



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA

DESARROLLO DE UN BOLÓMETRO PARA
APLICACIONES EN ASTROFÍSICA

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

ELÉCTRICA - INSTRUMENTACIÓN

P R E S E N T A :

MARIO ALBERTO DÍAZ CRUZ

TUTOR:

Dr. NASER QURESHI

2012



JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. AVENDAÑO ALEJO MAXIMINO
Secretario: DR. SANDOVAL ROMERO GABRIEL EDUARDO
Vocal: DR. QURESHI NASER
1^{er.} Suplente: DR. LARA SÁNCHEZ ALEJANDRO
2^{do.} Suplente: DR. MOUMTADI FATIMA

Lugar donde se realizó la tesis:

CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO



TUTOR DE TESIS :

DR. NASER QURESHI

FIRMA

Dedicado a mi hija, a mi madre, a mi padre y a mis hermanos que los amo

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México

A el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico

Al Dr. Naser Qureshi por su apoyo y guía, pero sobre todo por su contribución para la realización de éste trabajo.

A todas aquellas personas de las cuales no hago mención y no por ello son menos valiosas

A todos, gracias

Mario Alberto Díaz Cruz

Un hombre debe aspirar a los más altos ideales de la vida. Las aspiraciones de un hombre así son: conocimiento de sí mismo, esfuerzo, paciencia y constancia en virtud. Un hombre así es un sabio, ni la ira, ni el gozo, ni el orgullo, ni la falsa modestia, ni la vanidad pueden distraerle de su propósito. Siempre hace sus acciones pensando servir a los dos mundos. El deseo no tiñe sus acciones. Se deleita con las acciones honestas y ama el bien. Tampoco le afectan los honores ni las ofensas. Es tranquilo, fresco e inagitable como un lago en el curso del río Ganges.

Por otro lado, también son fáciles de enumerar las cualidades del ignorante. En lo que a él respecta las escrituras son un libro cerrado. Es vano y orgulloso, y cuando quiere obtener algo, nunca duda en emplear medios deshonestos. Tiene maña para desear lo que no tiene derecho a desear y los poderosos le hacen sentir envidia.

Al oro lo prueba el fuego, a una persona de buena cuna sus modales, a un hombre valiente una situación de pánico, al que tiene autocontrol los tiempos de pobreza, a los amigos y enemigos las épocas de calamidad y peligro.

El sacrificio, el estudio, el ascetismo, los donativos, la verdad, el perdón, la misericordia y la alegría constituyen los ocho diferentes caminos de la justicia. Los cuatro primeros, pueden ser practicados por motivo de orgullo, pero los cuatro últimos sólo existen en aquellos que son grandes de verdad. Haz esto durante el día y te valdrá para pasar la noche feliz, hazlo durante los primeros ocho meses del año y podrás pasar felizmente la estación de las lluvias. Hazlo durante tu juventud y te asegurará una feliz vejez, hazlo durante toda tu vida aquí y te asegurará la felicidad postrera.

Un bosque atravesado por flechas o cortado por hachas puede crecer de nuevo, pero un corazón herido por las palabras malvadas nunca puede recuperarse. Armas como las flechas y los dardos pueden extraerse fácilmente del cuerpo, pero una palabra clavada profundamente en el corazón como una daga, no es posible sacarla.

....El Mahabharata

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Breve reseña	1
1.2. Avances	1
1.3. Contenido	2
1.4. Alcances y objetivos	2
2. Bolómetro	4
2.1. Antecedentes	4
2.1.1. Principio de operación	4
2.1.2. Composición	5
2.1.3. Los inicios	6
2.2. Aplicaciones del bolómetro	8
2.3. Cálculo elemental de la Responsividad o la capacidad de respuesta del bolómetro	9
2.4. Mediciones de la responsividad del bolómetro	10
2.5. Potencia y ruido de radiación de cuerpo negro	13
2.6. Fuentes de ruido en bolómetros	15
3. Desarrollo Experimental	18
3.1. Depósitos de películas delgadas	18
3.1.1. Spin Coating	18
3.1.2. Evaporación térmica en vacío	20
3.2. Fabricación del bolómetro	21
3.3. Proceso de fabricación	22
3.3.1. Depósito de fotorresinas	22
3.3.2. Plantillas en AutoCAD	25
3.3.3. Metalización del sensor	27

4. Implementación	31
4.1. Antecedentes de la instrumentación	31
4.2. Estándares IEEE	31
4.3. Bus GPIB	32
4.3.1. Historia	32
4.3.2. Características físicas	33
4.4. Puente Wheatstone	35
4.5. Operación	37
4.6. Adquisición de datos	42
4.6.1. LabView	42
5. Resultados y análisis	46
6. Conclusiones	56
A. Diagrama a bloques hecho en LabView	58
B. Programa en MatLab	63
C. Especificaciones	64
D. Multímetro HP3458A	70
Bibliografía	72

Índice de figuras

2.1. Fuente de ruido de Johnson	16
3.1. Máquina utilizada para realizar spin coating llamada spin coater o spinner.	19
3.2. Esquema del equipo de depósito mediante calentamiento por resistencia utilizado en el laboratorio.	20
3.3. Esquema general que muestra las secuencias de fabricación del bolómetro.	23
3.4. La imagen A muestra como quedan las películas al termino del proceso antes mencionado. La imagen B muestra una perspectiva en 3D del proceso completo del depósito de las fotorresinas.	24
3.5. La plantilla No.1 es colocada sobre la fotorresina AZ3300. La plantilla No.2 es colocada sobre la fotorresina SU8-2000.	25
3.6. Dimensiones de cada una de las plantillas.	26
3.7. Programa utilizado para crear la plantilla de AutoCAD a PDF.	27
3.8. Equipo de evaporación en vacío utilizado y montado en el laboratorio.	28
3.9. La imagen A muestra la disposición de las películas que conforman el sensor. La imagen B muestra una perspectiva del sensor en 3D.	30
3.10. Imagen del sensor ampliada por medio de un microscopio.	30
4.1. Disposición de pines en el conector GPIB.	33
4.2. Tipos de configuración aceptados por el estándar IEEE 488.	34
4.3. Tarjeta GPIB-PCI para computadoras.	35
4.4. Disposición del puente de Wheatstone.	35

4.5.	Comparación del tamaño entre el sensor colocado sobre un pedazo de aluminio aislado con una mica y una moneda de valor conocido.	37
4.6.	Esquema donde se muestra como se realiza la medición de resistencia con el multímetro HP3458.	38
4.7.	Diagrama eléctrico del circuito completo para sensar cambios de voltaje.	39
4.8.	Diagrama eléctrico de la primera etapa del amplificador diferencial.	40
4.9.	Diagrama eléctrico de la segunda etapa del amplificador. . . .	40
4.10.	Esquema del circuito PCB diseñado con componentes y sin ellos, basado en el diagrama eléctrico para sensar los cambios de voltaje del diagrama de la figura 4.7.	41
4.11.	En la figura se muestra el esquema general de la implementación del sistema.	42
4.12.	Programa LabView para adquisición de datos.	43
4.13.	Diagrama del panel frontal del programa para adquirir datos. .	45
5.1.	Circuito implementado para comprobar el comportamiento resistivo del bolómetro.	46
5.2.	Gráfica I/V que muestra el comportamiento del bolómetro. . .	48
5.3.	Puente Wheatstone y etapas de amplificación analizados en el capítulo 4.	49
5.4.	Respuesta del bolómetro al acercar mano en distintos momentos sin etapa de amplificación.	49
5.5.	Respuesta del bolómetro al acercar mano en distintos momentos en una etapa intermedia de amplificación.	50
5.6.	Respuesta del bolómetro al acercar mano en distintos momentos en la última etapa amplificadora.	51
5.7.	Diagramas para adquirir graficamente el voltaje detectado por el bolómetro.	52
5.8.	En la figura A se muestran las dimensiones de la parte sensitiva, mientras en la figura B en la parte sombreada se muestra la parte sensitiva del bolómetro.	54
5.9.	Características de rendimiento de diferentes bolómetros. . . .	55

Capítulo 1

Introducción

1.1. Breve reseña

Los detectores bolométricos para ondas en el infrarrojo y milimétricas tienen una amplia variedad de aplicaciones para laboratorio y mediciones astronómicas. Diferentes aplicaciones tienen muy diferentes requerimientos para sensibilidad, velocidad, saturación, potencia, etc. A fin de lograr una alta sensibilidad, los bolómetros son operados por debajo de la temperatura de Helio[24]. Bolómetros enfriados con Helio fueron introducidos por Drew and Sievers para espectroscopía de laboratorio en el infrarrojo lejano y ahora son frecuentes en aplicaciones astronómicas. Los bolómetros son cada vez más desarrollados para su operación a temperaturas de $0.1^{\circ}K$ y por debajo, utilizando desmagnetización o refrigerantes.

1.2. Avances

A pesar del éxito logrado, sigue habiendo problemas para los desarrolladores de detectores bolométricos. Arreglos de bolómetros son cada vez más requeridos para aplicaciones astronómicas, pero no existe una tecnología monolítica de gran formato, adecuada para arreglos de dos dimensiones, como el conjunto de detectores de fotones utilizados en longitudes de onda infrarroja y visible. Algunas aplicaciones fueron beneficiadas desde que se realizaron grandes reducciones en el volumen del material que es térmicamente activo. Diversas aplicaciones de bolómetros con superconductores se están probando actualmente para cumplir con estos objetivos.

El descubrimiento de los superconductores de óxido ha dado lugar a la posibilidad de utilizar detectores de radiación bolométrica, los cuales usan nitrógeno líquido¹ como refrigerante o enfriador. Los bolómetros pertenecen a la categoría de funcionamiento de los transductores de la ley del cuadrado, ésto es, dan una tensión de salida o de corriente, la cual es proporcional al cuadrado de la amplitud de la señal, que es la potencia incidente. Esta categoría incluye diodos semiconductores y superconductores, fotoconductores extrínsecos e intrínsecos y también diodos fotovoltaicos. Todos pueden ser utilizados como detectores directos o como mezcladores para baja conversión heterodina coherente. Los detectores térmicos tales como los bolómetros son escogidos como detectores para longitudes de onda del lejano infrarrojo $\gtrsim 200\mu m$. [1]

1.3. Contenido

Este trabajo consiste de cinco capítulos, en el primer capítulo se da una breve reseña de lo que es un detector bolométrico, así como los avances que ha tenido; y por último el alcance que se busca en este trabajo y que sirve como contribución tecnológica. En el capítulo dos se trata de una visión general del principio de operación de los bolómetros, así como una breve historia de su desarrollo a través de los años y la aportación de diversas personas o investigadores dedicados a mejorar el desempeño de estos medidores, así como la composición y los materiales utilizados. El capítulo tres muestra el diseño propuesto del sensor, las consideraciones hechas y su implementación, los materiales utilizados, así como las mejoras realizadas en este proceso. En el capítulo cuatro se lleva a cabo el análisis de los resultados obtenidos y su interpretación gráfica. En el capítulo final se dan las conclusiones y algunas posibles aplicaciones futuras.

1.4. Alcances y objetivos

El Sol emite radiación electromagnética en casi todo el espectro electromagnético, esto quiere decir que se puede observar en telescopios y detectores

¹El nitrógeno líquido es nitrógeno puro en estado líquido a una temperatura igual o menor a su temperatura de ebullición, que es de -195.8 °C a una presión de una atmósfera

de emisiones de: Ondas de radio, radiación infrarroja, luz blanca, ultravioleta, Rayos X y Rayos gama(γ). Todas estas radiaciones se pueden observar durante el día, aunque algunas de ellas, sobre todo las más energéticas no se pueden observar desde la Tierra sino fuera de la atmósfera terrestre. En el instituto de Geofísica de la UNAM se han llevado a cabo estudios del sol desde hace varios años. En particular se están desarrollando telescopios que observan al Sol y su atmósfera en ondas de radio.²

Por lo tanto el alcance que tiene éste trabajo es, desarrollar tecnología de sencilla fabricación dedicada al estudio de la estrella más cercana a la Tierra, o sea, el Sol. Por lo que, el objetivo primordial es diseñar y construir un bolómetro sin enfriamiento, que permita llevar a cabo los estudios y observaciones del llamado, astro rey.

²Dr. Alejandro Lara Sánchez, Doctor en Ciencias (Física Espacial). Investigador Titular “B” de T.C. a partir de marzo del 2005 en el Instituto de Geofísica UNAM. Posgrado en Ciencias de la Tierra. UACPyP del CCH. Posgrado en Ciencias de la Tierra.

Capítulo 2

Bolómetro

2.1. Antecedentes

2.1.1. Principio de operación

La radiación infrarroja fue descubierta por W. Herschel usando un termómetro de vidrio-mercurio para detectar luz del sol que había sido dispersada por un prisma[25]. Los detectores térmicos han jugado un papel importante en la exploración y explotación de la radiación infrarroja. Todos los detectores de radiación térmica incluyen un elemento absorbente con capacidad calorífica C , él cual convierte la radiación electromagnética en calor, y él cual está unido a un disipador de calor a temperatura T_S a través de la conductancia térmica G .

Después de que la potencia de radiación incidente P está incidiendo en el detector, la temperatura T_B de este elemento absorbedor inicialmente se incrementa con un intervalo de tiempo de $dT_B/dt = P/C$ acercándose al valor límite

$$\int_{T_S}^{T_B} dT_B = \int_{t_0}^{\tau} \frac{P}{C} dt \Rightarrow T_B - T_S = \frac{P}{C}(\tau - t_0),$$

con $t_0 \rightarrow 0$

$$\Rightarrow T_B - T_S = \frac{P}{C}(\tau),$$

con la constante térmica $\tau = C/G$ entonces,

$$T_B = T_S + P/G.$$

Cuando la radiación ya no incide en el absorbedor, éste se relaja hasta T_S con la misma constante de tiempo τ . Los detectores térmicos frecuentemente son usados para dar una respuesta periódica a una señal que es modulada a una frecuencia $\omega \approx 1/\tau$.

Los detectores térmicos, difieren en los medios utilizados para leer las variaciones de temperatura en el absorbedor de radiación. Los siguientes ejemplos de uso frecuente ilustran la gama de posibilidades: En el termofil de radiación, el efecto termoeléctrico es usado como lector de temperatura. La impedancia de salida de éste termómetro es incrementado por el uso de muchos termocoples en serie, por el calor en la uniones sobre el absorbedor y el frío en la uniones sobre el disipador de calor. En el detector neumático Golay, el calor absorbido en la película de metal delgada es transferido a un pequeño volumen de gas. El resultado es un incremento en la presión cambiando el ángulo de un espejo en un amplificador óptico. En el detector piroeléctrico, el calor absorbido incrementa la temperatura de un material el cual su constante dieléctrica es una función sensible a la temperatura. Este material piroeléctrico está sometido a una diferencia de potencial alimentada por un capacitor el cual actúa como una fuente de corriente proporcional al rango de cambio de la constante dieléctrica. Ambos detectores el Golay y el piroeléctrico han sido ampliamente usados en espectrómetros infrarrojos de laboratorio desde 1960.

El Bolómetro, el cual fue desarrollado por Langley, es un detector térmico infrarrojo que emplea un termómetro de resistencia eléctrica para medir la temperatura del absorbedor de radiación. La popularidad de los detectores infrarrojos bolométricos, surgen, en parte, del hecho de que la temperatura de la resistividad de los materiales puede ser muy grande y ha sido ampliamente estudiado. Consecuentemente, ha sido relativamente fácil seleccionar materiales para optimizar bolómetros para diversas aplicaciones.

2.1.2. Composición

Una composición típica de un bolómetro consta de un absorbedor de radiación el cual tiene que tener un tamaño apropiado para interceptar la señal a ser medida, una gran absorción sobre el rango de frecuencias de interés y una baja capacidad calorífica. El sustrato de soporte debe tener una baja capacidad calorífica y una gran conductividad térmica, para que se mantenga

ga isotérmico durante la operación del bolómetro. Esto tiene baja capacidad calorífica, bajo ruido eléctrico y una adecuada dependencia de su resistencia eléctrica. La unión térmica, que conecta térmicamente las partes activas del bolómetro a el disipador de calor tiene una baja capacidad calorífica y una apropiada conductancia térmica para la aplicación que se requiere. El soporte mecánico para la porción activa térmica del bolómetro presenta baja capacidad calorífica, baja conductancia térmica y tiene que ser bastante duro a las frecuencias de resonancia mecánica que son superiores a las frecuencias de operación del bolómetro. Los bolómetros combinan varios elementos para diversas opciones. En algunos bolómetros, un elemento simple es usado para varias funciones.

2.1.3. Los inicios

A pesar de su larga historia, los detectores bolométricos fueron poco usados en los años 50's. Los detectores térmicos a temperatura ambiente, tales como el Golay neumático y el térmico tienen ventajas de sensibilidad. Las ventajas de operación de detectores térmicos en general y bolómetros en particular eran conocidas a bajas temperaturas.[26]

Los primeros experimentos fueron hechos por *Andrews*, usando la dependencia de la temperatura de la resistencia de un metal en la transición al estado de superconducción como el termómetro. Sin embargo, las técnicas especializadas necesarias para tales bolómetros generalmente no fueron puestas a disposición de los usuarios de detectores de radiación.

La historia moderna de los bolómetros infrarrojos comienza con la introducción del bolómetro de resistencia por *Boyle y Rogers*. En su tiempo fueron ampliamente usados por la baja temperatura como termómetros a temperaturas de helio líquido. Este dispositivo tiene un número de ventajas sobre el Golay y es que éste fue relativamente barato y fácil fabricar. Esto beneficia a la gran reducción en capacidad calorífica que tienen los sólidos a temperaturas bajas. Eso fue muy conveniente para usarse en experimentos para medir la propiedades infrarrojas de materiales a bajas temperaturas, desde que el detector pudo ser puesto dentro de un criostato para muestras bajo estudio. La tecnología requerida estuvo inmediatamente disponible para la física de estado sólido trabajando a temperaturas del helio líquido.

Desde el punto de vista moderno, el bolómetro de resistencia de carbón tuvo dos grandes inconvenientes, la capacidad calorífica del material no fue tan baja como la de los materiales cristalinos empleados mas tarde. Más importante, el material del resistor tiene excesivo ruido a bajas frecuencias, lo cual limita la sensibilidad del bolómetro. Poco después de este desarrollo, se comenzó a trabajar en el detector piroeléctrico por *Cooper y Hadni*, el cual a llegado a ser el más usado a temperatura ambiente para detectores térmicos infrarrojos. El siguiente paso importante en el desarrollo de bolómetros fue la invención de termómetros a baja temperatura, basados en fuertes dopajes y compensados de germanio. Aunque esta tecnología no fue tan disponible como la de resistencia de carbón, las ventajas del material son bien conocidas, tales como, propiedades reproducibles, alta estabilidad y bajo nivel de ruido inducido. El artículo de *Low*[27] es un punto de referencia, muestra como el termómetro de resistencia de germanio se puede usar para realizar un bolómetro superior. Este desarrollo fue rápidamente aplicado para astronomía a longitudes de onda media y grande también como para el laboratorio de espectroscopía infrarroja.

Un gran paso para el desarrollo de bolómetros modernos llegó a ser posible con las mejoras en el elemento de absorción de la radiación. Los bolómetros superconductores, el primer bolómetro superconductor de *Andrews*[24], utilizó una lámina de metal ennegrecido unido al termómetro de Tantalio. El original bolómetro de *Low* fue recubierto con pintura negra. *Coron* [22], usó una lámina de metal como substrato para un absorbedor pintado de negro. Un pequeño termómetro dopado de germanio se añadió para la lectura de la temperatura. Una mejora fue hecha a esta estructura por *Clarke*[28], quien sustituyó a un fino substrato dieléctrico de baja capacidad calorífica por una lámina de metal y utilizó una película de bismuto como absorbedor de baja capacidad calorífica en lugar de la pintura de color negro. Esta estructura fue rápidamente adoptada para uso de termómetros con semiconductores. Variaciones de ésto están en uso en una variedad de longitudes de onda donde relativamente muchos bolómetros son requeridos.

El siguiente paso fue la introducción de implantación ión para dopar silicio apropiadamente para termómetros. *Downey*, usó micromecanismos de silicio para producir bolómetros con un termómetro de silicio implantado en un sustrato de silicio con brazos de soporte de silicio. Este bolómetro tuvo muy

poco ruido inherente de baja frecuencia. Bolómetros basados en este diseño son usados actualmente para detectores infrarrojos y para calorímetros de rayos X[1].

2.2. Aplicaciones del bolómetro

Los detectores usados en el rango de ondas submilimétricas a infrarrojas pueden ser enfriados o no. Éste proyecto es en base a un bolómetro sin enfriamiento. En recientes años los bolómetros sin enfriamiento se usan ampliamente. Ellos proveen buena sensibilidad a temperatura ambiente trayendo ventajas como lo son: el bajo costo, tamaño pequeño y consumo de energía mínimo.

Los detectores que operan a estas altas frecuencias tienen un gran número de aplicaciones. Entre ellos se puede mencionar la imagen pasiva hecha a través de nubes, niebla, lluvia, humo e incluso a través de paredes, dispositivos que permiten la visión nocturna, detección de minas terrestres, detección de incendios, dispositivos de seguridad, cámaras para medicina y aplicaciones industriales; así como sensores para minas en los campos de batalla para aplicaciones militares. Otra aplicación de termosensado ha sido desarrollada para la agricultura, la tierra y los cultivos. Hay un importante potencial de aplicaciones en telecomunicaciones desde la tierra en el rango donde hay ventanas atmosféricas para transmisión y por encima de la tropósfera de la tierra para comunicaciones entre plataformas (globos aerostáticos, aeroplanos y dispositivos estacionarios) ó entre satélites.

Este rango del espectro electromagnético es también de gran interés para la ciencia espacial, porque éste trae información espectral esencial de la radiación de fondo cósmica, en galaxias distantes formadas recientemente y en las fases iniciales de formación estelar en nubes de gas en nuestra propia galaxia. El diagnóstico de objetos astrofísicos en el rango submilimétrico-IR, con énfasis en el Sol, no sólo en el continuo sino también en las líneas espectrales, se encuentran al frente de la investigación actual. En este rango de longitudes de onda es posible distinguir emisiones térmicas a partir de las emisiones no térmicas causadas por partículas relativistas. Estas mediciones pueden ser hechas desde la tierra o desde plataformas espaciales en globos y satélites[2].

2.3. Cálculo elemental de la Responsividad o la capacidad de respuesta del bolómetro

Un bolómetro absorbe una potencia radiante de entrada $P_0 + P_1 e^{i\omega_s t}$ [W], la cual usualmente tiene una parte constante P_0 y una parte variable con el tiempo P_1 a frecuencia ω_s . Consecuentemente la temperatura del bolómetro varía como $T_B = T_0 + T_1 e^{i\omega_s t}$ [K]. El bolómetro contiene una resistencia alimentada con una corriente constante I , esto produce un calor eléctrico variable que puede ser escrito como $I^2 R(T) = I^2 [R(T_0) + (dR/dT) T_1 e^{i\omega_s t}]$ [W]. El bolómetro pierde potencia $\bar{G}(T_B - T_s)$ que se va al disipador de calor a través de la conductancia térmica \bar{G} .

Ya que la conductividad térmica $\kappa(T)$ depende de la rapidez de cambio T en algunos materiales de utilidad, ésto es a veces útil para definir una conductividad térmica promedio para un cable de longitud l y área de sección transversal A ,

$$\bar{G} = \frac{A/l}{T_s - T_0} \int_{T_0}^{T_s} \kappa(T) dT \quad [W/K], \quad (2.1)$$

igualando la potencia de entrada a la potencia de salida más la potencia almacenada en la capacidad calorífica C da lo siguiente,

$$\begin{aligned} P_0 + P_1 e^{i\omega_s t} + I^2 R(T_0) + I^2 (dR/dT) T_1 e^{i\omega_s t} = \\ = \bar{G}(T_0 - T_s) + G T_1 e^{i\omega_s t} + i\omega_s C T_1 e^{i\omega_s t}, \end{aligned} \quad (2.2)$$

donde G es la conductancia térmica dinámica dP/dT a temperatura T_0 . Igualando los términos independientes del tiempo da el calor en estado estacionario, la ecuación que determina el flujo de temperatura T_0 promedio de operación de los bolómetros

$$P_0 + I^2 R(T_0) = \bar{G}(T_0 - T_s), \quad (2.3)$$

igualando los términos que varían con el tiempo tenemos que,

$$P_1/T_1 = G + i\omega_s C - I^2 (dR/dT), \quad (2.4)$$

Se define la responsividad de un bolómetro como el cambio en la caída de voltaje por Watt de la potencia de la señal absorbida

$$S_A = V_1/P_1 = I(dR/dT)(T_1/P_1). \quad (2.5)$$

De la ecuación 2.4 esto se puede escribir como,

$$S_A = \frac{I(dR/dT)}{[G - I^2(dR/dT) + i\omega_s C]} \quad [V/W]. \quad (2.6)$$

La capacidad de respuesta de un bolómetro está influenciada por la retroalimentación térmica. El incremento de la temperatura $T_1 = P_1/G$ esperado de un incremento de la potencia radiante P_1 es modificado por el hecho que cambia R , y por lo tanto, cambia el calor debido al voltaje de alimentación. Este efecto puede ser expresado como una conductancia térmica efectiva

$$G_e = G - I^2(dR/dT).$$

Esto es útil para introducir un parámetro $\alpha = R^{-1}(dR/dT) [K^{-1}]$, evaluado a $T = T_0$, para caracterizar el termómetro. Se puede escribir

$$G_e = G - I^2 R \alpha.$$

Para bolómetros semiconductores que tienen una constante α negativa, $G_e > G$. Para bolómetros superconductores que tienen una constante α positiva, $G_e < G$. Esta retroalimentación térmica también influye en el tiempo de respuesta del bolómetro. La constante de tiempo térmica se mide $\tau_e = C/G_e$. Usando estas definiciones, la responsividad de la potencia absorbida se puede escribir como,

$$S_A = IR\alpha / (G_e(1 + i\omega_s \tau_e)) \quad [V/W], \quad (2.7)$$

la cual tiene una forma Lorentziana.[1]

2.4. Mediciones de la responsividad del bolómetro

Una forma directa de medir la capacidad de respuesta de la potencia absorbida S_A es colocar un calentador en el bolómetro y por lo tanto convertirlo en un calorímetro de ac. En la práctica esto es deseable solo si el calentador y sus terminales no degradan las características del bolómetro. Esta técnica ha sido usada en bolómetros superconductores con un calentador independiente, en bolómetros compuestos con terminales de metal donde la película absorbidora de metal fue usada como calentador, y también para bolómetros

de Silicio monolítico para rayos X los cuales tienen un calentador por separado. Una técnica más utilizada generalmente, pero menos precisa es, medir la respuesta del bolómetro para cambios en la potencia eléctrica disipada en el termómetro. La capacidad de respuesta obtenida por este medio, hace uso de un modelo simple de respuesta asumiendo linealidad no térmica, que es también llamada capacidad de respuesta eléctrica S_E .

Primero, la curva de dc I-V del bolómetro es medida para un rango de corrientes y voltajes alrededor de un punto de operación anticipado. Por lo tanto ésta curva I-V es no lineal para el calentamiento por la corriente de alimentación. Para un bolómetro con $\alpha < 0$, $V(I)$ es lineal con una pendiente R , cerca de $V = 0$, tiene una amplitud máxima y luego comienza a decaer lentamente para grandes valores de I . Para un bolómetro con $\alpha > 0$, la curva $I(V)$ muestra una dependencia similar en V . El segundo paso es medir $R = V/I$ y $Z = dV/dI$ de la curva I-V para un rango de puntos de alimentación y registrar la capacidad de respuesta eléctrica de a cada punto de la expresión de Jones:[1]

$$S_E = (Z - R)/2IR \quad [V/W]. \quad (2.8)$$

Los valores exactos de Z en la práctica son obtenidos mejor usando un sumador analógico para combinar una señal pequeña de voltaje alterno a baja frecuencia con un voltaje constante, a través, de la combinación en serie de la resistencia de carga y el bolómetro, y la lectura de la tensión de bolómetro a través de un amplificador de corriente y un amplificador de ac lock-in. Se debe tener cuidado de obtener un valor de capacidad de respuesta cerca del origen, porque tanto el numerador como el denominador de la ecuación 2.8 se acercan a cero. Ésto es deseable para medir $V(I)$ para I positiva o negativa. Desviaciones de inversión simétrica son un indicador de contactos no ohmicos los cuales deben ser eliminados. El uso de simetría para identificar el origen cancela los efectos de fuentes térmicas las cuales son significativas para bolómetros operando a baja temperatura.

La capacidad de respuesta de un bolómetro puede depender de la potencia de fondo constante infrarroja de carga P_0 , a través de un cambio en la temperatura de funcionamiento, que es determinada por la ecuación 2.4. Porque G generalmente se incrementa con la temperatura y para termómetros semiconductores α decae, la capacidad de respuesta baja rápidamente tanto como el bolómetro es calentado.

A través de la derivación de la ecuación 2.8 no asume la potencia de fondo infrarroja, ésto es un método válido para obtener S_E para un determinado fondo si la curva I-V es determinada con la misma potencia de fondo. Otro tipo de saturación ocurre cuando la temperatura de excursión T_1 de la potencia de la señal modulada P_1 es suficientemente grande que la aproximación diferencial no es válida. En algunas mediciones, los bolómetros son diseñados para saturar señales grandes y la no linealidad es removida por calibración. En mediciones tales como la espectroscopía de transformada de Fourier, la linealidad es de especial importancia. La respuesta de un bolómetro dado puede ser linealizado al incrementar la alimentación hasta $I^2R > P_1$. Sin embargo, esto no será generalmente una óptima aplicación.

La capacidad de respuesta S de un bolómetro es el producto de la absorción η por la capacidad de respuesta de la potencia absorbida $S = \eta S_A$. Mediciones directas de S usando una fuente de calibración son posibles en principio. Sin embargo, a menudo es muy difícil caracterizar directamente la eficiencia de los elementos ópticos que se utilizan para la radiación infrarroja en un bolómetro, es más usual hacer mediciones directas de la capacidad de respuesta a la entrada del criostato u otro lugar conveniente en el sistema óptico. Una comparación de la medición directamente de la capacidad de respuesta del sistema con el valor de S_A obtenida como se discutió anteriormente, es entonces usada para deducir información acerca de la eficiencia de los filtros, las estructuras de acoplamiento y el absorbedor.

Finalmente, el conocimiento de la capacidad calorífica C puede ser obtenida a partir de mediciones de la constante de tiempo τ_e . Un valor aproximado de τ_e puede ser obtenido observando el voltaje del bolómetro en un osciloscopio después de un cambio en I . También es posible obtener $S_E(\omega)$ de la ecuación 2.8 midiendo Z sobre un rango de frecuencias. Dependiendo del equipo disponible, a menudo ésto es más conveniente para medir la frecuencia dependiente de S con una fuente de luz no calibrada y un chopper de velocidad variable.

2.5. Potencia y ruido de radiación de cuerpo negro

Dado que los bolómetros son usualmente usados para detectar radiación térmica y son fuertemente influenciados por ruido térmico, es útil resumir algunos aspectos de la radiación térmica que no se presentan en forma conveniente en los libros de texto elementales. Lo habitual es trabajar con un sistema óptico que limita el haz a un área A y un ángulo sólido Ω , y que tenga filtros con transmitancia $\tau(\nu)$, donde ν es la frecuencia óptica. La potencia transmitida a través de tal sistema desde una fuente de cuerpo negro con una brillantez espectral de Planck $B_\nu(\nu, T)$ puede ser escrita como,

$$P = \int_0^\infty P_\nu d\nu = \int_0^\infty A\Omega\tau(\nu)B(\nu, T)d\nu \quad [W]. \quad (2.9)$$

El rendimiento de $A\Omega[sr \cdot m^2]$ es invariante en un sistema óptico, como puede probarse a partir de la óptica geométrica o, en general, considerando de manera aislada a dos radiadores negros que se ven entre sí a través del sistema óptico. La segunda ley de la termodinámica requiere que la temperatura de los dos radiadores sea la misma en equilibrio, y siguen la ecuación 2.9 solo si $A\Omega$ en ambos extremos del sistema óptico es la misma.

Cuando la difracción es importante, el rendimiento depende de la frecuencia o longitud de onda λ . Por el teorema de antena de un solo modo espacial, o haz de difracción limitada, el rendimiento es exactamente $A\Omega = \lambda^2$. Este principio es fácilmente ilustrado usando la teoría de difracción de Fraunhofer registrando la divergencia del ángulo sólido Ω de una onda plana después de atravesar una apertura de área circular A . Cuando el ángulo sólido o área no es uniformemente iluminado, se puede usar un ángulo sólido equivalente para resultados exactos. Para una apertura circular uniformemente iluminada, 84% de la energía de la fuente puntual aparece en un rendimiento $A\Omega = 3.7\lambda^2$. Luz espacialmente incoherente puede ser tratada como compuesta de muchos modos. El número de modos para una polarización es $N = A\Omega/\lambda^2$. [29] Un resultado estándar de física térmica para una fuente de cuerpo negro, la potencia por modo es,

$$P_\nu d\nu = h\nu d\nu [\exp(h\nu/kT) - 1]^{-1} \quad [W], \quad (2.10)$$

que se aproxima a $kT d\nu$ para $h\nu \ll kT$. Ver *Kittel and Kroemer* [30]. La potencia $P(\nu, T) d\nu$ en una fuente multimodo es el número de modo por la

potencia por modo. Ésto da el resultado de Planck para la brillantez de un cuerpo negro,

$$B(\nu, T)d\nu = \frac{2h\nu^3 d\nu}{C^2[\exp(h\nu/kT) - 1]} \quad [W/m^2 \cdot sr]. \quad (2.11)$$

Una derivación de la ley de Planck, es identificar implícitamente el argumento del equilibrio térmico del número de fotones $n = [\exp(h\nu/kT) - 1]^{-1}$ por modo de una onda en una caja a temperatura T con el número de fotones por superficie por Hz en un ancho de banda infrarrojo en un modo espacial propagándose en espacio libre. Una vez realizada esta identificación, la varianza promedio en el número de fotones por modo dentro de la caja $\langle(\Delta n)^2\rangle = n + n^2$ para registrar las fluctuaciones de los fotones arribados cada segundo del rayo en espacio libre. Notar que cuando $h\nu/kT \gg 1$, se tiene que $n \ll 1$ y las fluctuaciones obedecen la estadística de Poisson, $\langle(\Delta n)^2\rangle = n$. En este caso el fotón arriva de manera aleatoria. Cuando hay muchos fotones por modo $n \gg 1$ los fotones arriban en grupos y $\langle(\Delta n)^2\rangle = n^2$.

Un bolómetro detecta potencia, por lo que nos interesa la fluctuación de la energía cuadrada media, la cual puede ser escrita como $h^2\nu^2\langle(\Delta n)^2\rangle$. Si se hace la simple suposición de que las fluctuaciones en energía en diferentes modos y en diferentes anchos de banda infrarrojo están sin correlacionar, entonces sus fluctuaciones cuadradas medias se suman. Por lo que la fluctuación de energía cuadrada media arribando en un segundo es $\int h^2\nu^2 2N(n + n^2)d\nu$. Ya que el ancho de banda asociado con un promedio no ponderado de $1s$ es $1/2Hz$, la potencia de ruido cuadrado medio por unidad de ancho de banda B después de la detección, se refiere a la potencia absorbida en la entrada,

$$\frac{P_N^2}{B} = 2 \int P_\nu h\nu d\nu + \int P_\nu^2 c^2 d\nu / A\Omega\nu^2 \quad [W^2/Hz], \quad (2.12)$$

donde está escrita la potencia espectral absorbida en el bolómetro como $2Nnh\nu = P_\nu$ y $N = A\Omega\nu^2/c^2$. Se debe notar que la constante de Planck h no aparece en el segundo término, lo cual es una propiedad de las ondas clásicas.

Un uso frecuente de la figura de mérito es la potencia equivalente de ruido (NEP), escrita así por sus siglas en inglés (Noise Equivalent Power), el cual es definido como la potencia de la señal requerida para obtener una señal igual al ruido en un ancho de banda de $1Hz$ ($P_S = P_N$). Notar que

NEP es una medida de la S/N , no es ruido. Si se refiere el NEP al interior del detector, entonces la potencia de la señal absorbida del detector que es requerida es $NEP_A = P_N B^{-1/2}$ esto de la ecuación 2.12. Sin embargo para referir el NEP a la entrada del detector. La señal de potencia incidente en el detector requerido para producir $S/N = 1$ es entonces

$$(NEP)^2 = \frac{2}{\eta^2} \int P_\nu h\nu d\nu + \frac{1}{q\eta^2} \int P_\nu^2 c^2 d\nu / A\Omega\nu^2 \quad [W^2/Hz]. \quad (2.13)$$

2.6. Fuentes de ruido en bolómetros

El ruido de Nyquist en una resistencia en equilibrio térmico a temperatura T puede ser calculado como un caso especial de los argumentos anteriores. La potencia radiada de cuerpo negro por un resistor encontrado en una línea de transmisión la cual transmite un solo modo con una simple polarización está dado por la ecuación 2.10, la cual es la expresión de Planck 2.11 con el número de modos $2N$ igual a la unidad. Para frecuencias, $h\nu/kT \ll 1$, y para un ancho de banda $d\nu = B$, la densidad de potencia espectral es $P_\nu d\nu = kTB$.

Para propósitos de cálculo es conveniente reemplazar este ruido de resistencia por un circuito equivalente consistente de una resistencia ideal libre de ruido R en serie con un generador de voltaje de ruido Johnson con fluctuaciones de voltaje rms,

$$V_N = (4kTRB)^{1/2} \quad [V]. \quad (2.14)$$

Esta representación puede ser justificada acoplando la resistencia ideal con su generador de voltaje de ruido a un par de cables de una línea de transmisión con impedancia característica $Z = R$, la cual al final de la línea se iguala a una resistencia $R_t = R$ que se asume a un $T = 0$, tal como se muestra en la figura 2.1. La potencia disipada en R_t por la corriente de ruido I_N manejada en el lazo desde el generador de Johnson es,

$$I_N^2 R_t = V_N^2 R / (R + R_t)^2 = kTB.$$

Éste es el resultado esperado para un cuerpo negro a temperatura T radiando que irradia a un cuerpo negro a $T = 0$ a través de un limitador que transmite un solo modo. La capacidad de respuesta S puede ser usada para referirse al ruido de Johnson en la resistencia R a la entrada del detector. Expresado

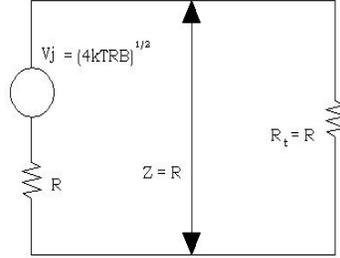


Figura 2.1: Fuente de ruido de Johnson

como una contribución de NEP, se tiene,

$$(NEP)^2 = \frac{4kTR}{|S|^2} [W^2/Hz], \quad (2.15)$$

donde el módulo cuadrado de S es usado porque la fase no es importante. En principio, el ruido de Johnson en el resistor de carga puede también ser considerado. Esto usualmente es despreciado para el uso de una gran carga resistiva $R_L \gg R$ enfriada a una temperatura T_S por un disipador.

Fluctuaciones en la energía de un bolómetro produce un ruido que es variable llamado energía de fluctuación de ruido, fluctuación de ruido térmico, ruido G , o ruido de fonón. El circuito térmico de un bolómetro consiste de un sistema con capacidad calorífica C conectada a un disipador por medio de una conductancia térmica G a una temperatura T_S . El equilibrio térmico de las fluctuaciones de la energía cuadrada media en este sistema son calculadas en general con textos de física térmica, siendo $\langle(\Delta u)^2\rangle = kT_S^2 C$. En un bolómetro, existe una resistencia eléctrica de termómetro que lee una fluctuación de temperatura $\Delta T = \Delta u/C$. La fluctuación de temperatura cuadrada media puede ser escrita como una integral sobre una intensidad espectral de temperatura $S_T(\nu)$ tal que,

$$\langle(\Delta T)^2\rangle = kT^2/C = \int_0^\infty S_T(\omega)d\omega/2\pi [K^2]. \quad (2.16)$$

Físicamente, este ruido se debe al paso de portadores de energía cuantizada (fonones o electrones o incluso fotones) a través de la conductividad térmica, que impulsan al bolómetro con las fluctuaciones de ruido blanco con

intensidad espectral de potencia S_P . Con retroalimentación no térmica para relacionar S_P a la intensidad espectral de temperatura $S_T = S_P/(G^2 + \omega^2 C^2)$. De la ecuación 2.16 $S_P = 2kT^2G/\pi$ [W^2/rad] o

$$(NEP)^2 = 4kT^2G \quad [W^2/Hz]. \quad (2.17)$$

Al igual que el ruido fotónico, el NEP, que se refiere a la entrada de bolómetro, es independiente de la medición de la frecuencia. En ambos casos, por supuesto, el ruido de voltaje a la salida del bolómetro cae $\omega\tau > 1$ debido a la dependencia de la frecuencia de la capacidad de respuesta.

El exceso de ruido de baja frecuencia, a menudo llamado ruido $1/f$ ha sido un problema en bolómetros. Con mejoras en los materiales y los contactos eléctricos, fuentes eléctricas de ruido $1/f$ en bolómetros se han vuelto menos importantes. En algunos casos el exceso de ruido en un bolómetro isotérmico es proporcional a la corriente de alimentación I , así surge de las fluctuaciones de resistencia lo cual puede ser escrito como una intensidad espectral S_R . En este caso,

$$(NEP)^2 = \frac{I^2 S_R}{|S|^2} \quad [W^2/Hz]. \quad (2.18)$$

El ruido de baja frecuencia debido a cambios en la temperatura T_S del disipador de calor es a menudo importante y es poco discutido. Esta contribución al NEP puede escribirse como,

$$(NEP)^2 = \frac{G^2 S_T}{\eta^2} \quad [W^2/Hz], \quad (2.19)$$

donde S_T es la intensidad espectral de fluctuación a la temperatura del disipador de calor[1].

Capítulo 3

Desarrollo Experimental

3.1. Depósitos de películas delgadas

Para la detección de las ondas electromagnéticas en el rango que incluye las ondas milimétricas, submilimétricas y hasta el infrarrojo lejano, se usan bolómetros o arreglos de micro bolómetros los cuales cambian sus características eléctricas por la incidencia de la radiación electromagnética. Como microsensores estos dispositivos son de tamaño pequeño y su fabricación está basada principalmente en tecnología de microistemas, por ejemplo, chips de Silicio, micromaquinas, técnicas de grabado selectivo, métodos de depósito de películas delgadas, tecnologías de empaquetado e interconexión, integración monolítica o híbrida[2].

3.1.1. Spin Coating

El deposito de la película delgada se lleva a cabo mediante un proceso llamado spin coating, el cual, es un procedimiento usado para colocar uniformemente películas delgadas sobre sustratos planos. En síntesis ésto es, una cantidad excesiva de una solución se coloca sobre el sustrato, que luego se gira a alta velocidad con el fin de difundir el fluido por fuerza centrífuga. La rotación es continua mientras que el líquido gira fuera de los bordes del soporte, hasta que se logra el grosor deseado de la película. Por lo tanto, cuanto mayor es la velocidad angular de giro, la película es delgada. El espesor de la película también depende de la concentración de la solución.

El Spin coating es ampliamente usado en la microfabricación donde pueden ser creadas películas delgadas con un espesor inferior a $10nm$. La figura 3.1 muestra una imagen del spin coating. Se utiliza de forma intensiva en la fotolitografía, para depositar capas de fotoprotector de $1\mu m$ de espesor. Debido a los valores bajos de espesor que se puede lograr utilizando los métodos de recubrimiento de giro, este método se emplea a menudo en la fabricación de películas transparentes, dióxido de titanio fino o sustratos de vidrio, como recubrimientos de película fina pueden presentar las propiedades de auto-limpieza y auto-esterilización.

Existen cuatro distintos pasos o etapas para el proceso de Spin coating:

- El depósito del fluido sobre la oblea o el sustrato. Esto se puede hacer mediante el uso de una boquilla o gotero y verter la solución de recubrimiento sobre la superficie. Un exceso sustancial de la solución de recubrimiento se aplica generalmente en comparación con la cantidad que se requiera.
- Aceleración del sustrato hasta su velocidad final.
- Las fuerzas viscosas de fluido dominan el comportamiento del adelgazamiento del mismo, proceso realizado a velocidad constante.
- La evaporación del solvente domina el comportamiento del recubrimiento, también éste proceso es realizado a velocidad constante[3][4].



Figura 3.1: Máquina utilizada para realizar spin coating llamada spin coater o spinner.

cual se deposita el material (efecto Joule). El material en forma de vapor se condensa entonces sobre el sustrato. El montaje de la técnica es simple, y resulta muy apropiada para depositar metales y algunos compuestos de bajo punto de fusión (Al, Ag, Au, SiO, etc.). Los metales típicos usados como resistencia de calentamiento son el Tantalio (Ta), Molibdeno (Mo), Wolframio o Tungsteno (W) los cuales presentan una presión de vapor prácticamente nula a la temperatura de evaporación ($T_{evap} = 1000-2000$ °C).² El esquema general de esta técnica se muestra en la figura 3.2.

3.2. Fabricación del bolómetro

Fueron dos los procesos utilizados para realizar la fabricación del bolómetro: uno de ellos es mediante spin coating y el otro es por evaporación térmica en vacío, a grandes rasgos la estructura formada consiste de una película delgada de metal en este caso aluminio u oro, como absorbedor de radiación, depositada en dos resinas una de ellas siendo SU8-2000 y la otra AZ3300, colocadas éstas sobre un sustrato de Silicio, produciendo así aislamiento térmico y resistencia mecánica.

Por medio del proceso spin coating se coloca sobre un sustrato de Silicio de dimensiones cercanas a 2 cm^2 dos capas de resina AZ3300, que en resumen tiene gran estabilidad térmica a 125° , se pueden realizar películas de 2.5 a $5\ \mu\text{m}$ (Ver apéndice C para mayor información al respecto); y una capa de SU8-2000, la cual a grandes rasgos tiene buenas características en cuanto a resistencia térmica y química, además de que se pueden depositar películas con un espesor entre 0.5 y $200\ \mu\text{m}$ en una sola capa, tiene propiedades mejoradas de recubrimiento, seca más rápido para un mayor rendimiento, su procesamiento está cerca del UV ($350-400\ \text{nm}$) y tiene un bajo módulo de Young, que lo hace ideal para la fabricación de micronano-estructuras tales como ménsulas, membranas y microcanales (Ver apéndice C para mayor información al respecto); porque lo que se necesita es un sensor que no vean afectadas sus características térmicas debido a los componentes que lo

²Dr. José María Albella Martín. *Profesor de Investigación y trabaja en el Departamento de Física e Ingeniería de Superficies del Instituto de Ciencia de Materiales del CSIC.* Ha sido también profesor del Dpto. de Física Aplicada de la UAM durante el periodo 1976-1996, impartiendo clases de Licenciatura y de Doctorado sobre temas relacionados con semiconductores, materiales electrónicos y películas delgadas.

conforman, o sea, que la conducción térmica que existe entre el Silicio y el cuerpo del sensor sea baja.

3.3. Proceso de fabricación

3.3.1. Depósito de fotorresinas

El proceso de colocación de las resinas se lleva a cabo dentro de un cuarto limpio ubicado en las instalaciones del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico de la UNAM (CCADET-UNAM), dentro del cuarto se ubica el equipo necesario para realizar el procedimiento de spin coating, el proceso para colocar las resinas se dividió en dos partes las cuales a continuación describo:

Parte 1 colocación de fotorresina AZ3300

1. Se corta un trozo de Silicio puro de área aproximada a 2cm^2 , no importando si se excede un poco el área.
2. Se lleva a cabo el proceso de limpieza del trozo de Silicio pasándolo por distintas soluciones en cantidades pequeñas (entre 10 y 15 *ml* cada una) primero con acetona, luego con alcohol isopropílico y por último con agua destilada, colocadas con anterioridad en recipientes de plástico nuevos, finalmente se elimina el exceso de agua con aire comprimido.
3. Enseguida el trozo de silicio se coloca sobre el spinner para colocar las dos capas de fotorresina negativa AZ3300(muestra).
 - Colocado el Silicio sobre el spinner, y sobre éste se colocan con una pipeta de una a dos gotas de fotorresina AZ3300, inmediatamente encendiendo el spinner durante un minuto previamente programado.
 - La muestra se retira del spinner y se coloca sobre una parrilla calentada a 65°C durante 60 segundos para secar y endurecer la fotorresina.
4. Siguiendo el paso 3 anteriormente descrito, se coloca la segunda capa de fotorresina.

5. A continuación se lleva a cabo la exposición del material a luz ultravioleta (UV)(350-400nm), colocando sobre la muestra la primera plantilla impresa realizada en Autocad, durante 30 segundos. La información al respecto de la plantilla, se describe en la siguiente sección de este capítulo.
6. Terminada la exposición, se lleva a cabo el revelado de la muestra en una solución reveladora de AZ3300 durante 60 segundos.
7. Para terminar esta parte, se limpia el excedente de solución reveladora con agua destilada, y el excedente de agua se retira con aire comprimido, finalmente obteniendo una muestra, en la cual donde se iluminó con UV se cae el material AZ3300 y en las partes donde no se iluminó se queda intacto, quedando una muestra lista para colocarle la capa de SU8-2000.

En la figura 3.3 se muestra de manera gráfica los pasos antes descritos para realizar el depósito de la fotorresina AZ3300.



Figura 3.3: Esquema general que muestra las secuencias de fabricación del bolómetro.

Parte 2 colocación de fotorresina SU8-2000

1. Se coloca la muestra nuevamente en el equipo spinner y sobre ésta se colocan con una pipeta de una a dos gotas de fotorresina SU8-2000, inmediatamente encendiendo el spinner durante un minuto previamente programado.

2. Al término del programa se retira la muestra del spinner y se coloca sobre la parrilla caliente a 65°C por dos minutos, con la finalidad de secar y endurecer la fotorresina.
3. Enseguida la muestra se expone con UV($350\text{-}400\text{nm}$) colocando sobre la misma la segunda plantilla impresa realizada en Autocad, durante 130 segundos. Los detalles de la plantilla, los daré en la siguiente sección de éste capítulo.
4. Al terminar la exposición, la muestra se coloca nuevamente sobre la parrilla a 65°C durante un minuto.
5. Por último, la muestra se revela con una solución reveladora de SU8-2000 durante un minuto y 5 segundos.
6. Para terminar esta parte, se limpia el excedente de solución reveladora con agua destilada, y el excedente de agua se retira con aire comprimido, finalmente obteniendo una muestra, en la cual donde se iluminó con UV($350\text{-}400\text{nm}$) el material SU8-2000 ésta se queda intacta, mientras que las partes donde no se iluminó se retiran o caen, quedando finalmente lista la muestra para llevar a cabo el proceso de metalización, o sea, colocarle metal, ya sea, Oro o Aluminio.

En la figura 3.4 se muestra de manera gráfica los pasos antes descritos para realizar el depósito de la fotorresina SU8-2000.

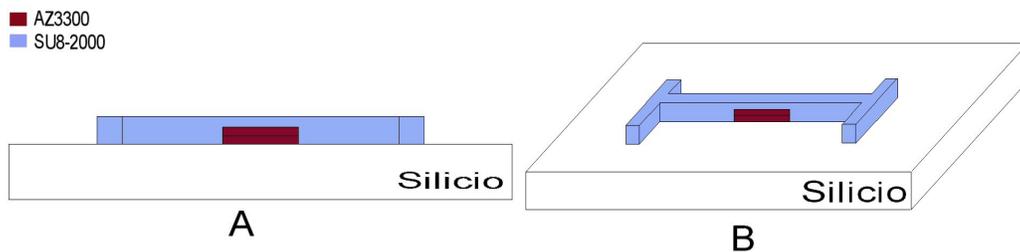


Figura 3.4: La imagen A muestra como quedan las películas al término del proceso antes mencionado. La imagen B muestra una perspectiva en 3D del proceso completo del depósito de las fotorresinas.

3.3.2. Plantillas en AutoCAD

AutoCAD es un programa de **Dibujo Asistido por Computadora**, el cual ofrece un alto nivel de velocidad, precisión y facilidad de uso, efectuando los dibujos con una precisión de hasta 16 decimales. La interfaz es consistente por lo que su aprendizaje y uso resultan mucho más agradables. Para ser más exacto AutoCAD es un programa de diseño en CAD analítico (frente a otros sistemas de CAD paramétrico).

La versatilidad del sistema lo ha convertido en un estándar general, sobre todo porque permite: Dibujar de una manera ágil, rápida y sencilla, con acabado perfecto y sin las desventajas que encontramos si se ha de hacer a mano, permite intercambiar información no solo por papel, sino mediante archivos, y esto representa una mejora en rapidez y efectividad a la hora de interpretar diseños, sobre todo en el campo de las tres dimensiones.

Con herramientas para gestión de proyectos se puede compartir información de manera eficaz e inmediata. Esto es muy útil sobretodo en ensamblajes, contrastes de medidas, etc., es importante en el acabado y la presentación de un proyecto o plano, ya que tiene herramientas para que el documento en papel sea perfecto, tanto en estética, como, lo más importante, en información, que ha de ser muy clara. Para esto tenemos herramienta de acotación, planos en 2D a partir de 3D, textos, colores, etc..., aparte de métodos de presentación fotorrealísticos, es muy versátil, pudiendo ampliar el programa base mediante programación (Autolisp, DCL, Visual Basic, etc ...), por lo mismo existen más programas específicos de cada campo basados en AutoCAD.[5]



Figura 3.5: La plantilla No.1 es colocada sobre la fotorresina AZ3300. La plantilla No.2 es colocada sobre la fotorresina SU8-2000.

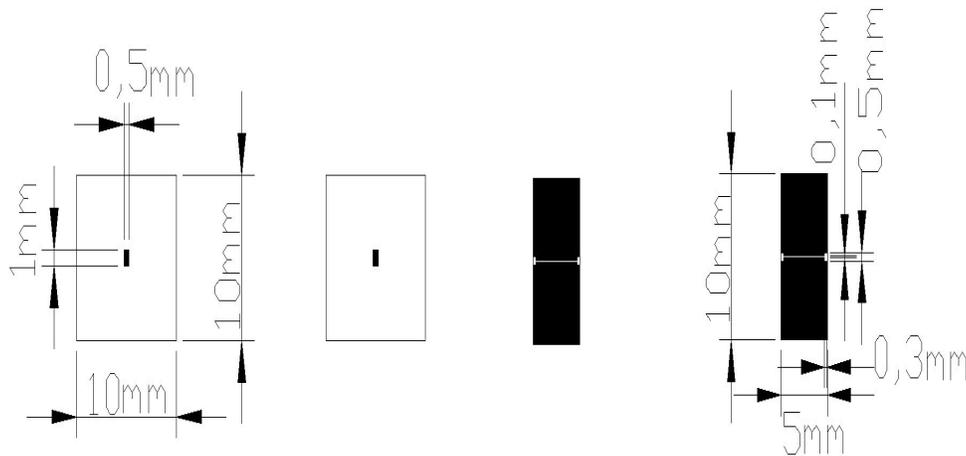


Figura 3.6: Dimensiones de cada una de las plantillas.

En las figuras 3.5 y 3.6 se muestran las plantillas hechas en AutoCAD en un proceso gráfico, las cuales se colocan varias de estas en una sola hoja tamaño carta en AutoCAD y se crea un archivo en PDF, con el propósito de llevarlas a imprimir en positivo a un taller dedicado exclusivamente al diseño gráfico y a las impresiones digitales con buena resolución de centésimos de μm , lo cual es suficiente para mi objetivo, el cual es realizar un sensor con medidas micrométricas o lo que es lo mismo un microsensar.

Este proceso fue difícil de conseguir; porque directamente AutoCAD realiza la creación del archivo, pero, con baja calidad, o sea, las partes en color negro no se obtenían como tal, sino, como una gama de grises lo cual no es lo adecuado, porque, en el momento de imprimir no se imprime totalmente negro y al utilizar así las plantillas, no quedan adecuadamente las exposiciones sobre las fotorresinas, ésto genera malos revelados. Para resolver éste inconveniente utilicé un programa llamado “AutoCAD DWG and DXF to PDF Converter”, el cual genera archivos PDF con buena calidad a partir de archivos DWG, éste último formato generado por AutoCAD. En la figura 3.7 se muestra el logotipo del programa antes mencionado.



Figura 3.7: Programa utilizado para crear la plantilla de AutoCAD a PDF.

3.3.3. Metalización del sensor

Una vez terminado el depósito de las películas delgadas, que en mi caso son las dos fotorresinas, se procede a realizar la colocación del metal sobre mi muestra, para ello se ocupa el equipo de evaporación en vacío o también conocido como equipo para depositos en vacío, que se ubica en uno de los laboratorios del CCADET-UNAM. En la figura 3.8 se muestra esté equipo.

El procedimiento para depositar metal es el siguiente:

1. Se limpia la campana de vidrio con un poco de alcohol isopropílico, o en su defecto si la campana está tan sucia que no se ve nada a través de ella, se puede limpiar con un estropajo y jabón líquido, al terminar se seca con un papel especial; el cual no deja pelusa, se tiene especial cuidado en el empaque de la misma para no dañarlo y quede perfectamente limpio y seco.
2. Cuidando de no maltratar la muestra, ésta se coloca en el sujetador por encima del calentador de resistencia, procurando que quede de manera perpendicular y en línea recta a dónde se va a colocar el material a evaporar (Au o Al).
3. Se coloca el Aluminio puro en 99.999% u Oro puro en 99.999% dentro de un bote hecho de tungsteno, el cual se coloca entre las terminales de una fuente que hará pasar corriente eléctrica por el bote de tal manera que se caliente hasta fundir el Aluminio.
4. Hecho lo anterior se quita una tapa que cubre una bomba, la cual tiene como función sacar el aire que se encuentre dentro de la campana, luego se coloca la campana por encima de los elementos para cubrirlos,

se abre una llave de paso y se cierra la ventilación para que deje de entrar aire a la campana. Se enciende la bomba y el equipo de medición, que ayudará a tener visualizados los parámetros de presión y el espesor del depósito en proceso (presión de inicio 1.7×10^2 torr³). Se dejan transcurrir varios minutos alrededor de 30 y se mide la presión la cual debe ser alrededor de 7×10^{-3} torr.

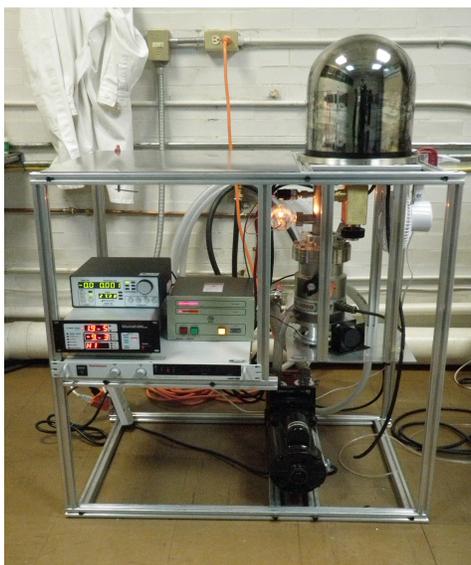


Figura 3.8: Equipo de evaporación en vacío utilizado y montado en el laboratorio.

5. Una vez obtenida una presión cercana y/o un poco mayor y/o un poco menor a la mencionada en el punto anterior se enciende la segunda bomba, la cual es una turbo bomba y permite extraer más aire de dentro de la campana. Se dejan transcurrir 30 minutos más y se mide nuevamente la presión la cual debe ser aproximadamente de $1.3-1.7 \times 10^{-5}$ torr.
6. Transcurrido el tiempo se verifica la lectura de presión y si ésta se encuentra cercana o igual a la presión mencionada en el punto anterior

³El torr (símbolo Torr) o milímetro de mercurio (símbolo mmHg) es una unidad de presión, así denominada con gran honor, en memoria a Evangelista Torricelli. $1 \text{ Torr} = 0.999\ 999\ 857\ 533\ 699 \text{ mmHg}$

continuamos el procedimiento, en caso de no tener una lectura cercana o igual, se apaga la turbo bomba y se deja que suba la presión hasta llegar aproximadamente a la de inicio del proceso y se repiten los pasos a partir del punto 4.

7. Obtenida la lectura de presión del punto 5 se procede a encender la fuente de corriente, revisando que la perilla de incremento/decremento de corriente se encuentre al mínimo, una vez hecho esto se oprime el botón REM, con la finalidad de tener de forma manual el control de la corriente por medio de la perilla antes mencionada. En el equipo medidor de espesor de depósitos se verifican los parámetros adecuados para el Aluminio, ya que el equipo lo utilizan otras personas, esto se puede realizar hasta estos momentos o de preferencia inmediatamente encendido el equipo.
8. Con la perilla de la fuente de corriente se comienza a incrementar la misma de manera gradual, conforme sucede esto, en el medidor de espesor se puede observar la velocidad a la que las partículas se van depositando en la muestra así como también el espesor que hasta el momento se ha depositado.
9. Una vez que se va alcanzado el espesor requerido se comienza a reducir la corriente hasta llegar a cero, se apaga la fuente y también la turbo bomba, luego se dejan transcurrir 15 minutos para que se incremente la presión hasta llegar aproximadamente a 2.3×10^{-3} torr.
10. Llegando a la presión mencionada en el punto anterior se cierra la llave de paso y se dejan transcurrir algunos minutos más (10 aproximadamente) hasta llegar a una presión aproximada de 2.8×10^{-1} torr.
11. Finalmente cuando se incrementa la presión se abre la ventilación poco a poco para que entre aire en la campana. Se apaga el equipo por completo y se retira con cuidado el sensor con el depósito de metal hecho.

En la figura 3.9 se muestra un esquema de la conformación final del bolómetro. Y en la figura 3.10 se muestra una imagen ampliada del bolómetro terminado visto a través de un microscopio.

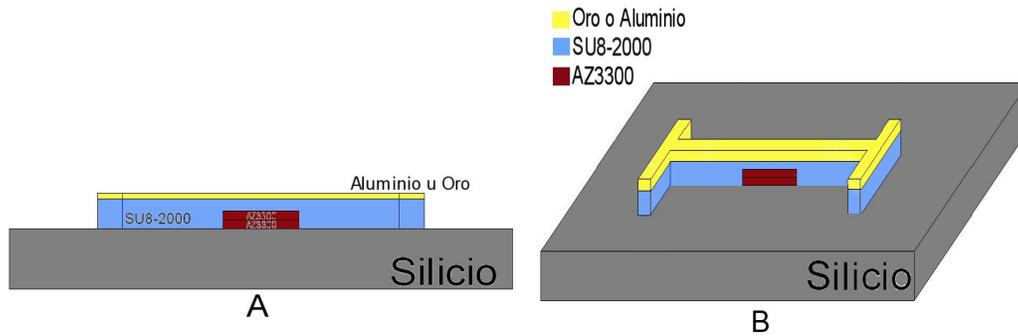


Figura 3.9: La imagen A muestra la disposición de las películas que conforman el sensor. La imagen B muestra una perspectiva del sensor en 3D.

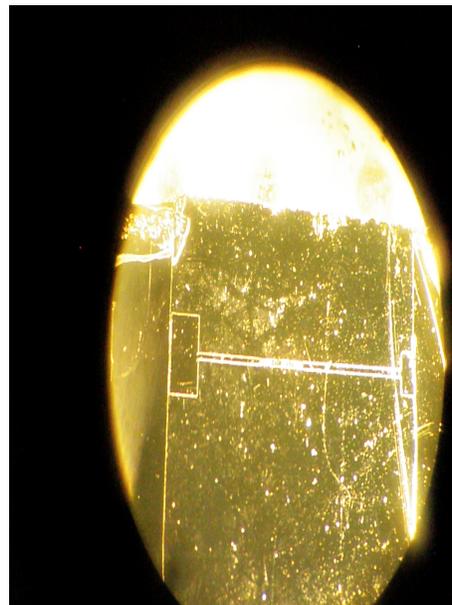


Figura 3.10: Imagen del sensor ampliada por medio de un microscopio.

Capítulo 4

Implementación

4.1. Antecedentes de la instrumentación

El proceso de medición requiere el uso de instrumentos como medios físicos para determinar la magnitud de una variable. Los instrumentos constituyen una extensión de las facultades humanas y en muchos casos permiten a las personas determinar el valor de una cantidad desconocida, la cual no podría medirse utilizando solamente las facultades sensoriales, por lo tanto, un instrumento, se puede definir como un dispositivo para determinar el valor o la magnitud de una cantidad o variable. El instrumento electrónico, como lo indica su nombre, se basa en principios eléctricos o electrónicos para efectuar una medición, puede ser un aparato relativamente sencillo y de construcción simple o un sistema complejo. El desarrollo de la tecnología demanda la existencia de nuevos diseños e instrumentos con mayor exactitud y precisión[6].

4.2. Estándares IEEE

El instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos (IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers) publica y conserva un conjunto de estándares de diversos tipos, por ejemplo especificaciones de controles, funciones, etc., y recomendaciones para el uso correcto de equipos de prueba, existen estándares relativos a la seguridad del alambrado de fábricas de energía, barcos, edificios industriales, etc. Uno de los estándares más importantes dentro de la instrumentación electrónica es el estándar IEEE 488[6].

4.3. Bus GPIB

La interfaz IEEE 488, conocida ampliamente como GPIB, fue diseñada para integrar uno o más instrumentos a una computadora o controlador, desde su diseño se contempla al bus como medio de simplificación en la realización de pruebas de ingeniería en sistemas ATE (Automatic Test Equipment). En el bus GPIB se pueden conectar hasta 15 instrumentos o dispositivos, los cuales se comunican unos con otros bajo una configuración maestro/esclavo mediante cables y conectores requeridos por el bus. El control del sistema lo realiza un dispositivo maestro, llamado controlador, el cual generalmente es una computadora personal o un controlador de bus dedicado, basado en un microcontrolador. El software requerido para el sistema puede ser implementado en cualquier lenguaje de programación, por ejemplo: Borland C++, C++ Builder, Borland Delphi, Visual C, etc. El bus GPIB contempla un protocolo que, mediante pocas órdenes, permite a los usuarios diseñar sistemas simples para realizar pruebas de mediciones complejas[6].

4.3.1. Historia

Fue creado en 1965 por la compañía Hewlett-Packard, que lo denominó originalmente HP-IB, y se popularizó con rapidez, debido a sus altas tasas de transferencia de datos (8 Mbytes/s). En 1975, para evitar la dispersión de características, los principales fabricantes acordaron la estandarización del GPIB (IEEE 488.1), centrándose en las características eléctricas y mecánicas del bus. En Europa se acoge con la norma IEC-625.1, que modifica el conector. En 1978 se revisó el documento y terminó siendo adoptado ampliamente en la industria bajo las siguientes denominaciones:

- GPIB (General Purpose Interface Bus).
- HP-IB (Hewlett-Packard Interface Bus).
- IEEE 488 Bus.
- IEEE 488.1 (denominación posterior, al definir el IEEE 488.2).

En 1987 tuvo lugar una segunda estandarización (IEEE 488.2) que delimitó de forma más concreta la programación del GPIB, definiendo comandos de aparatos, formato de mensajes y estado de los instrumentos. Se pretendía aumentar la compatibilidad entre sistemas. Sin embargo este protocolo no

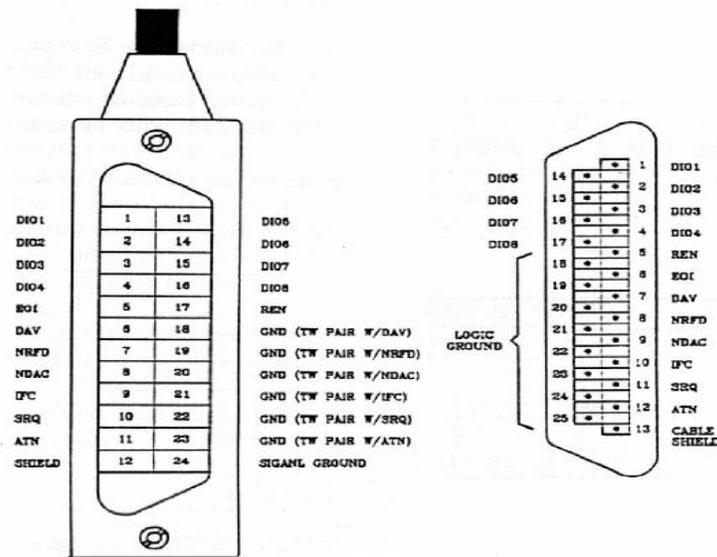


Figura 4.1: Disposición de pines en el conector GPIB.

llegó a reemplazar al original. De hecho hoy día sigue habiendo aparatos que responden únicamente al IEEE 488.1. En 1990 se adoptó el formato de comandos SCPI, incluido en el 488.2, que estructura las órdenes a los aparatos de forma coherente, permitiendo una compatibilidad más extensa[7].

4.3.2. Características físicas

El bus de transmisión de datos de GPIB es de 8 bits en paralelo, y lógica negativa con niveles TTL estándar (cierto si el voltaje es ≤ 0.8 V y falso si el voltaje es ≥ 2.0 V). Los cables y conectores tienen el aspecto típico mostrado en la figura 4.1. Están apantallados y permiten velocidades de transferencia de 1 MB/s, aunque existen versiones que llegan hasta los 8 MB/s. Los conectores tienen dos lados de conexión (macho y hembra) permitiendo diversas estructuras topológicas (línea, estrella y combinaciones) tal y como se muestra en la figura 4.2. Los hay de dos tipos: americano (24 pines) y europeo (IEC-625.1, 25 pines). El bus GPIB cuenta con la siguiente estructura:

- 8 líneas de transmisión de datos (DIO1-DIO8).
- 3 líneas para el control asíncrono de la comunicación (NRFD, NDAC y NRDAV). Mediante estas líneas se verifica la correcta transmisión de

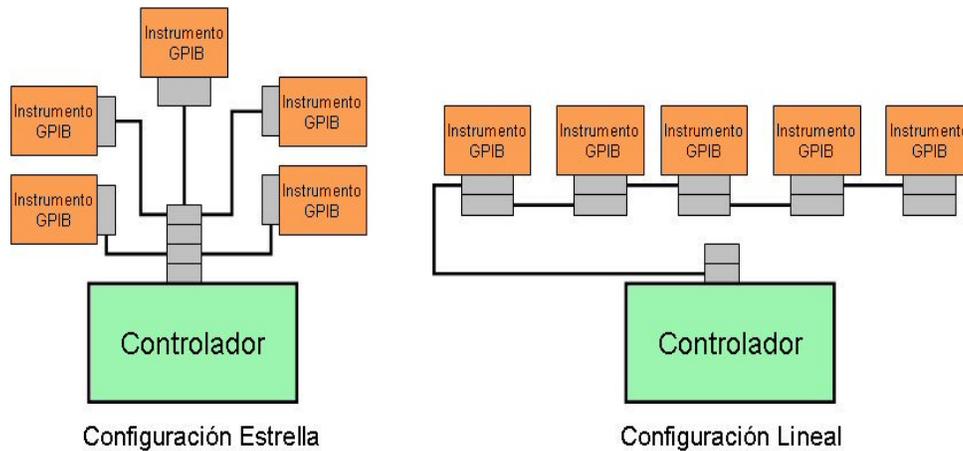


Figura 4.2: Tipos de configuración aceptados por el estándar IEEE 488.

los datos, que es una de las fortalezas del GPIB.

- 5 líneas que gestionan la transmisión de comandos (ATN, IFC, REN, SRQ y EOI).
- El resto componen las tierras de las diferentes líneas.

Para que el bus GPIB alcance la velocidad de transmisión para la que fue diseñado (hasta 8 Mbytes/s), deben cumplirse los siguientes requisitos:

1. La separación máxima entre dos dispositivos es 4 m, y la separación promedio en toda la red debe ser menor de 2m (National Instruments comercializa un extensor de fibra óptica (GPIB 140 y 140/2) que permite alcanzar una longitud de hasta 2 km).
2. Puede haber un máximo de 15 dispositivos conectados al bus, y al menos dos tercios de ellos deben estar encendidos.
3. La longitud total de la red no debe exceder los 20 m.

Un sistema típico constará de un ordenador con una tarjeta controladora GPIB, más los instrumentos (compatibles con IEEE 488, obviamente). Existen tarjetas GPIB para prácticamente todas las computadoras presentes en el mercado (PC, Macintosh, estaciones Sun, Silicon Graphics, DEC Alpha,

HP RS/6000, etc). En el caso concreto de la PC, las controladoras GPIB pueden conectarse al bus ISA, PCI, PCMCIA (portátiles), USB, Ethernet, Firewire, y los puertos serie y paralelo. Existen asimismo adaptadores para los estándares de comunicación RS-232 y RS-485[7]. La figura 4.3 muestra una tarjeta GPIB.



Figura 4.3: Tarjeta GPIB-PCI para computadoras.

4.4. Puente Wheatstone

Para registrar las lecturas del sensor o bolómetro se utiliza un circuito de sensado relativamente sencillo, el cual consiste de tres resistencias y el mismo bolómetro formando un arreglo llamado puente Wheatstone, alimentado con una batería alcalina de 9 Volts. Un puente de Wheatstone es un instrumento eléctrico de medida inventado por Samuel Hunter Christie en 1832, mejorado y popularizado por Sir Charles Wheatstone en 1843. Se utiliza para medir resistencias desconocidas mediante el equilibrio de los brazos del puente. Estos están constituidos por cuatro resistencias que forman un circuito cerrado, siendo una de ellas la resistencia bajo medida, o sea, el bolómetro. La figura 4.4 muestra la disposición eléctrica del circuito.

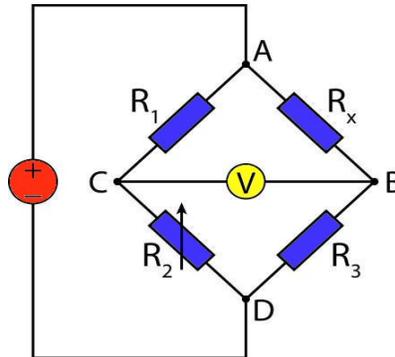


Figura 4.4: Disposición del puente de Wheatstone.

En la figura anterior se muestra que, R_x es la resistencia cuyo valor queremos determinar (bolómetro), R_1 , R_2 y R_3 son resistencias de valores conocidos, además la resistencia R_2 es ajustable. Si la relación de las dos resistencias del brazo conocido (R_1/R_2) es igual a la relación de las dos del brazo desconocido (R_x/R_3), el voltaje entre los dos puntos medios será nulo y por tanto no circulará corriente alguna entre esos dos puntos C y B. Para efectuar la medida lo que se hace es variar la resistencia R_2 hasta alcanzar el punto de equilibrio. La dirección de la corriente, en caso de desequilibrio, indica si R_2 es demasiado alta o demasiado baja. Asimismo, en condición de equilibrio siempre se cumple que:

$$R_x = \frac{R_1 \times R_3}{R_2}. \quad (4.1)$$

Si los valores de R_1 , R_2 y R_3 se conocen con mucha precisión, el valor de R_x puede ser determinado igualmente con precisión. Pequeños cambios en el valor de R_x romperán el equilibrio y serán claramente detectados.

Para conocer el valor de la resistencia del bolómetro, se puede medir directamente con un multímetro de buena resolución o bien se puede calcular de manera sencilla con la fórmula

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad [Ohms = \Omega], \quad (4.2)$$

siendo ρ la resistividad eléctrica del material, L la longitud de conductor, en este caso la película delgada de metal (Aluminio u Oro), y A el área de sección transversal.

Sustituyendo valores de acuerdo a las dimensiones del sensor construido con Oro tenemos que, la resistividad es una constante y ésta es para el oro

$$\rho = 2.22 \times 10^{-8} \text{ [Ohms} \cdot \text{m]},$$

para el aluminio

$$\rho = 2.82 \times 10^{-8} \text{ [Ohms} \cdot \text{m]},$$

la longitud

$$L = 5\text{mm} = 5 \times 10^{-3} \text{ [m]},$$

y el área de sección transversal; que es resultado de multiplicar las dimensiones de espesor de la película depositada e por el ancho de la misma a , o sea,

$$A = e * a = 15.2 \times 10^{-9} * 100 \times 10^{-6} = 1.52 \times 10^{-12} \text{ [m}^2\text{]},$$

sustituyendo los valores en la ecuación 4.2 se obtiene que,

$$R = \frac{(2.22 \times 10^{-8} \text{ [Ohms} \cdot \text{m]} * 5 \times 10^{-3}) \text{ [m]}}{1.52 \times 10^{-12} \text{ [m}^2\text{]}} = 73.026 \text{ [\Omega]},$$

Para el sensor hecho con oro se obtiene el valor de resistencia anterior, el cual es pequeño, y para leer su valor se realizaron adaptaciones y una montura pequeña para colocarlo y poder manejarlo de tal manera que no se maltrate, ni se dañe, así como se muestra en la figura 4.5.



Figura 4.5: Comparación del tamaño entre el sensor colocado sobre un pedazo de aluminio aislado con una mica y una moneda de valor conocido.

4.5. Operación

Los cambios de voltaje detectados son pequeños de acuerdo al diseño de resistencia calculado y los cuales al ser consultados en la literatura serán de alrededor de microvolts [μV] entre los puntos mostrados como B y C de la figura 4.4, por lo que, es necesario amplificar esos cambios de voltaje por medio de amplificadores operacionales de instrumentación.

Una vez adaptado el sensor a la base y con sus respectivos cables de conexión se mide directamente la resistencia en los cables que se muestran en la figura 4.5 con ayuda del multímetro HP3458A, el cual permite una considerable reducción de ruido en la mediciones hechas, tal y como lo muestra el esquema de la figura 4.6, obteniendo una resistencia de 36.6Ω , la cual difiere en casi la mitad del valor teórico calculado en la sección anterior utilizando la ecuación 4.2. En el apéndice D de este trabajo se dan mayores detalles del multímetro.

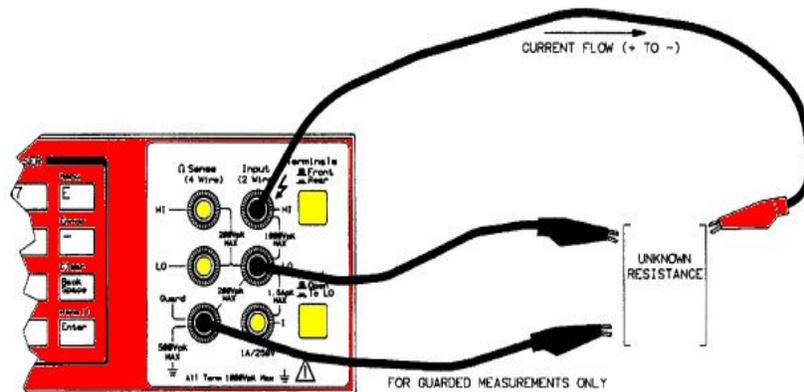


Figura 4.6: Esquema donde se muestra como se realiza la medición de resistencia con el multímetro HP3458.

El funcionamiento del circuito mostrado en la figura 4.7 es sencillo y fácil de entender. El bolómetro es colocado en una de las ramas del circuito puente Wheatstone en este caso se coloca en el lugar marcado con la resistencia $R4$ que se encuentra marcada en el circuito eléctrico de la figura 4.7. Una vez equilibrado adecuadamente el puente con las resistencias restantes, lo que se hace es medir el voltaje entre los puntos centrales del puente, el cual, como ya se mencionó con anterioridad tiene un valor pequeño de μV , por lo que,

es necesario amplificarlo, para lo cual utilicé 3 amplificadores operacionales de instrumentación OPA27.

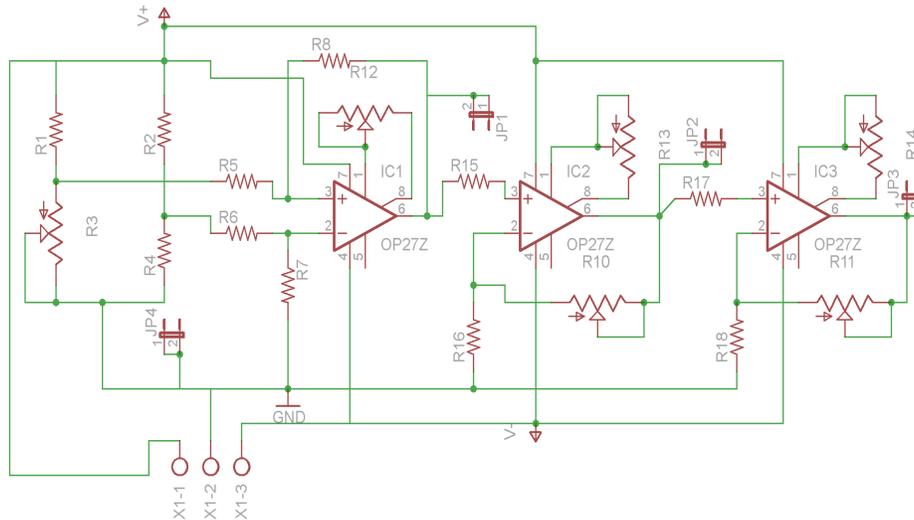


Figura 4.7: Diagrama eléctrico del circuito completo para sensores de voltaje.

La primera etapa del circuito consta de un amplificador diferencial, tal como se muestra en el diagrama de la figura 4.8. Este circuito permite obtener en la salida una tensión igual a la diferencia de las señales aplicadas multiplicada por una ganancia. Un circuito amplificador diferencial se utiliza normalmente para amplificar las señales diferenciales, mientras que las señales en modo común se rechazan. Una señal diferencial se presenta a través de dos terminales, el voltaje en una terminal aumenta a medida que la tensión en el otro terminal se cae (en relación con la tierra). Una señal de modo común es una donde las tensiones en ambos terminales suben y bajan juntos[8].

Aplicando la ley de Kirchhoff en el punto 3 de la figura 4.7 y si $\mathbf{R5=R6=R1}$ y $\mathbf{R7=R8=R2}$ tenemos que,

$$\frac{V_i - V_3}{R1} + \frac{V_6 - V_3}{R2} = 0, \quad (4.3)$$

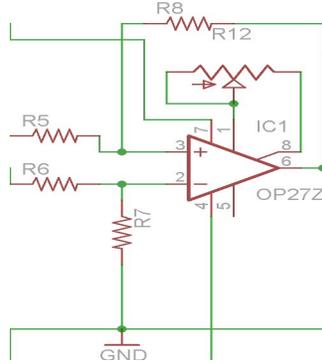


Figura 4.8: Diagrama eléctrico de la primera etapa del amplificador diferencial.

donde V_i es el voltaje de entrada que pasa a través de la resistencia $R5$. Si ahora se aplica la ley de Kirchoff en el punto 2 se tiene que,

$$\frac{V_{ii} - V_2}{R1} + \frac{0 - V_2}{R2} = 0, \quad (4.4)$$

donde V_{ii} es el voltaje de entrada que pasa a través de la resistencia $R6$, obteniendo,

$$V_2 = V_{ii} * \frac{R2}{R1 + R2}, \quad (4.5)$$

sustituyendo la ecuación 4.5 en la ecuación 4.4, y como $V_2 = V_3$, se obtiene

$$\frac{V_i - V_{ii}(\frac{R2}{R1+R2})}{R1} + \frac{V_6 - V_{ii}(\frac{R2}{R1+R2})}{R2} = 0, \quad (4.6)$$

de la que se obtiene operando algebraicamente, que

$$V_6 = (V_{ii} - V_i) \frac{R2}{R1}. \quad (4.7)$$

La segunda etapa del circuito consta de dos amplificadores en cascada, o sea, que la salida del amplificador que está a la izquierda es la entrada del siguiente amplificador a la derecha, los cuales se encuentran configurados en modo no inversor, con la finalidad de no invertir la polaridad del voltaje amplificado y la de obtener una ganancia grande (alrededor de 1000). El diagrama eléctrico de esta etapa se muestra en la figura 4.9.

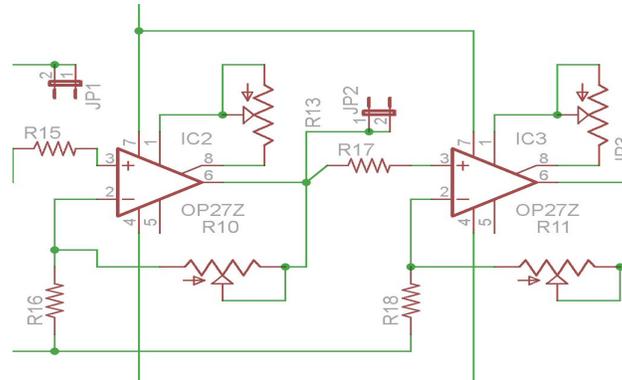


Figura 4.9: Diagrama eléctrico de la segunda etapa del amplificador.

Una vez analizado el funcionamiento del circuito amplificador completo, pasamos al diseño del mismo en tarjeta impresa (PCB), escrito así por sus siglas en inglés (Printed Circuit Board), el cual se llevó a cabo mediante el uso de un software especializado para realizar circuitos impresos llamado Eagle en su versión 5.02. En la figura 4.10 se muestra el diseño obtenido del PCB.

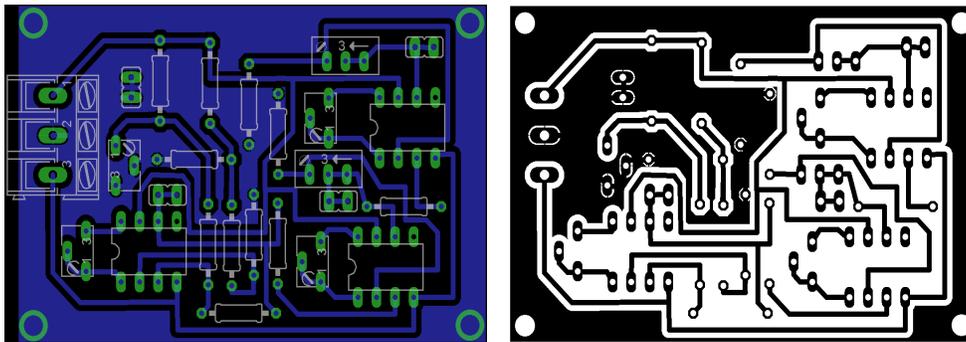


Figura 4.10: Esquema del circuito PCB diseñado con componentes y sin ellos, basado en el diagrama eléctrico para sensar los cambios de voltaje del diagrama de la figura 4.7.

Una vez terminado el PCB, se lleva a cabo la fabricación del mismo con el método de planchado, utilicé un papel termotransferible en donde imprimí el dibujo del circuito impreso sobre el papel, utilizando una impresora

láser. Luego coloque el papel sobre la baquelita con el dibujo mirando al cobre. Planché el papel sobre la baquelita durante 10 o 15 minutos y luego lo sumergí en agua fría, hasta que el papel se calca y quede el dibujo impreso sobre el cobre. A continuación sumergí la baquelita en cloruro férrico para que se revele el circuito impreso, hasta que el cloruro remueve el cobre de las zonas que no están cubiertas por el dibujo. Finalmente lavé la baquelita con agua y perfore los orificios para colocar y soldar los componentes.

Ya se mencionó con anterioridad que la radiación electromagnética incidente en el bolómetro permite detectar cambios de voltaje en el circuito puente de Wheatstone, lo cual se lleva a cabo con el uso del multímetro HP3458A debido a sus características y versatilidad, porque tiene comunicación GPIB y con los controladores adecuados se realiza la comunicación entre éste instrumento y una computadora personal, ya sea de escritorio o una Laptop, por conexión USB. En la figura 4.11 se muestra un esquema general de como queda conformado el sistema completo.

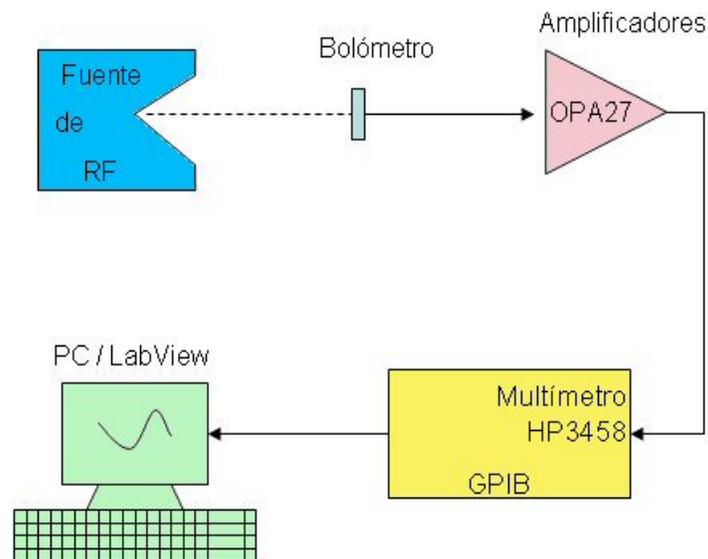


Figura 4.11: En la figura se muestra el esquema general de la implementación del sistema.

4.6. Adquisición de datos

4.6.1. LabView

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) es un lenguaje de programación gráfico para el diseño de sistemas de adquisición de datos, instrumentación y control. Labview permite diseñar interfaces de usuario mediante una consola interactiva basada en software. Se puede diseñar especificando un sistema funcional, un diagrama de bloques o una notación de diseño de ingeniería.

Labview es a la vez compatible con herramientas de desarrollo similares y puede trabajar con programas de otra área de aplicación, como por ejemplo Matlab. Tiene la ventaja de que permite una fácil integración con hardware, específicamente con tarjetas de medición, adquisición y procesamiento de datos (incluyendo adquisición de imágenes).[11]



Figura 4.12: Programa LabView para adquisición de datos.

Labview tiene su mayor aplicación en sistemas de medición, como monitoreo de procesos y aplicaciones de control, un ejemplo de esto pueden ser sistemas de monitoreo en transportación, laboratorios para clases en universidades, procesos de control industrial. Labview es muy utilizado en proce-

samiento digital de señales (wavelets, FFT, Total Distorsion Harmonic TDH), procesamiento en tiempo real de aplicaciones biomédicas, manipulación de imágenes y audio, automatización, diseño de filtros digitales, generación de señales, entre otras, etc.. Las ventajas que proporciona el empleo de LabView se resumen en las siguientes:

- A. Se reduce el tiempo de desarrollo de las aplicaciones al menos de 4 a 10 veces, ya que es muy intuitivo y fácil de aprender.
- B. Dota de gran flexibilidad al sistema, permitiendo cambios y actualizaciones tanto del hardware como del software.
- C. Da la posibilidad a los usuarios de crear soluciones completas y complejas.
- D. Con un único sistema de desarrollo se integran las funciones de adquisición, análisis y presentación de datos.
- E. El sistema está dotado de un compilador gráfico para lograr la máxima velocidad de ejecución posible.
- F. Tiene la posibilidad de incorporar aplicaciones escritas en otros lenguajes.[12]

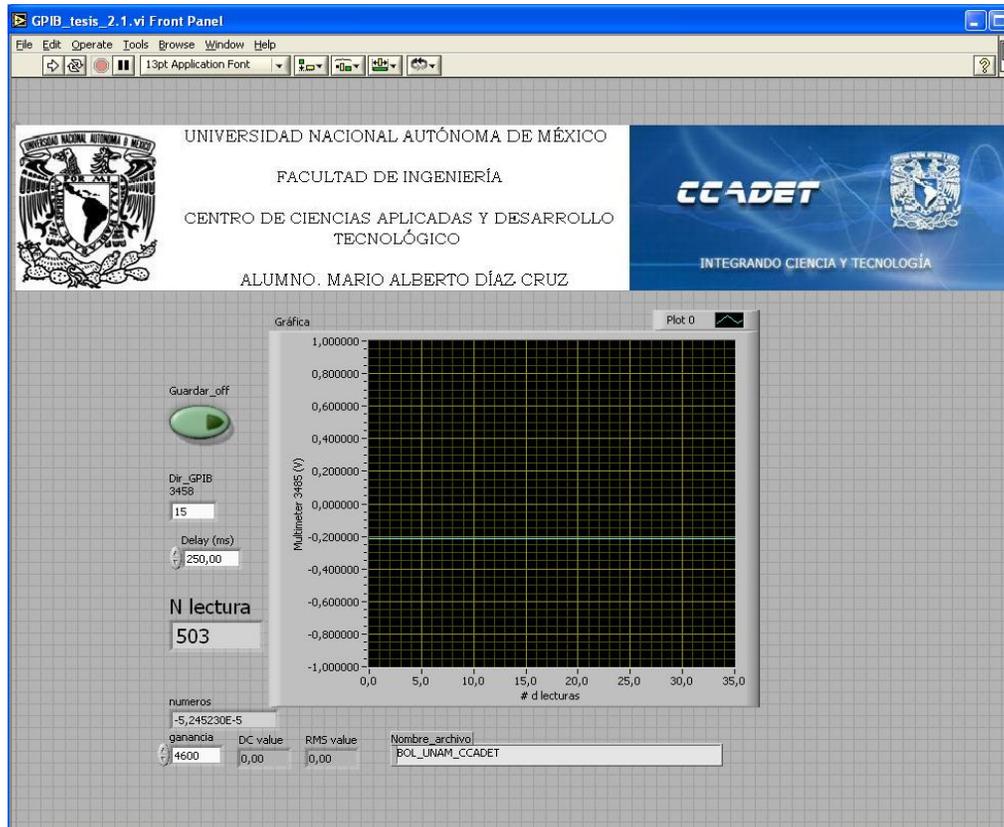


Figura 4.13: Diagrama del panel frontal del programa para adquirir datos.

Como se observa la versatilidad de este software permite la realización de un programa que adquiere los datos del multímetro HP3458 a través del bus GPIB y éste a su vez los mide directamente del circuito implementado. En el esquema de la figura 4.13 se muestra el programa de adquisición de datos terminado y listo para graficar y guardar datos en tiempo real. El código del programa implementado se muestra en el apéndice A de este trabajo.

Capítulo 5

Resultados y análisis

El sensor fabricado se comporta como una resistencia eléctrica, por lo tanto se puede realizar una prueba sencilla en la que se puede observar su comportamiento como tal. Como se sabe, los sensores bolométricos con dimensiones micrométricas o nanométricas se les puede hacer pasar a través de sus terminales una corriente eléctrica muy pequeña, de microamperes μA , tal y como se menciona en la referencia [20]. En donde por medio de un circuito serie muy simple, implementado únicamente con una resistencia de limitación de corriente y el sensor, se hace pasar a través éste último una corriente pequeña por medio de una fuente de voltaje, registrando mediciones de corriente y su respectivo voltaje, permitiendo así observar la respuesta del sensor y con ello comprobar su comportamiento resistivo.

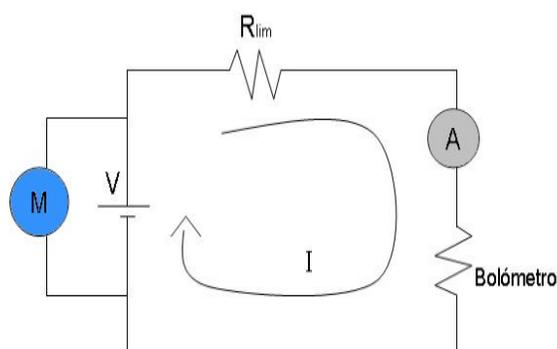


Figura 5.1: Circuito implementado para comprobar el comportamiento resistivo del bolómetro.

El cálculo de la resistencia de limitación, se lleva a cabo por medio del cálculo de un divisor de voltaje que se muestra en la figura 5.1 por el cual requiero pasar una corriente que puede ser desde décimas hasta cientos de microamperes (μA), esto de acuerdo a diversas publicaciones [18], [20], [21], entre otros más; debido a que se trata de un sensor con dimensiones micrométricas, tal como el que se desarrolla en este trabajo de tesis.

De la figura 5.1, aplicando la ley de Ohm se puede obtener la ecuación

$$V = (R_{lim} + R_{Bol})(I), \quad (5.1)$$

el objetivo primordial es limitar la corriente a un valor no mayor de $120\mu A$ y la fuente de voltaje a un valor no mayor de 9 Volts, de la ecuación 5.1 se obtiene que,

$$R_{lim} = \frac{V - (R_{Bol} * I)}{I}, \quad (5.2)$$

y siendo la resistencia del bolómetro medida y registrada en el capítulo 4 $R_{Bol} = 36.6 \Omega$, sustituyendo los valores en la ecuación 5.2 se obtiene que,

$$R_{lim} = \frac{9 [V] - (36.6 [\Omega] * 120 [\mu A])}{120 [\mu A]} = 74963.4 [\Omega] = 74.96 [k\Omega].$$

Los resultados de ésta prueba se encuentran plasmados en la gráfica de la figura 5.2. y su interpretación muestra el comportamiento resistivo del sensor al hacer pasar a través de él una corriente pequeña (μA), lo cual garantiza que el funcionamiento para el intervalo de corrientes será el adecuado como se pretende; y al mismo tiempo se puede concluir que no se está autocalentando al polarizarlo y hacerle pasar a través de sus terminales esta pequeña cantidad de corriente.

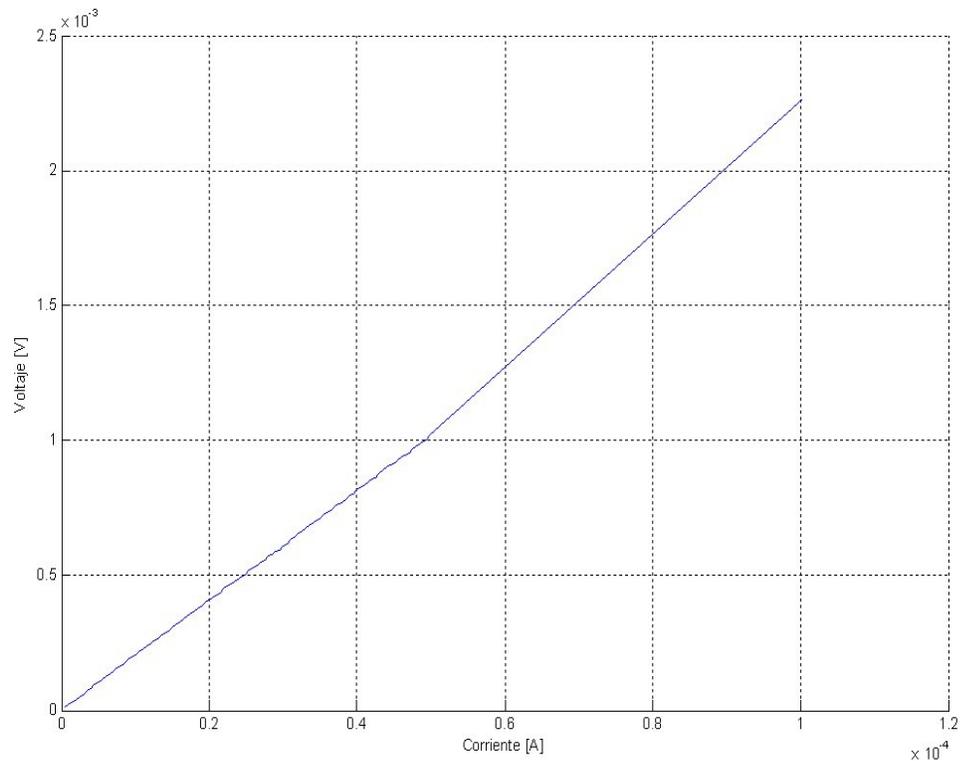


Figura 5.2: Gráfica I/V que muestra el comportamiento del bolómetro.

Una vez instalado el sensor en el circuito puente de Wheatstone visto en el capítulo anterior, como el que se ve en la figura 5.3. A continuación se da inicio al programa en LabView que se encarga de adquirir los datos del circuito donde se encuentra colocado el sensor antes mencionado, el cual además de mostrarlos en una gráfica en tiempo real, los guarda en un archivo de texto para ser manipulado en cualquier otro programa graficador, en este caso utilicé MatLab. Con el archivo de texto obtenido desde LabView posteriormente llevo a cabo ajustes para guardarlo en formato .xls, .xlt, o lo que es lo mismo, en excel, la extensión del archivo depende de la versión que se tenga de microsoft excel en la computadora, posteriormente realicé un programa sencillo en MatLab, que lee los datos desde ese archivo y los gráfica. El código del programa se puede observar en el apéndice B de este trabajo.

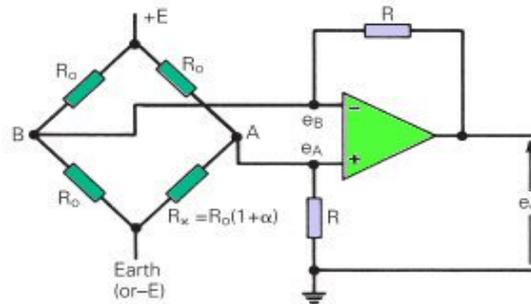


Figura 5.3: Punte Wheatstone y etapas de amplificación analizadas en el capítulo 4.

En el capítulo 4 de este trabajo se analizó el circuito utilizado y cada una de las etapas que lo conforman. Con la finalidad de presentar de mejor manera la respuesta registrada del bolómetro en el circuito, primero se presenta la respuesta sin amplificadores y posteriormente se ilustra la mejoría que existe al registrar los datos del circuito conforme se agregan las etapas de amplificación. Los primeros registros realizados al conectar el bolómetro fueron hechos con el circuito operando durante un lapso de tiempo estable hasta el momento en el que acerco mi mano o la pongo por encima de éste en distintas ocasiones.

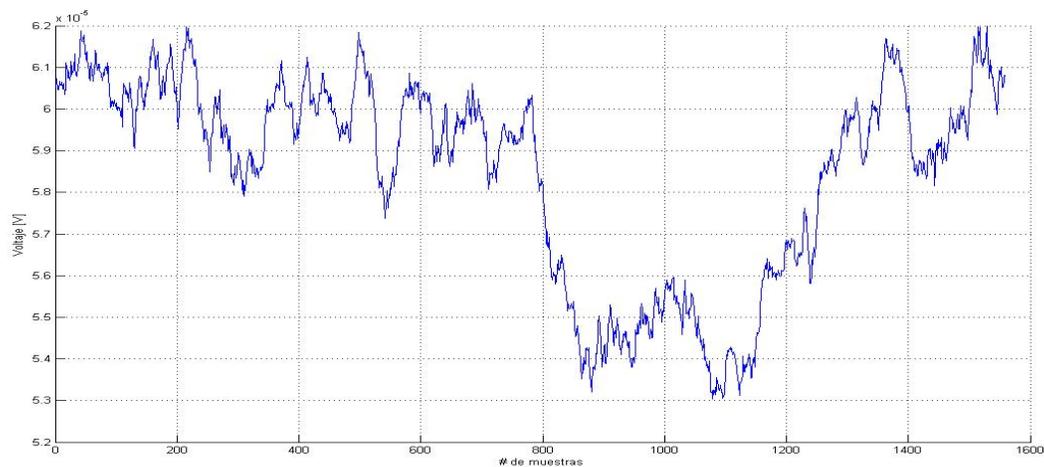


Figura 5.4: Respuesta del bolómetro al acercar mano en distintos momentos sin etapa de amplificación.

Como se observa en la gráfica de la figura 5.4 la respuesta del bolómetro parece ser aleatoria y tiene una magnitud pequeña, por lo que se puede afirmar que se trata de ruido que proviene del exterior y es ajeno a la implementación del circuito, por lo tanto, se requiere que la señal sea amplificada para que el nivel de la señal a detectar sea mayor que la del ruido que perjudica en gran proporción la mediciones hechas por el multímetro. Esta por demás mencionar que el multímetro utilizado tiene una gran respuesta y por sus características ayuda mucho a filtrar la señal detectada.

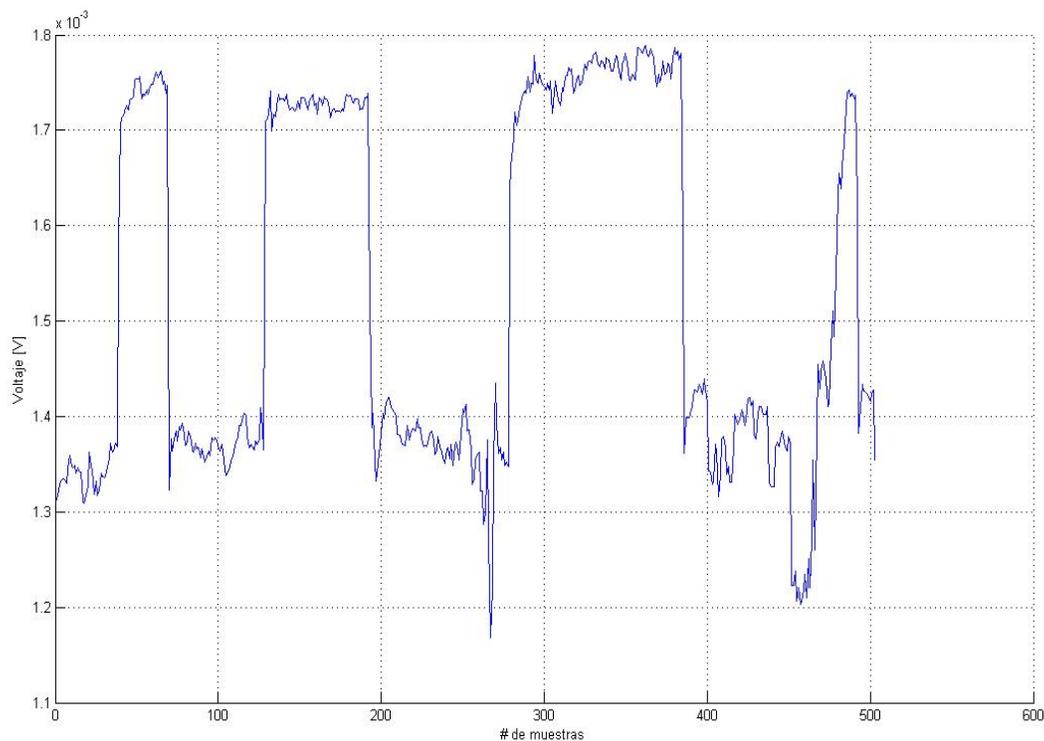


Figura 5.5: Respuesta del bolómetro al acercar mano en distintos momentos en una etapa intermedia de amplificación.

En la gráfica de la figura 5.5 se pueden observar de manera notable los cambios de voltaje al colocar la mano por encima del sensor, ésto debido a que se ha colocado una etapa de amplificación y por consiguiente mejora la señal registrada del sensor, eliminando con ello ruido y captando señal de interés.

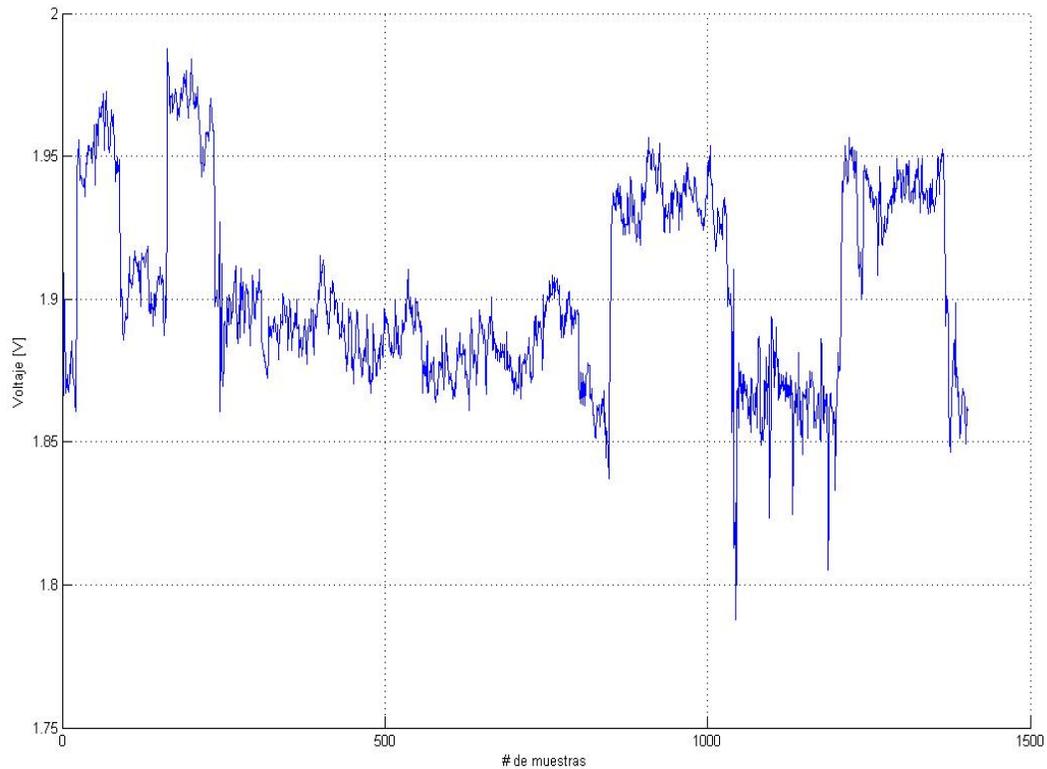


Figura 5.6: Respuesta del bolómetro al acercar mano en distintos momentos en la última etapa amplificadora.

En la gráfica de la figura 5.6 se observa el comportamiento del sensor y los cambios de voltaje que en él se presentan al acercar la mano. Debido a que las etapas de amplificación se encuentran en cascada, ésto es, que la salida de voltaje de un amplificador alimenta la entrada del subsecuente amplificador; por lo tanto la ganancia total de amplificación del circuito la da la multiplicación de la ganancia de cada etapa, por lo que $G_1 = 47$, $G_2 = 20$ y $G_3 = 50$ proporcionan una ganancia total $G = 47000$. De manera gráfica se puede obtener el valor de voltaje detectado y que más adelante en esta misma sección resulta de suma importancia para el análisis de responsividad.

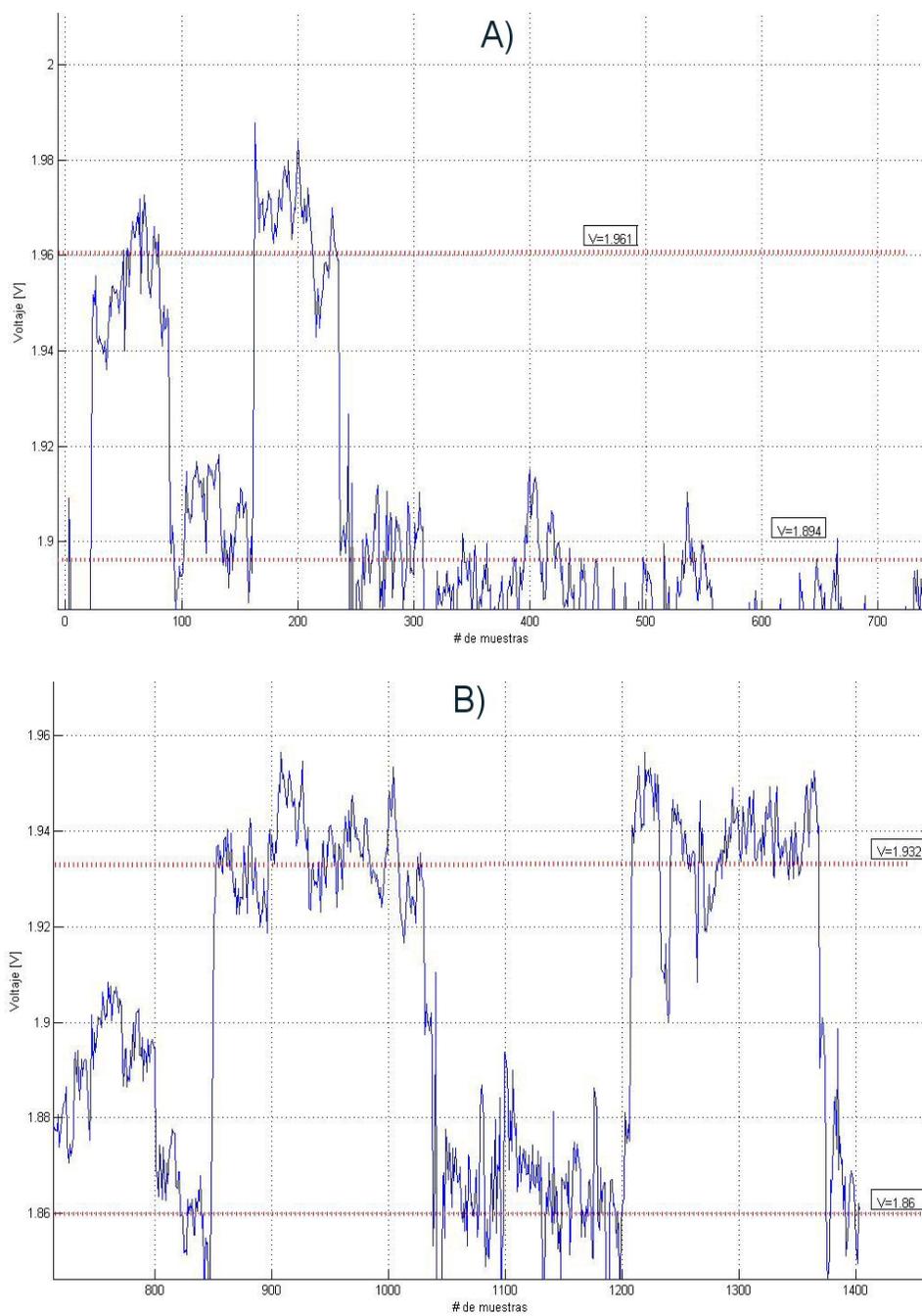


Figura 5.7: Diagramas para adquirir graficamente el voltaje detectado por el bolómetro.

Las gráficas de la figura 5.7 A y B juntas forman la gráfica de la figura 5.6, sólo que para analizarla mejor, ésta se ha separado en dos partes y con ello obtener el incremento de voltaje detectado por el sensor, como se observa se trazó una línea recta en la parte inferior y superior de la respuesta en ambas gráficas, obteniendo así los valores promedio, con ellos se realiza una operación aritmética de resta y se obtiene el voltaje. Para la gráfica señalada con la letra A se tiene que,

$$V = V_{superior} - V_{inferior} = 1.961 - 1.894 [V] = 0.067 [V] = 67 [mV], \quad (5.3)$$

y para la gráfica B se tiene que,

$$V = 1.932 - 1.86 [V] = 0.072 [V] = 72 [mV], \quad (5.4)$$

ambos valores son cercanos el uno al otro, siendo ambos aceptables se pueden utilizar cualesquiera de los dos.

En el capítulo 2 de este trabajo se habló acerca de los parámetros principales que caracterizan a los bolómetros, entre los que destacan se encuentra la responsividad o capacidad de respuesta del mismo, el cual se define como el cambio en el descenso del voltaje por watt de potencia de la señal absorbida, o sea,

$$R_{esp} = \frac{V_{det}}{P_{det}} [V/W], \quad (5.5)$$

donde V_{det} es el voltaje en el detector y P_{det} es la potencia de la señal absorbida por el detector. El voltaje en el detector se obtiene de la medición realizada directamente del circuito implementado con el sensor, o sea, el voltaje medido directamente en el sensor colocado en el puente Wheatstone dividido entre la ganancia total de los amplificadores operacionales usados.

$$V_{det} = \frac{V}{G} [V], \quad (5.6)$$

donde V es el voltaje detectado en el circuito y G la ganancia total que tienen los amplificadores operacionales. Sustituyendo los valores obtenidos con anterioridad en las ecuaciones 5.3 y 5.4 se tiene que,

$$V_{det} = \frac{67 [mV]}{47000} = 1.425 [\mu V]. \quad (5.7)$$

La potencia de la señal absorbida por el detector se cuantifica por medio de la relación de áreas, entre la parte sensitiva a la radiación del sensor y el

área de salida de la fuente de RF o microondas utilizada, multiplicada por la potencia que sale de la misma fuente.

$$P_{det} = P_{fuente} \left(\frac{A_{sen}}{A_{fuente}} \right) \quad [W]. \quad (5.8)$$

La parte sensitiva a la radiación del bolómetro es aquella porción del mismo en donde se encuentra realizado el puente, o sea, es aquella parte del sensor que no tiene ningún contacto con la oblea de silicio y que se encuentra por encima de las dos fotorresinas, evitando que el sensor tenga grandes pérdidas de energía a sus alrededores y al mismo tiempo al exterior, garantizando así un total aislamiento entre el silicio y el sensor y por lo tanto una baja conductividad térmica. El área sensitiva se obtiene del diseño y la geometría del bolómetro, la cual está ilustrada en el capítulo 3 específicamente en los subtemas 3.3.2 y 3.3.3 de este mismo trabajo.

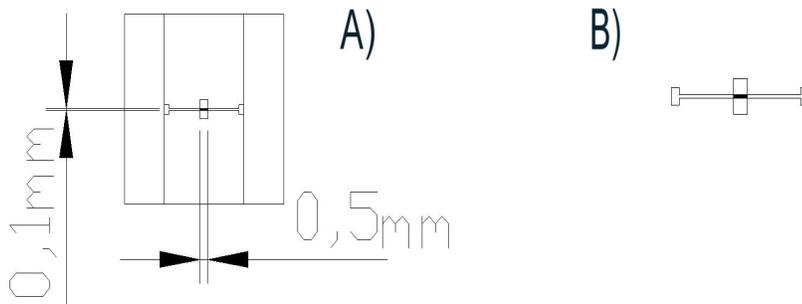


Figura 5.8: En la figura A se muestran las dimensiones de la parte sensitiva, mientras en la figura B en la parte sombreada se muestra la parte sensitiva del bolómetro.

Teniendo las dimensiones de las plantillas se puede calcular fácilmente las dimensiones del área sensitiva del bolómetro, siendo estas:

largo

$$l = 0.5mm,$$

y ancho

$$a = 0.1mm,$$

por lo tanto el área es

$$A_{sen} = l * a = (0.5mm)(0.1mm) = 0.05 \quad [mm^2]$$

El área de la fuente de RF utilizada se obtiene midiendo las dimensiones de la guía de onda por donde sale la señal de microondas que incide directamente en el bolómetro, la fuente utilizada tiene una guía de onda con abertura cuadrada de 75 mm por lo que el área es

$$A_{fuente} = 75mm \times 75mm = 5625 \text{ [mm}^2\text{]}.$$

Y la potencia también se registra de manera directa de la misma, siendo esta de 1 Watt, o sea, $P_{fuente} = 1 \text{ [W]}$.

Sustituyendo los valores anteriores en la ecuación 5.8 se obtiene que,

$$P_{det} = 1 \text{ [W]} \left(\frac{5 \times 10^{-2} \text{ [mm}^2\text{]}}{5265 \text{ [mm}^2\text{]}} \right) = 8.889 \times 10^{-6} \text{ [W]} = 8.889 \text{ [\mu W]} \quad (5.9)$$

Para obtener la responsividad se sustituyen los valores obtenidos en la ecuación 5.5 obteniendo que

$$R_{esp} = \frac{1.425 \times 10^{-6} \text{ [V]}}{8.889 \times 10^{-6} \text{ [W]}} = 0.16031 \text{ [V/W]} \quad (5.10)$$

Thermo sensing Layer	TCR, K ⁻¹	Cell resistance, R _{cell} , Ohm	Voltage responsivity, R _v , V/W ⁻¹	Detectivity, D [*] , cmHz ^{1/2} W ⁻¹	Thermal conductivity (W/K)
a-Si:H,B [3]	-0.028	3 x10 ⁷	10 ⁶	-	2.5x10 ⁻⁸
Poly-SiGe [4]	-0.24	1x10 ⁵	1.3x10 ⁵	2.3x10 ⁹	1.5x10 ⁻⁷
YBaCuO [5]	-0.03	1x10 ⁷	0.8x10 ⁴	2x10 ⁷	10 ⁻⁵
Ge _x Si _{1-x} O _y [6]	-0.048	7x10 ⁵	1x10 ⁵	7x10 ⁸	1.3x10 ⁻⁷
a-Si _x Ge _y :H [7]	-0.043	5x10 ⁸	7.2x10 ⁵	7x10 ⁹	3.8 x 10 ⁻⁷

Figura 5.9: Características de rendimiento de diferentes bolómetros.

La tabla de la figura 5.9 muestra diversos parámetros de bolómetros diseñados y construidos en la publicación *Measurements of thermal characteristics in silicon germanium un-cooled micro-bolometers* [20] citada en la bibliografía de este trabajo.

Capítulo 6

Conclusiones

Durante el desarrollo de éste trabajo de tesis, se implementó un novedoso sistema de fabricación de sensores bolométricos no implementado con anterioridad y en ningún otro lugar. Al término de este proyecto se construyó un sensor bolométrico de dimensiones micrométricas, único, genuino y capaz de realizar observaciones importantes de las emisiones de radio provenientes del Sol, teniendo como objetivo final la implementación de un equipo, que dotará al instituto de Geofísica de la UNAM con una herramienta más para continuar con la observación y el estudio de la estrella más cercana a la Tierra.

En base a este trabajo desarrollado durante mi estancia en la maestría, se sientan las bases para llevar a cabo en un futuro cercano un bolómetro que permitirá hacer observaciones solares puntuales, mejorando la fabricación del mismo, específicamente en la colocación de las fotorresinas, ya sea, utilizando la misma tecnología o con una distinta como lo es la litografía con rayo láser en conjunto con micromotores a paso, con el objetivo de obtener microsensores mejor definidos en su diseño y de ser posible de menor tamaño.

Como se observó en los resultados de éste trabajo, se consiguió tener lecturas del bolómetro tan solo amplificando la señal y utilizando el multímetro HP3458, sin necesidad de utilizar equipo más costoso y/o robusto, como por ejemplo un amplificador look-in, el cual por su principio de operación sirve para filtrar y eliminar el ruido en los circuitos que se tengan implementados.

Aunque el trabajo realizado muestra resultados satisfactorios en la caracterización del bolómetro por medios gráficos. Se podría llevar a cabo un análisis

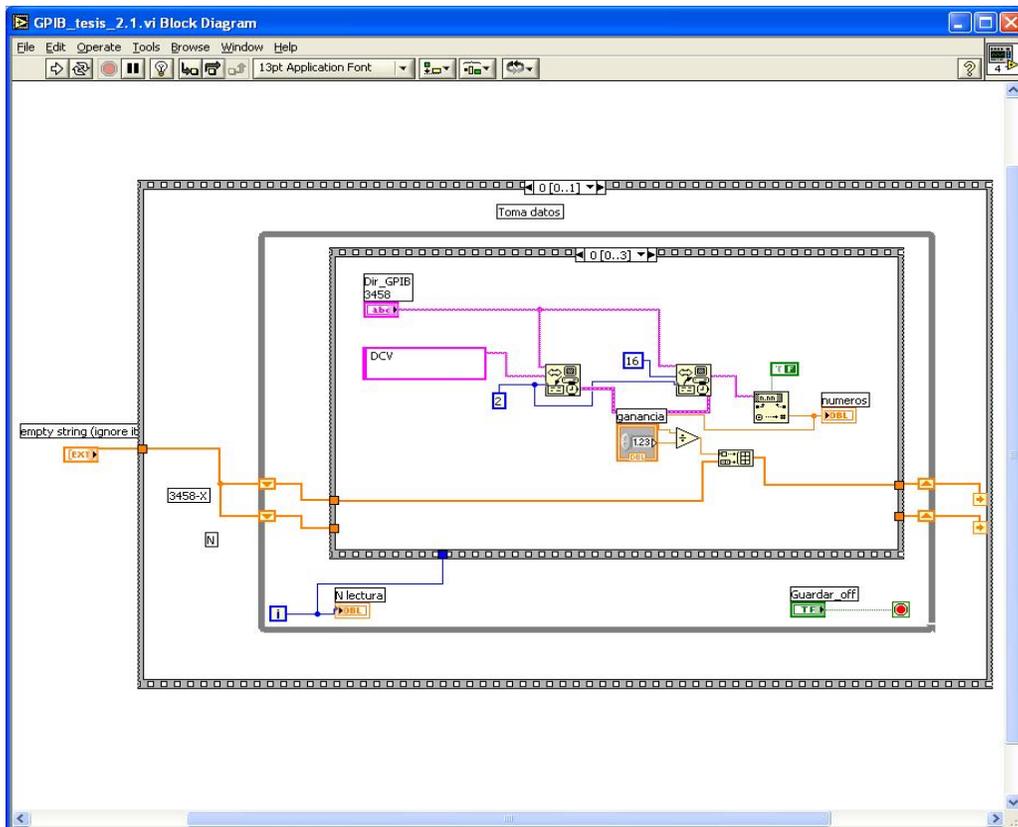
de ésto de forma más detallada y mediante algún otro método con mayor trabajo y extensión, utilizando como fuente de radiofrecuencia al Sol.

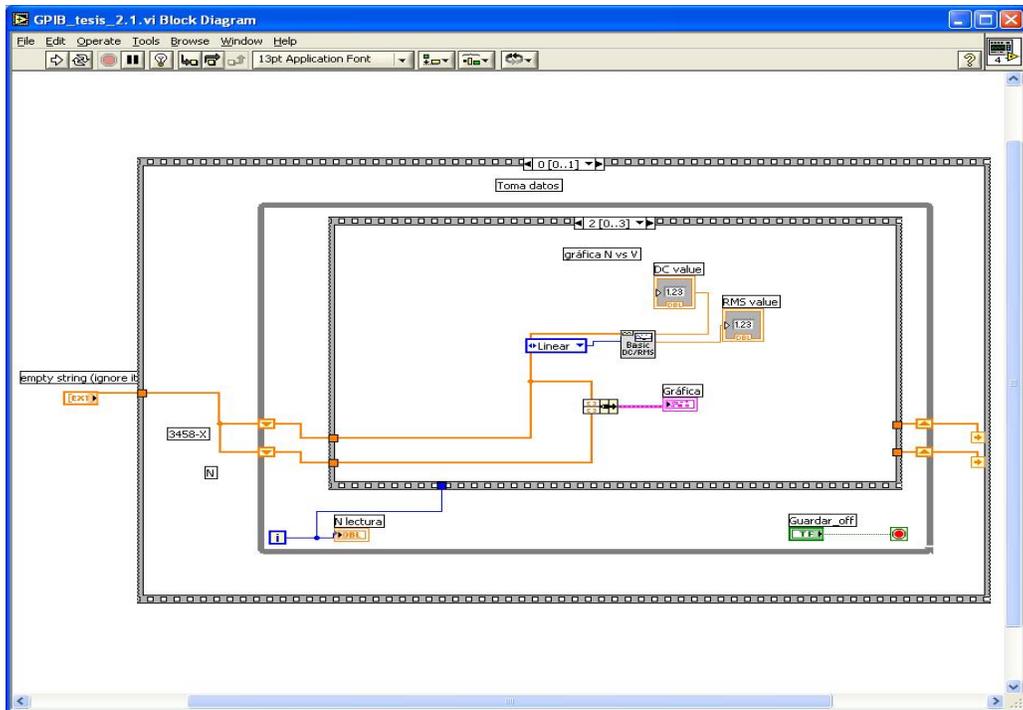
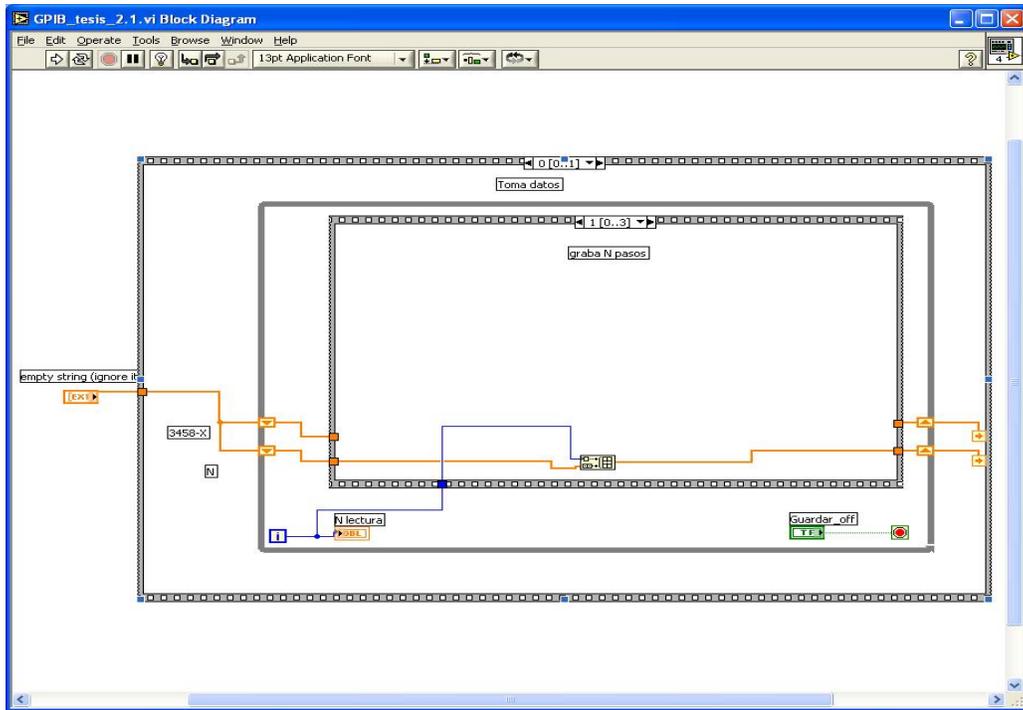
Siendo base este trabajo para fabricar sensores bolométricos, se pueden manufacturar mallas o rejillas formadas con microbolómetros para conformar un sensor con mejor respuesta y características, por ejemplo para hacer un sensor en el rango de frecuencias de THz.

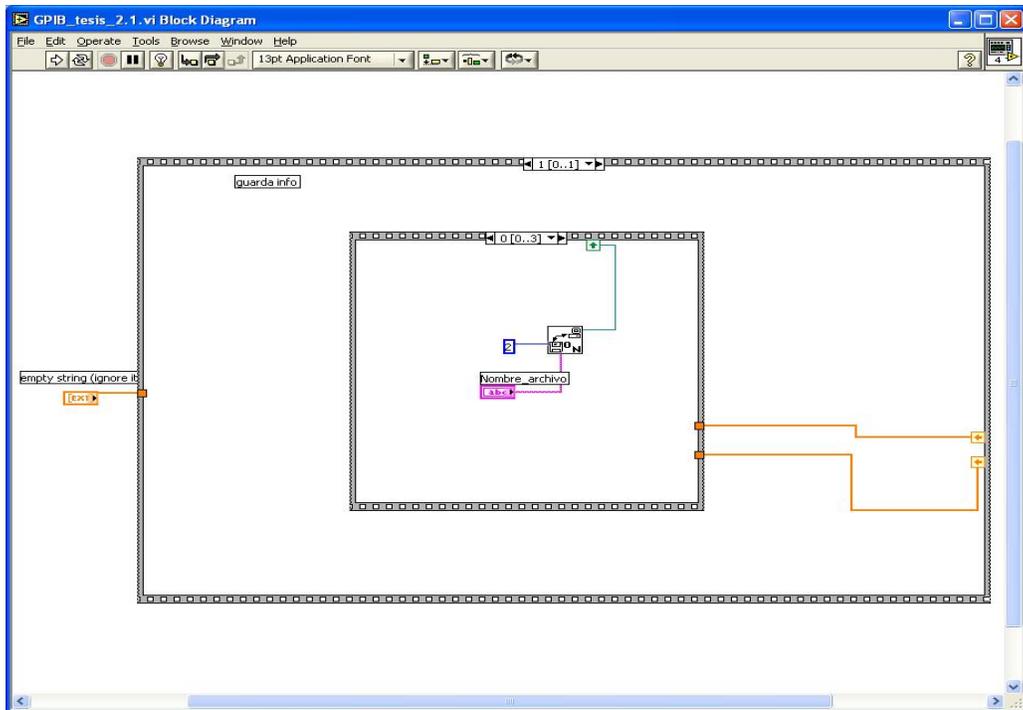
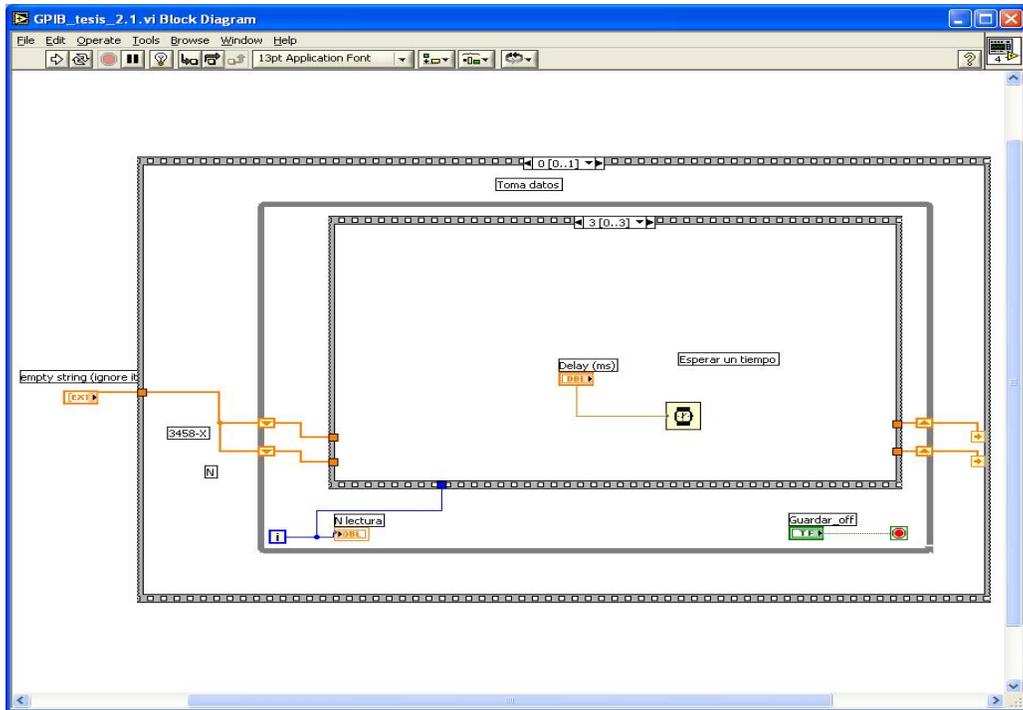
Finalmente, al ser un diseño sin necesidad de enfriamiento y al obtener nuestra propia metodología de fabricación, se puede implementar un dispositivo a bajo costo, con poco consumo de energía y accesible.

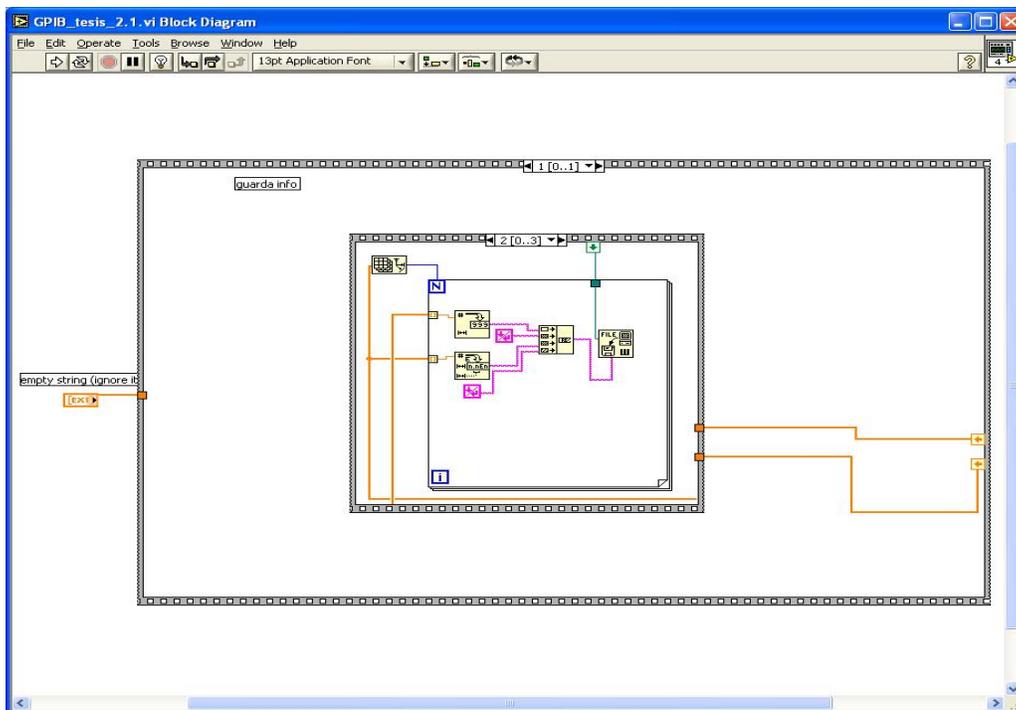
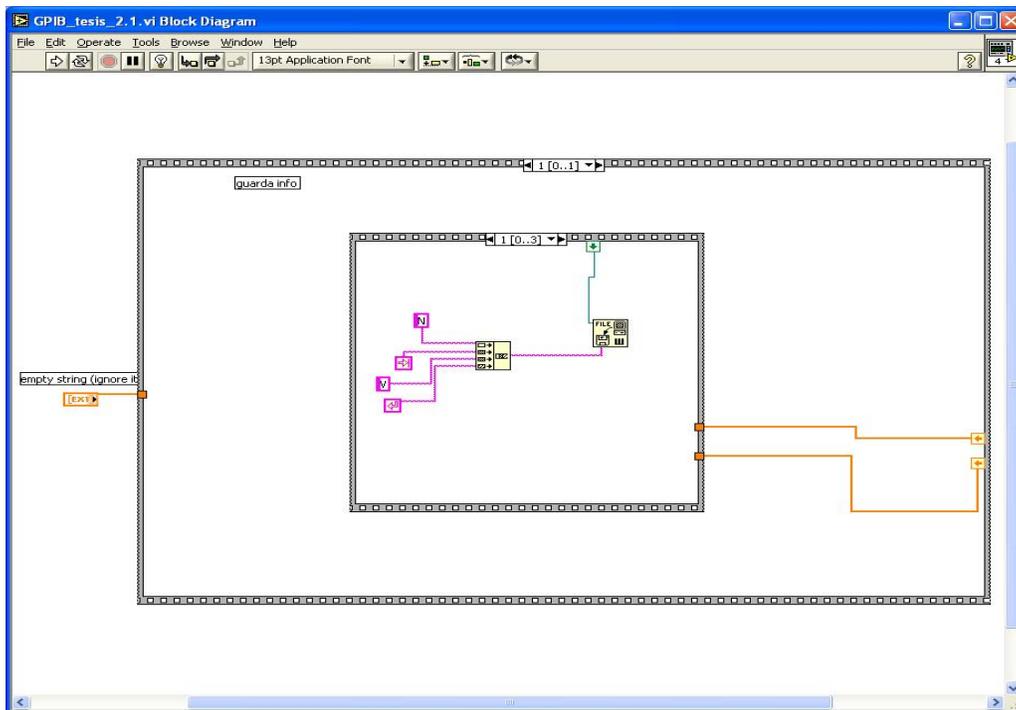
Apéndice A

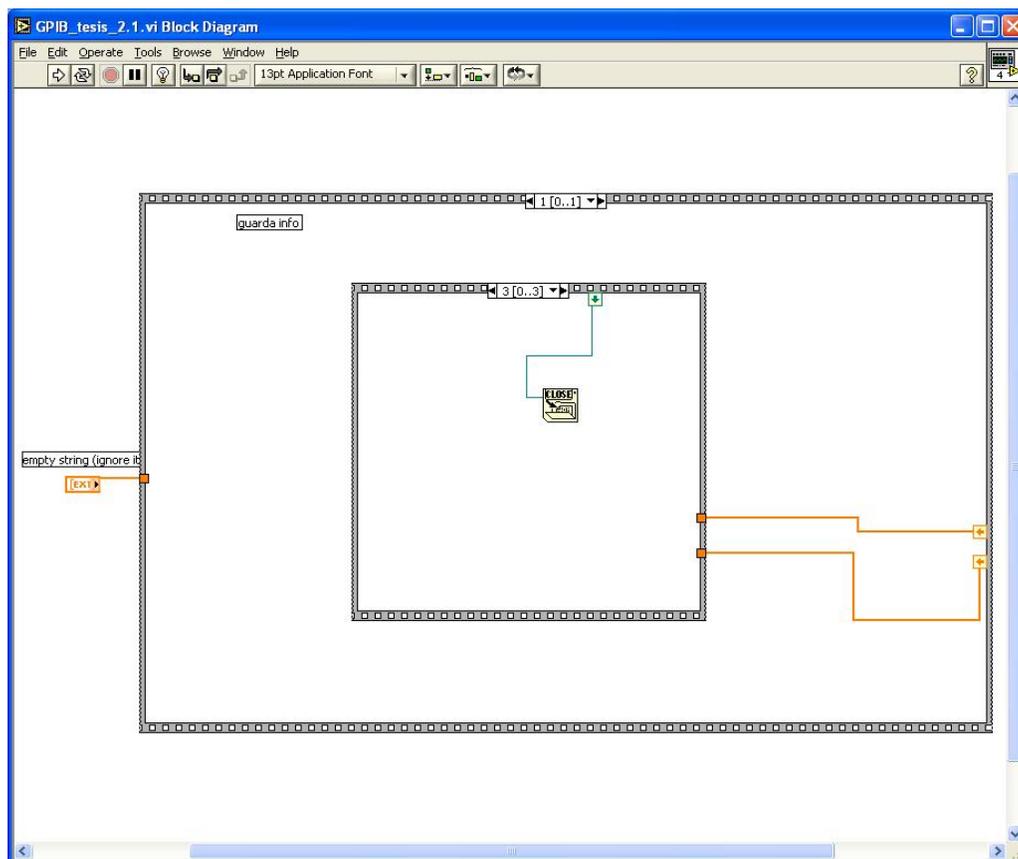
Diagrama a bloques hecho en LabView











Apéndice B

Programa en MatLab

```
hold on  
datos=xlsread ('Nombre del archivo.xlsx');  
x=datos(:,1),y=datos(:,2);grid on  
plot(x,y);  
xlabel ('Etiqueta del eje X')  
ylabel ('Etiqueta del eje Y')  
title ('Titulo de la gráfica')  
hold off
```

Apéndice C

Especificaciones



OPA27
OPA37

SBO5135C – JANUARY 1984 – REVISED AUGUST 2005

Ultra-Low Noise, Precision OPERATIONAL AMPLIFIERS

FEATURES

- **LOW NOISE:** $4.5\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ max at 1kHz
- **LOW OFFSET:** 100 μV max
- **LOW DRIFT:** 0.4 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
- **HIGH OPEN-LOOP GAIN:** 117dB min
- **HIGH COMMON-MODE REJECTION:** 100dB min
- **HIGH POWER-SUPPLY REJECTION:** 94dB min
- **FITS OP-07, OP-05, AD510, AND AD517 SOCKETS**

APPLICATIONS

- **PRECISION INSTRUMENTATION**
- **DATA ACQUISITION**
- **TEST EQUIPMENT**
- **PROFESSIONAL AUDIO EQUIPMENT**
- **TRANSDUCER AMPLIFIERS**
- **RADIATION HARD EQUIPMENT**

DESCRIPTION

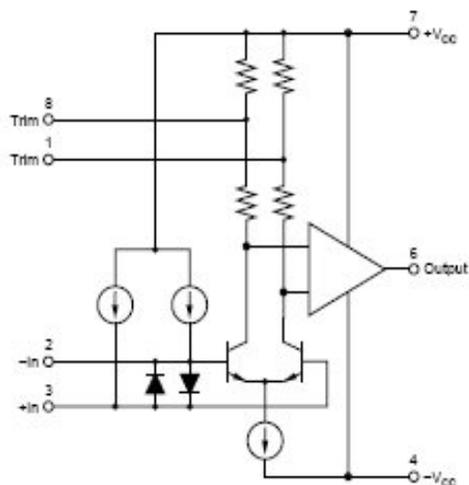
The OPA27 and OPA37 are ultra-low noise, high-precision monolithic operational amplifiers.

Laser-trimmed thin-film resistors provide excellent long-term voltage offset stability and allow superior voltage offset compared to common zener-zap techniques.

A unique bias current cancellation circuit allows bias and offset current specifications to be met over the full -40°C to $+85^\circ\text{C}$ temperature range.

The OPA27 is internally compensated for unity-gain stability. The decompensated OPA37 requires a closed-loop gain ≥ 5 .

The Texas Instruments' OPA27 and OPA37 are improved replacements for the industry-standard OP-27 and OP-37.



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

All trademarks are the property of their respective owners.

PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.



Copyright © 1984-2005, Texas Instruments Incorporated

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS⁽¹⁾

Supply Voltage	±22V
Internal Power Dissipation ⁽²⁾	500mW
Input Voltage	±V _{CC}
Output Short-Circuit Duration ⁽³⁾	Indefinite
Differential Input Voltage ⁽⁴⁾	±0.7V
Differential Input Current ⁽⁴⁾	±25mA
Storage Temperature Range	-55°C to +125°C
Operating Temperature Range	-40°C to +85°C
Lead Temperature:	
P (soldering, 10s)	+300°C
U (soldering, 3s)	+260°C

NOTES: (1) Stresses above these ratings may cause permanent damage. Exposure to absolute maximum conditions for extended periods may degrade device reliability. (2) Maximum package power dissipation versus ambient temperature. (3) To common with ±V_{CC} = 15V. (4) The inputs are protected by back-to-back diodes. Current limiting resistors are not used in order to achieve low noise. If differential input voltage exceeds ±0.7V, the input current should be limited to 25mA.

PACKAGE/ORDERING INFORMATION⁽¹⁾

PRODUCT	PACKAGE-LEAD	θ _{JA}	PACKAGE DRAWING	PACKAGE MARKING
OPA27	DIP-8	100°C/W	P	OPA27GP
OPA27	SO-8	160°C/W	D	OPA27U
OPA37	DIP-8	100°C/W	P	OPA37GP
OPA37	SO-8	160°C/W	D	OPA37U

NOTE: (1) For the most current package and ordering information, see the Package Option Addendum located at the end of this document, or see the TI website at www.ti.com.

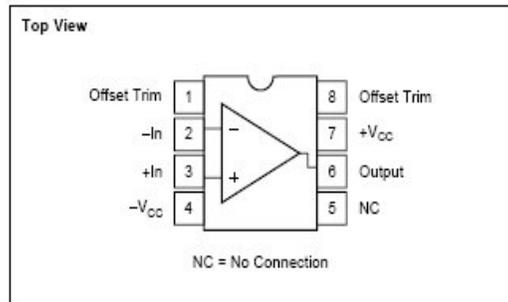


ELECTROSTATIC DISCHARGE SENSITIVITY

This integrated circuit can be damaged by ESD. Texas Instruments recommends that all integrated circuits be handled with appropriate precautions. Failure to observe proper handling and installation procedures can cause damage.

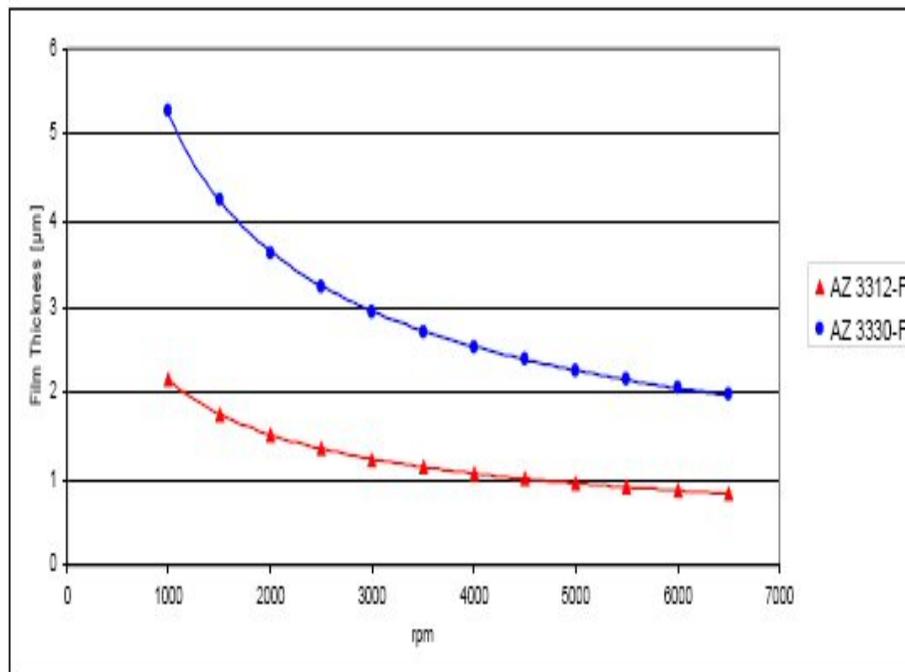
ESD damage can range from subtle performance degradation to complete device failure. Precision integrated circuits may be more susceptible to damage because very small parametric changes could cause the device not to meet its published specifications.

PIN CONFIGURATION



AZ 3300-F Photoresist	
AZ 3312-F	Very fast resist High resolution (i-line 0.6 μ m, g-line 0.8 μ m) Excellent for contact holes, vias, implants, and non critical gates
AZ 3330-F	Great for pad layer applications Can be coated from 2.5 to 5 μ m

AZ 3300-F Photoresist Spin Curves



AZ, the AZ logo, BARLI, Aquatar, nLOF, Kwik Strip, Klebosol, and Spinfil are registered trademarks and AX, DX, HERB, HIR, MIR, NCD, PLP, Signiflow, SWG, and TARP are trademarks of AZ Electronic Materials.



www.microchem.com

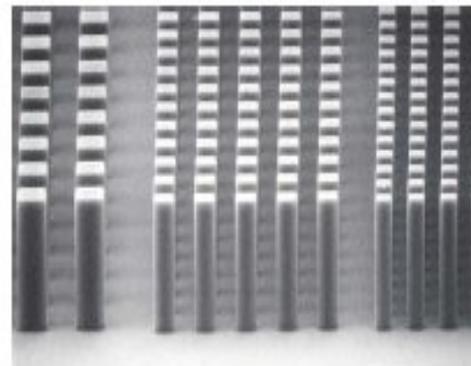
SU-8 2000

Permanent Epoxy Negative Photoresist

PROCESSING GUIDELINES FOR:

SU-8 2000.5, SU-8 2002, SU-8 2005, SU-8 2007, SU-8 2010 and SU-8 2015

SU-8 2000 is a high contrast, epoxy based photoresist designed for micromachining and other microelectronic applications, where a thick, chemically and thermally stable image is desired. SU-8 2000 is an improved formulation of SU-8, which has been widely used by MEMS producers for many years. The use of a faster drying, more polar solvent system results in improved coating quality and increases process throughput. SU-8 2000 is available in twelve standard viscosities. Film thicknesses of 0.5 to >200 microns can be achieved with a single coat process. The exposed and subsequently thermally cross-linked portions of the film are rendered insoluble to liquid developers. SU-8 2000 has excellent imaging characteristics and is capable of producing very high aspect ratio structures. SU-8 2000 has very high optical transmission above 360 nm, which makes it ideally suited for imaging near vertical sidewalls in very thick films. SU-8 2000 is best suited for permanent applications where it is imaged, cured and left on the device.



10 um features, 50 um SU-8 2000 coating

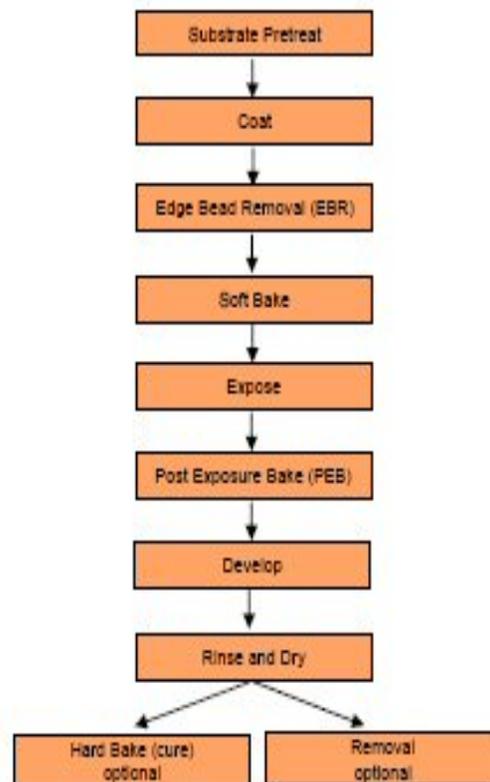
SU-8 2000 Features

- High aspect ratio imaging
- 0.5 to > 200 µm film thickness in a single coat
- Improved coating properties
- Faster drying for increased throughput
- Near UV (350-400 nm) processing
- Vertical sidewalls

Processing Guidelines

SU-8 2000 photoresist is most commonly exposed with conventional UV (350-400 nm) radiation, although H-line (365 nm) is the recommended wavelength. SU-8 2000 may also be exposed with e-beam or x-ray radiation. Upon exposure, cross-linking proceeds in two steps (1) formation of a strong acid during the exposure step, followed by (2) acid-catalyzed, thermally driven epoxy cross-linking during the post exposure bake (PEB) step. A normal process is: spin coat, soft bake, expose, PEB, followed by develop. A controlled hard bake is recommended to further cross-link the imaged SU-8 2000 structures when they will remain as part of the device. The entire process should be optimized for the specific application. The baseline information presented here is meant to be used as a starting point for determining a process.

Process Flow



Apéndice D

Multímetro HP3458A

Performance Highlights

dc Volts

- 5 ranges: 0.1 V to 1000 V
- 8.5 to 4.5 digit resolution
- Up to 100,000 readings/sec (4.5 digits)
- Maximum sensitivity: 10 nV
- 0.6 ppm 24 hour accuracy
- 8 ppm (4 ppm optional) / year voltage reference stability

Ohms

- 9 ranges: 10 Ω to 1 G Ω
- Two-wire and four-wire Ohms with offset compensation
- Up to 50,000 readings/sec (5.5 digits)
- Maximum Sensitivity: 10 $\mu\Omega$
- 2.2 ppm 24 hour accuracy

ac Volts

- 6 ranges: 10 mV to 1000 V
- 1 Hz to 10 MHz bandwidth
- Up to 50 readings/sec with all readings to specified accuracy
- Choice of sampling or analog true rms techniques
- 100 ppm best accuracy

dc Current

- 8 ranges: 100 nA to 1 A
- Up to 1,350 readings/sec (5.5 digits)
- Maximum sensitivity: 1pA
- 14 ppm 24 hour accuracy

ac Current

- 5 ranges: 100 μ A to 1 A
- 10 Hz to 100 kHz bandwidth
- Up to 50 readings/sec
- 500 ppm 24 hour accuracy

Frequency and Period

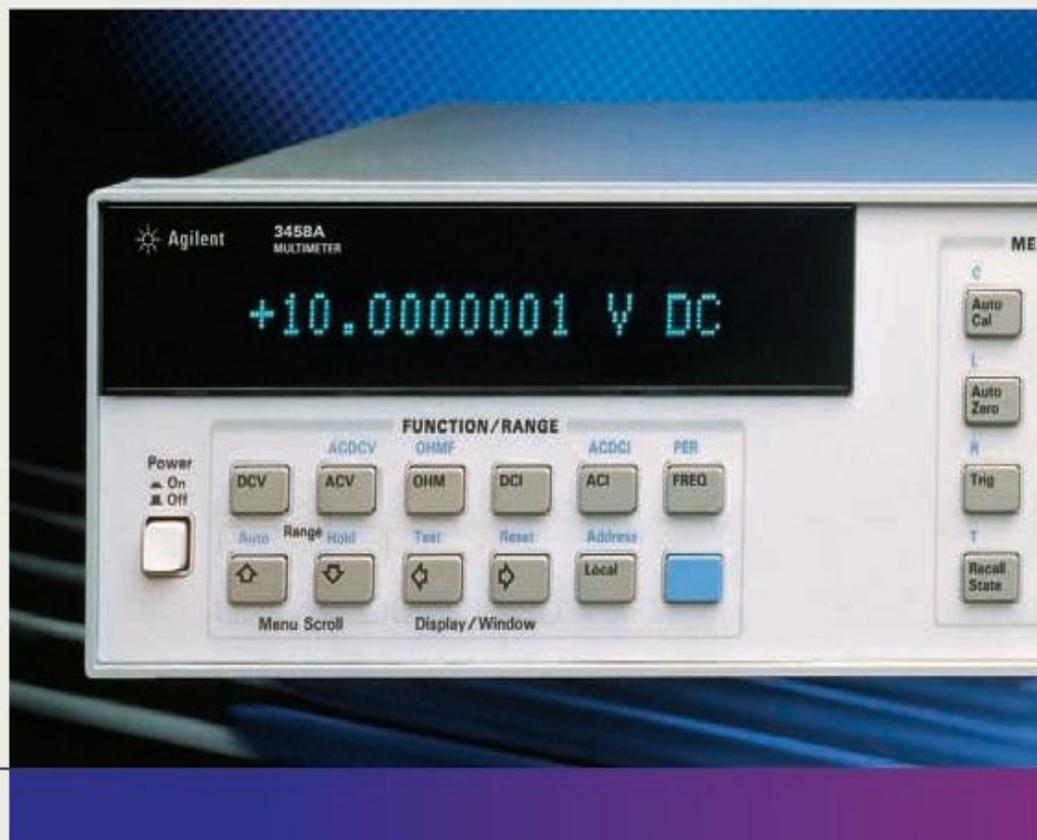
- Voltage or current ranges
- Frequency: 1 Hz to 10 MHz
- Period: 100 ns to 1 sec
- 0.01% accuracy
- ac or dc coupled

Maximum Speeds

- 100,000 readings/sec at 4.5 digits (16 bits)
- 50,000 readings/sec at 5.5 digits
- 6,000 readings/sec at 6.5 digits
- 60 readings/sec at 7.5 digits
- 6 readings/sec at 8.5 digits

Measurement Set-Up Speed

- 100,000 readings/sec over GPIB* or with internal memory
- 110 autoranges/sec
- 340 function or range changes/sec
- Post-processed math from internal memory



Bibliografía

- [1] P. L. Richards, “ *Bolometers for infrared and milimeter waves* ” Department of Physics, University of California, and Materials Sciences Division, *Publicación 10 de Marzo 1994*.
- [2] Roberto R. Neli, Arline M. Melodia, etal “ *A Submm-Wave/Far IR Uncooled bolometer system and aplicaciones* , IEEE,2003.
- [3] J.D. Le Roux, D.R. Paul, “ *Preparation of composite membranes by a spin coating process* ”, Original Research Article Journal of Membrane Science, *Volume 74, Issue 3, 4 November 1992, Pages 233-252*.
- [4] S. Middleman and A.K. Hochberg, “ *Process Engineering Analysis in Semiconductor Device Fabrication* ”, McGraw-Hill, *pag. 313, 1993*.
- [5] José Luis Cogollar, “ *El libro de AutoCAD LT 98* ”, Alfa Omega,1999.
- [6] González H. Angel F., “ *Estudio del protocolo IEEE 488 mediante el desarrollo de una herramienta de simulación* ”, Universidad Tecnológica de la Mixteca,*Abril 2003*.
- [7] Pérez G. Miguel A., etal., “ *Instrumentación Electrónica* ”, Universidad de Oviedo, *Abril 2003*.
- [8] George C.,Steve W., “ *Operational Amplifiers* ”, Fifth Edition, Newnes, *pag. 200-208, 2003*.
- [9] Antonio P., “ *Amplificadores Operacionales y filtros activos* ”, McGraw-Hill, *2000*.
- [10] CRC Press LLC, “ *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook* ”,CRC net Base, Microwave Measurement, *1999*.

- [11] Manuel Lázaro, et al., “ *LabVIEW 7.1. Programación gráfica para el control de instrumentación* ”, Ediciones Paraninfo S.A., 2ª Impresión, pag.192-241, 2005.
- [12] Roncancio Henry A., “ *Tutorial de LabView* ”, Universidad Distrital “Francisco Jose de Caldas” Laboratorio de Electrónica, 2001.
- [13] W. R. Blevin, W. J. Brown, “ *Large-area bolometers of evaporated gold* ”, J. Sci. Instrum. Vol. 42 , 1965.
- [14] J. Müller, U. Dilliner, R. Güttich, “ *Thermoelectric and Bolometric infrared microsensors* ”, Institute of Physical High Technology (IPHT), Jena, Germany.
- [15] Marco S.,Volkar N., Gerald G., “ *Infrared responsivity of pyroelectric detectors with nanostructured NiCr thin-film absorber* ”, IEEE sensors Journals, vol 10, no. 10, Oct. 2010.
- [16] Gilmartin S.F., Collins D., Brain D., “ *Uncooled IR nanobolometers fabricated by electron beam lithography and a MEMS/CMOS process* ”, IEEE, 2008.
- [17] Safy M., Hafz Zaky A., “ *Design of a high fill-factor micromachined bolometer for thermal imaging applications* ”, Department of electronics military technical college.
- [18] Shan P.C., Celik-Butler, Butler D.P., et al., “ *Investigation of semi-conducting YBaCuO thin films: A new room temperature bolometer* ”, American Institute of physics, 5 Sep. 1996.
- [19] Griffin M.J., “ *Bolometers for far-infrared and submillimetre astronomy* ”, Nuclear instruments and methods in physics research, Ago. 1999.
- [20] Mario M., Roberto A.,Alfonso T., “ *Measurements of thermal characteristics in silicon germanium un-cooled micro-bolometers* ”,Physica Status Solidi C, 2010.
- [21] Jin-Shown S., Yeong-Maw C, et al., “ *Characterization and modeling of Metal-film microbolometer* ”, Journal of Microelectromechanical Systems, Vol.5, No.4,1996.

- [22] N. Coron, G. Dambier, J. Leblanc, “ *Infrared Detector Techniques for Space Research* ”, Edit. V. Manno and J. Ring, pag. 121-131.
- [23] Ebbe Nyfors, “ *Industrial Microwave Sensors-A Review* ”, Subsurface Sensing Technologies and Applications, Vol. 1, No. 1, 2000.

Artículos de investigación complementarios

- [24] D.H. Andrews, et al., “ *Rev. Sci. Instrum.* ”, 13, 281, 1942.
- [25] W. Hershel, “ *Philos. Trans. R. Soc.* ”, 90, 284, 1800.
- [26] R.A. Smith, et al., “ *The detection and measurement of infrared radiation* ”, Clarendon, Oxford, 1957.
- [27] F.J. Low, et al., “ *J. Opt. Soc. Am.* ”, 51, 1300, 1961.
- [28] J. Clarke, et al., “ *Rev. Phys. Appl.* ”, 9, 69, 1974.
- [29] J.M. Lamarre, et al., “ *Appl. Opt.* ”, 25, 870, 1986.
- [30] C. Kittel and H. Kroemer, “ *Thermal Physics* ”, 2nd edition, Freeman, New York 1980.
- [31] W. S. Boyle and K.F. Rogers, “ *J. Opt. Soc. Am.* ”, 46, 66, 1959.
- [32] J. Cooper, “ *Rev. Sci. Instrum.* ”, 33, 92, 1962.
- [33] D. H. Andrews, W. F. Brucksch, W. T. Ziegler, “ *Rev. Sci. Instrum.* ”, 13, 281, 1942.
- [34] S. P. Langley, “ *Nature* ”, 25, 14, 1981.
- [35] A. Hadni, “ *J. Physics* ”, 24, 694, 1963.
- [36] Sabater Israel, “ *Guía de AutoCAD 2000* ”, pag. 1-209, 2000.
- [37] Agilent Technologies, “ *Agilent Technologies 3458A Multimeter* ”, User’s Guide, Manual Part Number: 03458-90014, printed in U.S.A, 2000.
- [38] Agilent Technologies, “ *Agilent 3458A Multimeter Data Sheet* ”, printed in USA, 2000.

- [39] Duane H.W., et al., “ SQM 160 Rate/Thickness Monitor ”, User’s Guide, version 4.09, Inficon Inc., USA, 2008.

Páginas de internet consultadas

[40] *http://en.wikipedia.org/wiki/Spin_coated*

[41] *http://www.icmm.csic.es/fis/espa/evaporacion_electrones.html*

[42] *<http://www.ni.com/labview/esa/>*