectors, *Transducers 91*, *International Conference on Solid-State Sensors and Actuators*, 635-638, 1991.
- [2.21] Hirota M., Infrared sensors with precisely patterned Au-black absorption layer, *SPIE Proc.* Vol. 3436, 623-634, 1998.

- [2.22] Kennedy C. E., Review of mid- to high-temperature solar selective absorber materials, Technical report, National Renewable Energy Laboratory, July 2002.
- [2.23] Osawa M., Surface-enhanced infrared absorption, Catalysis Research Center, Hokkaido University, 2001.
- [2.24] Darling R. B. and Iwanaga S., Structure, properties, and MEMS and microelectronic applications of vanadium oxides, *Sādhanā*, Vol. 34, Part 4, 531-542, 2009.
- [2.25] Kivaisi R.T. and Stensland L., Spectral selectivity of nickel and chromium rough surfaces, *Appl. Phys. A*, 27, 233-238, 1982.
- [2.26] Lang W., Absorbing layers for thermal infrared detectors, *Sensors and Actuators A*, Vol. 34, 243-248, 1992.
- [2.27] Jahanzeb A., Travers A. M., Çelik-Butler Z., Butler D. P. and Tan S. G., A semiconductor YBaCuO microbolometer room temperature IR imaging, *IEEE transactions on electron devices*, Vol. 44, No. 10, 1795-1801, 1997.
- [2.28] Syllaios A.J., Schimert T.R, Gooch R.W., McCardel W.L., Ritchey B.A, Tregilas J.H., Amorphous silicon microbolometer technology, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* Vol. 609, A14.4.1-A14.4.6, 2000.
- [2.29] Darling R. B. and Iwanaga S., Structure, properties, and MEMS and microelectronic applications of vanadium oxides, *Sādhanā*, Vol. 34, Part 4, 531-542, 2009.
- [2.30] Moreno M., Study or IR un-cooled micro-bolometer arrays based on thin films deposited by plasma, *Tesis de Doctorado*, INAOE, 2008.
- [2.31] Ambrosio R., Research on fabrication processes for un-cooled micro-bolometer based on plasma deposited films, *Tesis de Doctorado*, INAOE, 2005.
- [2.32] Y.M. Soro, A. Abramov, M.E. Gueunier-Farret, E.V. Johnson, C. Longeaud, P. Roca i Cabarrocas, J.P. Kleider, Device grade hydrogenated polymorphous silicon deposited at high rates, *J. of Non-Crystalline Solids* 354, 2092–2095, 2008.

- [2.33] L. Boufendi, M. Ch. Jouanny, E. Kovacevic, J. Berndt and M. Mikikian, Dusty plasma for nanotechnology, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 44, 2011.
- [2.34] P. Roca i Cabarrocas, R. Cariou, M. Labrune, Low temperature plasma deposition of silicon thin films: From amorphous to crystalline, *J. of Non-Crystalline Solids* 358, 2000–2003, 2012.
- [2.35] Butté R., Vignoli S., Meaudre M., Meaudre R., Marty O., Saviot L. Roca i Cabarrocas P., Structural, optical and electronic properties of hydrogenated polymorphous silicon films deposited at 150°C, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 266-269, 2000, 263-268.
- [2.36] Roca i Cabarrocas P., Fontcuberta i Morral A., Poissant Y., Growth and optoelectronic properties of polymorphous silicon thin films, *Thin Solid Films*, 403-404, 39-46, 2002.
- [2.39] Moreno M., Kosarev A., Torres A., Ambrosio R., Microbolometers fabricated with surface micromachining with a-Si-Ge:H thermo-sensing films, *International Journal of High Speed Electronics and systems*, Vol. 18, No. 4, 1045-1054, 2008.

Capítulo 3. Diseño de los micro-bolómetros y proceso de fabricación

En la primera parte de este capítulo se describe el diseño de las estructuras para la fabricación de los micro-bolómetros, mientras que en la segunda parte, se describe el proceso de fabricación que se ajusta para su compatibilidad con el proceso de fabricación CMOS.

3.1 Diseño de los micro-bolómetros

Anteriormente se han fabricado y caracterizado micro-bolómetros en el laboratorio de microelectrónica del INAOE. Ya existe un proceso de fabricación de dichos dispositivos que ya está caracterizado, y el cual es compatible con el proceso estándar de fabricación CMOS. Este proceso lo tomamos como referencia tanto para diseñar la estructura de los micro-bolómetros, como para ajustar el proceso de fabricación a nuestras necesidades. De los trabajos anteriores realizados en el laboratorio de microelectrónica del INAOE [3.1-3.4], se han obtenido diferentes configuraciones de dispositivos y también se han utilizado diferentes dimensiones. Los diseños realizados en trabajos anteriores, han tenido que ajustarse a la dimensión mínima que permite resolver el proceso de fabricación CMOS en el laboratorio de microelectrónica del INAOE, que en principio es de $10\mu\text{m}$. Ya se han realizado esfuerzos para poder definir menores dimensiones, sobre todo en el proceso de litografía y en la elaboración de mascarillas del proceso de fabricación, llegando a resolver dimensiones de hasta $3\mu\text{m}$ [3.5]. Dentro del trabajo que se ha realizado en la fabricación de micro-bolómetros sin enfriar, se ha logrado obtener dispositivos con áreas de hasta $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ [3.4, 3.6]. En nuestro diseño, una de nuestras metas es reducir el área de los micro-bolómetros hasta $25 \times 25 \mu\text{m}^2$, es decir, la reducción del área será hasta una cuarta parte;

una idea de la reducción en las dimensiones la complementa la figura 3.1. El diseño que se plantea tendrá un impacto en las figuras de mérito de los dispositivos.

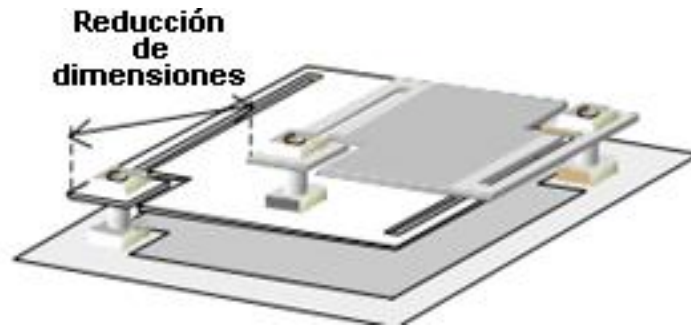


Figura 3.1 Reducción de las dimensiones de un micro-bolómetro.

La estructura del micro-bolómetro con dimensiones reducidas nos permitirá tener ventajas en su rendimiento, como es la reducción de la resistencia del micro-bolómetro, menor masa térmica, mejor aislamiento térmico, lo que impactará en mejorar las figuras de mérito [3.7]. Además con dispositivos de área reducida se puede tener un consumo eficiente del área del sustrato con la posibilidad de que a futuro se pueda diseñar y fabricar arreglos numerosos de pixeles para captación de imágenes térmicas con muy alta resolución. Lograr micro-bolómetros con mejores figuras de mérito y menor resistencia de dispositivo facilitará el diseño del circuito de lectura y control. El diseño de las estructuras de los micro-bolómetros consiste en determinar la forma y dimensiones de la membrana suspendida, los brazos de suspensión y postes de anclaje, mediante el diseño y variación de estas dimensiones. El diseño comienza a partir de dispositivos que han sido fabricados anteriormente en el laboratorio de microelectrónica del INAOE y que ha mostrado tener un alto rendimiento estructural, y buena respuesta a la radiación IR. De las diferentes estructuras que se han obtenido, las que tienen el mejor rendimiento son: micro-bolómetros que tienen brazos de suspensión de la membrana suspendida en forma de barra (tipo-I), y micro-bolómetros con brazos de suspensión más largos en forma de escuadra (tipo-L). En el caso de los micro-bolómetros con los brazos de suspensión tipo-I, se tienen dos longitudes diferentes de los brazos de suspensión, brazos largos y cortos. La configuración del diseño de los tres tipos de micro-bolómetros se muestran en la figura 3.2.

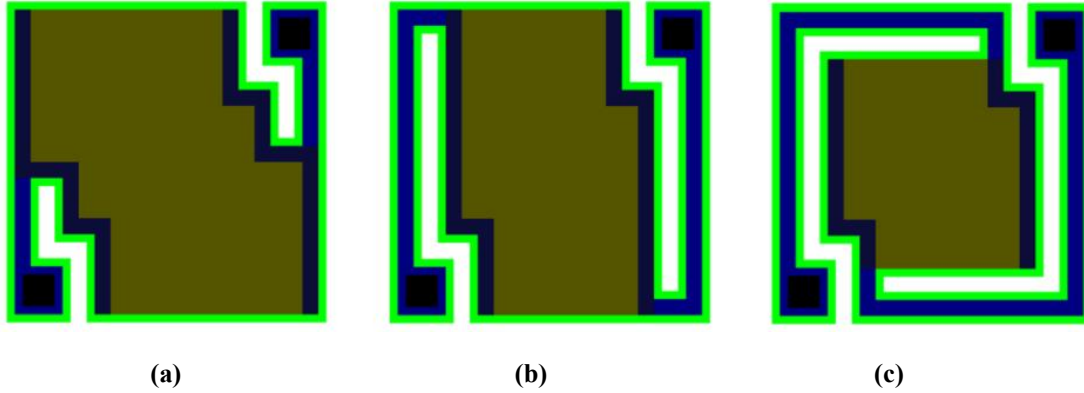


Figura 3.2 Estructuras de diseño (a) y (b) son micro-bolómetros tipo-I de brazo corto y largo respectivamente, (c) micro-bolómetro tipo-L.

Para lograr la meta de diseñar los micro-bolómetros con áreas de $25 \times 25 \mu\text{m}^2$, se determinó mediante el ajuste de las estructuras del dispositivo, que la dimensión mínima ideal es de $1 \mu\text{m}$. El uso de esta dimensión, hace complicado realizar el proceso de fabricación en el laboratorio de microelectrónica. Esto da lugar a que el proceso de fabricación se realice en el Laboratorio de Innovación en MEMS (LI-MEMS), donde se cuenta con el equipo adecuado para definir dimensiones de hasta $0.8 \mu\text{m}$. El diseño de los micro-bolómetros se realizó usando como dimensión mínima $1 \mu\text{m}$ y $2 \mu\text{m}$. El diseño realizado derivó en las estructuras mostradas en las figuras 3.3, 3.4 y 3.5. Para cada estructura de micro-bolómetro se diseñan tres diferentes tamaños; $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ con electrodos de $3 \mu\text{m}$ de espesor, $30 \times 30 \mu\text{m}^2$ con electrodos de $2 \mu\text{m}$ de espesor, y $25 \times 25 \mu\text{m}^2$ con electrodos de $1 \mu\text{m}$ de espesor.

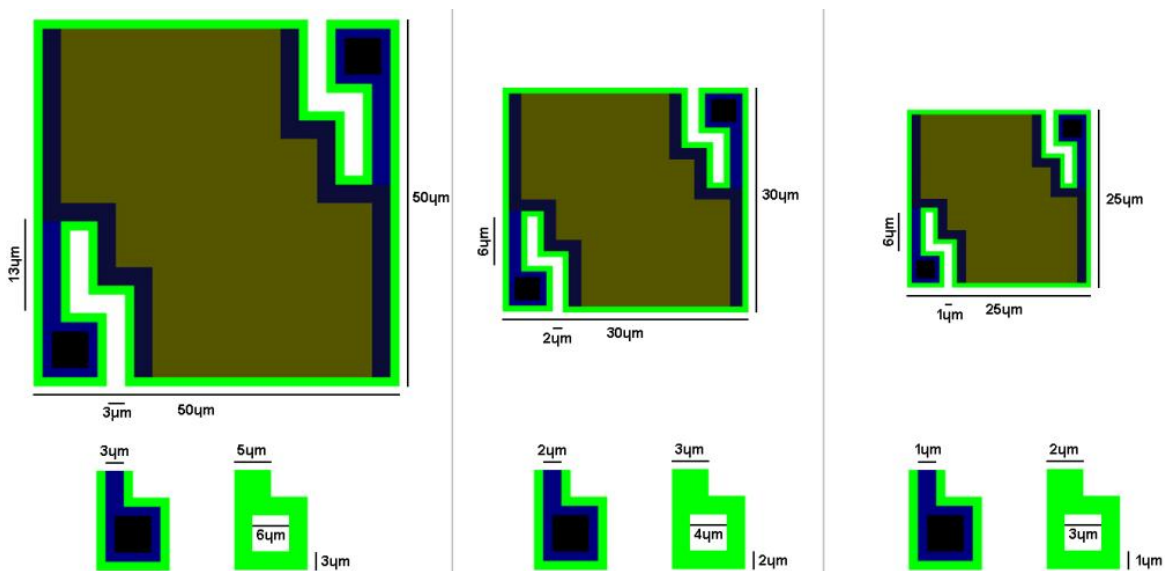


Figura 3.3 Micro-bolómetro tipo-I de brazos de suspensión corto (Tipo-I BC).

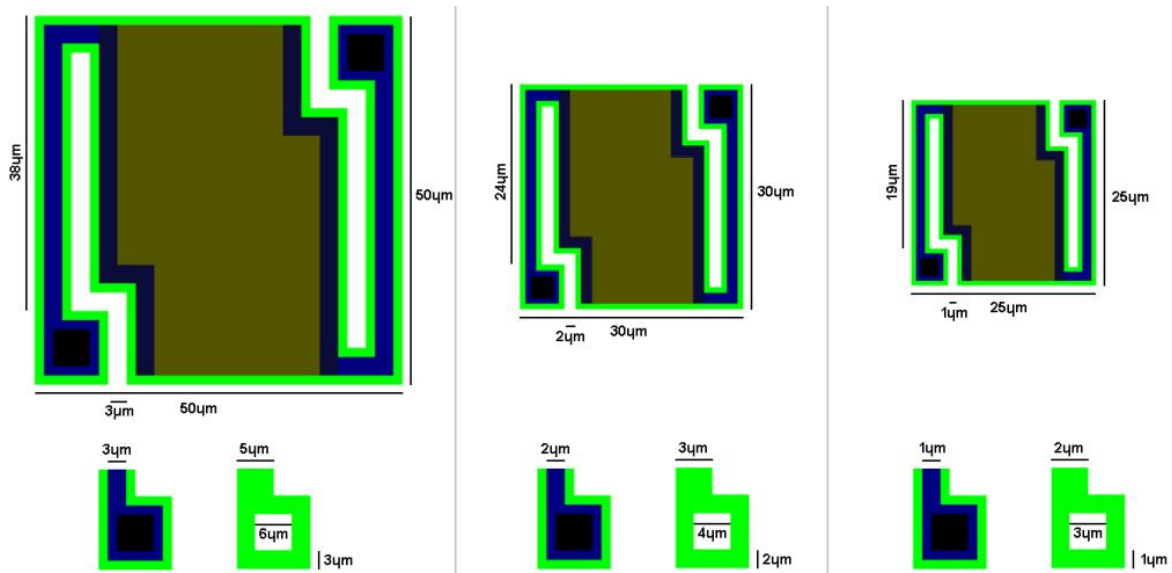


Figura 3.4 Micro-bolómetro tipo-I de brazos de suspensión largos (Tipo-I BL).

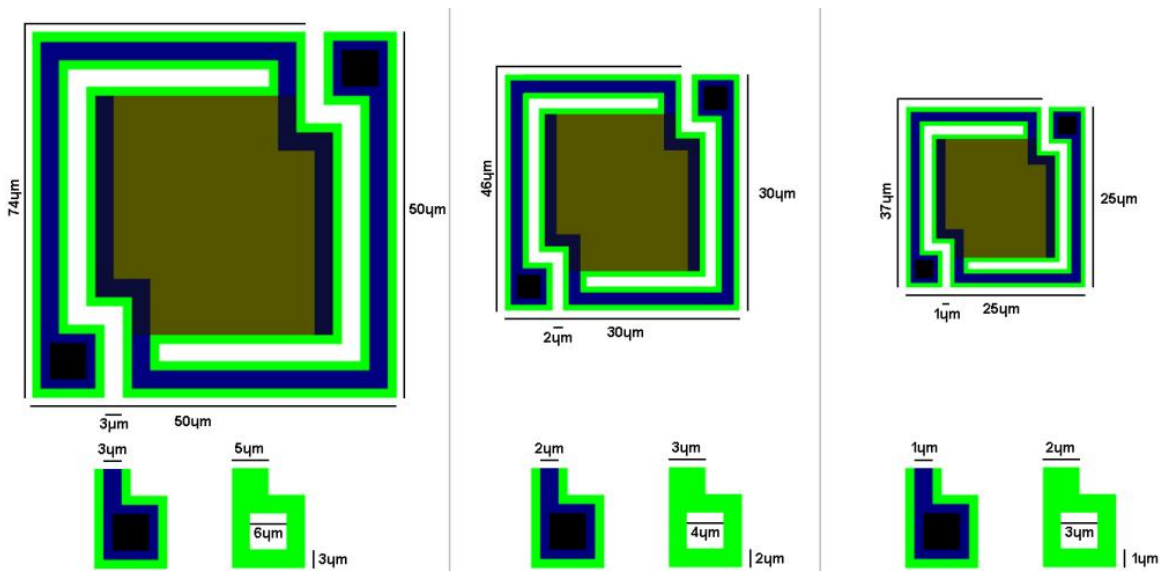


Figura 3.5 Micro-bolómetro tipo-L.

La polarización de los dispositivos se realiza mediante dos electrodos que son definidos en el primer depósito de metal. También se definen unas estructuras que tienen la función de espejo para reflejar la radiación IR no absorbida. Estas estructuras son justo de la forma de la membrana suspendida para cada tipo de micro-bolómetro. Los electrodos de polarización

tienen el tamaño indicado para poder polarizarlo por puntas de medición, y pasa ser alambrados en la etapa de encapsulado. Una representación general de los electrodos se muestra en la figura 3.6.

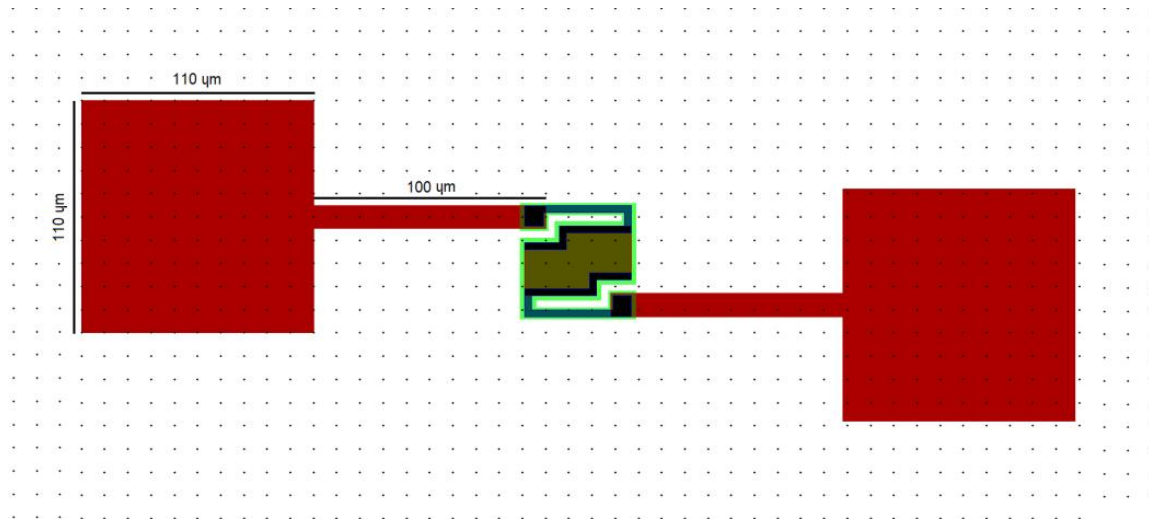


Figura 3.6 electrodos de polarización.

3.1.1 Layout

El layout final consta de tres series diferentes de micro-bolómetros, cada serie consta de las tres estructuras detalladas en la sección previa. Además, los micro-bolómetros fueron repetidos con algunas variaciones en el tamaño de los postes de anclaje (figura 3.7). En la serie R1 están los micro-bolómetros tipo-I con brazos de suspensión cortos (tipo-I BC), la serie R2 consta de los micro-bolómetros tipo-L, y la serie R3 de los micro-bolómetros tipo-I con brazos de suspensión largos (tipo-I BL). Cada serie consta de 14 micro-bolómetros, 7 con área de $25 \times 25 \mu\text{m}^2$ y 7 con área de $30 \times 30 \mu\text{m}^2$. Se incluyeron dos series de micro-bolómetros con las tres estructuras, las cuales constan de ventanas en el área de la membrana suspendida para facilitar el grabado de material de sacrificio.

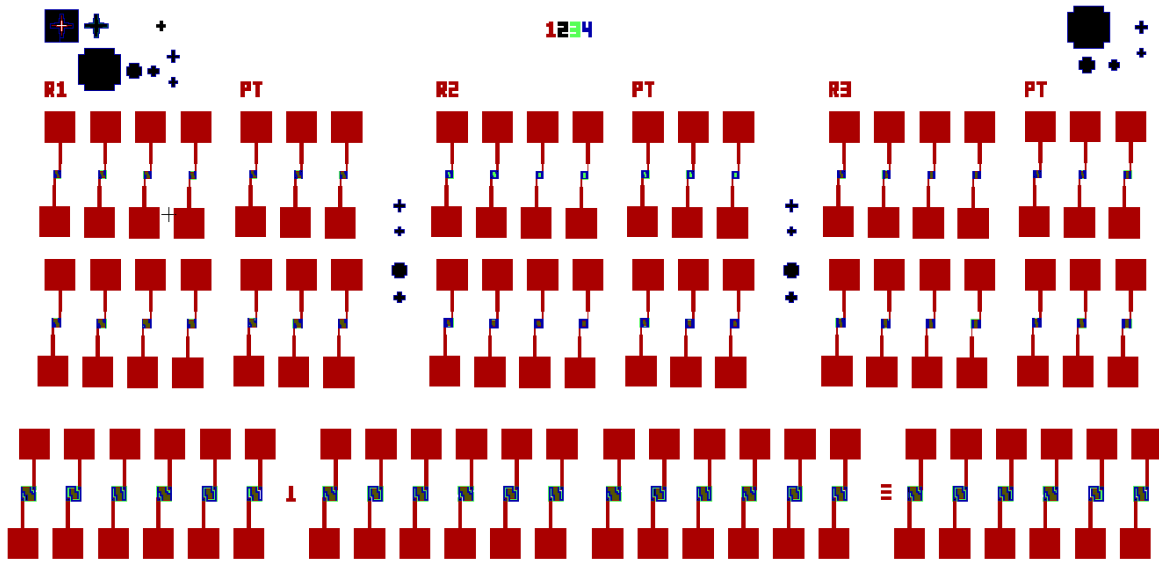


Figura 3.7 Layout para la fabricación de micro-bolómetros.

El layout cuenta con 66 micro-bolómetros en total y ocupa un área de $4 \times 2 \text{ mm}^2$. Cada layout se repitió en 12 columnas por 10 filas en la serie de mascarillas para el proceso de fabricación. El proceso consta de 4 mascarillas de 5 pulgadas que se realizaron en el generador de patrones del laboratorio LI-MEMS del INAOE, en placa de cuarzo y cromo para definir las estructuras de cada mascarilla. El juego de mascarillas para el proceso se describe en la tabla 3.1.

Mascarilla	Campo de definición	Tipo de foto-resina	Paso de proceso
#1 Pads metálicos	Claro	Positiva	Grabado de Ti (grabado húmedo)
#2 Contactos hacia electrodos	Oscuro	Positiva	Grabado de poliamida (grabado seco)
#3 Definición de área termo-sensible	Claro	Positiva	Grabado de pm-Si _x Ge _y :H (grabado seco)
#4 Electrodo de titanio	Claro	Positiva	Electrodos de Ti (grabado húmedo)
	Oscuro	Negativa	Electrodos de Ti (Lift-off)

Tabla 3.1 Mascarillas del proceso de fabricación de micro-bolómetros.

3.2 Proceso de fabricación

En la figura 3.8 se muestra la secuencia del proceso de fabricación de micro-bolómetros, el cual se describe a continuación.

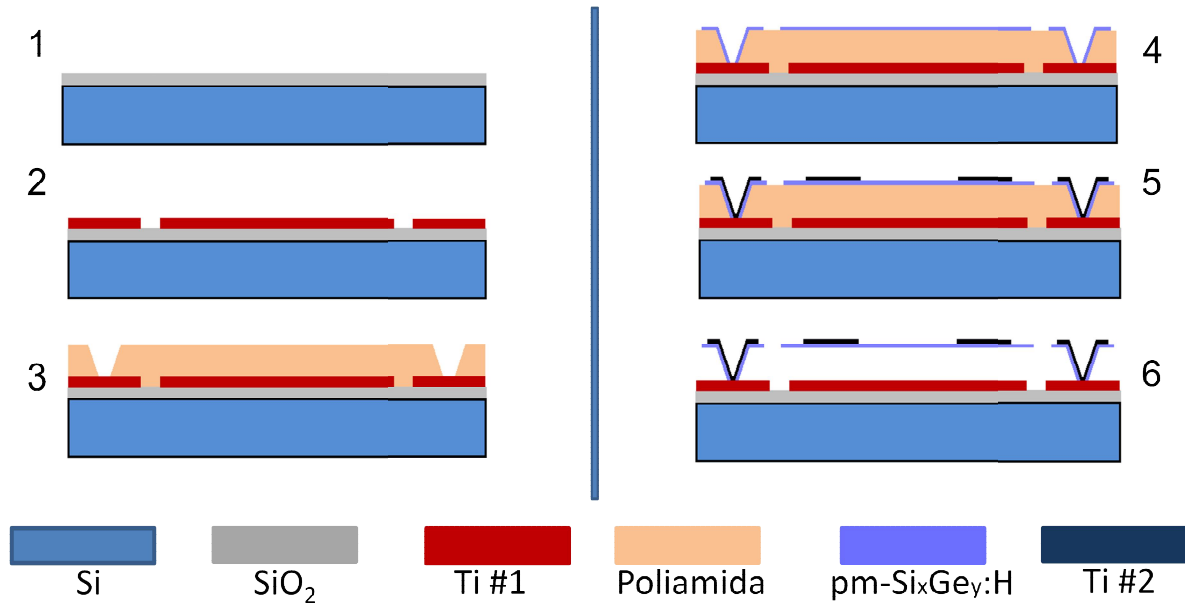


Figura 3.8 Secuencia del proceso de fabricación (1) oxidación inicial, (2) depósito de (titanio) Ti y definición de electrodos de polarización y espejo reflector, (3) depósito de poliamida se abren ventanas hacia electrodos, (4) depósito de pm-Si_xGe_y:H como película termo-sensible, (5) depósito de Ti y definición de electrodos, (6) liberación del micro-bolómetro.

Este proceso de fabricación de micro-bolómetros surge tanto de los procesos que se han realizado en el laboratorio de microelectrónica del INAOE, como de los procesos que se encuentran en el estado del arte. En el laboratorio de microelectrónica del INAOE se han realizado diversos trabajos relacionados a micro-bolómetros, desde materiales con características atractivas para emplearse como material termo-sensible, como procesos de fabricación de micro-bolómetros tanto en configuración planar y de micro-puente. El proceso de fabricación a seguir en este trabajo surgió de un estudio de tales procesos, del diseño de las estructuras de micro-bolómetros en configuración de micro-puente, y las necesidades surgidas durante este trabajo por la innovación de un proceso con dimensiones mínimas de hasta 1 μm y que se ajuste al proceso de fabricación del laboratorio LI-MEMS del INAOE y que se conjugue con algunos procesos complementarios en el laboratorio de microelectrónica.

El proceso de fabricación está proyectado para ser un post proceso de fabricación de CI's CMOS. Por lo tanto, los materiales utilizados y los pasos de proceso deben ser compatibles con el proceso CMOS. El material base son obleas de silicio de 4 pulgadas de diámetro, tipo-p y 500 μm de espesor. A continuación se describe cada paso realizado durante la fabricación.

3.2.1 Oxidación térmica

El primer paso es realizar la oxidación térmica de la oblea, para obtener una superficie plana y no conductora, que aisle tanto eléctrica y térmicamente a los micro-bolómetros con el sustrato (paso1, figura 3.8). En nuestro caso no se tiene aún la electrónica de control en la oblea de silicio, por lo que la oxidación de las obleas es suficiente para poder iniciar la fabricación sobre el SiO_2 , ya que se obtiene una superficie plana para la fabricación de los micro-bolómetros. En un post-proceso de fabricación de micro-bolómetros, al finalizar el proceso de fabricación de CI's que consiste el ROIC, se realiza un planarizado de la superficie mediante pulido químico mecánico (CMP), ya que si esta preparación no se lleva a cabo, se tiene una superficie irregular. Fabricar micro-bolómetros sobre esta superficie irregular puede dar como resultado dispositivos deformes o completamente destruidos, sin ninguna utilidad funcional [3.8].

Se puede obtener la película de SiO_2 por diferentes técnicas, una de las más comunes es la oxidación térmica del silicio, que se realiza en este trabajo ya que no hay una electrónica de control fabricada con anterioridad. La oxidación térmica del silicio requiere de temperaturas mayores de 800 $^{\circ}\text{C}$, que para un post proceso, hace este paso incompatible si ya se ha fabricado el circuito de control en el sustrato de silicio. Una técnica empleada para obtener la capa de SiO_2 a baja temperatura es por depósito químico en fase vapor a presión atmosférica (APCVD) cuya temperatura de depósito es de alrededor de 400 $^{\circ}\text{C}$. Mediante esta técnica de depósito se pueden agregar diversos tipos de dopantes (Boro, fosforo, etc.) para favorecer el reflujo, atrapamiento de iones metálicos y evita el problema de rompimiento de las líneas metálicas de interconexión con el sustrato por diferencias en sus coeficientes térmicos [3.4]. Con esta técnica se pueden obtener altas razones de depósito de SiO_2 con lo que se puede planarizar una superficie con múltiples irregularidades pero si no

se realiza una etapa de reflujo que típicamente es mayor a 800°C la superficie puede seguir siendo lo suficientemente irregular como para dificultar la fabricación de los microbolómetros. También se puede utilizar precursores de óxido líquidos (spin-on glass) para obtener superficies planas, pero para obtener las mejores características deben tener temperaturas de curado mayores a los 400 °C. Se ha realizado trabajos para obtener SiO₂ de buenas características a baja temperatura (200 °C) diluyendo el precursor de óxido en agua desionizada. Se cuenta con suficientes opciones para obtener un óxido planarizado para realizar un post-proceso de fabricación, pero no es nuestro caso y es suficiente realizar una oxidación térmica. La oxidación se realizó en un horno con capacidad para obleas de silicio de hasta 6 pulgadas de diámetro a una temperatura de 900 °C durante 60 minutos. El espesor obtenido es de 1200 nm e índice de refracción de 1.45.

3.2.2 Electrodo de polarización y espejo reflector

En este paso de proceso definimos los electrodos por los que se polariza el microbolómetro, además de un área que se utiliza como espejo reflector para la radiación que no se absorbe totalmente en la película termo-sensible. Se elige titanio (Ti) como material de los electrodos y se empleó la técnica de lift-off para la definición de tales electrodos. Se usó la mascarilla #1 y foto-resina negativa AZ2020, después de la litografía se realizó el depósito de una película de Ti con un espesor de 400 nm por medio de la técnica de evaporación por haz de electrones (sistema e-beam) a una razón de depósito de 10 Å/s. La resina fue eliminada usando la solución Technistrip sumergiendo las obleas y poniendo la solución en vibrador ultrasónico durante 15 minutos (paso 2, figura 3.8).

3.2.3 Depósito de la película de poliamida

En este trabajo se utilizó poliamida como material de sacrificio para la liberación de las estructuras suspendidas sobre el sustrato. En la literatura se encuentran diversos materiales usados como capa de sacrificio, entre los más usados encontramos SiO₂, PSG, aluminio y también poliamida. El uso de poliamida permite que este material sea eliminado en un proceso de grabado seco, mientras que otros materiales requieren que el grabado sea realizado mediante grabado húmedo, lo cual promueve el colapso de las membranas

suspendidas. Aún así, es necesario ser cuidadosos al momento de liberar las estructuras. El uso de poliamida como material de sacrificio ofrece ventajas con respecto a otros materiales para realizar un post-proceso. La temperatura de curado de este tipo de material, puede ajustarse por debajo de los 350 °C y su grabado se puede realizar principalmente en plasma de oxígeno, donde se pueden controlar diversos parámetros como la temperatura. En este trabajo utilizamos precursor de poliamida PI-2610 de la marca HD-MicroSystems. Se aplica el precursor de poliamida sobre la superficie de la oblea colocada horizontalmente en un sistema de centrifugado para esparcir uniformemente y después someterlo al proceso de curado. La velocidad de giro determinará el espesor final de la capa de poliamida. La velocidad de giro se estableció en 2500 RPM durante 30 segundos para obtener una película de poliamida con espesor de 2.5µm. El curado empieza con la evaporación de solventes colocando la oblea de silicio cubierta por el precursor de poliamida en una parrilla a 90 °C durante dos minutos. Posteriormente se coloca la oblea de silicio en otra parrilla a 150 °C durante dos minutos. El curado final se realiza incrementando gradualmente la temperatura de la parrilla hasta llegar a los 350 °C y manteniendo a esta temperatura por 30 minutos. Después, se deja enfriar gradualmente hasta temperatura ambiente. Para abrir ventanas hacia los electrodos de polarización se deposita una película delgada de aluminio (150 nm) como enmascarante de la poliamida. Se usa la mascarilla #2 para definir ventanas usando foto-resina positiva AZ-1505 (paso 3, figura 3.8). El grabado y posterior eliminación de la película delgada de aluminio se realiza con la solución Al-Etch (Acido fosfórico-Acido acético glacial-Acido nítrico – 7-1-1 partes) a 40 °C. El grabado de las ventanas de poliamida se realizó mediante la técnica de grabado por iones reactivo (RIE) en un reactor de placa hexagonal RIE-AME8110. Se generó un plasma de oxígeno a una potencia de 1200 W, flujo de oxígeno de 600 sccm y 900 mTorr de presión. Para asegurar que no haya residuos de poliamida se realiza otro grabado con las mismas condiciones adicionando un flujo de CF₄ a 50 sccm. Este segundo grabado se realizó durante 5 minutos.

3.2.4 Depósito de la película termo-sensible

A diferencia de anteriores procesos de fabricación de micro-bolómetros realizados en el laboratorio de microelectrónica del INAOE donde se utilizan películas delgadas de SiNx

con diferentes características como membrana de soporte y película absorbente, en este proceso se utiliza la película termo-sensible como estructura de auto-soporte y sin película absorbente de radiación IR. En este trabajo, se realizó el depósito y la caracterización de películas de silicio-germanio polimorfo ($\text{pm-Si}_x\text{Ge}_y\text{:H}$) depositadas por la técnica de depósito químico en fase vapor asistido por plasma (PECVD). Estas películas tienen propiedades muy atractivas y mejores características en comparación con los semiconductores amorfos utilizados como material termo-sensible en los detectores de infrarrojos (IR). Para el estudio de las propiedades de las películas de $\text{pm-Si}_x\text{Ge}_y\text{:H}$, se realizaron dos series de depósito en un reactor PECVD de placas paralelas (MVSystem) acoplado capacitivamente a frecuencia estándar (13.56 MHz), la potencia RF aplicada fue de 25 W y la temperatura del sustrato (T_s) fue 200 °C. Los depósitos de las películas de $\text{pm-Si}_x\text{Ge}_y\text{:H}$ se realizaron en diversos tipos de sustratos para realizar la caracterización del material obtenido. Los depósitos se realizaron simultáneamente en Corning Glass 2974, Corning Glass 1737, Corning Glass 2974 con electrodos de titanio, y en sustrato de silicio de alta resistividad para realizar la caracterización eléctrica, estructural y composicional de las películas depositadas. Se ha reportado que para producir nano-cristales embebidos en la matriz amorfa, es necesaria una alta razón de flujo de los gases precursores ($\text{SiH}_4/\text{GeH}_4$) y también alta dilución con hidrógeno (H_2). También es necesario que la presión de la cámara de depósito sea alta (> 600 mTorr) [3.10-3.13]. Estas condiciones de depósito están dirigidas para investigar el efecto tanto de alta razón de flujo de los gases precursores y la presión de la cámara de depósito en las películas resultantes. Las películas de la serie #1 fueron depositadas a presiones de cámara de 500, 1000 y 1200 mTorr, el flujo de los gases precursores fueron de $\text{H}_2 = 110$ sccm, $\text{SiH}_4 = 50$ sccm y $\text{GeH}_4 = 50$ sccm. Las películas de la serie #2 fueron depositadas a presiones de 500, 1000, 1200 y 1400 mTorr; el flujo de los gases precursores fue de $\text{H}_2 = 110$ sccm, $\text{SiH}_4 = 90$ sccm y $\text{GeH}_4 = 10$ sccm. Cabe la mención que el SiH_4 y GeH_4 están diluidos al 10% en H_2 , además, en la serie #1 no se realizó el depósito a presión de 1400 mTorr, debido a que a estas razones de flujo y presión en la cámara de depósito, no se logra el acoplamiento de la fuente de alimentación del sistema para generar el plasma. Las condiciones utilizadas para depositarlas dos series de $\text{pm-Si}_x\text{Ge}_y\text{:H}$ se resumen en la Tabla 3.2.

Las películas obtenidas mostraron tener propiedades atractivas para usarse como material termo-sensible en micro-bolómetros, con valores de $E_a = 0.71$ y $TCR = 9.1 \%K^{-1}$, que son valores muy altos y que no se ha reportado para usarse en dispositivos de detección de infrarrojo.

	Número de muestra	Temperatura °C	Presión mTorr	SiH ₄ sccm	GeH ₄ sccm	H ₂ sccm
Serie #1	P11	200°C	500	50	50	110
	P12		1000			
	P13		1200			
Serie #2	P21		500	90	10	110
	P22		1000			
	P23		1200			
	P24		1400			

Tabla 3.2 Condiciones de depósito de películas de pm-SixGey:H para el estudio de las propiedades de las películas obtenidas.

Pero estas condiciones no se pudieron usar en el proceso de fabricación, ya que las condiciones utilizadas en la serie de depósitos mostradas en la tabla 3.2, exceden las capacidades del sistema de depósito y por tanto se tiene que usar nuevas condiciones que ajusten tanto a las condiciones para producir películas polimorfas, como a las capacidades del sistema de depósito. Las nuevas condiciones se muestran en la tabla 3.3. De las películas obtenidas sólo se realizó la caracterización eléctrica ya que sólo se pudo realizar los depósitos en corning glass con electrodos de titanio.

Proceso	Temperatura °C	Presión mTorr	Potencia Watts	SiH ₄ sccm	GeH ₄ sccm	H ₂ sccm	Tiempo minutos
P1	200	500	10	25	25	55	72
P2		1000		25	25	55	47
P3		1000		25	10	55	74

Tabla 3.3 Condiciones de depósito de la película termo-sensible

Después del depósito de las películas de pm-Si_xGe_y:H del proceso de fabricación, se realiza litografía con la mascarilla #3 para definir el área termo-sensible. Se usa foto-resina

positiva AZ1512 y el grabado del material termo-sensible se llevó a cabo en el sistema Micro-RIE marca Technics 800, las condiciones se muestran en la tabla 3.4.

Potencia Watts	Presión mTorr	Gas	Tiempo (min)
250	300	CF ₄	30

Tabla 3.4 condiciones de grabado de la película termo-sensible.

3.2.5 Depósito de película de titanio y definición de contactos

Se definen los electrodos de los micro-bolómetros con el depósito de Ti. La definición de estos electrodos se realiza nuevamente por la técnica de lift-off. Se usa la mascarilla #4 (paso 5, figura 3.8) y foto-resina negativa AZ2020 para definir los electrodos. El depósito se realiza por evaporación por haz de electrones en el sistema de evaporación e-beam a una razón de depósito de 10 Å/s y el espesor de estos electrodos es de 500 nm.

3.3.6 Liberación de las estructuras

La liberación de las estructuras se realizó al eliminar la capa de poliamida. La eliminación de la poliamida se realizó en plasma de oxígeno en el sistema Asher Branson L2101 (paso 6, figura 3.8). En este paso se tuvo cuidado en no superar los 200 °C que es la temperatura a la que se depositó la película termo-sensible, y ya que el sistema se calienta debido al proceso de grabado, es necesario hacerlo por pasos. Si se supera la temperatura a la cuál fue depositada la película termosensible se modifican las características del material. La eliminación de la película de poliamida se realizó en 4 intervalos de 30 minutos. Las condiciones de grabado se muestran en la tabla 3.5.

Potencia Watts	Presión mTorr	Gas	Tiempo (min)
600	800	O ₂	120

Tabla 3.5 Condiciones de grabado de poliamida para la liberación de los micro-bolómetros.

Referencias

- [3.1] Ambrosio Lazaro R. C., Research on fabrication processes for un-cooled microbolometer base don plasma deposited films, Tesis de Doctorado, INAOE, 2005.
- [3.2] Péres González A. M., Diseño de arreglo plano focal de detectores infrarrojos, Tesis de Doctorado, INAOE, 2005.
- [3.3] García Cruz M., Characterization and modeling of uncooled microbolometers of a-SiGe, Tesis de Doctorado, INAOE, 2006.
- [3.4] Moreno Moreno M., Study of IR un-cooled microbolometer arrays based on thin films deposited by plasma, Tesis de Doctorado, INAOE, 2008.
- [3.5] Calleja Gómez C. M., Fabricación y caracterización de detectores de radiación UV basados en silicio, Tesis de Maestría, INAOE, 2011.
- [3.6] Jimenez Z. R., Desarrollo de micro-bolómetros no enfriados basados en silicio y Germanio polimorfo, Tesis de Maestría, INAOE, 2013.
- [3.7] Mottin E., Bain A., Martin J.L., Ouvrier-Buffet J.L., Bisotto S., Yon J.J., Tissot J.L., Uncooled amorphous silicon technology enhancement for 25 μ m pixel pitch achievement, Infrared Technology and applications XXVIII, SPIE Vol.4820, 2002.
- [3.8] S. Kumar, CCBDI readout circuit for YBaCuO micromachined microbolometers, Ph. D. Thesis, The University of Texas at Arlington, 2002.
- [3.9] C. Beck. Phosphor Concentration in Low Temperature Vapor Deposited Oxide. Solid State Technology, 1977.
- [3.10] P.Roca i Cabarrocas, A.Fontcuberta i Morral, Y. Poissant, “Growth and optoelectronic properties of polymorphous silicon thin films”, Thin Solid Films 403-404, pp. 39-46, 2002.
- [3.11] M. Meaudre, R. Meaudre, R. Butté, S. Vignoli, C. Longeaud et al. “Midgap density of states in hydrogenated polymorphous silicon”, J. Appl. Phys. 86, 946, 1999.

- [3.12] L. Boufendi, M. Ch. Jouanny, E. Kovacevic, J. Berndt and M. Mikikian, "Dusty plasma for nanotechnology", *J. Phys. D: Appl. Phys.* 44, 2011.
- [3.13] M. Moreno, A. Torres, C. Calleja, R. Ambrosio, P. Rosales, A. Kosarev, and R. Jiménez, "Exploring the infrared-sensing properties of polymorphous silicon-germanium (pm-SixGey:H) thin films", *Can. J. Phys.*, vol. 92, pp. 565–569, 2014.

Capítulo 4. Métodos de caracterización

En este capítulo se describen las técnicas utilizadas para la caracterización de las películas de silicio-germanio polimorfo hidrogenado que se utilizan como películas termo-sensibles en los micro-bolómetros. En la segunda parte del capítulo se describen las técnicas de caracterización de los micro-bolómetros.

4.1 Caracterización de la película termo-sensible

El material utilizado como material termo-sensible del micro-bolómetro debe tener una alta sensibilidad a la temperatura, tener bajos niveles de ruido, y ser compatible con el proceso estándar de fabricación CMOS para una manufacturación de bajo costo e integración con el circuito de control (ROIC).

De la caracterización eléctrica mediante la relación corriente-voltaje ($I(U)$) en función de la temperatura de las películas de silicio-germanio polimorfo ($\text{pm-Si}_x\text{Ge}_y\text{:H}$), es posible conocer algunas propiedades como la energía de activación (E_a) y el coeficiente térmico de la resistencia (TCR) que son dos de los parámetros más importantes para materiales utilizados como películas termo-sensibles. Además, se pueden determinar otras características del material como la resistividad eléctrica, propiedades ópticas y de composición. Para la caracterización, los depósitos de películas delgadas de $\text{pm-Si}_x\text{Ge}_y\text{:H}$ generalmente se realizan sobre corning glass (2974) para caracterizar la rugosidad superficial o conocer su espesor mediante la técnica de perfilometría. También se usa el mismo sustrato con electrodos de titanio para realizar la caracterización eléctrica dependiente de la temperatura. El depósito realizado sobre corning glass (1737) se utiliza para la caracterización óptica, y el realizado sobre silicio de alta resistividad se ocupa para

la caracterización de la composición de las películas depositadas mediante la técnica de espectroscopía por transformada de Fourier en infrarrojo (FTIR).

El arreglo experimental para realizar la caracterización $I(U)$ consiste de un criostato de ciclo abierto modelo ST-200 de la marca Janis Research donde se coloca una muestra de pm-Si_xGe_y:H depositado sobre corning glass (2974) con electrodos de titanio. Dentro del criostato, la muestra está en condiciones de oscuridad y a un nivel de vacío de 50 mTorr. Se utiliza un controlador de temperatura modelo 331 (Lake Shore) para variar la temperatura de la muestra iniciando en 300 K y aumentando la temperatura gradualmente en pasos de 10 K, hasta llegar a los 400 K. En cada aumento de temperatura se obtienen la característica $I(U)$. La caracterización eléctrica se realiza con un electrómetro (6517A, marca KEITHLEY) el cual es controlado por una PC mediante un programa ejecutado en LabView. El arreglo experimental se muestra en la figura 4.1.

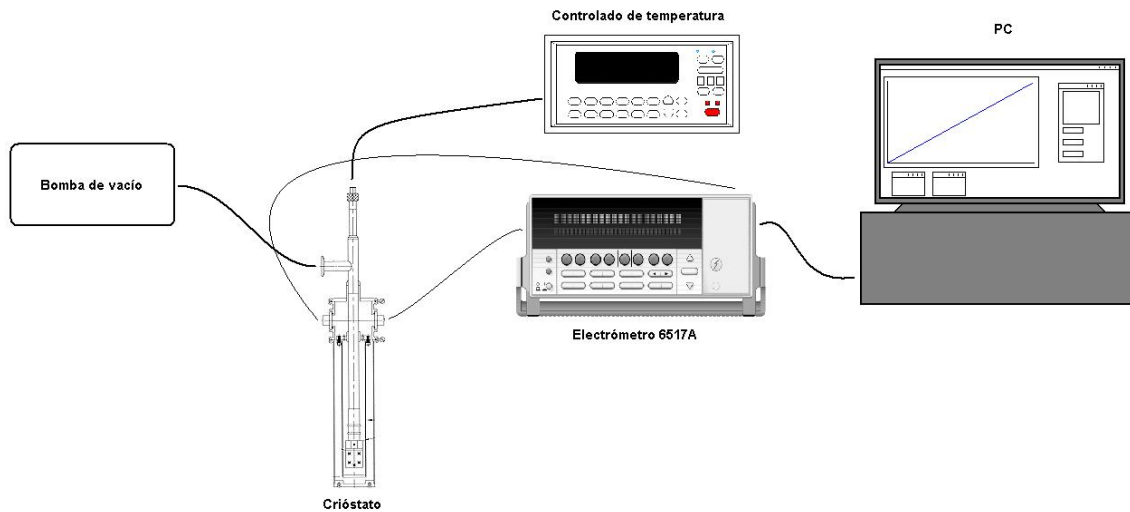


Figura 4.1 Arreglos experimentales para determinar la E_a y TCR.

Para determinar la E_a y el TCR se realizan mediciones eléctricas para obtener la relación corriente-voltaje ($I(U)$) variando la temperatura de la muestra. La resistencia de la película de pm-Si_xGe_y:H tiene dependencia con la temperatura en la forma:

$$\sigma(T) = \sigma_0 \exp(-E_a/kT) \quad (4.1)$$

donde E_a es la energía de activación. El TCR se define como:

$$TCR(T) = \frac{1}{R} \left| \frac{dR}{dT} \right| = \frac{E_a}{kT^2}. \quad (4.2)$$

Aplicando logaritmo natural a la ecuación 4.1 se obtiene la ecuación 4.3, que es la ecuación de una línea recta y el valor de la pendiente es la energía de activación.

$$\ln(\sigma) = \ln(\sigma_0) - E_a \frac{1}{kT} \quad (4.3)$$

Conociendo el valor de E_a se puede determinar el TCR mediante la ecuación (4.2). De la caracterización I(U) a diferentes temperaturas se obtiene una gráfica como la que se muestra en la figura 4.2.

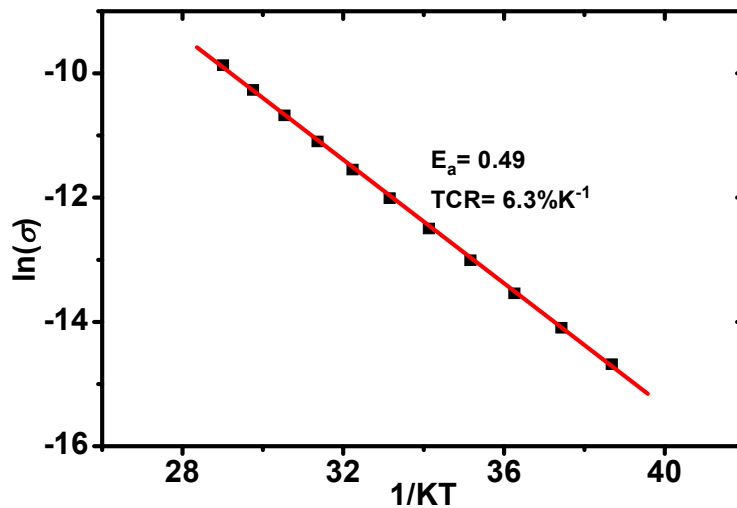


Figura 4.2 Conductividad dependiente de la temperatura de pm-Si_xGe_y:H.

Con los valores obtenidos es posible conocer el valor de E_a realizando un ajuste lineal de los datos y posteriormente se calcula el valor de TCR. E_a es una función del nivel de Fermi ($E_a = E_C - E_F$, donde E_C es el nivel de energía mínimo en banda de conducción y E_F el nivel de Fermi), y por tanto depende de la densidad de dopantes en el material. En el caso de semiconductores polimorfos intrínsecos, E_a es función de la cantidad de defectos presentes en el material. En caso de semiconductores polimorfos dopados, una mayor cantidad de dopantes tienen como consecuencia una reducción de E_a y por tanto del TCR.

4.2 Caracterización de la estructura y composición de las películas de pm-Si_xGe_y:H

4.2.1 Caracterización por la técnica FTIR

La técnica FTIR es empleada para el análisis de la composición de materiales orgánicos e inorgánicos, en fase sólida, líquido y gas. Esta técnica permite identificar y cuantificar diferentes enlaces químicos moleculares en una material. Los enlaces químicos en una molécula puede determinarse, mediante la interpretación del espectro de absorción IR. En nuestro caso, la técnica FTIR permite determinar los enlaces Si-H y Ge-H en las películas termo-sensibles. Estas películas se analizaron en un espectrofotómetro FTIR (modelo Vector 22, Bruker) para conocer la composición molecular de las películas depositadas en el rango de 400 a 2500 cm⁻¹. Es importante mencionar que para realizar la caracterización de la composición de las películas de pm-Si_xGe_y:H, el depósito se realiza sobre un sustrato de silicio de alta resistividad.

4.2.2 AFM

La microscopía de fuerza atómica (AFM) es una técnica que se utiliza para examinar la rugosidad en la superficie de algún material. Al realizar el rastreo de una muestra, es capaz de registrar de manera continua su topografía mediante una punta afilada. Esta técnica ha resultado una herramienta útil en el desarrollo de la nanotecnología para la caracterización y visualización de muestras a dimensiones nanométricas. Para determinar la rugosidad superficial de las películas de pm-Si_xGe_y:H, y de ese modo determinar la presencia de

nanoclusters en la superficie del material se usó un microscopio AFM Nanosurf Easy Scan 2.3 para escanear áreas de 2×2 hasta $50 \times 50 \mu\text{m}^2$.

4.2.3 Transmitancia UV-Visible

Las mediciones de transmitancia en el rango del espectro ultravioleta-visible (UV-Vis) se realizan con el fin de determinar los parámetros ópticos de las películas depositadas, como el coeficiente de extinción (k) y el ancho de banda prohibida del material (E_g). Esta caracterización se realizó en un espectrómetro Perkin-Elmer Lambda3B, realizando un barrido en el intervalo de 200-900 nm con incrementos de 1 nm. Los resultados de la caracterización de transmitancia fueron interpretados por el software PUMA (Point wise Unconstrained Minimization Approach) [4.2].

4.3 caracterización eléctrica de los micro-bolómetros

Una vez finalizado el proceso de fabricación se realiza una inspección visual para identificar los dispositivos que no se hayan destruido total o parcialmente durante el proceso de liberación, o se vean con algún tipo de daño. Ya identificados los micro-bolómetros en buenas condiciones, se realiza la primera etapa de caracterización eléctrica.

4.3.1 Caracterización $I(U)$ en condiciones de oscuridad

La primera etapa de la caracterización eléctrica, consiste en realizar mediciones $I(U)$ directamente en sustrato para verificar que el proceso de fabricación concluyó de manera satisfactoria y resulta en dispositivos funcionales. Esta caracterización se realiza para conocer el estado eléctrico de los micro-bolómetros, es decir, si estos tienen conducción eléctrica, si están en circuito abierto o en corto circuito. Las mediciones $I(U)$ se realizan en la estación manual en condiciones de oscuridad utilizando el analizador de parámetros de semiconductores (SPA HP-4516A, Hewlett Packard). Se realiza un barrido en voltaje en el rango de -2 a 2 V en incrementos de 10 mV. Cuando se han seleccionado los micro-bolómetros que continúan con el proceso de caracterización estos se cortan para poder ser empaquetados. El corte de los chips se realizó en la cortadora de disco de diamante y son

empaquetados en un encapsulado del tipo dual in-line package (DIP). El DIP más apropiado fue el de 40 pines que se montará en el crióstato. Los micro-bolómetros se empaquetaron usando aluminio (1% de silicio) en la alambreadora manual EMB 1100 (Sola Basic Tempres).

4.3.2 Caracterización $I(U)$ en condiciones de oscuridad y bajo iluminación

Para esta caracterización se usó el analizador de parámetros de semiconductores (SPA HP-4516A, Hewlett Packard), los micro-bolómetros empaquetados se montaron en un criostato de ciclo abierto MTD-150 (LakeShore) el cual cuenta con un apertura donde se puede colocar una tapa metálica para poder realizar mediciones en condiciones de oscuridad, o también se puede colocar una ventana para poder iluminar a los micro-bolómetros. La presión de la cámara del criostato se redujo hasta 50 mTorr utilizando una bomba mecánica. Primero se realizan la caracterización $I(U)$ en condiciones de oscuridad. Posteriormente se cambia la tapa metálica por una ventana de selenuro de zinc (ZnSe) que tiene una transmitancia del 70 % en el rango de longitud de onda 0.6-20 μm . Esto permite se iluminen las muestras y se obtiene de nuevo la característica $I(U)$. Durante las mediciones se usa un control de temperatura para mantener las muestras a 300 K. Como fuente de radiación IR se usó una barra de carburo de silicio (SiC globar) marca Kanthal Globar. La fuente de alimentación de la barra de SiC es una fuente de corriente PSP-2010 (GK instek). La apertura de salida de la fuente de radiación IR se colocó a 10 cm de los micro-bolómetros. El analizador de parámetros se configuró de tal modo que cada medición hiciera un barrido de voltaje en el rango de 0 V a 5 V incrementando 10 mV y se limitó la corriente hasta 100 μA como protección de los micro-bolómetros. En la figura 4.3 se muestra un esquema del sistema usado para realizar la caracterización.

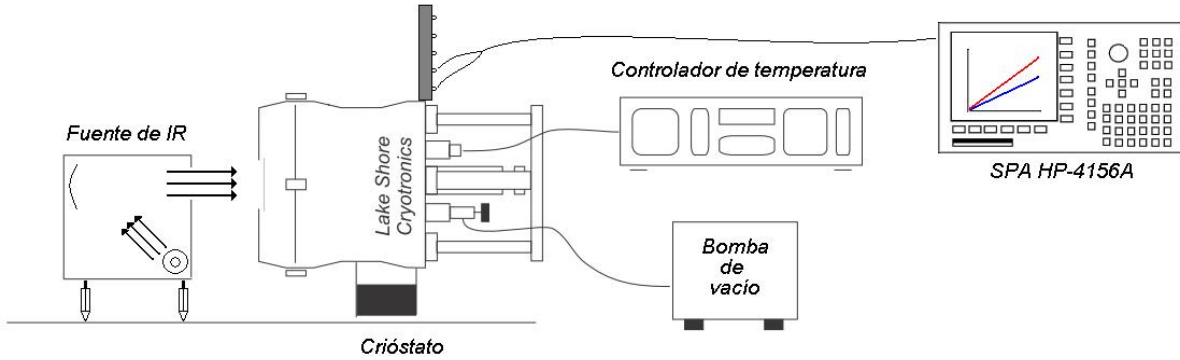


Figura 4.3 esquema de medición de los micro-bolómetros para la caracterización eléctrica.

Con los datos obtenidos de esta caracterización, es posible determinar la respuesta en corriente, \mathfrak{R}_I , y la respuesta en voltaje, \mathfrak{R}_U , que son figuras de mérito de gran importancia para micro-bolómetros. La respuesta se determina mediante el incremento en corriente cuando la muestra es iluminada. Esta se puede determinar mediante la ecuación (4.4), donde ΔI es la diferencia de la corriente cuando la muestra está en oscuridad y cuando es iluminada $\Delta I = I_{IR} - I_{DARK}$.

$$\mathfrak{R}_I = \frac{\Delta I}{P_{inc}} \left[\frac{A}{W} \right] \quad (4.4)$$

P_{inc} es la potencia de la radiación IR incidente sobre el micro-bolómetro, que se puede determinar con la ecuación 4.5, donde A es el área del micro-bolómetro y se expresa en cm^2 .

$$P_{inc} = AI_0 [W] \quad (4.5)$$

I_0 en la ecuación 4.5 es la intensidad de radiación IR por unidad de área que emite la fuente de radiación. Para determinar I_0 se mide la intensidad de radiación a una distancia de 10 cm, con una termopila modelo 21938 marca Thermo Oriel, y de acuerdo a sus

especificaciones, I_0 se calcula de acuerdo a la ecuación 4.6. La distancia es la misma a la que se encuentran separados los micro-bolómetros de la fuente de radiación IR durante la caracterización.

$$I_0 = \frac{I_{TH}}{RA_{TH}} \left[\frac{W}{cm^2} \right] \quad (4.6)$$

I_{TH} es la corriente medida con la termopila, A_{TH} es el área activa de la termopila.

Para una corriente de 8.87 A (12 V) suministrada por una fuente de potencia, que fluye a través de una barra de SiC, con la termopila se midió una corriente de 51.4 nA. En la ecuación 4.6 tanto R que es la respuesta de la termopila, como A_{TH} , los conocemos de las especificaciones de la termopila dadas por el fabricante. $R = 2.6 \times 10^{-4}$ A/W y $A_{TH} = 2.8 \times 10^{-3}$ cm². Con esto se determina $I_0 = 7.046$ W/cm². Conociendo que el filtro de ZnSe tiene una transmitancia del 70 % en el rango de 0.7 - 20 μm, la potencia incidente se puede estimar como $P_{inc} \approx 0.7 \times AI_0$ [W]. La fabricación de los micro-bolómetros se realizó con estructuras de tres áreas diferentes; 50 x 50, 30 x 30 y 25 x 25 μm², por tanto, la P_{inc} varía para cada micro-bolómetro con diferente área:

- Micro-bolómetros con área de 50x50 μm², la $P_{inc} = 1.23 \times 10^{-6}$ W.
- Micro-bolómetros con área de 30x30 μm², la $P_{inc} = 4.44 \times 10^{-7}$ W.
- Micro-bolómetros con área de 25x25 μm², la $P_{inc} = 3.08 \times 10^{-7}$ W.

Para determinar la respuesta en voltaje, se toma la diferencia en voltaje para un valor de corriente. Esta diferencia en voltaje se puede extraer de la misma característica $I(U)$ y la respuesta se calcula con la ecuación 4.7, donde ahora $\Delta V = V_{IR} - V_{DARK}$.

$$\mathfrak{R}_U = \frac{\Delta V}{P_{inc}} \left[\frac{V}{W} \right] \quad (4.7)$$

4.4 Caracterización de ruido

En esta sección mostramos la caracterización de la densidad espectral de ruido (NSD). La NSD se define como el ruido por unidad de frecuencia que afecta a los micro-bolómetros. Para la medición de ruido se tomó como referencia el trabajo previo realizado en las instalaciones del INAOE para realizar la caracterización de ruido en micro-bolómetros y en semiconductores amorfos y polimorfos aplicados en dispositivos sensores de radiación IR [4.1]. El sistema de caracterización de ruido en micro-bolómetros se muestra esquemáticamente en la figura 4.4.

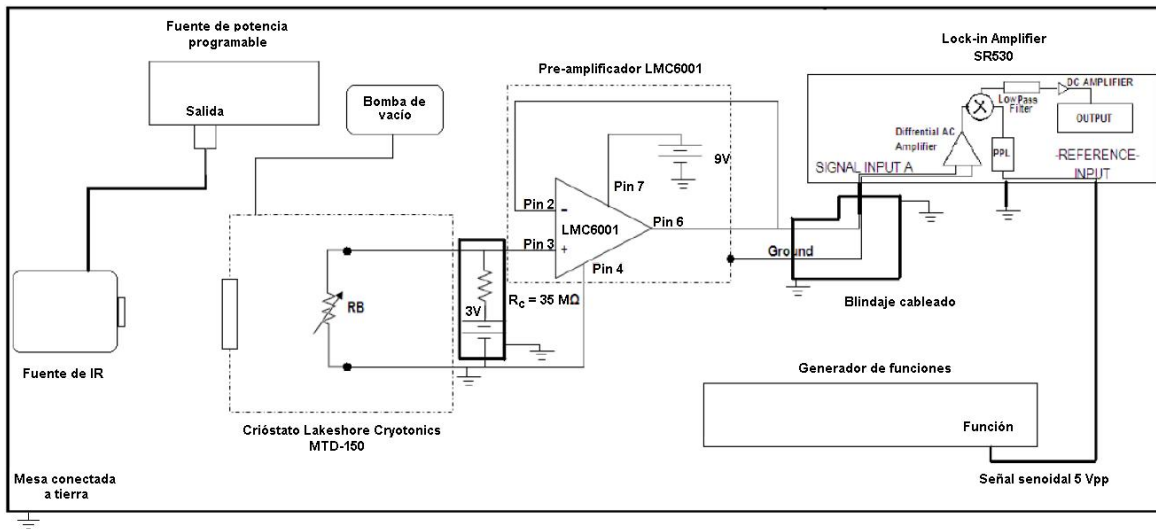


Figura 4.4 Esquema utilizado para la medición de la NSD.

Para realizar las mediciones de ruido se utiliza un amplificador de amarre de fase (Lock in amplifier) SR 530 (Stanford Research Systems). Este equipo se utiliza para medir el nivel de ruido a diferentes frecuencias, para esto, se debe tener una señal de referencia con la frecuencia de interés. Para obtener esta señal de referencia se utiliza un generador de funciones que nos proporciona una señal senoidal haciendo un barrido de frecuencia. La señal senoidal de referencia tiene un voltaje pico a pico de 5 V. Los micro-bolómetros generalmente tienen una resistencia muy alta y es necesario realizar un acoplamiento de impedancia. Para esto se usa un amplificador operacional configurado como seguidor de voltaje (ganancia de voltaje unitaria). Se usa el amplificador operacional LMC6001 que tiene una muy alta impedancia de entrada ($Z \approx 1 \text{ T}\Omega$) y una impedancia de salida pequeña

que es compatible a la impedancia de entrada del amplificador Lock-in. Además, este amplificador operacional es de muy bajo ruido ($0.13 \times 10^{-15} \text{AHZ}^{-1/2}$) que proporciona una señal de salida con muy baja amplificación de algún ruido extra al ruido intrínseco de los micro-bolómetros. El micro-bolómetro a ser caracterizado está conectado en serie con una resistencia de carga R_L de $35 \text{ M}\Omega$, y se alimenta con un voltaje en DC a 3.2V . El esquema de acoplamiento se muestra en la figura 4.5.

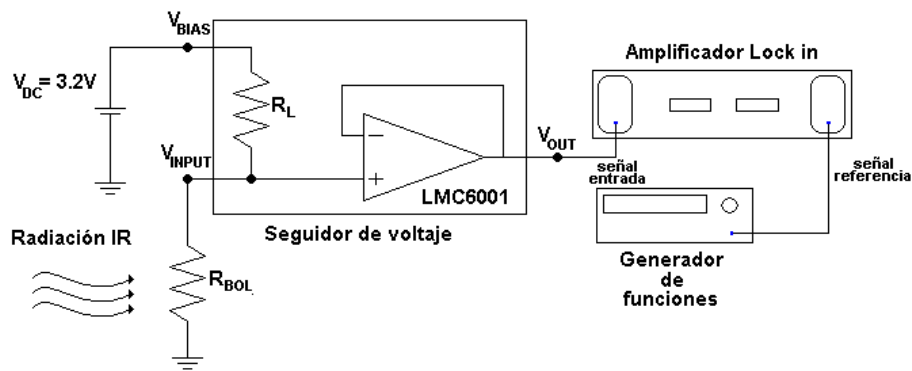


Figura 4.5 Circuito de acoplamiento de impedancia para la medición de la NSD.

El ruido total que afecta al micro-bolómetro es la suma de las contribuciones que describimos en el capítulo 2. Para obtener la NSD de los micro-bolómetros se realiza la caracterización de la NSD de los micro-bolómetros colocados en el criostato. Posteriormente se realiza la caracterización de la NSD del sistema, retirando los micro-bolómetros del criostato. La resta de los datos obtenidos de ambas caracterizaciones nos permite conocer la NSD del micro bolómetro, como se muestra en la ecuación 4.8

$$(V_{N\text{bolómetro}})^2 = (V_{N\text{bolómetro}+\text{sistema}})^2 - (V_{N\text{sistema}})^2 \quad (4.8)$$

La NSD se determinó realizando un barrido en frecuencia de 1 Hz a 80 kHz.

4.5 Detectividad de los micro-bolómetros

La detectividad (D^*) de los micro-bolómetros se determina a partir de la respuesta y de la NSD. La detectividad en voltaje se determinó usando la ecuación 4.9, donde \mathfrak{R}_U es la respuesta en voltaje, A es el área del micro-bolómetro, y Δf es el ancho de banda equivalente del equipo de medición ($\Delta f = 1$ Hz) que es un parámetro de ajuste del amplificador Lock-in. V_N es el valor rms del ruido en voltaje medido directamente del amplificador Lock-in.

$$D^* = \frac{\mathfrak{R}_U \sqrt{A \Delta f}}{V_N} \left[cm \frac{\sqrt{Hz}}{W} \right] \quad (4.9)$$

$$D^* = \frac{\mathfrak{R}_I R \sqrt{A \Delta f}}{I_N} \left[cm \frac{\sqrt{Hz}}{W} \right] \quad (4.10)$$

La detectividad en corriente se determinó usando la ecuación 4.10, donde R es la resistencia estimada del microbolómetro. I_N se determina la NSD en voltaje, dividiendo V_N por el valor de resistencia de la resistencia estimada del micro-bolómetro. La detectividad se determinó utilizando los resultados de la medición de ruido (V_N) a una frecuencia de 100 Hz.

4.6 Diferencia de temperatura equivalente al ruido (NETD)

Mientras que los detectores elementales, tal como los micro-bolómetros, se describen generalmente por figuras de mérito tal como la potencia equivalente al ruido (NEP) y D^* , los arreglos de detectores se han descrito por una NETD asociada a su uso en una cámara bajo ciertas condiciones específicas. La NETD se define como el cambio en la temperatura de un cuerpo negro, que cubre el campo de visión de un pixel en un sistema de captación de imágenes IR que da lugar a un cambio igual a la unidad en la razón señal a ruido a la salida del sistema. La medición de la NETD debe llevarse a cabo en la presencia de varios píxeles para evitar efectos de franja y con una SNR (relación de señal a ruido) muy por encima de 1 para obtener una buena precisión. La NETD puede ser determinado en formas diferentes y

al ser una relación de la razón señal-ruido, puede determinarse como el inverso de D^* o conociendo los valores de la NSD y respuesta del dispositivo [4.3-4.10]. En este trabajo se determinó la NETD de acuerdo a la ecuación 4.11.

$$NETD = \frac{4F^2 V_N}{\mathfrak{R}_U A \phi_{\lambda_1-\lambda_2} \left(\frac{\Delta P}{\Delta T}\right)_{\lambda_1-\lambda_2}} \quad (4.11)$$

Donde F es la razón entre la distancia focal de la lente y el diámetro de apertura del sistema óptico, V_N es el ruido, \mathfrak{R}_U la respuesta en voltaje, A el área del micro-bolómetro, $\phi_{\lambda_1-\lambda_2}$ es la transmisión del sistema óptico y $\left(\frac{\Delta P}{\Delta T}\right)_{\lambda_1-\lambda_2}$ es el contraste de temperatura para un intervalo de longitud de onda, o bien, la variación de la potencia incidente debido a la variación de la temperatura.

Referencias

- [4.1] I. Cosme, Estudio experimental de ruido en películas termosensor basadas en silicio-germanio depositadas por plasma con aplicación en microbolómetros, M. C. Tesis, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, 2008.
- [4.2] E. G. Birgin, I. Chambouleyron, and J. M. Martínez, Estimation of optical constants of thin films using unconstrained optimization, *Journal of Computational Physics* 151, pp. 862-880, 1999.
- [4.3] Niklaus F., Decharat A., Jansson C., Stemme G., Performance model for uncooled infrared bolometer arrays and performance predictions of bolometers operating at atmospheric pressure, *Infrared physics & technology*, Vol. 51, 168-177, 2008.
- [4.4] Benoit Dupont, Antoine Dupret, Eric Belhaire, and Patrick Villard, FPN Sources in Bolometric Infrared Detectors, *IEEE Sensors Journal*, VOL. 9, NO. 8, august 2009.
- [4.5] Pontus Eriksson, Jan Y. Andersson, and Göran Stemme, Thermal Characterization of Surface-Micromachined Silicon Nitride Membranes for Thermal Infrared Detectors, *Journal of Microelectromechanical Systems*, VOL. 6, NO. 1, march1997.
- [4.6] P.L. Marasco, E.L. Dereniak, Uncooled infrared sensor performance, in: *Proceedings of SPIE*, San Diego, USA, vol. 2020, 1993, pp. 363–378.
- [4.7] M. Kohin, N. Buttler, Performance limits of uncooled VOx microbolometer focal plane arrays, in: *Proceedings of SPIE*, Orlando, USA, vol. 5406, 2004, pp. 447–453.
- [4.8] B. Backer, M. Kohin, A. Leary, R. Blackwell, R. Rumbaugh, Advances in uncooled technology at BAE systems, in: *Proceedings of SPIE*, Orlando, USA, vol. 5074, 2003, pp. 548–556.
- [4.9] R.A. Wood, Uncooled microbolometer infrared sensor arrays, in: P.Capper, C.T. Elliott (Eds.), *Infrared Emitters and Detectors*, Kluwer Academic Publishers, Norwell, Massachusetts, 2001.

- [4.10] E. Mottin, A. Bain, J.L. Martin, J.L. Ouvrier-Buffet, S. Bisotto, J.J. Yon, J.L. Tissot, Uncooled amorphous silicon technology enhancement for 25 μm pixel pitch achievement, in: Proceedings of SPIE, Seattle, USA, vol. 4820, 2003, pp. 200–207.

Capítulo 5. Caracterización de las películas de pm-Si_xGe_y:H y micro-bolómetros fabricados.

En este capítulo se reportan los resultados obtenidos de la caracterización de las películas de pm-Si_xGe_y:H. Es evidente que, por sus características, estas películas tienen propiedades atractivas para aplicarse como material termo-sensible en micro-bolómetros. Además se incluyen los resultados de la caracterización eléctrica de los micro-bolómetros.

5.1 Caracterización de las películas de pm-Si_xGe_y:H

La caracterización de la película termo-sensible se realizó en dos series de películas de pm-Si_xGe_y:H depositadas con diferentes condiciones y que se realizaron en un reactor PECVD de placas paralelas acoplado capacitivamente a frecuencia estándar (13.56 MHz), a una potencia RF de 25 W y a temperatura de sustrato (T_s) de 200 °C. La caracterización de las películas depositadas sirve para conocer las propiedades de los semiconductores polimorfos basados en silicio y germanio. La serie #1 se depositó a las presiones de la cámara de depósito de 500, 1000 y 1200 mTorr, flujo de los gases precursores de H₂ = 110 sccm, SiH₄ = 50 sccm y GeH₄ = 50 sccm. En la serie #2 las presiones de la cámara de depósito fueron 500, 1000, 1200 y 1400 mTorr; y el flujo de los gases precursores fue de H₂ = 110 sccm, SiH₄ = 90 sccm y GeH₄ = 10 sccm. En la serie #1 no se realizó el depósito a 1400 mTorr ya que a esas condiciones no se logra el acoplamiento del sistema de depósito para generar el plasma. Las condiciones que se usaron para ambas series de depósitos se resumen en la tabla 5.1, cada depósito se realizó durante 30 minutos.

	Número de muestra	Temperatura °C	Presión mTorr	SiH ₄ sccm	GeH ₄ sccm	H ₂ sccm
Serie #1	P11	200°C	500	50	50	110
	P12		1000			
	P13		1200			
Serie #2	P21		500	90	10	110
	P22		1000			
	P23		1200			
	P24		1400			

Tabla 5.1 Condiciones de depósito de las películas de pm-Si_xGe_y:H.

Cada serie de depósito se realizó en diferentes sustratos para realizar la caracterización de las películas.

5.1.1 Espesor y razón de depósito de las películas de pm-Si_xGe_y:H

El espesor de las películas se determinó por la técnica de perfilometría y los resultados se muestran en la tabla 5.2, las razones de depósito (V_d) en función de la presión de la cámara dentro de la cámara de depósito. Para la serie #1, V_d se encuentra en el rango de 1.57-5.44 Å/s. Para la serie #2, V_d está en el rango de 2-3 Å/s. Para la serie #1 la mayor V_d es en 1200 mTorr, mientras que para la serie #2 V_d es prácticamente igual en el rango de 1000-1400 mTorr. Se ha reportado que una alta razón de depósito se relaciona con una fracción cristalina grande en películas polimorfas. Esto relacionado con el hecho de que a grandes razones de depósito la incorporación de oxígeno en la película se reduce y promueve la formación de nanocristales en el plasma [5.1].

5.1.2 Mediciones de la rugosidad superficial

La caracterización por la técnica de microscopía de fuerza atómica (AFM) se realizó con el fin de caracterizar la rugosidad en la superficie de las películas depositadas. La rugosidad superficial media $\langle S_a \rangle$ se obtuvo a partir de un análisis estadístico mediante el escaneo de un área de $4 \times 4 \mu\text{m}^2$ en la superficie de las películas depositadas. La Figura 5.1 muestra la

dependencia de $\langle S_a \rangle$ con la presión en la cámara de depósito para ambas series de películas depositadas.

	Depósito	Espesor (Å)	Razón de depósito (Å/s)
Serie #1	P11	2830	1.57
	P12	8195	4.55
	P13	9799	5.44
Serie #2	P21	3629	2
	P22	5401	3
	P23	4868	2.7
	P24	5464	3

Tabla 5.2 Razones de depósito de las películas de pm-Si_xGe_y:H.

Podemos ver que la tendencia es un aumento en $\langle S_a \rangle$ con el aumento en la presión de la cámara de depósito. El aumento en $\langle S_a \rangle$ es más evidente en las películas de la serie #1. Es importante puntualizar que las mediciones realizadas con la técnica de AFM se utilizan para correlacionar la rugosidad de la superficie con la posible presencia de nanocristales embebidos en la red amorfa. Una mayor $\langle S_a \rangle$ se relaciona con una mayor micro/nanocrystalinidad dentro de las películas en la red amorfa. Sin embargo, esta técnica no es adecuada para determinar la composición estructural del material en volumen y por sí sola no es suficiente para determinar la fracción cristalina de la película. La rugosidad superficial se correlaciona con la presencia de nanocristales embebidos en la red amorfa [5.1]. Las imágenes de rugosidad superficial obtenidas por AFM de las películas depositadas se muestran en la figura 5.2. En la figura 5.3 se muestran imágenes de alta resolución tomadas a la película del proceso mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y por microscopía de transmisión de alta resolución (HR-TEM) donde se puede distinguir la presencia de nanocristales embebidos en la red amorfa.

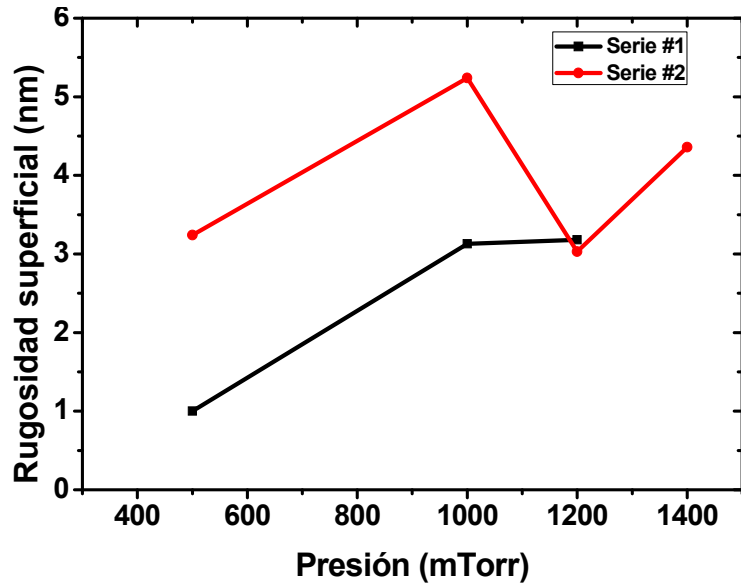
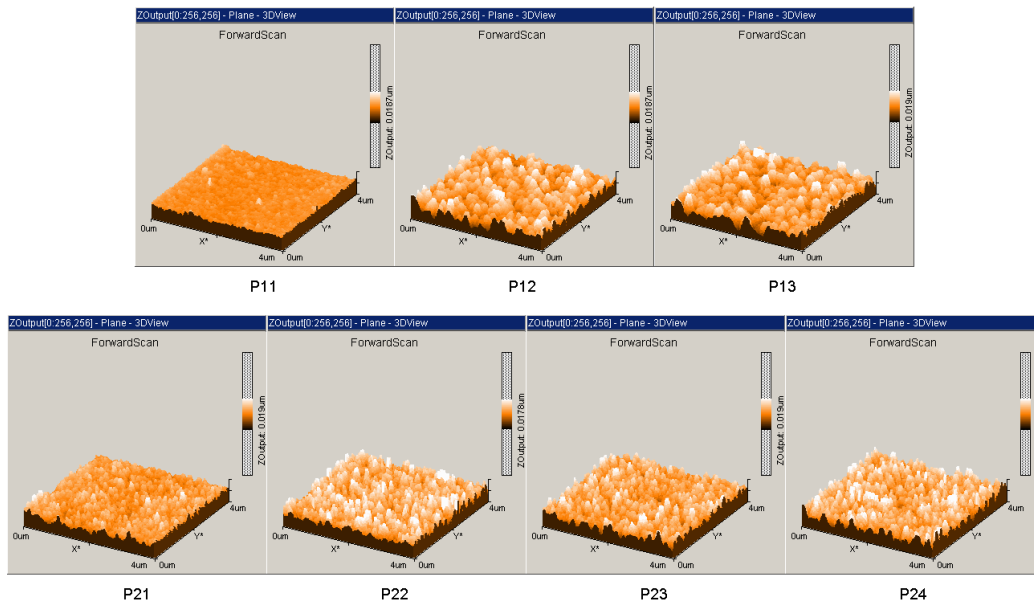


Figura 5.1 Rugosidad superficial media $\langle S_a \rangle$ contra la presión de la cámara de depósito en ambas series de las películas de pm-Si_xGe_y:H.



(a)

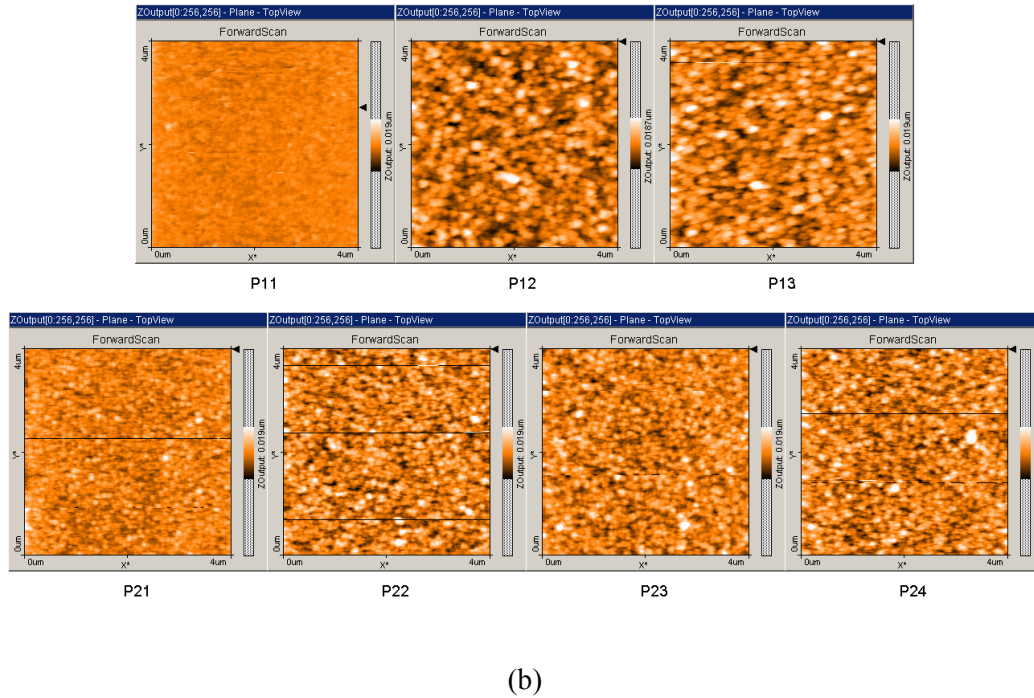


Figura 5.2 Rugosidad superficial en las dos series de películas depositadas de pm-Si_xGe_y:H sobre silicio cristalino. (a) Vista 3D y (b) vista superficial.

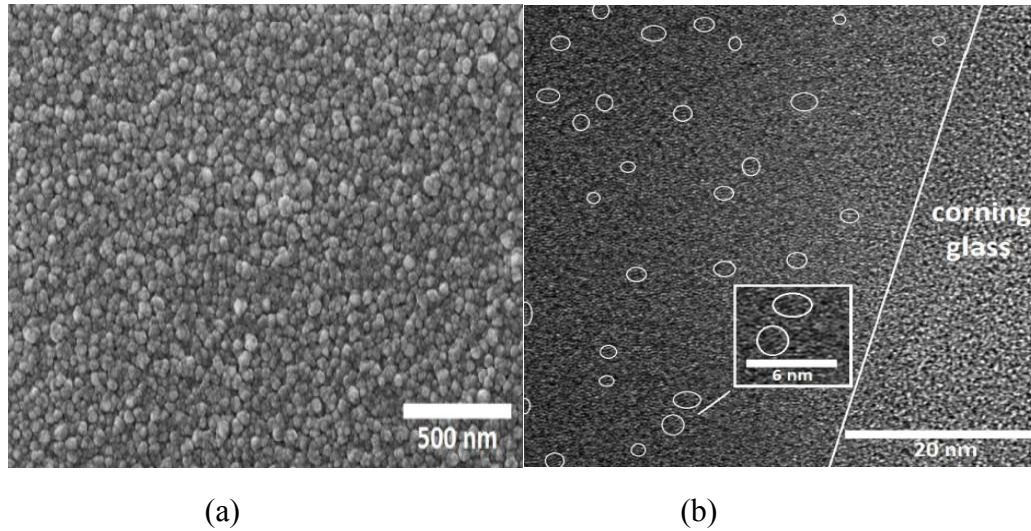


Figura 5.3 (a) Imagen obtenida por SEM de la película de pm-Si_xGe_y:H depositada, (b) imagen obtenida por HR-TEM de la sección transversal de la película depositada donde se aprecia la presencia de nanocristales en el rango de 2-3 nm, el recuadro interno muestra un par de nanocristales embebidos en la red amorfa.

5.1.2 Mediciones FTIR

En la Figura 5.4 se muestran los espectros de absorción en el intervalo de 400-2500 cm^{-1} para ambas series de películas depositadas. Observamos que estos espectros son similares. En la región entre 500-700 cm^{-1} hay un pico en alrededor de 600 cm^{-1} . Estos consisten en dos picos centrados en 560 cm^{-1} y en 640 cm^{-1} , que están relacionadas con la modos de vibración de doblamiento (bending vibration mode) de los enlaces de Ge-H y Si-H respectivamente [5.2]. El pico alrededor de 735 cm^{-1} está relacionado con enlaces Ge-O, mientras que el pico cerca de 885 cm^{-1} está relacionada con los enlaces Si-H. Cerca de 960 cm^{-1} se observa un pico que está relacionado con enlaces Ge-O y el pico en 1100 cm^{-1} con enlaces Si-O. Finalmente cerca a 2000 cm^{-1} se observa un pico atribuido a un modo de estiramiento (stretching mode) del enlace Si-H. Todos estos picos se encuentran presentes en ambos espectros. El pico de absorción cerca de 1880 cm^{-1} se atribuye a enlaces Ge-H [5.3], este pico está presente sólo en el espectro de la serie #1. Otra característica de esta serie, es que el pico relacionado con enlaces Ge-H en 560 cm^{-1} es superior al de la serie #2. La presencia de estos picos en los espectros de absorción en serie #1, nos indica que hay un mayor contenido de Ge en estas películas. Esto está de acuerdo con la razón de flujo más alta de GeH_4 utilizado para el depósito de las películas de la serie #1.

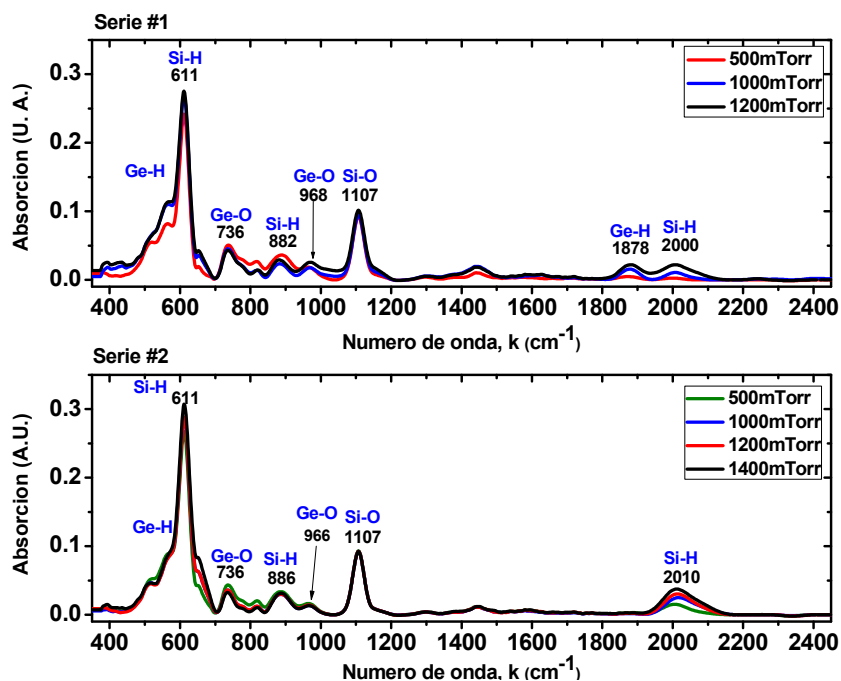


Figura 5.4 Espectro de absorción de las películas de la serie #1 y #2.

5.1.3 Transmittancia UV-Vis

Las mediciones de transmisión en el rango ultravioleta-visible (UV-Vis) del espectro electromagnético se realizaron para determinar el ancho de banda prohibida (E_g) de las películas depositadas. A partir de las mediciones de transmisión se obtiene un archivo de datos que se ha procesado en el software PUMA [5.4]. La Figura 5.5 muestra los gráficos de $(\alpha h\nu)^{1/2}$ de ambas series de películas de pm-Si_xGe_y:H. Se puede determinar E_g de las graficas de $(\alpha h\nu)^{1/2}$ por la extrapolación de la parte lineal de las curvas de absorción hacia el eje de energía. La interceptación indica el E_g de las películas depositadas. En la serie #1 los valores de E_g están en el rango 1.2-1.28 eV. En la serie #2 los valores de E_g están en el rango de 1.37-1.66 eV. Lo anterior esta en concordancia con el análisis de FTIR y con las condiciones de depósito, ya que las películas de la serie #1 tienen un mayor contenido de Ge con respecto a las películas de la serie #2.

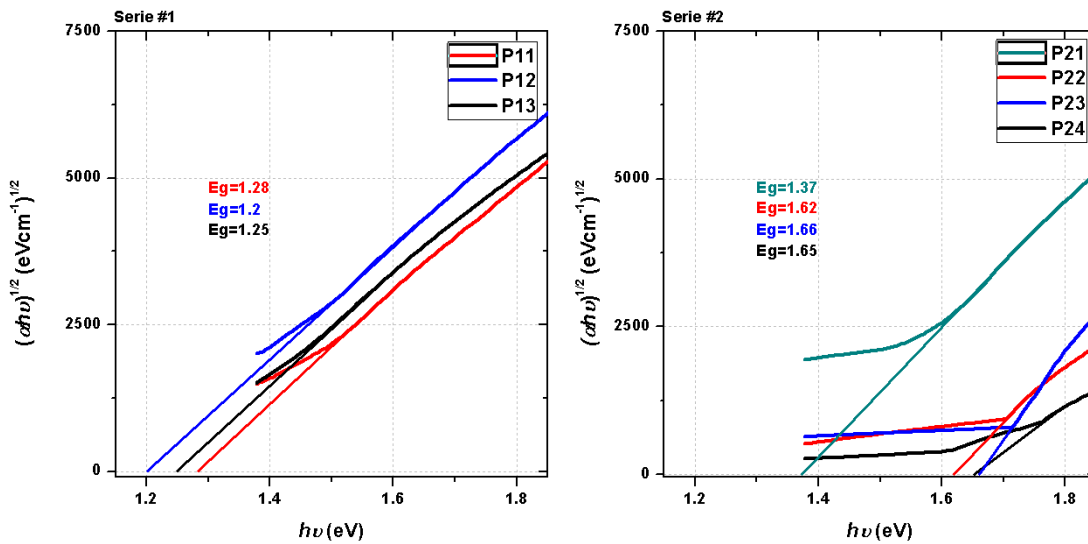


Figura 5.5 Absorción Vs. energía obtenida a partir de mediciones de UV-Vis para obtener el valor del ancho de banda prohibida (E_g).

5.1.4 Característica corriente-voltaje I(U) en función de la temperatura

La caracterización I(U) se realiza variando la temperatura de la muestra en el rango de 300-400 K en incrementos de 10 K. La muestra se coloca en un crióstato en condición de vacío. En la Figura 5.6, se muestra la dependencia de σ_{RT} en función de la presión de depósito. En la serie #1 la película depositada a 1000 mTorr presenta la mayor σ_{RT} , mientras que en la

serie #2 la película depositada a 1200 mTorr tiene la mayor la σ_{RT} . La presencia de nanocristales en las películas polimorfas se favorece al realizar los depósitos en el rango de presiones de 1000-1200 mTorr. Así pues, se puede corroborar que los nanocristales mejoran las propiedades de transporte en las películas polimorfas, como la movilidad de los portadores y por consiguiente su conductividad eléctrica.

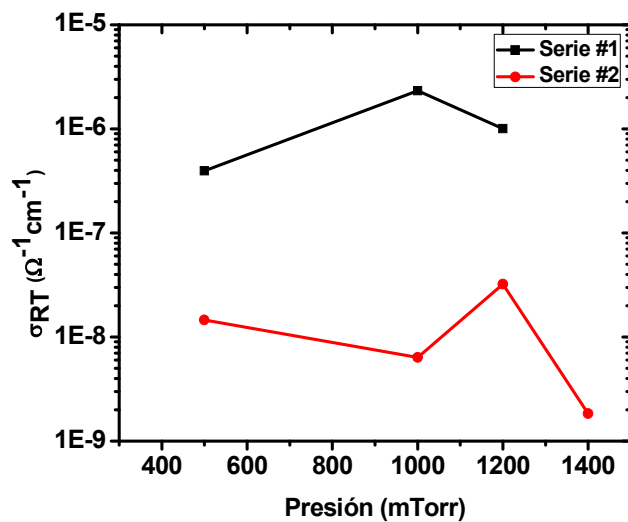


Figura 5.6 Conductividad a temperatura ambiente en función de la presión de la cámara de depósito.

En la Figura 5.6, se observa que las películas de la serie #1 (razón de gases precursores $\text{SiH}_4/\text{GeH}_4 = 1$) tienen mayor conductividad en casi dos órdenes de magnitud con respecto a las películas de la serie #2 (razón de gases precursores $\text{SiH}_4/\text{GeH}_4 = 9$). Esto en relación a un mayor contenido de germanio en las películas de la serie #1. Las mejores características para tener películas termo-sensibles con alta sensibilidad a la radiación IR, es tener valores altos de E_a y TCR. En la figura 5.7 se muestran las curvas de Arrhenius que muestra la variación de la conductividad en función de la temperatura $\sigma(T)$.

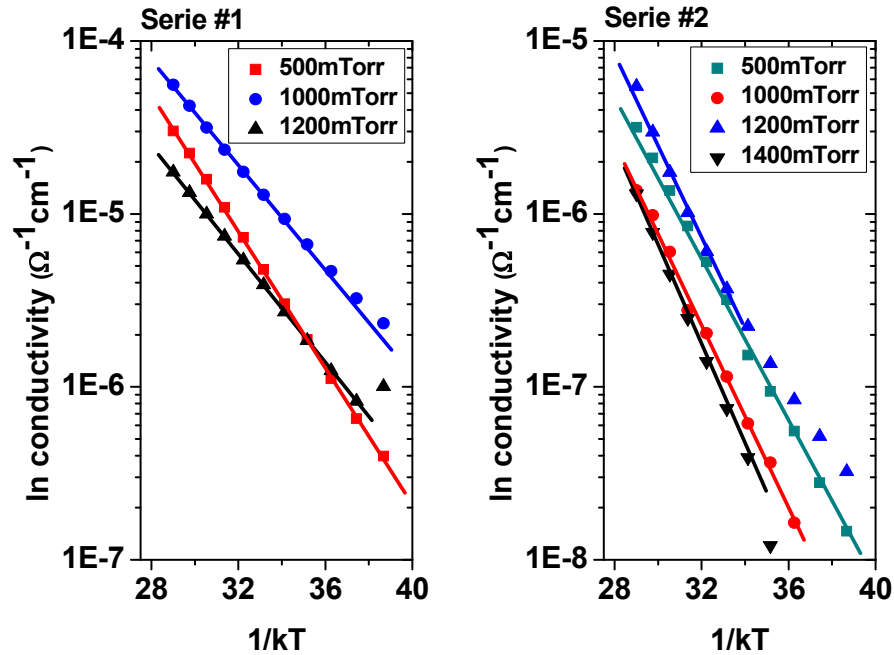


Figura 5.7 Graficas de Arrhenius de las películas de pm-Si_xGe_y:H.

Podemos determinar E_a partir de la pendiente de la conductividad, haciendo el ajuste de una línea recta. El TCR se puede conocer a partir de E_a . La Figura 5.8 muestra E_a y TCR en función de la presión de depósito para ambas series de películas depositadas. En la serie #1 los mayores valores de E_a y TCR se obtienen en la película depositada a 500 mTorr, mientras que en 1000 y 1200 mTorr E_a y TCR disminuye, mostrando un comportamiento contrario al normal. En las películas de la serie #2 se tienen valores más grandes de E_a y TCR que en las películas de la serie #1. Esto está relacionado con el hecho de que una mayor razón SiH₄/GeH₄ se utilizó para depósitos de películas de la serie #2. Como resultado, un mayor contenido de Si en las películas de la serie #2, aumenta los valores de E_a y TCR. Estos resultados se resumen en la tabla 5.3 y 5.4.

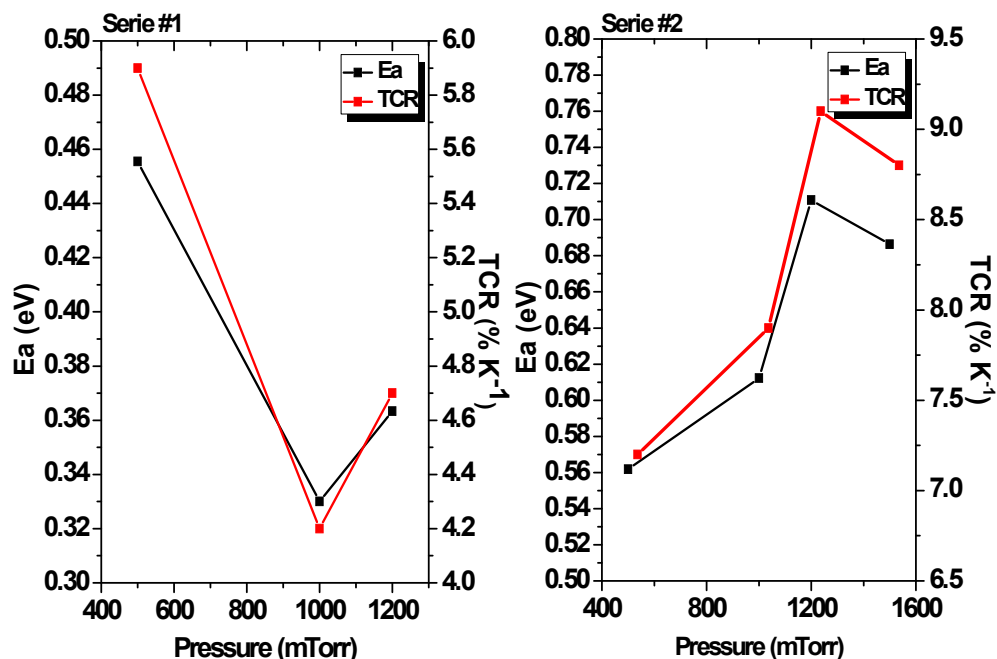


Figura 5.8 E_a y TCR determinados de las películas depositadas de las series #1 y #2.

Parámetros	Unidades	P11	P12	P13
Presión	mTorr	500	1000	1200
σ	$\Omega \cdot \text{cm}^{-1}$	3.96×10^{-7}	2.32×10^{-6}	1×10^{-6}
E_a	eV	0.45	0.33	0.36
TCR	%/K	5.9	4.2	4.7

Tabla 5.3 Características eléctricas de las películas depositadas de la serie #1

Parámetros	Unidades	P21	P22	P23	P24
Presión	mTorr	500	1000	1200	1400
σ	$\Omega \cdot \text{cm}^{-1}$	1.46×10^{-8}	6.37×10^{-9}	3.21×10^{-8}	1.83×10^{-9}
E_a	eV	0.56	0.61	0.71	0.68
TCR	%/K	7.2	7.9	9.1	8.7

Tabla 5.4 Características eléctricas de las películas depositadas de la serie #2

La caracterización muestra que las películas de pm-Si_xGe_y:H tienen propiedades muy atractivas para usarse como material termo-sensible en micro-bolómetros. Las películas de la serie #2 tienen valores muy grandes de E_a y TCR. Las películas de la serie #1 tienen

mayor conductividad y menor E_a y TCR respecto a la serie #2. En micro-bolómetros no se ha reportado el uso de materiales que tengan E_a y TCR tan altos como los que tienen estas películas.

5.2 Caracterización eléctrica de las películas de pm-Si_xGe_y:H utilizadas en el proceso de fabricación de los micro-bolómetros.

Durante el proceso de fabricación se usaron otras condiciones de depósito para cumplir con las condiciones de operación que nos fueron impuestas para el uso del sistema PECVD MVSystem, ya que las condiciones de depósito utilizadas para depositar las películas de pm-Si_xGe_y:H presentadas en la sección anterior, exceden la capacidad del sistema. El depósito para el proceso de fabricación se realiza en el mismo sistema de depósito pero la potencia y las razones de flujo de los gases precursores tienen que ajustarse para cumplir la relación de razones de flujo para producir nanocristales embebidos en la red amorfa. Las condiciones de depósito se muestran en la tabla 5.5. Debido a esto, sólo se realizó la caracterización eléctrica para conocer si E_a y TCR tienen valores tan altos como se observó en la caracterización anterior.

Proceso	Temperatura °C	Presión mTorr	Potencia Watts	SiH ₄ sccm	GeH ₄ sccm	H ₂ sccm	Tiempo minutos
P1	200	500	10	25	25	55	72
P2		1000		25	25	55	47
P3		1000		25	10	55	74

Tabla 5.5 Condiciones de depósito de películas de pm-Si_xGe_y:H utilizadas como material termo-sensible.

En la Figura 5.9 están las curvas de Arrhenius de las películas depositadas. Aquí determinamos los valores de E_a y TCR como fueron descritos con anterioridad. Las características eléctricas se resumen en la tabla 5.6, los valores más grandes ahora son $E_a = 0,62$ eV y $TCR = 8 \%K^{-1}$, correspondiente al proceso 3 (P3). Aunque la conductividad de la película P3 es relativamente baja, el TCR es alto, y esto hace a esta película muy atractiva para ser utilizado como material termo-sensible en micro-bolómetros y otros detectores térmicos.

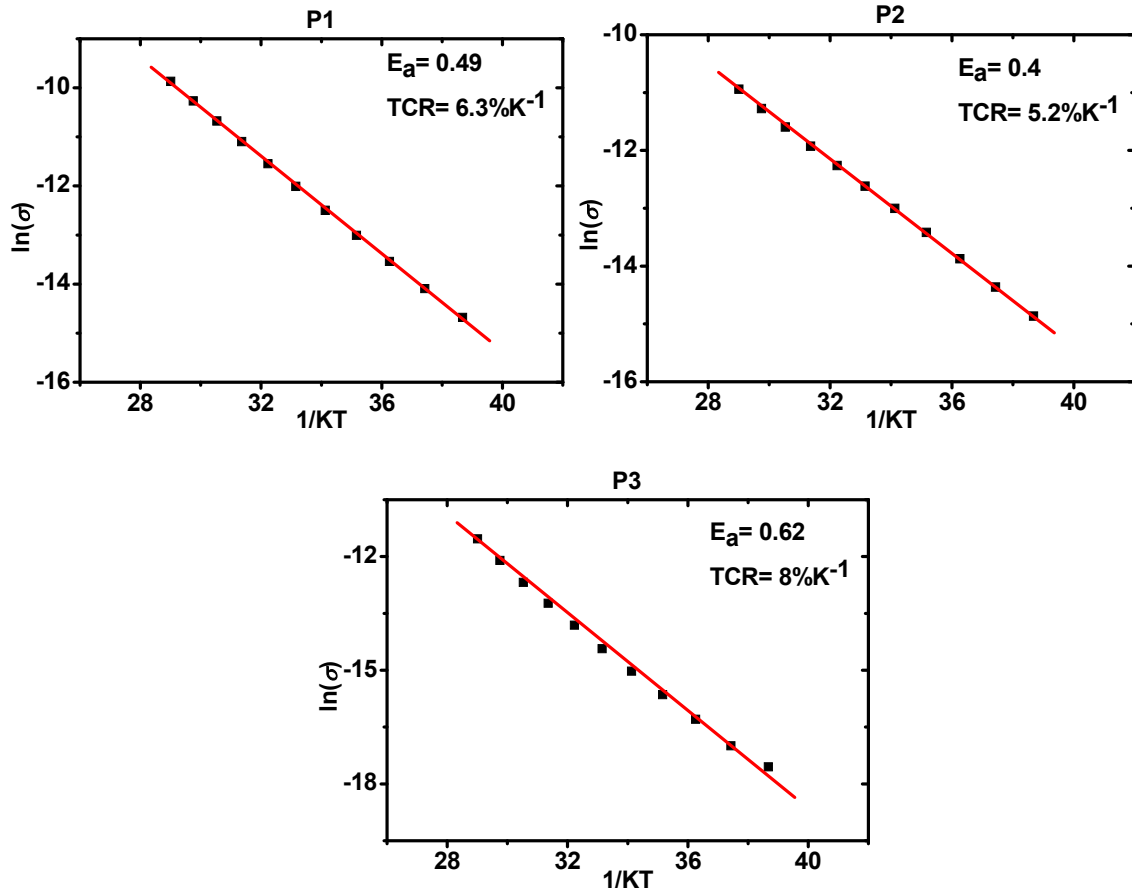
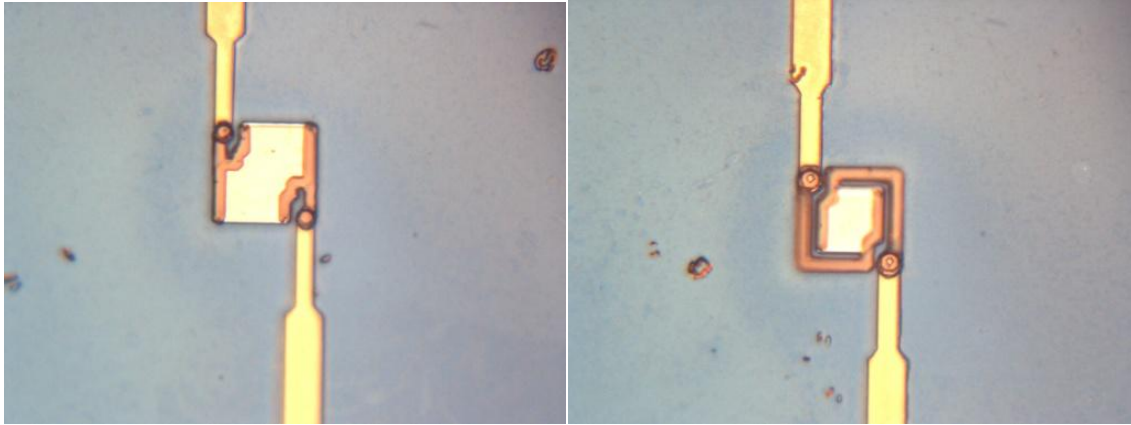


Figura 5.9 Curvas de Arrhenius para las películas depositadas en el proceso de fabricación de micro-bolómetros.

Process	E_a eV	TCR $\%K^{-1}$	σ_{RT} $\Omega^{-1}cm^{-1}$
P1	0.49	6.3	4.2×10^{-7}
P2	0.4	5.2	3.49×10^{-7}
P3	0.62	8	2.38×10^{-8}

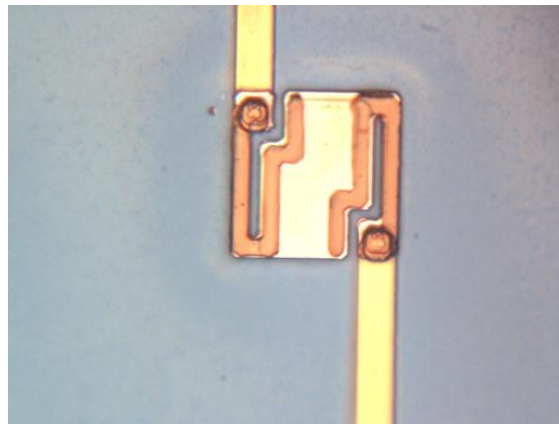
Tabla 5.6 Características eléctricas de las películas de pm-Si_xGe_y:H utilizadas en el proceso de fabricación de micro-bolómetros.

En las figuras 5.10 y 5.11 se muestran imágenes de los microbolómetros fabricados con la película de pm-Si_xGe_y:H depositados con las condiciones del proceso P3.



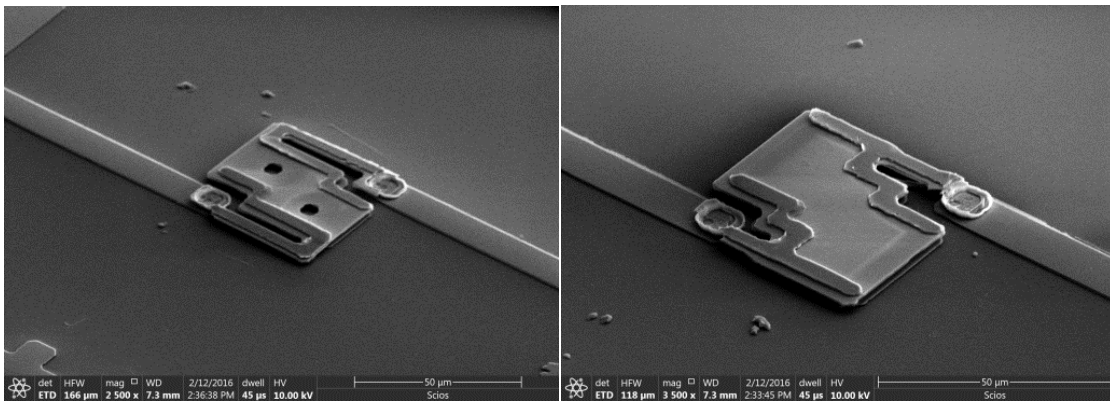
(a)

(b)



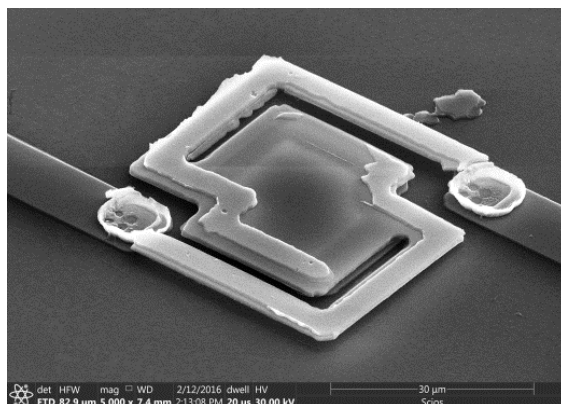
(c)

Figura 5.10 Micro-bolómetros resultantes del proceso de fabricación, (a) micro-bolómetro tipo-I de brazos cortos de $25 \times 25 \mu\text{m}^2$, (b) micro-bolómetro tipo-L y área de $30 \times 30 \mu\text{m}^2$, (c) micro-bolómetros tipo-I de brazos largos y área de $50 \times 50 \mu\text{m}^2$.



(a)

(b)



(c)

Figura 5.11 Imágenes obtenidas por SEM de diferentes micro-bolómetros fabricados. (a) micro-bolómetro tipo-I de brazos largos de $30 \times 30 \mu\text{m}^2$, (b) micro-bolómetro tipo-I de brazos cortos y área de $30 \times 30 \mu\text{m}^2$, (c) micro-bolómetro tipo-L y área de $30 \times 30 \mu\text{m}^2$.

5.3 Caracterización de micro-bolómetros

La caracterización de los micro-bolómetros se realiza para conocer la respuesta que tienen los micro-bolómetros cuando incide radiación IR sobre ellos. Las características más importantes por conocer es la respuesta en corriente y voltaje, la densidad espectral de ruido (NSD) y la detectividad. La caracterización se realizó en los micro-bolómetros que contienen la película de $\text{pm-Si}_x\text{Ge}_y\text{:H}$ del proceso P3 (tabla 5.7), es decir la película que tiene E_a y TCR más altos. Después de una inspección visual se determinó realizar la caracterización de los micro-bolómetros de los chips C4, C6, F7 y F10 que tienen la mayor cantidad de micro-bolómetros funcionales. Estos se muestran marcados en un tono gris oscuro en la figura 5.12.

5.3.1 Respuesta en corriente (\mathfrak{R}_i) a la radiación IR incidente

Para conocer la respuesta de los micro-bolómetros a la radiación IR se realiza la caracterización $I(U)$ en condiciones de oscuridad y bajo radiación IR. En la figura 5.13 muestra algunos resultados de respuesta en corriente de micro-bolómetros con área de $50 \times 50 \mu\text{m}^2$.

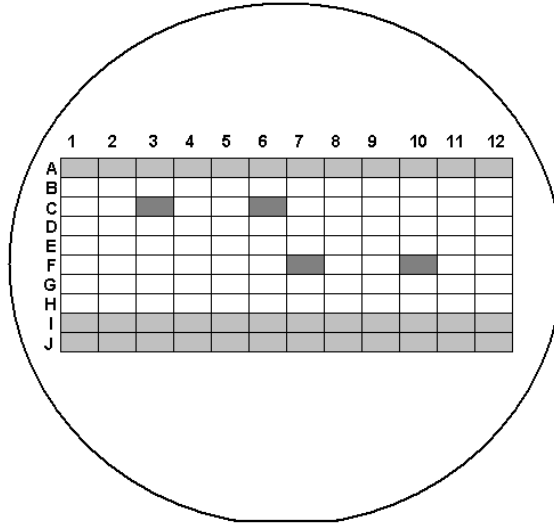


Figura 5.12 Mapa de oblea que contiene los chips fabricados.

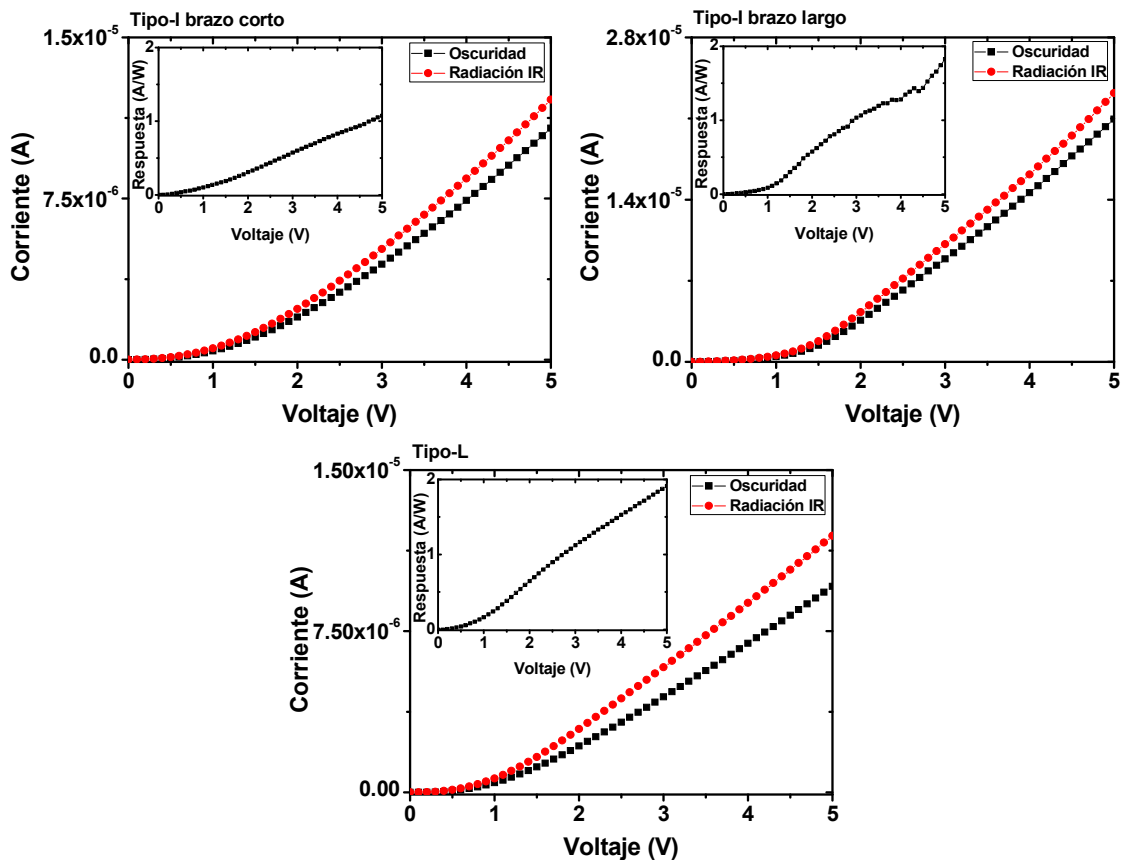


Figura 5.13 Resposta de corriente de micro-bolómetros con área de $50 \times 50 \mu\text{m}^2$.

La respuesta de los microbolómetros se observan en el recuadro interior de las graficas. En las gráficas vemos que la respuesta está entre 1-2 A/W y que el micro-bolómetro tipo-I de brazos de suspensión largos y el tipo-L son los que tienen mayor respuesta. En la figura 5.14 se muestran algunos resultados más micro-bolómetros con la misma área. También se observa que los micro-bolómetros con brazos de suspensión más largos son los que tienen mayores respuestas. Este comportamiento es esperado por el hecho de que las estructuras con los brazos de suspensión más largos tienen un mejor aislamiento térmico respecto al sustrato.

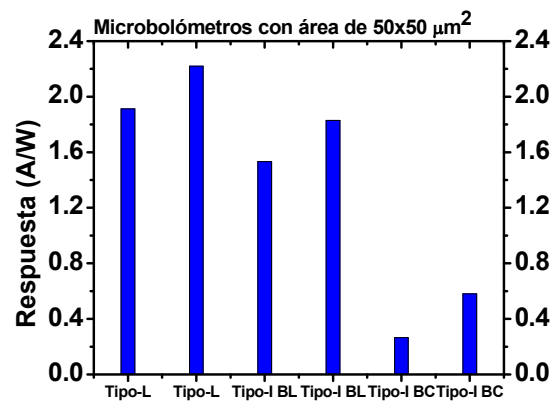


Figura 5.14 respuesta en corriente de micro-bolómetros con área de 50 x 50 μm^2 . BL significa Brazo Largo y BC significa Brazo Corto.

En la figura 5.15 se muestra la respuesta en corriente para micro-bolómetros con área de 30 x 30 μm^2 .

En estos micro-bolómetros tienen una respuesta en corriente mayor que para los micro-bolómetros de área más grande. Para micro-bolómetros con área de 30 x 30 μm^2 la respuesta es tan alta como 10 A/W. En la figura 5.16 se muestran más resultados para micro-bolómetros con esta área.

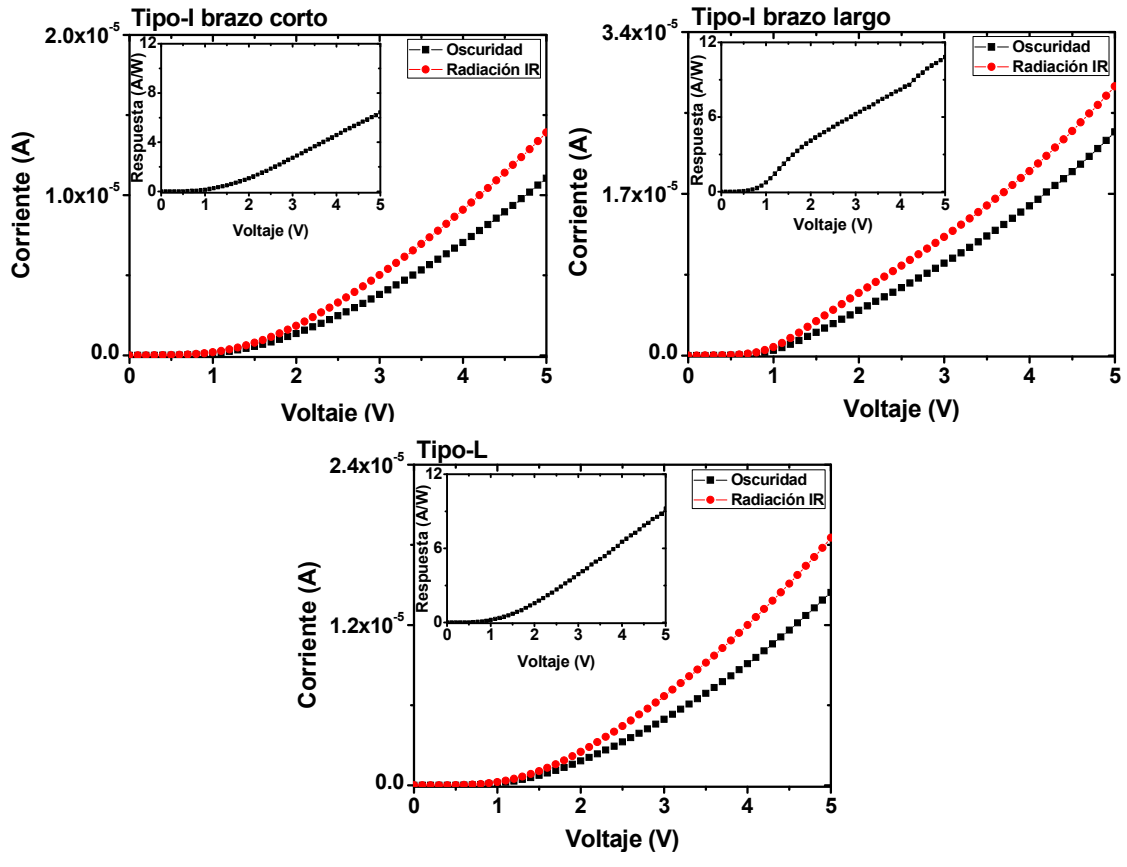


Figura 5.15 Respuesta de corriente de los tres tipos de micro-bolómetros con área de $30 \times 30 \mu\text{m}^2$.

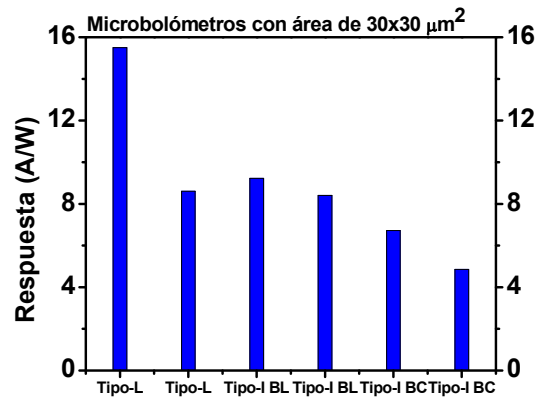


Figura 5.16 respuesta en corriente de micro-bolómetro con área de $30 \times 30 \mu\text{m}^2$. BL significa Brazo Largo y BC significa Brazo Corto.

En la figura 5.17 se muestran la respuesta en corriente de algunos micro-bolómetros con área de $25 \times 25 \mu\text{m}^2$.

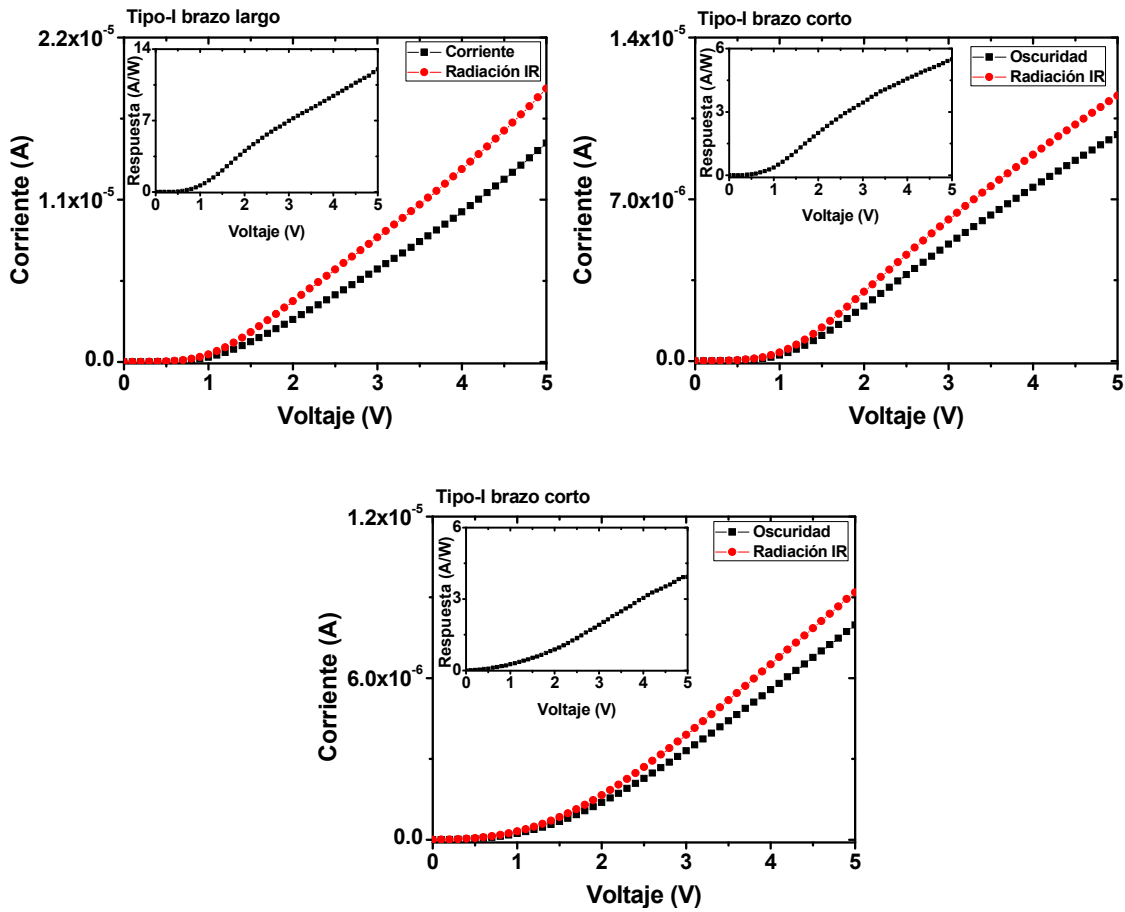


Figura 5.17 Respuesta de corriente de los tres tipos de micro-bolómetros con área de $25 \times 25 \mu\text{m}^2$.

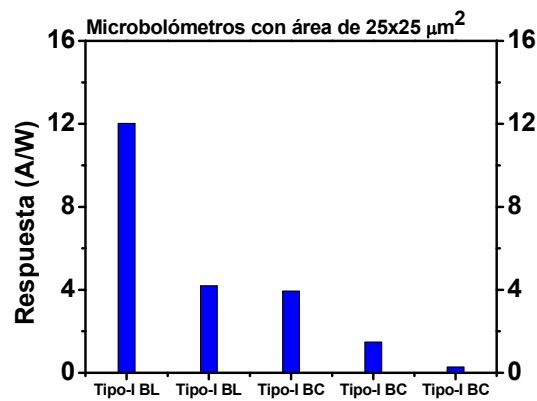


Figura 5.18 respuesta en corriente de micro-bolómetro con área de $25 \times 25 \mu\text{m}^2$. BL significa Brazo Largo y BC significa Brazo Corto.

En una de las estructuras tipo-I de brazos de suspensión largos se midió el valor más alto de respuesta en corriente, aunque en general su respuesta fue menor que para los micro-bolómetros con área de $30 \times 30 \mu\text{m}^2$. No obstante, su respuesta en corriente es mayor que para las estructuras de área de $50 \times 50 \mu\text{m}^2$. En la figura 5.18 se muestran más resultados para micro-bolómetros de la misma área.

5.3.2 Respuesta en voltaje (R_V) a la radiación incidente

Para conocer la respuesta en voltaje de los micro-bolómetros se realiza la diferencia de voltaje cuando el valor de corriente bajo radiación IR sea igual a la corriente en oscuridad, se calcula la diferencia de voltaje (ΔV). Conociendo la potencia incidente, se determina la respuesta en voltaje de los micro-bolómetros (Ecuación 4.6). Tomamos como referencia la corriente en oscuridad cuando se polariza el micro-bolómetro a 5 V. La respuesta en voltaje para los mismos micro-bolómetros con área de $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ están en la figura 5.19.

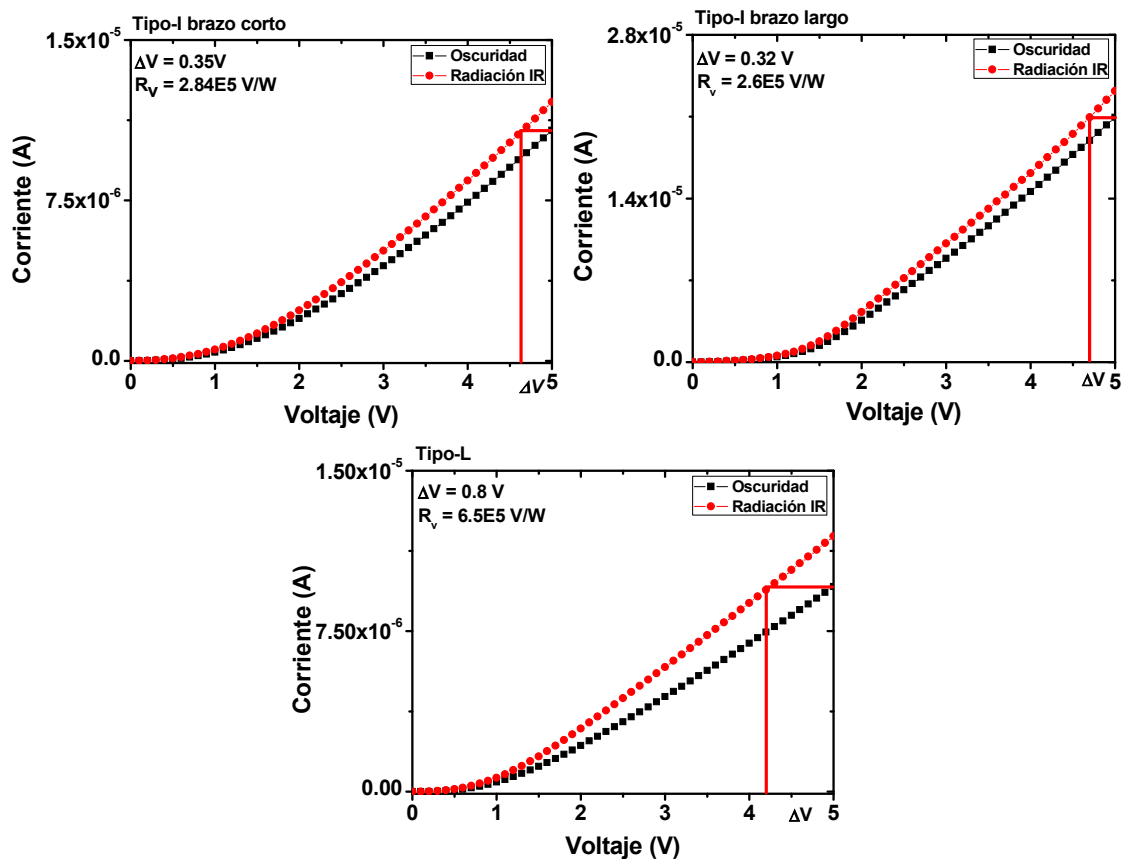


Figura 5.19 Respuesta en voltaje de los tres tipos de micro-bolómetros con área de $50 \times 50 \mu\text{m}^2$.

La respuesta en voltaje es más grande en el micro-bolómetro tipo-L. El valor de respuesta en voltaje más alto es en un micro-bolómetro de tipo-L que es de 6.5×10^5 V/W. En la figura 5.20 se muestran algunos resultados más micro-bolómetros con la misma área, pero aquí se observa que la respuesta en voltaje es más grande si los brazos de suspensión son más largos.

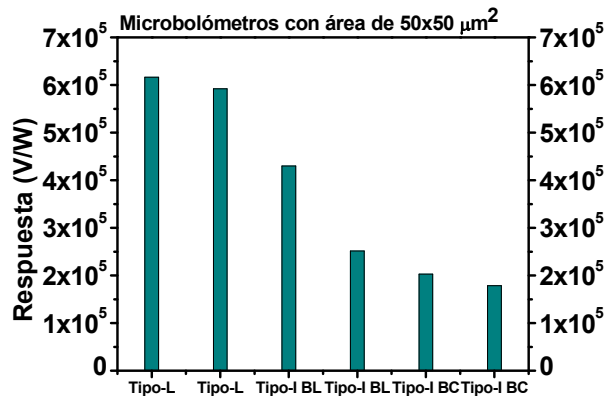


Figura 5.20 respuesta en voltaje de micro-bolómetro con área de $50 \times 50 \mu\text{m}^2$. BL significa Brazo Largo y BC significa Brazo Corto.

En la figura 5.21 se muestra la respuesta en voltaje para micro-bolómetros con área de $30 \times 30 \mu\text{m}^2$.

En estos resultados se observa que la respuesta en voltaje es casi un orden de magnitud mayor a diferencia de los micro-bolómetros de área de $50 \times 50 \mu\text{m}^2$. En la figura 5.22 se muestran más resultados para micro bolómetros y la respuesta más alta es para un micro-bolómetro de tipo-I de brazo largo que es de casi 2×10^6 V/W. Aunque no podemos ver que la tendencia sea que hay mayor respuesta con mayor longitud de los brazos de soporte.

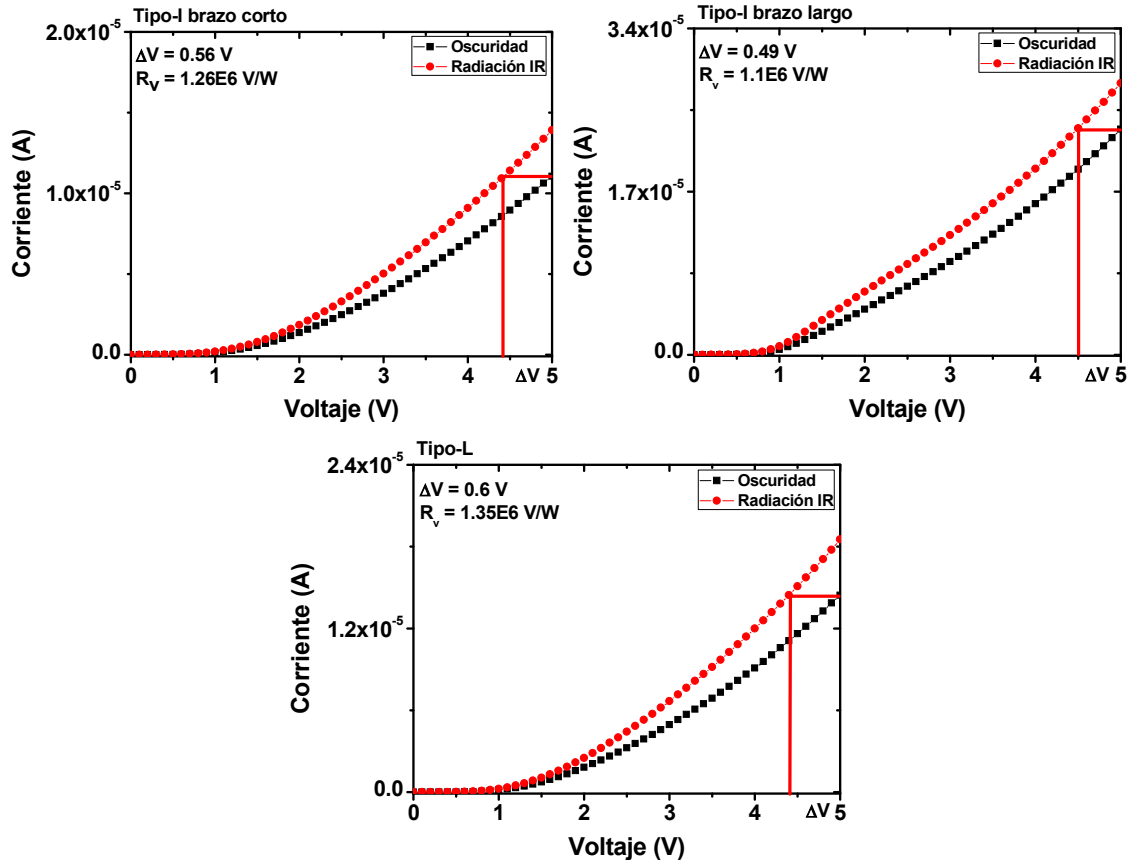


Figura 5.21 Respuesta en voltaje de los tres tipos de micro-bolómetros con área de $30 \times 30 \mu\text{m}^2$.

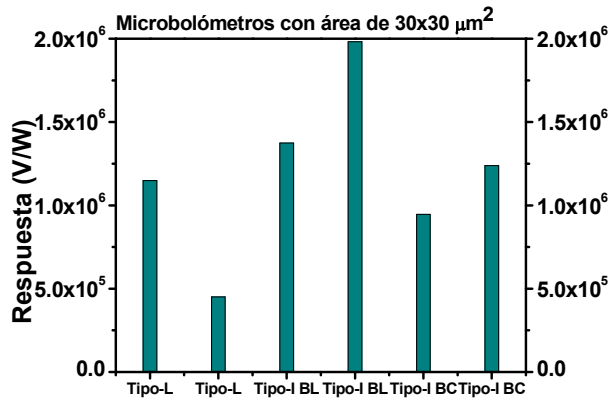


Figura 5.22 respuesta en voltaje de micro-bolómetro con área de $30 \times 30 \mu\text{m}^2$. BL significa Brazo Largo y BC significa Brazo Corto.

En la figura 5.23 se muestran la respuesta en corriente de algunos micro-bolómetros con área de $25 \times 25 \mu\text{m}^2$.

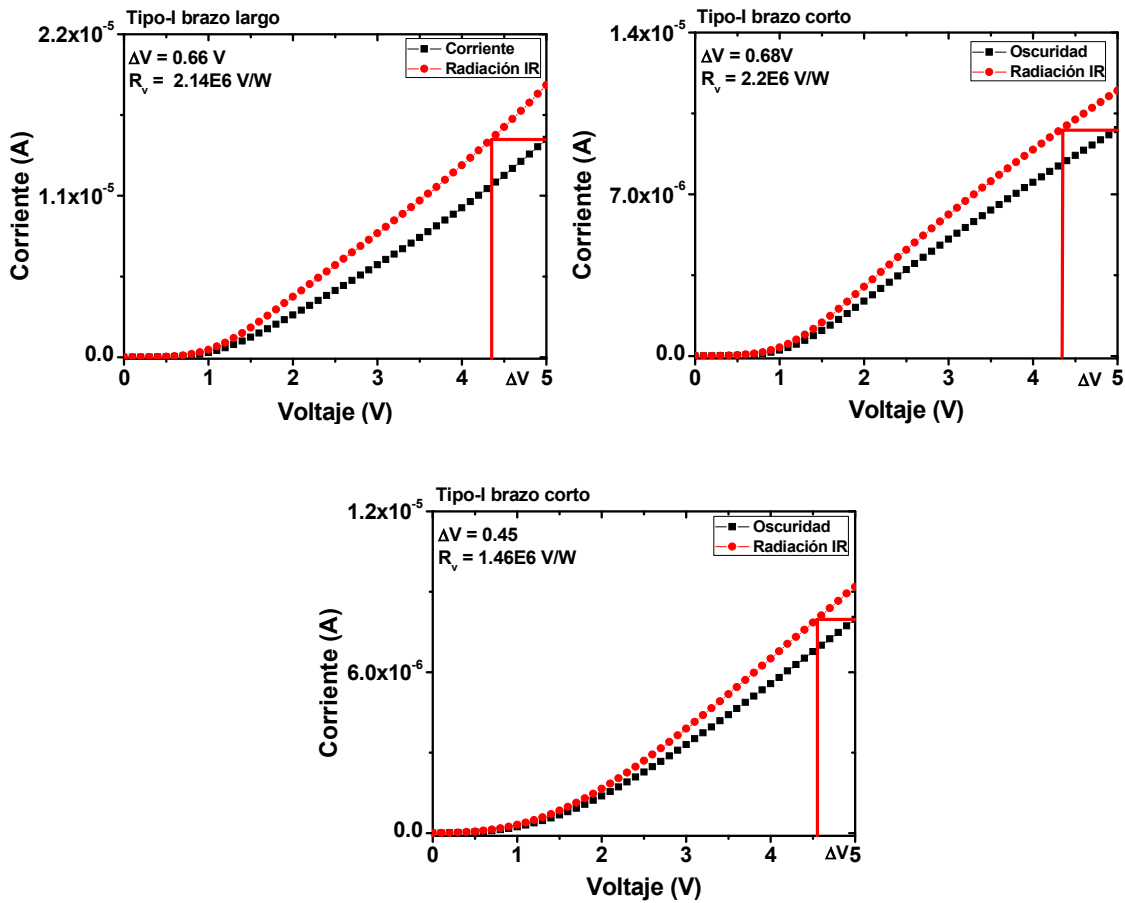


Figura 5.23 Respuesta en voltaje de los tres tipos de micro-bolómetros con área de $25 \times 25 \mu\text{m}^2$.

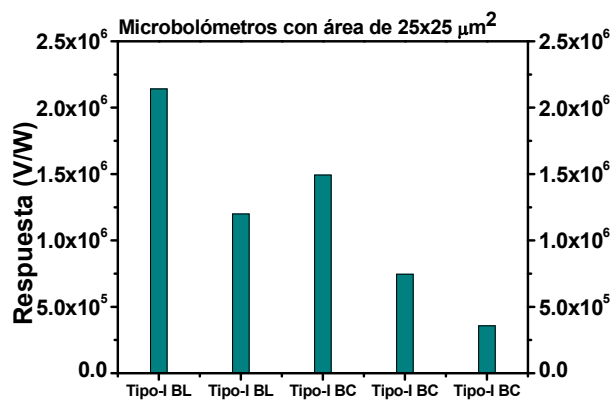


Figura 5.24 respuesta en voltaje de micro-bolómetro con área de $25 \times 25 \mu\text{m}^2$. BL significa Brazo Largo y BC significa Brazo Corto.

De acuerdo a las graficas de respuesta en voltaje, no se puede argumentar que con brazos de suspensión largos nos dé una mayor respuesta, aunque este es el comportamiento esperado. Lo mismo se observa para las demás estructuras caracterizadas como se ve en la figura 5.24. La respuesta más alta se encuentra en un par de micro-bolómetros, las dos estructuras son de tipo-I pero con diferente longitud de brazos de soporte, la respuesta en ambos casos es de 2.2×10^6 V/W.

Los micro-bolómetros con área de $30 \times 30 \mu\text{m}^2$ y $25 \times 25 \mu\text{m}^2$ tiene mayor respuesta tanto en corriente como en voltaje que los micro-bolómetros con área de $50 \times 50 \mu\text{m}^2$.

5.3.3 Mediciones de ruido en micro-bolómetros

Esta caracterización resultó ser la más larga en cuestión a tiempo empleado, por lo que se realizó a un menor número de micro-bolómetros. El procedimiento de la caracterización de ruido se realizó tal como fue descrito en la sección 4.4. En la figura 5.25 se muestra la densidad espectral de ruido para micro-bolómetros con área de $50 \times 50 \mu\text{m}^2$.

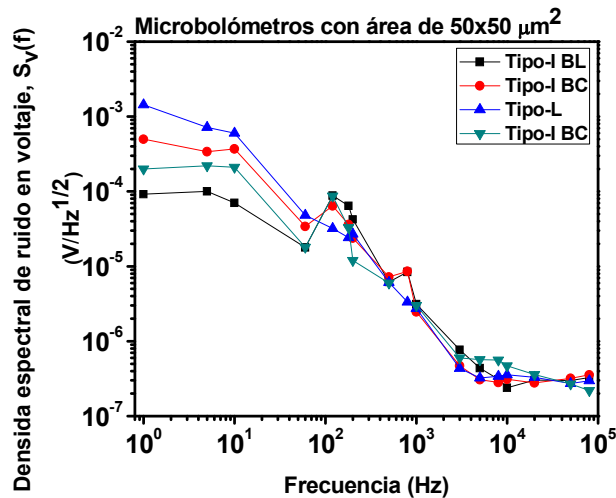


Figura 5.25 Densidad espectral de ruido para micro-bolómetros con área de $50 \times 50 \mu\text{m}^2$.

Estos resultados nos muestran que el ruido afecta a los micro-bolómetros a bajas frecuencias. El comportamiento del ruido no muestra una tendencia en comportamiento ya que a bajas frecuencias el ruido está en un intervalo de hasta un orden de magnitud. La

figura 5.26 muestra la densidad espectral de ruido para los micro-bolómetros con área de $30 \times 30 \mu\text{m}^2$.

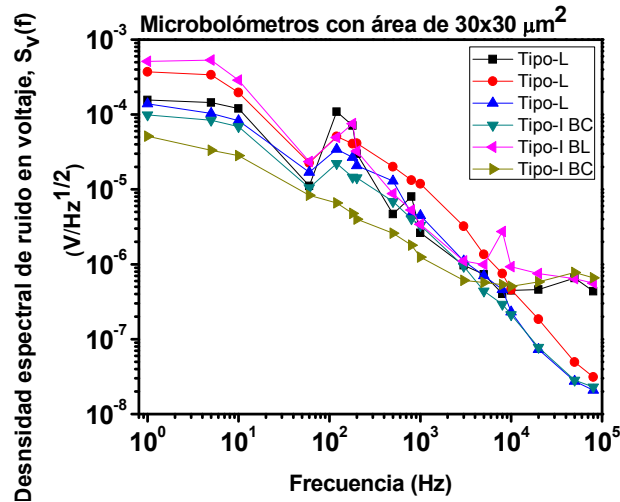


Figura 5.26 Densidad espectral de ruido para micro-bolómetros con área de $30 \times 30 \mu\text{m}^2$.

De la misma manera no se nota una tendencia para cada tipo de estructura de micro-bolómetro, inclusive el ruido medido a altas frecuencias ya no sigue un comportamiento decreciente para algunas estructuras. En la figura 5.27 se muestran los resultados de medición de ruido para los micro-bolómetros más pequeños con área de $25 \times 25 \mu\text{m}^2$.

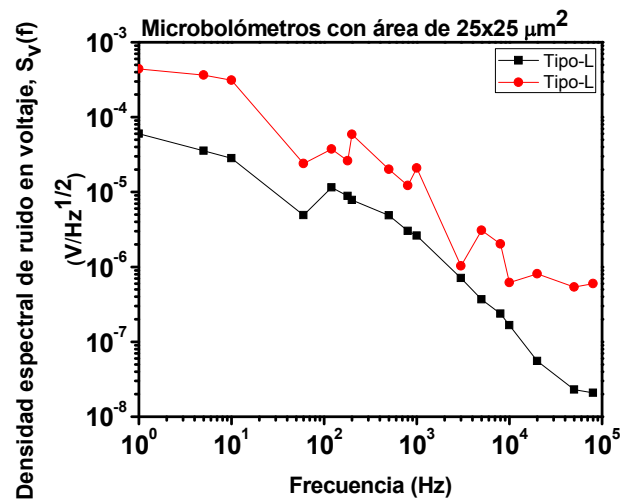


Figura 5.27 Densidad espectral de ruido para micro-bolómetros con área de $25 \times 25 \mu\text{m}^2$.

5.3.4 Detectividad

La detectividad se calcula a partir de la respuesta en corriente, también con la respuesta en voltaje, y la densidad espectral de ruido. La detectividad se determinó para los micro-bolómetros donde se midió la densidad espectral de ruido. Los datos de detectividad presentados en las siguientes figuras corresponden los mismos micro-bolómetros mostrados en los histogramas de respuesta en corriente y voltaje. La figura 5.28 muestra los valores calculados de detectividad para los micro-bolómetros de $50 \times 50 \mu\text{m}^2$.

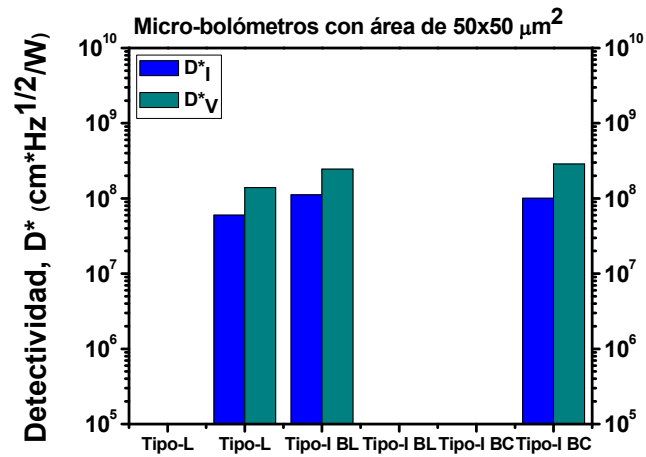


Figura 5.28 Detectividad de los micro-bolómetros con área de $50 \times 50 \mu\text{m}^2$.

Para estos micro-bolómetros la detectividad es prácticamente la misma, tanto para corriente y voltaje. En la figura 5.29 se muestran los datos de detectividad para micro-bolómetros con área de $30 \times 30 \mu\text{m}^2$.

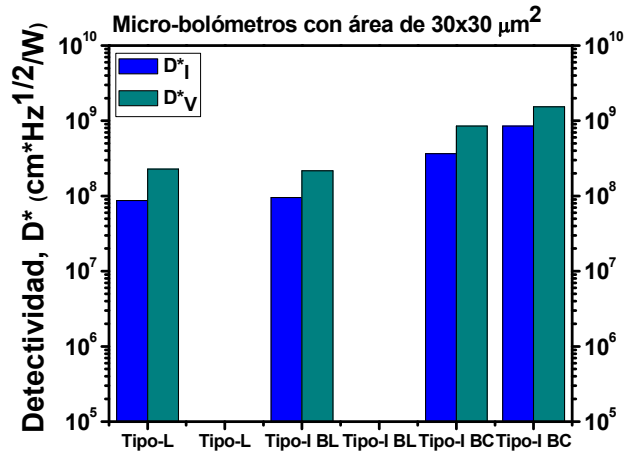


Figura 5.29 Detectividad de los micro-bolómetros con área de 30 x 30 μm^2 .

De nuevo la detectividad en voltaje es similar a la detectividad en corriente. Estos valores muestran que la detectividad de los micro-bolómetros de brazos cortos es un poco mayor a las otras estructuras. Finalmente se muestran los resultados de detectividad para los micro-bolómetros de 25 x 25 μm^2 en la figura 5.30. Donde el comportamiento es similar entre estos micro-bolómetros. Estos resultados tienen influencia del ruido, y como vimos en la medición de la densidad espectral de ruido, este afecta de manera muy diferente a cada estructura y tamaño de micro-bolómetro.

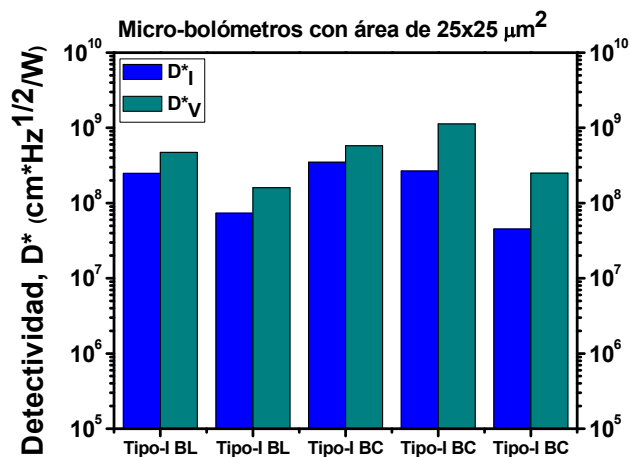


Figura 5.30 Detectividad de los micro-bolómetros con área de 25 x 25 μm^2 .

5.3.5 NETD

Conocer la NETD nos permiten tener una idea más clara de cuál es la sensibilidad de los microbolómetros. La NETD se determinó usando los valores determinados de la respuesta en voltaje y la medición de la NSD. En este caso suponemos una $F = 1$, y los valores de $\phi_{\lambda_1-\lambda_2} = 0.98$ que es la transmisión del sistema óptico y $\left(\frac{\Delta P}{\Delta T}\right)_{\lambda_1-\lambda_2} = 2.624 \left[\frac{W}{K m^2}\right]$ que son valores típicos en sistemas de captación de imágenes en infrarrojos. Valores pequeños de la NETD nos indica que los micro-bolómetros son más sensibles. Valores de la NETD considerados como dispositivos con buena sensibilidad son menores a 100 mK. Dispositivos con NETD por encima de 200 mK se consideran con muy pobre sensibilidad y sin funcionalidad [5.24]. La figura 5.31 nos muestra los valores determinados de la NETD para microbolómetros con área de $50 \times 50 \mu m^2$. Podemos observar que para este caso, la NETD está por debajo de 50 mK, que es un valor de sensibilidad muy competitivo con los dispositivos comerciales. Valores de NETD para arreglos de micro-bolómetros comerciales se muestran en la tabla 1.1.

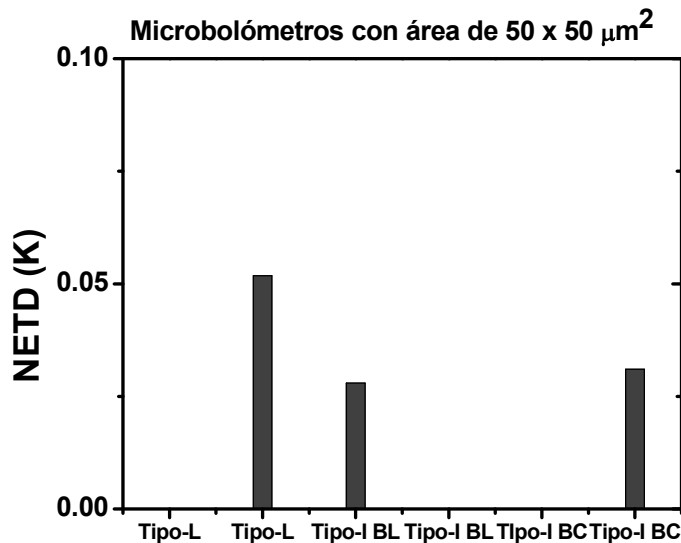


Figura 5.31 NETD de los micro-bolómetros con área de $50 \times 50 \mu m^2$.

En la figura 5.32 se muestran los valores de la NETD para micro-bolómetros de $30 \times 30 \mu m^2$. Nuevamente, se muestran valores de la NETD alrededor a 50 mK y menores.

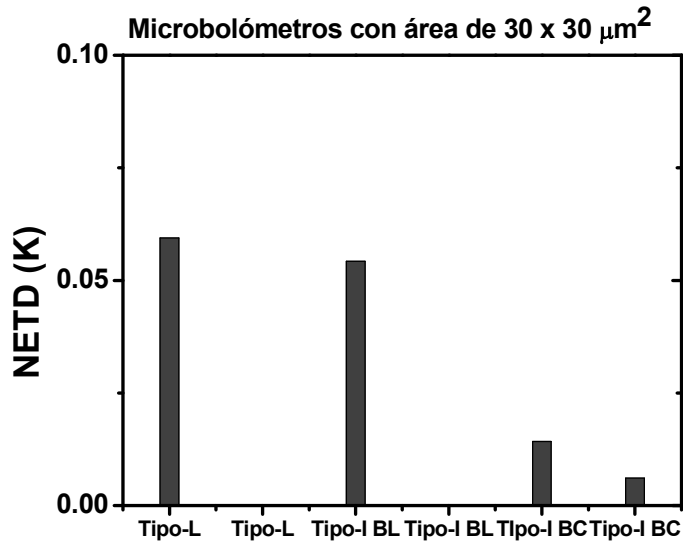


Figura 5.32 NETD de los micro-bolómetros con área de 30 x 30 μm^2 .

Finalmente, en la figura 5.33 se muestran los valores de la NETD para los con área de micro-bolómetros de 25 x 25 μm^2 . Aquí podemos ver que dos de los micro-bolómetros tienen valores de la NETD cercanos y superiores a los 100 mK, que si bien los hace menos sensibles, son dispositivos que muestran buena sensibilidad. En estos dispositivos vemos también sensibilidades menores a 50 mK.

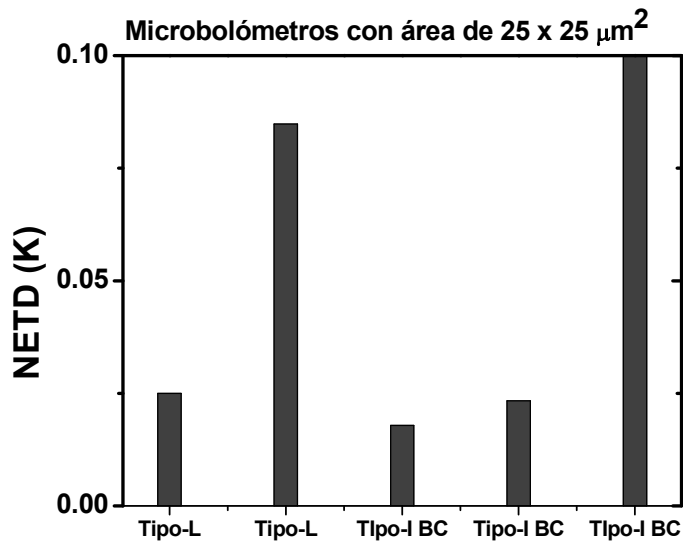


Figura 5.33 NETD de los micro-bolómetros con área de 25 x 25 μm^2 .

5.4 Discusión de resultados

5.4.1 Películas de pm-Si_xGe_y:H

En la primera parte de este trabajo, se ha realizado el depósito y la caracterización de películas de silicio-germanio polimorfo (silicio-germanio con nanocristales embebidos en la matriz amorfa). Hemos realizado el estudio de las propiedades de las películas bajo la influencia de los parámetros de depósito, como la presión en la cámara de depósito y también las razones de flujo de los gases precursores (SiH₄/GeH₄). El TCR obtenido de estas películas es mayor para las películas de la serie #2 y están en el rango de 7.2-9.1 %K⁻¹. Las películas de la serie #1 tienen valores de TCR menores, pero tienen mayor conductividad (hasta dos órdenes de magnitud). Grandes valores de TCR son preferidos para fabricar dispositivos de alta respuesta. Y las películas del proceso P23 son las que tienen el TCR más alto de 9.1 %K⁻¹. Estas películas son atractivas para usarse como material termo-sensible en micro-bolómetros.

En la tabla 5.7 se muestra el valor de TCR comparado con algunos materiales más utilizados como película termo-sensible encontrados en la literatura.

Material	TCR %K ⁻¹	Referencia
VOx	2.1-2.3	[5.5, 5.6]
Pt	0.13-0.23	[5.7, 5.8]
YBaCuO	2.8-3.5	[5.5, 5.6, 5.8]
a-Si:H	>10	[5.9, 5.10]
a-Si:H,B	2.8-3.4	[5.5, 5.11]
a-Ge:H	2.6	[5.5]
pm-Si _x Ge _y :H	8	Este trabajo

Tabla 5.7 Valores típicos de TCR para materiales usados como película termos-sensible.

Podemos ver que las películas de pm-Si_xGe_y:H tienen ventajas sobre películas delgadas basadas en silicio amorfo a-Si:H y películas de a-Si:H dopadas con boro, debido a sus valores muy altos de TCR con valores moderados de σ_{RT} y, además, debido a la posibilidad

de adaptar esas características para requerimientos específicos. Y ventajas con otros materiales ya que además de tener valores de TCR más altos, este material es compatible con el proceso de fabricación CMOS y que fue realizado a bajas temperaturas.

5.4.2 Micro-bolómetros basados en pm-Si_xGe_y:H

Se realizó el diseño y la fabricación de micro-bolómetros basados en películas de pm-Si_xGe_y:H. Se realizó el diseño de tres tipos de estructuras de micro-bolómetros con tres diferentes áreas, con la finalidad de conocer el rendimiento de cada tipo diferente de dispositivos. De los resultados obtenidos de la caracterización tanto de la respuesta en corriente y la respuesta en voltaje, podemos ver que los micro-bolómetros en las que sus estructuras que tienen una mayor longitud de los brazos de suspensión, que son los tipo-L y posteriormente los de tipo-I de brazos largos, son las que muestran una mayor respuesta. Esto nos dice que el aislamiento térmico es mayor, y por tanto, más eficiente para los micro-bolómetros que tienen mayores longitudes de brazos de suspensión y en consecuencia muestran una mayor respuesta. Cada estructura de micro-bolómetro se diseñó de tres tamaños diferentes $50 \times 50 \mu\text{m}^2$, $30 \times 30 \mu\text{m}^2$ y $25 \times 25 \mu\text{m}^2$. Para micro-bolómetros con área de $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ la respuesta en corriente típica estuvo en un rango de 1-2 A/W, mientras que para micro-bolómetros de área de $30 \times 30 \mu\text{m}^2$ la respuesta en corriente estuvo por encima de los 6 A/W llegando a valores cercanos a los 16 A/W, que es una respuesta muy alta para este tipo de dispositivos. A su vez, los micro-bolómetros con área más pequeña ($30 \times 30 \mu\text{m}^2$ y $25 \times 25 \mu\text{m}^2$) tienen una mayor respuesta. Este comportamiento no se mostró para el caso de los micro-bolómetros con área de $25 \times 25 \mu\text{m}^2$, donde en algunos dispositivos se obtuvo una respuesta en corriente de hasta 12 A/W, pero en general, la respuesta de corriente fue menor respecto a los micro-bolómetros de $30 \times 30 \mu\text{m}^2$. La respuesta en voltaje tiene un comportamiento similar a la respuesta en corriente, es decir, los micro-bolómetros con menor área son los de mejor respuesta y también las que tienen brazos de suspensión más largos. La respuesta de los micro-bolómetros no fue completamente una respuesta lineal, más bien, se asemeja a la respuesta típica de un contacto rectificador. La respuesta tan alta que muestran los micro-bolómetros, se debe principalmente a la alta absorción de la radiación IR incidente, mejorada por la cavidad resonante formada por la membrana suspendida y el espejo reflector. Además, de que

tienen una menor masa térmica y que el aislamiento térmico es más eficiente, que son factores fundamentales en las respuesta de estos dispositivos. También la alta sensibilidad se debe al alto valor de TCR de la película termo-sensible, y puede estar relacionada a la respuesta de tipo rectificadora como la que se presenta en diodos, que sin ser planificado, se pudo obtener contactos del tipo rectificadores (Barrera tipo Schottky) entre los electrodos de titanio y el pm-Si_xGe_y:H. Con respecto a la caracterización de la densidad espectral de ruido que afecta a los micro-bolómetros, se puede observar que el ruido afecta principalmente a bajas frecuencias y que no hay una tendencia en el comportamiento de la densidad espectral de ruido para algún tipo de estructura ni de tamaño. Finalmente la D^* de los dispositivos se encuentra en el rango de 10^7 - 10^9 cmHz^{1/2}W⁻¹ en todos los casos. En general, se puede decir que los micro-bolómetros muestran altos valores de D^* . No se observa una tendencia hacia algún tipo de micro-bolómetro o tamaño de la estructura que nos muestre que tenga mayor D^* . De la misma forma, la NETD no muestra una clara tendencia por algún tipo de estructura o tamaño, pero si se puede ver, que las estructuras con menor área son las que tienen la NETD más pequeña, en consecuencia, son dispositivos más sensibles. De la gran mayoría de los micro-bolómetros donde se determinó la NETD el sus valores estuvieron por debajo de los 50 mK, que los hace comparables e incluso mejores que a dispositivos comerciales.

En la tabla 5.8 se muestra un comparativo con diferentes micro-bolómetros fabricados y reportados en la literatura. Los micro-bolómetros fabricados en este trabajo tienen respuesta en voltaje y respuesta en corriente más altos que los presentados en la literatura.

Película termo-sensible	TCR %K⁻¹	R_I A/W	R_V V/W	D* (voltaje) cmHz^{1/2}W⁻¹	D* (corriente) cmHz^{1/2}W⁻¹	NETD mK	Ref.
VOx	2	-	-	-	-	-	[5.12, 5.13]
Poly-SiGe	2	-	2 x 10 ⁴	2.3 x 10 ⁹	-	-	[5.14]
YBCO	3.4	-	6.1 x 10 ⁴	1.2 x 10 ⁸	-	-	[5.15, 5.16]
Ge_xSi_{1-x}O_y	4.2	-	1.6 x 10 ⁶	6.7 x 10 ⁸	-	-	[5.17]
a-Si:H,B	2.8	-	1 x 10 ⁶	-	-	-	[5.18-5.21]
Nano VOx	5.6	-	9 x 10 ⁵	1 x 10 ⁹	-	-	[5.22]
Pm-Si_xGe_y:H	6.6	3.2	9.2 x 10 ⁵	2 x 10 ⁹	-	-	[5.23]
Pm-Si_xGe_y:H	8	15.5	1.15 x 10 ⁶	8.73 x 10 ⁷	2.28 x 10 ⁸	59.4	Este Trabajo
Pm-Si_xGe_y:H	8	12.02	2.14 x 10 ⁶	2.49 x 10 ⁸	4.71 x 10 ⁸	25	Este Trabajo
Pm-Si_xGe_y:H	8	8.4	1.98 x 10 ⁶	8.5 x 10 ⁸	1.54 x 10 ⁹	6	Este Trabajo

Tabla 5.8 Análisis de micro-bolómetros en la literatura.

Referencias

- [5.1] A. Shaha, E. Vallat-Sauvain, P. Torres et al., "Intrinsic microcrystalline silicon ($\mu\text{-Si:H}$) deposited by VHF-GD (very high frequency-glow discharge): a new material for photovoltaics and optoelectronics," *Materials Science and Engineering B*, vol. 69-70, pp. 219–226, 2000.
- [5.2] X. Liao, H. Povolny, P. Agarwal, and X. Deng, Raman and IR study of narrow bandgap a-SiGe and c-SiGe films deposited using different hydrogen dilution, *Photovoltaic Specialists Conference 2002. Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE*, pp. 1150-1153, May 2002.
- [5.3] A. Kosarev, A. Torres, Y. Hernandez, R. Ambrosio, C. Zuniga, Silicon-germanium films deposited by low-frequency plasma-enhanced chemical vapor deposition: Effect of H_2 and Ar dilution, *J. Mater. Res.* Vol. 21, No. 1, 2006.
- [5.4] E. G. Birgin, I. Chambouleyron, and J. M. Martínez, Estimation of optical constants of thin films using unconstrained optimization, *Journal of Computational Physics* 151, pp. 862-880, 1999.
- [5.5] R. Ambrosio. Research on fabrication processes for uncooled microbolometer based on plasma deposited films. Ph.D. Thesis, National Institute for Astrophysics, Optics and Electronics, 2005
- [5.6] M. M. Rana. Rf Sputtered $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ and $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}\text{O}_y$ Thin Films for Uncooled Infrared Detectors. Ph.D. Thesis, The University of Texas at Arlington, 2007
- [5.7] S. Yoneoka, M. Liger, G. Yama, R. Schuster, F. Purkl, J. Provine, F. B. Prinz, R. T. Howe, T. W. Kenny. ALD-METAL UNCOOLED BOLOMETER. MEMS Cancun, MEXICO, 2011
- [5.8] A. Mahmood. Device level vacuum packaged microbolometers on flexible substrates. Ph.D. Thesis, The University of Texas at Arlington, 2006
- [5.9] A. J. Syllaios, T. R. Schimert, R. W. Gooch, W. L. McCardel, B. A. Ritchey, J. H. Tregilgas. Amorphous Silicon Microbolometer Technology. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, 609, 2000

- [5.10] R. A. Street. Hydrogenated Amorphous Silicon. 1991
- [5.11] H. Y. Kim, K. M. Kim, B. I. Kim, W. S. Jang, T. H. Kim, T. Y. Kang. Mechanical Robustness of FPA in a-Si Microbolometer with Fine Pitch. *Sensors & Transducers Journal*, 11, 56-63, 2011
- [5.12] B. E. Cole, R. E. Higashi, and R. A. Wood, Monolithic Two-Dimensional Arrays of Micromachined Microstructures for Infrared Applications, *Proc. IEEE*, vol. 86, No. 8, pp. 1679-1686, Aug. 1998.
- [5.13] Naoki Oda, Yutaka Tanaka, Tokuhito Sasaki, Akira Ajisawa, Akihiro Kawahara, Seiji Kurashina, "Performance of 320x240 Bolometer-type uncooled infrared detector", *Nec Res. & Develop.*, vol. 44 No. 2, pp. 170-174, Apr. 2003.
- [5.14] Sherif Sedky, Paolo Fiorini, Kris Baert, Lou Hermans, and Robert Mertens, "Characterization and Optimization of Infrared Poly SiGe Bolometers", *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 46, No. 4, pp. 675-682, 1999.
- [5.15] Alp Yaradanakul, Donald P. Butler, and Zeynep Celik-Butler, "Uncooled Infrared Microbolometers on a Flexible Substrate", *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 49, No. 5, pp. 930-933, May 2002.
- [5.16] Agha Jahanzeb, Christine M. Travers, Zeynep Celik-Butler, Donald P. Butler, and Stephen G. Tan, "A Semiconductor YBaCuO Microbolometer for Room Temperature IR Imaging", *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 44, No. 10, pp. 1795-1801, Oct. 1997.
- [5.17] A. H. Z. Ahmed and R. Niall Tait, "Characterization of an Amorphous Ge_xSi_{1-x}O_y Microbolometer for Thermal Imaging Applications", *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 52, No. 8, pp. 1900-1906, Aug. 2005.
- [5.18] Sameer K. Ajmera, A.J. Syllaios, Gregory S. Tyber, Michael F. Taylor, and Russell E. Hollingsworth, "Amorphous Silicon Thin-Films for Uncooled Infrared Microbolometer Sensors", in *Proc. SPIE*, 2010, vol. 7660, pp. 766012.
- [5.19] B. Fieque, J.L. Tissot, C. Trouilleau, A. Crastes, O. Legras, "Uncooled microbolometer detector: Recent developments at Ulis", *Infrared Phys. Technol.*, vol. 49 pp. 187-191, 2007.

- [5.20] A.J. Syllaios, T.R. Schimert, R.W. Gooch, W.L.Mc. Cardel, B.A. Ritchey, J.H. Tregilgas, in: R.W. Collins, H.M. Branz, S. Guha, H. Okamoto, M. Stutzmann (Eds.), *in Proc. Mater. Res. Soc. Symp.*, San Francisco, Vol. 609, 2000, pp. A14.4.1.
- [5.21] T. Schimert, C. Hanson, J. Brady, T. Fagan, M. Taylor, W. McCardel, R. Gooch, M. Gohlke, A.J. Syllaios, in *Proc.SPIE*, Vol. 7298, 2009, pp. 72980T.
- [5.22] Bin Wang, Jianjun Lai, Hui Li, Haoming Hu, Sihai Chen, "Nanostructured vanadium oxide thin film with high TCR at room temperature for microbolometer", *Infrared Phys. Technol.*, vol. 57, pp. 8-13, 2013.
- [5.23] Mario Moreno, Ricardo Jiménez, Alfonso Torres, Roberto Ambrosio, Microbolometers Based on Amorphous Silicon Germanium films with Embedded Nanocrystals,
- [5.24] Niklaus F., Decharat A., Jansson C., Stemme G., Performance model for uncooled infrared bolometer arrays and performance predictions of bolometers operating at atmospheric pressure, *Infrared physics & technology*, Vol. 51, 168-177, 2008.

Capítulo 6. Conclusiones

6.1 Conclusiones

Se realizó el depósito y estudio de películas de pm-Si_xGe_y:H con valores altos de TCR [8 %K⁻¹], con los cuales se fabricaron micro-bolómetros con alta respuesta a la radiación IR incidente. Se muestra que variando las condiciones de depósito como la presión en la cámara de depósito, y la razón de flujo de los gases precursores (SiH₄/GeH₄) es posible ajustar las propiedades de las películas, como la conductividad y el TCR. El valor de TCR más alto fue para el proceso de depósito P23 con un valor de 9.1 %K⁻¹, que si bien, no se pudo utilizar en el proceso de fabricación por que las condiciones de depósito excedieron las capacidades del sistema de depósito, se puede lograr una serie de películas delgadas de semiconductores polimorfos basados en silicio y germanio que se pueden ajustar para obtener tener mejores respuesta a la radiación infrarroja incidente, o bien, a obtener películas con menor resistencia eléctrica que tengan un mejor acoplamiento con un circuito de lectura o de control. Al ajustar las condiciones del depósito que se utilizó en el proceso de fabricación, se obtuvo una película de pm-Si_xGe_y:H con un TRC de 8%K⁻¹, que es uno de los valores más altos para películas termo-sensibles aplicados en micro-bolómetros hasta ahora reportados.

Se fabricaron micro-bolómetros con tres estructuras diferentes con el fin de conocer el efecto que tiene las dimensiones de área superficial, y la geometría de los brazos de suspensión, y el impacto que esto tiene en las figuras de mérito. Se realizó el diseño de estructuras de micro-bolómetros en la configuración de micro puente, en tres diferentes áreas 50 x 50 μm², 30 x 30 μm² y 25 x 25 μm², donde la dimensión mínima es de 1 μm. Para el diseño de las estructuras se tomó como base los micro-bolómetros fabricados en el laboratorio de microelectrónica del INAOE en anteriores procesos. En el diseño se logró

reducir la dimensión mínima de 5 hasta 1 μm , compatible con el proceso de obtención de mascarillas y definición de patrones por litografía en LI-MEMS. También se logró reducir el área de los dispositivos hasta en una cuarta parte respecto a los dispositivos fabricados anteriormente con la menor área lograda ($50 \times 50 \mu\text{m}^2$). También se caracterizó un proceso de fabricación de micro-bolómetros para LI-MEMS, dicho proceso se realiza a baja temperatura, donde la temperatura máxima es de $350 \text{ }^\circ\text{C}$. Este proceso involucra un menor número de pasos que los procesos caracterizados en el laboratorio de microelectrónica, y de muchos procesos encontrados en la literatura. En este proceso no se utilizan las capas de nitruro de silicio que definen a la membrana suspendida y a la película absorbente de radiación IR. Es decir, la película termosensible cumple la función de la membrana suspendida y también de absorber la radiación IR. La absorción de radiación IR se mejora con la cavidad óptica resonante formada por la estructura suspendida y el espejo reflector de titanio depositado en la superficie de la oblea, y que para obtener el máximo de absorción en $10 \mu\text{m}$ de longitud de onda, la altura de la membrana suspendida es de $2.5 \mu\text{m}$. De esta manera, los micro-bolómetros fabricados cuentan con una estructura muy simple, con masa térmica reducida y fabricados con un proceso que a su vez también es simple, sencillo, y que requiere de muy pocos pasos de proceso. El proceso es totalmente compatible con el proceso estándar de fabricación de circuitos integrados CMOS. Este proceso está proyectando para la fabricación de micro-bolómetros en un post-proceso para poder ser integrado con un circuito de lectura que ya se haya fabricado en las obleas de silicio.

De la caracterización de los micro-bolómetros se obtuvieron las mejores respuestas de los micro-bolómetros con brazos de suspensión de la membrana termo-sensible más largos, esto aumenta el aislamiento térmico y mejora la respuesta de los micro-bolómetros. También se observó que al reducir las dimensiones de los micro-bolómetros se logra aumentar la respuesta de estos. La mejor respuesta corresponde a micro-bolómetros con área de $30 \times 30 \mu\text{m}^2$ y del tipo-L, es decir, los micro-bolómetros con los brazos de suspensión más largos. En este trabajo se logro una respuesta en corriente de hasta 15.5 A/W y respuesta en voltaje de hasta $1.15 \times 10^6 \text{ V/W}$, valores que son más altos a los reportados hasta el momento en la literatura. La respuesta mostrada por los micro-bolómetros no es completamente al comportamiento de contactos óhmicos, y la respuesta

se asemeja a la de contactos rectificadores donde puede haber una ganancia debido a la polarización. Debido a esto, y más la alta sensibilidad de la película termo-sensible (alto TCR), y a la alta eficiencia de las estructuras para absorber la radiación IR y el aislamiento térmico, se logran dispositivos con muy alta respuesta y sensibilidad. Pero es necesario conocer a futuro el mecanismo específico de la alta respuesta de los micro-bolómetros.

La caracterización de ruido en micro-bolómetros no nos permitió encontrar de forma concisa el efecto de las variaciones en la geometría y de las dimensiones de las estructuras sobre los niveles de ruido. El nivel de ruido entre distintas estructuras presentó variaciones de hasta una orden de magnitud, mientras para diferentes áreas de micro-bolómetros, el ruido a baja frecuencia parece estar en promedio por debajo de una orden de magnitud que los micro-bolómetros con área de $50 \times 50 \mu\text{m}^2$. Para distintas estructuras de micro-bolómetros se encontró que un micro-bolómetro de tipo-I de brazos cortos con área de $30 \times 30 \mu\text{m}^2$ tuvo el mejor resultado de detectividad con $1.54 \times 10^9 \text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}/\text{W}$. Respecto a la NETD, la gran mayoría de los micro-bolómetros tuvieron sensibilidades por debajo de los 50 mK, que comparables con dispositivos encontrados en la literatura y también con los comerciales.

6.2 Trabajo a futuro

Ya se ha realizado suficiente trabajo respecto al estudio, diseño, fabricación y caracterización de micro-bolómetros sin enfriar en los laboratorios del INAOE. En principio se puede realizar la fabricación de micro-bolómetros con diversas películas termo-sensibles con diferentes conductividades y valores de TCR, para estudiar el efecto en las figuras de mérito al usar estas diversas películas y realizar un estudio comparativo de estos micro-bolómetros. Ya se cuenta con el trabajo suficiente para realizar el diseño de un arreglo bidimensional de micro-bolómetros con diferente número de dispositivos y posteriormente se debe realizar el estudio, diseño y fabricación de un circuito de control y lectura para poder acoplarse y formar un sistema de captación de imágenes para el infrarrojo.

Lista de tablas

Tabla 1.1 Arreglos de micro-bolómetros sin enfriar comerciales (U.D. Umbrella Design)...	8
Tabla 3.1 Mascarillas del proceso de fabricación de micro-bolómetros.....	47
Tabla 3.2 Condiciones de depósito de películas de pm-Si _x Ge _y :H para el estudio de las propiedades de las películas obtenidas.....	53
Tabla 3.3 Condiciones de depósito de la película termo-sensible.....	53
Tabla 3.4 condiciones de grabado de la película termo-sensible.....	54
Tabla 3.5 Condiciones de grabado de poliamida para la liberación de los micro-bolómetros.....	54
Tabla 5.1 Condiciones de depósito de las películas de pm-Si _x Ge _y :H.....	72
Tabla 5.2 Razones de depósito de las películas de pm-Si _x Ge _y :H.....	73
Tabla 5.3 Características eléctricas de las películas depositadas de la serie #1.....	80
Tabla 5.4 Características eléctricas de las películas depositadas de la serie #2.....	80
Tabla 5.5 Condiciones de depósito de películas de pm-Si _x Ge _y :H utilizadas como material termo-sensible.....	81
Tabla 5.6 Características eléctricas de las películas de pm-Si _x Ge _y :H utilizadas en el proceso de fabricación de micro-bolómetros.....	82
Tabla 5.7 Valores típicos de TCR para materiales usados como película termos-sensible.....	99
Tabla 5.8 Análisis de micro-bolómetros en la literatura.....	102

Lista de figuras

Figura 1.1 Experimento de Herschel con el cual realiza el descubrimiento de la radiación infrarroja.....	3
Figura 2.1 Espectro electromagnético óptico donde se encuentra la radiación UV, la luz visible y la radiación IR.....	15
Figura 2.2 Espectro de potencia de emisión de un cuerpo negro a diferentes temperaturas.	16
Figura 2.3 Espectro de transmisión de radiación IR por la atmosfera terrestre, se ven las ventanas de transmisión más utilizadas en la detección de radiación IR 3-5 μ m y 8-14 μ m [2.3].....	17
Figura 2.4 Procesos fundamentales de excitación óptica en materiales semiconductores, (a) absorción intrínseca, (b) absorción extrínseca, (c) absorción por portadores libres [2.7]....	19
Figura 2.5 Respuesta espectral relativa para un detector térmico y un detector de fotones [1.4].....	21
Figura 2.6 Configuraciones básicas de micro-bolómetros sin enfriar, (a) estructura suspendida sobre una cavidad, y (b) suspendida encima del sustrato.....	24
Figura 2.7 Esquema básico de un micro-bolómetro sin enfriar de membrana suspendida [2.14].....	25
Figura 2.8. Imagen de HRTEM de una película de silicio polimorfo de 10 nm de espesor en la cual se puede distinguir las partículas de silicio nanocrystalino [2.36].....	30
Figura 2.9 Representación básica de un micro-bolómetro sin enfriar [2.30].....	31
Figura 3.1 Reducción de las dimensiones de un micro-bolómetro.....	43
Figura 3.2 Estructuras de diseño (a) y (b) son micro-bolómetros tipo-I de brazo corto y largo respectivamente, (c) micro-bolómetro tipo-L.....	44
Figura 3.3 Micro-bolómetro tipo-I de brazos de suspensión corto (Tipo-I BC).....	44
Figura 3.4 Micro-bolómetro tipo-I de brazos de suspensión largos (Tipo-I BL).....	45
Figura 3.5 Micro-bolómetro tipo-L.....	45
Figura 3.6 electrodos de polarización.....	46
Figura 3.7 Layout para la fabricación de micro-bolómetros.....	47

Figura 3.8 Secuencia del proceso de fabricación (1) oxidación inicial, (2) depósito de (titanio) Ti y definición de electrodos de polarización y espejo reflector, (3) deposito de poliamida se abren ventanas hacia electrodos, (4) depósito de pm-Si _x Ge _y :H como película termo-sensible, (5) depósito de Ti y definición de electrodos, (6) liberación del micro-bolómetro.....	48
Figura 4.1 Arreglos experimenta para determinar la E_a y TCR.....	58
Figura 4.2 Conductividad dependiente de la temperatura de pm-Si _x Ge _y :H.....	59
Figura 4.3 esquema de medición de los micro-bolómetros para la caracterización eléctrica.....	63
Figura 4.4 Esquema utilizado para la medición de la NSD.....	65
Figura 4.5 Circuito de acoplamiento de impedancia para la medición de la NSD.....	66
Figura 5.1 Rugosidad superficial media $\langle S_a \rangle$ contra la presión de la cámara de depósito en ambas series de las películas de pm-Si _x Ge _y :H.....	74
Figura 5.2 Rugosidad superficial en las dos series de películas depositadas de pm-Si _x Ge _y :H sobre silicio cristalino. (a) Vista 3D y (b) vista superficial.....	75
Figura 5.3 (a) Imagen obtenida por SEM de la película de pm-Si _x Ge _y :H depositada, (b) imagen obtenida por HR-TEM de la sección transversal de la película depositada donde se aprecia la presencia de nanocristales en el rango de 2-3 nm, el recuadro interno muestra un par de nanocristales embebidos en la red amorfa.....	75
Figura 5.4 Espectro de absorción de las películas de la serie #1 y #2.....	76
Figura 5.5 Absorción Vs. energía obtenida a partir de mediciones de UV-Vis para obtener el valor del ancho de banda prohibida (E_g).....	77
Figura 5.6 Conductividad a temperatura ambiente en función de la presión de la cámara de depósito.....	78
Figura 5.7 Graficas de Arrhenius de las películas de pm-Si _x Ge _y :H.....	79
Figura 5.8 E_a y TCR determinados de las películas depositadas de las series #1 y #2.....	80
Figura 5.9 Curvas de Arrhenius para las películas depositadas en el proceso de fabricación de micro-bolómetros.....	82
Figura 5.10 Micro-bolómetros resultantes del proceso de fabricación, (a) micro-bolómetro tipo-I de brazos cortos de $25 \times 25 \mu\text{m}^2$, (b) micro-bolómetro tipo-L y área de $30 \times 30 \mu\text{m}^2$, (c) micro-bolómetros tipo-I de brazos largos y área de $50 \times 50 \mu\text{m}^2$	83

Figura 5.11 Imágenes obtenidas por SEM de diferentes micro-bolómetros fabricados. (a) micro-bolómetro tipo-I de brazos largos de $30 \times 30 \mu\text{m}^2$, (b) micro-bolómetro tipo-I de brazos cortos y área de $30 \times 30 \mu\text{m}^2$, (c) micro-bolómetro tipo-L y área de $30 \times 30 \mu\text{m}^2$...	84
Figura 5.12 Mapa de oblea que contiene los chips fabricados.....	85
Figura 5.13 Respuesta de corriente de micro-bolómetros con área de $50 \times 50 \mu\text{m}^2$	85
Figura 5.14 respuesta en corriente de micro-bolómetros con área de $50 \times 50 \mu\text{m}^2$. BL significa Brazo Largo y BC significa Brazo Corto.....	86
Figura 5.15 Respuesta de corriente de los tres tipos de micro-bolómetros con área de $30 \times 30 \mu\text{m}^2$	87
Figura 5.16 respuesta en corriente de micro-bolómetro con área de $30 \times 30 \mu\text{m}^2$. BL significa Brazo Largo y BC significa Brazo Corto.....	87
Figura 5.17 Respuesta de corriente de los tres tipos de micro-bolómetros con área de $25 \times 25 \mu\text{m}^2$	88
Figura 5.18 respuesta en corriente de micro-bolómetro con área de $25 \times 25 \mu\text{m}^2$.BL significa Brazo Largo y BC significa Brazo Corto.....	88
Figura 5.19 Respuesta en voltaje de los tres tipos de micro-bolómetros con área de $50 \times 50 \mu\text{m}^2$	89
Figura 5.20 respuesta en voltaje de micro-bolómetro con área de $50 \times 50 \mu\text{m}^2$. BL significa Brazo Largo y BC significa Brazo Corto.....	90
Figura 5.21 Respuesta en voltaje de los tres tipos de micro-bolómetros con área de $30 \times 30 \mu\text{m}^2$	91
Figura 5.22 respuesta en voltaje de micro-bolómetro con área de $30 \times 30 \mu\text{m}^2$. BL significa Brazo Largo y BC significa Brazo Corto.....	91
Figura 5.23 Respuesta en voltaje de los tres tipos de micro-bolómetros con área de $25 \times 25 \mu\text{m}^2$	92
Figura 5.24 respuesta en voltaje de micro-bolómetro con área de $25 \times 25 \mu\text{m}^2$. BL significa Brazo Largo y BC significa Brazo Corto.....	92
Figura 5.25 Densidad espectral de ruido para micro-bolómetros con área de $50 \times 50 \mu\text{m}^2$.	93
Figura 5.26 Densidad espectral de ruido para micro-bolómetros con área de $30 \times 30 \mu\text{m}^2$.	94

Figura 5.27 Densidad espectral de ruido para micro-bolómetros con área de $25 \times 25 \mu\text{m}^2$	94
Figura 5.28 Detectividad de los micro-bolómetros con área de $50 \times 50 \mu\text{m}^2$	95
Figura 5.29 Detectividad de los micro-bolómetros con área de $30 \times 30 \mu\text{m}^2$	96
Figura 5.30 Detectividad de los micro-bolómetros con área de $25 \times 25 \mu\text{m}^2$	96
Figura 5.31 NETD de los micro-bolómetros con área de $50 \times 50 \mu\text{m}^2$	97
Figura 5.32 NETD de los micro-bolómetros con área de $30 \times 30 \mu\text{m}^2$	98
Figura 5.33 NETD de los micro-bolómetros con área de $25 \times 25 \mu\text{m}^2$	98