



INAOE

“Estudio experimental de ruido en películas termosensor basadas en silicio-germanio depositadas por plasma con aplicación en microbolómetros”

Por

Ismael Cosme Bolaños

Tesis sometida como requisito parcial para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS EN LA ESPECIALIDAD DE ELECTRÓNICA

en el

Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica

Octubre 2008

Tonantzintla, Puebla

Supervisada por:

Dr. Andrey Kosarev

©INAOE 2008

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



RESUMEN

Actualmente existen sistemas infrarrojos para diversas aplicaciones en diferentes campos. Algunas de estas aplicaciones se encuentran en los campos de la milicia, seguridad, medicina, mantenimiento preventivo y visión nocturna. Una parte importante de estas aplicaciones está basada en la detección de la radiación infrarroja. Por esta razón actualmente existe un gran interés en el desarrollo de detectores infrarrojos que cumplan las necesidades requeridas con un bajo costo y un alto desempeño.

El reciente interés en materiales amorfos con aplicaciones de películas termosensor en microbolómetros ha surgido gracias a los altos valores de coeficiente térmico de resistencia (TCR) que presentan este tipo de materiales. Este último parámetro se traduce en un alto desempeño de los dispositivos de detección infrarroja. Sin embargo, no es el único parámetro a considerar en el dispositivo. Otro parámetro que quizá tenga igual o mayor importancia es la detectividad específica. La detectividad específica es el parámetro que describe el desempeño de un detector infrarrojo y relaciona su responsividad con el ruido presente en el dispositivo. Este parámetro permite comparar los diferentes tipos de microbolómetros.

En el INAOE se han desarrollado microbolómetros con películas termosensor basadas en SiGe depositadas por la técnica de depósito asistido por plasma (PECVD). Estos microbolómetros presentan un gran desempeño debido a que sus películas termosensor

cuentan con un alto TCR y por lo tanto una alta responsividad. Sin embargo, no se había realizado un estudio profundo de ruido en los dispositivos desarrollados.

Este trabajo de investigación tiene tres direcciones principales. La primera es el desarrollo de una metodología de medición de ruido en materiales termosensores y microbolómetros. La segunda tarea es el estudio de ruido intrínseco en películas termosensor basadas en SiGe, incluyendo efectos de temperatura y polarización. Y por último el estudio de ruido en microbolómetros basados en SiGe y obtención de valores de detectividad que permitan compararlos con otros microbolómetros reportados en literatura.

Durante este trabajo se desarrollo una metodología de medición de ruido. Esto debido al escasa información en el estado del arte sobre metodologías de medición de ruido en materiales amorfos. El desarrollo de esta metodología de medición incluyó la reducción de ruido externo, el aumento de la frecuencia limite del equipo de medición, determinar el tiempo óptimo de integración y el correcto procesamiento de los datos. Finalmente se comprobó la reproducibilidad de los datos comparándola con una metodología de medición de ruido encontrada en literatura. Durante este trabajo se estudio el comportamiento de ruido en materiales amorfos con aplicación en microbolómetros basados en $a\text{-Si}_x\text{Ge}_y\text{B}_x\text{:H}$ y se agregó al estado del arte datos sobre el comportamiento del ruido, incluidos los efectos de polarización y temperatura. También se logró comparar, por medio de la detectividad específica, el desempeño de los microbolómetros desarrollados en el INAOE.

Dedicada a:
Mis padres Marielena Bolaños, Vicente Cosme
y a mi hermosa Rosy
(Rosalba Tecpanecatl Quechol)

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres y mi familia por su apoyo incondicional. Agradezco a mi asesor Dr. Andrey Kosarev por la confianza y las enseñanzas que depositó en mí durante este trabajo de tesis, sin su guía y sus consejos este trabajo no hubiera sido posible.

Agradezco también por el apoyo otorgado por parte del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) tanto en el proyecto con número de contrato D48454F como por la beca otorgada durante mi maestría.

De igual manera quedo agradecido con la comunidad del INAOE en general y principalmente con los profesores que me mostraron el camino durante mi estancia en el INAOE: Dr. Alfonso Torres, Dr. Alexander Malik, Dr. Carlos Zuñiga, Dr. Javier de la Hidalga, Dr. Wilfrido Calleja, Dr. Mario Moreno, Dr. Pedro Rosales y Dr. Peter Halevi. También un agradecimiento especial al Instituto de Investigación en Comunicación Óptica y al Dr. Francisco González por su colaboración en este trabajo.

También me encuentro agradecido por el apoyo de Rosalba Tecpanecatl Quechol y familia por tratarme como un miembro más de ellos. Por último quiero dar gracias a los compañeros y amigos que llegaron para quedarse en mi vida durante este tiempo en el INAOE: Luis Navarrete, Francisco Sánchez, Rodolfo Trejo, Judith Onchi, Andrés Alanís, Delia Hurtado, Erika Póndigo, Guillermo Ruiz, Gregorio Fierro y Gustavo Vera.

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE ABREVIATURAS.....	xiii
LISTA DE SIMBOLOS.....	xv
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes y justificación.....	3
1.1.1 Objetivos y tareas.....	6
1.2 Organización de la tesis.....	7
1.3 Referencias Capítulo 1.....	8
2. ANÁLISIS DE LITERATURA.....	11
2.1 Introducción.....	11
2.2 Detectores Infrarrojo: operación.....	11
2.2.1 Fotodetectores.....	12
2.2.2 Detectores térmicos.....	13
2.3 Microbolómetros no enfriados basados en materiales depositados por plasma....	15
2.3.1 Operación.....	15
2.3.2 Estructura y fabricación.....	19
2.4 Definición de figuras de mérito en bolómetros.....	21
2.4.1 Coeficiente Térmico de Resistencia (TCR).....	22
2.4.2 Responsividad.....	23
2.4.3 Tiempo de respuesta térmico.....	24
2.4.4 Potencia equivalente de ruido.....	25
2.4.5 Detectividad específica.....	25
2.5 Ruido en sistemas IR: microbolómetros.....	26
2.5.1 Caracterización de ruido en detectores IR.....	29
2.5.1.1 Densidad espectral de ruido.....	29

3.3.3 Detectividad Especifica	82
3.4 Mediciones de ruido en películas termosensor a-SiGeB:H.....	83
3.4.1 Mediciones de ruido: dependencia de temperatura.....	85
3.4.2 Mediciones de ruido en películas termosensor y reproducibilidad.....	86
3.4.3 Mediciones de ruido: dependencia de polarización.....	89
3.5 Mediciones de ruido en microbolómetros basados en películas termosensor a-	
Si_xGe_yB_z:H.....	89
3.6 Conclusiones Capítulo 3.....	90
3.7 Referencias Capítulo 3.....	92
4. RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	95
4.1 Introducción.....	95
4.2 Resultados sobre el desarrollo de la metodología de medición de ruido.....	95
4.3 Características corriente voltaje de I(U) de las muestras.....	100
4.4 Reproducibilidad de resultados experimentales de ruido en resistencias.....	105
4.5 Resultados experimentales de ruido en películas termosensor a-Si_xGe_yB_z:H.....	107
4.5.1 Resultado de ruido: dependencia de temperatura.....	109
4.5.2 Resultados de ruido: dependencia de polarización.....	115
4.6 Resultados de ruido en microbolómetros con películas a-Si_xGe_yB_z:H y	
detectividad de dispositivos.....	117
4.7 Referencias Capítulo 4.....	122
5. DISCUSIÓN SOBRE RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	123
5.1 Introducción.....	123
5.2 Desarrollo de metodología de medición de ruido.....	123
5.3 Ruido en películas termosensor.....	126
5.3.1 Discusión de efecto de temperatura en ruido.....	129
5.3.2 Discusión sobre efecto de polarización en ruido.....	130
5.4 Ruido en microbolómetros.....	131

6. CONCLUSIONES.....	135
PROYECTO CONACYT.....	139
LISTA DE PUBLICACIONES.....	141
LISTA DE FIGURAS	143

LISTA DE ABREVIATURAS

1D	Una dimensión
2D	Dos dimensiones
a-Ge_xSi_{x-1}O_y	Óxido de Silicio Germanio
Al	Aluminio
a-SiN	Nitruro de silicio
a-Si_xGe_yB:H	Silicio Germanio Boro amorfo
CMOS	Tecnología metal oxido semiconductor complementaria
FFT	Transformada rápida de Fourier
GaAs	Arseniuro de galio
Ge	Germanio
GPIB	Bus de interfaz de propósito general
HBT	Transistor bipolar de heterounion
HgCdTe	Telurio mercurio-cadmio
IICO	Instituto de Investigación en Comunicación Óptica
In	Indio
INAOE	Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica
InSb	Antimonio de indio
IR	Radiación infrarroja
LETI	Laboratoire d'Electronique de Technologie de l'Information, Francia
LF	Frecuencia baja
PbSnTe	Telurio de plomo-estaño
PC	Computadora personal
PECVD	Técnica de depósito por vapor químico asistido por plasma
PNSD	Potencia de densidad espectral de ruido

SEM	Microscopio electrónico de barrido
Si	Silicio
SiGe	Silicio-Germanio
SIMS	Espectroscopia de masa de iones secundarios
TFT	Transistor de película delgada
Ti	Titanio
VO_x	Oxido de Vanadio
YBCO	Oxido de itrio, bario y cobre
ZnSe	Seleniuro de Zinc

LISTA DE SÍMBOLOS

λ	Longitud de onda	μm
E_a	Energía de activación	eV
σ	Conductividad	$\Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$
a	Área transversal película	cm^{-2}
A_d	Área del microbolómetro	cm^2
B_{eff}	Ancho de banda efectivo	Hz
C_{th}	Capacitancia térmica	JK^{-1}
D^*	Detectividad específica	$\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$
E_{na}	Energía de activación de ruido	eV
f	Frecuencia	Hz
f_c	Frecuencia de rodilla	Hz
G	Ganancia	1
G_{th}	Conducción térmica	WK^{-1}
h	Constante de Planck	eV(s)
I	Corriente de polarización	A
I_0	Intensidad de fuente de IR	W/cm^2
i_{jnoise}	Corriente de ruido térmico	A
k	Constante de Boltzman	$1.38 \times 10^{-23} \text{JK}^{-1}$
L	Longitud electrodos	cm
NEP	Potencia equivalente de ruido	W
P	Presión	Torrs
R	Resistencia	Ω
R	Responsividad	AW^{-1}
R_m	Resistencia de la muestra medida	Ω

$S_i(f)$	Densidad espectral de ruido en corriente	A^2/Hz
$S_v(f)$	Densidad espectral de ruido en voltaje	V^2/Hz
TCR	Coefficiente térmico de resistencia	$\%K^{-1}$
V_{jnoise}	Voltaje de Ruido térmico	V
v_{ph}	Frecuencia tentativa de escape	Hz
ρ	Resistividad	$\Omega\text{ cm}^{-1}$
τ	Constante de tiempo térmica	seg
τ_T	tiempo de captura	seg

1. INTRODUCCIÓN

En 1800 el astrónomo William Herschel usó un prisma para separar la luz proveniente del sol en sus distintas longitudes de onda. Con un termómetro descubrió que existía una región en el espectro cercano al rojo en la cual no se observaba luz visible y sin embargo existía un efecto considerable de calentamiento sobre el termómetro. Con este experimento se demostró la existencia de radiación fuera del visible. También, por primera vez se implementó un detector térmico.

La radiación infrarroja, como la luz visible, es una forma de onda electromagnética que forma parte del espectro de radiación. La diferencia fundamental entre los distintos tipos de radiación es la longitud de la onda. Según su longitud de onda, la radiación electromagnética ha sido dividida en: Rayos gamma, Rayos X, Ultra violeta, Visible, Infrarrojo y Ondas de Radio. Esta clasificación está basada fundamentalmente en el tipo de fuentes y detectores que son utilizados para generar y detectar la onda. La radiación infrarroja se encuentra entre las ondas que detecta el ojo humano (visible) y las ondas de radio. Las longitudes de onda en IR van de $0.7 \mu\text{m}$ hasta 1mm . Cuanto mayor sea la temperatura de un objeto mayor será la radiación en IR que emita. Todos los objetos que se encuentran por encima del cero absoluto irradian en IR. Por lo tanto, este tipo de radiación puede ser utilizada para detectar todo tipo de objetos por medio del calor.

El desarrollo de detectores IR tiene diversas aplicaciones dentro de los campos comercial, militar y médico. Dentro del campo militar y comercial una de las principales aplicaciones es la visión nocturna. Dentro del campo comercial se encuentran aplicaciones adicionales como seguridad, detección de fuego y detección de calentamiento en equipo mecánico.

Los detectores de IR se clasifican según el mecanismo de detección: fotodetectores y detectores térmicos. Los fotodetectores básicamente absorben la energía de los fotones que se irradian sobre ellos y generan cargas libres que son utilizadas para la detección de IR. Los detectores térmicos utilizan la propiedad de ciertos materiales en cambiar alguna característica en el momento de ser calentados al ser expuestos a radiación IR.

El Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) han realizado una serie de trabajos de investigación [1.1-1.3] para el desarrollo de nueva tecnología basada en detectores térmicos tipo microbolómetros. En [1.2] se ha demostrado que celdas de microbolómetros basados en películas amorfas de silicio-germanio depositadas por LF PECVD presentan parámetros viables para la fabricación de arreglos en 1D y 2D. En [1.3] se fabrican arreglos en 1D y se caracterizan algunos de sus parámetros. Además, se muestra que tanto los arreglos en 1D y celdas individuales presentan parámetros comparables y superiores a los bolómetros presentados en el estado del arte. También, se estudian distintas configuraciones de microbolómetro con diferentes dopados en la película termosensor. Por otro lado, se propone el estudio de microbolómetros con configuración de sándwich para solucionar la alta resistividad y el lento tiempo de respuesta de los bolómetros.

1.1. Antecedentes y justificación

El ruido es una propiedad inherente de los sistemas, sobre todo de los sistemas que contienen una gran cantidad de componentes, y por lo cual, requieren de un manejo estadístico. En electrónica estos elementos están compuestos por átomos y electrones, y su comportamiento se describe por medio de estadística. Por lo tanto el ruido intrínseco de un dispositivo electrónico es principalmente dado por fluctuaciones de diferentes condiciones del sistema.

El ruido ha sido utilizado como herramienta para resolver problemas en la ciencia y tecnología. Problemas tan simples, como el movimiento del polen en líquidos, y tan fundamentales, como la existencia de átomos y el origen del universo, han encontrado en el ruido una respuesta [1.4]. La primera publicación sobre este tema fue realizada por Einstein en 1905 en la cual plantea al ruido como una consecuencia de que la materia está constituida por átomos [1.5]. En el campo de la electrónica el ruido ha jugado un papel muy importante desde la invención de los tubos de vacío. El estudio de ruido en los tubos de vacío fue esencial para el desarrollo de estos dispositivos los cuales revolucionaron el campo de la electrónica.

El buen entendimiento de las fuentes de ruido en los dispositivos, no sólo permite disminuir la magnitud de ruido, sino que además, permite entender mecanismos tanto físicos como tecnológicos que pueden ser empleados para mejorar a dichos dispositivos, esto debido a que el ruido está relacionado con las propiedades de los materiales. Por otro lado, el ruido

en dispositivos como detectores IR impone la última limitación física del dispositivo. La detectividad es el parámetro principal de un detector que permite compararlo con detectores de diferentes tipos. Por consecuencia, el estudio de ruido en los detectores IR (microbolómetros) desarrollados en el INAOE tiene gran importancia. Este estudio sobre ruido permitirá entender el comportamiento del ruido en los dispositivos fabricados en el INAOE, de tal manera que sea posible compararlos con los microbolómetros presentados en el estado del arte.

El reciente interés en detectores térmicos basados en materiales termosensores amorfos es debido a que se ha encontrado que este tipo de materiales depositados por plasma presentan un alto TCR. Por otra parte, las técnicas de micromaquinado para un buen aislamiento térmico y la compatibilidad con la actual tecnología CMOS de estos materiales [1.1-1.3] los ha hecho atractivos como materiales termosensores. Pese a lo anterior, el estudio de ruido en materiales amorfos ha sido pobremente reportado en la literatura. En 1982, utilizando el rápido crecimiento de las microcomputadoras en los instrumentos de laboratorio, se propuso la técnica de espectroscopia de ruido para el estudio de a-Si:H [1.6]. De estos estudios se encontró que a-Si:H presenta un dominio de ruido $1/f$. Algunos estudios de interés sobre ruido incluyen la dependencia de este con la temperatura y polarización. La dependencia temperatura del ruido en películas a-Si:H en la región $1/f$ se presenta en [1.7] observándose desviaciones en la pendiente de la región $1/f$ que van de 0.7 a 1.1. Sin embargo, debido a que solo existe este estudio, aun no queda claros el efecto de temperatura en a-Si:H

Como causa principal de las fluctuaciones de ruido en a-Si:H se propone un modelo que atribuye las fluctuaciones a procesos de captura de electrones debido a niveles de energía entre la banda de conducción (o de valencia) y el nivel de Fermi del a-Si:H [1.6].

Los estudios de ruido en dispositivos microbolómetros son pobres cuando se buscan referencias de ruido en estructuras de bolómetros basados en materiales amorfos. Esto es debido a que los estudios de caracterización de ruido en detectores reportados se limitan a presentar la detectividad del dispositivo, quedando como interrogantes los métodos de medición de ruido. Otro factor importante que contribuye a este empobrecimiento de reportes de estudio de ruido en detectores es que las grandes compañías como “LETI” sólo presentan datos muy generales, manteniendo en secreto tecnología ante sus competidores [1.8]. Sobre ruido en estructuras de bolómetros se encuentran algunos estudios de ruido en amorfos. En [1.9] se presenta un reporte de ruido en microbolómetro estructura tipo sándwich con película termosensor a-Ge_xSi_{x-1}O_y. Este estudio es el único que presenta tendencias sobre efecto de polarización en el ruido.

Por otra parte, de igual importancia es el estudio ruido como el desarrollo de una correcta metodología de medición de ruido que permita asegurar la veracidad de los datos estudiados, pese a lo dicho, existen muy pocos trabajos publicados sobre metodologías de medición de ruido. Sobre técnicas de medición de ruido se presenta la espectroscopia de ruido en [1.6] donde por un análisis de Fourier y una interface a un microcomputador se realiza el análisis de ruido. En la mayoría de los casos reportados no se describe la metodología empleada en detalle, omitiendo puntos como ruido externo y el procesamiento

de datos. Por tal motivo es necesario desarrollar una metodología propia para el estudio de ruido en el laboratorio del INAOE.

1.1.1 Objetivos y tareas

La actual investigación y desarrollo de microbolómetros no enfriados con estructura de puente en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) ha permitido fabricar microbolómetros basados en $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}:\text{H}$ y $\text{a-Si}_x\text{Ge}_y\text{B}_z:\text{H}$ con características competitivas a nivel mundial. El estudio y entendimiento de ruido en estos materiales con aplicación en microbolómetros permitirá mostrar el comportamiento del ruido en los microbolómetros fabricados en el INAOE. Con esto se podrán observar ciertas tendencias sobre dependencia en temperatura y polarización. En consecuencia, se podrán calcular parámetros como detectividad en microbolómetros basados en estos materiales y compararlos con otros microbolómetros reportados en literatura.

Por todo lo dicho anteriormente **los objetivos de este trabajo** de tesis son:

1. Desarrollar una metodología de medición de ruido para películas termosensor y microbolómetros.
2. Estudiar experimentalmente el ruido, incluidos los efectos de polarización, en películas termosensor y en dispositivos (microbolómetros).

Para alcanzar el objetivo planteado es necesario implementar **las siguientes tareas:**

- Desarrollar una metodología de medición de ruido que incluya la instalación de mediciones, reducción de ruido externo, procesamiento de datos y reproducibilidad de datos experimentales.
- Emplear la metodología desarrollada para el estudio de ruido en películas $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}:\text{H}$ y $\text{a-Si}_x\text{Ge}_y\text{B}_z:\text{H}$ tomando en cuenta efectos de polarización y temperatura.
- Realizar el estudio experimental de ruido en microbolómetros basados en $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}:\text{H}$ y $\text{a-Si}_x\text{Ge}_y\text{B}_z:\text{H}$ para obtener valores de detectividad que permitan compararlos con microbolómetros de diferentes tipos.

Al realizar las tareas antes mencionadas se espera tener una referencia de ruido en materiales $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}:\text{H}$ y $\text{a-Si}_x\text{Ge}_y\text{B}_z:\text{H}$, que incluyan efectos de temperatura y polarización.

1.2 Organización de la tesis

Consecuente con la organización de este trabajo, en el Capítulo 2 se presenta los conceptos más importantes relacionados con los objetivos de este trabajo. También, se presentan la teoría sobre micro-bolómetros, operación y fabricación, además de definir sus principales figuras de mérito. Se describen los conceptos sobre medición y tratamiento de ruido por medio de experimentación. Después se presentan los modelos de ruido y se revisa el estado del arte sobre mediciones de ruido en micro-bolómetros. Finalmente, se realizan las

conclusiones sobre el estado del arte de ruido en materiales termosensibles y microbolómetros.

En el Capítulo 3 se presenta la metodología desarrollada durante este trabajo. En primer lugar, se describe el equipo de medición empleado en las mediciones. En segundo lugar, se revisan las diferentes técnicas de caracterización de ruido en micro-bolómetros. Finalmente, se revisan los diferentes métodos de caracterización de ruido en microbolómetro.

En el Capítulo 4 se presentan todos los resultados obtenidos de las mediciones realizadas durante este trabajo.

En el Capítulo 5 se lleva a cabo la discusión sobre los resultados y se contrastan con los reportados en la literatura para finalmente presentar las conclusiones principales en el Capítulo 6.

1.3 Referencias Capitulo1

[1.1] **Cruz Garcia, María de la Luz**, *“Characterization and Modeling of Uncooled Microbolometers of a-SiGe”*[tesis doctoral], INAOE, Puebla, 2006.

[1.2] **Ambrosio, Roberto Carlos**, *“Research on fabrication processes for un-cooled microbolometer based on plasmadeposited films”*[tesis doctoral], INAOE, Puebla, 2005.

- [1.3] **Moreno, M.C. Mario Moreno**, “*Study of IR un-cooled micro-bolometer arrays based on thin films deposited by plasma*” [tesis doctoral] . INAOE, Puebla, 2008.
- [1.4] **Cohen, Leon**, “*The history of noise*”, IEEE signal processing magazine, p.p. 20-45, 2005.
- [1.5] **Albert, Einstein**, “*Über die von der molekularkinetischen theorie der wärme geforderte bewegung von in ruhenden flüssigkeiten suspendierten teilchen,*” (On the movement of small particles suspended in a stationary liquid demanded by the molecular-kinetic theory of heat), Annalen der Physik, vol. 17, pp. 549–560, 1905.
- [1.6] **Anderson, J.C** “*Noise spectroscopy in amorphous silicon films*”, Philos. Mag. B, Vol 48, p.p. 31-45, 1983
- [1.7] **F.Z, Bathaei and Anderson, J.C**, “*Electrical noise measurements in intrinsic amorphous silicon*” Philos. Mag. B, Vol. 55, p.p. 87-100, 1987.
- [1.8] **J. L. Tissot**, “*Advanced IR technology development at CEA/LETI,*” *Infrared Phys. Technol.*, vol. 43, no. 3-5, pp. 223–228, June 2002.
- [1.9] **A. Ahmed and R.N.Tait** “*Noise behavior of amorphous $a\text{-Ge}_x\text{Si}_{x-1}\text{O}_y$ for microbolometer applications*” *Infrared Physics & Technology*, Vol 46, p.p. 468–472, 2005.

2. ANÁLISIS DE LITERATURA

2.1 Introducción

En este capítulo se presenta una breve descripción sobre microbolómetros y radiación infrarroja. También se realiza el estudio sobre el estado del arte de ruido en materiales termosensor con aplicación en microbolómetros. Este análisis de literatura incluye metodologías de medición de ruido en materiales termosensor amorfos, estudio de ruido en películas termosensor, incluyendo efectos de polarización y temperatura, y finalmente estudio de datos reportados sobre detectividad en diferentes tipos de microbolómetros.

2.2 Detectores Infrarrojo: operación

El primer detector de IR fue desarrollado en 1800 por el astrónomo William Herschel, sin embargo, el mayor desarrollo de los detectores IR se llevo a cabo hasta la Segunda Guerra Mundial. Durante este periodo se demostró la efectividad de la tecnología de IR en el campo militar y de seguridad. La principal aplicación de los detectores desarrollados durante este periodo fue visión nocturna. En 1958 un estudio demostró que el valor total de la industria de IR había alcanzado los \$100 millones de dólares [2.1]. Actualmente, además de las aplicaciones militares los detectores IR son utilizados en campos como el médico, seguridad y aplicaciones comerciales.

Los detectores de IR se clasifican, principalmente, por el mecanismo que utilizan para detectar la radiación. En este orden los detectores infrarrojo son clasificados principalmente en dos tipos: fotodetectores y detectores térmicos. Ambos tipos de detectores presentan ventajas y desventajas.

2.2.1 Fotodetectores

Cuando se hace incidir fotones sobre un fotodetector la energía de los fotones es absorbida por el material para generar pares electrón-huecos. Si la energía absorbida es lo suficientemente grande para que un electrón escape de la superficie entonces ocurre el efecto fotoeléctrico. Para generar el efecto fotoeléctrico es necesario que la longitud de onda incidente sea menor a $1.2\mu\text{m}$, si esto no se cumple, los fotones no tienen la suficiente energía para liberar a un electrón de la superficie del material. Sin embargo, para energías menores existen una serie de *fotoefectos* internos para generar carga libre en un material detector. La excitación es llamada intrínsecas si la generación de fotocargas está relacionada con emisiones entre la banda de valencia y conducción. Si la generación esta relacionada con niveles de energía debido dopado o con impurezas, entonces la excitación es llamada excitación extrínseca. Si se aplica un voltaje al material detector y la carga libre generada por fotones incidente cambia y fluye corriente a través del material entonces ocurre el efecto llamado *fotoconductividad*.

Para la generación de carga libre en un semiconductor es necesario que la energía de los fotones incidentes se mayor a la energía de la banda prohíba E_g . La radiación infrarroja es

una forma de radiación electromagnética con longitud de onda entre 8 μm a 1 mm. Algunos materiales como el antimonio de indio (InSb) pueden operar en el rango de longitudes $\lambda=3\text{-}5\mu\text{m}$. Sin embargo, es importante hacer notar que para energías E_g bajas la generación térmica de carga es alta. Esta alta concentración de carga por generación térmica dificulta la extracción de la señal generada por la radiación IR. También esta alta generación térmica provoca altas fluctuaciones de carga que tienen como consecuencia alto ruido.

2.2.2 Detectores térmicos.

Los detectores térmicos son dispositivos que cambian alguna propiedad física cuando en ellos cambia su temperatura debido a incidencia de radiación infrarroja. La principal ventaja de los detectores térmicos es que no requieren de un sistema de enfriamiento, por esta razón son comúnmente usados en aplicaciones en que resulta impráctico añadir sistemas de enfriamiento. Una característica de los detectores térmicos es que su respuesta es independiente de la longitud de onda. Por lo tanto, la detección de IR se lleva a cabo de manera global en el espectro de frecuencia. Los principales mecanismos de detección de los detectores térmicos son: bolométrico, efecto piroeléctrico, y efecto termoelectrónico.

Un bolómetro es un tipo de detector térmico el cual cambia su resistencia eléctrica cuando es calentado por medio de radiación infrarroja. Puesto que la resistencia de la mayoría metales y semiconductores tienen una fuerte dependencia con su temperatura, estos materiales son utilizados como elementos sensitivos en la estructura de los bolómetros. Si este elemento es un metal la resistencia incrementa con la temperatura. En contraste, si el

elemento sensitivo es un semiconductor la resistencia disminuye con el aumento de temperatura.

Los detectores basados en el efecto piroeléctrico cambian su polaridad al ser calentados. Este cambio transitorio de polaridad se lleva a cabo por cambio de carga en el material debido al calentamiento por radiación infrarroja. Este tipo de detectores no requieren de polarización para la detección de IR. En contraste existen detectores basados en materiales ferro eléctricos los cuales trabajan de la misma manera con excepción de que requieren ser polarizados. Si con dos materiales con diferentes valores de conductividad eléctrica y diferencias entre funciones de trabajo se forma una unión, y posteriormente, una parte de la unión es calentada con respecto a la otra, se crea un voltaje proporcional a la diferencia de temperatura. A este efecto se le conoce como efecto termoelectrico. Al incidir IR sobre la unión se obtiene un voltaje proporcional al calentamiento por esta radiación. Los detectores como la termopila utilizan este principio de operación.

Tabla 2. 1 Ventajas y desventajas entre diferentes tipos de detectores térmicos [2.1]

Detector Térmico	Ventajas	Desventaja
Bolómetros	Alta responsividad, no requiere de chopper y se puede implementar en arreglos	Alta resistividad, requiere de polarización
Efecto piroeléctrico	Alta responsividad y no requiere de polarización	Requiere de modulación por chopper y no puede ser implementado en arreglos
Efecto termoelectrico.	No requiere de polarización	Baja responsividad y posibilidad media de implementación

En la tabla 2.1 se presentan las ventajas y desventajas de los diferentes tipos de detectores térmicos. Las principales ventajas de los bolómetros son: su alta responsividad y se pueden implementar en arreglos. Esto permite que los bolómetros puedan ser empleados como detectores en cámaras térmicas.

2.3 Microbolómetros no enfriados basados en materiales depositados por plasma

2.3.1 Operación

Un bolómetro es un tipo de detector térmico que varía su resistencia cuando es calentado por radiación IR. Este tipo de detectores está formado por los siguientes elementos:

- Elemento de absorción IR: Este elemento o material es encargado de absorber con eficiencia la radiación IR e incrementar la temperatura del elemento termosensor.
- Elemento termosensor: Este elemento cambia su resistencia al ser calentado por el elemento de absorción.
- Elementos de aislamiento térmico: Estos elementos proporcionan aislamiento térmico controlando las pérdidas de calor por conducción y convección.

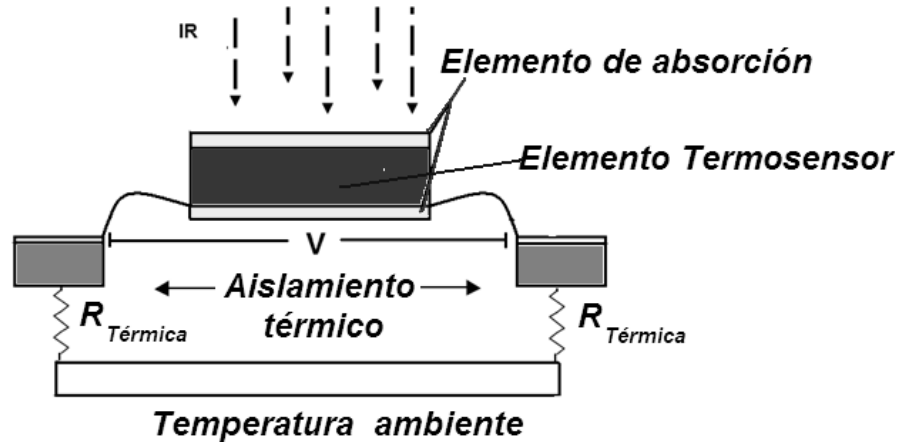


Figura 2. 1 Diagrama de elementos básicos en un detector térmico IR: bolómetro, elemento termosensor, elemento de absorción y aislamiento térmico

En la Figura 2.1 se ilustran las partes principales que forman un bolómetro. Los bolómetros en su inicio consistían en una banda delgada de platino conectada por un brazo a un puente de piedra afilada [2.1]. Posteriormente comenzaron a usarse semiconductores y metales como elementos de la estructura del bolómetro. Actualmente el material más empleado como elemento sensible es el óxido de vanadio VO_2 . Este material cuenta con un $TCR \approx 2\%K^{-1}$ y ha sido empleado por Honeywell en cámaras con arreglos de 320 x 240 [2.2].

Un microbolómetro se caracteriza por ser fabricado con técnicas de micromaquinado de silicio. La operación de estos dispositivos es similar a los bolómetros convencionales. Una alternativa para el desarrollo de estos tipos de bolómetros son los materiales amorfos. Los microbolómetros basados en este tipo de materiales presentan alto TCR como elemento termosensor, además, de presentar la gran ventaja de compatibilidad con tecnologías

CMOS actuales. Arreglos de 160x120 celdas se han desarrollado en países como Francia [2.3-2.4].

En la tabla 2.2 se muestran los materiales más comúnmente empleados como elementos sensitivos para estos dispositivos y se compara su TCR.

Tabla 2. 2 Comparación de TCR de los principales materiales sensitivos empleados en micro-bolómetros

Material	TCR (K⁻¹)	REFERENCIA
VO_x	0.021	[2.5-2.6]
a-Si:H (PECVD)	0.039	[2.7]
a-SiGe:H (PECVD)	0.043	[2.7]
Poly-SiGe	0.024	[2.8-2.9]

Se observa en la tabla 2.2 que los materiales amorfos presentan un mayor TCR comparado con el material más empleado (VO_x) para película termosensor en microbolómetros. Siendo a-SiGe:H el material con mayor TCR (0.043 K⁻¹)

Como se mencionó anteriormente la principal ventaja de los detectores térmicos es la temperatura de operación. En consecuencia, es posible desarrollar microbolómetros no enfriados gracias al elemento de absorción en el microbolómetro. La función principal de este elemento es incrementar la absorción de radiación IR y convertirla en calor. Estos elementos sensitivos son comúnmente capas de materiales que tienen un coeficiente de absorción en el rango de $\lambda=8-12 \mu\text{m}$ dependiendo de la aplicación, por esto, estos elementos son llamados también capas de absorción. Diferentes elementos como capas

delgadas de metal han sido reportados en literatura [2.10], con absorción del 50% en radiación IR. También, durante mucho tiempo se han utilizado películas de oro negro con 99% de absorción, sin embargo, este material no es compatible con la tecnología estándar de silicio [2.11].

Otro elemento importante que permite el desarrollo de microbolómetros no enfriados son los elementos de aislamiento térmico. La radiación absorbida por la capa de absorción convierte la radiación en calor, la cual, fluye hacia la capa sensitiva y sus alrededores. La transferencia de calor puede llevarse a cabo por conducción, convección y radiación. Los elementos térmicos controlan la transferencia del calor (generado por el elemento de absorción) a través de conducción y convección. Los elementos de aislamiento térmico pueden ser implementaciones de diseño en la estructura del dispositivo o por medio de materiales los cuales cuentan con una baja conducción térmica G_{th} .

En el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica se han estudiado y desarrollado microbolómetro basados en películas delgadas de a-SiGe:H compatibles con tecnología CMOS [2.2, 2.12, 2.13].

En [2.12] se propone como elemento sensitivo películas delgadas de a-SiGe:H depositadas por LF PECVD. Las películas a-SiGe:H desarrolladas tienen un $TCR \approx 5.9\% K^{-1}$ y como soporte mecánico se propone películas de a-SiN (Capa 1). Además, a-SiN también es empleado como elemento termosensor (Capa 2) con coeficientes de absorción máximo en $12\mu m$. Además, se desarrollan microbolómetros no enfriados con estructura de micro-

puente basados con estos materiales. En [2.13] se mejora el proceso de fabricación de microbolómetros y se comparan diferentes tipos de microbolómetros con diferentes películas sensitivas. En la Figura 2.2 se muestra la estructura de un microbolómetro desarrollado en el INAOE

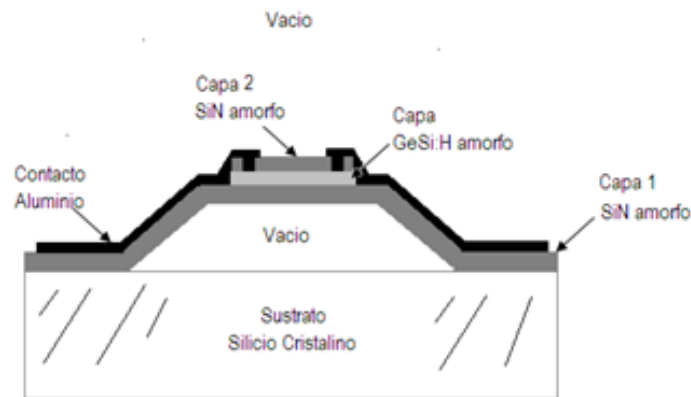


Figura 2. 2 Estructura de microbolómetro no enfriado con película sensitiva de SiGe:H [2.13]

En este tipo de estructura se implementa un micropuente, formado por las películas de soporte SiN, para reducir el área de contacto de la película sensitiva y reducir la transferencia de calor por contacto. Las películas SiN también son empleadas como elementos de absorción IR. La película a-SiGe:H es el elemento termosensor y los contactos son formados con aluminio. Todo suspendido en un sustrato de Si cristalino.

2.3.2 Estructura y fabricación

El estudio y fabricación de los microbolómetros se inició en el trabajo [2.12], sin embargo, el proceso de fabricación fue mejorado en [2.13] para mejorar el porcentaje de celdas

funcionales. El proceso de fabricación se muestra en la Figura 2.3. Las películas delgadas fueron depositadas con la técnica LF PECVD.

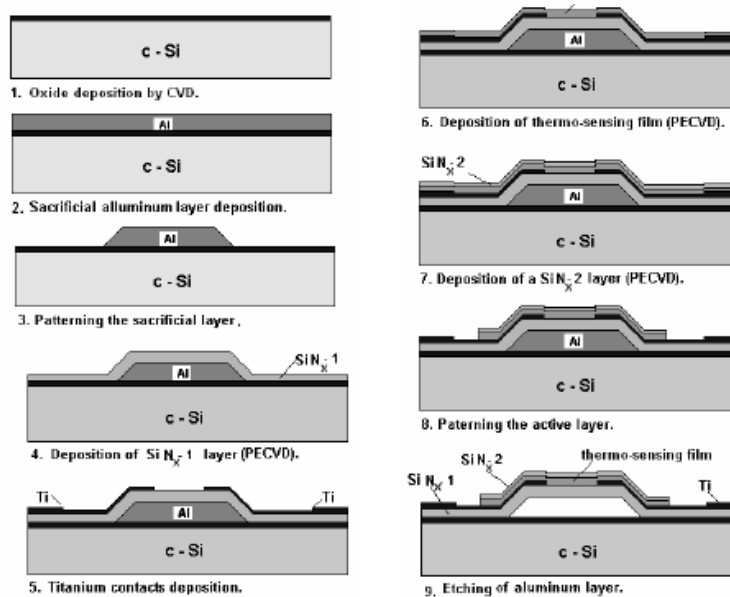


Figura 2. 3 Proceso de fabricación de microbolómetros no enfriados basados en materiales depositados por plasma [2.13]

Las etapas de fabricación en forma general son:

1. Depósito de óxido delgado por CVD.
2. Depósito de capa de aluminio de sacrificio.
3. Grabado y formación de soporte de sacrificio para el micropuente.
4. Depósito de SiN_{x-1} por PECVD.
5. Depósito de Titanio para formación de contactos.

6. Depósito de película termosensor $a\text{-Si}_x\text{Ge}_y\text{B}_z\text{:H}$.
7. Depósito de la segunda capa de SiN_{x-1} por PECVD
8. Formación de los patrones de área activa por el grabado de SiN_{x-1} y $a\text{-Si}_x\text{Ge}_y\text{B}_z\text{:H}$.
9. Grabado del soporte de aluminio para formación del micropuente.

Para mayores referencias sobre el proceso de fabricación consultar [2.13]. Las muestras fabricadas con este proceso son de estructura planar con película sensitiva de $a\text{-SiGe:H}$ o $a\text{-SiGeB:H}$.

2.4 Definición de figuras de merito en bolómetros

Las figuras de mérito son usadas para describir y comparar el desempeño de los detectores. Estos parámetros pueden ser definidos en términos de las señales de salida y de entrada en los detectores. Los parámetros más comunes para caracterizar los detectores IR son:

- Coeficiente de temperatura de resistencia: representa la variación de la resistencia en función de la temperatura.
- Responsividad: Relación de la señal de salida entre una señal de entrada
- Relación señal ruido: Relación entre una señal de entrada y el ruido presente en el sistema

- Potencia equivalente de ruido (NEP). Potencia mínima que puede ser detectada claramente por el detector.
- Detectividad específica (D*). Relación señal a ruido normalizada a un área con mediciones bajo condiciones de mediciones estándar. Este parámetro está definido por una relación señal a ruido y frecuencia unitaria.
- Crosstalk: es el parámetro que determina la proporción de una señal de entrada en una celda que interfiere con celdas vecinas a las cuales no ésta dirigida la señal. El crosstalk puede ser eléctrico, térmico y óptico.

A su vez estos parámetros pueden ser descritos tomando en cuenta algunas características físicas de los materiales con los cuales están formados los microbolómetros.

2.4.1 Coeficiente Térmico de Resistencia (TCR)

El coeficiente térmico de resistencia TCR por sus siglas en ingles es definido como el cambio fraccional en resistencia por unidad de cambio en temperatura (ecuación 2.1).

$$\alpha(T) = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} \quad (2.1)$$

Este coeficiente es positivo si el material es metal, lo cual significa que la resistencia incrementa con la temperatura. En cambio, si el coeficiente es negativo, el material es semiconductor y la resistencia es inversamente proporcional con la temperatura.

La conductividad, σ determinada por la generación térmica semiconductores puede expresarse como función de la temperatura:

$$\sigma(T) = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.2)$$

Donde σ_0 es el factor pre-exponencial, k es la constante de Boltzman y E_a es la energía de activación. Definiendo la resistividad como el inverso de la conductividad y despreciando la dependencia de la resistencia el TCR puede ser expresado como:

$$\alpha(T) = \left(\frac{1}{R}\right)\left|\frac{dR}{dT}\right| = \left(\frac{1}{\rho}\right)\left|\frac{d\rho}{dT}\right| = -\frac{E_a}{kT^2} \quad (\text{K}^{-1}) \quad (2.3)$$

Donde:

$$R = \frac{\rho L}{S} \quad (2.4)$$

R es la resistencia de la muestra, L la longitud entre electrodos y S el área transversal de la muestra en cm^2

2.4.2 Responsividad

La responsividad se define como la señal de salida por unidad de cambio en la entrada (ecuación 2.5):

$$\mathfrak{R} = \frac{\text{Señal_de_Salida}}{\text{Señal_IR_de_entrada}} \quad (2.5)$$

La responsividad puede expresarse tanto en salida en corriente sobre potencia incidente (A/W) o salida en voltaje sobre la potencia incidente (V/W). A su vez un modelo en 1D sobre la responsividad se presenta en [2.7]:

$$\mathfrak{R}_v = \frac{|TCR|\varepsilon V R_b R_L}{G_{th} (R_b + R_s + R_L)^2 \sqrt{1 + 4\pi f^2 \tau^2}} \quad (2.6)$$

Donde R_b es la resistencia del bolómetro, ε es la emisividad del bolómetro, V el voltaje de polarización, R_s la resistencia en serie debido a los conectores y R_L resistencia de carga, G_{th} la conductividad térmica del bolómetro, f la frecuencia de la señal y τ la constante térmica de tiempo.

2.4.3 Tiempo de respuesta térmico

El comportamiento térmico del bolómetro se describe a través del tiempo de respuesta térmico (ecuación 2.7).

$$\tau = C / G_{th} \quad (2.7)$$

Donde C es la capacitancia térmica y G_{th} la conductividad térmica [2.12]. Donde el tiempo de respuesta térmico puede ser determinado por técnicas experimentales y la capacitancia

térmica puede ser extraída de la estructura del dispositivo. El tiempo de respuesta térmico es el tiempo que tarda la señal de entrada hasta convertirse en señal de salida.

2.4.4 Potencia equivalente de ruido

La potencia equivalente de ruido, NEP (Noise Equivalent Power), es el flujo radiante necesario para obtener una relación señal a ruido igual a 1. En otras palabras, es la potencia necesaria a la entrada para generar una señal de salida, al menos, de igual amplitud que el ruido presente en el dispositivo. La NEP es expresada en función de la responsividad y el ruido en la ecuación 2.8.

$$NEP = \frac{noise}{\mathfrak{R}} \quad (2.8)$$

Las unidades de NEP son Watts.

2.4.5 Detectividad específica

La detectividad específica es el parámetro más importante para describir el desempeño de los detectores. La detectividad específica puede definirse como el inverso de la potencia necesaria para crear una relación señal a ruido de 1 con un ancho de banda de 1Hz en un cm^2 . La detectividad puede ser expresada en función de la responsividad del detector (ecuación 2.9).

$$D^* = \frac{\Re(A_d \Delta f)^{1/2}}{I_{noise}} \quad (2.9)$$

Donde A_d es el área del detector, Δf el ancho de banda equivalente del equipo de medición y I_{noise} es el ruido expresado en corriente. La detectividad específica puede definirse también como el inverso de la potencia equivalente de ruido normalizado a un área y a un ancho de banda (ecuación 2.10)

$$D^* = \frac{1}{NEP} (A_d \Delta f)^{1/2} \quad (2.10)$$

La detectividad es un parámetro fuertemente relacionado con el ruido del dispositivo. Por definición la detectividad específica es un parámetro que nos permite comparar diferentes tipos de detectores como pueden ser detectores térmicos y fotodetectores.

2.5 Ruido en sistemas IR: microbolómetros

El ruido es un parámetro importante en las características de los detectores. Aunque el ruido es un parámetro difícil de definir este puede expresarse como: *ruido es toda señal indeseada que se superpone a la señal deseada limitando su lectura [2.1]*. En un sistema una señal indeseada consiste de dos partes: una parte sistemática, la cual se puede predecir con una función y una parte en forma de fluctuación la cual depende de las propiedades del sistema. Este último tipo de ruido en detectores infrarrojos puede expresarse como ruido intrínseco: *Toda señal transmitida de carácter espontáneo (fluctuaciones) la cual es **la***

última limitación y depende de la naturaleza y las propiedades del sistema que puede ser descrita estadísticamente. En sistemas experimentales reales existen los dos tipos de ruido.

El ruido puede ser clasificado por el tipo de fuente que lo genera. En la Figura 2.4 se muestra una clasificación de los diferentes ruidos existentes en un sistema.

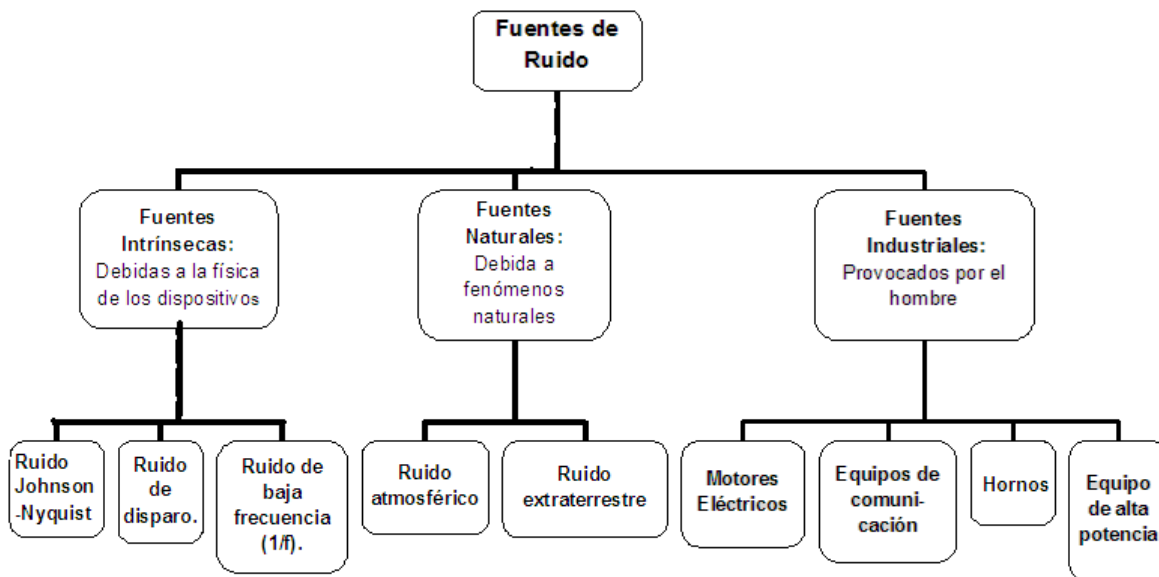


Figura 2. 4 Clasificación de ruido según su fuente de generación

En esta misma clasificación se pueden distinguir dos principales fuentes. El ruido que es generado por fuentes externas a los detectores y las fuentes de ruido debido al dispositivo mismo. Entre las fuentes externas al dispositivo se consideran: fuentes naturales, fuentes industriales y todas las fuentes intrínsecas relacionadas al equipo de medición. Entre las principales fuentes de ruido externo se encuentra:

- a) **Ruido atmosférico:** ruido de estática eléctrica el cual se escucha en los receptores de comunicación cuando no hay señal presente. Este ruido tiene un comportamiento en amplitud inversamente proporcional a la frecuencia.
- b) **Ruido extraterrestre:** es todo aquel ruido que proviene del espacio exterior. Este ruido tiene como fuentes todos los cuerpos celestes y eventos cósmicos. La magnitud de este tipo de ruido es relativamente pequeña (fA), sin embargo en el tratamiento de pequeñas señales tiene cierta influencia [2.14].
- c) **Ruido industrial:** es todo aquel ruido producido de forma directa por el hombre. Es el ruido de mayor impacto en los sistemas electrónicos y de comunicaciones. Este ruido proviene principalmente de motores eléctricos, equipos de comunicación, generadores de corriente, lámparas fluorescentes etc.
- d) **Ruido intrínseco:** este tipo de ruido está presente en todos los dispositivos de estado sólido. Es debido a la naturaleza discreta de las partículas que forman la materia. El ruido intrínseco se verá en la sección 2.5.2 está formado por diversas fuentes de ruido.

Para poder estudiar el ruido intrínseco en los bolómetros es necesario desarrollar una metodología de medición de ruido que excluya todas las componentes de ruido externas. Esto se puede lograr con técnicas de reducción de ruido empleadas en el equipo de medición y en el método de medición (sección 3.2.3).

2.5.1 Caracterización de ruido en detectores IR

El ruido intrínseco, en detectores IR, es la última limitación física del dispositivo. Como se vio en el apartado 2.4.5 una Figura de mérito importante es la detectividad específica. Este parámetro permite comparar el desempeño entre diferentes tipos de detectores IR. Además, es importante conocer el comportamiento del ruido en el detector en el dominio de la frecuencia (densidad espectral de ruido). Esto permite conocer la cantidad de ruido en las frecuencias de operación del dispositivo.

2.5.1.1 Densidad espectral de ruido

La función de densidad espectral de ruido $S_x(f)$ describe la distribución espectral de la potencia de la señal de ruido en un determinado rango de frecuencias. Si el ruido es considerado como un proceso aleatorio estacionario $X(t)$. Entonces, el promedio cuadrado de $X(t)$ está relacionado con su función de densidad espectral de ruido por el teorema de Wiener-Khintchine como:

$$\overline{X^2(t)} = \int_0^{\infty} S_x(f) df \quad (2.11)$$

Donde $S_x(f)$ es la función de densidad de espectral de ruido de $X(t)$. Y $X^2(t)$ es el promedio cuadrado de las fluctuaciones en el tiempo. Por lo tanto la densidad espectral de ruido $S_x(f)$ puede obtenerse por métodos experimentales. Si $X(t)$ es aplicado a un sistema lineal con

función de transferencia $g(f)$ se obtiene una señal de salida del sistema $Y(t)$. Al ser un sistema lineal la densidad espectral de ruido de $X(t)$ y $Y(t)$ están relacionadas por:

$$S_y(f) = S_x(f)|g(f)|^2 \quad (2.12)$$

Aplicando la ecuación 2.11 se obtiene:

$$\overline{Y^2(t)} = \int_0^{\infty} S_x(f)|g(f)|^2 df \quad (2.13)$$

Si el sistema lineal es un amplificador, entonces, $S_x(f)$ puede ser medido con un detector cuadrático. Para esto el amplificador debe de ser ajustado abruptamente a una frecuencia f_c .

De esta manera $\overline{Y^2(t)}$ tiende a $S_x(f) \approx S_x(f_c)$ sobre el ancho de banda del amplificador como:

$$\overline{Y^2(t)} = S_x(f_c) \int_0^{\infty} |g(f)|^2 df = S_x(f_c) g_0^2 B_{eff} \quad (2.14)$$

Donde $g_0 = g(f_c)$ es la respuesta a medio ancho de banda del sistema y B_{eff} es el ancho de banda efectivo del amplificador también conocido como *ancho de banda de ruido* Δf definido como:

$$\Delta f = B_{eff} = \frac{1}{g_0^2} \int_0^{\infty} |g(f)|^2 df \quad (2.15)$$

Los valores de g_0 y B_{eff} pueden ser determinados del amplificador. Finalmente se obtiene $S_x(f)$ del valor medido de $\overline{Y^2(t)}$.

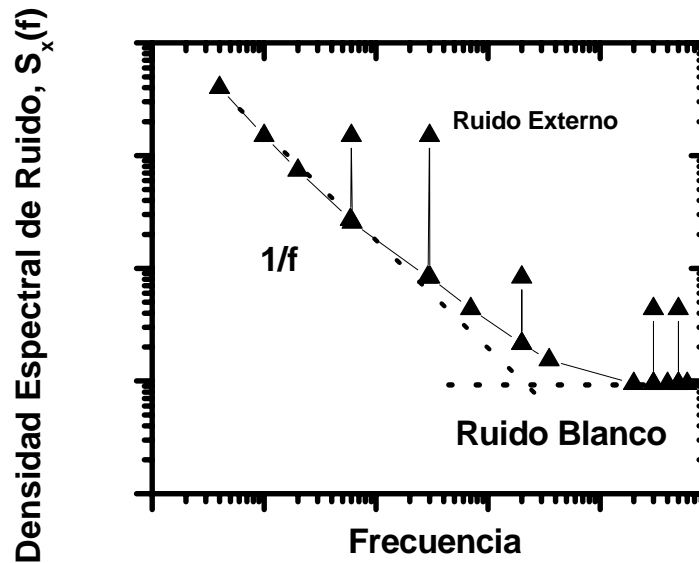


Figura 2.5 Ejemplo típico de Densidad espectral de ruido con región $1/f$, ruido blanco y ruido debido a fuentes externas

Un ejemplo típico de una función $S_x(f)$ arbitraria se muestra en la Figura 2.5. Se muestran las dos regiones correspondientes al ruido $1/f$ y ruido blanco compuesto por ruido Johnson, de disparo entre otros [sección 2.5.2]. Además de las fuentes intrínsecas de ruido se muestran distorsiones en forma de picos de amplitud debidos a fuentes de ruido externo.

2.5.2 Ruido en microbolómetros basados en materiales amorfos

El ruido intrínseco en los bolómetros es causado por la naturaleza que determina la concentración de carga y de movimiento aleatorio de los portadores de carga. Existen

diferentes fuentes de ruido en los dispositivos electrónicos, sin embargo, solo algunas de estas fuentes tienen influencia importante en el desempeño de los bolómetros.

2.5.2.1 Ruido 1/f

El ruido 1/f o también llamado “Flicker noise” es un fenómeno universal presente en diferentes procesos físicos. El origen de este tipo de ruido no es del todo claro. Sin embargo, existen algunos modelos sobre los posibles procesos que lo generan. Entre estos modelos se encuentran modelos puramente matemáticos y modelos basados en mecanismos físicos del sistema en el cual se presenta el ruido 1/f.

En dispositivos electrónicos han sido propuestas diversas fuentes de ruido 1/f que aun están siendo discutidas. Los efectos de superficie y de cuerpo son los más aceptados como causas del ruido 1/f. Los efectos de cuerpo se presentan por fluctuaciones de concentración de carga y movilidad debido a efectos de captura y emisión por impurezas. Los efectos de superficie son debidos a defectos de enlaces en las superficies de los materiales. Otra fuente posible de ruido 1/f son los contactos no óhmicos. El ruido 1/f al parecer es la combinación de estos y otros efectos [2.15]. En sistemas electrónicos como ruido en materiales amorfos se ha encontrado que este tipo de ruido presenta la forma $1/f^\beta$ donde $\beta=0.5-1.5$.

El estudio del ruido 1/f en materiales amorfos (a-Si:H) obedece a dos modelos principalmente. El modelo propuesto por Van der Ziel en 1953 [2.16] atribuye las fluctuaciones de carga causantes del ruido 1/f a la distribución de estados localizados entre

la banda de conducción y la banda de valencia en materiales amorfos. Estas fluctuaciones pueden ser expresadas por procesos individuales:

$$S_i(\omega) = 2 \left(\frac{q\mu V}{d^2} \right)^2 \overline{\Delta N^2} \frac{\tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.16)$$

Donde V es el voltaje a través de la muestra, d es el grueso de la muestra, μ es la movilidad de carga, $\overline{\Delta N^2}$ el promedio cuadrado de la fluctuación en el número de carga debido al proceso de captura-emisión y τ es el tiempo de captura de un electrón. Los procesos de este tipo contribuyen de forma aditiva en el ruido total. Cálculos analíticos sobre este modelo muestran que puede ser utilizado para comprender las variaciones de pendiente β en $S_x(f)$ en materiales amorfos. Sin embargo este modelo es complejo y no es empleado para el análisis de resultados experimentales.

El segundo modelo empleado en ruido 1/f es puramente empírico del cual se deduce la fórmula de Hooge [2.17]:

$$\frac{S_I(f)}{I^2} = \frac{\gamma}{fN_f} \quad (2.16)$$

Donde I es la corriente de polarización, γ es constante de Hooge, f es frecuencia y N_f es el número de carga libre. Esta fórmula es soportada por muchos resultados experimentales, sin embargo, no existe un modelo físico totalmente satisfactorio para explicar la relación en la

ecuación 2.16. Además que existen resultados experimentales sobre ruido que no pueden ser explicados por esta fórmula.

2.5.2.2 Ruido Johnson o ruido térmico

Fue en 1928 cuando Johnson [2.1] probó experimentalmente que un resistor actúa como una fuente de ruido con valor rms en voltaje igual a:

$$\overline{v^2}_{noise} = 4kTR\Delta f \quad (2.17)$$

Donde k es la constante de Boltzmann, T es la temperatura del resistor en $^{\circ}\text{K}$, R es la resistencia y Δf es el ancho de banda eléctrico asociado al equipo de medición. Si el dispositivo es una impedancia, el ruido es independiente de la parte capacitiva o inductiva.

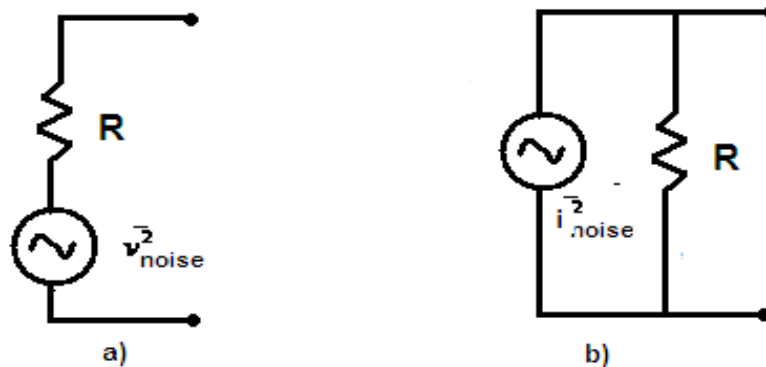


Figura 2. 6 Circuito equivalente para el ruido térmico en un resistor a) Voltaje b) Corriente

El ruido térmico en voltaje en dispositivos basados en materiales amorfos puede ser importante debido a la alta resistividad característica de estos materiales.

El ruido térmico puede ser expresado tanto en corriente como voltaje. En la Figura 2.6 se muestra los circuitos equivalentes del ruido térmico. En la Figura 2.6 a) se muestra el modelo de una fuente de ruido en serie con un resistor ideal. En la Figura 2.6 b) se muestra el modelo del ruido correspondiente a una fuente de ruido en corriente en paralelo con un resistor ideal. Tomando en cuenta que para los valores rms de voltaje y corriente la relación es:

$$\overline{v^2}_{Jnoise} = \overline{i^2}_{Jnoise} R \quad (2.18)$$

Entonces el equivalente en corriente:

$$\overline{i^2}_{Jnoise} = \frac{4kT\Delta f}{R} \quad (2.19)$$

El ruido térmico es parte del ruido llamado *blanco*. Una fuente de ruido blanco es independiente de la frecuencia y es dominante en alta frecuencia.

El ruido Johnson está presente en todos los materiales conductores. La causa de este ruido es el movimiento aleatorio de los electrones en los materiales conductores. El constante movimiento de los electrones y sus colisiones causan el ruido Johnson. Cada trayectoria de un electrón libre hasta su colisión provoca una mínima corriente y la suma de todas estas

corrientes aleatorias en un corto periodo de tiempo es el ruido total Johnson. La suma de estas corrientes en un periodo largo es igual a cero. La velocidad rms de los electrones es proporcional a la temperatura y por lo tanto el ruido Johnson es proporcional, también, a la temperatura. Por esta razón comúnmente el ruido Johnson es también llamado ruido térmico.

El ruido térmico en un sistema puede ser reducido disminuyendo la resistencia del mismo o reduciendo el ancho de banda. Si el ruido térmico es demasiado grande, entonces puede ser considerablemente menor si se baja la temperatura de operación. Otra característica importante del ruido térmico es que es una función universal. En otras palabras, un resistor de 10Ω de carbón tendrá el límite de ruido térmico igual al de otro resistor de 10Ω de cualquier otro material.

2.5.2.3 Ruido de disparo.

En 1918, Schottky, describió el ruido conocido como ruido de disparo. Un flujo de electrones en un tubo de vacío muestra un ruido causado por la naturaleza discreta y aleatoria de los electrones que llegan al electrodo colector. El ruido de disparo es expresado como:

$$\overline{i^2} = 2eI\Delta f \quad (2.20)$$

El ruido de disparo es proporcional a la corriente de polarización I_{DC} atravesando el dispositivo. Este tipo de ruido es ruido blanco con distribución gaussiana al igual que el ruido térmico. Dado un ancho de banda el ruido de disparo solo depende de la corriente de polarización. En dispositivos con materiales amorfos el ruido de disparo puede estar oculto debajo del ruido de Johnson.

2.5.2.4 Ruido de temperatura

El ruido de temperatura es observado en detectores térmicos únicamente. Este tipo de ruido es causado por fluctuaciones de la temperatura de operación de los detectores o por fluctuaciones de transferencia de calor del detector con sus alrededores. Este tipo de ruido es independiente de la frecuencia y es reducido controlando la transferencia de calor por los mecanismos de conducción y convección. Los microbolómetros al ser detectores de tipo térmico están expuestos a este tipo de ruido debido a que el material termosensor es sensible a estos cambios de temperatura.

2.6 Análisis del estado arte del sobre el estudio de ruido en microbolómetros

El ruido en microbolómetros ha sido muy poco reportado en la literatura. Esto es consecuencia de la diversidad de dispositivos, diversidad de materiales, la complejidad del ruido en materiales amorfos y en algunos casos, por motivos comerciales. En este trabajo el análisis de ruido se dividirá en tres partes: análisis de metodologías de medición de ruido,

análisis de ruido en materiales con aplicación en microbolómetros y análisis de ruido en microbolómetros.

2.6.1 Análisis de metodologías de medición de ruido

El reporte sobre metodologías de medición de ruido en materiales amorfos es muy escaso. Salvo un par de excepciones [2.18-2.20] el reporte de una metodología de medición en las publicaciones de ruido en materiales amorfos se limita a la presentación de la instalación de medición. Esto dificulta el análisis sobre el método empleado y procesamiento de los datos experimentales en literatura.

El objetivo principal de una metodología de medición de ruido para el estudio en materiales amorfos es la obtención de la densidad espectral de ruido $S_x(f)$. El método por el cual se obtienen $S_x(f)$ de un dispositivo o material se conoce como “Noise spectroscopy”. Este método como se observó en la sección 2.5.1.1 consiste en la medición de $Y(t)$ y a través del teorema de Wiener-Khintchine obtener la función $S_x(f)$. La diferencia fundamental en las técnicas de medición reportadas en la literatura es el equipo de medición para la obtención de $Y(t)$ y $S_x(t)$. En 1983 J.C Anderson propuso el método de “Noise spectroscopy” para el estudio de materiales amorfos, particularmente en a-Si:H [2.18]. En 1987 ocupa esta misma técnica para el estudio de ruido en películas a-Si y resuelve de forma numérica la integral en el modelo de ruido de Van der Ziel para ciertas condiciones y diferentes energías E_0 .

En la Figura 2.7 se muestra la instalación empleada por Anderson para el estudio de ruido en películas a-Si.

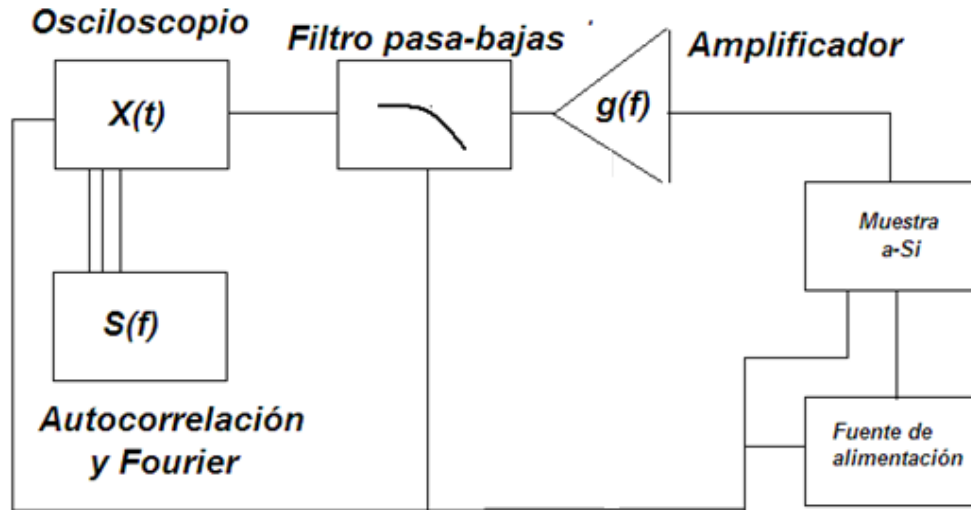


Figura 2.7 Instalación empleada por Anderson para medición densidad espectral de ruido (Noise spectroscopy) en películas a-Si [2.18]

La técnica de espectroscopia de ruido puede dividirse en las siguientes etapas: amplificación de las fluctuaciones (pre-amplificador y amplificador), filtro pasa-bajas (una serie de filtros seleccionan el ancho de banda de las mediciones), muestreo de $X(t)$ y obtención de $S(f)$.

Actualmente el desarrollo de equipo de caracterización permite obtener directamente $S(f)$ para su análisis. Equipo como analizadores de espectro FFT son utilizados para obtener $S(f)$. En [2.15] se reporta el uso de un analizador dinámico de señal para la obtención de $S(f)$ directamente en $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{O}_y$ para aplicaciones en microbolómetros. En [2.19] también se reportan mediciones de ruido en microbolómetros con analizador de espectro FFT. Sin

embargo, los analizadores comerciales tienen impedancias en el rango de 10^6 - $10^7 \Omega$ que limitan las mediciones de muestras de alta impedancia. Este último es problema que se enfrenta al medir ruido en bolómetros basados en materiales amorfos. Como veremos en la sección 2.6.1 la alta resistividad de estos materiales complica las etapas de amplificación. En la Figura 2.7 se muestra un esquema de las instalaciones de medición de ruido con estas etapas. En [2.15] se emplea un preamplificador para el acoplamiento de impedancias entre el analizador FFT. En [2.20] se realiza un estudio de las posibles fuentes de ruido dentro de una instalación para mediciones de ruido y se observa la importancia de reducirlas al máximo. En este último trabajo también se emplea un analizador de espectro FFT para la medición de ruido posterior a una etapa de preamplificación y amplificación. Sin embargo, los microbolómetros manejados son de baja impedancia (200Ω).

Otro punto importante sobre la metodología de medición es el rango de frecuencias permitido. En estudios en materiales amorfos como a-Si:H [2.18] este rango de estudio se extiende hasta frecuencias de 10^4 Hz debido al dominio de ruido $1/f$ en gran parte del rango de frecuencia. Por lo tanto un gran rango en frecuencias permite observar el comportamiento de ruido en la región $1/f$ y sus límites. En cuanto a la metodología existen otros puntos importantes como reducción de ruido externo y procesamiento de datos que no siempre son reportados.

2.6.2 Análisis de ruido en materiales termosensores en microbolómetros

El elemento termosensor en los microbolómetros es el más importante ya que de él depende en mayor parte el desempeño del dispositivo. Diferentes materiales han sido empleados como elementos sensitivos en microbolómetros. El más común es el óxido de Vanadio (VO_x) por su alto $\text{TCR} \approx 2\%$ de resistencia a $T = 200\text{K}$. Arreglos de microbolómetros basados en VO_x han sido desarrollados y reportados en [2.21]. Sin embargo, el VO_x no es un material estándar compatible con la tecnología CMOS y numerosos procesos adicionales son requeridos para lograr esta compatibilidad. Algunos metales como Titanio [2.22] y Platino [2.23] han sido empleados como materiales termosensores. Desafortunadamente, estos materiales cuentan con un bajo TCR comparado con materiales semiconductores. Materiales policristalinos como Si y SiGe presentan un $\text{TCR} \approx 2.5\%$ [2.24], no obstante, estos materiales requieren de altas temperaturas ($T = 650^\circ\text{C}$) para obtener su estructura policristalina [2.8]. Estas temperaturas pueden afectar procesos anteriores en la fabricación de las estructuras de los microbolómetros. Por otro lado, materiales amorfos como a-Si:H [2.3] a-SiB:H [2.8, 2.25], a-SiGe:H [2.26] presentan un alto TCR (2%-5%) y son compatibles con la tecnología estándar de CMOS. En consecuencia los materiales amorfos han sido empleados actualmente como base en la fabricación de microbolómetros no enfriados. Sin embargo, estos materiales cuentan con una alta impedancia (10^3 - $10^8 \Omega$) que requiere una etapa adicional de acoplamiento con el circuito de lectura en sistemas de detección IR.

Además de las características mencionadas anteriormente se debe estudiar el ruido en los materiales termosensor. Sin embargo este estudio en literatura es escaso y no se encuentra estandarizado. Esto dificulta la comparación de ruido entre los diferentes materiales termosensores.

Tabla 2.3 Ruido reportado en diferentes materiales con aplicaciones en microbolómetros en la región 1/f [2.15]

Material	$S_v(f)$ (V^2/Hz)	Frecuencia
a-Ge _x Si _{1-x} O _y	7×10^{-13}	250 Hz
VO _x	10^{-12}	0.1 Hz
a-Si (dopado)	8.1×10^{-7}	25 Hz
a-Si	4×10^{-12}	1 Hz
a-Si (PECVD)	1.1×10^{-6}	10 Hz
a-SiC:H	8×10^{-14}	20 KHz
a-Ge	1×10^{-10}	10 Hz
a-YBCO	2.5×10^{-11}	1 Hz
Poly SiGe	10^{-11}	1 Hz
Poly Si	3.6×10^{-13}	10 Hz

En la tabla 2.3 se muestra $S_v(f)$ reportado para diferentes materiales con aplicaciones en microbolómetro en la región de baja frecuencia [2.15]. Como se mencionó anteriormente, en la tabla 2.3 se observa la diferencia que existe en la frecuencia al momento de reportar el ruido en películas termosensor. Esto complica la comparación de resultados reportados en la literatura. Sin embargo, es posible observar algunos puntos generales. El primer punto importante que se puede observar es la gran diferencia que existe en ruido para un mismo material como a-Si con diferentes técnicas de fabricación. Para a-Si depositado por plasma

se tiene una PNSD en voltaje de $1.1 \times 10^{-6} \text{ V}^2/\text{Hz}$ a diferencia de a-Si en la cual no se especifica la técnica de depósito se tiene $4 \times 10^{-12} \text{ V}^2/\text{Hz}$. Esta diferencia es de 6 órdenes de magnitud. Por otro lado la diferencia en frecuencia para estos datos reportados es de un solo orden de magnitud. El material a-SiC:H no puede compararse debido a que la diferencia en frecuencia es de 4 ordenes. De entre los materiales reportados no existen referencia sobre el ruido en materiales a-Si_xGe_yB_z:H. Las referencias más directas son los materiales a-Si:H y a-Ge_xSi_{1-x}O_y.

En materiales amorfos se reporta un dominio de ruido 1/f con variaciones de pendientes $\beta = 0.4-1.4$ [2.16, 2.17, 2.18]. Esto provoca que el ruido cambie en órdenes de magnitud en rangos de frecuencia distintos. Este ruido 1/f, además, se extiende en estos materiales en rangos de frecuencia de 1Hz- 50KHz. El estudio experimental de efectos de temperatura y polarización en el ruido es poco claro en literatura.

Tabla 2.4 Valor reportado de pendiente β en la región de ruido 1/f en muestras de a-Si en [2.16]

Muestra	Temperatura (°C)	Pendiente β	PNSD $S_I(f)$ (A^2Hz^{-1})	Frecuencia (Hz)
a-Si:H (100-2 kHz)	150°C	1	1×10^{-22}	1×10^3
			5×10^{-23}	5×10^3
			1×10^{-23}	5×10^4
	100°C	0.8	1×10^{-23}	3×10^2
			5×10^{-24}	1×10^3
			1×10^{-24}	3×10^3
	55°C	0.69	1×10^{-25}	5×10^2
			6×10^{26}	1×10^3
			1.5×10^{26}	5×10^5

En la tabla 2.4 se muestran resultados experimentales sobre el efecto de temperatura en una muestra de a-Si:H [2.16]. Se observa que para un aumento de temperatura aproximadamente de 50° se tiene incrementos en el ruido 1/f de 2 órdenes de magnitud. La pendiente por otro lado aumenta conforme se aumenta la temperatura. En [2.17] se presentan resultados experimentales en a-Si:H para diferentes niveles de dopados y temperaturas. En la tabla 2.5 se muestra ejemplos de valores de β para a-Si:H con diferentes niveles de dopado y temperatura.

Tabla 2.5 Densidad espectral de ruido normalizada en corriente de polarización para cuatro muestras de a-Si: a diferentes temperaturas y nivel de dopado [2.17]

Muestra	Temperatura (K)	Pendiente β	$S(f)/I^2$ @100Hz (Hz⁻¹)
i) a-Si:H Tipo n (10^{-5})	448	1.21	10^{-13}
ii) a-Si:H Tipo p (10^{-4})	390	---	10^{-15}
iii) a-Si:H Tipo n (10^{-4})	295	1.07	10^{-15}
iv) a-Si:H Tipo p (5×10^{-2})	388	1.45	10^{-17}

Los resultados en la tabla 2.5 son difíciles de interpretar debido a que se cambian dos parámetros: dopaje y temperatura. Por otro lado se presenta un estudio sobre el efecto de ruido en una sola muestra en el mismo trabajo [2.17]. La energía de activación reportada en este último trabajo para una muestra de a-Si:H tipo n (10^{-4}) es $E_{na}=0.10$ eV con valores de $S_I(f)$ de 3.9×10^{-25} a 11×10^{-25} A²Hz⁻¹, a temperatura T=380K a T=450K respectivamente.

Los efectos de polarización en el ruido no son reportados en literatura para a-Si:H Sin embargo, existe un estudio de este efecto para a-Si_xGe_{x-1}O_y. Estos resultados se muestran en la figura 2.8.

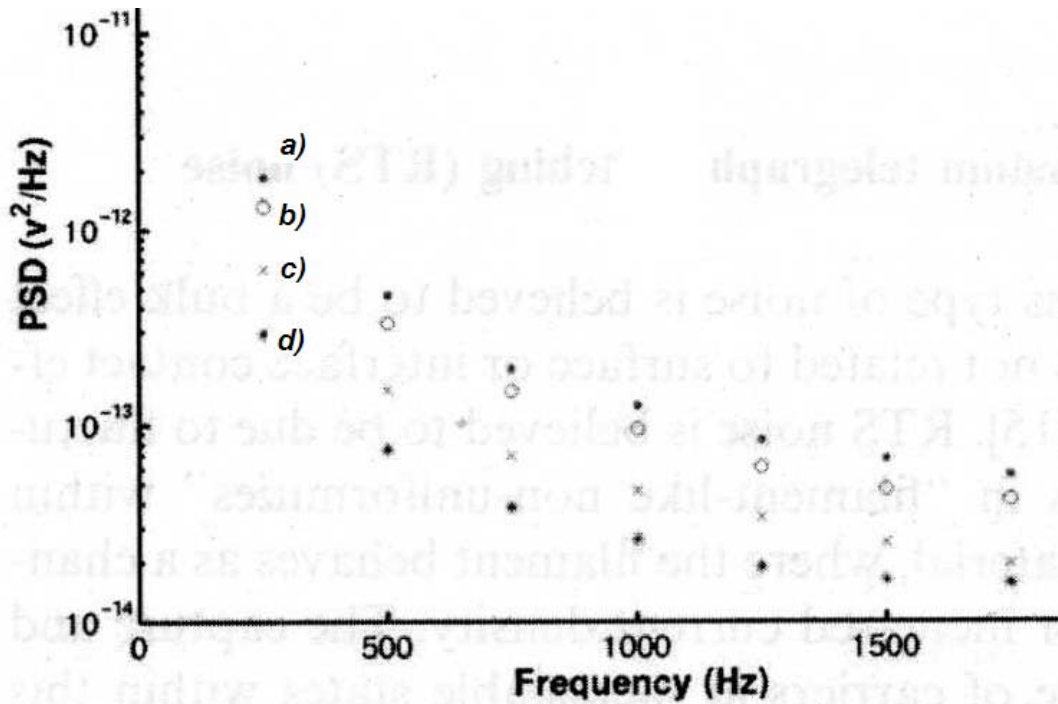


Figura 2.8 Densidad Espectral de Ruido en voltaje para una muestra a-Si_xGe_{x-1}O_y, a) I_b=9μV b) I_b=7μV c) I_b=4μV d) I_b=1μV [2.15]

En esta se muestra un aumento de ruido con un aumento de la corriente de polarización. Este aumento se encuentra dentro del mismo orden de magnitud de ruido.

Otro factor importante en el análisis y comparación sobre el comportamiento del ruido en materiales es la constante de Hooge γ (ecuación 2.16). La constante de Hooge en la ecuación 2.16 tiene valor $\sim 2 \times 10^{-3}$ [2.16]. Sin embargo, este valor no es una constante del

todo ya que se han reportado variaciones de $\approx 10^{-4}$ a $\approx 10^{-2}$ [2.18] en a-Si:H. Por otro lado para la referencia [2.15] se reporta una “constante” $\gamma=2.9 \times 10^{-9}$ en a-Si_xGe_{x-1}O_y.

Finalmente un reporte interesante se encuentra en [2.28] para una muestra de a-Si_xGe_{x-1}O_y. Estos estudios muestran que el ruido 1/f puede ser disminuido por procesos de recocido. Los resultados se muestran en la Figura 2.9.

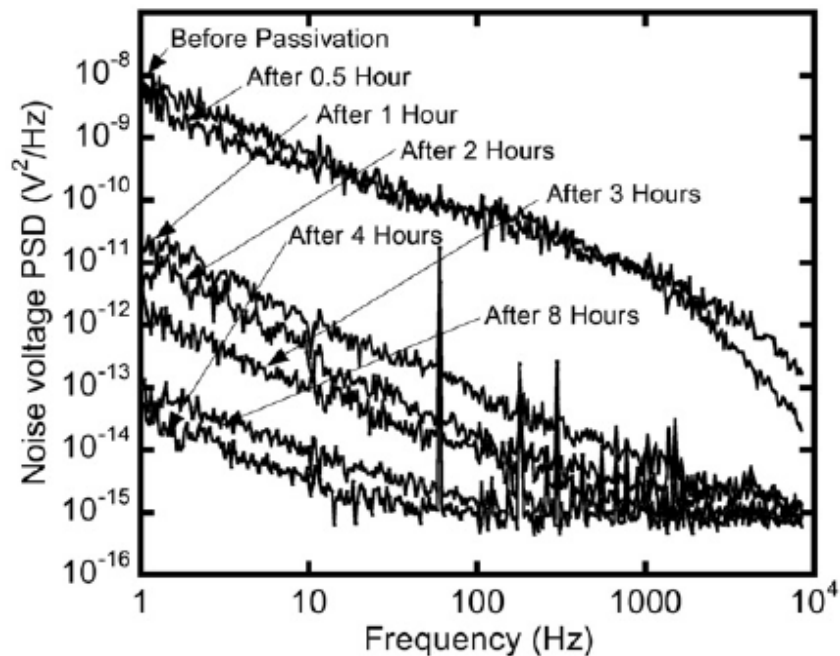


Figura 2.9 Reducción de PSD en voltaje en a-Si_xGe_{x-1}O_y debido a proceso de recocido(T=250°C) en la muestra para diferentes tiempos [2.28]

La figura 2.9 muestra la reducción de ruido 1/f para muestras que han sido sometidas a procesos de recocido a diferentes tiempos. Se puede observar que la disminución de ruido se encuentra dentro de varios órdenes de magnitud después de una hora del proceso. Estos

reportes en literatura dan un gran potencial a los materiales termosensores basados en a-Si:H para aplicación en microbolómetros ya que el ruido es una de las principales desventajas de estos materiales.

Como se mencionó anteriormente el estudio de ruido en a-Si_xGe_{1-x}:H y a-Si_xGe_yB_z:H no ha sido reportado para aplicaciones de microbolómetros. Esto es debido a que sólo recientemente se ha empleado este material para este tipo de aplicación. Por tal motivo tampoco existe reporte sobre el ruido y los efectos de temperatura y polarización en estos materiales. Algunos estudios de ruido en a-SiGe para aplicación en TFT y HBT se muestran en [2.29], pero el enfoque del estudio sobre ruido no se aplica en microbolómetros.

2.6.3 Análisis de ruido en microbolómetros

El reporte de la densidad espectral de ruido en microbolómetros es más pobre comparado con el estudio de ruido en materiales. En la Figura 2.10 se muestra la densidad espectral de ruido normalizada en corriente para un microbolómetro comercial de la compañía LETI [2.35]. En los resultados presentados por la compañía LETI se observa que al igual que el material termosensor a-Si:H, en el microbolómetro existe un dominio de ruido 1/f. Los resultados presentados de $S_x(f)$ son normalizados en corriente de polarización. Sin embargo no se presenta el valor de esta corriente. Esto impide la comparación de los resultados con respecto a los niveles de ruido.

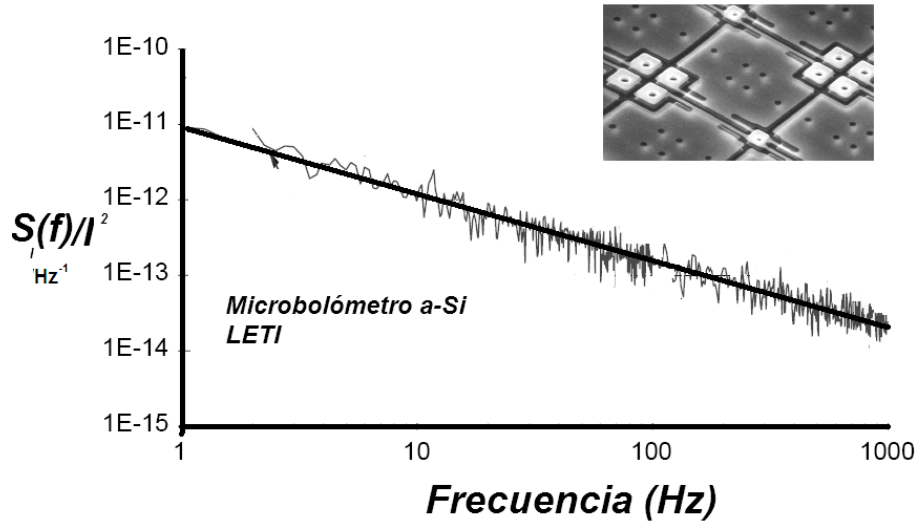


Figura 2.10 Densidad Espectral de ruido normalizada por el cuadrado de corriente de polarización para microbolómetro a-Si compañía LETI / imagen de microbolómetro a-Si [2.35]

En la figura 2.11 se muestra la densidad espectral de ruido para un microbolómetro con material termosensor $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}\text{O}_y$.

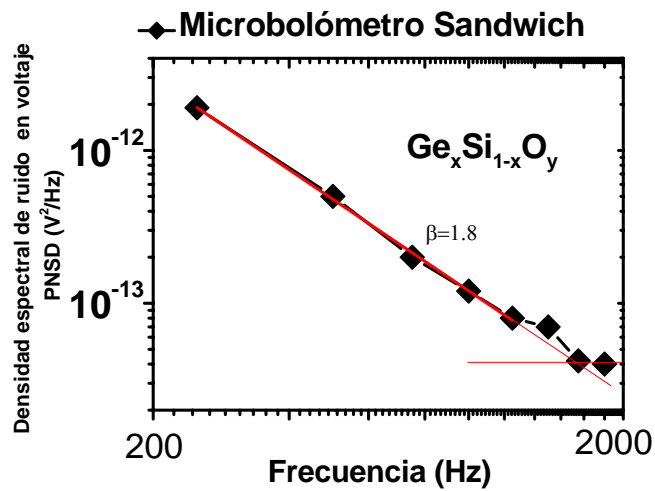


Figura 2.11 Densidad espectral de ruido en voltaje para microbolómetros $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{O}_y$ con estructura de Sándwich $I_{\text{bias}}=1\mu\text{A}$ [2.28]

En la figura 2.11 se observa que existe un dominio de ruido $1/f$ en el dispositivo. Sin embargo en alta frecuencia se observa una región de ruido blanco. Para ambas figuras se puede observar que el ruido dominante en los microbolómetros con películas termosensor es ruido $1/f$. Por lo tanto se puede determinar que el ruido dominante en los microbolómetros es del material termosensor.

La forma más común de describir el comportamiento del microbolómetro en relación al ruido, es la detectividad D^* . Sin embargo, aún este parámetro es muy pocas veces reportado en literatura. Algunos valores reportados de D^* en literatura para diferentes microbolómetros se muestran en la tabla 2.7

Tabla 2.7 Detectividad específica reportada para microbolómetros con diferentes materiales termosensibles

Material	Detectividad ($\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$)	Referencia
VWO_x	1.1×10^7	[2.30]
$\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{O}_y$	6.7×10^8	[2.15]
a- YbaCuO	9.45×10^7	[2.31]
Pt	1.6×10^8	[2.31]
Ni-Fe	1×10^9	[2.21]
VO_x	1.89×10^8	[2.32]
Poly-Si	4.9×10^2	[2.24]
Poly-SiGe	8.3×10^8	[2.33]
a-Si	2×10^8	[2.34]
a-Ge	3.2×10^8	[2.34]

Un problema que presenta la detectividad al ser reportada es que no se especifica la frecuencia para la cual fue considerada. Sobre todo en materiales amorfos en los cuales domina el ruido $1/f$. Por lo tanto la frecuencia es un parámetro muy importante, no obstante, no es indicado en los reportes publicados. Aun así se observa que el rango de detectividad de los microbolómetros se encuentra en 10^7 - 10^9 $\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$.

2.7 Conclusiones Capitulo 2

El análisis de literatura sobre ruido en materiales termosensores y microbolómetros nos permite realizar las siguientes conclusiones:

- *Sobre metodologías de medición de ruido.* No se han reportado suficientes detalles sobre mediciones, procesamiento de datos, equipo de medición ni reproducibilidad de datos. Esto dificulta la comparación los resultados obtenidos entre diferentes laboratorios.
- *Sobre estudio de ruido en materiales termosensores.* No existen estudios sobre ruido en películas $a\text{-Si}_x\text{Ge}_{1-x}\text{:H}$ y $a\text{-Si}_x\text{Ge}_y\text{B}_z\text{:H}$ con aplicación en microbolómetros. Las referencias más cercanos sobre estudio de ruido para comparación, han sido reportadas en literatura sobre materiales $a\text{-Si:H}$ y $\text{Si}_x\text{Ge}_y\text{O}_z$.
- *Sobre efectos de temperatura y polarización.* Los estudios sobre los efectos de temperatura y polarización en el ruido en materiales amorfos ha sido muy poco

([2.17], [2.27] y [2.15]), por tal motivo, los efectos de temperatura y polarización han sido comparados

- *Sobre ruido en microbolómetros.* No ha sido reportado el ruido en microbolómetros con película termosensor $a\text{-Si}_x\text{Ge}_{1-x}\text{:H}$ y $a\text{-Si}_x\text{Ge}_y\text{B}_z\text{:H}$. Las referencias más cercanas se encuentran en microbolómetros basados en $a\text{-Si:H}$ y $\text{Si}_x\text{Ge}_y\text{O}_z$. Estas referencias muestran un dominio de ruido $1/f$ en un rango de frecuencias de $10^0\text{-}10^4$ Hz.
- *Sobre detectividad en microbolómetros.* Es el único parámetro que permite comparar diferentes detectores (térmicos y fotodetectores) y se encuentra basado en la relación entre responsividad y ruido. Sin embargo no existen datos suficientes reportados en literatura para microbolómetros. Su descripción en literatura es poco clara ya que no se especifica el tipo de ruido considerado, la frecuencia y la metodología empleada para la su obtención.

2.8 Referencias Capítulo 2

- [2.1] **Jr., R.D.Hudson.** *Infrared system engineering.* USA Wiley : s.n., 1969.
- [2.2] **Cruz Garcia, María de la Luz,** “*Characterization and Modeling of Uncooled Microbolometers of a-SiGe*” [tesis doctoral], INAOE, Puebla, 2006.

- [2.3] **A.J.Syllaios, T.R.Schimert, R.W.Gooch, W.L.McCardel, J.H.Tregilgas, and B.A. Ritchey** "*Amorphous silicon microbolometer technology*", s.l. : Material Research Society Symposium, Vol. 609 p.p.A14.4.1-A14.4.6, 2000.
- [2.4] **J.T.Tssot.** "*Advanced IR technology development at CEA/LETI*". s.l. : infrared Phys. Technol., Vols. 43, no.3-5,p.p 223-228, 2002
- [2.5] **B. E. Cole, R.E. Higashi and R. A. Wood,** "*Monolithic Arrays of Micro-machined Pixels for Infrared Applications*", International Electron Devices Meeting, IEDM '98 Technical Digest., pp. 459 – 462, 1998.
- [2.6] **Yong-Hee Han, In-Hoon Choi, Ho-Kwan Kang, Jong-Yeon Park, Kun-Tae Kim, Hyun-Joon Shin, Sung Moon,** "*Fabrication of vanadium oxide thin film with high temperature coefficient of resistance using VO₂/V/V₂O₅ multilayers for uncooled microbolometers*", journal of Thin Solid Films, Vol. 425, pp.260-264, 2003.
- [2.7] **R. Ambrosio, A. Torres, A. Kosarev, A. Illinski, C. Zúñiga, A.S. Abramov,** "*Low frequency plasma deposition and characterization of Si_{1-x}Ge_x:H,F Films*" J. Non-Cryst. Solids, vol. 338-340, pp. 91-96, 2004.

- [2.8] **S. Sedky, P. Fiorini, M. Caymax, C. Baert, L. Hermans and R. Mertens,** “*Characterization of Bolometers Based on Polycrystalline Silicon Germanium Alloys*”, IEEE Electron Device Letters, Vol. 19, No. 10, pp. 376- 378, 1998.
- [2.9] **Sherif Sedky, Paolo Fiorini, Kris Baert, Lou Hermans and Robert Mertens,** “*Characterization and optimization of Infrared Poly SiGe Bolometers*”, IEEE Transactions on Electron Devices”, Vol. 46, No. 4 pp. 675 - 682, 1999.
- [2.10] **W. Lang, K. Kuhl and H- Sandmaier,** “*Absorbing layers for thermal Infrared Detectors*”, Transducers 91, International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, pp. 635-638, 1991.
- [2.11] **M. Hirota, and S. Morita,** “*Infrared sensor with precisely patterned Au-Black absorption layer*”, SPIE proc., Vol. 3436, pp. 623-634, 1998.
- [2.12] **Ambrosio, Roberto Carlos,** “*Research on fabrication processes for un-cooled microbolometer based on plasmadeposited films*”[tesis doctoral], INAOE, Puebla, 2005.

- [2.13] **Moreno, M.C. Mario Moreno**, “*Study of IR un-cooled micro-bolometer arrays based on thin films deposited by plasma*” [tesis doctoral] . INAOE, Puebla, 2008.
- [2.14] **Rako, Paul**. “*Measuring nanoamperes*”, EUA, EDN, p.p. 43-52, 2007
- [2.15] **A.Ahmed and R.N.Tait** “*Noise behavior of amorphous $a\text{-Ge}_x\text{Si}_{x-1}\text{O}_y$ for microbolometer applications*” Infrared Physics & Technology, Vol 46, p.p. 468–472, 2005
- [2.16] **F. Z, Bathaei and Anderson, J.C**, “*Electrical noise measurements in intrinsic amorphous silicon*” Philos. Mag. B, Vol. 55, p.p. 87-100, 1987
- [2.17] **R.E. Johanson, M.Günea and S.O Kasap**.: “*Noise in hydrogenated amorphous silicon*”, IEE Proc. Circuits Devices Syst. Vol. 149, p.p. 68-73, 2002.
- [2.18] **Anderson, J.C** “*Noise spectroscopy in amorphous silicon films*”, Philos. Mag. B, Vol 48, p.p. 31-45, 1983.
- [2.19] **González, F.J.** “*Noise measurements on optical detectors*” Rev. Mex. Fis. Vol.52, p.p. 550-554, 2006.

- [2.20] **Jeroen, Pieter Roelof B.** “*Noise and degradation of amorphous silicon devices*”, Utrecht, 2003.
- [2.21] **R. A. Wood**, “*Monolithic silicon microbolometer arrays*”, Semiconductor Semimetals, Academic Press, Vol. 47, pp. 43–121, 1997.
- [2.22] **M. Almarsi, D. P. Butler, and Z. Celik-Butler**, “*Self-supporting uncooled infrared microbolometers with low-thermal mass*,” J. Microelectromech. syst., Vol.10, pp. 469–76, 2001.
- [2.23] **K. C. Liddiard**, “*Thin-film resistance bolometer IR detectors*”, Infrared Phys., Vol. 24, pp. 57–64, 1984.
- [2.24] **L. Dobrzanski, E. Nossarzewska-Orlowska, Z. Nowak, and J. Piotroski**, “*Micromachined silicon bolometers as detectors of soft X-ray, ultraviolet, visible and infrared radiation*”, Sens and Act. A, Vol. 60, pp. 154–159, 1997.
- [2.25] **A. Heredia, A. Torres, A. Jaramillo, F.J. De la Hidalga, M. Landa**, “*A boron doped amorphous silicon thin-film bolometer for long wavelength detection*”, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 744, pp. M5.26.1- M5.26.6, 2003.

- [2.26] **T. A. Eukova, N. L. Ivanova, Y. V. Kulikov, V. G. Malyarov, and I. A. Khrebtov**, “*Amorphous silicon and germanium films for uncooled microbolometers*”, Tech. Phys. Lett., Vol. 23, pp. 504–506, 1997.
- [2.27] **F.Z. Bathaei and Anderson, J.C.**, “*Electrical noise measurements in intrinsic amorphous silicon*” Philos. Mag. B, Vol. 55, p.p. 87-100, 1987.
- [2.28] **Mukti M. Rana, Donald P. Butler**, “*Noise reduction of $a\text{-Si}1 - x\text{Ge}x\text{O}y$ microbolometers by forming gas passivation*”, thin solid films, Vol. 516, p.p. 6499–6503, 2008.
- [2.29] **M.Régis, M. Borgarino, L.Bary, O. Llopis, J. Graffeuil, L. Escot, U. Koenig, R. Plana**, “*Noise behavior in SiGe devices*”, Solid-State, Vol. 45, p.p. 1891-1897, 2001
- [2.30] **Nguyen Chi-Anh, Hyun-Joon Shin, KunTae Kim, Yong-Hee Han, Sung Moon**, “*Characterization of uncooled bolometer with vanadium tungsten oxide infrared active layer*”, Sensor and Actuators, Vol A, p.p. 123-124, 2005.

- [2.31] **P.W. Kruse**, “*Uncooled thermal imaging, Arrays Systems and Applications*”, SPIE Press, Bellingham, Washington USA, 2001.
- [2.32] **C. Chen, X. Yi, J. Zhang, and X. Zhao**, “*Linear uncooled microbolometer array based on VO thin films*”, *Infrared Phys. Technol.*, Vol. 42, pp. 87–90, 2001.
- [2.33] **D. Liang, Y- R. Feng and L. L. Tian**, “*Characterization of Uncooled Poly SiGe Microbolometer for Infrared Detection*”, *Chi. Phys. Lett.*, Vol. 20, pp. 773, 2003.
- [2.34] **M. H. Unewisse, B. I. Craig, R. J. Watson, O. Reinhold and R. C. Liddiard**, “*The Growth and Properties of Semiconductor Bolometers Infrared Detection*”, SPIE Vol. 2554, pp. 43-54, 1995.
- [2.35] **J. L. Tissot**, “*Advanced ir technology development at CEA/LETI*,” *Infrared Phys. Technol.*, vol. 43, no. 3-5, pp. 223–228, June 2002.

3. METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN

3.1 Introducción

Como se vio en el Capítulo 2, existe una necesidad de desarrollar una metodología de medición de ruido propia que se adapte a las características de las películas $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}:\text{H}$ y $\text{a-Si}_x\text{Ge}_y\text{B}_z:\text{H}$. Debido al escaso reporte sobre este tema en literatura. En el presente capítulo se presenta el desarrollo de esta metodología de medición. Esto permitirá iniciar el estudio de ruido en $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}:\text{H}$ y $\text{a-Si}_x\text{Ge}_y\text{B}_z:\text{H}$. Este desarrollo consiste en la reducción de ruido externo, desarrollo de la instalación de medición de ruido, desarrollo de procesamiento de datos y finalmente la comprobación de reproducibilidad de datos. Además se revisan las diferentes técnicas de caracterización de la figuras de mérito de los microbolómetros entre las cuales se encuentran la obtención de PNSD y el cálculo de la detectividad en los microbolómetros.

3.2 Desarrollo de metodología de medición de ruido en películas y microbolómetros

El correcto desarrollo de una metodología de medición de ruido consiste en el estudio de las características de las muestras, la selección del equipo de instalación, reducción de ruido externo, la correcta adquisición y procesamiento de los datos. En la sección 2.6.1 se presento el análisis de literatura sobre metodológica de medición reportada. Sin embargo,

estos reportes no presentan en su totalidad la metodología empleada, por lo que es necesario desarrollar una metodología propia en el INAOE que se adapte a las características de nuestro estudio.

El equipo de medición y la metodología influyen de manera muy importante en las mediciones de ruido. En mediciones de ruido, principalmente la metodología de medición juega un papel fundamental la adquisición de los datos. Antes de comenzar las mediciones de ruido es importante asegurar que el ruido externo no está afectando las mediciones del ruido intrínseco de la muestra. Además, la metodología debe permitirnos extraer el ruido del detector a partir del ruido del sistema. Por esta razón en esta sección del trabajo de tesis se da un breve resumen del desarrollo de la metodología de medición de ruido. Este desarrollo incluyó el análisis del equipo de medición, la disminución de interferencia por ruido externo y, por último, la adquisición y procesamiento de datos del equipo.

3.2.1 Instalación para mediciones de curvas I(U) y resistencia

El principal objetivo de la medición de curvas I(U) es la selección de la muestra a medir, además de determinar la resistencia de las muestras. Sin embargo, dentro de la caracterización de detectores tiene otras aplicaciones como: dependencia de la conductividad con voltaje de polarización, dependencia de conductividad con temperatura, responsividad entre otros. El determinar las curvas I(U) de las muestras permitirá, entre otras cosas, conocer las características eléctricas de las muestras para un correcto desarrollo de la metodología de medición.

Una curva I(U) de un bolómetro lineal se presenta en la Figura 3.1. El comportamiento de un bolómetro lineal es el de una resistencia con curva I(U) lineal.

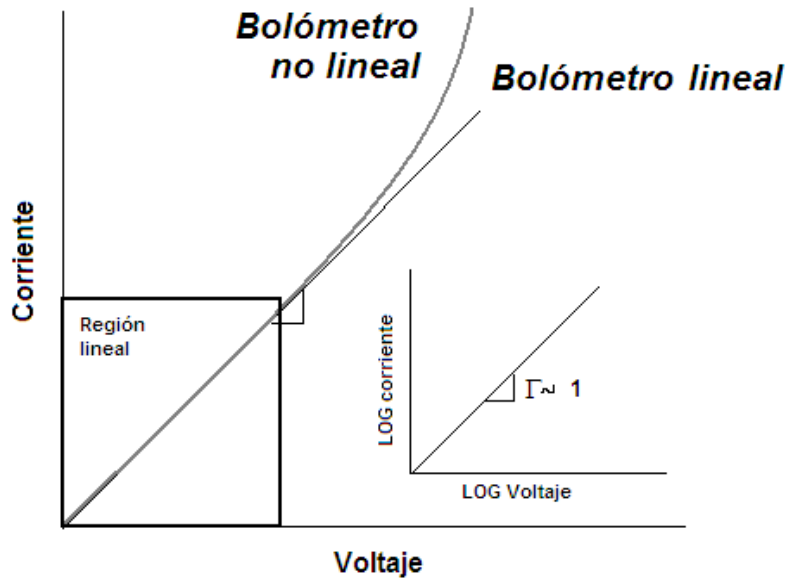


Figura 3.1 Curva I(U) de un microbolómetro y cálculo de su coeficiente lineal

Un bolómetro no lineal no presenta del todo una curva completamente lineal. Para altos voltajes el bolómetro no lineal presenta corrientes las cuales dependen de voltajes de manera no lineal. Sin embargo, para bajos voltajes se puede aproximar una región en la cual el bolómetro puede trabajar como una resistencia lineal (Figura 3.1).

La resistencia eléctrica del bolómetro se puede calcular como:

$$I = \frac{1}{R} V^\Gamma \tag{3.1}$$

Donde Γ es la pendiente de la curva $I(U)$ del microbolómetro como se muestra en la figura 3.1. La selección de una muestra, en este trabajo, dependió de su linealidad y su valor de resistencia. Según el tipo de muestra será la resistencia y la región lineal seleccionada.

El diagrama a bloques de la instalación requerida para medir curvas $I(U)$ se presenta en la Figura 3.2. Los principales equipos de la instalación son el electrómetro marca KEITHLEY modelo 6517A y un equipo completo de medición con temperatura programable de la compañía “MMR Technologies” modelo K-20. La adquisición de datos se lleva a cabo por una interface con un PC por GPIB y Software LABVIEW.

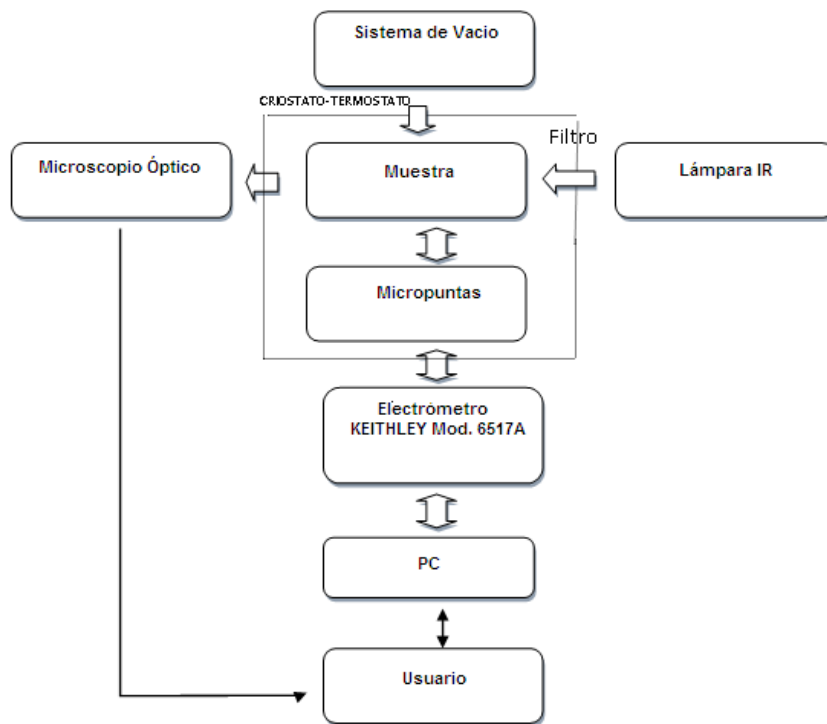


Figura 3. 2 Diagrama a bloques de la instalación para medir curvas $I(U)$

En la Figura 3.3 se observa el diagrama de conexiones entre el electrómetro y la muestra medida RB.

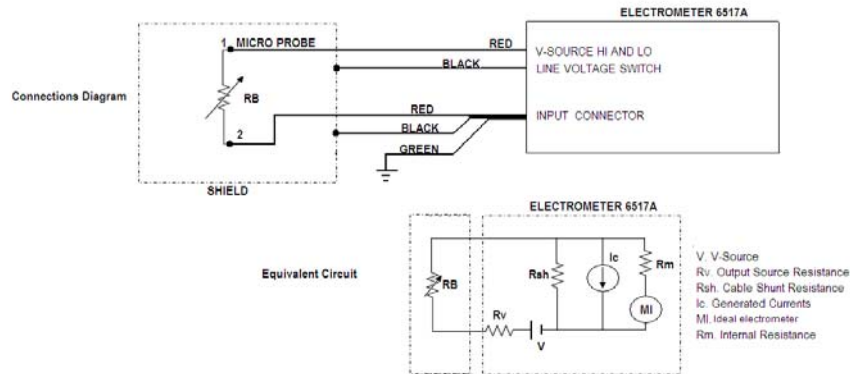


Figura 3.3 Diagrama de conexiones para mediciones de curva I(U)

Las mediciones de curvas I(U) se realizaron en el rango de 1-7 Volts. La fuente de radiación infrarroja fue de material SiC tipo “global” que provee un rango de $\lambda=1-20\mu\text{m}$ con filtro de ZnSe de transmitancia de 70% en el rango de $\lambda=0.6-20\mu\text{m}$. La intensidad final de la lámpara IR sobre la muestra fue de $I_0=5.3 \times 10^{-2} \text{ W/cm}^2$ [3.1]. Las muestras fueron colocadas en la cámara de vacío a presión $P=20\text{mTorr}$.

3.2.2 Instalación para medición de ruido

Como parte del desarrollo de la metodología de medición se debe considerar el equipo de medición. Debido a la alta resistencia de las muestras (sección 3.4) en este trabajo se propone la sustitución del analizador FFT por un amplificador LOCK-IN. Este último amplificador cuenta con una mayor sensibilidad de medición. En nuestro caso particular

este amplificador fue el amplificador LOCK-IN de la compañía “Stanford Research Systems” modelo SR530.

Para las mediciones de ruido en este trabajo se emplearon en total 3 instalaciones. La primera instalación fue empleada para la medición de microbolómetros como dispositivos (Figura 3.4), la segunda fue empleada para mediciones de ruido en películas sobre sustrato de vidrio “STRIPES” (Figura 3.5), ambas con un amplificador LOCK-IN como equipo principal y la tercera instalación (Figura 3.6) fue empleada para comprobar la reproducibilidad de los resultados obtenidos. Esta última instalación se encuentra en el Instituto de Investigación de Comunicaciones Ópticas en San Luis Potosí IICO y usa un analizador que emplea FFT para la adquisición del ruido $S_x(f)$.

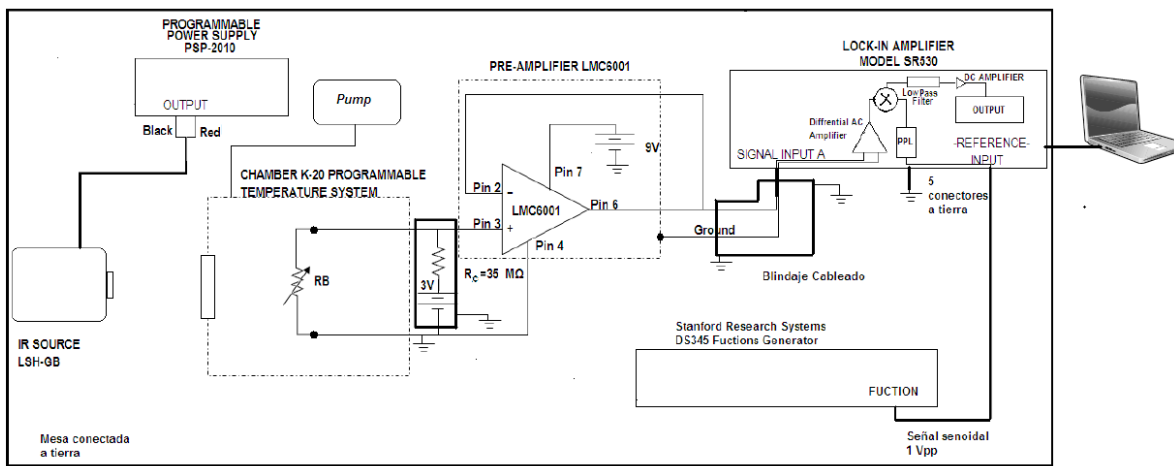


Figura 3.4 Instalación empleada para medición de PSD en microbolómetros con amplificador LOCK-IN en el INAOE (instalación INAOE 1)

La instalación INAOE 1 (Figura 3.4) cuenta con un preamplificador LCM6001 (tabla 3.1) para el acoplamiento de las impedancias entre la muestra medida y el amplificador LOCK-IN. Las características del preamplificador se muestran en la tabla 3.1. En este trabajo se propone al amplificador LOCK-IN como una alternativa al analizador de espectros FFT empleado en las instalaciones reportadas en la sección 2.6.1. Esto debido a que los amplificadores LOCK-IN son dispositivos más sensibles por que cuentan con una mayor impedancia de entrada ($100\text{M}\Omega$) comparada con los analizadores de espectro FFT ($1\text{M}\Omega$) [3.2]. Por tal motivo, en las instalaciones con el amplificador LOCK-IN es posible omitir la etapa de amplificación de la señal lo cual disminuye el ruido perteneciente a la instalación.

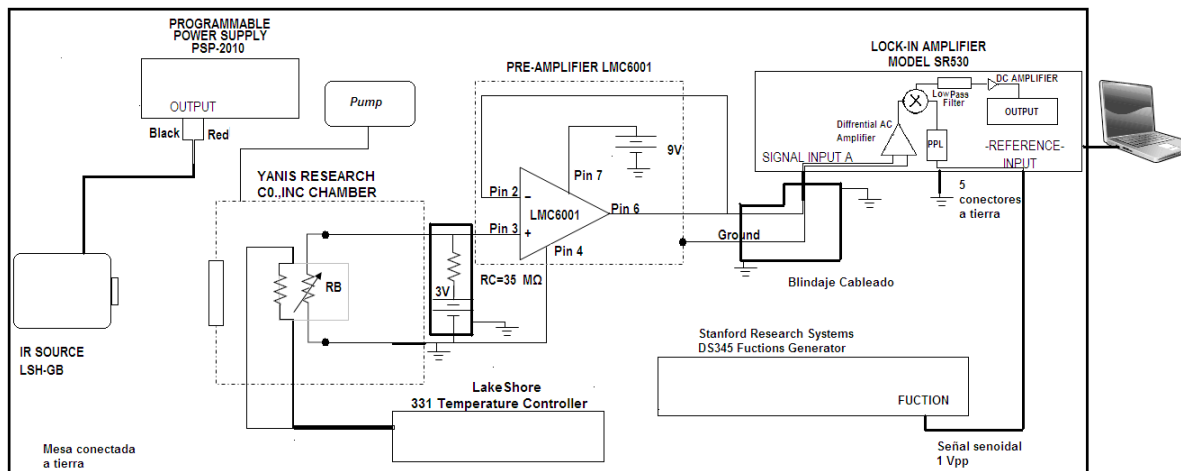


Figura 3.5 Instalación empleada para la medición de películas termosensibles con variaciones de temperatura en el INAOE (instalación INAOE 2)

La instalación INAOE 2 empleada para mediciones de películas termosensor se muestra en la Figura 3.5. Esta instalación permite variar la temperatura de las muestras y medir

dependencia de ruido a la temperatura en las películas termosensor. Esta instalación cuenta con una cámara tipo criostato de la compañía YANIS RESEARCH y un controlador de temperatura LakeShore modelo 331.

Tabla 3.1 Características principales del amplificador LMC6001y amplificador LOCK-IN para acoplamiento de impedancias y medición de ruido en instalaciones INAOE

	Parámetro	Pre-amplificador LMC6001
Preamplificador LMC6001	Ruido (fAHz^{-1/2})	100
	Ancho de banda	1.3 MHz
	Resistencia de entrada	<1 TeraΩ
Amplificador LOCK-IN	Ruido (pAHz^{-1/2})	0.13
	Resistencia de entrada	100MΩ

Las características de los amplificadores empleados en las instalaciones en el INAOE se muestran en la tabla3.1. Finalmente, la instalación IICO empleada para comprobar los resultados obtenidos con la metodología desarrollada en el INAOE se muestra en la Figura 3.6. Las mediciones con esta instalación fueron desarrolladas en el Instituto de Investigación en Comunicaciones Ópticas en San Luis Potosí en colaboración con el Dr. Javier González y M.C. Gustavo Vera [3.3].

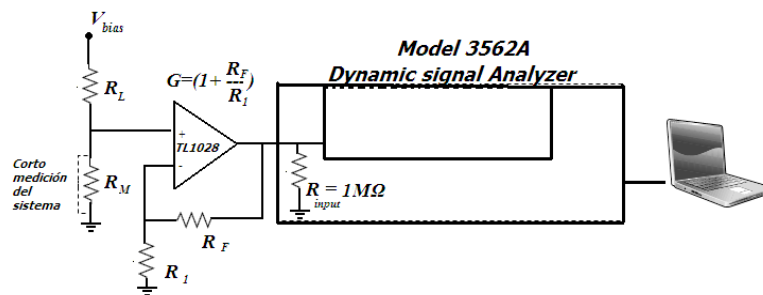


Figura 3.6 Instalación IICO empleada para la corroboración de resultados de la metodología empleada en el INAOE con analizador de espectro [3.3]

Esta última instalación fue empleada para comprobar la reproducibilidad de los datos y realizar mediciones sobre efecto de polarización. La resistencia de entrada ($1\text{M}\Omega$) del analizador de señal dinámico es dos órdenes de magnitud más pequeña que la resistencia de entrada del amplificador LOCK-IN ($100\text{M}\Omega$). Esto limita las mediciones a muestras que tengan una resistencia menor a la del analizador.

3.2.3 Técnicas de reducción de ruido externo

La reducción de ruido externo es de suma importancia en el desarrollo de una metodología de medición de ruido. Esto es debido a que cualquier influencia de ruido externo puede influir en los resultados finales provocando errores y malas interpretaciones de los mismos. Por esta razón en esta sección se presenta la parte que corresponde al desarrollo de la metodología de medición en cuanto a la reducción de ruido externo.

3.2.3.1 Análisis de ruido externo

La influencia de ruido externo en el laboratorio es importante en las mediciones de ruido. El ruido provocado por los sistemas que se encuentran trabajando en el laboratorio puede afectar los resultados de ruido intrínseco de la muestra. Por esta razón es importante estudiar la influencia de ruido externo en nuestras mediciones.

En el primer piso del laboratorio se cuenta con equipo de fabricación de circuitos integrados. Estos equipos consumen alta potencia entre los que se encuentran: Hornos de difusión, un sistema de implantación de iones y un sistema de depósito PECVD entre otros.

Estos sistemas trabajan con muy altos voltajes y corrientes que puede acoplarse con la instalación de ruido por varios factores.

Tabla 3. 2 Mediciones de ruido para el estudio de influencia de equipo externo a la instalación de medición en diferentes horarios

Día	Hora	Actividad	Equipo en uso
Miércoles 9/Septiembre/07	11:00 am	Día Laboral Poca actividad	Hornos
Miércoles 19/Septiembre/07	1:00 pm	Día Laboral Actividad Media	Hornos PECVD
Miércoles 19/Septiembre/07	3:00 pm	Día Laboral Actividad Alta.	Hornos PECVD
Sábado 22/Septiembre/07	12:00pm	Día no laboral	Ninguno

En la tabla 3.2 se muestran las diferentes mediciones que se realizaron. El estudio de ruido consistió en el análisis del comportamiento del ruido en diferentes horarios. En determinados horarios como se observa en la tabla 3.2 existen diferentes equipos de fabricación funcionando. Además de que la actividad en el laboratorio aumenta con el horario de las mediciones.

3.2.3.2 Reducción de ruido externo

En un sistema electrónico pueden existir diferentes fuentes de ruido (sección 2.5). En el estudio del ruido intrínseco de un dispositivo es necesario suprimir todas las fuentes externas que no pertenecen a la muestra. Para esto es necesario implementar una serie de técnicas de eliminación de ruido. Estas técnicas consisten en romper el sistema de

acoplamiento (Figura 3.7) que se forma entre las fuentes de ruido externas y el sistema de medición.

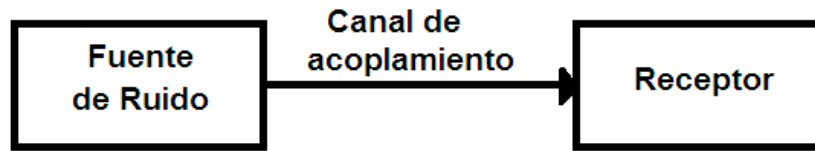


Figura 3.7 Sistema de acoplamiento de ruido debido a fuentes externas en el equipo de medición o receptor [3.4]

Las técnicas de reducción de ruido externo rompen con el sistema de acoplamiento que se observa en la Figura 3.7, ya sea, eliminando la fuente, rompiendo el canal o protegiendo al receptor. Las técnicas empleadas en este trabajo de tesis fueron: blindaje, implementación de tierra y reducción de cableado.

Durante este trabajo se realizaron diferentes configuraciones de instalación de equipo y las técnicas de reducción de ruido. Algunos de estos experimentos se muestran en la tabla 3.3.

Tabla 3. 3 Configuraciones de tierra aterrizando la mesa de trabajo

Técnica de reducción de ruido	Análisis de ruido en frecuencia (Hz)
Diferentes conexiones a tierra independiente a la línea	60, 120
Análisis de ruido en equipo de medición	300 y 900
Blindaje en cableado.	60, 120, 300

En la tabla 3.3 se observa cada técnica implementada para cada fuente externa de ruido correspondiente a una o varias frecuencias. La técnica de tierra se implementa en las frecuencias de 60 y 120 Hz debido a que frecuentemente este ruido se encuentra en la línea de tierra industrial. Las técnicas de blindaje y cableado se implementan para ruido acoplado a través de inducción.

3.2.4 Adquisición y procesamiento de datos

Uno de los detalles no reportados en literatura es la adquisición y procesamiento de los datos. Por esta razón fue necesario desarrollar un software de adquisición de datos de manera sistemática. Este desarrollo consistió en el ajuste del equipo de la instalación para una correcta adquisición de datos y determinar la configuración de iluminación IR. También, se revisó la técnica de adquisición de $S_x(f)$ a partir de un sistema de medición.

3.2.4.1 Configuración de iluminación IR y ajustes diversos del equipo de medición

Una vez atenuado el ruido en las frecuencias principales se procedió a ajustar las instalaciones de medición. Los principales objetivos de estas mediciones fueron: seleccionar preamplificador, determinar el ajuste del equipo de medición y determinar la configuración de iluminación IR en las muestras. Las configuraciones de los experimentos sobre ajuste del equipo de medición en cuanto a tipo de polarización por iluminación se muestran en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Mediciones para determinar efectos de configuración de iluminación en ruido de las muestras medidas.

Configuración	Señal de Referencia	Rango Frecuencia (Hz)
Iluminación modulada de IR	Chopper óptico	10^0 - 10^3
Iluminación IR Constante	Generador de Señales	10^0 - 10^5

Como se observa en la tabla 3.4 existen dos configuraciones de iluminación IR. La iluminación modulada que fue empleada anteriormente y la modulación constante que se propone en este trabajo para mejorar la metodología de medición. La configuración modulada de IR limita la frecuencia máxima de mediciones. Esto debido a que el chopper óptico solo cuenta con una frecuencia de operación máxima de 8000Hz. Esta frecuencia era la frecuencia máxima que se podía obtener como señal de referencia para el amplificador LOCK-IN. En este trabajo se propone aumentar el ancho de banda cambiando la configuración de iluminación IR modulada de la muestra por iluminación IR constante y obtener la señal de referencia de un generador de señales (aumentando la frecuencia máxima a 10^5 Hz). Para esto se propone comparar ambos resultados de los experimentos presentados en la tabla 3.4 y observar los efectos de este cambio en configuración de iluminación. Si no existe influencia sobre el tipo de configuración será posible aumentar el ancho de banda hasta en dos órdenes de magnitud.

3.2.4.2 Adquisición de datos primarios

La adquisición de los datos es una parte fundamental en el desarrollo de la metodología de medición de ruido. En este trabajo se propuso al amplificador LOCK-IN como el equipo de

medición de $S_x(f)$. Los amplificadores LOCK-IN son utilizados para medir señales pequeñas de corriente alterna en presencia de ruido relativamente alto. Con estos amplificadores es posible medir señales más pequeñas que el ruido presente. Los amplificadores LOCK-IN usan una técnica de detección sensible a la fase. Esencialmente estos detectores permiten dos señales de entrada: una señal de entrada y una de referencia. El amplificador LOCK-IN solo mide la amplitud y la componente de fase de la transformada de Fourier de la señal de entrada que sea igual a la señal de referencia [3.5]. De este modo el amplificador puede diferenciar entre una señal de entrada y el ruido. Un amplificador LOCK-IN también permite medir el ruido a una frecuencia determinada por la señal de referencia. El amplificador LOCK-IN Modelo SR530 es utilizado como amplificador y medidor de ruido. Algunas de sus características se presentan en la tabla 3.5

Tabla 3. 5 Características principales del amplificador SR530 Stanford Research Systems empleado en el INAOE

Característica:	Valor
Impedancia de entrada	100MΩ
Escala de sensibilidad completa	10nV a 500 mV
Ruido	7nVHz ^{-1/2}
Señal de referencia	0.5 Hz a 100KHz

Debido a las características del ruido es necesario un manejo estadístico de las señales obtenidas Este manejo estadístico lo realiza el amplificador LOCK-IN midiendo en un tiempo determinado un numero de muestras de señal y calculando el promedio de estas muestras. El tiempo en el cual realiza el muestreo se conoce como tiempo de integración. A

mayor tiempo de integración más precisa es la señal medida. Sin embargo, este tiempo de integración se encuentra determinado por el equipo de medición. En las instalaciones propuestas es el amplificador LOCK-IN el que limita este tiempo (3ms). En este trabajo se propone combinar el amplificador LOCK-IN, PC y el desarrollo de un programa por LABVIEW para la optimización del tiempo de integración. Esta combinación permitirá aumentar el tiempo de integración a un tiempo determinado por el usuario y sin límite de tiempo. Además esta implementación con LABVIEW permitirá observar la señal de ruido en tiempo real, lo cual no es posible observar en equipos como el amplificador LOCK-IN. Esto tiene como ventajas el poder observar el comportamiento del ruido y determinar a su vez el tiempo de inicio para comenzar la integración. Por este motivo como parte del desarrollo de la metodología de medición se diseñó un programa con LABVIEW de adquisición de datos controlado por PC que mejorara la adquisición de los datos del amplificador LOCK-IN. Las principales funciones de este programa son:

- Aumentar el tiempo de integración del amplificador LOCK-IN con el cambio de configuración IR
- Permitir el manejo estadístico de los datos primarios por medio de muestreo de los datos primarios.
- Realizar una adquisición de datos con mayor control y objetividad.
- Mejorar la interface de los datos primarios por medio de interface gráfica y observar la señal de ruido en tiempo real.

La interface con el usuario del programa se muestra en la Figura 3.8.

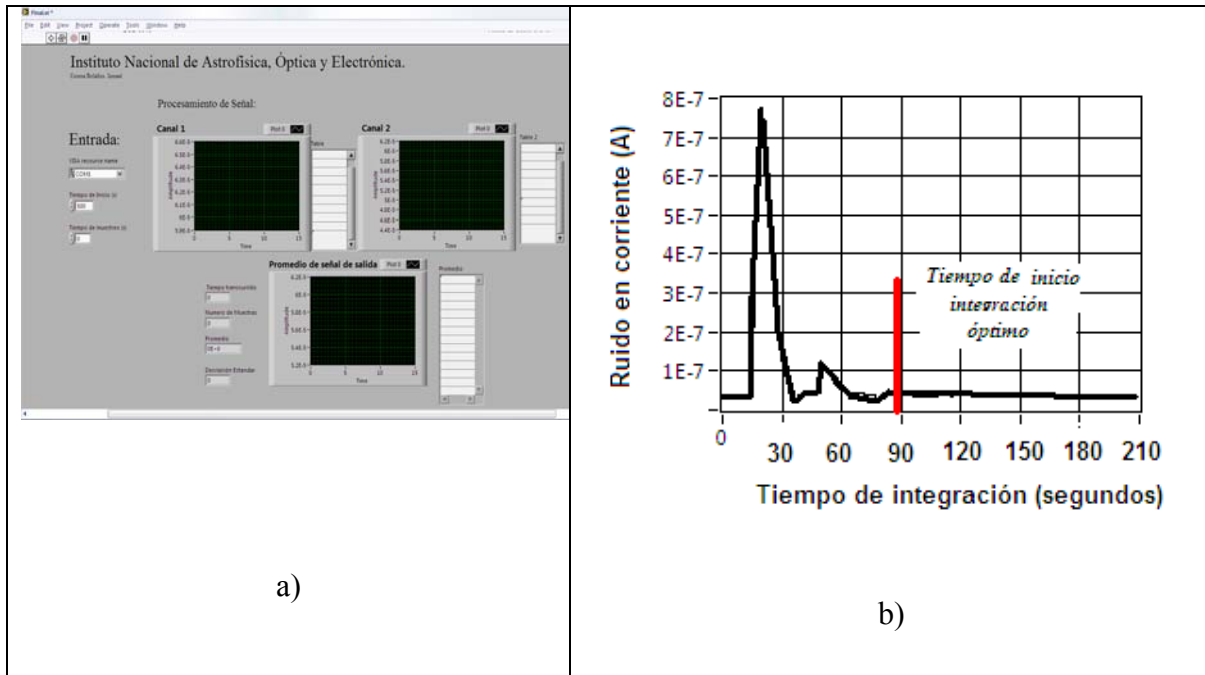


Figura 3. 8 Programa LABVIEW modificado para adquisición de datos primarios a) Interface del programa diseñado para la adquisición de datos de la señal b) Monitoreo de señal de ruido en corriente a una frecuencia de $f=100\text{Hz}$ muestra 443 a-SiGe:H (sección 3.5) por combinación de LOCK-IN con PC y programa de adquisición de datos

En la Figura 3.8 a) se muestra el monitoreo de la señal de salida de una muestra medida. Esto nos permite determinar el tiempo de integración óptimo para la toma de mediciones y a su vez permite determinar el tiempo de inicio de la medición. Se observa que para tiempos menores de 90 segundos se tiene un estado no estacionario de ruido. Por lo que antes de iniciar cada medición es necesario esperar este tiempo para comenzar el experimento. Esto se considero para todas las muestras medidas. Sin la interfaz gráfica este tiempo de inicio de integración no hubiera sido conocido. Para iniciar una medición en el programa es necesario ajustar antes la señal de referencia en la frecuencia deseada. El

LOCK-IN cuenta con un indicador de sobre voltaje en la señal de entrada. Si este está encendido o parpadeando es posible que la señal de salida sea incorrecta. Durante el funcionamiento del programa es necesario monitorear este indicador de forma visual. El programa cuenta con una etapa de entrada y una de adquisición de datos. En la etapa de entrada se especifican los siguientes parámetros:

1. Puerto de entrada: En este parámetro se especifica el puerto de la PC al cual está conectado el amplificador LOCK-IN. Esta conexión se lleva a cabo por puerto serial RS232. Para información acerca de los comandos se puede consultar el manual del LOCK-IN.
2. Tiempo de inicio de integración: Es el tiempo necesario para empezar las mediciones. Este tiempo es utilizado para permitir al LOCK-IN estabilizar sus dos señales de salida. En la Figura 3.8 a) se muestra un tiempo de inicio de integración óptimo de 90 segundos.
3. Tiempo de integración total: Es el tiempo durante el cual se muestrearan las señales de salida. El tiempo mínimo de escritura y lectura en LOCK-IN es de 300 ms por muestra.

En la etapa de procesamiento de los datos o de salida se muestran los siguientes datos

1. Graficas y tablas: En ellas se muestran las señales de salida en tiempo real.

2. Tiempo transcurrido: Se muestra el tiempo transcurrido a partir del inicio de la toma de muestras.
3. Numero de muestras: Se muestra el número de muestras total usadas para el cálculo del promedio final. El numero de muestras es calculado dividiendo el tiempo de integración total entre el tiempo de toma de datos del amplificador LOCK-IN
4. Promedio: Se calcula promediando la señal de los dos canales de entrada.
5. Desviación estándar: Se calcula a partir del promedio de las mediciones. Esta desviación es desviación de las muestras.

El valor especificado como promedio es el que se toma en cuenta para la densidad espectral de ruido de la frecuencia determinada. Los datos primarios obtenidos por el amplificador LOCK-IN tienen unidades V^2/Hz .

3.2.4.3 Densidad espectral de ruido en potencia, en voltaje y corriente

El procesamiento de datos es una parte fundamental del desarrollo de la metodología de medición. Un mal procesamiento puede provocar una mala interpretación de los resultados. El procesamiento de datos inicia con la adquisición de los datos primarios. El ruido obtenido como datos primarios del amplificador LOCK-IN incluye componentes de ruido intrínseco en el equipo de medición.

El análisis de las componentes de ruido en el equipo de medición se muestra en la Figura 3.9. Existen dos componentes principales de ruido en la instalación. La componente

$\overline{V_{s1}^2}$ debido al ruido en el preamplificador y la componente $\overline{V_{s2}^2}$ debida a las componentes de ruido en el amplificador LOCK-IN.

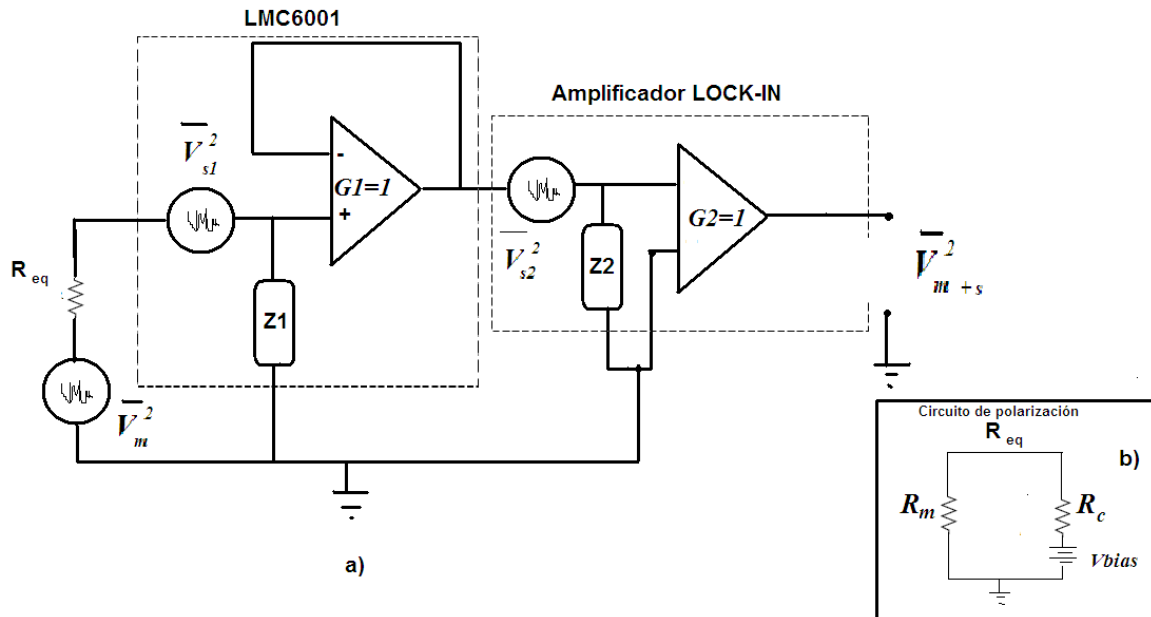


Figura 3.9 Análisis de componentes de ruido debido a fuentes intrínsecas en la instalación de medición de ruido a) Análisis de componentes de ruido para amplificador y preamplificador b) circuito de polarización en corriente directa

La componente total de ruido debido al sistema de medición es:

$$\overline{V_s^2} = \overline{V_{s1}^2} + \overline{V_{s2}^2} \quad (3.2)$$

Para obtener la componente de ruido solo de la muestra es necesario extraer la componente $\overline{V_s^2}$ de los datos primarios. La extracción del ruido del bolómetro se lleva a cabo de la siguiente manera:

1. Se mide la densidad espectral de ruido normalmente con la muestra conectada para todo el espectro.
2. Se mide la densidad espectral de ruido solo del sistema poniendo en corto la muestra medida.
3. Una vez obtenidos ambas densidades espectrales de ruido se procesa los datos y se extrae la densidad correspondiente al bolómetro.

La extracción de la componente de ruido del sistema se lleva acabo como:

$$\overline{V_m^2} = \overline{V_{m+s}^2} - \overline{V_s^2} \quad (3.3a)$$

donde (figura 3.9):

$$\overline{V_{m+s}^2} = G^2 \left(G^2 (\overline{V_m^2} + \overline{V_{s2}^2}) + \overline{V_{s2}^2} \right) \quad (3.3b)$$

Donde $\overline{V_m^2}$ es la componente final de ruido intrínseco de la muestra medida. La componente de ruido del sistema se mide poniendo en corto las terminales de la muestra. La densidad espectral de ruido $S_V(f)$ se obtiene con la ayuda de la ecuación 2.14 [3.6] del capítulo anterior:

$$\overline{V_m^2} = \overline{Y^2} = S_V(f_0) \int_0^{\infty} |g(f)|^2 df = S_V(f_c) g_0^2 B_{eff} \quad (3.4)$$

Y despejando:

$$S_V(f_c) = \frac{\overline{V_m^2}}{g_0^2 B_{eff}} \quad (3.5)$$

Donde f_c es la frecuencia de la señal de referencia. Para nuestro sistema de medición $g_0=1$ y B_{eff} puede ajustarse en el amplificador LOCK-IN como 10 Hz o 1Hz. Por simplicidad el ajuste de este último parámetro es $B_{eff}=1$ Hz en todas las mediciones. La curva final $S_V(f)$ se construye evaluando f_c en el rango de 4Hz hasta 50KHz. La densidad espectral de ruido en corriente se obtiene por:

$$S_I(f) = \frac{S_V(f)}{R_m^2} \quad (3.6)$$

Donde R_m es la resistencia de la muestra medida.

3.2.5 Reproducibilidad de resultados

Con el fin de corroborar el correcto desarrollo de la metodología de medición de ruido se realizaron mediciones de ruido una resistencia comercial con dos metodologías distintas y en laboratorios. Finalmente, se compararon los resultados de ambas metodologías con el cálculo de ruido teórico. Para la instalación IICO se midió una resistencia de $1M\Omega$ y se comparó el resultado con los obtenidos con la instalación INAOE 2 para una resistencia del mismo valor.

Debido a que en la instalación IICO no se trabajó sobre el ruido externo, las mediciones se encuentran limitadas en el rango de 100Hz a 1KHz en esta instalación. Para corroborar resultados en la instalación IICO se midió la PNSD de una resistencia de valor $R=1k\Omega$ y se comparó con ruido Johnson calculado para esa resistencia. Los resultados se muestran en el Capítulo 4 en la sección 4.4. La reproducibilidad de los resultados es de suma importancia en este trabajo. Esto es debido a la ausencia de resultados reportados en la literatura con respecto a estudios de ruido en películas en Si y Ge. La única forma de revisar si los datos obtenidos con la metodología desarrollada son correctos es por medio de la reproducibilidad de los datos en ambas metodologías.

3.3 Técnicas de caracterización de figuras de mérito

El desempeño de un microbolómetro puede ser descrito por figuras de mérito, como se vio en la sección 2.4. Las figuras de mérito más importantes y que describen la respuesta al ruido en la muestra son: TCR, responsividad y detectividad. En la presente sección se muestra la metodología de caracterización de estas figuras de mérito.

3.3.1 Coeficiente térmico de resistencia (TCR)

El TCR definido en la sección 2.4.1 se obtiene de las diferentes curvas $I(U)$ a distintas temperaturas (Figura 3.10).

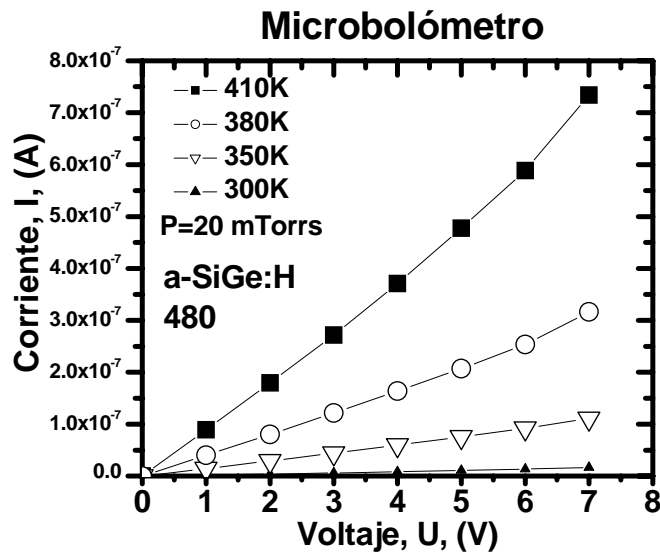


Figura 3.10 Curvas I(U) de microbolómetro (a-SiGe:H) diferentes temperaturas para cálculo de TCR

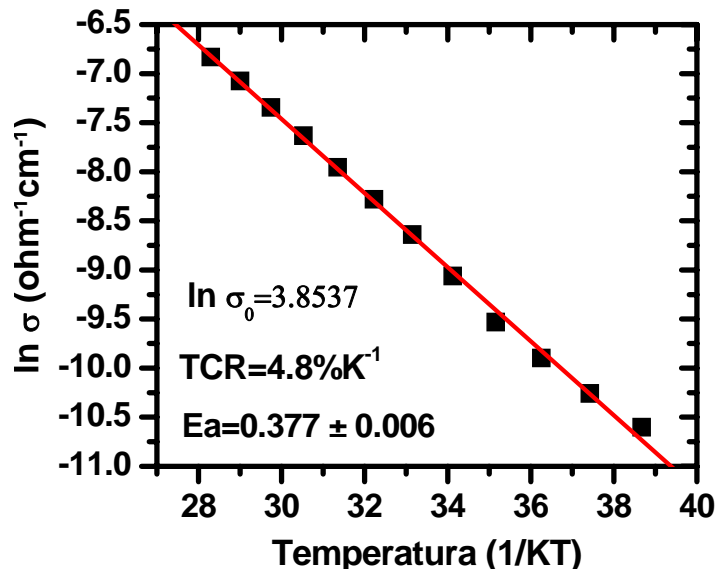


Figura 3.11 Curva conductividad contra temperatura para el cálculo de TCR en microbolómetros y películas termosensor ($V_{\text{bias}}=1V$)

El cálculo se logra graficando la conductividad de la muestra en función de la temperatura para un voltaje de polarización fijo (Figura 3.11). La energía de activación E_a y el TCR se extraen finalmente de las ecuaciones 2.2 y 2.3 usando la pendiente de la curva de conductividad contra temperatura ($1/kT$) [3.7].

3.3.2 Responsividad

Como se definió en la sección 2.4.2 la responsividad es la razón de la señal de salida entre la señal de entrada. Para películas termosensor y microbolómetros la señal de salida es representada por el cambio de corriente al ser iluminada la muestra con IR. La señal de entrada se define como la potencia incidente de IR sobre la muestra. La responsividad, entonces, puede expresarse en función de estos dos parámetros como:

$$\mathfrak{R} = \frac{\Delta I}{P_{incident}} = \frac{I_{IR} - I_{dark}}{A_d I_0} \quad (3.7)$$

Donde A_d es el área de la muestra y I_0 es la intensidad de la fuente IR presentada en la sección 3.2.1.

3.3.3 Detectividad Específica

La detectividad específica como se presentó en la sección 2.6.3 es el parámetro más importante para comparar la respuesta en ruido de los microbolómetros. La ecuación 2.9 puede emplearse para el cálculo directo de la detectividad específica. El ruido en microbolómetros es proporcional a la frecuencia sección 2.6.3, lo que indica que para cada

frecuencia de operación corresponde una detectividad específica. En este trabajo se calculó la detectividad específica en función de la frecuencia para facilitar la comparación con los valores reportados en literatura. La responsividad de cada muestra se obtuvo de [3.1]. El ancho de banda para cada valor de detectividad en frecuencia fue de $\Delta f=1$ Hz y la corriente de ruido fue extraída de igual manera de $S_I(f)^{-1/2}$, es decir, valores rms de corriente de ruido I_{noise} .

Para más detalles sobre la metodología empleada en el cálculo de la detectividad específica consultar la sección 3.5 en la cual se presenta la metodología de caracterización de microbolómetros.

3.4 Medición de ruido en películas termosensor a-SiGeB:H

Las mediciones de ruido en películas termosensor se realizaron con la instalación INAOE2. En esta instalación se implementaron las técnicas de reducción de ruido comentadas en la sección 3.2.3.2 para evitar interferencia de ruido externo. La muestra fue colocada en una cámara a una presión $P=20$ mTorr.

Se realizaron mediciones de ruido a 3 muestras diferentes de películas termosensor a-Si_xGe_{1-x}:H y Si_xGe_yB_z:H con diferentes cantidades de Boro. Se usaron las curvas $I(U)$ para determinar la resistividad de la muestra. Las características de las diferentes películas termosensor Si_xGe_{1-x}:H y Si_xGe_yB_z:H para mediciones de densidad espectral de ruido se

muestran en la tabla 3.6 y su proporción en estado sólido de diferentes elementos determinado por SIMS en [3.1] por Mario Moreno Moreno.

Las cantidades relativas de los materiales son mostradas en la tabla 3.6. La muestra 443 es muestra a-Si_xGe_{1-x}:H intrínseco mientras que las muestras 479 y 480 son muestras tipo a-Si_xGe_yB_z:H.

Las muestras seleccionadas son representativas de los procesos de fabricación. La funcionalidad de las muestras fue comprobada por su respuesta a iluminación IR.

Tabla 3.6 Características de películas a-SiGeB:H en microbolómetros para mediciones de densidad espectral de ruido[3.1]

Muestra		Proceso 479	Proceso 480	Proceso 443
Grueso (µm)		0.42 (10 min.)	0.51 (10 min.)	0.5 (30 min.)
E_a (eV)		0.21	0.18	0.34
σ_{RT} (ohm cm)⁻¹		1.3 x10 ⁻²	2.6 x10 ⁻²	6 x10 ⁻⁵
Ge_y (SIMS)	atm/ cm ³	3.4 x10 ²²	3.5x10 ²²	4.6x10 ²²
	Cantidad Relativa	0.674	0.717	0.880
Si_y (SIMS)	atm/ cm ³	2.8 x10 ²¹	2.0 x10 ²¹	6.1 x10 ²¹
	Cantidad Relativa	0.055	0.041	0.117
B_y (SIMS)	atm/ cm ³	1.3 x10 ²²	1.1 x10 ²²	1.1x10 ¹⁸
	Cantidad Relativa	0.262	0.231	2.0x10⁻⁵

H_y (SIMS)	atm/ cm ³	4.3 x10 ²⁰	5.5 x10 ²⁰	1.8x10 ²⁰
	Relative	0.0086	0.011	3.4x10⁻³
C_y (SIMS)	atm/ cm ³	1.5 x10 ¹⁸	1.4x10 ¹⁸	7.6x10 ¹⁷
	Relative	3.1x10⁻⁵	2.9x10⁻⁵	1.4x10⁻⁵
Ti_y (SIMS)	atm/ cm ³	5.1x10 ¹⁴	2.4 x10 ¹⁴	1.4x10 ¹⁵
	Relative	1x10⁻⁸	4.9x10⁻⁹	2.7x10⁻⁸

Tanto las películas termosensor STRIPES y las películas termosensor de los MICROBOLÓMETROS no. 443, 479 y 480 fueron depositadas con el mismo proceso correspondiente.

3.4.1 Mediciones de ruido: dependencia de temperatura

Las mediciones de densidad espectral de ruido a diferentes temperaturas en películas a-SiGe:H y a-SiGeB:H se realizaron con la instalación INAOE 2. La temperatura se vario de 300K a 400K para las tres diferentes muestras. Esta variación de temperatura se realizó con el equipo YANIS RESEARCH y controlador de temperatura LakeShore modelo 331 para mantener la temperatura constante durante las mediciones de densidad espectral de ruido.

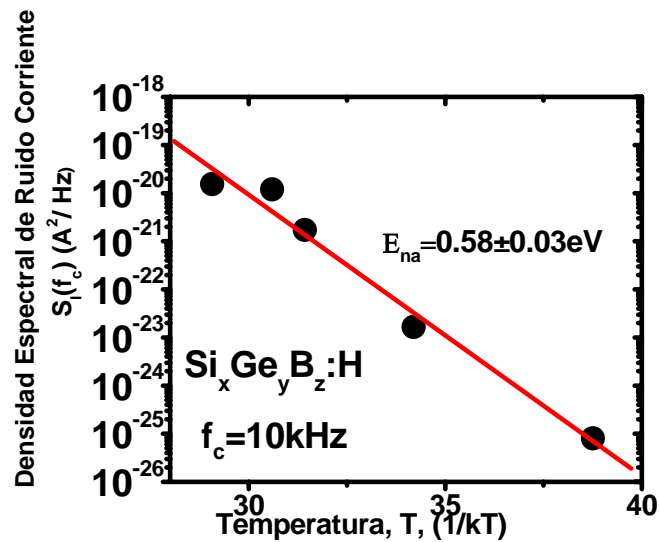


Figura 3.12 Ejemplo de dependencia experimental de densidad espectral de temperatura (Muestra: STRIPE $Si_xGe_yB_z:H$)

Para estudiar el efecto de temperatura se representó el proceso de ruido como un proceso de activación térmica graficando la densidad espectral de ruido para una frecuencia f_c fija en función de la temperatura [3.8]. El proceso de activación térmica fue caracterizado por una energía de activación de ruido E_{na} . La Figura 3.12 muestra un ejemplo donde se adquirió la energía de activación E_{na} para una película termosensor $Si_xGe_yB_z:H$.

3.4.2 Mediciones de ruido en películas termosensor y reproducibilidad

Con el fin de corroborar los datos obtenidos se optó por medir una resistencia de $1M\Omega$ con dos metodologías distintas en laboratorios distintos. Las mediciones se realizaron en el laboratorio de infrarrojos del Instituto de Investigación en Comunicación Óptica en San Luis Potosí con colaboración del Dr. Javier González con la instalación IICO.

El ajuste del equipo de medición de la instalación IICO se llevo a cabo por medio de la medición de dos resistencias de $1k\Omega$ y $10M\Omega$. El rango de las mediciones fue de 0 a 100 KHz y se compararon los resultados con el ruido térmico teórico. La adquisición de los datos primarios se llevo a cabo por el diseño de una interface con la PC que permitía seleccionar el tiempo de integración y el ancho de banda de las mediciones (Figura 3.13).

Se espera comprobar la reproducibilidad de los resultados por medio de dos caminos principales:

- Reproducción de resultados experimentales de una misma muestra con dos metodologías distintas
- Reproducibilidad de resultados experimentales en dos laboratorios distintos (INAOE e IICO)

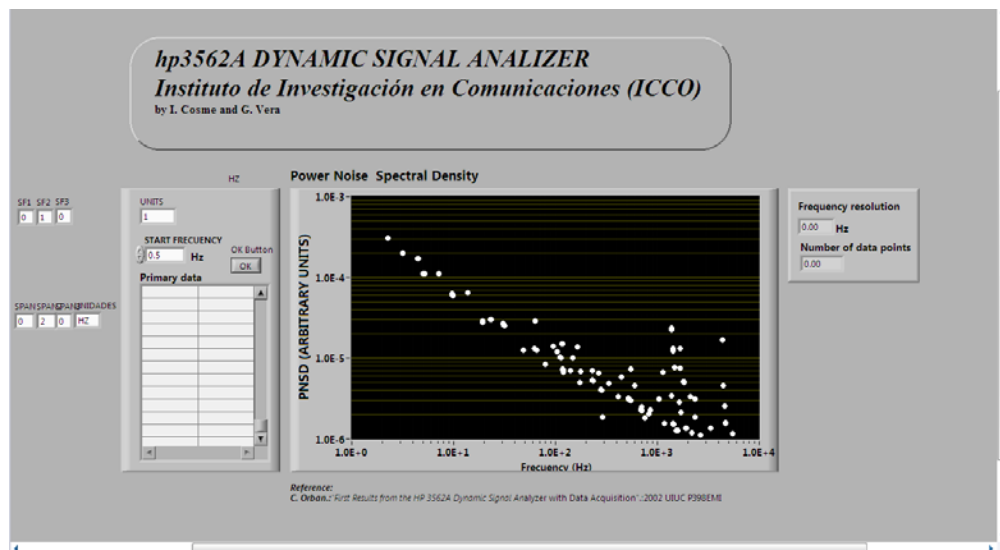


Figura 3.13 Interface a PC diseñada para el equipo hp3562A para adquisición de datos primarios en la instalación IICO

El procesamiento de datos parte de la adquisición de datos primarios que se obtiene en valores rms de voltaje ($V/Hz^{1/2}$). La extracción de ruido del sistema se llevo a cabo como:

$$(V_m) = \frac{\sqrt{(V_{m+s})^2 - (V_s)^2}}{G} \quad (3.8)$$

Donde V_m es el ruido de la muestra medida, y V_s es el ruido del sistema y G es la ganancia de la etapa de amplificación. La PNSD en corriente se calcula finalmente por:

$$S_I(f) = \left(\frac{V(f)_{rms}}{R_M} \right)^2 \quad (3.9)$$

Donde R_M es la resistencia de la muestra medida. El ruido térmico teórico se calcula a la entrada de la etapa de amplificación como:

$$V_{Nt} = \sqrt{4kTR_M} \quad (3.10)$$

Donde k es la constante de Boltzmann y T es la temperatura de la muestra. Los resultados fueron comparados con los obtenidos en el INAOE para determinar si estos eran reproducibles en condiciones y metodologías distintas.

3.4.3 Mediciones de ruido: dependencia de polarización

Las mediciones de ruido con y sin polarización se realizaron con la instalación ICCO (Figura 3.6). Se midieron dos películas de los procesos 479 y 480 con ausencia de polarización y con polarización de 1V. Las muestras se encontraron a presión atmosférica y fuera de cámara de vacío. El rango de frecuencia para las mediciones fue de 100Hz a 1KHz.

3.5 Mediciones de ruido en microbolómetros basados en películas termosensor $a\text{-Si}_x\text{Ge}_y\text{B}_z\text{:H}$

La instalación empleada para las mediciones de microbolómetros fue INAOE 1 (Figura 3.4) y la adquisición de datos se presenta en la sección 3.2.4.3. En la instalación se implementaron las técnicas correspondientes de reducción de ruido para evitar interferencia con los resultados. Se midieron 3 tipos de de microbolómetros con características de películas termosensor mostradas anteriormente en la tabla 3.6. Las mediciones se realizaron a temperatura ambiente con presión $P= 20$ mTorr.

Para determinar la detectividad se realizó el cálculo de la ecuación 2.9 en la sección 2.4.5.

Considerando los resultados experimentales de $S_I(f)$:

$$D^* = \frac{\Re(A_d)^{1/2}}{\sqrt{S_I(f)}} \quad (3.11)$$

Donde R es la responsividad para cada muestra, $A_d=4.62 \times 10^{-5} \text{ cm}^2$ es el área de los microbolómetros y $S_1(f)$ es la densidad espectral de ruido obtenida experimentalmente. Otro parámetro empleado en este trabajo será la detectividad límite D^*_{lim} del microbolómetro. La detectividad límite es la detectividad máxima posible físicamente determinada por el ruido Johnson de la muestra:

$$D^*_{\text{lim}} = \frac{\Re(A_d)^{1/2}}{\sqrt{4kT/R_m}} \quad (3.12)$$

Donde T es la temperatura y R_m es la resistencia de la muestra. La detectividad D^*_{lim} es la última limitación física del dispositivo en cuanto a ruido se refiere. No es posible obtener una detectividad por encima de este parámetro, sin embargo, si el valor experimental se encuentra por encima de la detectividad límite. Entonces como se vio en el análisis de literatura en la sección 2.6.3 el ruido puede ser reducido por procesos de recocido.

3.6 Conclusiones Capítulo 3

En este capítulo se presenta el desarrollo de una metodología de medición de ruido para la obtención de los resultados experimentales. Los puntos más importantes sobre el desarrollo de la metodología son:

- El desarrollo de la metodología de medición en este capítulo consistió en el análisis de ruido externo, equipo de medición, adquisición y procesamiento de datos. Incluyendo el análisis de ruido en temperatura y polarización.

- Se seleccionó como equipo principal de medición un amplificador LOCK-IN debido a que en comparación de un analizador FFT cuenta con algunas principales como: permitirá tener más flexibilidad en la etapa de acoplamiento de impedancias debido a la alta impedancia de entrada del amplificador LOCK-IN.
- Se desea aumentar el rango de frecuencias experimentales en los resultados obtenidos. De tal manera que se propuso sustituir la configuración de iluminación IR modulada por Chopper por una configuración de IR constante. Esto permitirá una mayor flexibilidad en cuanto a la obtención de la señal de referencia, aumentando el ancho de banda de 10^3 Hz a 10^5 Hz. Para lograr esto, es necesario observar que efecto tiene el cambio de configuración de iluminación IR sobre el ruido de las muestras.
- Para mejorar la adquisición de los datos primarios se pretende combinar al amplificador LOCK-IN con una interfaz a la PC y un programa de adquisición de datos para optimizar el tiempo de integración en el momento de adquirir los datos. Esto a su vez permitió observar la señal de ruido en tiempo real y de forma gráfica. Se empleó para obtener el tiempo de integración inicial óptimo.

- Finalmente, se realizó una comparación de resultados entre la metodología desarrollada y una metodología alterna. De esta manera se espera comprobar la reproducibilidad de los resultados obtenidos con la metodología desarrollada en este capítulo.

3.7 Referencias Capítulo 3

- [3.1] **Moreno, M.C. Mario Moreno**, “*Study of IR un-cooled micro-bolometer arrays based on thin films deposited by plasma*” [tesis doctoral] . INAOE, Puebla, 2008.
- [3.2] **Martín Javier**, “*Analizadores de espectro, tipos*”, Metrología electrónica, p.p. 60-64, 2005
- [3.3] **González, F.J.** “*Noise measurements on optical detectors*” Rev. Mex. Fis. Vol.52, p.p. 550-554, 2006.
- [3.4] **Ott, Henry.** ”*Noise reduction techniques in electronic system*”s. 2^a edición, EUA, WILEY, 1988, 642 pp.
- [3.5] www.thinkSRS.com, “*About Lock-In amplifiers*”. Application note #3, p. 9, Junio 2008
- [3.6] **Van der Ziel, A.** ” *Noise* ” 1^a edición, EUA, Prentice-Hall, 1954, 450

- [3.7] **Cruz Garcia, María de la Luz**, “*Characterization and Modeling of Uncooled Microbolometers of a-SiGe*” [tesis doctoral], INAOE, Puebla, 2006.
- [3.8] **R.E. Johanson, M.Günea and S.O Kasap.**: “*Noise in hydrogenated amorphous silicon*”, IEE Proc. Circuits Devices Syst. Vol. 149, p.p. 68-73, 2002.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en el desarrollo de la metodología de medición de ruido en materiales a-SiGe:H y a-SiGeB:H con implementación en microbolómetros. Además, se muestran las curvas I(U) de las muestras empleadas para el estudio de ruido. Posteriormente se muestran resultados obtenidos con diferentes metodologías para comprobar la reproducibilidad de los datos adquiridos con la metodología desarrollada. Finalmente se presentan los resultados obtenidos sobre ruido en películas termosensor a-SiGeB:H, a-SiGe:H y microbolómetros.

4.2 Resultados sobre el desarrollo de la metodología de medición de ruido

Como se vio en el Capítulo 3 fue necesario el desarrollo de una metodología de medición de ruido. En esta sección se muestran los resultados obtenidos sobre el desarrollo de la metodología de medición de ruido.

Una parte del desarrollo de la metodología de medición de ruido consistió en la disminución de ruido externo en la instalación. Para lograr este objetivo se implementaron las diferentes técnicas explicadas en la sección 3.2.3. Estas técnicas permitieron aislar el sistema de medición de la influencia de fuentes ajenas al equipo de la instalación.

Posteriormente, se buscó separar las componentes de ruido debidas al equipo de medición y obtener el ruido intrínseco de las muestras medidas. Durante este periodo se analizaron diferentes factores que pudieran influir en los resultados como: ajustes del equipo de medición, condiciones de las mediciones y efectos debidos al carácter no ideal del equipo de medición. Finalmente se busco un método correcto para la extracción de $S_I(f)$ de las muestras y poder presentar los resultados.

En la Figura 4.1 se presenta las primeras mediciones de ruido con la instalación INAOE 1. Estos resultados presentan interferencias en forma de picos en el dominio de la frecuencia en 60Hz, 120Hz, 300 Hz 900Hz y 1000Hz. Se observó que estas interferencias eran debidas a fuentes externas de ruido presentes en el laboratorio.

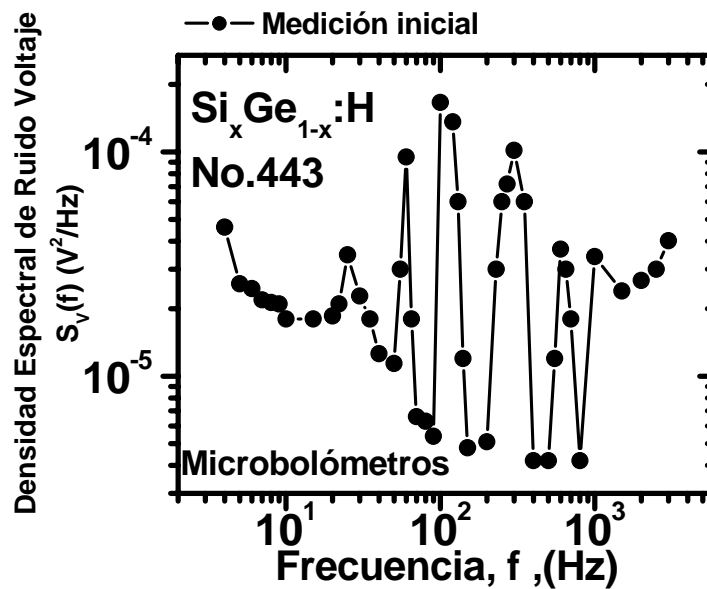


Figura 4.1 Densidad espectral de ruido microbolómetro a-SiGe:H 443 microbolómetro con interferencia de ruido externo

La reducción de ruido externo se llevo a cabo con la implementación de una tierra independiente a la línea industrial. Como se vio en la tabla 3.3 la implementación de tierra disminuyó los picos en las frecuencias de 60Hz y 120Hz. Los picos de 300, 900 Hz y la interferencia en frecuencias mayores a 1000Hz se disminuyeron con una combinación de técnicas como: tierra independiente, reducción de la longitud de los cables y blindaje. En la Figura 4.2 se presentan las curvas una vez eliminado el ruido externo.

Otra limitación que presentaba la instalación inicial INAOE 1 era el ancho de banda considerado en los resultados. Debido a limitaciones físicas de chopper óptico era imposible obtener frecuencias de referencias mayores a 8KHz.

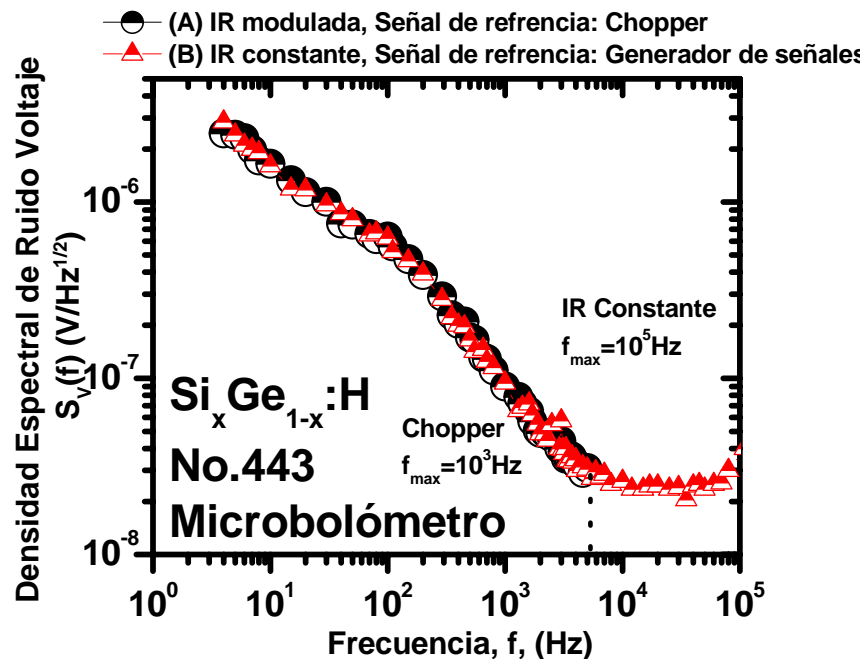


Figura 4.2 Medición de ruido en microbolómetro a-SiGe:H a) IR modulada chopper b) IR constante con generador de señales

Para aumentar el ancho de banda de las mediciones se procedió a comprobar que no existía influencia del tipo de modulación IR sobre el ruido. Estos experimentos consistieron en la obtención de la densidad espectral de ruido de la muestra $a\text{-Si}_x\text{Ge}_{1-x}\text{:H}$ con iluminación IR modulada por el chopper óptico y mediciones con modulación constante y señal de referencia obtenida de un generador de señales. Los resultados se presentan en la Figura 4.2 y se observa en los resultados obtenidos que no existe diferencia perceptible sobre el efecto de tipo de configuración de iluminación IR. Esto permitió usar la configuración de iluminación constante y aumentar el ancho de banda hasta 10^5 Hz.

Con los resultados de reducción del ruido externo y la configuración de iluminación constante se procedió a extraer las componentes de ruido debidas al equipo de medición (Figura 4.3).

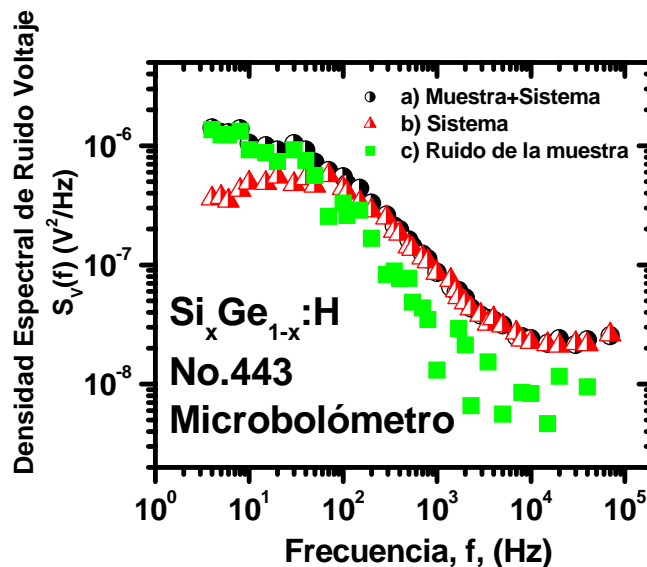


Figura 4.3 Mediciones de ruido para extracción de componentes de ruido por equipo de medición a) muestra+ sistema (muestra conectada) b) sistema (muestra en corto) c) Ruido de la muestra

En la Figura 4.3a) se presentan los resultados obtenidos en la medición de ruido cuando la muestra está conectada al equipo de medición. Por otra parte en la Figura 4.3b) se observa solo la componente de ruido debida al equipo de medición. En este caso las mediciones se realizaron con la muestra en corto circuito con tierra. En la Figura 4.3c) se muestra la extracción de ruido del sistema, obteniendo de esta manera el ruido de la muestra. La curva final se muestra en la Figura 4.4. Esta curva representa la potencia de densidad de espectral de ruido $S_v(f)$ final de la muestra.

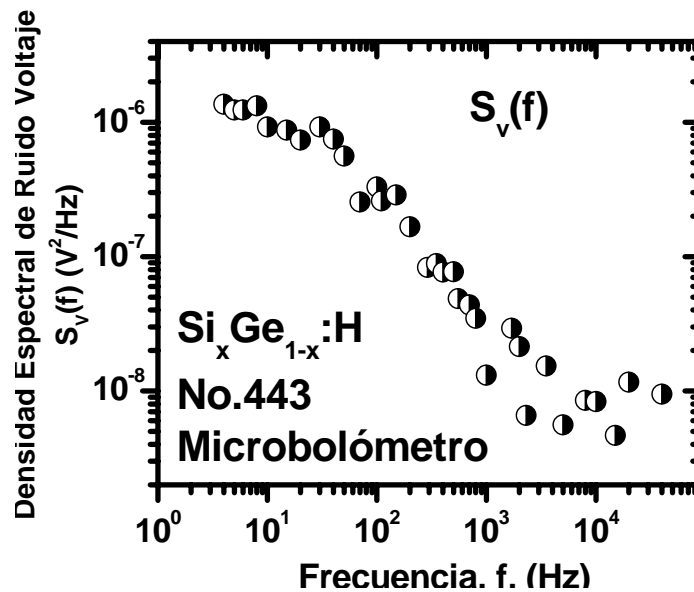


Figura 4.4 Componte de ruido extraída para microbolómetro a-SiGe:H sin ruido del sistema de medición

La curva en la Figura 4.4 muestra la densidad espectral de ruido sin influencia de ruido externo y ruido debido al equipo de medición. Finalmente se obtiene la potencia de densidad espectral de ruido en corriente $S_I(f)$ como se vio en la sección 3.2.4.3 y se muestra en la Figura 4.5.

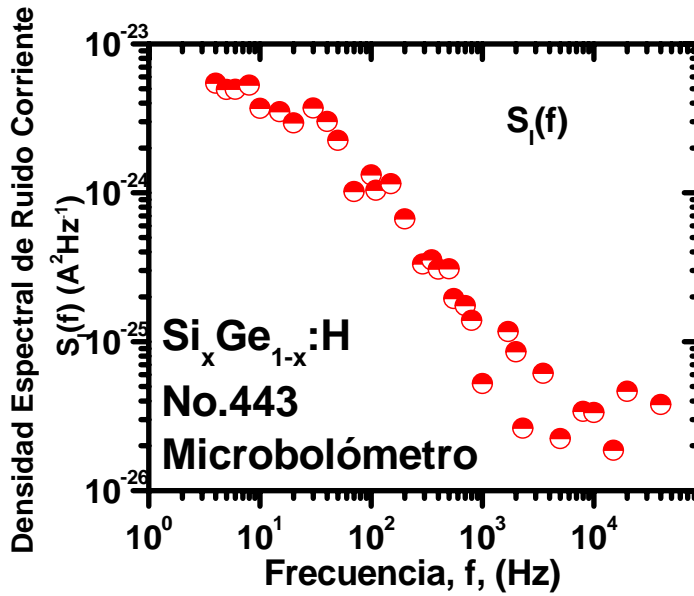


Figura 4.5 Densidad Espectral de Ruido $S_I(f)$ para muestra de microbolómetro a-SiGe:H en corriente

La Figura 4.5 muestra la curva de la densidad espectral de ruido en corriente $S_I(f)$. Los resultados obtenidos en este trabajo sobre ruido en las películas y microbolómetros presentaran esta forma. El mismo procedimiento de datos se lleva a cabo para todos los resultados, mostrándose sólo la curva final $S_I(f)$.

4.3 Característica corriente voltaje $I(U)$ de las muestras

Durante este trabajo se estudiaron 3 películas termosensor basadas en a-SiGe:H con diferentes concentraciones de B (tabla 3.5). El estudio de las películas se realizó en STRIPES (Figura 4.6a) en los tres procesos e implementadas en microbolómetros para los procesos 443 y 480 (Figura 4.6b). Los datos fueron obtenidos con la instalación descrita en

la sección 3.2.1. De las curvas I(U) se obtuvo la resistencia de las muestras para diferentes temperaturas. La presión a la cual fueron obtenidas todas las curvas I(U) fue P=20mTorr

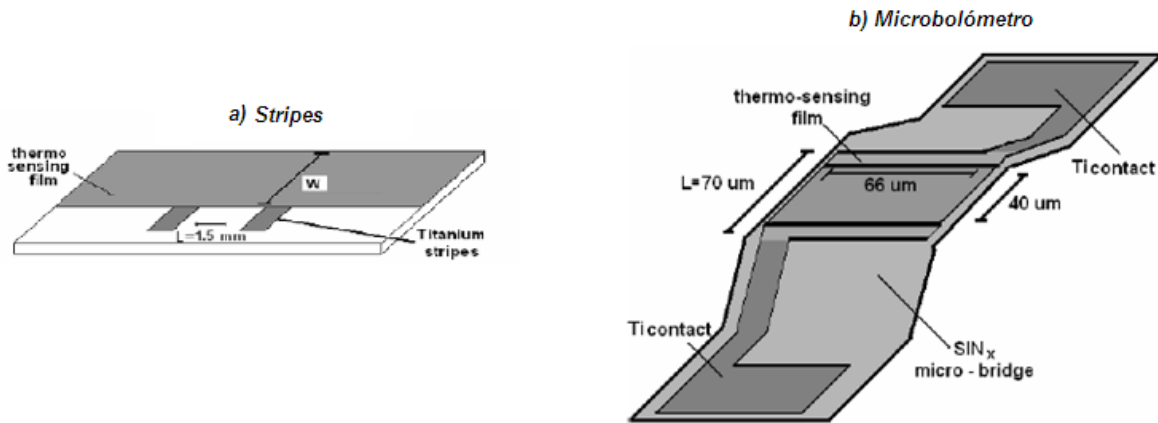


Figura 4.6 Estructuras implementadas para mediciones de ruido en películas $a\text{-Si}_x\text{Ge}_{1-x}\text{:H}$ y $a\text{-Si}_x\text{Ge}_y\text{B}_z\text{:H}$ a) Estructura STRIPE (sustrato de vidrio) b) microbolómetro con película termosensor $a\text{-SiGe:H}$ y $a\text{-SiGeB:H}$

En la Figura 4.7 se muestran las diferentes curvas I(U) correspondientes a la película termosensor $a\text{-Si}_x\text{Ge}_{1-x}\text{:H}$ en STRIPE No. 443. Esta muestra se caracteriza por su alta resistencia debido a que no contiene Boro. En la Figura 4.8 se muestran las curvas I(U) correspondientes a la muestra proceso 479. Finalmente, se muestra las curvas I(U) de la muestra No. 480 STRIPE $\text{Si}_x\text{Ge}_y\text{B}_z\text{:H}$ y su resistencia en la Figura 4.9

La película más resistiva fue $a\text{-Si}_x\text{Ge}_{1-x}\text{:H}$ con $75\text{M}\Omega$ seguida de $\text{Si}_x\text{Ge}_y\text{B}_z\text{:H}$ del proceso 479 con resistencia de $3\text{M}\Omega$, finalmente, la muestra de menor resistencia fue del proceso 480 con $250\text{K}\Omega$.

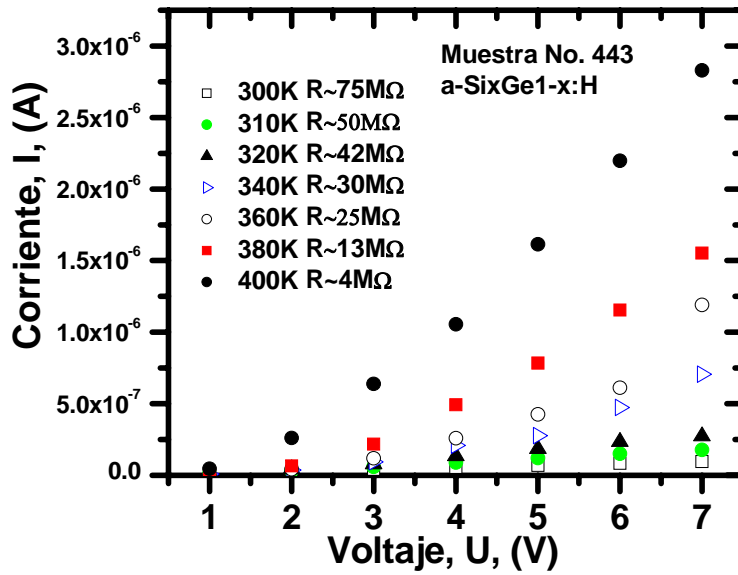


Figura 4.7 Curva I(U) para diferentes temperaturas de muestra a-Si_xGe_{1-x}:H STRIPE y su resistencia correspondiente a la temperatura

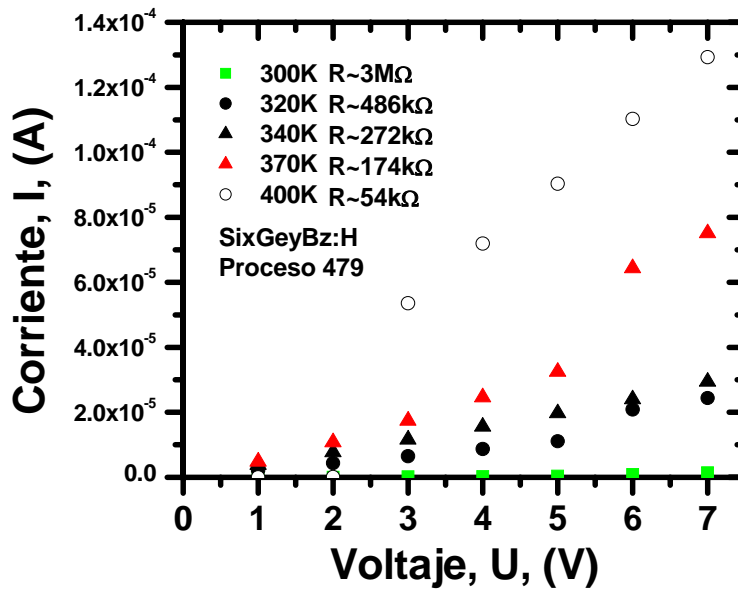


Figura 4.8 Curva I(U) para diferentes temperaturas de muestra a-Si_xGe_yB_z:H STRIPE proceso 479y su resistencia correspondiente a cada temperatura

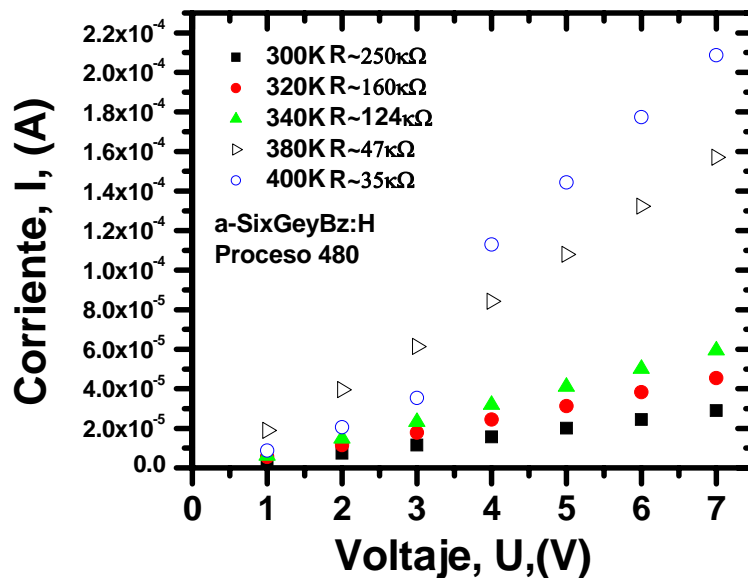


Figura 4.9 Curva I(U) para diferentes temperaturas de muestra a-Si_xGe_yB_z:H STRIPE proceso 480 y su resistencia correspondiente a cada temperatura

Las curvas corriente voltaje de las muestras en microbolómetros se muestran en la Figura 4.10 y 4.11 del proceso 443 y 480 respectivamente. Las curvas fueron obtenidas a una presión P=20mTorr a temperatura ambiente. La resistencia de un microbolómetro con película termosensor No. 443 de a-Si_xGe_{1-x}:H obtenida fue de R≈500MΩ. Esta resistencia disminuye conforme se aumenta la cantidad de B en la película termosensor. Para el proceso No. 480 a-Si_xGe_yB_z:H se tiene una R=8MΩ para una celda de microbolómetro. Estos resultados muestran en conjunto que el amplificador LOCK-IN es una mejor opción como equipo principal debido a su alta resistencia de entrada.

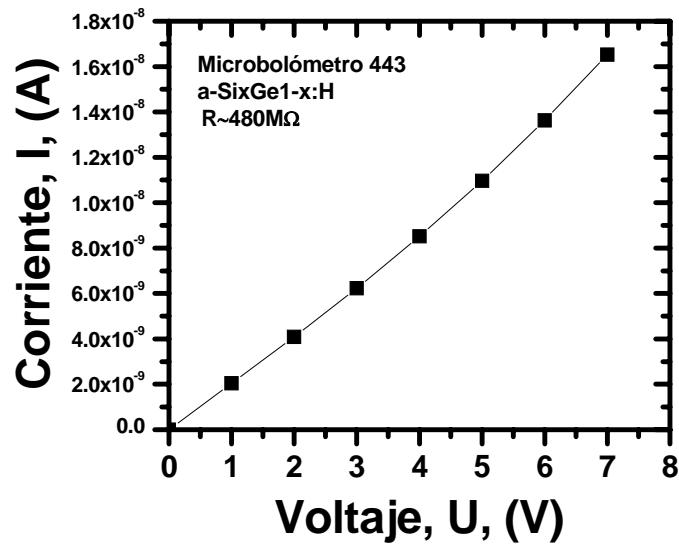


Figura 4.10 Curva I(U) de la muestra a-Si_xGe_yB_z:H Proceso 443 microbolómetro a temperatura ambiente y su resistencia correspondiente a la temperatura

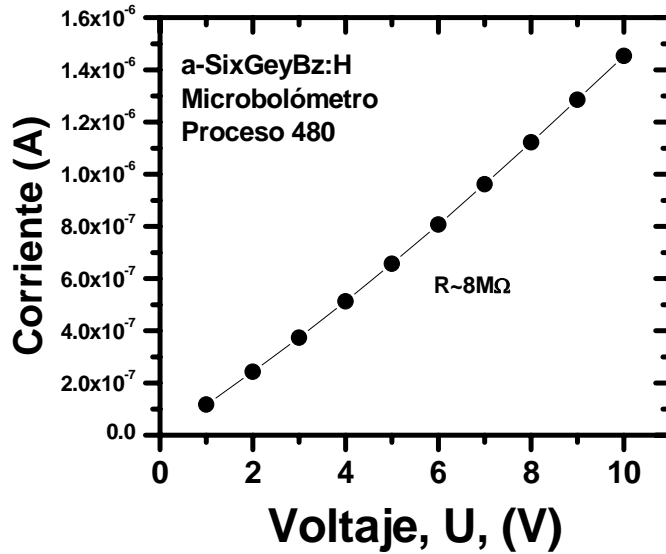


Figura 4.11 Curva I(U) de la muestra a-Si_xGe_yB_z:H Proceso 480 microbolómetro a temperatura ambiente y su resistencia correspondiente a la temperatura

Un estudio sobre la conductividad de las muestras energía de activación y TCR puede ser consultado en [4.1].

4.4 Reproducibilidad de resultados experimentales de ruido en resistencias

Los resultados obtenidos sobre reproducibilidad se muestran en la Figura 4.12. Se compararon de igual manera con el ruido teórico para una resistencia del mismo valor. Se observa que el ruido térmico calculado ($1.6 \times 10^{-23} \text{ A}^2 \text{ Hz}^{-1}$) es muy cercano al ruido obtenido experimentalmente $(1.6-3) \times 10^{-23} \text{ A}^2 \text{ Hz}^{-1}$.

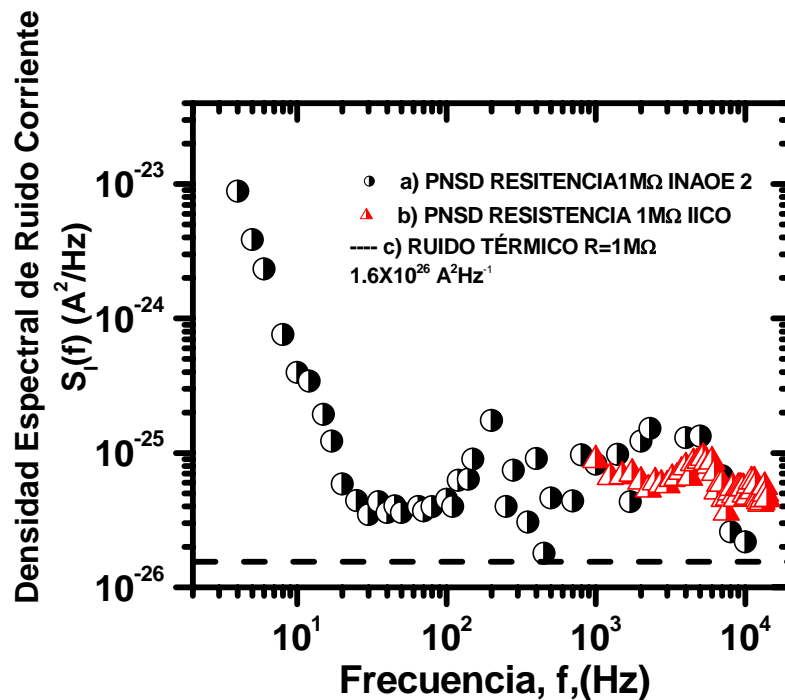


Figura 4.12 Densidad espectral de ruido para una resistencia de $1 \text{ M}\Omega$ a) Resultados obtenidos con la instalación INAOE2, Puebla b) Resultados obtenidos en IICO, San Luis Potosí c) ruido teórico Térmico para una resistencia de $1 \text{ M}\Omega$

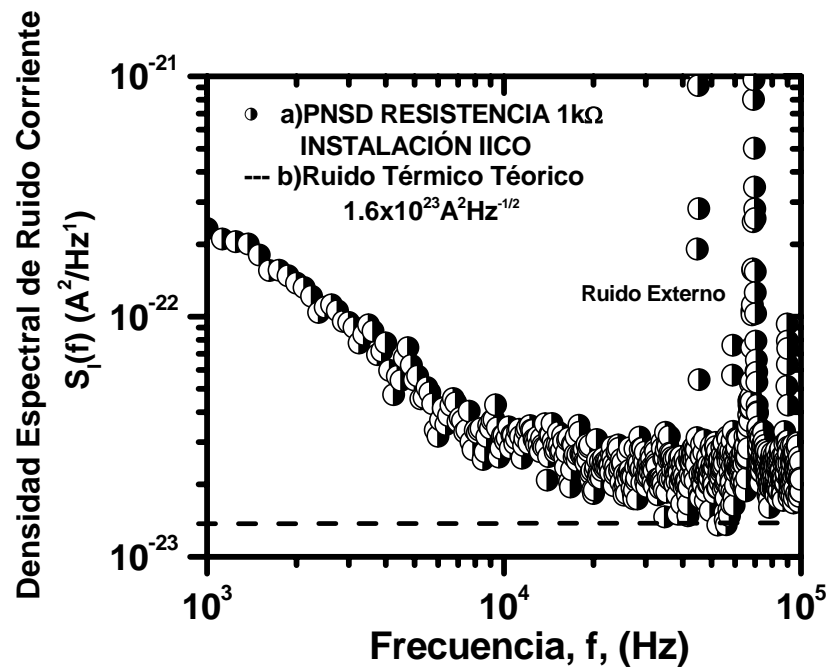


Figura 4.13 Densidad espectral de ruido para una resistencia de $1\text{k}\Omega$ a) Resultados obtenidos en IICO, San Luis Potosí c) Ruido teórico térmico para una resistencia de $1\text{k}\Omega$

Las Figura 4.12 muestra que los resultados experimentales obtenidos con diferentes metodologías se encuentran en el mismo orden de amplitud. Los resultados en la Figura 4.13 muestran ruido externo debido a que en la instalación IICO no se trabajo en la reducción de ruido externo. Sin embargo, al comparar los resultados obtenidos se observa que las mediciones experimentales y teóricas son cercanas. Estos resultados comprueban que los resultados experimentales tienen reproducibilidad con diferentes metodologías y en diferentes laboratorios.

4.5 Resultados experimentales de ruido en películas termosensor $a\text{-Si}_x\text{Ge}_y\text{B}_z\text{:H}$

El estudio de ruido en películas termosensor se realizó en muestras STRIPE (Figura 4.6a). El estudio consistió en mediciones de densidad espectral de ruido para diferentes temperaturas y polarización.

En la Figura 4.14a se muestran los resultados de PNSD en las tres muestras de STRIPE. La muestra STRIPE 443 es una película termosensor $a\text{-Si}_x\text{Ge}_{1-x}\text{:H}$ ($x=0.117$) intrínseca. Esta muestra se caracteriza por su alta resistencia ($480\text{M}\Omega$) debido a la ausencia de Boro. Se observa en los resultados que esta muestra presenta menor nivel de ruido. También se observa en la curva de PNSD de la muestra No. 443 que cuenta con una pendiente $\beta=1$. La Figura 4.14b presenta la PNSD para la muestra STRIPE 479 con película termosensor $a\text{-Si}_x\text{Ge}_y\text{B}_z\text{:H}$ ($x=0.055$ $y=0.67$ $z=0.262$). Esta muestra contiene Boro para el aumento de la conductividad. Se observa que esta película presenta mayor ruido (3 ordenes en 4Hz) en PNSD. La curva de PNSD presenta una deformación comparada con la muestra STRIPE 443. En la Figura 4.14b se muestran dos regiones diferentes. Una región con pendiente $\beta=0.74$ y una región constante en frecuencia. Finalmente en la Figura 4.14c se muestran los resultados obtenidos para la película STRIPE 480 $a\text{-Si}_x\text{Ge}_y\text{B}_z\text{:H}$ ($x=0.041$ $y=0.717$ $z=0.231$). Esta muestra es la que presenta menor resistencia ($\text{k}\Omega$, $T=300\text{K}$) y menor cantidad de Si.

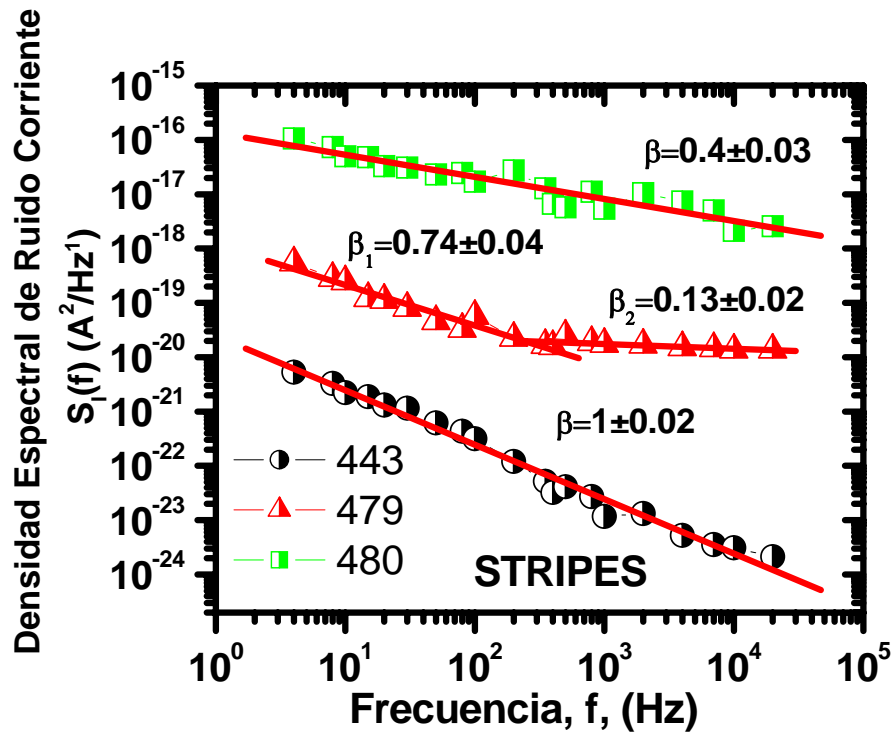


Figura 4.14 Densidad espectral de ruido diferentes películas termosensor 300K a) Muestra 443 a-
 $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}:\text{H}$ ($x=0.117$) b) Muestra 479 a- $\text{Si}_x\text{Ge}_y\text{Bz}:\text{H}$ ($x=0.055$ $y=0.67$ $z=0.262$) c) Muestra 480 a-
 $\text{Si}_x\text{Ge}_y\text{Bz}:\text{H}$ ($x=0.041$ $y=0.717$ $z=0.231$)

En la curva de la Figura 4.14c se observa solo una región con una pendiente $\beta=0.4$. Esta pendiente es la menor de las tres curvas en baja frecuencia. También es la curva que presenta una mayor cantidad de ruido. La energía de activación E_a y la resistencia de los STRIPES se muestran en la tabla 4.1 junto con los parámetros obtenidos de resultados experimentales en la medición de PNSD a temperatura ambiente. En la tabla 4.1 se observa que a mayor energía de activación existe una mayor pendiente β .

Tabla 4.1 Comparación de diferentes características de STRIPES obtenidas experimentalmente de PNSD

STRIPES	Ea (eV)	Resistencia (Ω) T=300K	β_1	β_2	PNSD (A^2Hz^{-1})100Hz
443 a-Si_xGe_{1-x}:H (x=0.117)	0.34	7.5×10^7	1	---	10^{-22}
479 a-Si_xGe_yBz:H (x=0.055 y=0.67 z=0.262)	0.21	3×10^6	0.74	0.13	10^{-20}
480 a-Si_xGe_yBz:H (x=0.041 y=0.717 z=0.231)	0.18	2.5×10^5	0.4	---	10^{-17}

Otro resultado importante que se muestra en la tabla 4.1 es la disminución de la pendiente de la región 1/f con la disminución de la energía de activación.

4.5.1 Resultados de ruido: dependencia de temperatura

Parte del estudio de PNSD en las películas termosensor consistió en el efecto de la temperatura en el ruido. Las mediciones consistieron en obtener la PNSD para diferentes temperaturas y observar su efecto. Las mediciones se realizaron con la instalación INAOE2 presentada en el Capítulo 3.

En la Figura 4.15 se muestran los resultados obtenidos en STRIPE 443 de PNSD a diferentes temperaturas. El primer efecto que salta a la vista es el aumento de nivel de ruido con la temperatura. También se observa un cambio en la pendiente de las curvas conforme

se aumenta la temperatura (tabla 4.2). En la Figura 4.16 se muestra la dependencia de PNSD en función de temperatura para una frecuencia $f=1\text{kHz}$ para la muestra 443. De esta curva se obtiene la E_{na} .

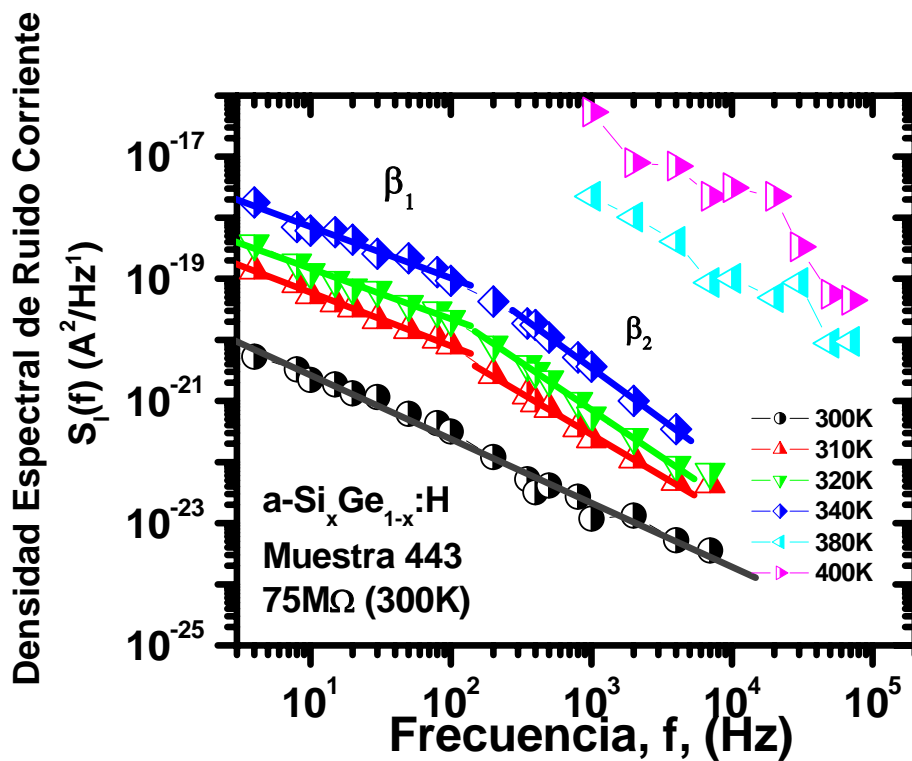


Figura 4.15 PNSD para diferentes temperaturas de muestra No. 443 a-Si_xGe_{1-x}:H (x=0.117)

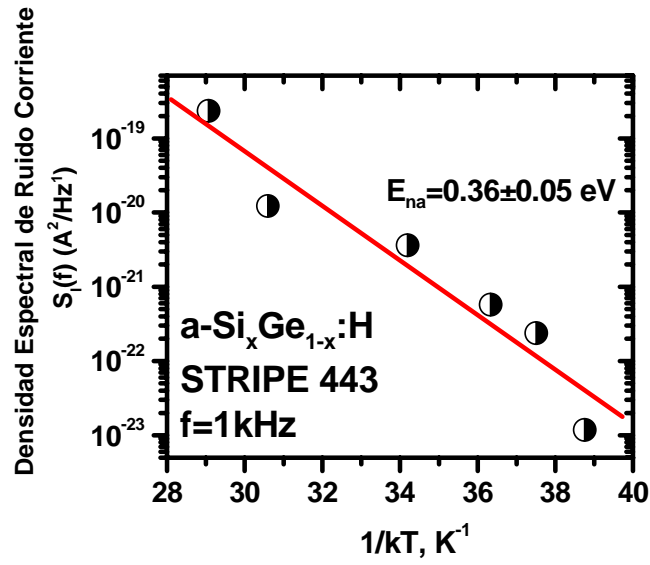


Figura 4.16 PNSD de STRIPE 443 a-Si_xGe_{1-x}:H (x=0.117) en función de la temperatura (f=1kHz)

Tabla 4.2 Parámetros extraídos de la curva de PNSD de muestra 443

a-Si_xGe_{1-x}:H (x=0.117)

STRIPE	E _{na} (eV)	Temperatura (°K)	Resistencia	β ₁	β ₂	PNSD (A ² Hz ⁻¹) (f=1KHz)
443 a-Si _x Ge _{1-x} :H (x=0.117)	0.36	300	7.5x10 ⁷	1	--	1x10 ⁻²³
		310	5.0x10 ⁷	0.87±0.02	1.2±0.03	4.3x10 ⁻²³
		320	4.2x10 ⁷	0.82±0.04	1.4±0.04	6.8x10 ⁻²³
		340	3.0x10 ⁷	0.84±0.04	1.6±0.03	3.45x10 ⁻²²
		380	1.3x10 ⁷	---	---	9x10 ⁻²¹
		400	4x10 ⁶	---	---	4.4x10 ⁻²⁰

La Figura 4.17 muestra los resultados obtenidos para la muestra STRIPE 479 $a\text{-Si}_x\text{Ge}_y\text{B}_z\text{:H}$ ($x=0.055$ $y=0.67$ $z=0.262$) a diferentes temperaturas. En las primeras 3 curvas correspondientes a las temperaturas de 300K, 320K y 340K se observa un aumento de ruido. También se observan dos regiones, una inversamente proporcional a la frecuencia y una constante. En ambas regiones existe el aumento de ruido. La pendiente β_1 aumenta conforme aumenta la temperatura. También se observa que conforme aumenta la temperatura y el nivel de ruido surgen dos regiones. La primera con una pendiente β_2 pequeña y otra región β_3 mayor. Se observa que en el rango de temperatura de $T=300\text{K}$ - 400K el ruido aumenta en 3 ordenes aproximadamente. De igual manera lo hace la resistencia de la muestra.

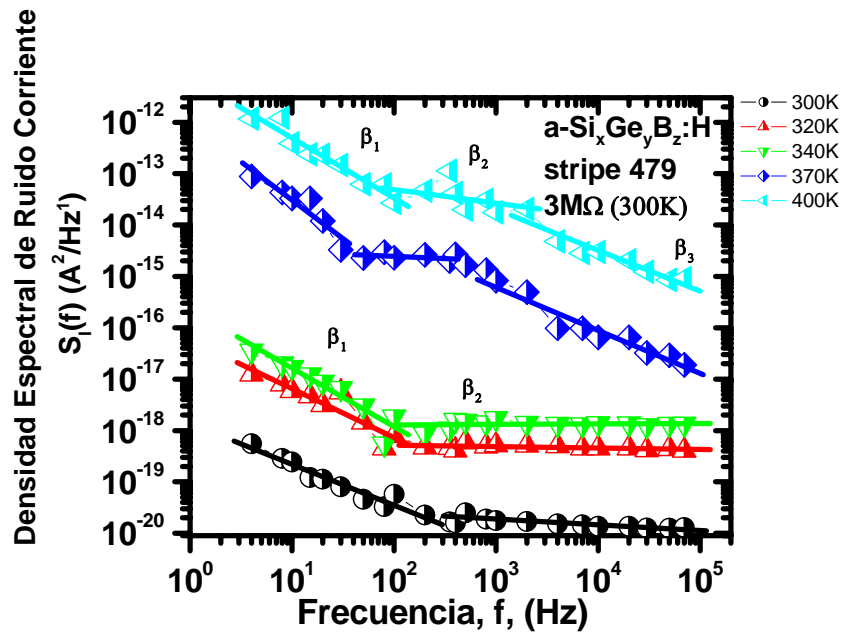


Figura 4.17 PNSD para diferentes temperaturas de STRIPE 479 $a\text{-Si}_x\text{Ge}_y\text{B}_z\text{:H}$ ($x=0.055$ $y=0.67$ $z=0.262$)

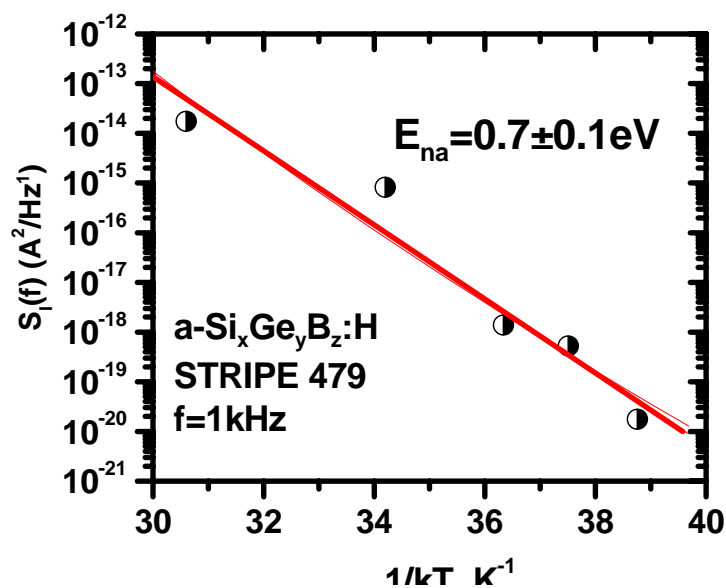


Figura 4.18 PNSD de STRIPE 479 a-Si_xGe_yBz:H (x=0.055 y=0.67 z=0.262) en función de la temperatura (f=1kHz)

Tabla 4.3 Parámetros extraídos de la curva de PNSD de muestra STRIPE 479 a-Si_xGe_yBz:H (x=0.055 y=0.67 z=0.262)

Muestra	E _{na} (eV)	T (K)	R (Ω)	β ₁	β ₂	β ₃	PNSD (A ² Hz ⁻¹)
479 a-Si _x Ge _y Bz:H (x=0.055 y=0.67 z=0.262)	0.7	300	3x10 ⁶	0.79±0.07	0.11±0.01	---	1.3x10 ⁻²⁰
		320	4.8x10 ⁵	0.9±0.1	0	---	4.1x10 ⁻¹⁹
		340	2.72x10 ⁵	1.4±0.1	0	---	1.3x10 ⁻¹⁸
		370	1.74x10 ⁵	1.5±0.3	0	0.8±0.08	1.89x10 ⁻¹⁷
		400	5.4x10 ⁴	1.1±0.1	0.2±0.02	0.7±0.01	9.1x10 ⁻¹⁶

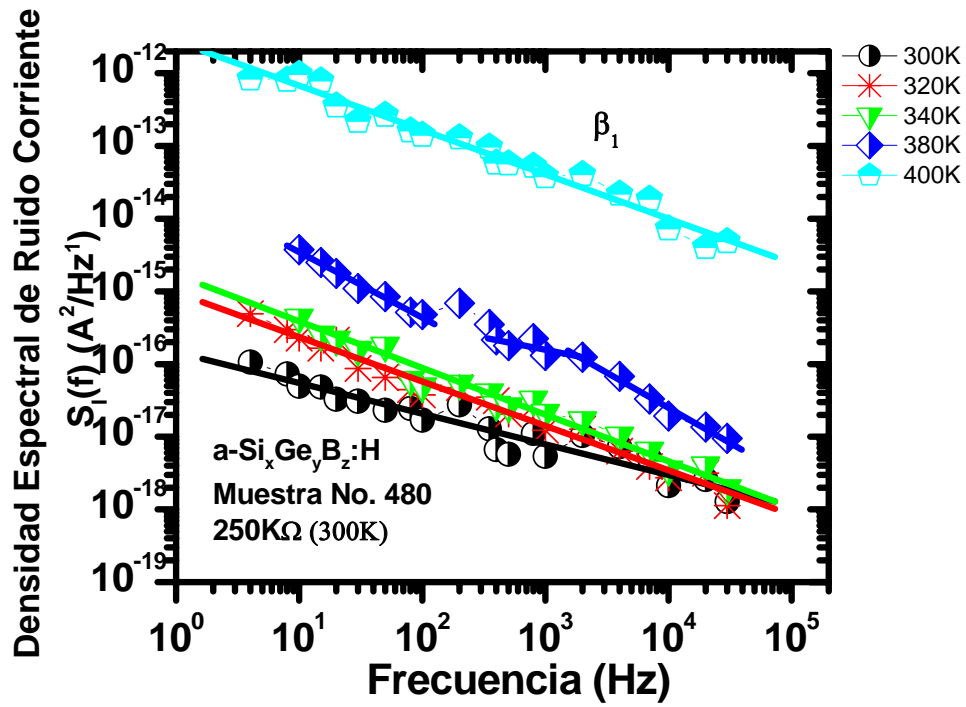


Figura 4.19 PNSD para diferentes temperaturas de STRIPE 480 a-Si_xGe_yB_z:H (x=0.041 y=0.717 z=0.231)

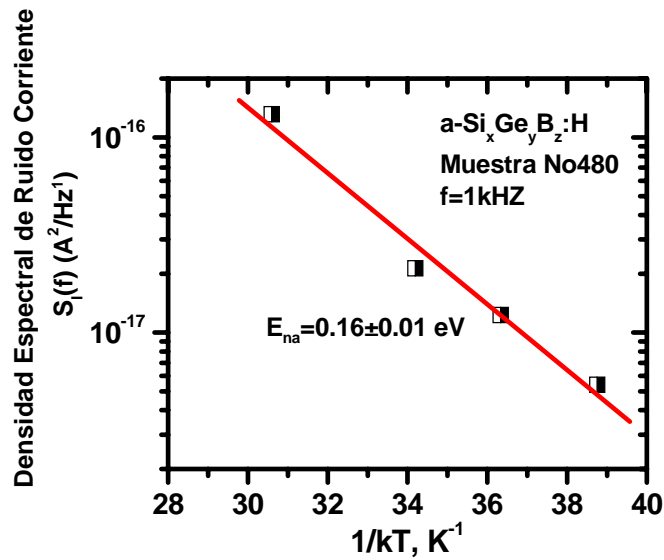


Figura 4.20 PNSD de STRIPE 480 a-Si_xGe_yB_z:H (x=0.041 y=0.717 z=0.231) en función de la temperatura (f=1kHz)

Tabla 4.4 Parámetros extraídos de la curva de PNSD de muestra STRIPE 480 a-Si_xGe_yBz:H (x=0.041 y=0.717 z=0.231)

STRIPE	E _{na} (eV)	T (°K)	R (Ω)	β ₁	β ₂	β ₃	PNSD(A ² Hz ⁻¹)
480 a-Si_xGe_yBz:H (x=0.041 y=0.717 z=0.231)	0.16	300	2.5x10 ⁵	0.4±0.03	---	---	1.2x10 ⁻¹⁸
		320	1.6x10 ⁵	0.6±0.02	---	---	1.1x10 ⁻¹⁸
		340	1.2x10 ⁵	0.64±0.02	---	---	1.9x10 ⁻¹⁸
		380	4.7x10 ⁴	0.89±0.04	0.3±0.1	0.96±0.07	9.5x10 ⁻¹⁸
		400	3.4x10 ⁴	0.6±0.02			4.8x10 ⁻¹⁵

De igual manera en la Figura 4.19 se muestran los resultados obtenidos de muestra STRIPE 480 a-Si_xGe_yBz:H (x=0.041 y=0.717 z=0.231). Se observa en los resultados un aumento de ruido debido a un aumento de la temperatura. En todas las curvas se identifica solo una región, excepto por el experimento con T=380K la cual presenta tres regiones. Los cambios en la pendiente son menores en esta muestra. Los parámetros extraídos de este experimento se describen en la tabla 4.4. Cabe mencionar que esta muestra es la de menor resistencia y a la vez es la que presenta los mayores niveles de ruido de las tres.

4.5.2 Resultados de ruido: dependencia de polarización

El efecto de polarización en PNSD de las muestras STRIPES 480 y 479 se realizó con la instalación IICO. Estos experimentos son en el rango de frecuencia de 1kHz a 10kHz. Las muestras fueron medidas con polarización de 1V y sin polarización. Los resultados en la

muestra STRIPE 479 $a\text{-Si}_x\text{Ge}_y\text{B}_z\text{:H}$ ($x=0.055$ $y=0.67$ $z=0.262$) se presentan en la Figura 4.21.

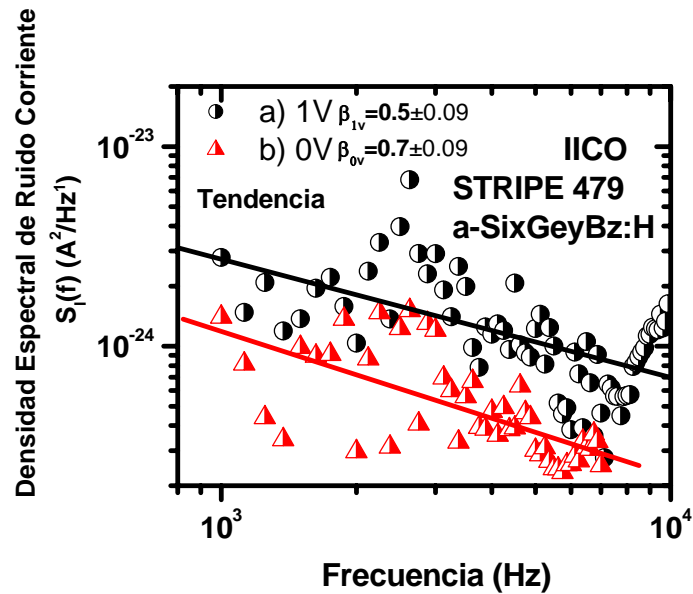


Figura 4.21 PNSD con y sin polarización de muestra STRIPE 479 $a\text{-Si}_x\text{Ge}_y\text{B}_z\text{:H}$ ($x=0.055$ $y=0.67$ $z=0.262$), Mostrando tendencia de resultados, donde líneas solidas muestran tendencia de resultados

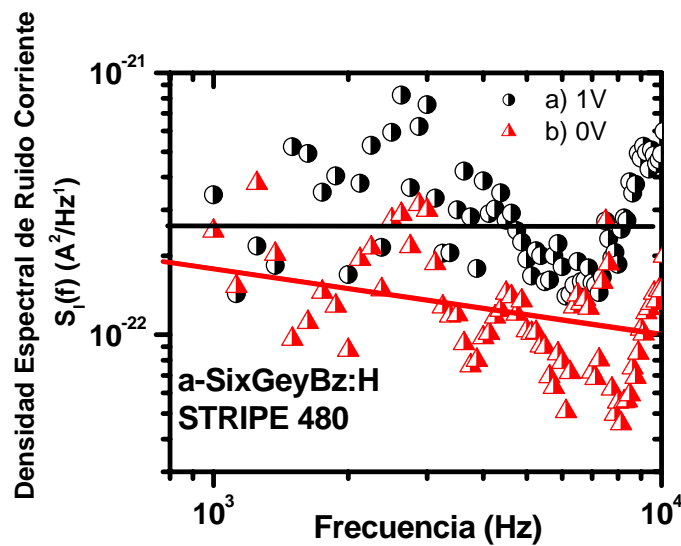


Figura 4.22 PNSD con y sin polarización de 480 $a\text{-Si}_x\text{Ge}_y\text{B}_z\text{:H}$ ($x=0.041$ $y=0.717$ $z=0.231$), tendencia de resultados, donde líneas solidas muestran tendencia de resultados

Tabla 4.5 Parámetros de experimentos de efectos de polarización en muestras de proceso 480 a- $\text{Si}_x\text{Ge}_y\text{B}_z\text{:H}$ ($x=0.041$ $y=0.717$ $z=0.231$) y STRIPE 479 a- $\text{Si}_x\text{Ge}_y\text{B}_z\text{:H}$ ($x=0.055$ $y=0.67$ $z=0.262$)

Muestra	V_{bias}	I_{bias}	β	PNSD $S_I(f)$ (A^2Hz^{-1})
STRIPE 479 a- $\text{Si}_x\text{Ge}_y\text{B}_z\text{:H}$ ($x=0.055$ $y=0.67$ $z=0.262$)	1V	76nV	0.500±0.09	8×10^{-24}
	0V	0	0.700±0.09	3×10^{-24}
STRIPE 480 a- $\text{Si}_x\text{Ge}_y\text{B}_z\text{:H}$ ($x=0.041$ $y=0.717$ $z=0.231$)	1V	76nV	0	2×10^{-22}
	0V	0	0.2	1×10^{-22}

Se observa el aumento del nivel de ruido con polarización de 1V comparado con 0V, la pendiente β , presenta una tendencia de disminución en 1V. En la Figura 4.22 se muestran los resultados obtenidos con STRIPE 480 a- $\text{Si}_x\text{Ge}_y\text{B}_z\text{:H}$ ($x=0.041$ $y=0.717$ $z=0.231$). Igualmente, existe un aumento del nivel de ruido con polarización de 1V comparado con 0V. En esta región la pendiente $\beta \approx 0$ para ambos casos. Sin embargo, de igual manera que en la muestra 479 se observa una pequeña tendencia a disminuir β en el experimento de mayor polarización.

4.6 Resultados de ruido en microbolómetros con películas a- SiGeB:H y detectividad de dispositivos

El estudio de ruido en las películas incluyó la implementación de las mismas en microbolómetros. Las muestras de los procesos 443 a- $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}\text{:H}$ ($x=0.117$) y 480 a- $\text{Si}_x\text{Ge}_y\text{B}_z\text{:H}$ ($x=0.041$ $y=0.717$ $z=0.231$) fueron implementadas en microbolómetros estructura micropuente y se midió PNSD de cada microbolómetro. Las mediciones se

realizaron con la instalación INAOE 1. En la Figura 4.23 se muestra PNSD del MICROBOLÓMETRO 443 $-\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}:\text{H}$ ($x=0.117$). Al igual que en las muestra tipo STRIPE se observa un exceso de ruido $1/f$. También, se observan 3 regiones con $\beta_1=0.2$ $\beta_2=0.9$ y $\beta_3\approx 0$. La pendiente de la región mayor coincide con la dominante en PNSD de las muestra STRIPE del mismo proceso. La frecuencia de corte de la primera región se encuentra en $f_{c1}=35\text{Hz}$ y la segunda se encuentra en $f_{c2}=4.5\text{kHz}$. La última región no es proporcional a la frecuencia y se encuentra dos órdenes por encima ($2 \times 10^{13} \text{ A/Hz}^{-1/2}$) del valor de ruido teórico correspondiente al microbolómetro ($2 \times 10^{-15} \text{ A/Hz}^{-1/2}$). Un resultado importante es que al igual que su película termosensor existe un dominio de ruido $1/f$ en el microbolómetro.

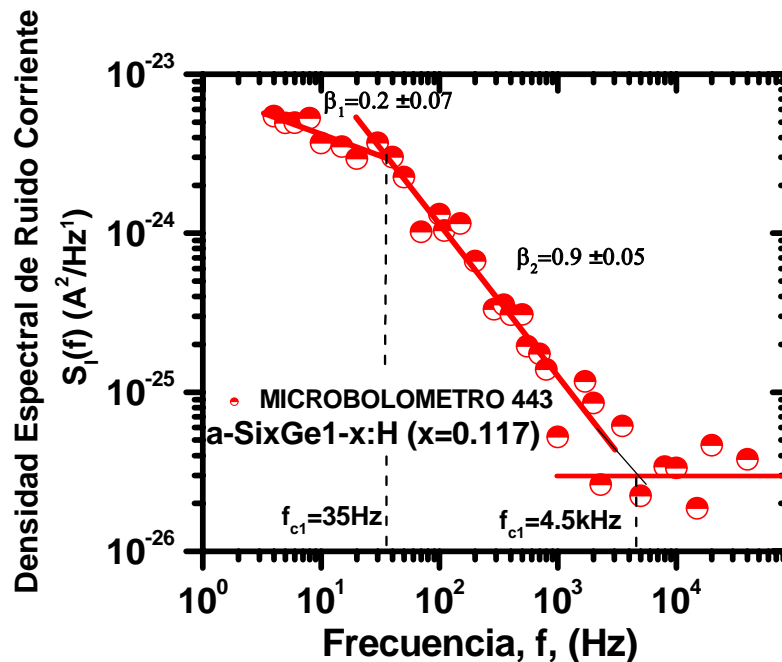


Figura 4.23 PNSD microbolómetro MICROBOLÓMETRO 443 $-\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}:\text{H}$ ($x=0.117$) y frecuencias de corte, donde líneas solidas muestran el ajuste de los resultados

La PNSD del microbolómetro permite ver el comportamiento de ruido en la muestra, sin embargo, no es muy útil para comparar el desempeño entre detectores con diferentes características. Para tal objetivo es necesario, entonces, emplear la detectividad específica D^* . La detectividad relaciona la responsividad del detector y el ruido, así como el factor geométrico. La detectividad del microbolómetro se muestra en la Figura 4.24 en función de la frecuencia. Se observa que la detectividad aumenta hasta una detectividad máxima, limitada por el ruido térmico. En la tabla 4.6 se muestra la responsividad para ambas muestras de microbolómetros, la detectividad máxima obtenida experimentalmente y la detectividad correspondiente al ruido térmico calculado para cada bolómetro.

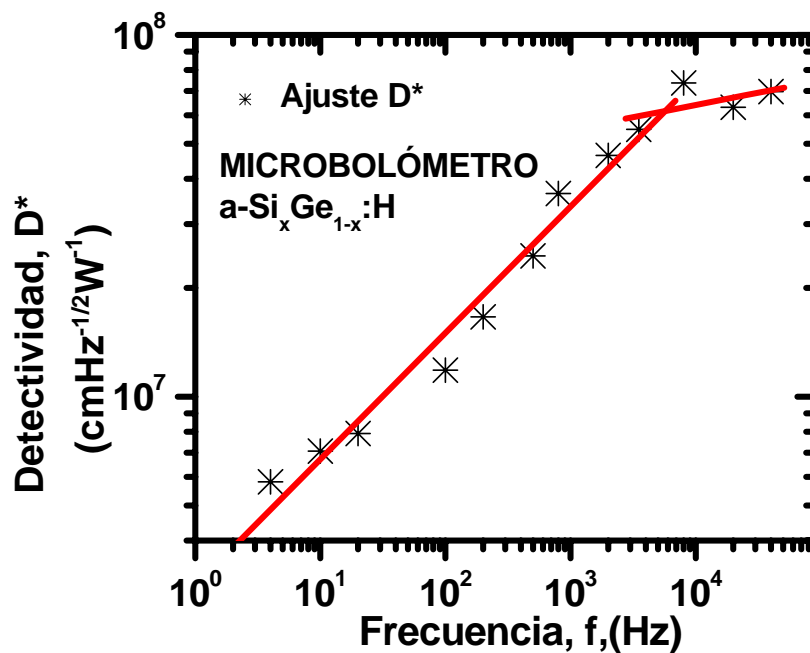


Figura 4.24 Detectividad específica para la muestra MICROBOLÓMETRO 443 - $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}:\text{H}$ ($x=0.117$) en función de la frecuencia donde líneas solidas muestran el ajuste de los resultados

En la Figura 4.25 se muestra la PNSD para el MICROBOLÓMETRO 480 a-Si_xGe_yB_z:H (x=0.041 y=0.717 z=0.231). Se observan dos regiones, la mayor con una pendiente $\beta=1$ y una región de ruido blanco. La frecuencia de corte entre las regiones es $f_c=40\text{kHz}$. La detectividad específica se muestra en la Figura 4.26. Se observa al igual que en la muestra 443 una detectividad limite en alta frecuencia. Entre las muestras, se observa que la muestra 480 tiene mayor detectividad (tabla 4.6). Esto es debido a que presenta mayor responsividad. Sin embargo, el ruido es mayor para esta muestra. Por el contrario la muestra 443 presenta menor responsividad pero mayor ruido. Esto es debido a su alta resistencia.

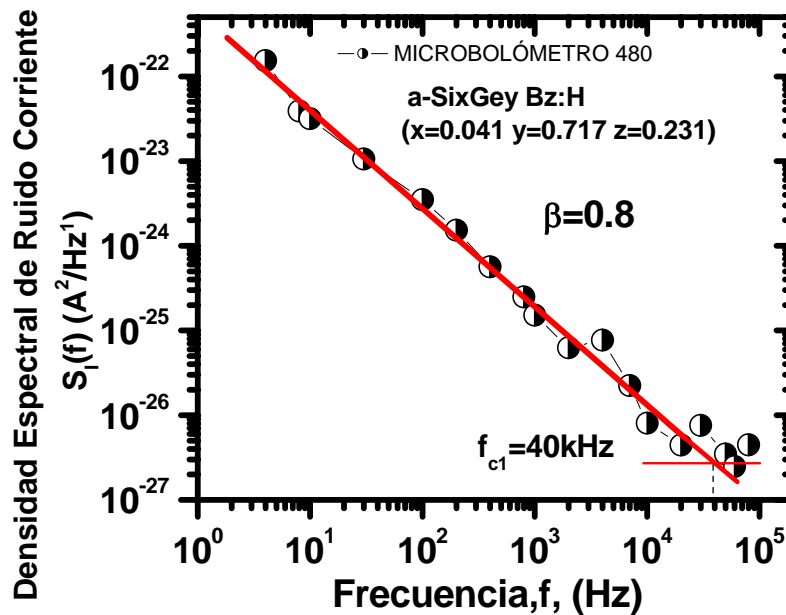


Figura 4.25 PNSD y ajuste microbolómetro 480 a-Si_xGe_yB_z:H (x=0.041 y=0.717 z=0.231) y frecuencia de corte, donde líneas solidas muestran el ajuste de los resultados

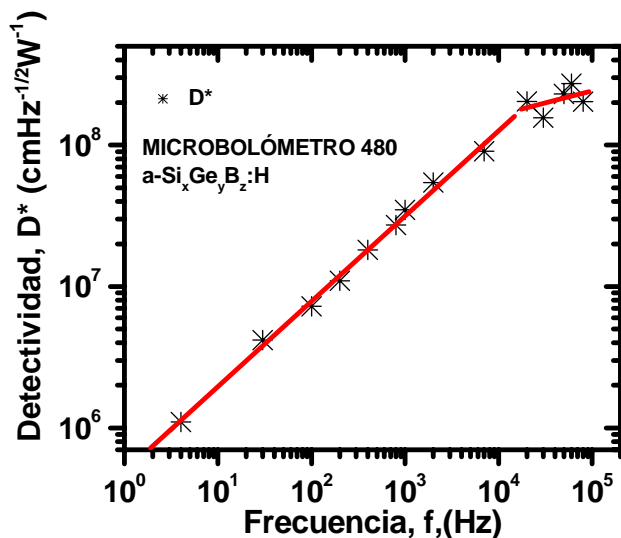


Figura 4.26 Ajuste y detectividad para la muestra MICROBOLÓMETRO 480 a-Si_xGe_yB_z:H (x=0.041 y=0.717 z=0.231) donde líneas solidas muestran el ajuste de los resultados

Tabla 4.6 Responsividad y detectividad de las muestras de MICROBOLÓMETROS 443 y 480.

	Responsividad R (AW ⁻¹)	Detectividad D* _{max} (cmHz ^{-1/2} W ⁻¹)	Detectividad D* _{lim} (cmHz ^{-1/2} W ⁻¹)
MICROBOLÓMETRO 443 a-Si _x Ge _{1-x} :H	2x10 ⁻³	8x10 ⁷	2.3x10 ⁹
MICROBOLÓMETRO 480 a-Si _x Ge _y B _z :H	7x10 ⁻²	3x10 ⁸	1.x10 ¹⁰

Los efectos de temperatura y polarización en los microbolómetros se espera sean similares. Esto es debido a que en los microbolómetros el ruido dominante es el exceso de ruido 1/f de sus películas termosensor. Sobre la detectividad por los resultados obtenidos en las muestras STRIPES muestran la tendencia de una disminución de detectividad. En otras palabras, al aumentar la temperatura aumenta el ruido, por lo tanto, se espera una

disminución de detectividad. Sobre polarización se espera igualmente una disminución de detectividad. Sin embargo este efecto es menor que el obtenido por temperatura.

4.7 Referencias Capitulo 4

- [4.1] **Moreno, Mario Moreno**, “*Study of IR un-cooled micro-bolometer arrays based on thin films deposited by plasma*” [tesis doctoral] . INAOE, Puebla, 2008.

5. DISCUSIÓN SOBRE RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.1 Introducción

Durante este capítulo es presentada la discusión de los resultados experimentales del trabajo de tesis. El capítulo está dividido en secciones al igual que los resultados experimentales presentados en el capítulo anterior. En primer lugar se presenta la discusión sobre el desarrollo de la metodología de medición de ruido. En segundo lugar se discuten los resultados en películas termosensor a-SiGe:H y a-SiGeB:H y los efectos de temperatura. Finalmente, se presenta la discusión sobre mediciones de ruido en microbolómetros y detectividad.

5.2 Discusión sobre el desarrollo de la metodología de medición de ruido

Sobre los reportes en literatura de las metodologías de medición de ruido encontramos que se limitan a presentar los resultados experimentales y el equipo de medición. En algunos casos, solo se limitan a la presentación de los resultados experimentales. En [2.19], sin embargo, se presenta una metodología de medición de ruido que incluye el equipo de medición y el procesamiento de datos, así como la consideración del ruido intrínseco del equipo de medición. El desarrollo de una metodología debe incluir equipo de medición, reducción de ruido externo, adquisición de datos y su procesamiento. Estos detalles no se

presentan de forma integral en los reportes de literatura. Además de que no existe una forma de presentación estándar de los resultados experimentales. Esto dificulta la comparación de los resultados entre diferentes reportes de literatura. Por tal motivo en este trabajo de tesis se desarrolló una metodología de medición de ruido en el laboratorio del INAOE que consistió en la implementación de diferentes recursos como:

- **Implementación de amplificador LOCK-IN contra FFT:** Los resultados en la sección 4.3 mostraron que las películas termosensor tienen una alta resistencia (10^5 - $10^8 \Omega$). Estos resultados comparados con los mostrados en [2.19] donde estudian un dispositivo de 200Ω señalan que es necesario aumentar la flexibilidad de la metodología de medición en cuanto a resistencia de entrada se refiere de la instalación de medición empleada. Esto se logró sustituyendo al equipo de medición de ruido principal (analizadores FFT) en las metodologías reportadas en la sección 2.6.1 por un amplificador LOCK-IN propuesto en la sección 3.2.4.
- **Reducción de ruido externo.** Como se vio en la sección 2.5 en un equipo de medición existe ruido externo. En los reportes de literatura sobre estudio de ruido en microbolómetros no se presenta la metodología empleada para la reducción del mismo. En este trabajo, sección 4.2, se comprueba que si existe influencia de ruido externo en la instalación de medición. Este ruido externo fue removido de los resultados finales con técnicas de reducción de ruido como tierra, blindaje y el procesamiento de datos.

- **Aumento de ancho de banda (10^3 - 10^5 Hz).** Como se vio en los reportes en la literatura sobre ruido en materiales termosensor, en la sección 2.6.1, el ruido dominante en materiales amorfos es $1/f$ en un amplio ancho de banda ($>10^3$ Hz). Esto hizo necesario que la metodología desarrollada contara con un amplio ancho de banda para observar el comportamiento del ruido claramente. En la sección 3.2.4.1 se propuso sustituir la iluminación de IR modulada por IR constante siempre y cuando no exista una influencia en los resultados finales. En los resultados mostrados en la Figura 4.2 se comprobó que no existe influencia sobre el tipo de configuración de iluminación IR. Esto permitió sustituir la señal de referencia del chopper por una señal de referencia proveniente de un generador de señales. Con esto se aumentó el ancho de banda de las mediciones en dos órdenes (10^5 Hz)
- **Implementación de LOCK-IN con PC y Software LABVIEW.** La adquisición de los datos se mejoró a través de la combinación de estos tres elementos. En la Figura 3.8 se muestra cómo fue posible observar la señal de ruido en tiempo real gracias a esta combinación de elementos. Esto permitió seleccionar el tiempo de inicio de integración. También permitió aumentar este tiempo de integración a un valor óptimo. En literatura no existe reportado este tipo de implementaciones. Se observa que esto permite reducir el rango de error de ruido en un factor de un orden.
- **Reproducibilidad y procesamiento de datos.** En la sección 2.2.5 se muestran los resultados obtenidos para una resistencia de $10M\Omega$ con diferentes metodologías y

diferentes laboratorios. Estos resultados al ser semejantes comprueban la reproducibilidad de los resultados con la metodología desarrollada. Por otra parte, en este trabajo se presenta el completo procedimiento de datos ausente en literatura.

5.3 Discusión sobre ruido en películas termosensor

En la sección 3.4 se mostraron las características de las muestras estudiadas a-Si_xGe_{1-x}:H y a-Si_xGe_yBz:H. El estudio de ruido en este tipo de películas aplicadas a microbolómetro no había sido reportado en la literatura (sección 2.6.2). La referencias más directas para la comparación de resultados es el estudio de ruido en a-Si:H en [2.17, 2.18, 2.27] y el estudio de ruido en a-Si_xGe_{x-1}O_y en [2.28]. La comparación entre los resultados obtenidos y los resultados de referencias más directas en materiales reportados en literatura para películas termosensor se muestra en la tabla 5.1. En los resultados publicados presentados en la sección 2.6.2 y los resultados obtenidos en este trabajo se observa de igual manera un dominio de ruido 1/f en materiales amorfos. De esta manera se comprueba que los materiales a-SiGeB:H mantienen el dominio de ruido 1/f al igual que en a-Si:H.

**Tabla 5.1 Comparación de PNSD S_I(f) para diferentes materiales basados en Si y Ge amorfos
f=1000Hz**

Material	Si Contenido	Ruido S_I(f) (A²/Hz) f=1 KHz	Referencia
a-Si:H	---	3.9x10 ⁻²⁵	[2.17]
a-Si_xGe_{x-1}O_y (x=0.117 y=0.0125)	0.117	1x10 ⁻²⁰	[2.28]

a-Si_xGe_{1-x}:H (x=0.117) proceso 443	0.117	1x10 ⁻²³	Este trabajo
a-Si_xGe_yBz:H (x=0.055 y=0.67 z=0.262) proceso 470	0.055	1.7x10 ⁻²⁰	Este trabajo
a-Si_xGe_yBz:H (x=0.041 y=0.717 z=0.231)	0.041	5.2x10 ⁻¹⁸	Este trabajo

De los resultados mostrados en la tabla 5.1 se puede observar que la muestra con menor ruido es la muestra a-Si:H reportada en [2.17]. Se observa que los niveles de ruido aumentan conforme se modifica el contenido de a-Si:H con otros materiales como B, Ge y O. Se observa también que este es un parámetro importante ya que al disminuir en pequeñas cantidades la composición de Si existe un cambio en los niveles de ruido de hasta 2 ordenes. Otro resultado importante se observa en la muestra No. 443. Esta muestra presenta el nivel de ruido más cercano a la muestra de a-Si:H con una diferencia de 2 ordenes y presenta menor ruido que la muestra a-Si_xGe_{x-1}O_y.

En la tabla 5.2 se muestra los resultados obtenidos en las películas a-SiGeB:H comparados con materiales amorfos, policristalinos y VO_x. Estos materiales también son empleados como materiales termosensor en microbolómetros. Cabe mencionar que la comparación se llevó a cabo para diferentes frecuencias de operación. Estas frecuencias son las reportadas en el trabajo fuente.

Tabla 5.2 PNSD en Voltaje para diferentes materiales reportados en literatura a baja frecuencia [2.15]

Material	Ruido $S_v(f)$ (V^2/Hz)	Frecuencia
a-Ge_xSi_{1-x}O_y	1×10^{-9}	10 Hz
VO_x	10^{-12}	0.1 Hz
a-Si	4×10^{-12}	1 Hz
a-Si (PECVD)	1.1×10^{-6}	10 Hz
a-SiC:H	8×10^{-14}	20 kHz
a-Ge	1×10^{-10}	10 Hz
Poly Si	2.5×10^{-11}	1 Hz
Poly SiGe	10^{-11}	1 Hz
Poly Si	3.6×10^{-13}	10 Hz
a-Si_xGe_{1-x}:H (INAOE)	1.6×10^{-8}	10Hz
a-Si_xGe_yB_z:H (INAOE)	6×10^{-6}	10Hz

En la tabla 5.2 se muestra que los materiales con menor ruido ($<10^{10} V^2/Hz$) son los materiales policristalinos, VO_x, a-Si:H y a-SiC:H. Sin embargo ya se mencionaron las desventajas que los materiales policristalinos tienen en los procesos de fabricación (2.6.2). Por otro lado el material a-SiC:H es un material caracterizado por su alta resistividad. El material VO_x presenta un ruido menor que las muestras de a-Si_xGe_yB_z:H, sin embargo como se discutirá más adelante estas diferencias se compensan por los valores de su responsividad. Además, el material VO_x no es compatible con la tecnología de Si. Otra observación importante de los resultados mostrados en la tabla 5.1 es la diferencia de niveles de ruido entre materiales a-Si reportados en literatura depositados con una técnica diferente como PECVD. Se observa que para un mismo material a-Si:H se tiene seis ordenes de diferencia de ruido para el material depositado por medio de la técnica PECVD.

Para los resultados obtenidos en este trabajo la muestra $a\text{-Si}_x\text{Ge}_{1-x}\text{:H}$ (INAOE) se puede ver que tiene niveles de ruido dentro del mismo orden que $a\text{-Si:H}$ depositada por PECVD. Siendo esta última muestra la de menor ruido comparada con la muestra $a\text{-Si}_x\text{Ge}_y\text{B}_z\text{:H}$ (INAOE).

5.3.1 Discusión de efecto de temperatura en ruido

En literatura el estudio de ruido no ha sido sistemático ni estandarizado. A excepción de un reporte en una muestra $a\text{-Si:H}$ en [2.27] no existe reportes claros sobre el efecto de temperatura en literatura. Los estudios presentados en la sección 2.6.2 no pueden ser comparados entre si ya que los resultados corresponden a diferentes temperaturas, pero también a diferentes muestras con diferentes dopados.

Los resultados obtenidos en este trabajo sobre el efecto de temperatura se muestran en la sección 4.5.1. En las tres muestras estudiadas se observa un aumento de ruido debido a un aumento de temperatura. También se observa que el aumento de temperatura tiende a deformar la curva de $1/f$ excepto en la muestra del proceso 480 (Figura 4.19). Una forma de entender el efecto de temperatura es representar los procesos de ruido como un proceso relacionado con una activación térmica. La energía de activación para cada muestra se presenta en la tabla 5.3. También se presenta la energía de activación térmica para la muestra $a\text{-Si:H}$, único reporte en literatura sobre el proceso de activación térmico de ruido. Por estos motivos el efecto de temperatura sobre el ruido, sobre todo $1/f$, sigue abierto a discusión.

Tabla 5.3 Diferentes reportes sobre energía de activación térmica en ruido para materiales con aplicación en microbolómetros

MUETRA	E_{na} (eV)	Referencia
a-Si:H	0.1	[2.27]
Si_xGe_{1-x}:H 443	0.36	Este trabajo
a-Si_xGe_yB_z:H 479	0.7	Este trabajo
a-Si_xGe_yB_z:H 480	0.16	Este trabajo

En la tabla 5.3 se presenta los resultados obtenidos de las tres muestras estudiadas en este trabajo. Se observa que las películas basadas en SiGe presentan una mayor energía de activación que a-Si:H. Esta energía de activación se traduce en un alto efecto de temperatura en contraste a lo reportado en a-Si:H. Sin embargo también se observa que la muestra No. 480 presenta una energía de activación de ruido similar a la muestra reportada en a-Si:H. Debido al poco reporte sobre este tipo de parámetro dificulta la interpretación del mismo.

5.3.2 Discusión sobre efecto de polarización en ruido

En literatura solo existe un reporte sobre el efecto de polarización en películas termosensor con aplicación en microbolómetros. Para Si_xGe_{x-1}O_y se reporta en [2.15] un aumento de ruido debido a un aumento de polarización. En la tabla 5.4 se comparan los resultados obtenidos en este trabajo de tesis con respecto a la polarización (sección 4.5.2) y los resultados reportados en la sección 2.6.2 para el material Si_xGe_{x-1}O_y.

Tabla 5.4 Configuraciones de polarización y aumento de ruido en muestras de materiales basados en a-SiGe

Muestra	I	$S_I(f) (A^2Hz^{-1})$	$\Delta S_I(f)(A^2Hz^{-1})$
Si _x Ge _{x-1} O _y [2.15]	1μA	5.9x10 ⁻²⁶	2.2x10 ⁻²⁶
	4μA	8.16x10 ⁻²⁶	
a-Si _x Ge _{1-x} :H INAOE	76nA	2x10 ⁻²⁴	1x10 ⁻²⁴
	0	1x10 ⁻²⁴	
a-Si _x Ge _y Bz:H INAOE	76nA	2.6x10 ⁻²²	8.3x10 ⁻²¹
	0	1.77x10 ⁻²²	

En la tabla 5.3 se presenta el único estudio sobre el efecto de polarización sobre el ruido en materiales con aplicación en microbolómetros. Se observa que el efecto de polarización sobre el ruido en Si_xGe_{x-1}O_y se presenta como aumento en el nivel de ruido dentro del mismo orden. Este efecto se observa de la misma manera en los resultados obtenidos para las muestras estudiadas en este trabajo de investigación en SiGe. En cuanto a efectos en la curva 1/f se observa cierta tendencia a la disminución de la pendiente con la presencia de polarización (sección 4.5.2). Sin embargo, los datos siguen siendo insuficientes para formular una conclusión en este aspecto.

5.4 Discusión sobre ruido en microbolómetros

Como se menciona en la sección 2.6.2 el reciente interés en materiales amorfos para implementación en microbolómetros es debido a su alto TCR y la compatibilidad con tecnología silicio.

En los resultados sobre ruido en microbolómetro obtenidos en este trabajo (sección 4.6; SiGe:H, SiGeB:H) y en los resultados reportados en literatura (sección 2.6.3; $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{O}_y$, a-Si:H) se muestra que el ruido dominante en microbolómetros basados en materiales amorfos es el ruido $1/f$, mismo ruido presente en su material termosensor. Estos resultados demuestran que material termosensor determina las características del dispositivo. En cuanto a niveles de ruido los resultados no pueden ser comparados por falta de datos como corriente de polarización. Sin embargo, con el fin de comparar los resultados a nivel dispositivo se calculó la detectividad de los microbolómetros estudiados en este trabajo y se graficó en función de la frecuencia. La comparación entre diferentes valores de detectividad en microbolómetros reportados en literatura se muestra en la tabla 5.5

Tabla 5.5 Comparación de diferentes valores de detectividad reportadas en literatura y resultados obtenidos en este trabajo

Material	Detectividad($\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$)	Referencia
VWO _x	1.1×10^7	[2.30]
$\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{O}_y$	6.7×10^8	[2.15]
a-YbaCuO	9.45×10^7	[2.31]
Pt	1.6×10^8	[2.31]
Ni-Fe	1×10^9	[2.21]
VO _x	1.89×10^8	[2.32]
Poly-SiGe	8.3×10^8	[2.33]
a-Si	2×10^8	[2.34]
a-Ge	3.2×10^8	[2.34]
a-Si _x Ge _{1-x} :H	8×10^7	INAOE
a-Si _x Ge _y B _z :H	3×10^8	INAOE

En la tabla 5.5 se muestra los diferentes valores de detectividad reportados en literatura. Se observa que este rango de valores se encuentra entre 10^7 - 10^9 $\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$. Como se comentó en la sección 5.3 los niveles de ruido de VO_x se compensan con sus bajos valores de responsividad. Por esta razón los microbolómetros VO_x presentan la menor detectividad de los resultados reportados. Microbolómetros basados en materiales amorfos basados en Si y Ge presentan una mayor detectividad por sus altos valores de TCR, que se traduce en una alta responsividad. Estos materiales y los materiales policristalinos presentan una detectividad en el orden de 10^8 $\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$. Los microbolómetros fabricados en el INAOE se encuentran en este rango. Se puede observar que estos microbolómetros presentan una diferencia de detectividad de un orden poniendo en evidencia el efecto de composición de la película termosensor discutido en la sección 5.3. Otro resultado observado es la diferencia que existe entre la detectividad obtenida experimentalmente para las muestras fabricadas en el INAOE y su detectividad límite obtenida a partir del ruido teórico Johnson. Esta diferencia se encuentra dentro de 2 órdenes para el microbolómetro $\text{a-Si}_x\text{Ge}_y\text{B}_z\text{:H}$ no.443 y de tres órdenes para el microbolómetro $\text{a-Si}_x\text{Ge}_{1-x}\text{:H}$ no.480. Esto sumado a los resultados presentados en literatura en la sección 2.6.3 muestra un potencial para mejorar las características de los microbolómetros en detectividad y ruido.

6 CONCLUSIONES

Durante este trabajo de tesis se desarrollo una metodología de medición de ruido en películas termosensor y en microbolómetros basados en SiGe depositados por plasma. Se estudió por primera vez el ruido en este tipo de materiales y se compararon con los resultados reportados en literatura. El estudio incluyó efectos de temperatura y polarización en el ruido, además, del estudio de ruido en películas implementadas en microbolómetros. A continuación se presentan las conclusiones principales de este trabajo de investigación:

a) Sobre el desarrollo de la metodología de mediciones de ruido

- Se ha logrado la reducción de ruido externo a través de técnicas como blindaje, tierra independiente y un extenso análisis de ruido en el laboratorio del INAOE.
- Se comprobó que los resultados de ruido con iluminación constante e iluminación modulada infrarroja son similares, es decir, no existe un cambio en el ruido debido a la configuración de IR sobre la muestra. Esto permitió aumentar el ancho de banda en frecuencia (10^3 a 10^5 Hz) al utilizar iluminación constante en los experimentos realizados. Debido a que la configuración de iluminación modulada limitaba el ancho de banda en frecuencia de los experimentos.
- En este trabajo se ha optimizado la adquisición de datos a través de la combinación del amplificador LOCK-IN con la PC y el software LABVIEW modificado para la

adquisición de los datos. Esto permitió observar la señal de ruido en tiempo real y permitió optimizar el tiempo de integración en la adquisición de los datos reduciendo de esta manera el error de ruido en un orden de magnitud.

- Se ha comprobado la reproducibilidad de los resultados obtenidos con la metodología desarrollada en este trabajo a través de la comparación de resultados obtenidos con una metodología alterna en el laboratorio del Instituto de Investigación en Comunicaciones Ópticas en San Luis Postosí, México con la colaboración del Dr. Francisco J. González.

b) Sobre ruido en películas termosensor a-SiGe:H y a-SiGeB:H

- Por primera vez se ha estudiado el ruido en películas termosensor $\text{Si}_x\text{Ge}_y\text{B}_z\text{:H}$ con aplicación en microbolómetros. En todas las muestras estudiadas se ha observado un dominio de ruido $1/f^\beta$ en un amplio rango de frecuencia (10^0 - 10^5 Hz) con diferentes pendientes ($\beta=0.2$ - 1.6).
- Se ha demostrado que existe un efecto significativo de la composición de las películas a-Si:H en el ruido (al alterar las composición de a-Si:H con Ge y B se observó un aumento de ruido en órdenes de magnitud y cambio en la pendientes β)
- Se ha observado por primera vez el efecto de la temperatura sobre el ruido en materiales $\text{Si}_x\text{Ge}_y\text{B}_z\text{:H}$. Se demostró que este efecto consiste en un aumento de la magnitud de ruido debido a un aumento de temperatura. Este aumento de

temperatura también provocó cambios en la forma de la curva de ruido afectando la pendiente de la región $1/f$. Se mostró también que esta dependencia de ruido con la temperatura pueden ser representados como un proceso relacionado con activación térmica caracterizado por una energía de activación E_{na} (0.1-0.7 eV). Estas energías de activación de ruido fueron iguales y mayores que la reportada en literatura para el material a-Si:H ($E_{na}=0.1$ eV)

- Se ha observado por primera vez el efecto de polarización en muestras $Si_xGe_yB_z:H$. Se demostró que existe un aumento de ruido cuando la muestra se polariza. Estos resultados coinciden con el único estudio reportado sobre el efecto de polarización en ruido en una película a- $Si_xGe_{x-1}O_y$. Se observó, también una tendencia en el cambio de β en la curva de ruido debido a la polarización. La falta de reportes en literatura sobre este efecto dificulta el estudio y análisis de los resultados.

c) Sobre microbolómetros basados en películas termosensor a-SiGeB:H

- Se ha demostrado que en todos los microbolómetros estudiados basados con películas termosensor amorfo existe un dominio de ruido $1/f$. Esto comprueba que el ruido dominante en microbolómetros es el ruido presente en su película termosensor.
- Se ha observado una región de ruido blanco en mediciones de ruido en los microbolómetros estudiados en la región de alta frecuencia con frecuencia de corte en $f= 4.5$ kHz

- En base a datos de responsividad y ruido se ha obtenido la detectividad en los microbolómetros estudiados. Los valores de detectividad obtenidos para los microbolómetros estudiados en esta investigación se encuentran en el rango de $8 \times 10^7 - 3 \times 10^8 \text{ cmHz}^{-1/2} \text{ W}^{-1}$. Estos valores de detectividad se encuentran el rango de los valores reportados en literatura. En este sentido, una de las muestras estudiadas presenta mayor detectividad que el material más empleado en la fabricación de arreglos de microbolómetros (VO_x).

PROYECTO CONACYT

Este trabajo formó parte del proyecto CONACYT con número de contrato D48454F: con el título: “Investigación en aleaciones de semiconductores Silicio-Germanio obtenidas por plasma y nuevas estructuras para microbolómetros no enfriados con implementación de nuevas estructuras” INAOE/CINVESTAV con una duración de 15.09.2006 a 15.09.2009.

CONFERENCIAS

A. Kosarev, M. Moreno, A. Torres and I. Cosme, “Noise in Different Micro-bolometer Configurations with Silicon-Germanium Thermo-sensing Layer”, Material Research Society Symposiums, Spring Meeting, March 24-28, 2008, San Francisco, USA, Abstract book A18.5

A.Kosarev, M.Moreno, A.Torres, S.Rumyantsev, I.Cosme “Study of noise in micro-bolometers with silicon-germanium thermo-sensing layer”, European Material Research Society Symposiums, May 2008, Strasbourg, France, USA, Abstract book E

PUBLICACIONES

A. Kosarev, M. Moreno, A. Torres and I. Cosme, “Noise in Different Micro-bolometer Configurations with Silicon-Germanium Thermo-sensing Layer” Thin Film Silicon Sciences and Technology, Ed. by A.Flewitt, J Hou, S.Miyazak, H. Nathan and Y. Yang (Material Research Society, Symposium Proceedings V.1066, Warrendale, PA,2008) Ref. No. 1066-A18-05)

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Diagrama de elementos básicos en un detector térmico IR: bolómetro, elemento termosensor, elemento de absorción y aislamiento térmico	16
Figura 2.2	Estructura de microbolómetro no enfriado con película sensitiva de SiGe:H [2.13]	19
Figura 2.3	Proceso de fabricación de microbolómetros no enfriados basados en materiales depositados por plasma [2.13]	20
Figura 2.4	Clasificación de ruido según su fuente de generación	27
Figura 2.5	Densidad espectral de ruido para detectores IR con región 1/f, ruido blanco y ruido debido a fuentes externas	31
Figura 2.6	Circuito equivalente para el ruido térmico en un resistor a) Voltaje b) Corriente	34
Figura 2.7	Instalación empleada por Anderson para medición densidad espectral de ruido (Noise spectroscopy) en películas a-Si [2.18]	37
Figura 2.8	Densidad Espectral de Ruido en voltaje para una muestra a-Si _x Ge _{x-1} O _y a) I _b =9μV b) I _b =7μV c) I _b =4μV d) I _b =1μV	45
Figura 2.9	Reducción de PSD en voltaje en a-Si _x Ge _{x-1} O _y debido a proceso de recocido en la muestra para diferentes tiempos [2.28]	46
Figura 2.10	Densidad Espectral de ruido normalizada por el cuadrado de corriente de polarización para microbolómetro a-Si compañía LETI / imagen de microbolómetro a-Si [2.35]	48
Figura 2.11	Densidad espectral de ruido en voltaje para microbolómetros Ge _x Si _{1-x} O _y con estructura de Sándwich I _{bias} =1μA [2.28]	48
Figura 3.1	Curva I(U) de un microbolómetro y cálculo de su coeficiente lineal	61
Figura 3.2	Diagrama a bloques de la instalación para medir curvas I(U)	62
Figura 3.3	Diagrama de conexiones para mediciones de curva I(U)	63
Figura 3.4	Instalación empleada para medición de PSD en microbolómetros con amplificador LOCK-IN en el INAOE (instalación INAOE 1)	64

Figura 3.5	Instalación empleada para la medición de películas termosensibles con variaciones de temperatura en el INAOE (instalación INAOE 2)	65
Figura 3.6	Instalación IICO empleada para la corroboración de resultados de la metodología empleada en el INAOE con analizador de espectro [3.3]	66
Figura 3.7	Sistema de acoplamiento de ruido debido a fuentes externas en el equipo de medición o receptor[3.4]	69
Figura 3.8	Programa LABVIEW modificado para adquisición de datos primarios a) Interface del programa diseñado para la adquisición de datos de la señal b) Monitoreo de señal de ruido en corriente en la frecuencia $f=100\text{Hz}$ muestra 443 a-SiGe:H por combinación de LOCK-IN con PC y programa de adquisición de datos	74
Figura 3.9	Análisis de componentes de ruido debido a fuentes intrínsecas en la instalación de medición de ruido a) Análisis de componentes de ruido para amplificador y preamplificador b) circuito de polarización en corriente directa	77
Figura 3.10	Curvas I(U) de microbolómetro (a-SiGe:H) diferentes temperaturas para cálculo de TCR	81
Figura 3.11	Curva conductividad contra temperatura para el cálculo de TCR en microbolómetros y películas termosensor ($V_{\text{bias}}=1\text{V}$)	81
Figura 3.12	Ejemplo de dependencia experimental de densidad espectral de temperatura (Muestra: STRIPE $\text{Si}_x\text{Ge}_y\text{B}_z\text{:H}$)	86
Figura 3.13	Interface a PC diseñada para el equipo hp3562A para adquisición de datos primarios en la instalación IICO	87
Figura 4.1	Densidad espectral de ruido microbolómetro a-SiGe:H 443 microbolómetro con interferencia de ruido externo	96
Figura 4.2	Medición de ruido en microbolómetro a-SiGe:H a) IR modulada chopper b) IR constante con generador de señales	97
		98

Figura 4.3	Mediciones de ruido para extracción de componentes de ruido por equipo de medición a) muestra+ sistema (muestra conectada) b) sistema (muestra en corto) c) Ruido de la muestra	
Figura 4.4	Componte de ruido extraída para microbolómetro a-SiGe:H sin ruido del sistema de medición	99
Figura 4.5	Densidad Espectral de Ruido $S_I(f)$ para muestra de microbolómetro a-SiGe:H en corriente	100
Figura 4.6	Estructuras implementadas para mediciones de ruido en películas a-SixGe1-x:H y a-SixGeyBz:H a)Estructura STRIPE (sustrato de vidrio) b) microbolómetro con película termosensor a-SiGe:H y a-SiGeB:H	101
Figura 4.7	Curva I(U) para diferentes temperaturas de muestra a-SixGe1-x:H STRIPE y su resistencia correspondiente a la temperatura	102
Figura 4.8	Curva I(U) para diferentes temperaturas de muestra a-SixGeyBz:H STRIPE proceso 479y su resistencia correspondiente a cada temperatura	102
Figura 4.9	Curva I(U) para diferentes temperaturas de muestra a-SixGeyBz:H STRIPE proceso 480 y su resistencia correspondiente a cada temperatura	103
Figura 4.10	Curva I(U) de la muestra a-SixGeyBz:H Proceso 443 microbolómetro a temperatura ambiente y su resistencia correspondiente a la temperatura	104
Figura 4.11	Curva I(U) de la muestra a-SixGeyBz:H Proceso 480 microbolómetro a temperatura ambiente y su resistencia correspondiente a la temperatura	104

Figura 4.12	Densidad espectral de ruido para una resistencia de $1M\Omega$ a) Resultados obtenidos con la instalación INAOE2, Puebla b) Resultados obtenidos en IICO, San Luis Potosí c) ruido teórico Térmico para una resistencia de $1M\Omega$	105
Figura 4.13	Densidad espectral de ruido para una resistencia de $1k\Omega$ a) Resultados obtenidos en IICO, San Luis Potosí c) Ruido teórico térmico para una resistencia de $1k\Omega$	106
Figura 4.14	Densidad espectral de ruido diferentes películas termosensor 300K a) Muestra 443 a-SixGe $_{1-x}$:H (x=0.117) b) Muestra 479 a-SixGeyBz:H (x=0.055 y=0.67 z=0.262) c) Muestra 480 a-SixGeyBz:H (x=0.041 y=0.717 z=0.231)	108
Figura 4.15	PNSD para diferentes temperaturas de muestra No. 443 a-SixGe $_{1-x}$:H (x=0.117)	110
Figura 4.16	PNSD de STRIPE 443 a-SixGe $_{1-x}$:H (x=0.117) en función de la temperatura (f=1kHz)	111
Figura 4.17	PNSD para diferentes temperaturas de STRIPE 479 a-SixGeyBz:H (x=0.055 y=0.67 z=0.262)	112
Figura 4.18	PNSD de STRIPE 479 a-SixGeyBz:H (x=0.055 y=0.67 z=0.262) en función de la temperatura (f=1kHz)	113
Figura 4.19	PNSD para diferentes temperaturas de STRIPE 480 a-SixGeyBz:H (x=0.041 y=0.717 z=0.231)	114
Figura 4.20	PNSD de STRIPE 480 a-SixGeyBz:H (x=0.041 y=0.717 z=0.231) en función de la temperatura (f=1kHz)	114
Figura 4.21	PNSD con y sin polarización de muestra STRIPE 479 a-SixGeyBz:H (x=0.055 y=0.67 z=0.262), Mostrando tendencia de resultados	116
Figura 4.22	PNSD con y sin polarización de 480 a-SixGeyBz:H (x=0.041 y=0.717 z=0.231), tendencia de resultados	116

Figura 4.23	PNSD microbolómetro MICROBOLÓMETRO 443 -Si _x Ge _{1-x} :H (x=0.117) y frecuencias de corte	118
Figura 4.24	Detectividad específica para la muestra MICROBOLÓMETRO 443 - Si _x Ge _{1-x} :H (x=0.117) en función de la frecuencia	119
Figura 4.25	PNSD y ajuste microbolómetro 480 a-Si _x Ge _y B _z :H (x=0.041 y=0.717 z=0.231)y frecuencia de corte	120
Figura 4.26	Ajuste y detectividad para la muestra MICROBOLÓMETRO 480 a-Si _x Ge _y B _z :H (x=0.041 y=0.717 z=0.231)	121