



**BUAP**

# **BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA  
ELECTRÓNICA**

**CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ÓPTICA, A.C.**

## **TESIS**

### **“DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE ESTRUCTURAS RESISTIVAS CON GEOMETRÍA EN ESPIRAL PARA SU POSIBLE APLICACIÓN COMO UN SENSOR DE FLUJO”**

**Presenta:**

**STEPHANY ANDRADE ENRÍQUEZ**

**Director externo de Tesis:**

**DRA. NATIELY HERNÁNDEZ SEBASTIÁN**

**Director interno de Tesis:**

**DR. MARCO ANTONIO VÁSQUEZ AGUSTÍN**

**Director interno de Tesis:**

**DR. ROBERTO CARLOS AMBROSIO LÁZARO**

**Puebla, Puebla, octubre 2023.**

## RESUMEN

La concentración excesiva de contaminantes atmosféricos provenientes de vehículos que utilizan combustible como gasolina o diésel causan que la población mexicana se vea afectada en los ámbitos de: economía, salud y productividad. Es por ello que en el área automotriz, se ha visto la necesidad de implementar técnicas de monitoreo ambiental, como lo es el sensor de flujo. Este sensor calcula adecuadamente una mezcla aire-combustible con la medición precisa del flujo de aire, para así controlar emisiones de partículas contaminantes, humo negro en el escape, ahorro en consumo de combustible y mayor eficiencia en los autos.

En la actualidad, los sensores de flujo propuestos han sido los anemómetros de hilo caliente, karman vortex y de tipo paletas. Sin embargo, presentan algunos inconvenientes, como lo son: baja tasa de respuesta dinámica, se contaminan fácilmente, son voluminosos y tienen un alto costo.

Por estas razones, en este proyecto de tesis se propone la fabricación y caracterización de un sensor de flujo, basado en tecnología de microelectrónica. Para obtener un dispositivo miniaturizado, con alta tasa de respuesta, un bajo costo, con un alto coeficiente de temperatura de resistencia, mecánicamente estable y bajo consumo de potencia.

De este modo se pretende disminuir las concentraciones de partículas finas, reducir enfermedades prematuras como lo es el cáncer pulmonar, enfermedades cardiovasculares y enfermedades cardiopulmonares, en el país.

Este proyecto se llevó a cabo en colaboración con la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) y el Centro de Investigaciones en Óptica, A.C. (CIO). Específicamente en el laboratorio de micro y nano dispositivos fotónicos, ubicado en León, Guanajuato. Este laboratorio es un cuarto limpio clase 10,000 destinado a la fabricación de micro y nano dispositivos fotónicos, plasmónicos, BioMEMS y fluídicos. Dentro de este laboratorio, se llevaron a cabo procesos de limpieza química húmeda, la caracterización del aluminio en tres diferentes tipos de vidrio en el Sputtering AJA International, proceso de litografía con la alineadora de mascarillas SUSS Microtec, caracterización de la resina tipo S1813, grabado de aluminio, limpieza de sustratos y verificación de las estructuras mediante el microscopio digital.

Utilizando estas técnicas de fabricación, se espera tener un dispositivo reproducible, sin defectos estructurales, mecánicamente estable y tecnológicamente factible.

## DEDICATORIA

*Por la fuerza, el amor, la resiliencia que me enseñas diariamente y por enseñarme a disfrutar de la vida.*

*Para ti, papá.*

*Por la dedicación que tienes conmigo y con mis hermanas, y nunca dejarnos solas en este caminar, y por llenarme de abrazos cuando me dan ataques de ansiedad.*

*Para ti, mamá.*

## AGRADECIMIENTOS

A mi mamá, porque nunca será suficiente agradecer todo lo que has hecho por nosotras. Eres una mujer extraordinaria, porque aún con miedo, logras todo lo que te propones. Te admiramos siempre.

A mi papá, por demostrarme su amor y su apoyo. También por enseñarme a ser fuerte, perseverante, y que la paciencia se construye todos los días. Eres la persona más fuerte que conozco.

A Betty, porque cada día te entiendo mejor y te quiero más. Te admiro desde chiquita. Gracias, hermana, por enseñarme tantas cosas y por darme el mejor regalo de todos: ser tía.

A Karla, porque perdí la cuenta de las veces que fuiste mi guía para todas mis materias de la escuela y de la vida. Por orientarme y regañarme cuando lo requería. Eres mi inspiración.

A mi abuelita Meche y mi abuelito Lupe, por el legado de amor y trabajo que inculcaron.

A mis tías: Norma, Diana, Libia, Ángeles, Lourdes, Alba y Chuy, por la perseverancia y la fe que siempre nos inculcan. A mi tío Juan por llevarme a la escuela cuando estaba pequeña; a mi tío Servando y Enrique.

A mi abuelita Lore, por sus deliciosas comidas, a mi abuelito Juan por el cariño que siempre nos brindó.

A mis tíos Chris, Carlos, Paco y a mi tía Delfina, que cuidan de mi papá.

A todos mis primos, por todas las aventuras que hemos vivido juntos, su compañía siempre es alimento para mi alma.

A Iván, por ser luz de conocimiento en todos los aspectos de mi vida. Gracias por siempre creer en mí, cuando ni yo lo hacía. Tu amor me lleva a lugares inimaginables.

A Yaretzi, Fernanda, Paola, Sara, José Ángel, Alexis, Ramón, Erick y Hassan, por demostrarme el verdadero valor de la amistad, por las risas y las enseñanzas que hemos vivido juntos.

A mi asesor, el Dr. Marco, por el tiempo, conocimientos, paciencia y generosidad que me brindó durante todo este proceso. Su compromiso por formar excelentes profesionistas es de admirarse.

A mi asesora, la Dra. Natiely, por la hospitalidad que me brindó en el CIO, por todos los conocimientos adquiridos y la paciencia que día con día me tuvo. Sus conocimientos son muchos y su humildad en enseñar es infinita.

A Galle, mi viejita, que fue mi primera interacción con un perrito como mascota y me robó el corazón; a Colchis, carita de ángel, por la dulzura, la tranquilidad y el amor que siempre me brindan y me transmiten.

A Tupsi, porque llegó cuando más la necesité, y aunque no habla y solo ladra, siempre estuvo para mí. Su calorcito cobijó mi corazón y calmó mi mente.

Y a todos los maestros y compañeros que me guiaron y nunca me soltaron, ni dudaron que lo lograría.

# CONTENIDO

## ÍNDICE

|                                      |            |
|--------------------------------------|------------|
| <b>RESUMEN .....</b>                 | <b>i</b>   |
| <b>DEDICATORIA.....</b>              | <b>ii</b>  |
| <b>AGRADECIMIENTOS .....</b>         | <b>iii</b> |
| <b>CONTENIDO .....</b>               | <b>iv</b>  |
| <b>LISTADO DE ABREVIATURAS .....</b> | <b>vi</b>  |

|                                                                                           |          |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| <b>CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN .....</b>                                                     | <b>1</b> |
| 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....                                                      | 2        |
| 1.2 OBJETIVOS .....                                                                       | 3        |
| 1.2.1 Objetivo general .....                                                              | 3        |
| 1.2.2 Objetivos particulares.....                                                         | 3        |
| 1.3 JUSTIFICACIÓN.....                                                                    | 3        |
| 1.4 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS .....                                                        | 4        |
| REFERENCIAS .....                                                                         | 5        |
| <b>CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO .....</b>                                                    | <b>6</b> |
| 2.1 SENSORES EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ .....                                             | 6        |
| 2.1.1 Características estáticas y dinámicas de los sensores.....                          | 7        |
| 2.2 SENSORES DE FLUJO DE MASA DE AIRE .....                                               | 9        |
| 2.2.1 Sensor de flujo de aire tipo paleta (Vane Air Flow, VAF) .....                      | 9        |
| 2.2.2 Sensor de flujo de aire tipo alambre caliente .....                                 | 10       |
| 2.2.3 Sensor de flujo de aire tipo Karman Vortex.....                                     | 11       |
| 2.3 SENSORES DE FLUJO DE MASA DE AIRE MEMS .....                                          | 12       |
| 2.3.1 Principio de funcionamiento de un sensor de flujo de aire de película delgada ..... | 14       |
| 2.4 FABRICACIÓN DE DISPOSITIVOS MICROELECTRÓNICOS .....                                   | 16       |
| 2.4.1 Técnicas de limpieza .....                                                          | 17       |
| 2.4.2 Depósito de películas delgadas.....                                                 | 19       |
| 2.4.3 Fotolitografía .....                                                                | 21       |
| 2.4.4 Técnicas de grabado .....                                                           | 23       |

|                                                               |           |
|---------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.5 SISTEMAS MICROELECTROMECHANICOS (MEMS).....               | 25        |
| 2.5.1 Micromaquinado De Volumen .....                         | 26        |
| 2.5.2 Micromaquinado de Superficie .....                      | 26        |
| 2.6 MATERIALES PARA MEMS.....                                 | 27        |
| REFERENCIAS .....                                             | 28        |
| <b>CAPÍTULO 3. DESARROLLO .....</b>                           | <b>31</b> |
| 3.1 CONSIDERACIONES DE DISEÑO .....                           | 31        |
| 3.1.1 Tipo de estructura .....                                | 31        |
| 3.1.2 Substrato/Conductividad térmica, k.....                 | 32        |
| 3.1.3 Coeficiente de temperatura de resistencia, TCR.....     | 33        |
| 3.1.4 Geometría del sensor .....                              | 33        |
| 3.2 DISEÑO DEL LAYOUT .....                                   | 34        |
| 3.3 FABRICACIÓN DE LA MASCARILLA.....                         | 36        |
| 3.4 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES .....                       | 36        |
| 3.4.1 Aluminio .....                                          | 37        |
| 3.4.2 Fotoresina S1813.....                                   | 38        |
| 3.5 PROCESO DE FABRICACIÓN.....                               | 39        |
| REFERENCIAS .....                                             | 46        |
| <b>CAPITULO 4. CARACTERIZACIÓN .....</b>                      | <b>47</b> |
| 4.1 CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA.....                            | 47        |
| 4.1.1 Determinación teórica de la resistencia eléctrica ..... | 47        |
| 4.1.2 Medición de la resistencia eléctrica.....               | 50        |
| 4.2 CARACTERIZACIÓN TÉRMICA.....                              | 55        |
| 4.2.1 Resultados de procesamiento espira grande.....          | 60        |
| 4.2.2 Resultados de procesamiento espira pequeña.....         | 67        |
| REFERENCIAS .....                                             | 75        |
| <b>CAPITULO 5. CONCLUSIONES .....</b>                         | <b>76</b> |
| <b>TRABAJO A FUTURO .....</b>                                 | <b>77</b> |
| <b>ANEXO A .....</b>                                          | <b>78</b> |

## LISTADO DE ABREVIATURAS

|         |                                       |
|---------|---------------------------------------|
| ° C     | Grados Centígrados                    |
| µm      | Micrómetro                            |
| Al      | Aluminio                              |
| Al-etch | Grabado de Aluminio                   |
| Au      | Oro                                   |
| BOS     | Background Oriented Schlieren         |
| CI      | Circuitos Integrados                  |
| CO      | Monóxido de Carbono                   |
| Cr      | Cromo                                 |
| DI      | Desionizada                           |
| ECM     | Módulo de Control Eléctrico           |
| h       | Coeficiente de Transferencia de Calor |
| HC      | Hidrocarburos                         |
| HF      | ÁCIDO Fluorhídrico                    |
| I       | Corriente Eléctrica                   |
| k       | Conductividad Térmica                 |
| mA      | Miliamperios                          |
| MAF     | Mass Air Flow                         |
| MAP     | Manifold Absolute Pressure            |
| MEMS    | Sistemas Microelectromecánicos        |
| nm      | Nanómetros                            |

|                  |                                           |
|------------------|-------------------------------------------|
| P                | Energía Eléctrica                         |
| Pt               | Platino                                   |
| Q                | Flujo de Calor                            |
| R                | Resistencia Eléctrica                     |
| RPM              | Revoluciones Por Minuto                   |
| Si               | Silicio                                   |
| SiO <sub>2</sub> | Dióxido de Silicio                        |
| T                | Temperatura                               |
| Ta               | Temperatura Ambiente                      |
| TCR              | Coeficiente de Temperatura de Resistencia |
| Tmax             | Temperatura Máxima                        |
| V                | Voltaje                                   |
| VAF              | Vane Air Flow                             |
| W                | Watts                                     |
| $\sigma$         | Constante de Stefan-Boltzmann             |
| $l$              | Longitud                                  |
| $t$              | Espesor                                   |
| $w$              | Ancho                                     |
| $\varepsilon$    | Emisividad                                |
| $\rho$           | Resistividad del Material                 |

## CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, los sensores de flujo que miden la velocidad del fluido o la tasa de flujo másico se utilizan para una gran variedad de aplicaciones, como la industria automotriz, monitoreo ambiental e instrumentación médica [1]. Específicamente, en la industria automotriz los sensores de flujo se emplean para medir el flujo de masa de aire transitorio y de estado estable en un motor. El proceso de combustión de un motor se puede controlar mezclando la proporción adecuada de combustible con el flujo másico de aire de admisión. Por lo tanto, la medición precisa del flujo de masa de aire en un motor ayuda a determinar el flujo de combustible del motor, para controlar las emisiones de partículas contaminantes, rendimiento del combustible de los vehículos y vitalidad del motor [2-3].

Actualmente, los sensores de flujo de aire convencionales típicos que se encuentran en los sistemas automotrices son los anemómetros de hilo caliente. El principio de funcionamiento de este tipo de sensores consiste en calentar un alambre mediante corriente eléctrica para mantener un diferencial de temperatura constante entre el elemento calentado y otro elemento no calentado. El flujo de aire que pasa por el elemento calentado reduce su temperatura, lo que requiere un aumento de corriente para mantener el mismo diferencial de temperatura constante. La corriente eléctrica suministrada al elemento calentado se puede medir y obtener el flujo de masa de aire. Las ventajas de esta técnica incluyen: precisión media aceptable, automatización y permite medir flujos turbulentos. Sin embargo, también presenta algunos inconvenientes, como son: baja tasa de respuesta dinámica, se contamina fácilmente, son voluminosos y tienen un alto costo.

Recientemente, los sensores de flujo de aire a microescala desarrollados con la tecnología de Sistemas Microelectromecánicos (MEMS) están atrayendo más la atención. Los sensores miniaturizados reducen el consumo de energía, normalmente son de bajo costo debido a la naturaleza de la fabricación por lotes y se caracterizan por una gran sensibilidad y precisión. De los diferentes métodos de detección de flujo de aire, se utilizan dos principios en el campo de los MEMS: mecánico y térmico. La estructura mecánica recoge la fuerza de arrastre directamente del flujo de aire y provoca una tensión o deformación de las piezas mecánicas [4]. Mientras que la medición de flujo térmico se basa en la detección de transferencia de calor por convección desde un elemento sensor resistivo calentado eléctricamente y el flujo de aire [5]. Este tipo de sensor, a diferencia del mecánico posee una estructura simple, reproducible y robusta, pero se caracteriza

por tener una pérdida de calor por conducción alta, característica no deseada en este tipo de estructuras.

No obstante, en este proyecto de tesis se presenta el desarrollo de un sensor de flujo de película delgada con un principio de funcionamiento térmico, ya que las pérdidas por conducción se asocian principalmente al material de sustrato, por lo cual se propone utilizar un material con una baja constante térmica ( $k$ ) y con un espesor grande para compensar la pérdida de calor por conducción y así, aprovechar las características de robustez y fabricación de este tipo de sensor. También, utilizaremos un material para el elemento térmico con un alto coeficiente de temperatura de resistencia (TCR) para tener una alta sensibilidad del sensor, además de las ventajas intrínsecas de un sensor fabricado con la tecnología de MEMS.

## **1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Como es bien sabido, la sociedad se ha visto afectada por la necesidad del diagnóstico eficiente de sistemas electrónicos, para así aumentar la vitalidad y eficiencia de los dispositivos. Los sensores juegan un papel importante para la detección de fallas que son caracterizadas típicamente por un cambio en los parámetros del sensor o en sus características operativas [6]. Sin embargo, los sensores utilizados comúnmente presentan fallas en su funcionamiento, ya que presentan una baja tasa de rapidez en su respuesta, son costosos debido a los métodos de fabricación que utilizan al igual que los materiales que implementan, son susceptibles al polvo y baja sensibilidad.

Por otro lado, al tener presencia de una mala calidad de mezcla aire-combustible, mejor conocida como mezcla estequiométrica, provoca humo negro proveniente del escape ocasionando la formación de monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos (HC), exceso de consumo de gasolina, fallos de fuerza al acelerar el vehículo cuando enciende, disminución de RPM del auto o paro total, oscilaciones cuando el voltaje se encuentra fuera del límite de operación, entre otras.

Teniendo en cuenta las fallas presentes, se requiere que este tipo de sensores cuenten con un tiempo de respuesta rápida, proporcione una correcta mezcla estequiométrica para evitar ruidos y detonaciones en el motor y cuente con mayor sensibilidad. Es por ello, que la incorporación de la tecnología de sistemas microelectromecánicos (MEMS), es una opción prometedora para la implementación de dispositivos novedosos, ya que ofrece características de miniaturización, mejor tiempo de respuesta, menor consumo de potencia, resistencia al polvo y bajo costo.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo general**

El objetivo general del presente proyecto de tesis es la fabricación y caracterización de estructuras resistivas de película delgada con geometría en espiral para su posible aplicación como un sensor de flujo.

### **1.2.2 Objetivos particulares**

A fin de cumplir con el objetivo general, se desarrollan los siguientes objetivos específicos:

1. Investigar y estudiar bibliografía relacionada con el tema.
2. Recibir capacitación sobre la tecnología de microelectrónica y cuartos limpios.
3. Diseñar el Layout de las estructuras resistivas por medio de Tanner L-Edit.
4. Recibir entrenamiento de cada uno de los equipos que se utilizarán dentro del laboratorio de micro y nanodispositivos fotónicos (Cuarto limpio).
5. Fabricar las estructuras resistivas con geometría en espiral.
6. Realizar la caracterización eléctrica y térmica de las estructuras fabricadas.

## **1.3 JUSTIFICACIÓN**

El desarrollo de éste microdispositivo para sensar flujo se basa en promover el bienestar de la sociedad ante las exposiciones contaminantes atmosféricas, ya que las principales fuentes productoras de las emisiones son los vehículos de gasolina y/o diésel, y esto afecta en el ámbito de productividad, economía y salud en todo México. Es por ello por lo que la innovación asociada a esta demanda de necesidades genera la indagación en las nuevas tecnologías, como son los MEMS, ya que, gracias a esta tecnología es posible obtener sensores miniaturizados, eficientes, con un incremento en su tiempo de respuesta y sensibilidad.

Con la implementación de la tecnología MEMS, se realizará la fabricación y caracterización de estructuras resistivas para su aplicación como un sensor de flujo para brindar un correcto funcionamiento de dispositivos electrónicos del motor, aumentando la eficacia y diagnóstico de fallos, para así evitar pérdidas de potencia, niveles altos de CO, humo negro por el escape y respuesta tardía al acelerar.

Por último, el desarrollo de esta tesis sin duda generará información de interés para la comunidad científica, ya que debido a las necesidades ambientales que son requeridas continuamente por las empresas automotrices y para brindar una mejor calidad de aire hacia la sociedad, es necesario la implementación de dispositivos microelectrónicos. Los resultados obtenidos son de gran importancia, ya que la industria automotriz, va en busca de nuevas tecnologías y serán clave para la comunidad científica y desarrollo de automóviles modernos que brinden confort y seguridad.

## **1.4 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS**

Los capítulos de esta tesis están organizados de la siguiente manera; el capítulo 2, presenta el marco teórico, en el cual se abordan los siguientes temas: los sensores de flujo en la industria automotriz, los sensores de flujo de masa de aire MEMS, su principio de funcionamiento, fabricación de dispositivos MEMS, técnicas de grabado, sistemas MEMS y materiales mayormente utilizados para MEMS. En el capítulo 3, se describe el desarrollo que se llevó a cabo para la fabricación de las estructuras resistivas, abordando apartados como: consideraciones de diseño, diseño del Layout, fabricación de la mascarilla, caracterización de materiales; así también, se describe a detalle cada paso realizado en la fabricación. En el capítulo 4, se presenta el análisis matemático y caracterización eléctrica de cada una de las estructuras realizadas; así mismo, la descripción paso a paso de la caracterización térmica, utilizando el método óptico Background Oriented schlieren (BOS) y mostrando el resultado del procesamiento de imágenes obtenidas de las estructuras. Finalmente, en el capítulo 5, se encuentra la conclusión del trabajo de tesis y el trabajo a futuro propuesto.

## REFERENCIAS

- [1] Wang, Y. H., Chen, C. P., Chang, C. M., Lin, C. P., Lin, C. H., Fu, L. M., & Lee, C. Y. “MEMS-based gas flow sensors. Microfluidics and nanofluidics” 6(3), 333-346, (2009).
- [2] W.J. Fleming, “New automotive sensors—a review”, IEEE Sens. J. 8 1900–1921 (2008).
- [3] M.S. Rauscher, M. Schardt, M.H. Köhler, A.W. Koch, “Dual-channel midinfrared sensor based on tunable fabry-pérot filters for fluid monitoring applications”, Sens. Actuat. B 259, 420–427 (2018).
- [4] C.-M. Ho, Y.-C. Tai, “Micro-electro-mechanical-systems (MEMS) and fluidflows”, Annu. Rev. Fluid Mech. 30 579–612, (1998).
- [5] R. Bogue, “Recent developments in MEMS sensors: a review of applications,markets and technologies”, Sens. Rev. 33, 300–304 (2013).
- [6] J. Mohammadpour, M. Franchek, and K. Grigoriadis, “A survey on diagnostic methods for automotive engines,” Int. J. Engine Res., vol. 13, no. 1, pp. 41–64, (2012).

## **CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 SENSORES EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ**

Los sensores son componentes esenciales de los sistemas de control electrónico automotriz. Un sensor se define como un "dispositivo que transforma (o transducen) cantidades físicas como presión o aceleración (llamadas medidas) en señales de salida (generalmente eléctricas) que sirven como entradas para sistemas de control" [1 - 2].

Hace no mucho tiempo los sensores primarios para automóviles eran dispositivos discretos que se usaban para medir la presión del aceite, el nivel de combustible, la temperatura del refrigerante, etc. A partir de fines de la década de 1970, los módulos de control de motores de automóviles basados en microprocesadores se introdujeron paulatinamente para cumplir con las reglamentaciones federales sobre emisiones. Estos sistemas requerían nuevos sensores como: el sensor de presión absoluta múltiple (MAP), temperatura del aire y sensores de gases de escape.

Actualmente, la necesidad del uso de sensores está evolucionando y creciendo progresivamente. Por ejemplo, en aplicaciones de control de motores, el número de sensores utilizados aumentó de aproximadamente diez en el año 2012 a más de treinta en el año 2022. Hoy en día, los ingenieros automotrices se enfrentan a una multitud de estrictos requisitos. Por ejemplo, los sensores de automóviles normalmente deben tener un error combinado/total inferior al 3% en todo su rango de temperatura de funcionamiento y cambio de mensurando, incluidos todos los errores de medición debidos a la no linealidad, la histéresis, la sensibilidad a la temperatura y la repetibilidad. Además, aunque se pueden fabricar cientos de miles de sensores, la calibración de cada sensor debe ser intercambiable dentro del 1% [1].

Los requisitos ambientales de operación automotriz también son muy severos, con temperaturas de 40 ° C a 125 ° C (compartimento del motor), barridos de vibraciones de hasta 10 g durante 30 h, caídas sobre piso de concreto (para simular percances de ensamblaje), interferencia y compatibilidad electromagnética, etc. Cuando se compra en gran volumen para uso automotriz, el costo también es siempre una preocupación importante. Por lo tanto, los sensores automotrices deben satisfacer un difícil equilibrio entre precisión, robustez, capacidad de fabricación, intercambiabilidad y bajo costo [1-2].

La figura 1, muestra una descripción general de los diferentes tipos de sensores automotrices, divididos en tres grupos principales. Específicamente, en este trabajo de tesis nos centraremos en los sensores de flujo de masa de aire, los cuales detallaremos en la siguiente sección.

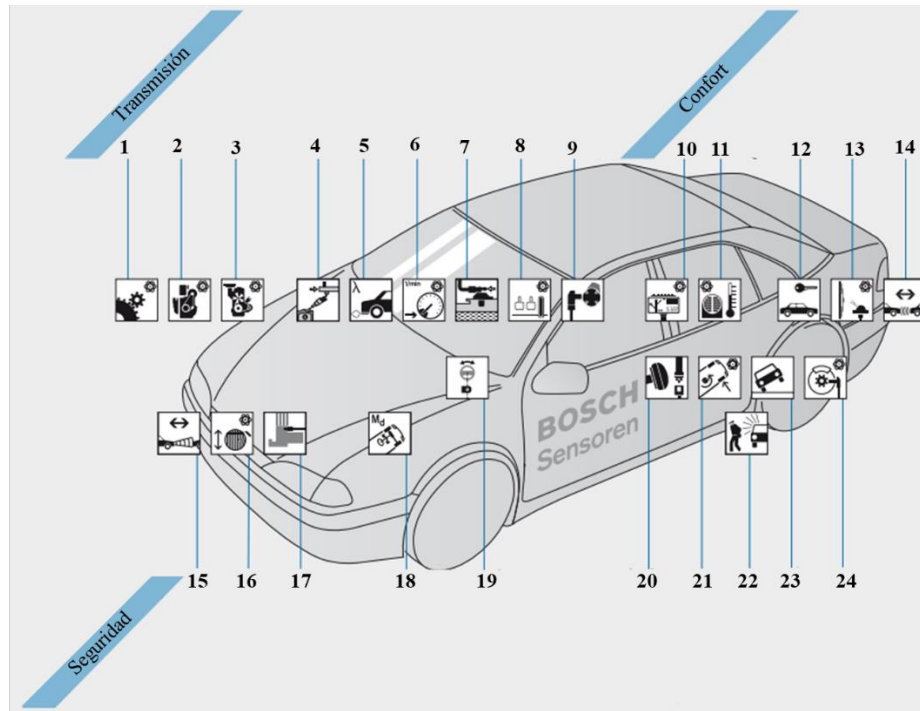


**Figura 1.** Descripción general de los sensores automotrices. Transmisión: (1) Sensor de presión, (2) Sensor de presión de sobrealimentación, (3) Sensor de masa de aire, (4) Sensor de alta presión, (5) Sensor de oxígeno lambda, (6) Sensor de velocidad, (7) Sensor de presión del tanque, (8) Sensor del pedal del acelerador, (9) Sensor de posición y ángulo de giro. Confort: (10) Sensor de velocidad de yaw, (11) Sensor de calidad de aire, (12) Sensor de presión, (13) Sensor de lluvia. Seguridad: (15) Radar de alcance, (16) Sensor de iniciación, (17) Sensor de presión alta, (18) Sensor de torque, (19) Sensor de ángulo del volante, (20) Sensor de aceleración (bolsa de aire), (21) Sensor de frecuencia yaw, (22) Sensor de iniciación, (23) Sensor de frecuencia yaw, (24) Sensor de velocidad (ABS) [3].

### 2.1.1 Características estáticas y dinámicas de los sensores

Los sensores poseen características que se agrupan en dos partes: estáticas y dinámicas.

Las características estáticas describen el comportamiento del sensor en régimen permanente o con cambios muy lentos de la variable a medir, es decir, no presentan variaciones al momento de realizar la medición. En la tabla 2.1, se muestran descritas las características estáticas más comunes en los sensores.

**Tabla 2.1.** Descripción de las características estáticas.

| <b>Características</b> | <b>Definición</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Exactitud              | Aproximación con la cual la lectura de un instrumento se acerca al valor real de la variable medida [5].                                                                                                                                                                                                  |
| Precisión              | Capacidad de un instrumento en dar el mismo valor de la magnitud medida, al medir varias veces en condiciones determinadas [4].                                                                                                                                                                           |
| Sensibilidad           | Capacidad de un instrumento de medida para detectar la mínima sensación que le hace provocar una variación [4].                                                                                                                                                                                           |
| Repetibilidad          | Especifica la habilidad del instrumento para entregar la misma lectura en aplicaciones repetidas del mismo valor de la variable medida [4].                                                                                                                                                               |
| Reproducibilidad       | Capacidad del instrumento de mantener una misma lectura cuando el valor de la especie medida está a valor constante [4].                                                                                                                                                                                  |
| Resolución             | Cambio más pequeño en el valor medido al cual responde el instrumento [5].                                                                                                                                                                                                                                |
| Linealidad             | Por lo general los instrumentos se diseñan de forma que tengan una respuesta lo más lineal posible, es decir, que para un determinado incremento del parámetro que estamos midiendo, el desplazamiento correspondiente del indicador sea siempre el mismo, independientemente de la posición de éste [5]. |

Mientras que las dinámicas, describen el comportamiento del sensor en régimen transitorio. En la tabla 2.2, se muestra la descripción de estas características.

**Tabla 2.2.** Descripción de las características dinámicas.

| <b>Característica</b> | <b>Definición</b>                                                                                                                                                       |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Error dinámico        | Diferencia entre la cantidad indicada en un instante de tiempo dado y el verdadero valor del parámetro que se está midiendo [5].                                        |
| Tiempo de respuesta   | Tiempo transcurrido entre la aplicación de una función escalón y el instante en que el instrumento indica un cierto porcentaje del valor final [5].                     |
| Sobrealcance          | Se presenta cuando la magnitud medida rebasa la magnitud real en función del tiempo. La diferencia entre el valor máximo y el valor final se denomina sobrealcance [5]. |

## 2.2 SENSORES DE FLUJO DE MASA DE AIRE

Los sensores de flujo de masa de aire miden el estado estable y el flujo de masa transitorio de aire en un motor. El proceso de combustión de un motor se controla mezclando la proporción correcta de combustible con la masa del flujo de aire de admisión. La medición precisa del flujo de masa de aire permite la medición precisa del combustible en un motor para el control de las emisiones, la economía, el rendimiento y la capacidad de conducción del vehículo [6-8]. El sensor de flujo de masa de aire se localiza directamente en el conducto de entrada de aire, entre el filtro de aire y el cuerpo de aceleración, que es donde puede medir la cantidad de aire fresco que ingresa al motor. Existen diferentes tipos de sensores de flujo de masa de aire que se utilizan en los motores de tipo carburador convencionales: el sensor de paleta (VAF) y el Karman Vortex, son dos modelos antiguos de sensores de flujo de aire que pueden ser fácilmente identificados por su forma. El más nuevo y común es el sensor de flujo de alambre caliente [9]. A continuación, se presenta una descripción de cada uno de ellos.

### 2.2.1 Sensor de flujo de aire tipo paleta (Vane Air Flow, VAF)

Este sensor de flujo de masa de aire es de tipo mecánico y se encuentra ubicado arriba del acelerador. Su función es medir el flujo de masa de aire que entra al motor mediante la deflexión de una aleta mecánica accionada por un resorte. En consecuencia, el módulo de control electrónico (ECM) calcula la duración de inyección y de encendido [10]. La figura 2, muestra un esquema del sensor de flujo tipo VAF y sus principales componentes.

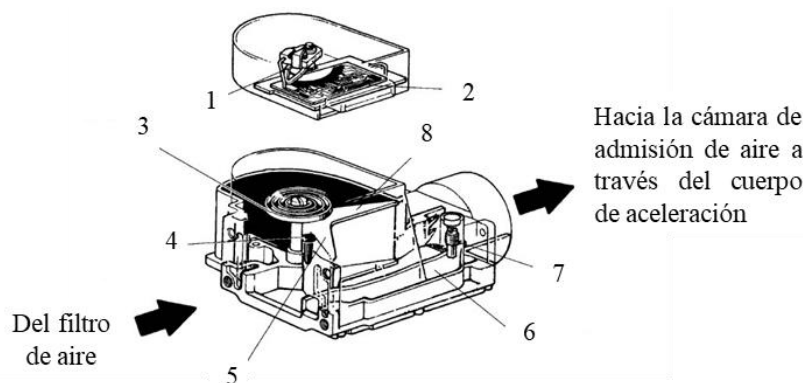


**Figura 2.** Esquema del sensor de flujo tipo VAF y sus principales componentes: (1) Deslizador, (2) Potenciómetro, (3) Resorte, (4) Sensor de temperatura IAT, (5) Plato medidor, (6) Conducto Bypass, (7) Tornillo de ajuste y (8) Plato compensador [10].

Su funcionamiento es el siguiente: el resorte es empujado por una cantidad proporcional de flujo de aire que entra al motor (aire de admisión). La deflexión del resorte es medida por medio de un potenciómetro. Mientras más se abra la aleta mecánica, mayor será el cambio de resistencia del potenciómetro. El plato compensador se ubica dentro de la cámara de amortiguación y actúa como un amortiguador para evitar el movimiento rápido o vibración del plato medidor, ver figura 3 [10-11].

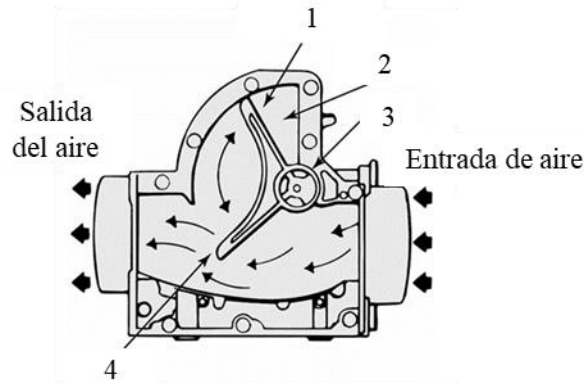


**Figura 3.** Sistema de operación del sensor VAF. (1) Placa de compensación, (2) Cámara de amortiguación, (3) Muelle de retorno, (4) Placa de medición.

Este sensor también contiene un switch de seguridad para la bomba eléctrica de combustible. El flujo de aire dentro del motor activa la bomba. Además, cuenta con un tornillo de ajuste que controla la cantidad de aire que pasa por la aleta mecánica. Una de las más grandes desventajas del sensor VAF es su intolerancia con las fugas de aire. Este tipo de fugas hace que entre aire que no es medido hacia el motor y causa problemas de conducción. Además, es vulnerable a la suciedad.

### 2.2.2 Sensor de flujo de aire tipo alambre caliente

Este sensor está compuesto por un filamento (cable), que es accionado por la unidad de mando con un voltaje constante. Al momento de aplicar este voltaje, se genera un aumento de temperatura en el cable y cuando hay flujo de aire, la temperatura del cable disminuye [12]. En la Figura 4, se muestra el esquema del sensor y sus principales componentes.

El funcionamiento de este sensor también es a partir de la ley de Ohm, debido a que, al haber cambios en la resistencia del cable a causa del flujo de aire, la unidad de control compensará esa pérdida enviando más corriente eléctrica, para así mantenerlo caliente. Sin embargo, aunque

presente excelentes características de funcionamiento, los sensores de este tipo no son demasiado precisos, se necesitan calibrar regularmente y no poseen un alto rango de vida en sus baterías.

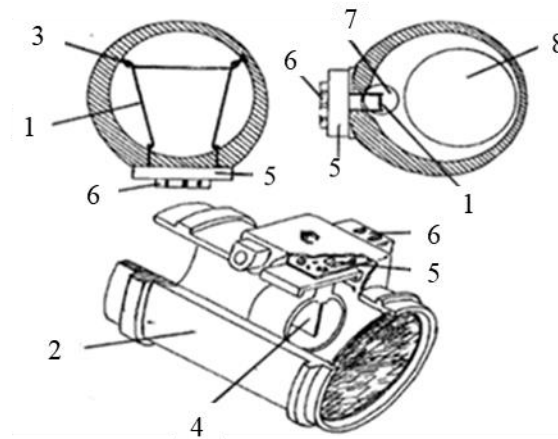


**Figura 4.** Esquema del sensor de flujo de aire tipo cable caliente. (1) Hilo de platino, (2) Cuerpo del medidor, (3) Soporte del hilo, (4) Lámina caliente, (5) Amplificador electrónico, (6) Conector eléctrico, (7) Conducto de desvío, (8) Conducto principal [10].

### 2.2.3 Sensor de flujo de aire tipo Karman Vortex

Aunque el sensor VAF y el de tipo alambre caliente son los más comunes para medir el aire que entra hacia el motor, el sensor Karman Vortex se ha utilizado en la producción de vehículos desde 1976 [13-14]. Este medidor de flujo de aire tipo mecánico proporciona el mismo tipo de información que el VAF, es decir mide la cantidad de masa de aire que ingresa al motor. La figura 5, muestra un esquema representativo del sensor de flujo de aire tipo Karman Vortex y sus principales componentes.

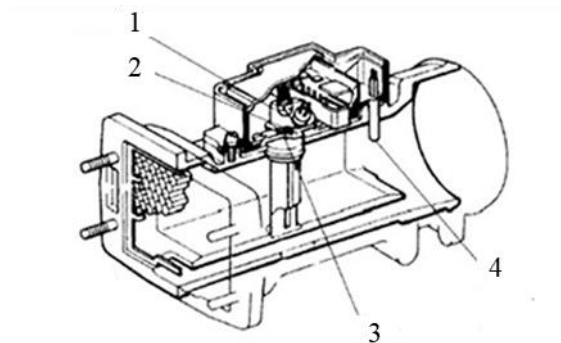


**Figura 5.** Esquema del sensor de flujo tipo Karman Vortex y sus principales componentes: (1) Fotocople, (2) Espejo, (3) Orificio direccionador de presión y (4) sensor de temperatura [10].

Su principio de operación es el siguiente: Cuando el flujo de aire de admisión reacciona en contra del generador de vortex, crea un efecto de remolino. Esta oscilación o remolino es lo que se conoce con el nombre de "Karman Vortex". Dentro del generador vortex, a estas oscilaciones se les mide la frecuencia, las cuales varían en proporción con la velocidad del aire que está ingresando al motor. Los vórtices se miden dentro del orificio direccionador de presión, desde el cual sus movimientos oscilantes empujan y jalan un pequeño espejo de metal de manera repetitiva, la rapidez del movimiento será en proporción directa a la frecuencia con que se generen más vortex. Este movimiento, ocasionará que la iluminación del fotocople se aplique y se desvíe alternativamente de un fototransistor. Como resultado, el fototransistor aterrizará a tierra cuando esté iluminado o abrirá el circuito para enviar una señal KS de 5V al ECM cuando el vortex mueva al espejo de lugar, ver figura 6 [10].

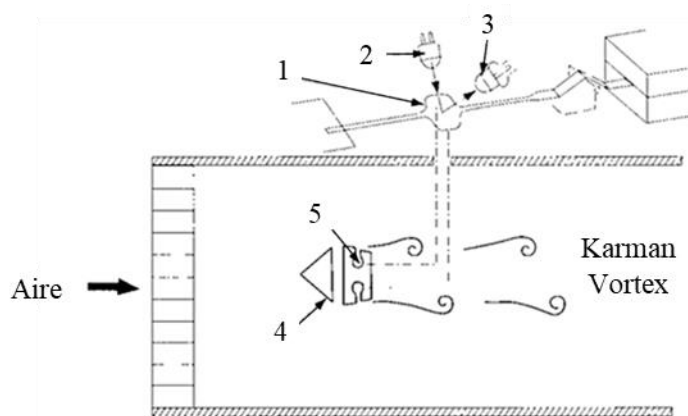


**Figura 6.** Principio de operación del sensor Karman Vortex. (1) Espejo, (2) LED, (3) Fototransistor, (4) Generador de vórtice, (5) Orificio de dirección de presión [10].

De los tipos de sensores de flujo de masa de aire que se utilizan en los motores de tipo carburador convencionales se prefieren los sensores MAF a su tasa de respuesta, que es comparativamente alta con respecto a los sensores convencionales de tipo paleta y Karma Vortex. Aunque son eficientes, aún existe la necesidad de mejorar la tasa de respuesta dinámicamente para un mejor flujo de masa de aire al motor. Por lo cual, es posible incorporar de manera eficiente tecnologías novedosas y sistemas de simulación para reducir el error de los sensores y mejorar sus características [11].

## 2.3 SENSORES DE FLUJO DE MASA DE AIRE MEMS

Los dispositivos MEMS ofrecen características tales como dispositivos de tamaño pequeño, bajo consumo de potencia, bajo costo y escalables que no se podían lograr con los métodos de ingeniería

tradicionales. Recientemente, las tecnologías de microfabricación se han empleado ampliamente para fabricar sensores MEMS para su uso en una amplia gama de aplicaciones, como atención médica, actividades físicas, seguridad, detección ambiental y la industria automotriz [16-17]. Los sensores de flujo de aire MEMS son dispositivos miniaturizados que pueden lograr una alta resolución (hasta unos pocos micro a nano litros por minuto) sensibilidad, precisión y, además, ofrecen una alternativa de bajo costo en comparación con los dispositivos de detección tradicionales [18-19].

De los diferentes métodos de detección de flujo de aire, a menudo se usan dos principios en el campo MEMS: mecánico y térmico. La estructura mecánica recoge la fuerza de arrastre directamente del flujo de aire y provoca tensión o deformación de las piezas mecánicas. La tensión o deformación detectada por un mecanismo piezoresistivo, piezoeléctrico o magnético puede relacionarse a la velocidad y/o dirección del flujo de aire [20-21]. La figura 7, muestra un sensor de flujo de aire de estructura mecánica.

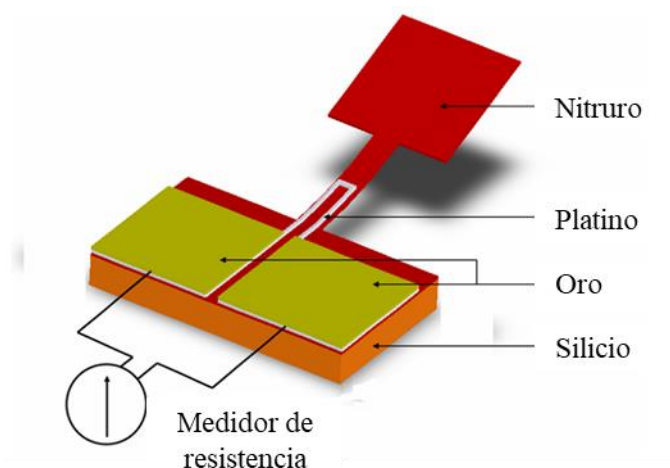


**Figura 7.** Sensor de flujo de aire de tipo mecánico.

Por otra parte, la medición del flujo de aire con métodos térmicos se basa en la detección de la transferencia de calor por convección desde un elemento sensor resistivo calentado eléctricamente al fluido que fluye [22-23]. Este calor es obtenido mediante energía eléctrica, lo cual provoca cambios de temperatura en las superficies de la película por el movimiento convectivo de la corriente de fluido que se está midiendo. Estos cambios de temperatura provocan cambios de resistencia, que se controlan en forma de señales eléctricas [24].

Esta tasa de fluido se puede medir en términos de los cambios de temperatura de la resistencia sensible a la película, que se refleja con precisión en la cantidad de pérdida de calor. La corriente de salida cambiará en medida al cambio de temperatura [25]. Los sensores de flujo térmico cuentan con una estructura simple y de fácil implementación, por lo cual, por estas características, este trabajo de tesis está enfocado en este método de sensado. La figura 8, muestra la estructura típica de un sensor de flujo de aire de tipo térmico. Como puede observarse, su estructura principal se basa en un substrato de silicio o de vidrio y películas de metal delgadas depositadas sobre el substrato [26].

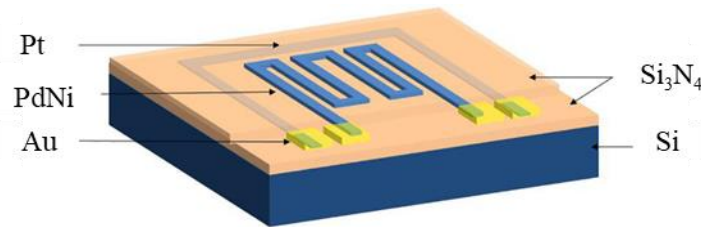


**Figura 8.** Sensor de flujo de aire de tipo térmico.

### 2.3.1 Principio de funcionamiento de un sensor de flujo de aire de película delgada

El principio de detección de un sensor de película caliente se basa en la transferencia de calor de la película calentada al fluido que se va a medir. En un solo conductor con resistencia eléctrica ( $R$ ) la energía eléctrica consumida ( $P$ ) está agregando calor. Este flujo de calor depende de  $R$  y de la corriente [27]:

$$P = R \cdot I^2 \quad (1)$$

El calor insertado se disipará en el ambiente en tres modos de transferencia de calor. El primer modo es la **conducción de calor** [26-27]:

$$Q_{conducción} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

Como se describe en la ecuación 2, la conducción del flujo de calor ( $Q_{conducción}$ ) se realiza a través de un objeto con sección transversal  $A$  en presencia de un gradiente de temperatura. La capacidad de conducir calor para un determinado material se describe mediante la conductividad térmica ( $k$ ).

El segundo modelo es la **convección de calor**, el flujo de calor convectivo ( $Q_{convección}$ ) depende del coeficiente de transferencia de calor ( $h$ ), el área superficial  $A$  y la diferencia de temperatura entre el resistor y el fluido circundante ( $T - T_{fluid}$ ), como se muestra en la ecuación 3 [26-27]:

$$Q_{convección} = hA(T - T_{fluid}) \quad (3)$$

De la ecuación anterior, puede observarse que  $h$  también depende de  $(T - T_{fluid})$ . El flujo de calor convectivo se puede diferenciar entre convección natural y convección forzada. En la convección natural el movimiento del fluido está influenciado por medios naturales mientras que, en la convección forzada, el movimiento de los fluidos está influenciado por medios externos.

El tercer modo es la **radiación**, dependiendo de la emisividad ( $\varepsilon$ ), la superficie  $A$  y la temperatura ( $T$ ) de un objeto, parte de la potencia se puede disipar de esta manera [26-27].

$$Q_{radiation} = \varepsilon\sigma AT^4 \quad (4)$$

Donde,  $\sigma$  representa la constante de Stefan-Boltzmann. En el contexto de los sensores térmico de película delgada, debe subrayarse que la radiación  $Q_{radiación}$  aumenta con la cuarta potencia de la temperatura [27].

La potencia disipada ( $P_{diss}$ ) es igual a la suma de los tres flujos de calor disipados descritos por las ecuaciones anteriores. La figura 9, ilustra los tres modos de disipación de calor en un sensor de película delgada [26-27].

$$P_{diss} = Q_{conducción} + Q_{convección} + Q_{radiación} \quad (5)$$

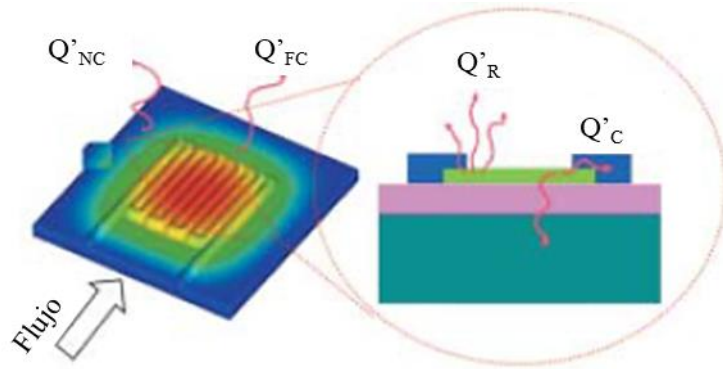


**Figura 9.** Diferentes flujos de calor disipados en los sensores de película caliente.  $Q'_{NC}$ : convección natural,  $Q'_{FC}$ : convección forzada,  $Q'_R$ : radiación térmica y  $Q'_C$ : conducción térmica [26].

Debe notarse que cuando la estructura es lo suficientemente pequeña, las pérdidas por radiación y convección natural son insignificantes para la mayoría de las condiciones de operación. Para optimizar el rendimiento del sensor para una mayor sensibilidad y un menor consumo de energía,

se puede maximizar  $Q_{FC}$  para una mejor sensibilidad y minimizar  $Q_C$  para un menor consumo de energía.

Al tener velocidades variables en el tiempo, también se debe considerar la influencia de la capacidad para almacenar energía térmica. El flujo de calor temporal asociado ( $Q_{capacity}$ ) depende de la masa del alambre (m), la capacidad calorífica (c) y el aumento de temperatura variable con el tiempo  $\left[ \frac{d(T - T_{fluid})}{dt} \right]$  como [27]:

$$Q_{capacity} = mc \frac{d(T - T_{fluid})}{dt} \quad (6)$$

Al aplicar una potencia eléctrica (P) al sensor, la temperatura aumenta continuamente hasta que la suma de todos los flujos de calor vuelve a llegar a cero, lo que significa que logra un estado estable como se expresa en la ecuación 7. Para la función de un sensor de flujo de aire de película caliente, el flujo de calor convectivo ( $Q_{convection}$ ) será el modo de disipación de calor dominante [27].

$$P = R(T) \cdot I^2 = hA(T - T_{fluid}) + kA \frac{dT}{dx} + mc \frac{d(T - T_{fluid})}{dt} \quad (7)$$

Es esencial para la función del sensor que el coeficiente de transferencia de calor (h) no sea constante; este depende de la velocidad del flujo y del estado del flujo (laminar, turbulento). Para los materiales típicos de película caliente, el coeficiente de temperatura es positivo, por lo que la resistencia aumenta con la temperatura.

Además, como puede verse en la ecuación 7, tanto un cambio de h como de  $T_{fluid}$  afectan la resistencia y la corriente en funcionamiento. Mediante el diseño, la superficie A del sensor se puede adaptar para reducir o aumentar la superficie para la transferencia de calor. La conducción no deseada a través del substrato se puede reducir seleccionando un material con una k menor o aumentando el grosor del substrato en caso de que el anemómetro se adhiera a un cuerpo con una k mayor [27].

## 2.4 FABRICACIÓN DE DISPOSITIVOS MICROELECTRÓNICOS

La tecnología de fabricación de dispositivos microelectrónicos consiste en desarrollar una serie de procesos en un orden específico. Algunas etapas individuales se repiten varias veces durante todo el proceso de fabricación, no necesariamente en secuencia, ver figura 10. Estos procesos,

normalmente incluyen: limpieza química húmeda general, depósito de películas delgadas, procesos fotolitográficos, revelado y grabado de metal, por mencionar algunos [28].

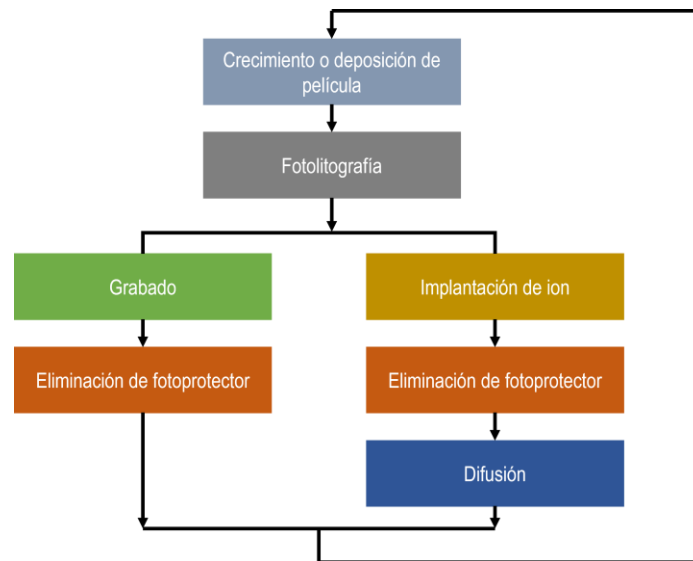


**Figura 10.** Procesos de fabricación [28].

### 2.4.1 Técnicas de limpieza

Las superficies de sustrato limpias son fundamentales para obtener el máximo rendimiento y confiabilidad a largo plazo de componentes y dispositivos microelectrónicos. Se utilizan técnicas de limpieza para eliminar partículas e impurezas de modo que se puedan obtener superficies libres de contaminación. Sin embargo, dichos métodos de limpieza también deben poder hacer esto sin dañar la superficie del sustrato. Los procedimientos de limpieza también deben ser seguros, simples, económicos y producir un mínimo de residuos peligrosos [28].

Son muchos los aspectos que intervienen en la obtención de superficies limpias. Existen numerosos tipos de contaminantes, fuentes de contaminación y técnicas de limpieza para evitar que los contaminantes invadan los sustratos y superficies. La figura 11, muestra las principales fuentes de contaminación que se encuentran en las superficies de los sustratos [28].

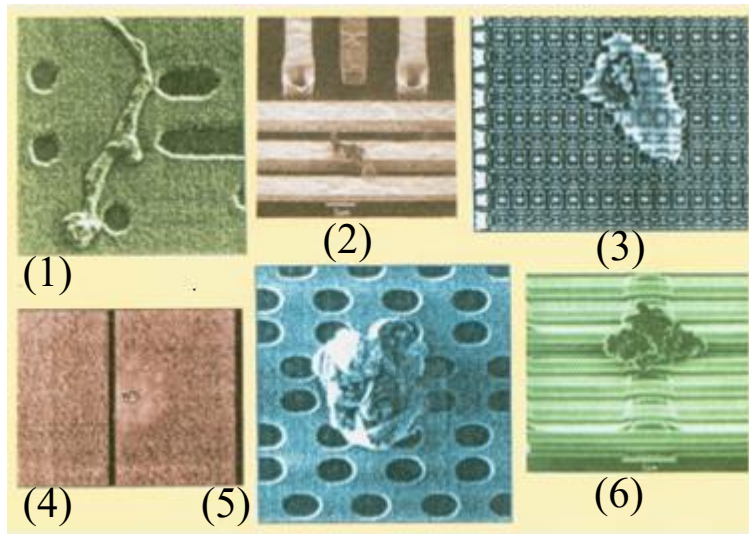


**Figura 11.** Fotografías SEM de ejemplos de tipos de partículas que se encuentran en superficies de substratos: (1) material adicional; (2) partícula incrustada; (3) patrón faltante; (4) escamas; (5) partícula superficial; (6) patrón faltante [28].

Los procesos de limpieza suelen ser una serie de pasos diseñados para eliminar tanto las partículas grandes como las pequeñas. Estos métodos emplean procesos físico-secos y químico-húmedos para alcanzar el objetivo. Los principales procesos de limpieza utilizados en microelectrónica se detallan a continuación:

#### **2.4.1.1 Limpieza con Nitrógeno**

El proceso de remoción de partículas más simple es soplar la superficie de la oblea usando un **rocío de nitrógeno filtrado a alta presión** de una pistola de mano ubicada en las estaciones de limpieza. Las pistolas de purga de nitrógeno son eficaces para eliminar la mayoría de las partículas grandes. Dado que las pistolas son de mano, los operadores deben usarlas de una manera que no contamine otras obleas en la estación.

#### **2.4.2.2 Limpieza Química Húmeda**

La limpieza química húmeda ha sido la técnica estándar utilizada para eliminar películas unidas químicamente y moléculas y átomos contaminantes de las superficies de las obleas. Algunos procedimientos de limpieza en húmedo también son efectivos para eliminar partículas. Los principales tipos de limpieza química húmeda y sus objetivos de limpieza se describen a continuación:

- i. **Limpieza química general.** Se utiliza para eliminar contaminación orgánica, como polvo, grasa y huellas. Su proceso consiste en:
  - a) Acetona por 10 min en sistema de ultrasonido.
  - b) Alcohol isopropílico por 10 min en sistema de ultrasonido.
  - c) 2 enjuagues en agua desionizada (DI).
  
- ii. **Limpieza química RCA.** Se utiliza para limpiar impurezas de obleas con productos altamente reactivos. Si la oblea cuenta con fotoresistencia, se elimina mediante un paso preliminar que consiste en sumergir la oblea en una mezcla de ácido sulfúrico y peróxido de hidrogeno, llamado Piraña –  $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ . El proceso de la limpieza química RCA consiste en [28]:
  - a) RCA 1. Elimina contaminación de películas orgánicas y de algunos metales. Consiste en una mezcla de agua, peróxido de hidrogeno e hidróxido de amonio ( $\text{H}_2\text{O: H}_2\text{O}_2\text{:NH}_4\text{OH}$ ), la solución se calienta a  $70^\circ\text{C}$  y se sumergen las muestras durante 10 min.
  - b) Enjuague en agua DI.
  - c) RCA 2. Elimina iones inorgánicos, alcalinos y metales pesados. Es una mezcla de  $\text{H}_2\text{O: HCl: H}_2\text{O}_2$ , la solución se calienta a  $70^\circ\text{C}$  y se sumergen las muestras durante 10 min.
  - d) Enjuague en agua DI.
  - e) Secado en nitrógeno de alta pureza.
  
- iii. **Eliminación de óxido nativo.** El proceso de eliminación de óxido nativo se realiza en una solución buffer de HF, compuesta por agua y ácido fluorhídrico en una concentración [7:1].

#### 2.4.2 Depósito de películas delgadas

El depósito de películas delgadas consiste en la aplicación de una fina capa de material sobre un sustrato. Aplicar estas películas delgadas, tienen diferentes objetivos, como son: cambiar las propiedades ópticas del vidrio, evitar procesos de oxidación de los metales, modificar las propiedades eléctricas de los semiconductores y utilizar estas películas delgadas como base de estructura en los dispositivos a diseñar. Las películas delgadas se crecen utilizando diferentes técnicas de depósito. Para obtener recubrimientos delgados a escala micro o nanométrica, se utilizan capas de átomos y moléculas del material a depositar [29].

A continuación, se presenta una descripción de las técnicas utilizadas para la obtención de películas delgadas en este trabajo de tesis:

#### 2.4.2.1 Spin-Coated

El recubrimiento por rotación es una técnica utilizada para extender películas delgadas uniformes sobre sustratos planos mediante la fuerza centrífuga. El aparato utilizado para el recubrimiento por rotación se denomina spin-coater. Se dispensa una solución de material en el centro de una oblea, que luego gira a alta velocidad.

La rotación continúa hasta que el exceso de solución se desprende del sustrato y queda el espesor deseado de la película sobre el sustrato. El disolvente aplicado suele ser volátil y se evapora durante el depósito, y posteriormente la película se endurece con un tratamiento térmico hasta de 1100° C. Los dos factores principales que definen el espesor de la película son; la velocidad de centrifugado y la viscosidad de la solución.

Otros factores considerados incluyen el tiempo de centrifugado, la densidad de la solución y la tasa de evaporación del solvente. De manera general, podemos decir que este proceso involucra cuatro fases: (i) depósito del precursor, (ii) aceleración del sustrato, (iii) giro a una velocidad constante para establecer el grosor deseado y (iv) curado térmico para endurecer la película, ver figura 12.

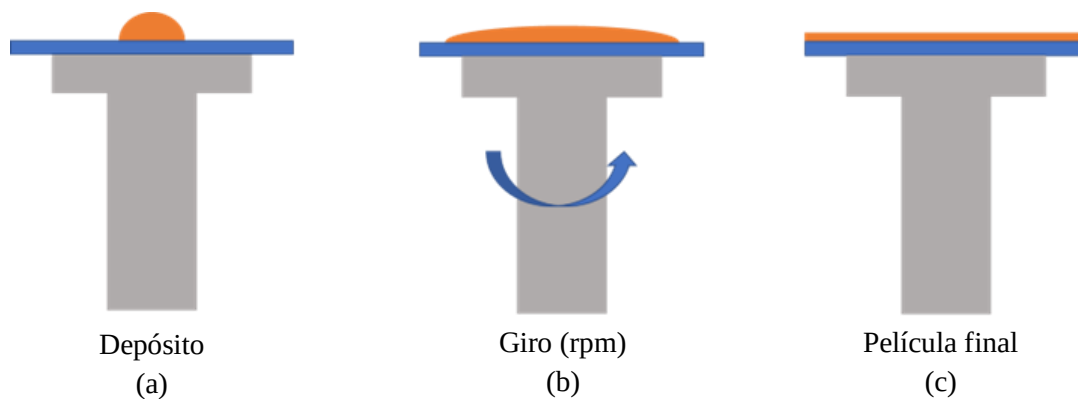


**Figura 12.** (a) Depósito de la solución de la fotoresina sobre la oblea, (b) Esparcimiento de la resina sobre la oblea, (c) Película delgada final.

#### 2.4.2.2 Sputtering

Es un término usado para describir el mecanismo en el cual los átomos son expulsados de la superficie de un material cuando es golpeado por una partícula suficientemente energética. La técnica de Sputtering o pulverización catódica es un proceso físico y fijo que ha llegado a ser la técnica

más dominante para el depósito de películas metálicas [28]. Este proceso del depósito por sputtering, se puede describir con los siguientes puntos: (i) los iones se generan y se dirigen al target, (ii) los iones generados arrojan átomos desde el target, (iii) los átomos ejecutados son transportados al sustrato y (iv) los átomos se condensan en el sustrato y forman una película delgada (véase la Figura 13).

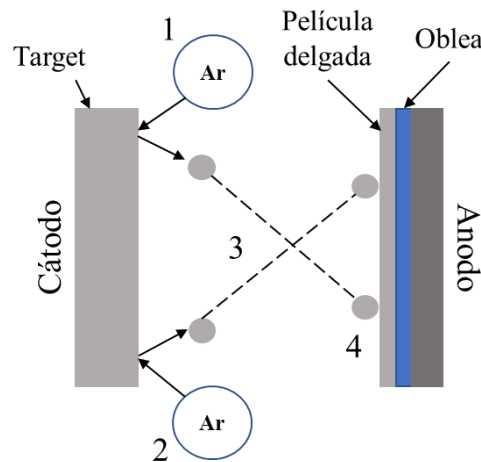


**Figura 13.** (1) Los iones de argón son generados y son dirigidos al target (cátodo). (2) Estos iones golpean al target y expulsan átomos del target (sputtering). (3) Los átomos del target se transportan a través del espacio de presión reducida que separa las obleas del target. (4) Los átomos del target se condensan sobre la superficie de la oblea para formar una película delgada [28].

### 2.4.3 Fotolitografía

Es un proceso de transferencia de patrones hacia la superficie de un material utilizando una mascarilla. De manera muy general el proceso de fotolitografía consiste en [28]:

- Recubrir el sustrato de la oblea con una fotoresina (resina, PR), ver figura 12 (a).
- Exponer a alguna forma de radiación, como lo es la luz ultravioleta o haz de electrones.
- Revelado.

Para lograr esto, se utiliza una herramienta de exposición (alineadora de mascarillas) y una máscara para producir la exposición selectiva deseada. Al acabar con el proceso de revelado, la fotoresina expuesta a la luz ultravioleta se elimina y las áreas que quedan después del revelado protegen el material al que se quiere transferir los patrones geométricos durante el proceso de grabado selectivo [28].

### 2.4.3.1 Fotoresina

Es un material fotosensible que se utilizan para realizar procesos de fotolitografía. Hay dos tipos de fotoresina: positiva y negativa.

La fotoresina positiva, se denomina así cuando las regiones expuestas a la luz UV son solubles, es decir, donde no existe el patrón opaco en la fotomascarilla. Por otro lado, en la fotoresina negativa, la parte expuesta a la luz UV, permanecerá insoluble, es decir, el revelador disuelve las regiones no expuestas con la luz ultravioleta, ver figura 14.

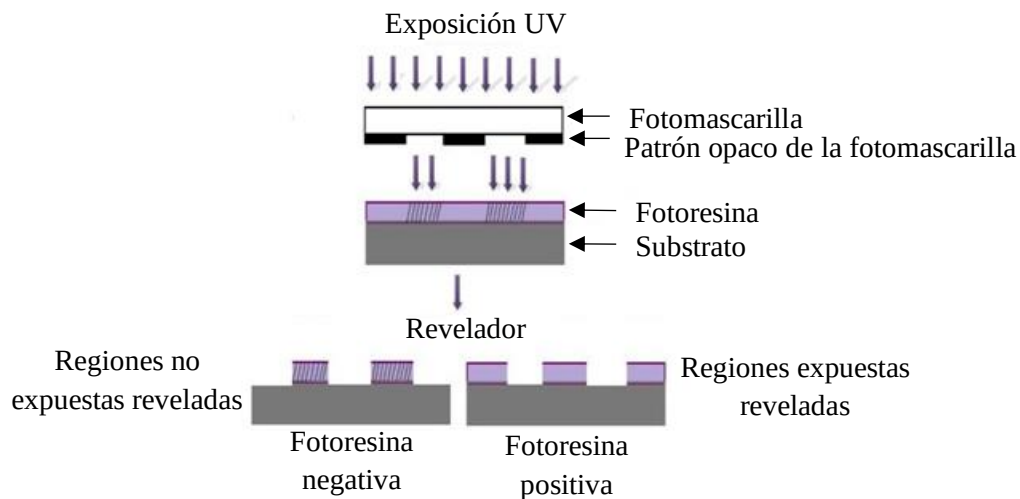


**Figura 14.** Proceso de fotolitografía: fotoresina negativa y positiva.

Las fotoresinas ópticas convencionales, constan de tres materiales: (i) Resina, sirve como aglutinante y establece las propiedades mecánicas de la película, (ii) PAC, es un ingrediente activo, que es un compuesto fotoactivo y (iii) un solvente. El solvente mantiene a la resistencia en estado líquido hasta que es aplicado sobre la oblea [28].

### 2.4.3.2 Mascarillas

Una mascarilla es definida como un sustrato que contiene patrones que pueden ser transferidos a una oblea completa (o hacia otra mascarilla) [28]. El proceso de escritura de mascarillas debe proveer: alta resolución, precisión en la posición del patrón y bajos niveles de defectos. Existen dos tipos de mascarillas, que se definen mediante su polaridad. Una mascarilla es nombrada campo

claro (positiva) si las áreas de fondo son transparentes y es llamada de campo oscuro (negativa) si las áreas de fondo son opacas, como se ilustra en la figura 15 [28].

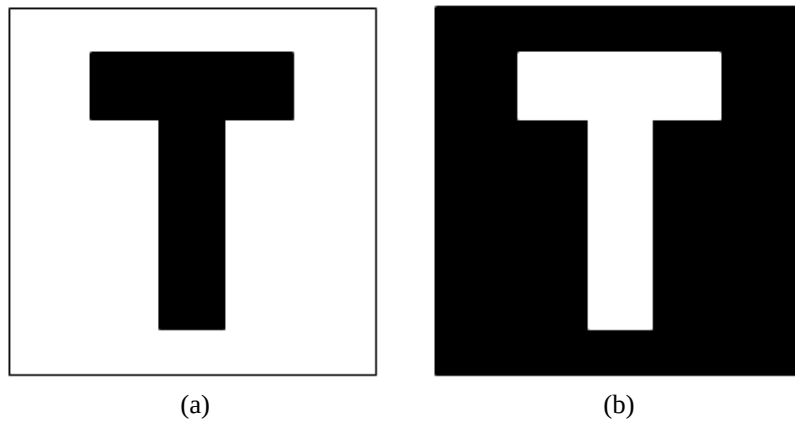


**Figura 15.** Tipos de mascarillas en fotolitografía: (a) campo claro y (b) campo oscuro.

#### 2.4.4 Técnicas de grabado

El grabado en la fabricación microelectrónica es un proceso mediante el cual el material se elimina selectivamente del sustrato o de las películas delgadas en la superficie del sustrato. Cuando se utiliza una película de fotoresina para proteger regiones específicas de la superficie de la oblea, el objetivo del grabado es eliminar con precisión el material no cubierto por la fotoresina. Los dos tipos básicos de procesos de grabado utilizados en la fabricación de semiconductores, son el grabado químico húmedo y grabado en seco. En el caso de un proceso de grabado ideal, el patrón de la máscara debería de ser transferido precisamente a la capa subyacente [28].

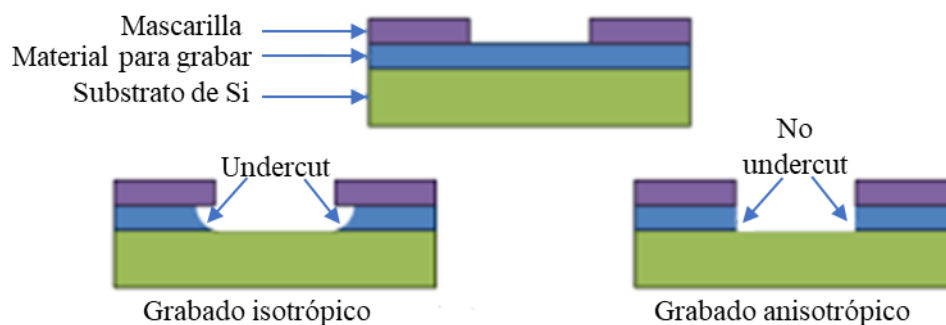


**Figura 16.** Tipos de grabado: isotrópico y anisotrópico.

Los requisitos generales de un proceso de grabado son: obtener el perfil deseado, minimizar el grabado lateral (undercutting), máxima selectividad con el enmascarante y material subyacente, uniformidad y reproducibilidad, mínimo daño superficial, limpio, económico y seguro.

#### 2.4.4.1 Grabado Químico Húmedo

Es un método que consiste en la inmersión de la oblea en un baño líquido que contiene el agente grabante, seguido de enjuague con agua desionizada. Este tipo de grabado permite obtener perfiles isotrópicos, es decir el agente grabante avanza en todas las direcciones a la misma velocidad [28]. La Figura 17, muestra un perfil de grabado isotrópico, en el cual podemos ver el grabado lateral del material, el cual se conoce como efecto undercut.

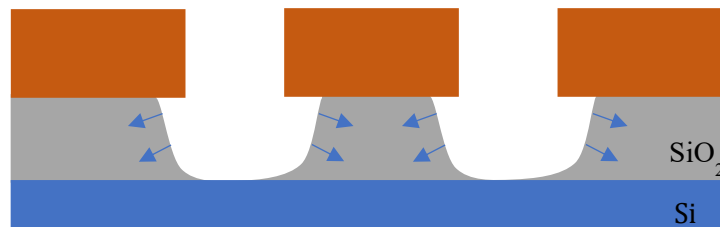


**Figura 17.** Grabado isotrópico, final del grabado con efecto undercut.

En el proceso de grabado químico húmedo, hay que tener en cuenta el material de la película que será grabada y del sustrato, ya que, a partir de esa información, se utilizará el grabante correspondiente para el material. La tabla 2.3, muestra los agentes grabantes para algunos materiales utilizados en microelectrónica.

**Tabla 2.3.** Materiales en microelectrónica.

| Material                       | Grabante                                                                                                        | Razón de Grabado                                           |
|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 28 ml de HF, 170 ml H <sub>2</sub> O, 113 g NH <sub>4</sub> F                                                   | BHF, 1000-2500 A/min a 25° C                               |
| Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> | 28 ml de HF, 170 ml H <sub>2</sub> O, 113 g NH <sub>4</sub> F                                                   | BHF, 5-10 A/min                                            |
| Al                             | CH <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> , CH <sub>3</sub> COOH, HN <sub>3</sub> en una concentración de [25:8:1] a 50°C | 1.6 nm/min                                                 |
| Au                             | 3 ml HCl, 1 ml HNO <sub>3</sub>                                                                                 | Agua regia, 25-50 μm/min                                   |
| Cr                             | 1 ml HCl, 1 ml glicerina                                                                                        | 800 A/min.                                                 |
| Pt                             | 3 ml HCl, 1 ml HNO <sub>3</sub>                                                                                 | Agua regia, 20μm/min, procediendo a 30s de inmersión en HF |

#### 2.4.4.2 Grabado Químico Seco

El grabado en seco es un excelente sustituto para el grabado húmedo. El grabado químico seco brinda la ventaja de eliminar la manipulación, el consumo y disminuir la cantidad de ácidos y disolventes peligrosos que se utilizan en el grabado húmedo. Además, este tipo de grabado se caracteriza por obtener un grabado anisotrópico, es decir que el grabado procede exclusivamente en una dirección, por lo cual se obtienen perfiles verticales, ver Figura 18 [28].



**Figura 18.** Grabado anisotrópico, con grabado final en una sola dirección

### 2.5 SISTEMAS MICROELECTROMECAÓNICOS (MEMS)

El acrónimo MEMS (por sus siglas en inglés) microelectromechanical systems significa sistemas microelectromecánicos y fue acuñado en los Estados Unidos a fines de la década de 1980. Casi al mismo tiempo, los europeos usaban la frase tecnología de microsistemas (MST) [30]. Los MEMS son sistemas integrados a microescala que combinan sistemas eléctricos, ópticos, magnéticos, mecánicos, térmicos, fluídicos, etc. [31].

Estos sistemas son diseñados para interactuar con el ambiente externo, ya sea como sensor o como actuador para generar información de estado o controlarla a una escala diferente [32-33]. Esta tecnología, cuenta con múltiples ventajas, ya que miniaturiza las interacciones físicas casi al mismo grado que los circuitos integrados (IC). También cuenta con la capacidad de integrar el sensado, el análisis y la respuesta en dimensiones nanométricas y generar efectos en la escala macro. Estos dispositivos se crean utilizando técnicas como la fotolitografía, grabado de materiales, depósito de películas delgadas, etc. [31].

Mediante la implementación de la tecnología MEMS, se pueden producir componentes y dispositivos con mayor rendimiento y confiabilidad, también tales productos cuentan con un tamaño pequeño, peso ligero y bajo costo [31]. En general, para este tipo de tecnología, existen dos métodos de fabricación: micromaquinado de volumen y micromaquinado de superficie. El micromaquinado de volumen es un proceso sustractivo mediante el cual se eliminan regiones del

substrato; mientras que, con el micromaquinado de superficie, se acumulan capas sobre la superficie del substrato de manera aditiva [30].

### 2.5.1 Micromaquinado De Volumen

Micromaquinado es el término generalmente aceptado que describe la microfabricación de estructuras mecánicas utilizando varias técnicas de procesamiento microelectrónico o micromecánico. Las técnicas de grabado anisotrópico, isotrópico, profundo y selectivo, combinadas con un buen proceso de fotolitografía, hacen posible la estructuración tridimensional miniaturizada de alta precisión [34], como lo podemos ver en la Figura 19.

El micromaquinado de volumen se basa en varias técnicas de grabado y crea proyecciones de máscaras fotolitográficas planas en 3 dimensiones. El micromaquinado de volumen y de superficie son técnicas complementarias y, por lo tanto, su uso combinado produce dispositivos más versátiles [34].



**Figura 19.** Esquema representativo de un micromaquinado de volumen.

### 2.5.2 Micromaquinado de Superficie

El micromaquinado de superficie es una tecnología de fabricación basada en el depósito, modelado y grabado de materiales sobre un substrato. Los materiales consisten en capas alternas de un material estructural y un material de sacrificio [35]. El material de sacrificio se elimina al final del proceso de fabricación a través de un grabado de liberación. La Figura 20, muestra una representación del micromaquinado de superficie.



**Figura 20.** Esquema representativo de un micromaquinado de superficie

El micromaquinado de superficies utiliza métodos de fabricación comunes en la industria de la microelectrónica. Los grabados de las capas estructurales definen la forma de la estructura mecánica, y el grabado de las capas de sacrificio define los anclajes de la estructura al sustrato y entre las capas estructurales [35].

Los dispositivos MEMS de micromaquinado de superficie son generalmente más grandes ( $>100\ \mu\text{m}$  frente a  $<1\ \mu\text{m}$ ). El depósito repetido y el patrón de las películas gruesas utilizadas en el micromaquinado de superficies producirán una topografía más ancha a medida que se agreguen más capas al proceso [35].

La eliminación de las capas de sacrificio producirá un dispositivo mecánicamente libre capaz de moverse [35].

## 2.6 MATERIALES PARA MEMS

Los materiales utilizados para la fabricación de MEMS se pueden clasificar en: metales, polímeros, semiconductores y cerámicos. Algunos de estos materiales y sus propiedades se enlistan en la Tabla 2.4.

**Tabla 2.4.** Materiales para MEMS

| <b>Propiedades</b> | <b>Resistividad eléctrica <math>\rho</math><br/>(<math>\Omega \cdot m</math>)</b> | <b>Conductividad térmica (W/m K)</b> | <b>Coefficiente de temperatura de resistencia por grado C</b> |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| <b>Material</b>    |                                                                                   |                                      |                                                               |
| Silicio            | 640                                                                               | 148                                  | -0.07                                                         |
| Teflón             | $10^{22}$ - $10^{24}$                                                             | $10^{-25}$ - $10^{-23}$              |                                                               |
| Poliamida          | $6 \times 10^{14}$                                                                | 0,23                                 |                                                               |
| Aluminio           | $2,650 \times 10^{-8}$                                                            | 237                                  | 0.00429                                                       |
| Níquel             | $6,93 \times 10^{-8}$                                                             | 90,7                                 | 0.00641                                                       |
| Cromo              | $12,5 \times 10^{-8}$                                                             | 93,7                                 | 0.005866                                                      |
| Plata              | $1,587 \times 10^{-8}$                                                            | 429                                  | 0.0038                                                        |
| Titanio            | $4,60 \times 10^{-7}$                                                             | 21,9                                 |                                                               |
| Oro                | $2,214 \times 10^{-8}$                                                            | 317                                  | 0.003715                                                      |

## REFERENCIAS

- [1] Fleming, W. J., “Overview of automotive sensors”, IEEE sensors journal, 1(4), 296-308 (2001).
- [2] H. Norton, “Transducer fundamentals,” in Handbook of Transducers. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, ch.2, (1989)
- [3] Bosch GmbH, R, “Bosch Automotive Electrics and Automotive Electronics” (5a ed.). Springer Vieweg. (Obra original publicada en 1999) (2007).
- [4] P. Fernández, P. Escribano (2001-2002). Sensores de olfato nariz electrónica artificial, U.C.L.M. [Online]. Disponible: <http://mimosa.pntic.mec.es/~pferna37/web/32.htm>
- [5] E.A. Franco Martínez. (2020, Junio). Instrumentación: Características de un instrumento de medición, Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Cómputo. [Online].  
Disponible: <https://docencia.eafranco.com/materiales/instrumentacion/05/Diapositivas05.pdf>
- [6] Thilagar D, Venkatesan M & Arul Sivan S, “Experimental investigation on automotive hot wire anemometer to determine dynamic flow rate”, International Science and Technology Journal, Vol. 7 (3), pp. (141 – 147), (2018).
- [7] Fleming, W. J., “New automotive sensors”—A review. IEEE Sensors Journal, 8(11), 1900-1921, (2008).
- [8] Mohankumar, P., Ajayan, J., Yasodharan, R., Devendran, P., & Sambasivam, R., “A review of micromachined sensors for automotive applications”. Measurement, 140, 305-322, (2019).
- [9] P.G.S.A Bandara, “A Constant Current Hotwire”, Department of Physics Faculty of Science University of Peradeniya, (S/06/552) (2011).
- [10] Toyota Motors Sales, U.S.A., Inc. Air Flow Sensors
- [11] Ph, D, J. T, “Automotive Sensors”, Momentum Press, (2009).
- [12] Mte-Thomson (2022, Marzo 29). Sensor MAF (Mass Air Flow) “Cable Caliente” (Hot Wire) [Online]. Disponible: <https://mte-thomson.com/es/?noticias=sensor-maf-mass-air-flow-cable-caliente-hot-wire>
- [13] Cartnell, B. C., and F. L. Zeisler, “An engine mass airflow meter”, SAE paper 760017, (1998).
- [14] Joy, R. D., “Airflow for engine control”, SAE paper 760018, (1976).
- [15] J. Bryzek, H. Abbott, A. Flannery, D. Cagle, J. Maitan, “Control issues for MEMS” ,42nd IEEE International Conference on Decision and Control, IEEE (2003)3039–3047.
- [16] C.-M. Ho, Y.-C. Tai, “Micro-electro-mechanical-systems (MEMS) and fluid flows”, Annu. Rev. Fluid Mech. 30 (1998) 579–612.

- [17] G. Ciuti, L. Ricotti, A. Menciassi, P. Dario, “MEMS sensor technologies for human centred applications in healthcare, physical activities, safety and environmental sensing: a review on research activities in Italy”, *Sensors* 15(2015) 6441–6468.
- [18] R. Bogue, “Recent developments in MEMS sensors: a review of applications, markets and technologies”, *Sens. Rev.* 33 (2013) 300–304.
- [19] S. Nihtianov, A. Luque, “Smart Sensors and MEMS: Intelligent Devices and Microsystems for Industrial Applications”, Woodhead Publishing, Amsterdam, The Netherlands, (2014).
- [20] P. Zylka, P. Modrzynski, P. Janus, “Vortex anemometer using MEMS cantilever sensor”, *Journal of Microelectromechanical systems*, 19, pp.1485-1489, (2010).
- [21] X. M. Jing, J. M. Miao, T. Xu, M. Olfatnia, L. Norford, “Vibration characteristics of micromachined piezoelectric diaphragms with a standing beam subjected to airflow”, *Sensors and Actuators A*, 164, pp.22-27, (2010).
- [22] P. Kahroba, I. Mirzaee, P. Sharifi, H. Shirvani, “The Microcavity-based micro-heater: an optimum design for micro-heaters”, *Microsyst. Technol.* 14, pp. 705-710, (2008).
- [23] E. Meng, P. Y. Li, Y. C. Tai, “A biocompatible parylene thermal flow sensing array”, *Sensors and Actuators A*, 144, pp. 18-28, (2008).
- [24] Shin, W. C., Besser, R. S., “A micromachined thin-film gas flow sensor for microchemical reactors”, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 731-741, (2006).
- [25] Liu, C., Lou, X., Zhang, Z., Wang, X., Liu, S., “A Hot Platinum Thin Film Anemometer”, 11th International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging, IEEE, 1297-1301, (2010).
- [26] Chiu, N. F., Hsiao, T. C., & Lin, C. W., “Low power consumption design of micro-machined thermal sensor for portable spirometer”, *Journal of Applied Science and Engineering*, 8(3), 225-230, (2005).
- [27] Schwerter, M., Beutel, T., Leester-Schädel, M., Büttgenbach, S., & Dietzel, A., “Flexible hot-film anemometer arrays on curved structures for active flow control on airplane wings”, *Microsystem technologies*, 20(4), 821-829, (2014).
- [28] S. Wolf, “Microchip Manufacturing. California”, U.S.A.: Lattice Press, (2004).
- [29] prcommercialre.com (Mayo 2) ¿Qué es la deposición de película delgada? [Online]. Disponible: <https://www.prucommercialre.com/que-es-la-deposicion-de-pelicula-delgada/>
- [30] S. Beeby, G. Ensell, M. Kraft y N. White, “MEMS Mechanical Sensors”. Boston, London: Artech House, Inc, (2004).
- [31] Y. J. Chen, "Advantages of MEMS and its distinct new applications", Institute of Scientific and Technical Information of China, (2013).

- [32] Jan G Korvink and Oliver Paul, “MEMS: A Practical Guide to Design, Analysis and Applications”, Springer, (2006).
- [33] A. R. Jha, “MEMS and Nanotechnology-Based Sensors and Devices for Communications, Medical and Aerospace Applications”, CRC Press, (2008).
- [34] Y. Suzuki and I. Yokomori, “Sensors Applications Upcoming volumes: · Sensors in Medicine and Health Care · Sensors in Aerospace Technology · Sensors in Environmental Technology” Related Wiley-VCH titles :, vol. 4. (2003).
- [35] J. J. Allen, “Microelectromechanical System Design”, Columbus, Ohio: Taylor & Francis Group, (2005).

## CAPÍTULO 3. DESARROLLO

### 3.1 CONSIDERACIONES DE DISEÑO

Un problema en el diseño de sensores de flujo de película delgada es la temperatura con la que trabaja el sensor en comparación con la temperatura ambiente, ya que, con este problema no se podrá lograr un bajo consumo de energía. Para optimizar su rendimiento, el sensor que se proponga deberá tener una resistencia eléctrica pequeña, bajar su capacidad calorífica y aumentar su área superficial para detectar el flujo de aire. El rango óptimo de resistencia debe estar dentro de 35-500 ohm y la temperatura de trabajo adecuada para el sensor debe ser alrededor de 70° C con una corriente de 1-15 mA [1].

De los criterios mencionados anteriormente, hay algunas cuestiones importantes que también debemos considerar, estos incluyen la conductividad térmica del material ( $k$ ), la sensibilidad, la dirección del flujo y el tipo de estructura. Debido a que este proyecto de tesis se limitó al proceso de fabricación del dispositivo, para su fabricación se consideraron los siguientes criterios:

#### 3.1.1 Tipo de estructura

Este tipo de sensores pueden ser fabricados utilizando dos técnicas de microelectrónica: micromaquinado de superficie y micromaquinado de volumen. Con la primera técnica obtenemos una estructura definida sobre un sustrato fijo (figura 3.1.a). Con la segunda técnica de micromaquinado el sustrato se desgasta de tal manera que el sensor térmico queda suspendido sobre una membrana (ver figura 3.1.b).

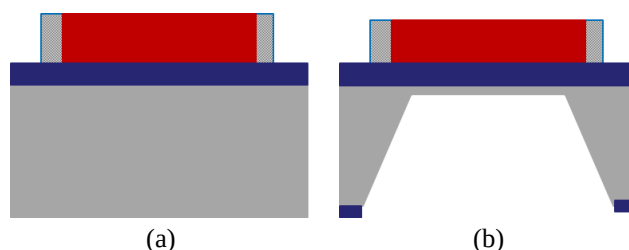


**Figura 3.1.** Resistencia térmica de película delgada sobre un sustrato y una membrana (a) Micromaquinado de superficie, (b) Micromaquinado de volumen

La elección de la técnica, así como de los materiales en la fabricación dependerán de las ventajas y desventajas que cada una de ellas presenta, como son: conductividad térmica, rigidez mecánica, miniaturización, robustez, costos de fabricación, etc., ver tabla 3.1.

**Tabla 3.1.** Diferencias entre una estructura fija y suspendida.

| <b>Parámetro</b>                | <b>Fijo</b>   | <b>Suspendido</b> |
|---------------------------------|---------------|-------------------|
| Fabricación                     | Simple        | Compleja          |
| Robustez                        | Alta          | Baja              |
| Costo                           | Bajo          | Alto              |
| Pérdida de calor por conducción | Alta          | Baja              |
| Tamaño                          | Miniaturizado | Miniaturizado     |

De la tabla anterior, podemos observar que la estructura fija presenta ventajas mecánicas y de fabricación en comparación a una estructura suspendida. De hecho, la pérdida de calor por conducción alta que caracteriza a las estructuras fijas (característica no deseada), se asocia casi siempre al uso de un sustrato de silicio (material con alta conductividad térmica,  $k$ ). Sin embargo, si utilizamos un sustrato con una baja  $k$  y aumentamos su espesor, podemos compensar la pérdida de calor por conducción (debido al sustrato) e incluso, mejorar este parámetro en comparación con una estructura suspendida. Por lo tanto, en el presente trabajo de tesis se definirá una resistencia térmica de película delgada sobre un sustrato fijo.

### 3.1.2 Substrato/Conductividad térmica, $k$

Al seleccionar una estructura fija, el material de sustrato debe satisfacer la condición de baja conductividad térmica ( $k$ ) para evitar las pérdidas de calor por conducción, por lo que se eligió como sustrato, tres diferentes tipos de vidrio: cuarzo, N-BK7 y Corning 1737. La tabla 3.2, muestra los valores de conductividad térmica ( $k$ ) a temperatura ambiente de estos materiales. En esta tabla se incluye también al silicio [2-5].

**Tabla 3.2.** Conductividad térmica ( $k$ ) a temperatura ambiente.

| <b>Material</b> | <b><math>k</math> (W/mK)</b> |
|-----------------|------------------------------|
| N-BK7           | 1.11                         |
| Corning 1737    | 2.47                         |
| Cuarzo          | 3.00                         |
| Silicio         | 156.00                       |

Como se observa en la tabla 3.2, la conductividad térmica de un sustrato de vidrio (en el caso del N-BK7) en comparación con la oblea de silicio, presenta un aislamiento térmico hasta 140 veces mejor que el silicio y 52 veces mejor que el cuarzo. Con la disminución de pérdidas de calor en el sustrato, se cuenta con más energía para calentar la resistencia térmica y alcanzar una temperatura

más alta. Una mayor diferencia entre la temperatura de la resistencia térmica y la temperatura del fluido produce mayor sensibilidad del sensor con un consumo de energía reducido [2].

### 3.1.3 Coeficiente de temperatura de resistencia, TCR

Los sensores de flujo de película caliente detectan la velocidad del flujo midiendo el cambio en la resistencia eléctrica debido al enfriamiento que provoca el flujo de aire. Esto significa que la sensibilidad del sensor depende del coeficiente de temperatura de resistencia (TCR) del material estructural de la resistencia eléctrica del sensor, por lo tanto, es necesario que el material de la resistencia tenga un TCR alto [2, 6-8]. En general, los metales presentan un TCR positivo, pero en función de su relación temperatura/resistencia eléctrica, los sensores de flujo de película delgada de base metálica normalmente se componen de platino, níquel, cobre, oro y aluminio [9].

La tabla 3.3, muestra los valores de TCR de los materiales metálicos más utilizados en sensores de flujo de película delgada.

**Tabla 3.3.** Coeficiente de temperatura de resistencia (TCR).

| Material | TCR/° C |
|----------|---------|
| Níquel   | 0.006   |
| Platino  | 0.00392 |
| Aluminio | 0.0039  |
| Cobre    | 0.0039  |
| Oro      | 0.0034  |

Para este trabajo de tesis, se seleccionó aluminio como material estructural para la película delgada, ya que cuenta con TCR adecuado y parecido al valor de los metales mayormente utilizados en microelectrónica, como lo es el platino y níquel, además de ser un metal de fácil alcance debido a su precio [10-11].

### 3.1.4 Geometría del sensor

La forma geométrica elegida para la resistencia térmica fue en forma de espiral (véase Figura 3.2), con la finalidad de maximizar el uso del área de superficie. Esta geometría, permite obtener una mayor longitud en comparación con una estructura convencional en forma de hilo y aumenta el área de contacto entre el flujo de aire y la superficie del sensor, lo que aumenta los valores de

resistencia eléctrica de la estructura y produce una mayor sensibilidad del sensor con un consumo de energía reducido.

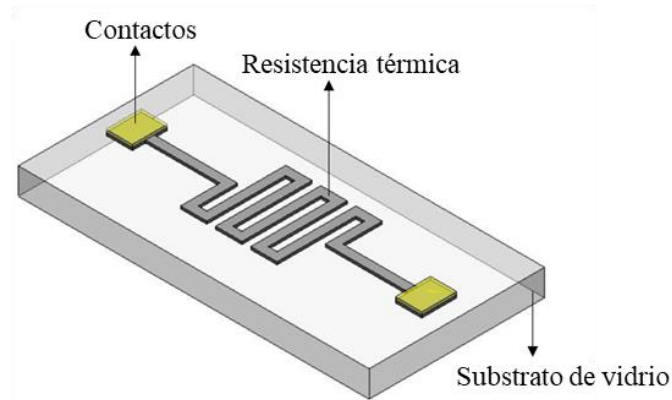


**Figura 3.2.** Esquema de la estructura resistiva.

En la tabla 3.4, se presenta un resumen de las características de diseño de las estructuras resistivas de película delgada fabricado en este proyecto de tesis.

**Tabla 3.4.** Características de diseño de las estructuras resistivas.

| Parámetros de diseño |                              |
|----------------------|------------------------------|
| Tipo de estructura   | Fijo                         |
| Material de sustrato | Cuarzo, N-BK7 y Corning 1737 |
| Material estructural | Aluminio                     |
| Forma geométrica     | Espiral                      |

Con las características propuestas, se espera obtener un dispositivo miniaturizado, con alta sensibilidad, bajo consumo de potencia, mecánicamente estable, reproducible y de bajo costo.

## 3.2 DISEÑO DEL LAYOUT

El layout de las estructuras resistivas fue diseñado con el software Tanner L-Edit y consiste en un solo nivel de mascarilla. El layout, está formado por dos tipos de estructuras en espiral, que difieren en tamaño y distribución. La primera estructura tiene un área de sensado de  $1200\ \mu\text{m} \times 700\ \mu\text{m}$  y la segunda estructura tiene un sensado tamaño de  $550\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$ . Estas estructuras, se diseñaron con el objetivo de evaluar el comportamiento de las estructuras resistivas en términos de sensibilidad y factibilidad de fabricación. Además, de las dos estructuras anteriores a manera de comparación se diseñaron estructuras en forma de hilo. En la figura 3.3, muestra el diseño completo

del Layout en donde se puede apreciar las tres diferentes estructuras del sensor de película delgada, el cual está definido en un área de 1.8 cm x 2 cm.

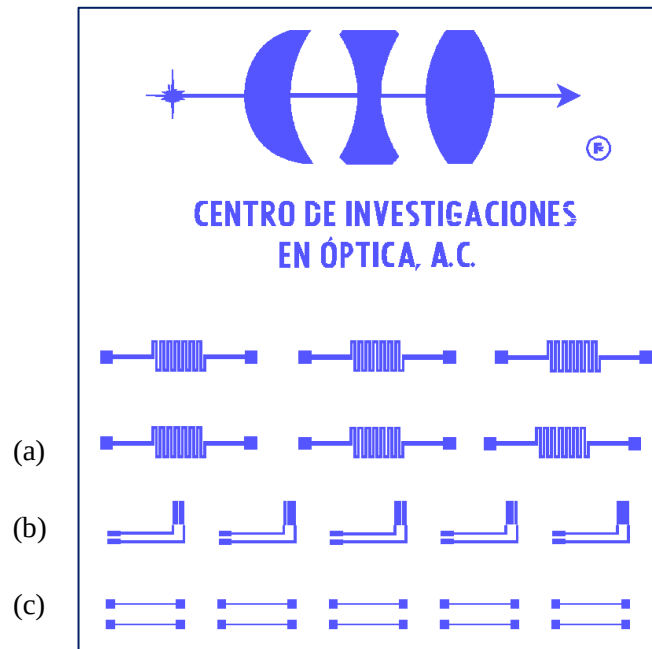
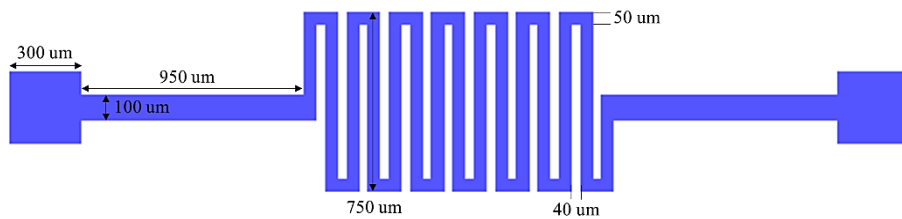
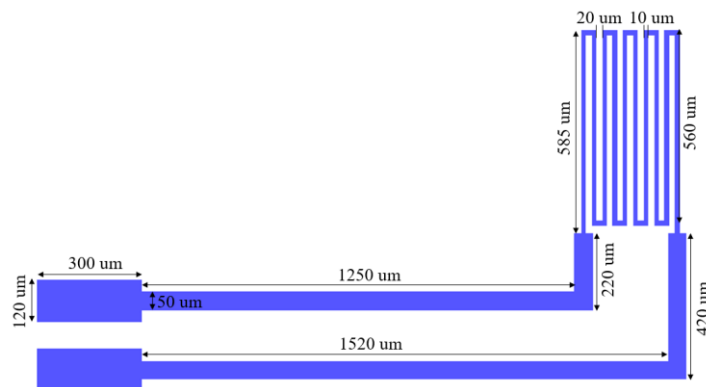


**Figura 3.3.** Layout completo de las estructuras resistivas. (a) Primera estructura. (b) Segunda estructura. (c) Estructuras en forma de hilo.

Las figuras 3.4a-c muestran con detalle las estructuras individuales con sus dimensiones.



(a)



(b)

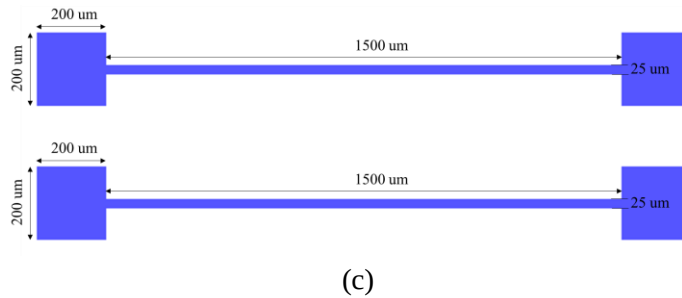


**Figura 3.4.** Características de las estructuras individuales.

### 3.3 FABRICACIÓN DE LA MASCARILLA

El diseño del Layout de las estructuras resistivas, se transfirió a una mascarilla comercial de 5 pulgadas utilizando el escritor de mascarillas del laboratorio de micro y nano dispositivos fotónicos del CIO (Centro de Investigaciones en Óptica, A.C.). Debido a que nuestro diseño cubre un área muy pequeña, se integró a un Layout con otros diseños realizados por personal del laboratorio para aprovechar el área de la mascarilla. El resultado final de fabricación se muestra en la figura 3.5.



**Figura 3.5.** Fotografía de la mascarilla fabricada.

### 3.4 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

Para la fabricación de las estructuras resistivas fue necesario caracterizar el material estructural y la fotoresina utilizada en el proceso de fotolitografía. Ya que, si bien estos materiales son ampliamente conocidos en la industria de la Microelectrónica, en el Laboratorio de Micro y Nano Dispositivos Fotónicos (cuarto limpio) del CIO, es la primera vez que se utilizarán, debido a que recientemente (enero del 2022) se terminó la puesta en marcha del laboratorio y la caracterización

de los diferentes equipos de fabricación. Por lo cual, en esta sección abordaremos la caracterización del aluminio y de la fotoresina S1813.

### 3.4.1 Aluminio

El aluminio se utiliza como material estructural de la resistencia térmica de película delgada, debido a su alto TCR y versatilidad de fabricación. Considerando las diferentes técnicas de depósito con las que cuenta el cuarto limpio del CIO y el espesor deseado (250 nm) se seleccionó la técnica de depósito mediante pulverización catódica (Sputtering). Los parámetros utilizados en el depósito de aluminio, tomando como referencia la experiencia del personal del cuarto limpio fueron: presión de argón: 32 sccm, presión de la cámara: 5mTorr, potencia: 50 W y fuente: DC.

Para determinar la razón de depósito del aluminio, se realizaron cuatro depósitos con las mismas condiciones variando únicamente el tiempo: 20 min, 40 min, 60 min, y 80 min. Los resultados obtenidos, se muestran en la figura 3.6., en la cual, podemos observar que el depósito de aluminio es lineal y tiene una razón de depósito de 2.5 nm/min.

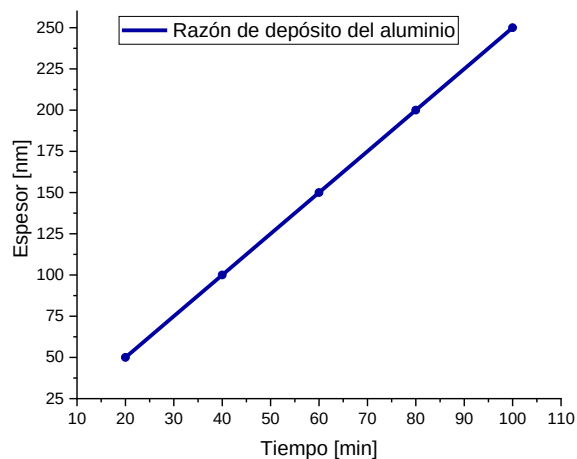


**Figura 3.6.** Razón de depósito del aluminio.

El grabado selectivo del aluminio se realizó sumergiendo la muestra en solución Al-etch, esta solución es una mezcla de ácido fosfórico ( $\text{CH}_3\text{PO}_4$ ), ácido acético glacial ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) y ácido nítrico ( $\text{HN}_3$ ), en una concentración [25:8:1] a una temperatura de 50° C. La razón de grabado obtenida fue de 1.6 nm/min.

### 3.4.2 Fotoresina S1813

La fotoresina S1813 se utiliza como material fotosensible en el proceso de fotolitografía, que se define como la transferencia fiel de patrones geométricos a un material. Su depósito se realiza por la técnica de spin coating y su curado térmico en un hot plate. La velocidad de giro depende del espesor deseado, en este proceso utilizamos una velocidad de giro de 4000 rpm para obtener un espesor de 1.5  $\mu\text{m}$ , de acuerdo con su hoja de datos [12]. La figura 3.7, muestra el proceso de depósito de la fotoresina S1813.

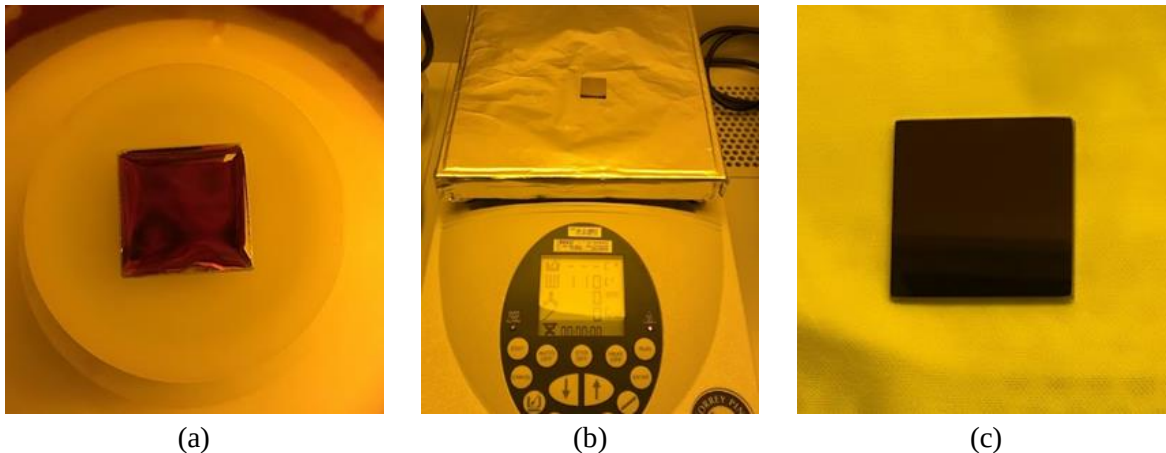


**Figura 3.7.** (a) Depósito de fotoresina S1813, (b) tratamiento térmico y (c) película resultante.

Otro tipo de características como son: curado térmico, exposición a luz ultravioleta y revelado, dependen del estado del material, potencia de la lámpara y concentración de revelado, todas estas características proporcionadas por el fabricante. En este caso, la fotoresina S1813 que utilizamos estaba caduca, por lo cual, no fue posible reproducir las condiciones recomendadas en la hoja de datos. Lo que nos llevó a caracterizar el material, tomando como base las recomendaciones del fabricante.

La caracterización de la fotoresina S1813, nos llevó alrededor de dos semanas, pero finalmente fue posible obtener un proceso reproducible capaz de transferir estructuras de hasta 10  $\mu\text{m}$  de ancho. La tabla 3.5, muestra los parámetros utilizados en el proceso de fotolitografía utilizando la fotoresina S1813.

**Tabla 3.5.** Parámetros caracterizados de la fotoresina S1813.

| <b>Parámetro</b>              | <b>Valor</b> |
|-------------------------------|--------------|
| Velocidad de giro             | 4000 rpm     |
| Temperatura de curado térmico | 110° C       |
| Tiempo de curado térmico      | 2 minutos    |
| Tiempo de exposición          | 10 segundos  |
| Revelador                     | MIF 319      |
| Tiempo de revelado            | 30 segundos  |

### **3.5 PROCESO DE FABRICACIÓN**

La fabricación de las estructuras resistivas considera: (i) un nivel de mascarilla y (ii) dos tipos de materiales: un sustrato y aluminio como material estructural. El proceso de fabricación se realizó sobre tres diferentes sustratos: N-BK7, cuarzo y corning 1737, con la finalidad de evaluar la adherencia, defectos y calidad.

1. La fabricación de las estructuras resistivas comienza con el proceso de limpieza de los sustratos, este proceso consiste en:
  - a. 10 minutos en acetona en limpiador ultrasónico.
  - b. 10 minutos en alcohol isopropílico en limpiador ultrasónico. Las muestras se pasan de la acetona al alcohol sin enjuague.
  - c. 2 enjuagues en agua desionizada (DI).
  - d. Sumergir los sustratos en solución Buffer de HF, esta solución se prepara a base de agua y ácido fluorhídrico (HF) en una concentración [7:1].
  - e. 2 enjuagues en agua DI.
  - f. Secado de las muestras con nitrógeno de alta pureza.

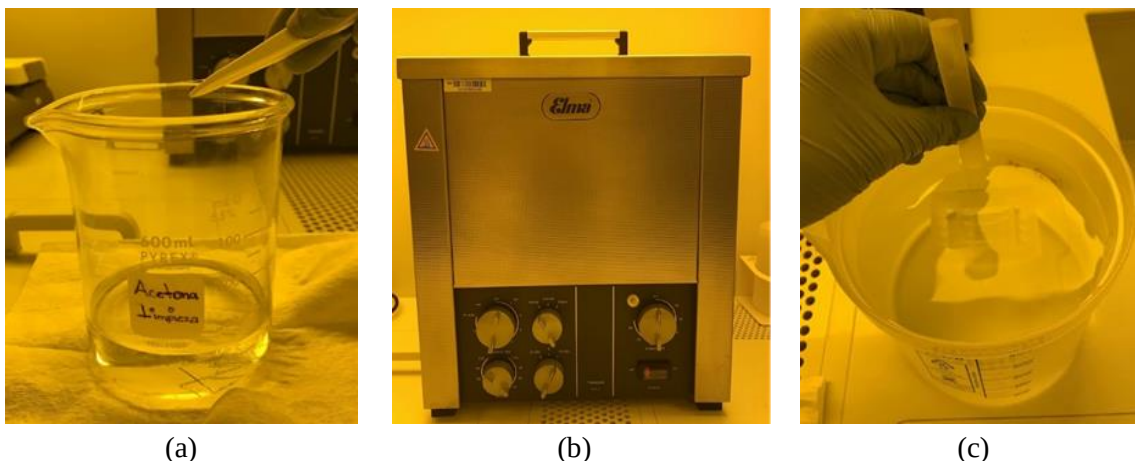


**Figura 3.8.** Etapas involucradas en el proceso de limpieza: (a) sumergir la muestra en acetona, (b) limpiador ultrasónico y (c) enjuague en agua DI.

2. Posteriormente, se realiza el depósito de una película de aluminio de 250 nm de espesor utilizando la técnica de pulverización catódica. El proceso se realiza en el equipo Sputtering AJA international utilizando las condiciones de proceso descritas en la sección 3.4.1. El equipo y sus características principales se muestran en el Anexo A.

Antes del depósito, la platina se recubre con papel aluminio libre de aceite y las muestras se colocan en la platina con cinta de cobre de doble cara.

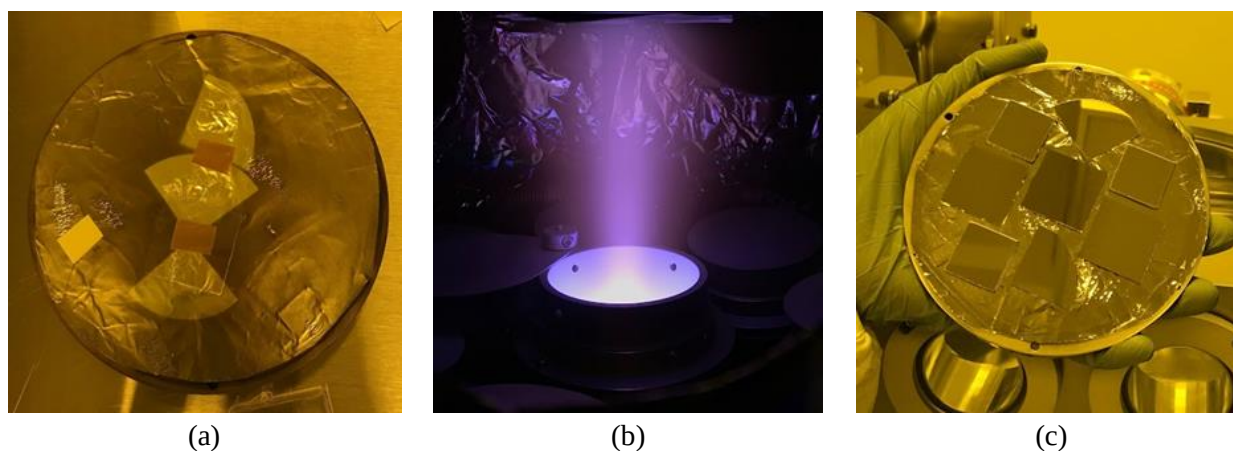


**Figura 3.9.** Proceso de depósito de la película de aluminio en el Sistema Sputtering. (a) Colocación de las muestras en la platina del equipo, (b) generación de plasma y (c) película de aluminio depositada.

3. Enseguida se realiza un proceso de fotolitografía estándar, que consiste en los siguientes pasos:
  - a. Depósito de fotoresina S1813 a 4000 rpm.
  - b. Curado térmico a 110° C por 2 min.

- c. Exposición a luz ultravioleta por 10 segundos, utilizando la alineadora de mascarillas y la mascarilla fabricada.
- d. Revelado en solución MIF 319 durante 30 segundos.
- e. Dos enjuagues en agua DI.
- f. Secado de las muestras en nitrógeno de alta pureza.

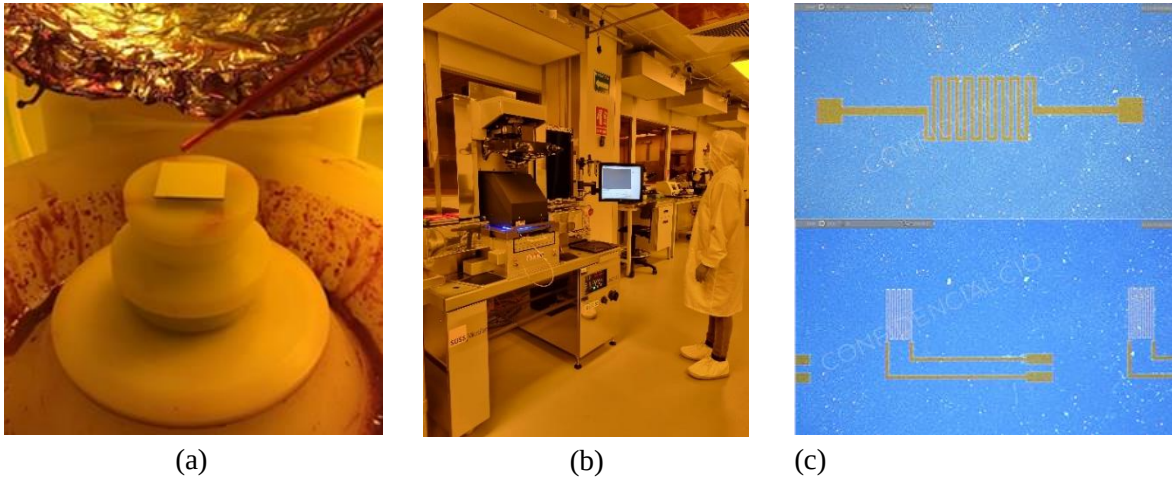


**Figura 3.10.** Etapas principales del proceso de fotolitografía: (a) depósito de fotoresina S1813, (b) exposición a luz UV y (c) estructuras resultantes después del proceso de revelado.

4. Se continua el proceso de fabricación con el grabado selectivo del aluminio, el cual consiste en:
  - a. Preparación de la solución Al-etch, ver sección 3.4.1.
  - b. Inmersión de las muestras en solución Al-etch durante 2 minutos. Durante el proceso de grabado se realizan movimientos continuos para uniformizar el grabado.
  - c. Dos enjuagues en agua DI.
  - d. Secado de las muestras con nitrógeno de alta pureza.

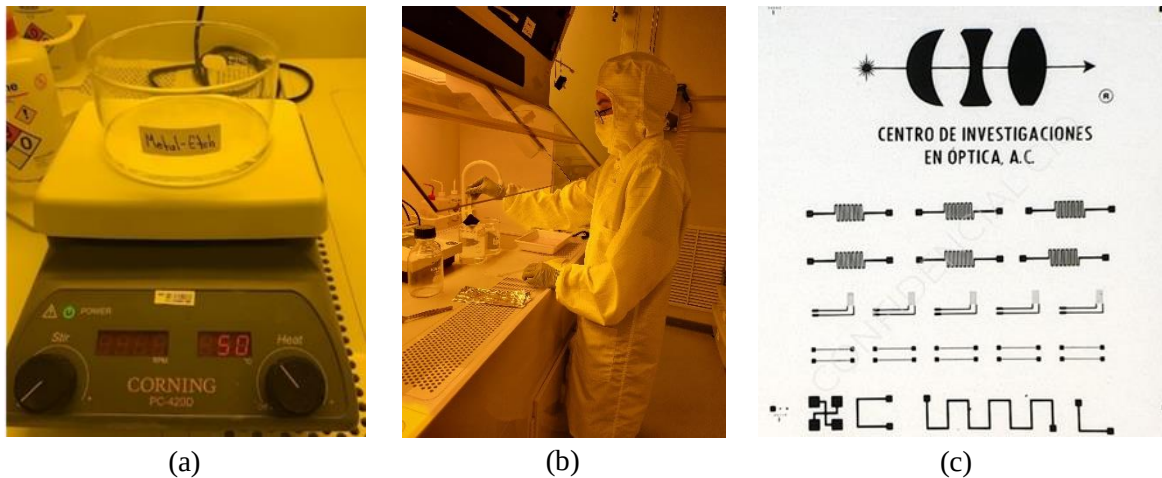


**Figura 3.11.** Proceso de grabado selectivo de la película del aluminio: (a) muestra inmersa en la solución Al-etch, (b) enjuague después del proceso de grabado y (c) estructuras resultantes vistas en un microscopio digital.

5. Finalmente, se remueve la fotoresina S1813 de la siguiente manera:

- a. Inmersión de las muestras en acetona por 10 minutos en el limpiador ultrasónico.
- b. Dos enjugues en agua DI.
- c. Secado de las muestras con nitrógeno de alta pureza.

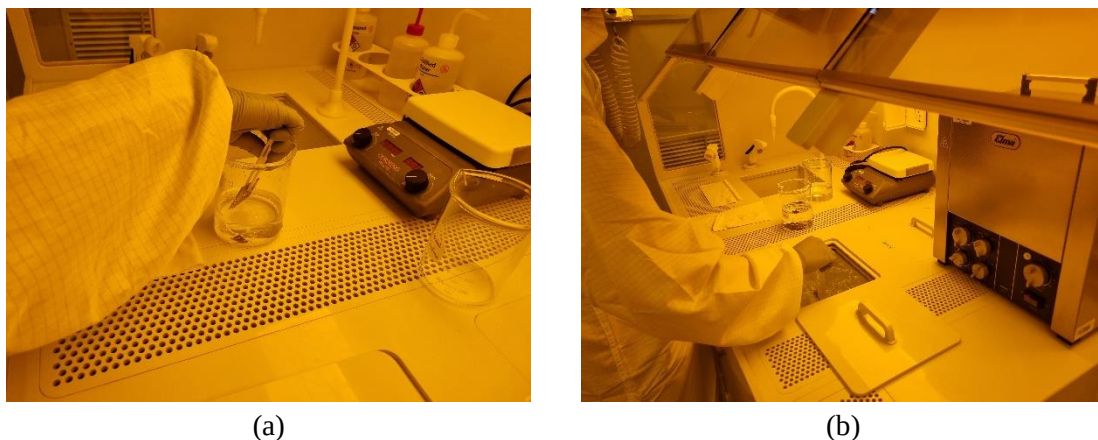


**Figura 3.12.** (a) inmersión de muestras en acetonas y enjuague de las muestras en rising tank.

Al finalizar el proceso de fabricación evaluamos la integridad de las estructuras fabricadas en función del tipo de sustrato utilizado. Para realizar esta evaluación, utilizamos el microscopio digital, con un lente óptico de 1x y un zoom óptico de 300x. Los resultados obtenidos, mostraron que las estructuras resistivas de mayor tamaño se definieron sin defectos en los tres tipos de sustrato. Sin embargo, en las estructuras resistivas de menor tamaño se observaron defectos significativos en aquellas definidas sobre un sustrato de corning, ver figura 3.13.

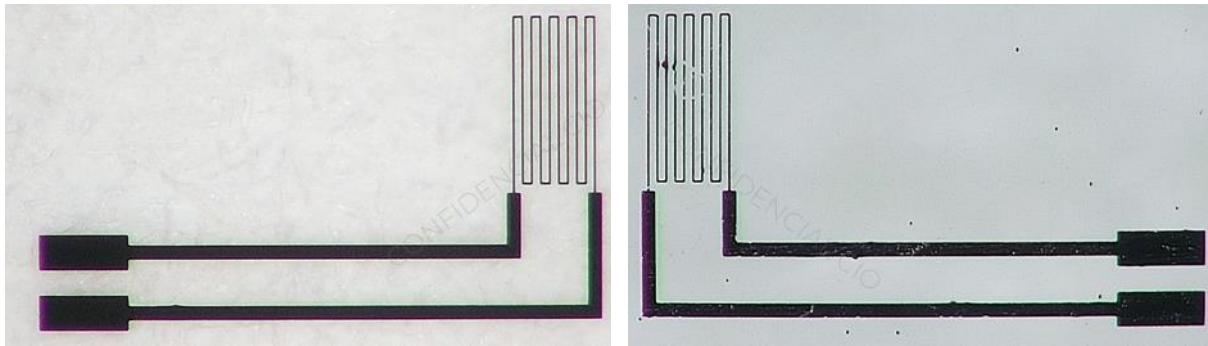
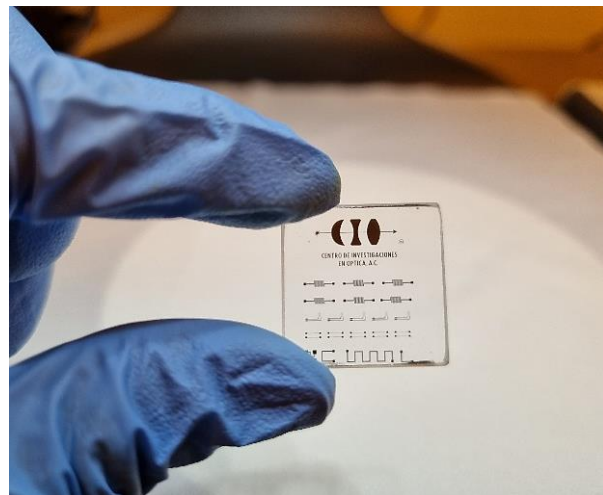


**Figura 3.13.** Comparación entre las estructuras fabricadas sobre (a) un sustrato de cuarzo y NBK7 y (b) un sustrato de corning 1737.

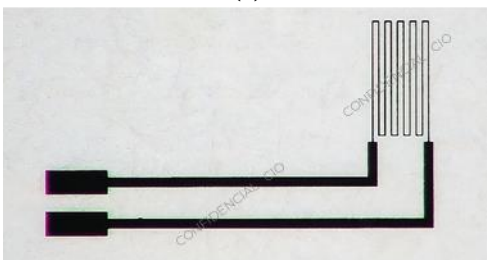
Como se observa, los defectos de las estructuras resistivas se deben principalmente a la discontinuidad de las estructuras debido a la falta de adherencia del metal como consecuencia de la calidad del sustrato (corning 1737). Por lo cual, a pesar de que el corning 1737 presenta una conductividad térmica menor que la del N-BK7, se prefiere cuarzo y NBK7 para la fabricación de este tipo de estructuras. La figura 3.14, muestra las estructuras resistivas fabricadas sobre cuarzo y N-BK7.



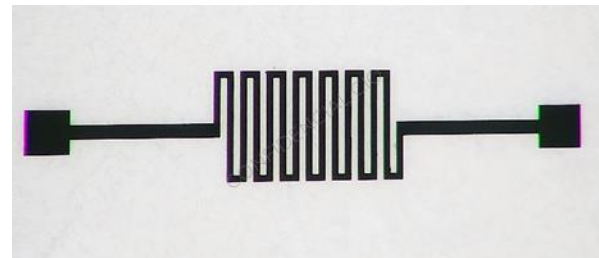
(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 3.14.** (a) Estructuras resistivas fabricadas vistas desde un microscopio digital, (b) fotografía de las estructuras resistivas fabricadas y (c y d) estructuras individuales vistas desde un microscopio digital.

La figura 3.15, muestra el corte transversal de los principales pasos del proceso de fabricación de las estructuras resistivas.

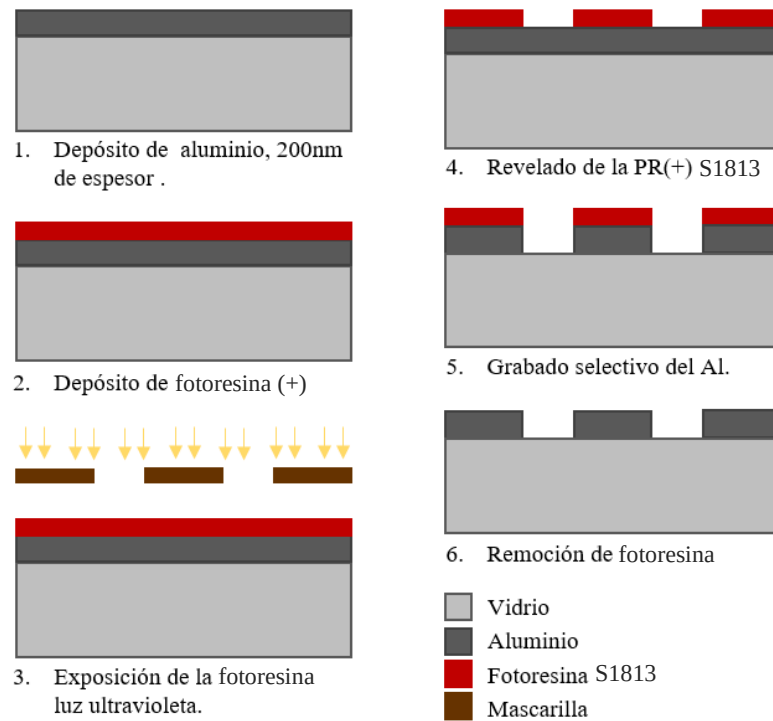


**Figura 3.15.** Corte transversal del flujo de proceso de fabricación de las estructuras resistivas.

Para comprender el proceso de fabricación, se añade el siguiente diagrama de bloques, figura 3.16.

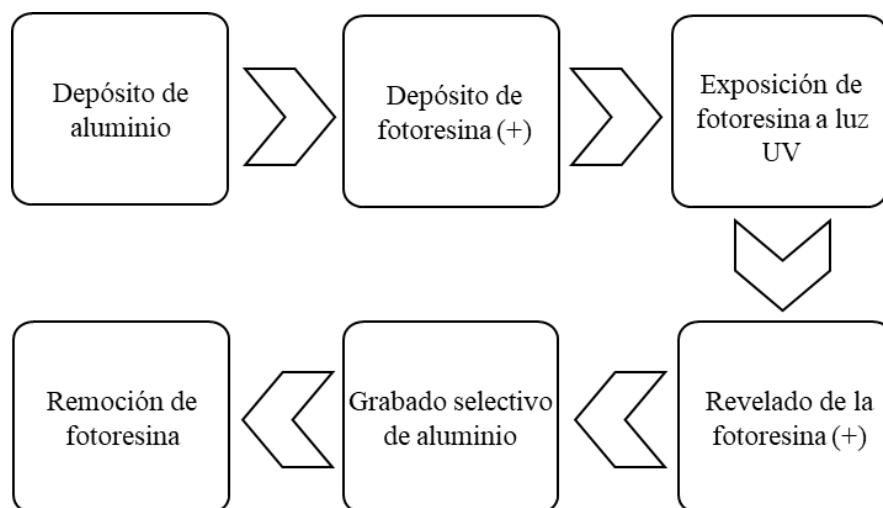


**Figura 3.16.** Diagrama del proceso de fabricación del dispositivo.

Finalmente, podemos concluir que el proceso de fabricación propuesto para las estructuras resistivas fue exitoso, ya que permitió obtener un dispositivo reproducible, sin defectos estructurales utilizando un sustrato de calidad, mecánicamente estable y tecnológicamente factible, además de presentar otras características como son: etapas de proceso a bajas temperaturas y bajo costo de procesamiento.

## REFERENCIAS

- [1] Chiu, N. F., Hsiao, T. C., & Lin, C. W., “Low power consumption design of micro-machined thermal sensor for portable spirometer”. *Journal of Applied Science and Engineering*, 8(3), 225-230, (2005).
- [2] Buder, U., Berns, A., Petz, R., Nitsche, W., & Obermeier, E., “AeroMEMS wall hot-wire anemometer on polyimide substrate featuring top side or bottom side bondpads” *IEEE Sensors Journal*, 7(8), 1095-1101, (2007).
- [3] Wang, Haitao et al. “Thermal Conductivity Measurement of Tungsten Oxide Nanoscale Thin Films.” *Materials Transactions* 47 (2006): 1894-1897.
- [4] Material properties. Cuarzo-Densidad-Capacidad calorífica-Conductividad térmica. [Online]. Disponible:<https://material-properties.org/es/cuarzo-densidad-capacidad-calorifica-conductividad-termica/>
- [5] Crystran. Optical Glass (N-BK7 and others). [Online]. Disponible: <https://www.crystran.co.uk/optical-materials/optical-glass-n-bk7-and-others>
- [6] Ejeian, F., Azadi, S., Razmjou, A., Orooji, Y., Kottapalli, A., Warkiani, M. E., & Asadnia, M., “Design and applications of MEMS flow sensors: A review”, *Sensors and Actuators A: Physical*, 295, 483-502, (2019).
- [7] Hung, S. T., Wong, S. C., & Fang, W., “The development and application of microthermal sensors with a mesh-membrane supporting structure”, *Sensors and Actuators A: Physical*, 84(1-2), 70-75, (2000).
- [8] Giani, A., Mailly, F., Bonnot, R., Pascal-Delannoy, F., Foucaran, A., & Boyer, A., “Thermal model of thin film anemometer”, *Microelectronics journal*, 33(8), 619-625, (2002).
- [9] T. Dinh, H. Phan, A. Qamar, P. Woodfield, N. Nguyen, D.V. Dao, “Thermoresistive effect for advanced thermal sensors: fundamentals, design considerations, and applications”, *J. Microelectromech. Syst.* 26 (2017)966–986.
- [10] EEpwer. Temperature Coefficient of Resistance. [Online]. Disponible: <https://eepower.com/resistor-guide/resistor-fundamentals/temperature-coefficient-of-resistance/#>
- [11] Hung S T, Wong S C and Fang W., “The development and application of microthermal sensors with a mesh-membrane supporting structure”, *Sensors Actuators A* 84 70–5, (2000).
- [12] Rohm and Hass Electronic, “Microposit S1800 G2 series photoresists for Microlithography Applications”, (2006).

## CAPITULO 4. CARACTERIZACIÓN

En este capítulo se presentan los métodos experimentales utilizados en la caracterización de las estructuras resistivas fabricadas. El proceso de caracterización realizado se divide en dos etapas: en la primera, confirmamos la continuidad eléctrica, medimos los valores de resistencia eléctrica y obtuvimos las curvas I-V de cada una de las estructuras fabricadas, diferenciándolas según su tipo de sustrato; mientras que en la segunda etapa se caracterizó el incremento de temperatura del sensor de película delgada en función del voltaje aplicado.

### 4.1 CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA

La caracterización eléctrica se realizó con la estación de pruebas Summit 1200 y con el analizador de parámetros. Con ambas herramientas se obtuvo el valor de la resistencia eléctrica de las estructuras diseñadas, con la finalidad de tener un valor esperado antes de las mediciones y realizar una comparación.

#### 4.1.1 Determinación teórica de la resistencia eléctrica

La determinación de la resistencia eléctrica de las estructuras fabricadas se realizó usando la siguiente expresión:

$$R = \frac{\rho l}{wt} \quad (1)$$

Donde  $\rho$ , es la resistividad del material,  $l$  la longitud,  $w$  el ancho y  $t$  el espesor de la estructura. Con esta expresión (ecuación 1), se estimó el valor de la resistencia eléctrica para cada una de las estructuras fabricadas. Las estructuras se enumeraron para su identificación como se indica en la figura 4.1. Para la estimación de los valores de la resistencia eléctrica, se consideraron los parámetros de fabricación de las estructuras. Los pasos realizados fueron los siguientes:

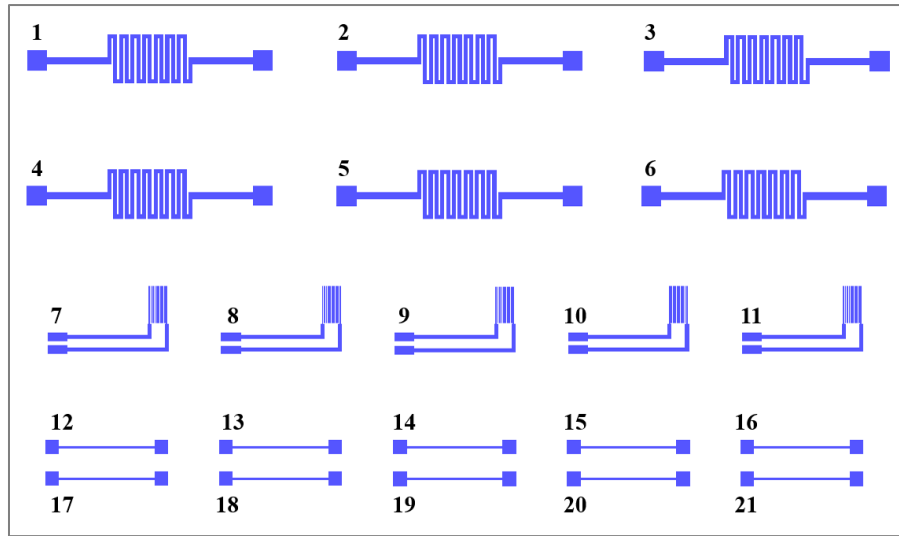


**Figura 4.1.** Numeración de las estructuras diseñadas.

El cálculo de la resistencia eléctrica de las estructuras diseñadas se calculó por segmentos, como se indica en la figura 4.2. El valor de la resistencia total se obtuvo sumando los valores de resistencia eléctrica de cada uno de los segmentos que forman la estructura.

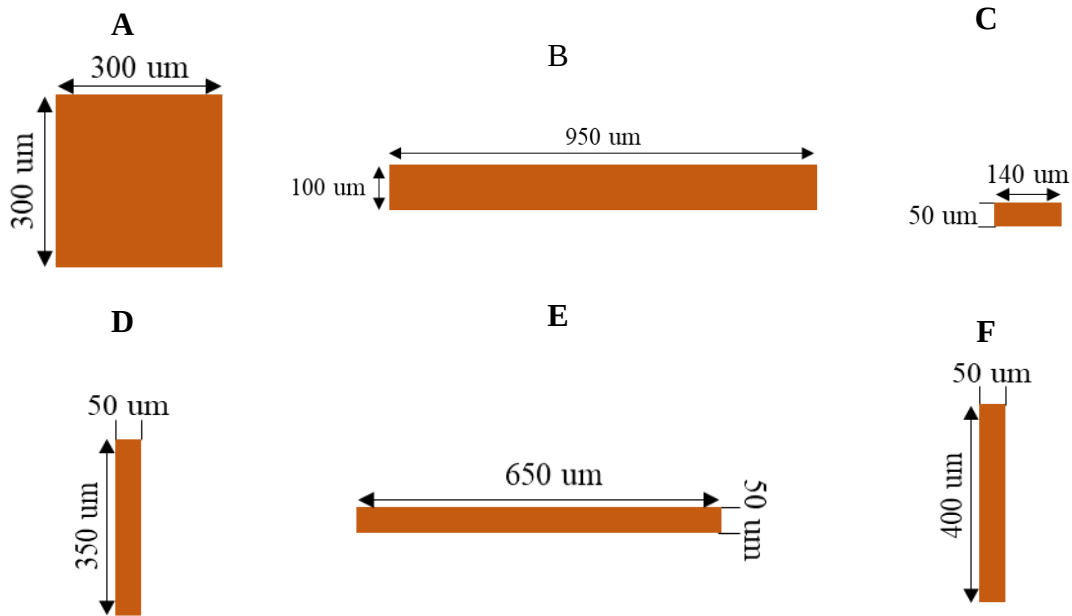


**Figura 4.2.** Segmentos de la estructura resistiva en espiral de mayor tamaño y sus dimensiones.

Considerando que la resistividad eléctrica del aluminio es  $\rho = 2.28 \times 10^{-8}$ , la resistencia eléctrica de los segmentos se calcula de la siguiente manera:

**Segmento A**

$$R_A = \left( \frac{(2.82 \times 10^{-8})(300 \times 10^{-6})}{(300 \times 10^{-6})(250 \times 10^{-9})} \right) = \mathbf{0.112 \, \Omega}$$

**Segmento B**

$$R_B = \left( \frac{(2.82 \times 10^{-8})(950 \times 10^{-6})}{(100 \times 10^{-6})(250 \times 10^{-9})} \right) = \mathbf{1.071 \, \Omega}$$

**Segmento C**

$$R_C = \left( \frac{(2.82 \times 10^{-8})(140 \times 10^{-6})}{(50 \times 10^{-6})(250 \times 10^{-9})} \right) = \mathbf{0.315 \, \Omega}$$

**Segmento D**

$$R_D = \left( \frac{(2.82 \times 10^{-8})(350 \times 10^{-6})}{(50 \times 10^{-6})(250 \times 10^{-9})} \right) = \mathbf{0.789 \, \Omega}$$

**Segmento E**

$$R_E = \left( \frac{(2.82 \times 10^{-8})(650 \times 10^{-6})}{(50 \times 10^{-6})(250 \times 10^{-9})} \right) = \mathbf{1.466 \, \Omega}$$

**Segmento F**

$$R_F = \left( \frac{(2.82 \times 10^{-8})(400 \times 10^{-6})}{(50 \times 10^{-6})(250 \times 10^{-9})} \right) = \mathbf{0.902 \, \Omega}$$

De la estructura 1 a la 6 básicamente está formada por 2 segmentos A, dos segmentos B, 14 segmentos C, 1 segmento D, 13 segmentos E y 1 segmento F. Realizando la suma de las resistencias eléctricas de cada segmentó, la resistencia eléctrica calculada total es:

$$R_{TOTAL} = 2(0.112) + 2(1.071) + 14(0.315) + 0.789 + 13(1.466) + 0.902 = \mathbf{27.305}$$

Los valores de resistencia eléctrica de las otras estructuras fabricadas fueron calculadas siguiendo el mismo procedimiento. La tabla 4.1, muestra los resultados obtenidos.

**Tabla 4.1.** Valores analíticos de resistencia eléctrica para las estructuras fabricadas.

| Estructura | Resistencia eléctrica [ $\Omega$ ] |
|------------|------------------------------------|
| 1 – 6      | 27.305                             |
| 7 – 11     | 73.82                              |
| 12 – 21    | 6.99                               |

#### 4.1.2 Medición de la resistencia eléctrica

La caracterización eléctrica de las estructuras resistivas fabricadas se llevó a cabo utilizando la estación de pruebas Summit 1200 y el analizador de parámetros Keithley 4200A-SCS. Estos equipos fueron utilizados para comprobar la conductividad eléctrica, obtener las curvas I-V y medir los valores de resistencia eléctrica de las estructuras fabricadas sobre los substratos de cuarzo, N-BK7 y corning 1737.

Los pasos que se siguieron para realizar esta caracterización fueron:

1. Encendido de la estación de pruebas y el analizador de parámetros (figura 4.3).

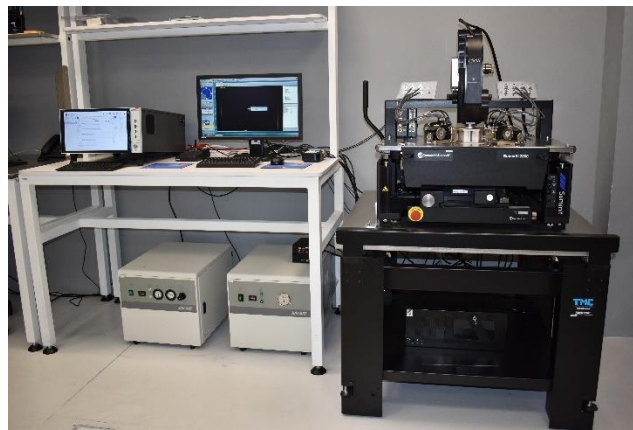
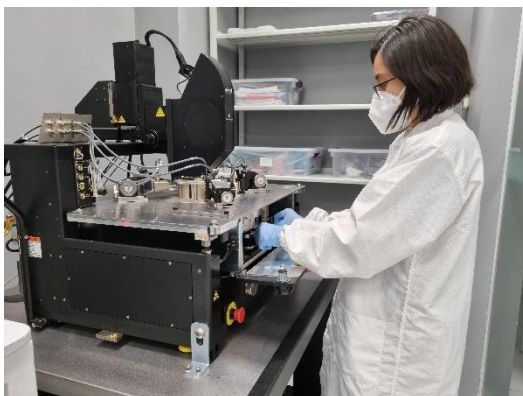


**Figura 4.3.** Estación de pruebas y analizador de parámetros encendidos.

2. Abrimos la microchamber y colocamos el substrato en el Chuck. En este paso seleccionamos el área de vacío para la sujeción de nuestra muestra.



(a)



(b)

**Figura 4.4.** (a) Microchamber abierta, en esta imagen se observa al usuario jalando manualmente el chuck y (b) muestra colocada en el chuck.

3. Cerramos la microchamber y comenzamos a bajar las puntas de prueba sin tocar el sustrato con ayuda de los posicionadores y el microscopio.

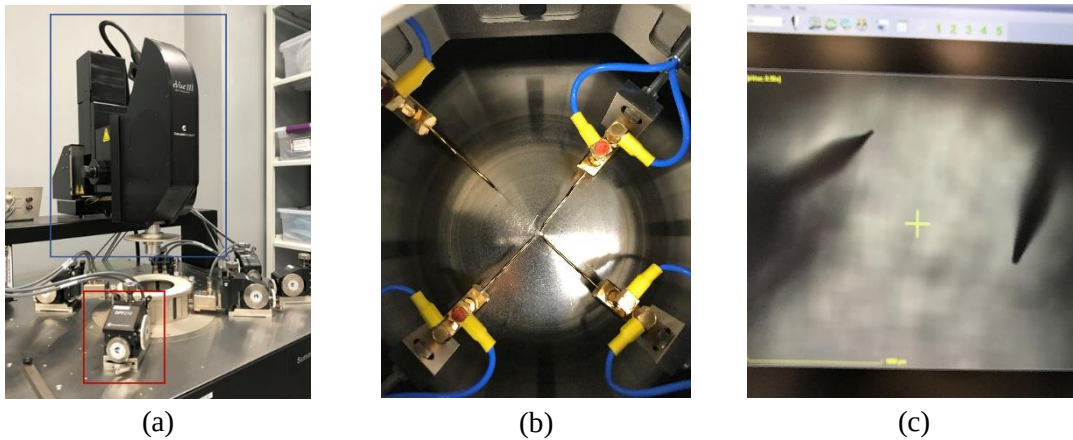


**Figura 4.5.** (a) Posicionadores (línea roja) y microscopio (línea azul), (b) Puntas de prueba y (c) puntas de prueba en el aire vistas con el microscopio.

4. Colocamos las puntas de prueba sobre los pads de las estructuras diseñadas. Las puntas tienen un diámetro de  $35\ \mu\text{m}$  y los pads varían de  $300\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$  y  $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$ .

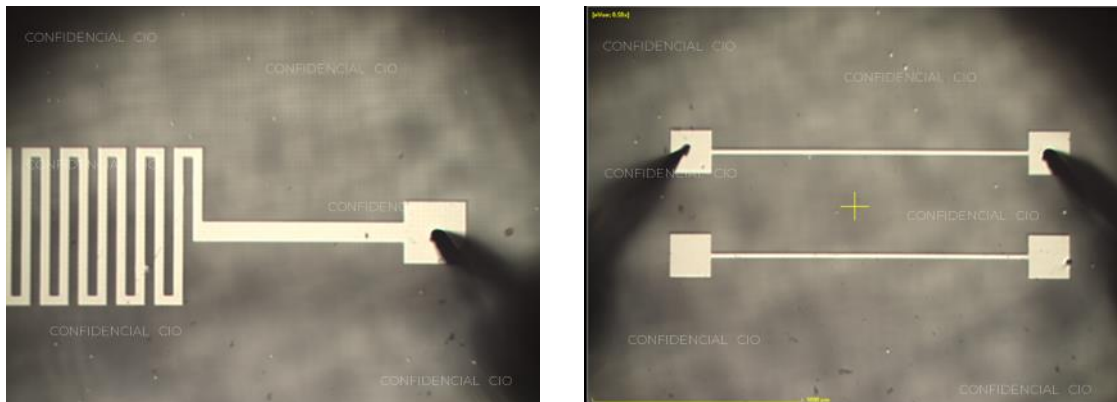


**Figura 4.6.** Puntas de prueba sobre los pads de las estructuras a medir.

5. Abrimos el software CLARIUS del analizador de parámetros y seleccionamos el tipo de dispositivo a analizar, asignamos los parámetros iniciales y comenzamos a medir.

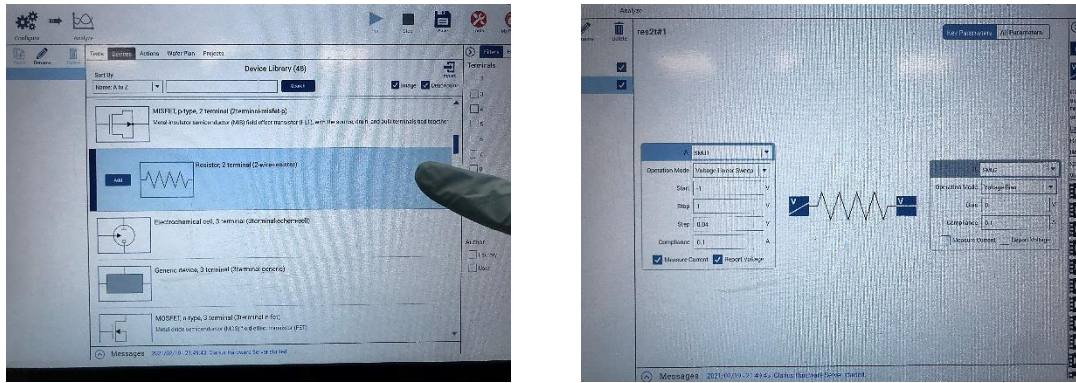


**Figura 4.7.** Parámetros de configuración del software CLARIUS.

Para realizar las mediciones de las estructuras resistivas seleccionamos como dispositivo un resistor. Para las estructuras 1 – 11 se aplicó un voltaje pico a pico de -5V a 5V con un step de 0.1 V y para las estructuras 12 – 21 se aplicó un voltaje pico a pico de -1V a 1V con el mismo step. El cambio en el Voltaje aplicado se debe principalmente al tamaño de la estructura.

Las curvas I-V obtenidas para cada una de las estructuras fabricadas fueron muy similares, por lo cual, en este documento únicamente se presenta una curva para cada tipo de estructura, ver figuras 4.8 y 4.9. Los resultados, muestran un incremento de corriente dependiente del voltaje. Para la estructura en espiral de mayor tamaño y la estructura en forma de hilo, se observa una región de saturación, esta región corresponde a la corriente de saturación del equipo, no de la estructura, y ocurre en 0.009 A.

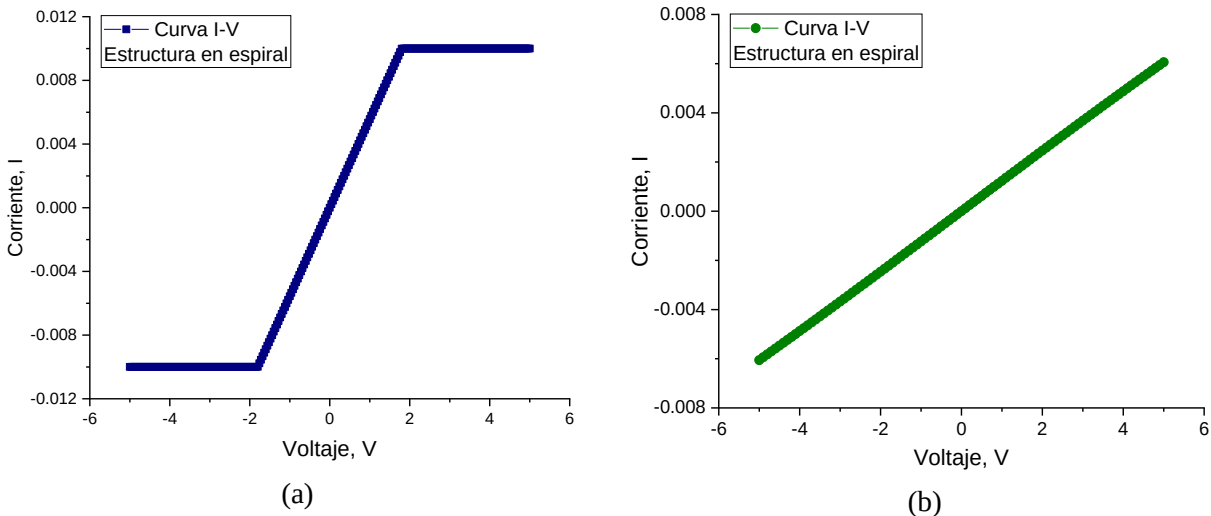


**Figura 4.8.** Curva I-V de la estructura en forma de espiral (a) estructura grande y (b) estructura pequeña.

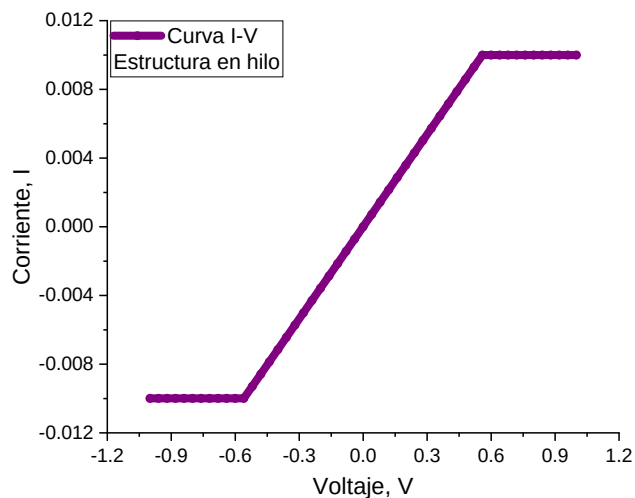


**Figura 4.9.** Curva I-V de la estructura en forma de hilo.

La tabla 4.2, muestra los valores de resistencia eléctrica obtenidos para cada una de las estructuras. Los espacios asignados con NA, significa que no se pudo obtener una medición debido a la falta de continuidad eléctrica de las estructuras.

**Tabla 4.2.** Valores de resistencia eléctrica de las estructuras fabricadas.

| Estructura* | Resistencia eléctrica ( $\Omega$ ) |          |              |
|-------------|------------------------------------|----------|--------------|
|             | Cuarzo                             | N-BK7    | Corning 1737 |
| 1           | 28.57278                           | 28.24718 | 28.1957      |
| 2           | 28.95317                           | 28.3679  | 28.7715      |
| 3           | 29.49001                           | 28.4409  | 29.1845      |
| 4           | 28.42150                           | 28.2471  | 28.5651      |
| 5           | 28.73114                           | 28.3069  | 28.3421      |
| 6           | 29.2391                            | 28.2076  | NA           |
| 7           | 72.93726                           | NA       | 69.6273      |
| 8           | NA                                 | 72.7069  | 72.1918      |
| 9           | 73.44369                           | 74.7321  | 73.921       |
| 10          | 72.45493                           | 70.8948  | 74.3609      |
| 11          | 74.59740                           | 73.2512  | NA           |
| 12          | 6.40692                            | 6.4822   | 6.41924      |
| 13          | 6.49695                            | 6.4594   | 6.4927       |
| 14          | 6.54714                            | 6.4330   | 6.5568       |
| 15          | 6.57126                            | 6.4274   | NA           |
| 16          | 6.67806                            | 6.3997   | 2.92924      |
| 17          | 6.41797                            | 6.4705   | 6.42035      |

|    |         |         |         |
|----|---------|---------|---------|
| 18 | 6.50807 | 6.4735  | NA      |
| 19 | 6.49123 | 6.3880  | 6.50043 |
| 20 | 6.59481 | 6.40139 | NA      |
| 21 | 6.68102 | 6.40960 | 7.75448 |

\*Las estructuras fueron enumeradas de acuerdo como se indica en la figura 4.1.

Como se puede observar, los resultados medidos se ajustan muy bien a los resultados analíticos, mostrando una diferencia de mucho 3 ohm, con respecto a los valores calculados. Estas variaciones se pueden atribuir al proceso de fabricación, donde podemos tener variaciones de espesor, ancho y largo de las estructuras por las diferentes técnicas utilizada. Además, a pesar de que el equipo de medición utiliza cables de bajo ruido, estos pueden contribuir al valor medido.

En cuanto a la prueba de conductividad eléctrica, podemos observar que el sustrato de corning, presenta un mayor número de estructuras sin continuidad eléctrica (5 estructuras), debido a la baja calidad del sustrato. Por el contrario, los sustratos de cuarzo y N-BK7 presentaron una sola estructura sin continuidad eléctrica. Con estos datos, se llegó a la conclusión que el cuarzo y N-BK7 son los mejores candidatos para utilizarlos como sustrato.

## 4.2 CARACTERIZACIÓN TÉRMICA

La caracterización térmica de las estructuras resistivas fabricadas se realiza midiendo la temperatura en función del voltaje aplicado. Para realizar esta caracterización se utiliza el método óptico Background Oriented Schlieren (BOS). Este método en comparación con otros métodos no ópticos, tiene la ventaja de no introducir perturbaciones en el objeto a examinar y, además, cubre todo el campo de visión, de modo que se pueden realizar mediciones para una región completa.

BOS es un método sin contacto que se utiliza para medir campos de desplazamiento que son proporcionales al gradiente de las distribuciones del índice de refracción dentro de un área de observación. El sistema de medición consiste en un fondo (rejilla), el gradiente de densidad (objeto a analizar), una cámara (la cámara se enfoca sobre la rejilla) y una fuente de luz [1]. La figura 4.10, muestra el esquema de medición con esta técnica.

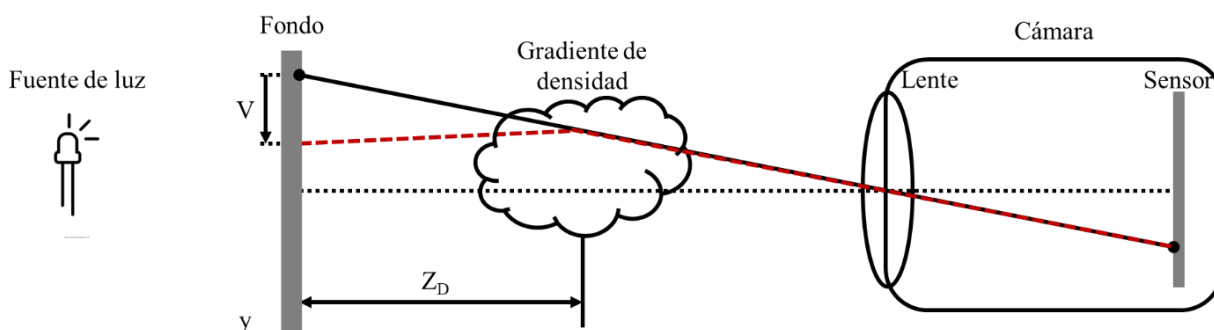


**Figura 4.10.** Esquema de medición de la técnica BOS (permite visualizar gradientes de densidad, se basa en la desviación de los rayos de luz debido a cambios en el índice de refracción).

La medición de temperatura inicia tomando dos imágenes: una sin gradiente de densidad y la otra con gradiente de densidad, en nuestro caso fue con o sin voltaje aplicado. Estas imágenes son la imagen de referencia y la imagen desplazada. Al aplicar un voltaje, las estructuras espaciales correspondientes a la imagen de referencia sufren desplazamientos que son proporcionales al cambio de índice de refracción [1-2]. La imagen 4.11 muestra una imagen de referencia y una imagen desplazada.

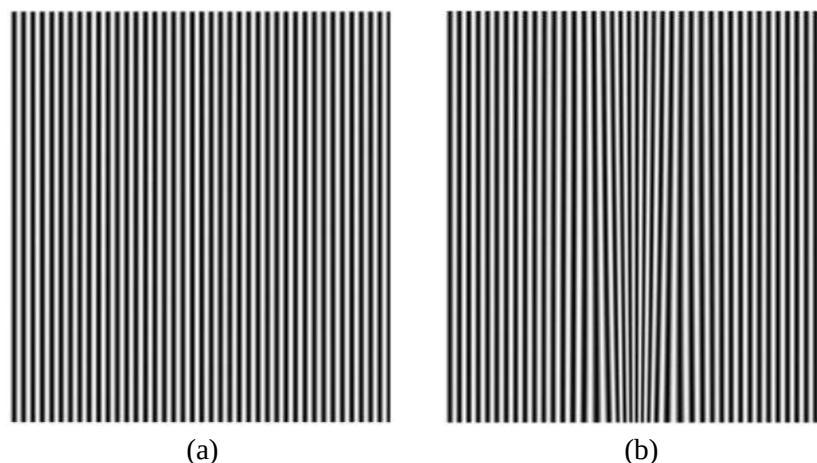


**Figura 4.11.** (a) Imagen sin gradiente de densidad (referencia) y (b) con gradiente de densidad (franja desplazada).

La imagen desplazada y la imagen de referencia se utilizan para calcular los campos de desplazamiento a partir del algoritmo de transformada de Fourier [2]. Al realizar la transformada de Fourier, el desplazamiento aparente en el fondo se obtiene como un cambio de fase. El cambio de fase, es el cambio de intensidades (debido al movimiento aparente de las líneas negras y blancas) y es proporcional a la derivada de la temperatura. Una vez obtenido el cambio de fase, el programa realiza una integral para calcular la temperatura del sensor y del aire circundante.

Esta caracterización se realizó con apoyo del Dr. Bernardino Barrientos García, investigador del CIO y el Dr. Carlos Mares Castro, Ingeniero de la Dirección de Tecnología e Innovación, quienes nos fueron guiando en el proceso de obtención de las imágenes y su procesamiento en el software Matlab. Estas mediciones, se realizaron en el laboratorio de visualización, en donde se implementan técnicas de velocimetría por imágenes de partículas, schlieren, proyección de franjas, Interferometría y polarización. El laboratorio cuenta con ambiente controlado y dos mesas ópticas con sistema de amortiguamiento.

El arreglo óptico utilizado (fuente de luz, rejilla, cámara, etc.), ya se encontraba armado, por lo que, únicamente improvisamos una base para integrar nuestro sensor, ya que se requería una plataforma de mayor altura debido al tamaño micrométrico de nuestro dispositivo. La figura 4.12, muestra las diferentes partes que conforman el arreglo óptico utilizado, así como la plataforma improvisada.

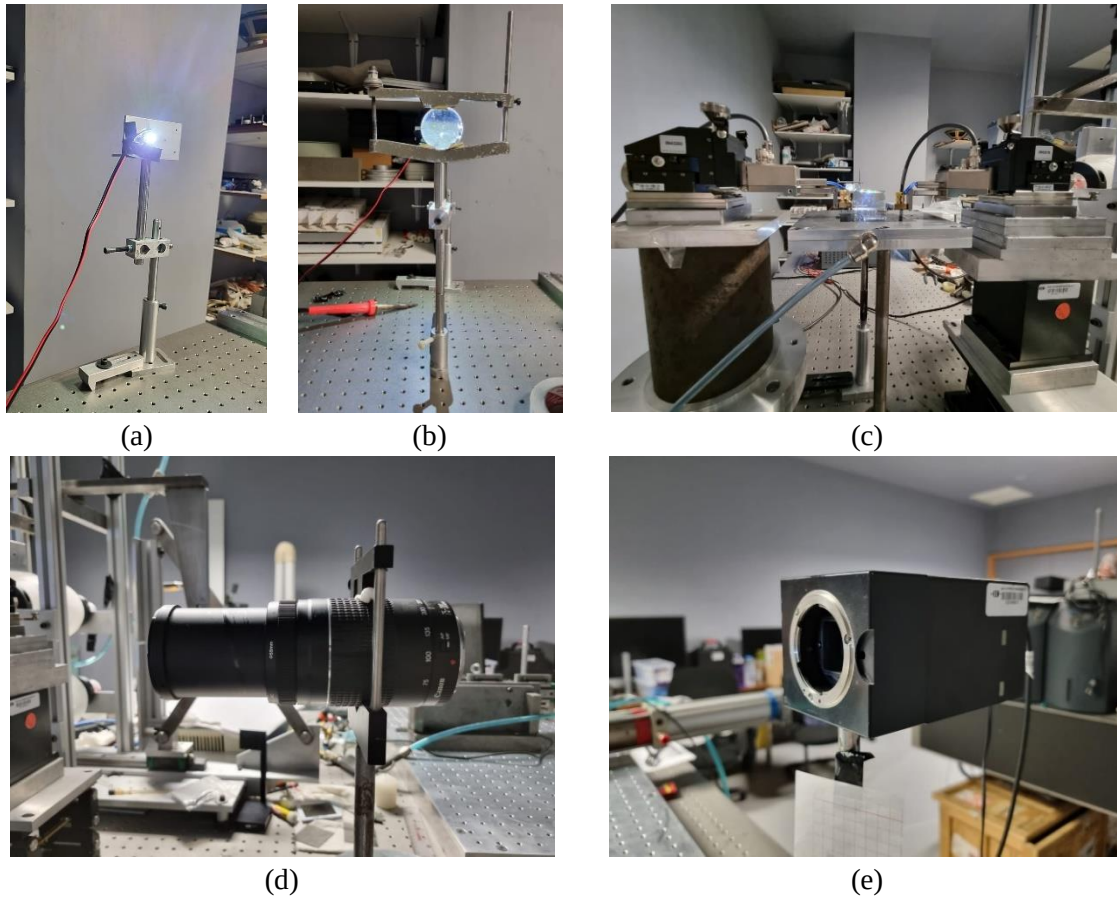


**Figura 4.12.** (a) fuente de luz, (b) espejo para concentrar la luz, (c) base improvisada, en la cual podemos ver: la platina, la rejilla, las puntas y sus posicionadores, (d) el lente de la cámara y (e) la cámara.

Las mediciones de temperatura se realizaron para los sensores de flujo en forma de espiral (estructura pequeña y grande) de la siguiente manera:

1. Colocamos las estructuras resistivas fabricadas sobre la platina y lo fijamos con vació.

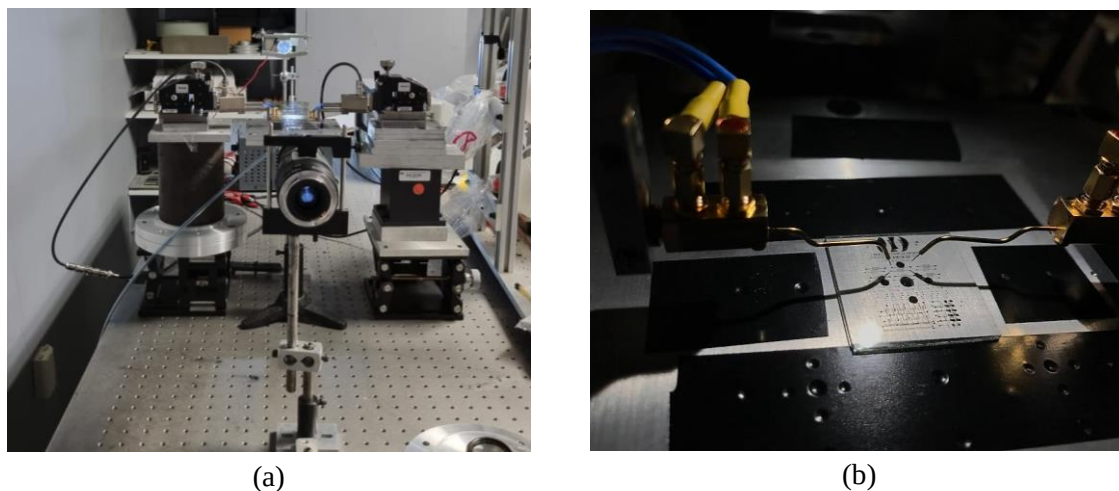


**Figura 4.13.** (a) arreglo completo y (b) estructura resistiva sobre la platina (puntas de prueba arriba).

2. Bajamos las puntas de prueba y las colocamos cuidadosamente sobre los pads de la estructura resistiva utilizando los posicionadores y una lupa. La lupa se utiliza, ya que no fue posible integrar un microscopio al arreglo óptico utilizado, ver figura 4.14.

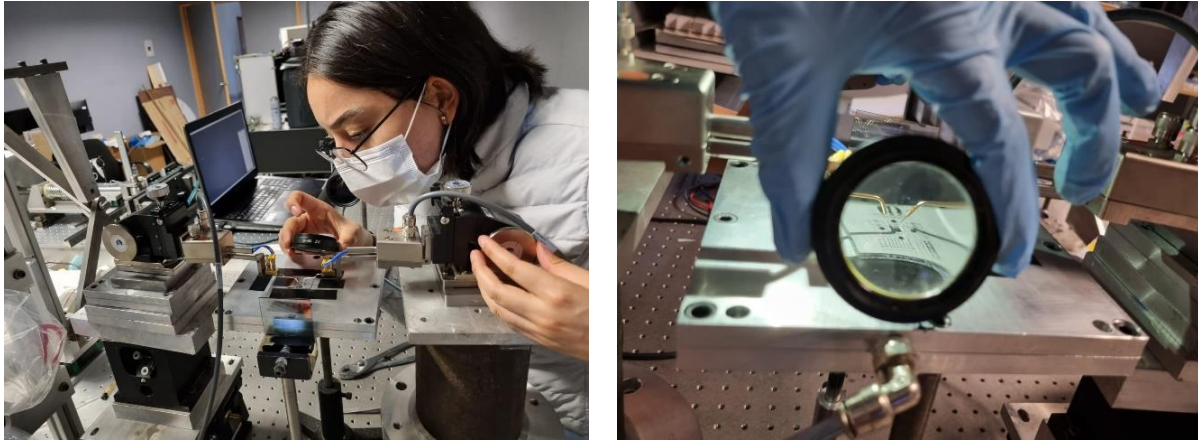


**Figura 4.14.** Posicionamiento de las puntas de prueba sobre los pads del sensor.

3. Una vez que se encuentran posicionadas las puntas de prueba, enfocamos la cámara sobre la rejilla. Para este paso se realiza lo siguiente:
  - a. La cámara se encuentra conectada a una Laptop, abrimos el programa *LuCam Capture* y colocamos los siguientes parámetros: Exposición 2.8 y ganancia 1.
  - b. Visualizamos las líneas de la rejilla en el programa *LuCam Capture* y enfocamos la imagen variando la distancia de la lente de la cámara. En este caso la rejilla utilizada tiene una densidad de 1000 líneas por pulgada. La figura 4.15, muestra las rejillas vistas en el programa *LuCam Capture*.



**Figura 4.15.** Rejilla enfocada vista en el programa *LuCam Capture*.

4. Tomamos la imagen de referencia y la guardamos. En total capturamos 10 imágenes, una de ellas se muestra en la figura 4.16, en la cual podemos observar las líneas de la rejilla enfocadas.

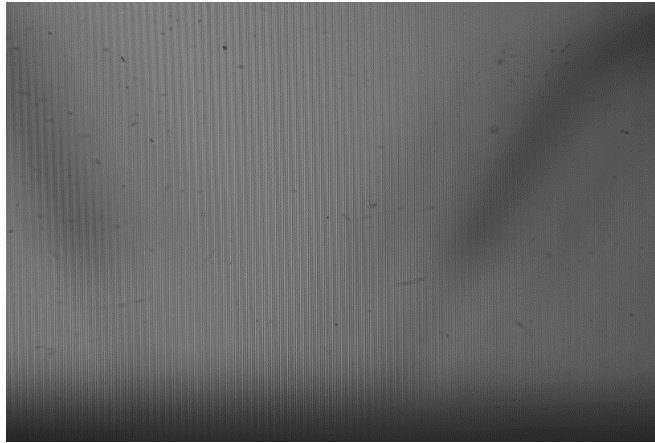
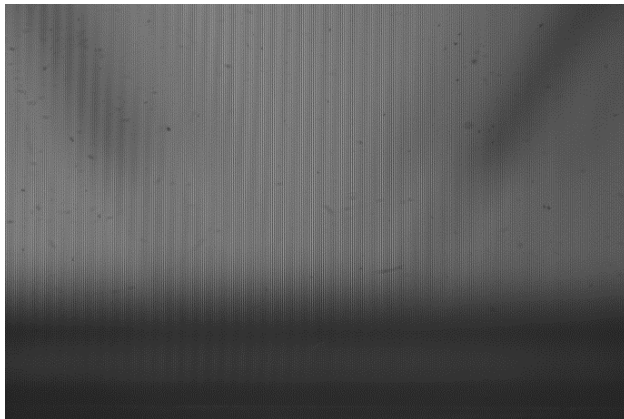
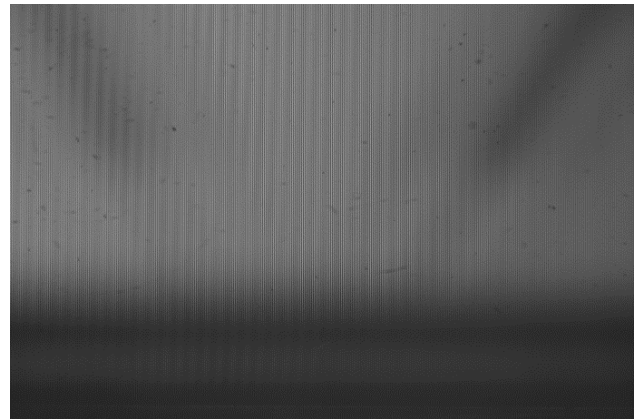


**Figura 4.16.** Imagen de referencia.

5. Con una fuente de voltaje aplicamos 5 V y capturamos la imagen desplazada. Al igual que para la referencia capturamos 10 imágenes con un intervalo en tiempo de 5 minutos cada una.
6. Para las siguientes capturas, incrementamos el valor del voltaje aplicado a 10V y tomamos las siguientes 10 imágenes. Este procedimiento se repite hasta llegar a 30 V. La figura 4.17 muestra las imágenes capturadas para 5 V y 30 V.



(a)



(b)

**Figura 4.17.** Imágenes capturadas para (a) 5 V y (b) 15 V.

En las imágenes anteriores no es posible visualizar el desplazamiento de las líneas de la rejilla. Sin embargo, durante las mediciones este desplazamiento se observó como un movimiento de vaivén, que incrementaba al aumentar el voltaje.

7. El siguiente paso, consiste en procesar las imágenes utilizando el programa *sensor* (programa realizado por el Dr. Bernardino Barrientos para el cálculo de temperatura con la técnica BOS) en el software Matlab. La imagen 4.18, muestra la captura de pantalla de parte del programa utilizado.

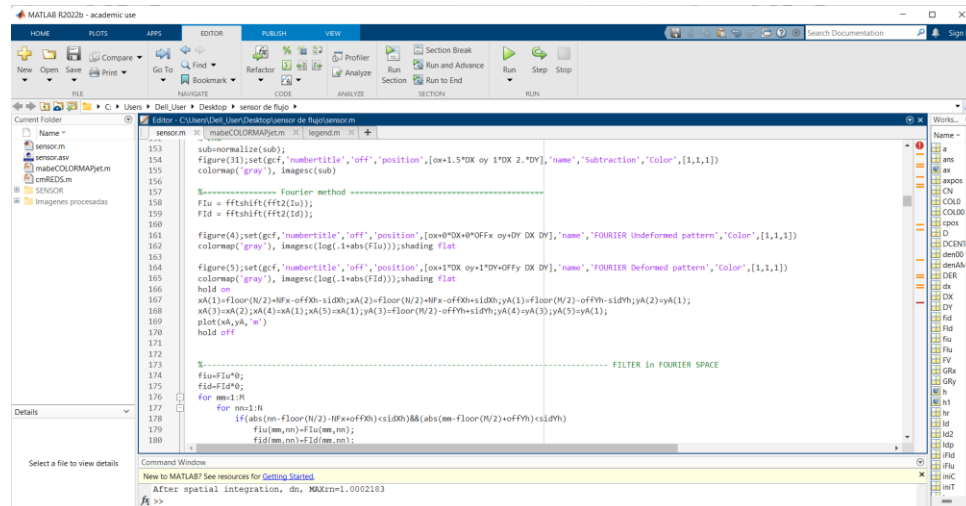


**Figura 4.18** Captura de pantalla de parte programa utilizado en el software Matlab.

La información del programa no se presenta de manera detallada, ya que pertenece a otro grupo de investigación. Entre los parámetros que se utilizan para el procesamiento se encuentran: área de visualización (tamaño del sensor), periodo de la rejilla (1000), temperatura ambiente (24° C) y las imágenes capturadas.

#### 4.2.1 Resultados de procesamiento espira grande

La temperatura ambiente controlada en el laboratorio de visualización durante la caracterización térmica se verificó con un sensor de temperatura, el valor medido fue de 24° C. Sin embargo, antes de comenzar con el análisis de las imágenes polarizadas a 5V, 10V, y hasta 30V, analizamos únicamente la imagen de referencia para obtener la temperatura del sensor sin polarización. Para esto, la imagen de referencia se utiliza como referencia y como imagen desplazada.

La figura 4.19a, muestra la imagen de referencia y la figura 4.19b, la sustracción de la imagen de referencia y desplazada (en este caso la imagen desplazada en la de referencia). Como es de esperarse, se obtiene una imagen en color negro, debido a que estamos restando la misma imagen, es decir, tenemos un valor 0.

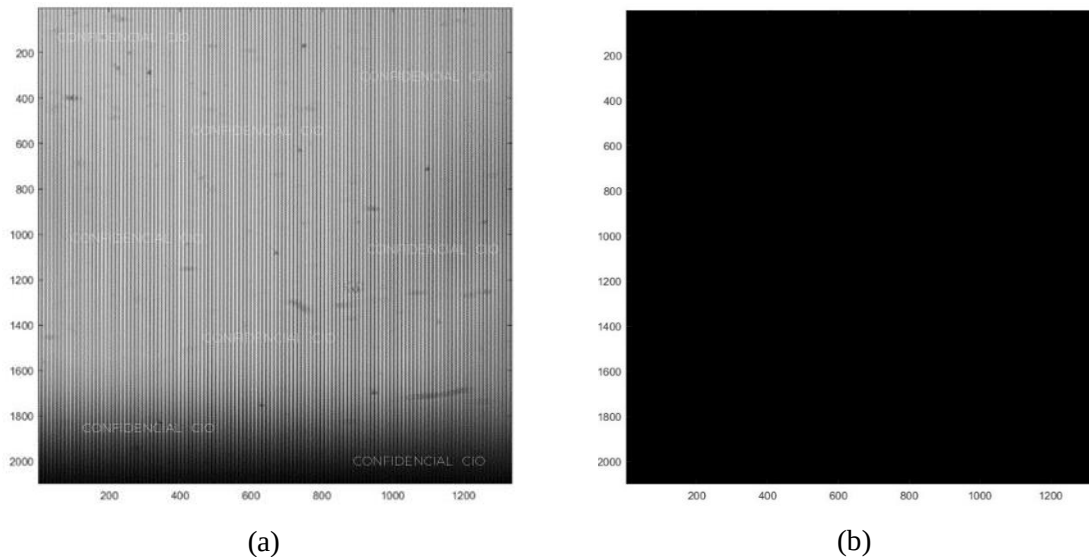


**Figura 4.19.** (a) Imagen de Referencia (sin voltaje aplicado) capturada para la estructura resistiva en forma de espiral (grande) y (b) sustracción (referencia-referencia).

El cambio de fase obtenido después de que el programa realizara automáticamente la transformada de Fourier se muestra en la figura 4.20a. En este caso, la imagen resultante es de un color uniforme, casi blanca, debido a que no hay ningún cambio de fase entre la imagen 1 (referencia) y la imagen 2 (desplazada). El resultado de la fase se integra y como resultado tenemos el valor de la temperatura, ver imagen 4.20b. La temperatura medida fue de 24° C, lo cual comprueba la temperatura ambiente en el laboratorio.

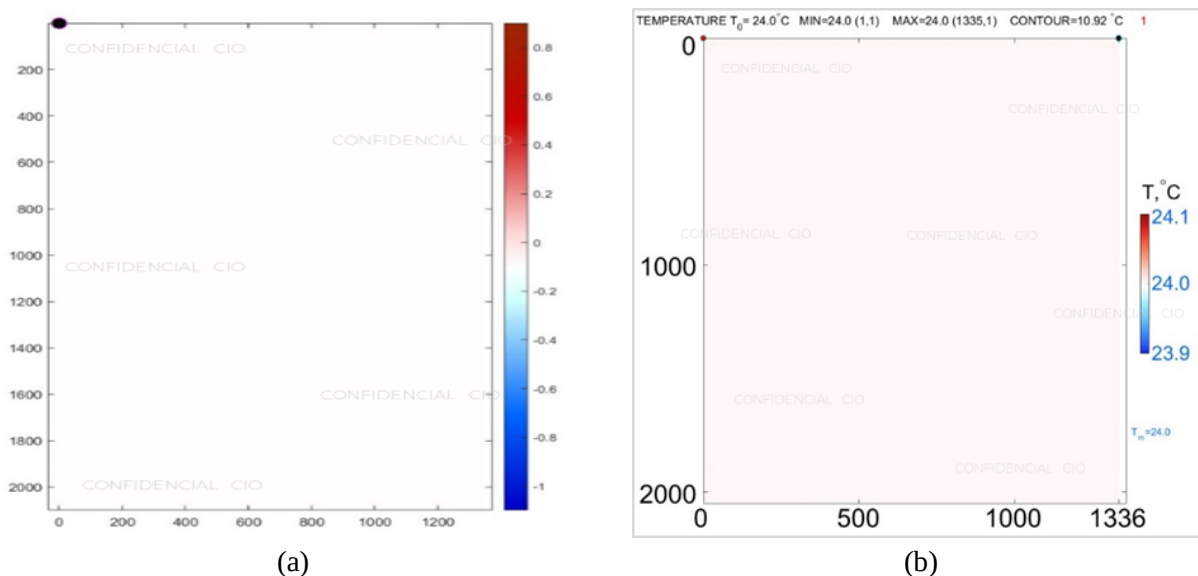
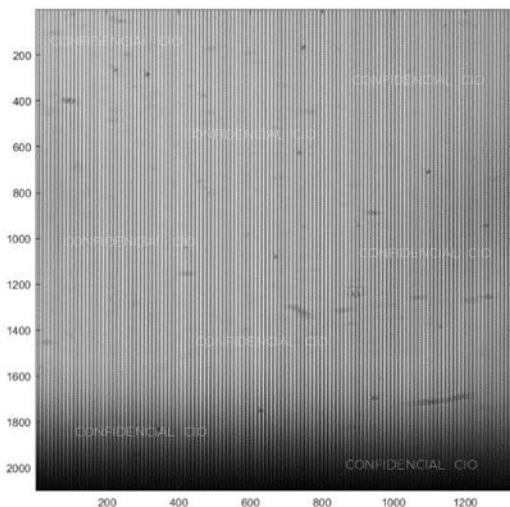


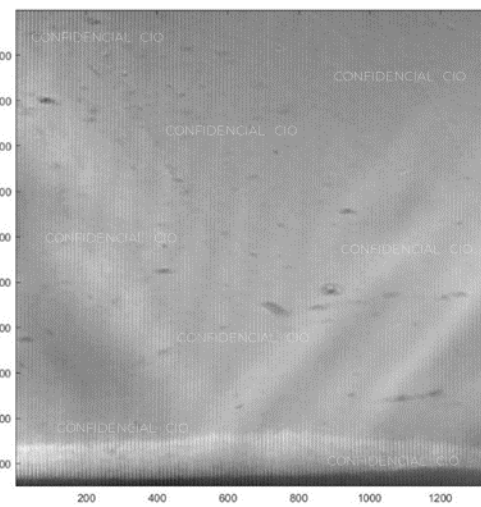
**Figura 4.20.** (a) cambio de fase y (b) temperatura medida sin voltaje aplicado (24° C).

Una vez comprobada la temperatura ambiente en la que se realizó la caracterización térmica de las estructuras resistivas fabricadas, se procesan las imágenes capturadas para 5V, 10V, 15V, 20V, 25V y 30V. Para cada voltaje aplicado se capturan 10 imágenes y se utiliza la misma imagen de referencia, esta imagen también se utilizó para el análisis anterior, ver figura 4.19a.

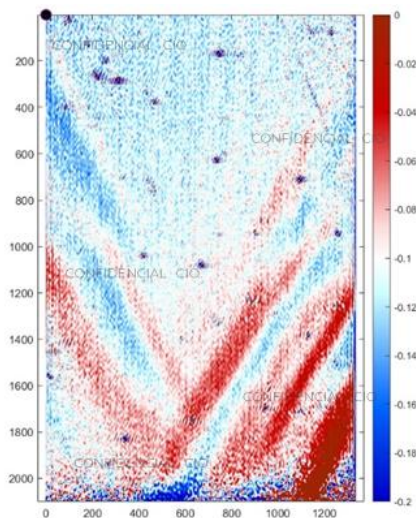
Los resultados obtenidos para la resistencia polarizada con 5V se muestran en la figura 4.21. En esta figura podemos observar: (i) la imagen desplazada capturada con el programa *LuCam Capture*, ver figura 4.21a, (ii) la sustracción de la imagen de referencia y la imagen desplazada, ver figura 4.21b, en esta imagen se pueden observar de manera cualitativa el cambio de temperatura del sensor y el efecto de convección al aplicar un voltaje, (iii) el cambio de fase obtenido después de aplicar la transformada de Fourier (cambios en intensidades), ver figura 4.21c y (iv) la temperatura medida, ver figura 4.21d; en la región del sensor la temperatura medida fue de  $24.3^{\circ}\text{C}$ , es decir se tuvo un incremento de  $0.3^{\circ}\text{C}$  en comparación a la temperatura sin polarización.



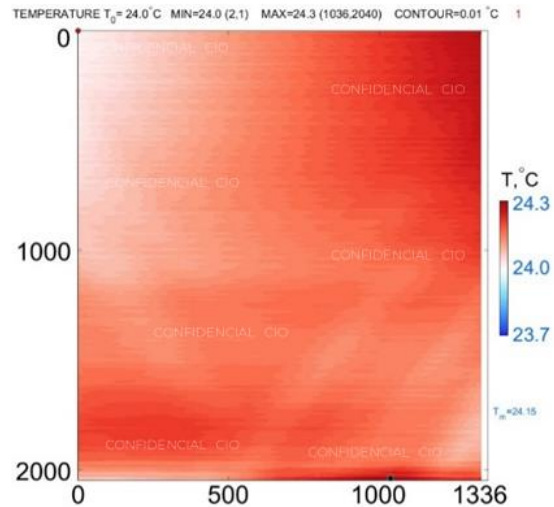
(a)



(b)



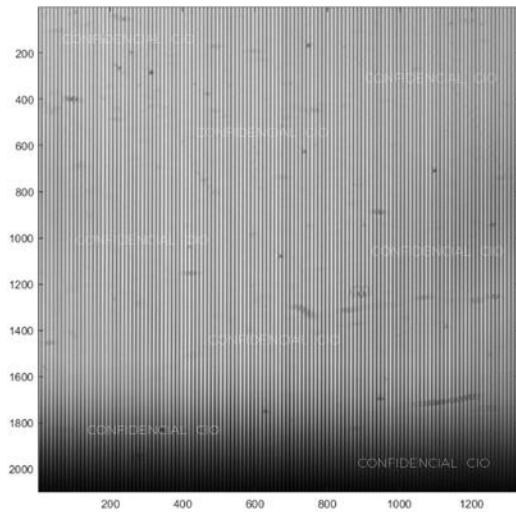
(c)



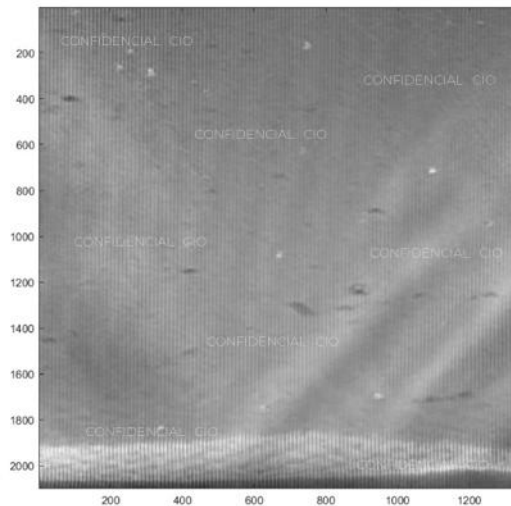
(d)

**Figura 4.21.** Imágenes capturadas para la estructura resistiva polarizada con 5V(a) imagen desplazada, (b) sustracción, (c) cambio de fase y (d) temperatura medida (24.3° C).

La figura 4.22, muestra los resultados obtenidos para la estructura resistiva polarizada con 10V. Los resultados muestran un incremento en la temperatura del sensor de 0.2° C. Además, en las imágenes de fase y sustracción es posible visualizar mayor intensidad en los patrones de convección (intensidad y desplazamiento). Recordemos que estos cambios de coloración se pueden atribuir de manera cualitativa a cambios de temperatura.



(a)



(b)

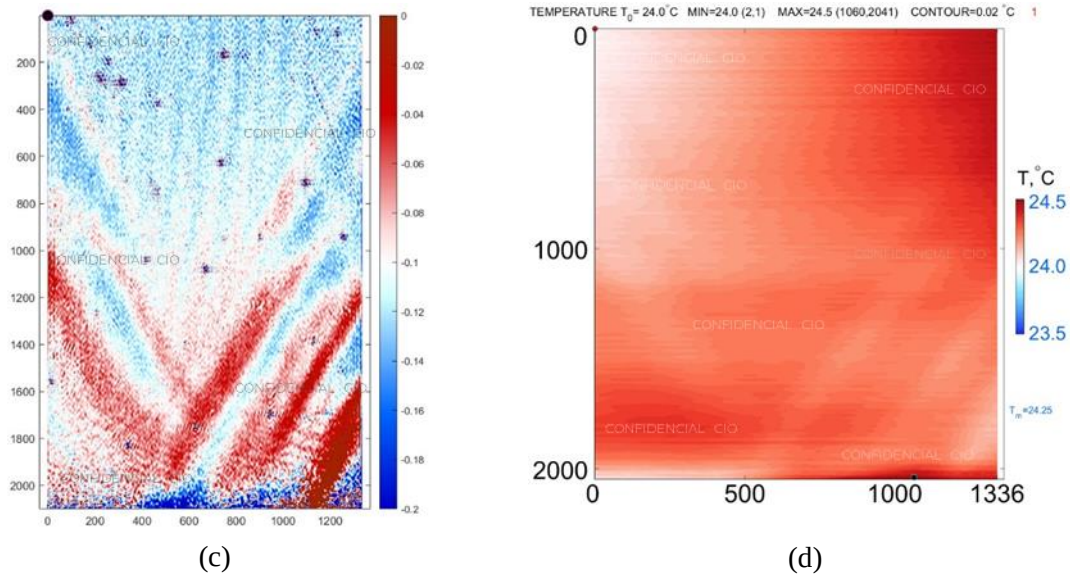
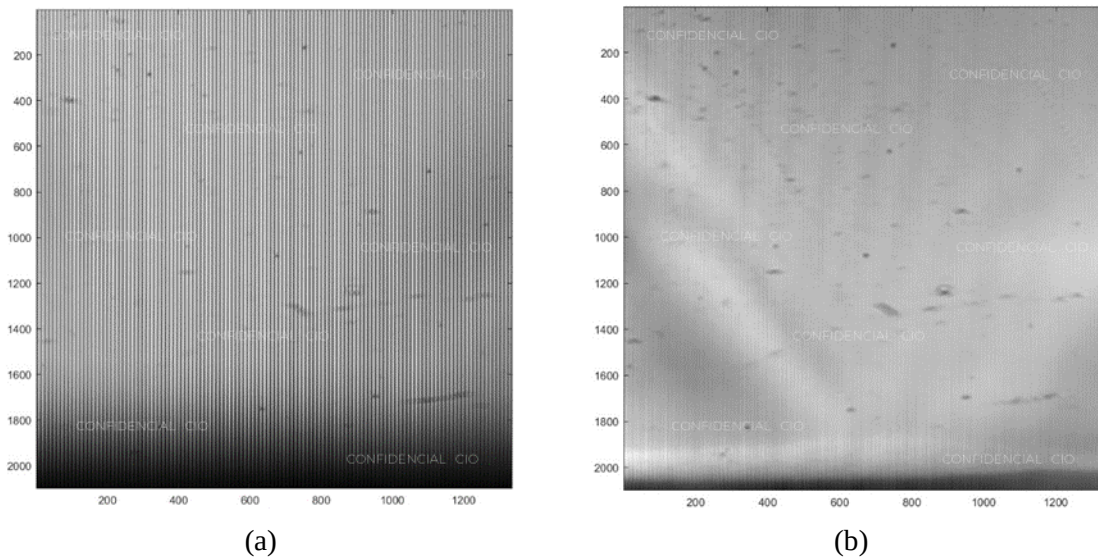


**Figura 4.22.** Imágenes capturadas para la estructura resistiva polarizada con 10V (a) imagen desplazada, (b) sustracción, (c) cambio de fase y (d) temperatura medida (24.5° C).

La figura 4.23, muestra los resultados obtenidos para la estructura resistiva polarizada con 15V. En este caso, los resultados obtenidos muestran un incremento de temperatura de 0.2° C, con respecto a los valores obtenidos con 10V, es decir se obtuvo un valor de temperatura en la región del sensor de 24.7° C con 15V. Además, se puede observar un aumento en la intensidad de la fase y desplazamiento en la sustracción, ambos valores proporcionales al incremento de voltaje.



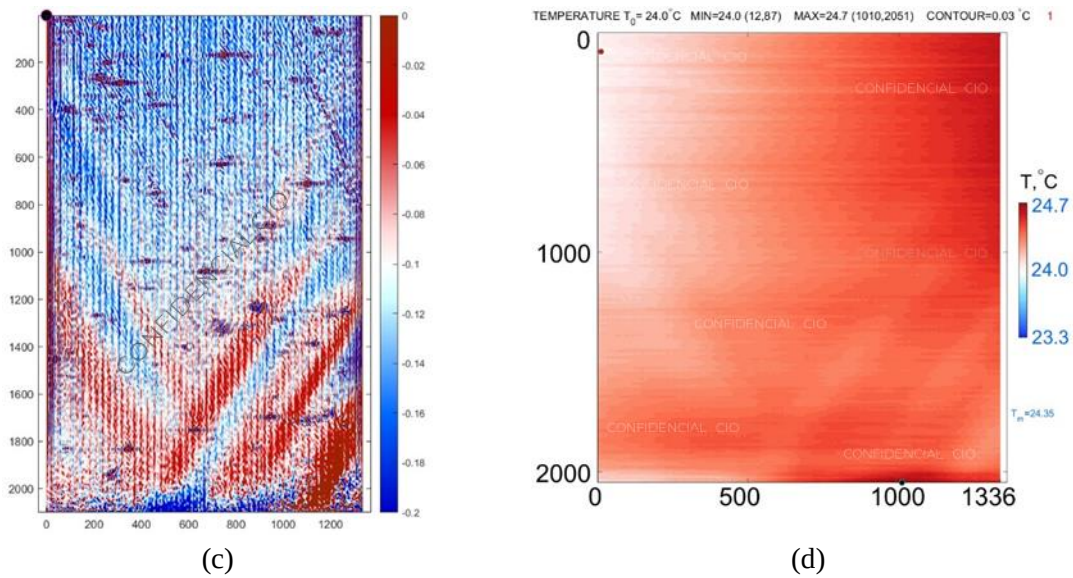
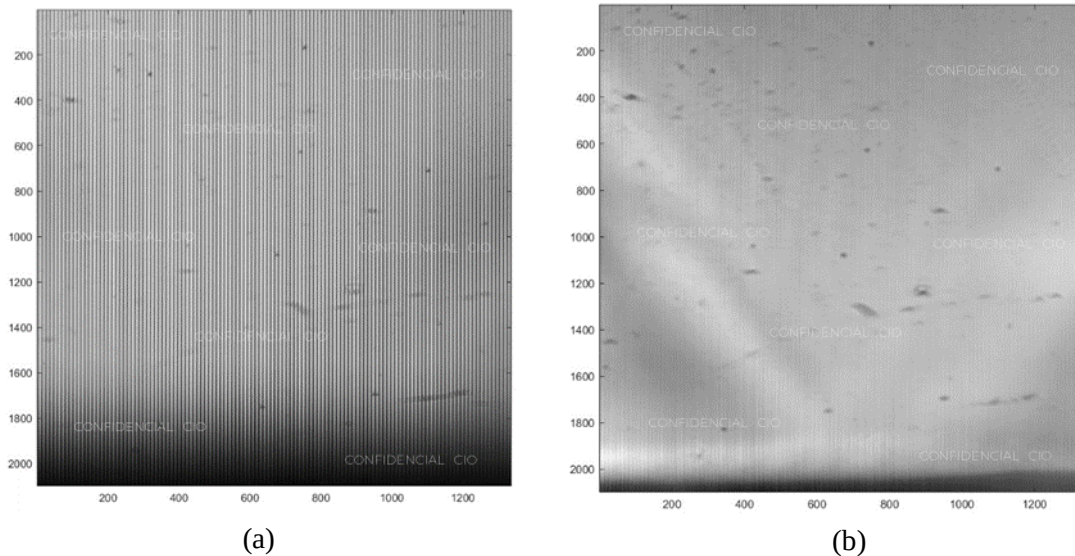


**Figura 4.23.** Imágenes capturadas para la estructura resistiva polarizada con 15V (a) imagen desplazada (b) sustracción, (c) cambio de fase y (d) temperatura medida (24.7° C).

La figura 4.24, muestra los resultados obtenidos para la estructura resistiva polarizada con 20V. Como se observa, el incremento en temperatura sigue mostrando un comportamiento lineal (0.2° C cada 5V), en este caso se midió una temperatura en la región del sensor de 24.9° C. En cuanto a la sustracción y la fase, se observa un incremento en intensidad y desplazamiento, incluso en la imagen de temperatura se muestra una mayor distribución y aumento de temperatura.



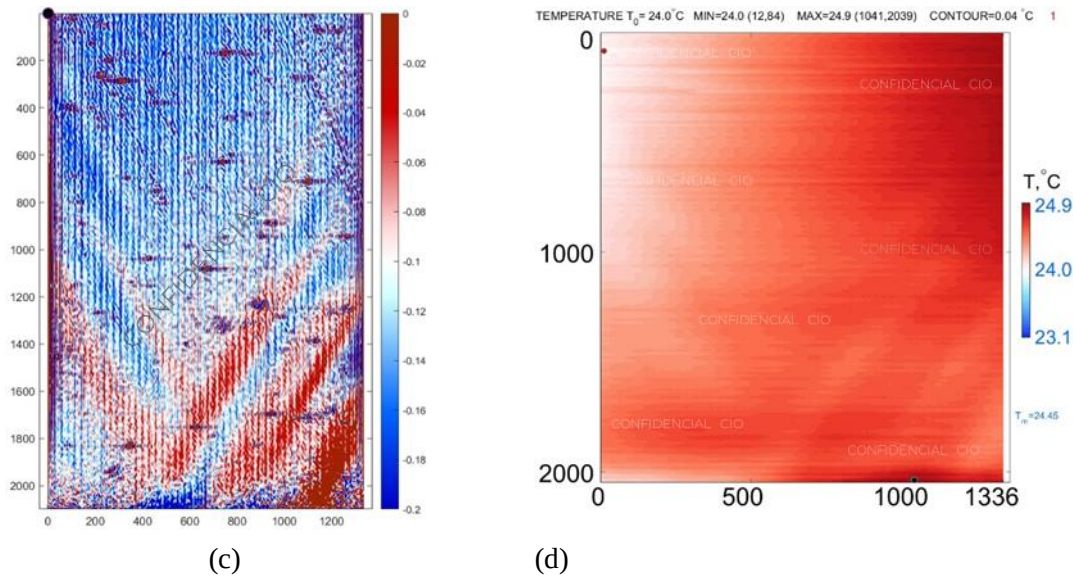
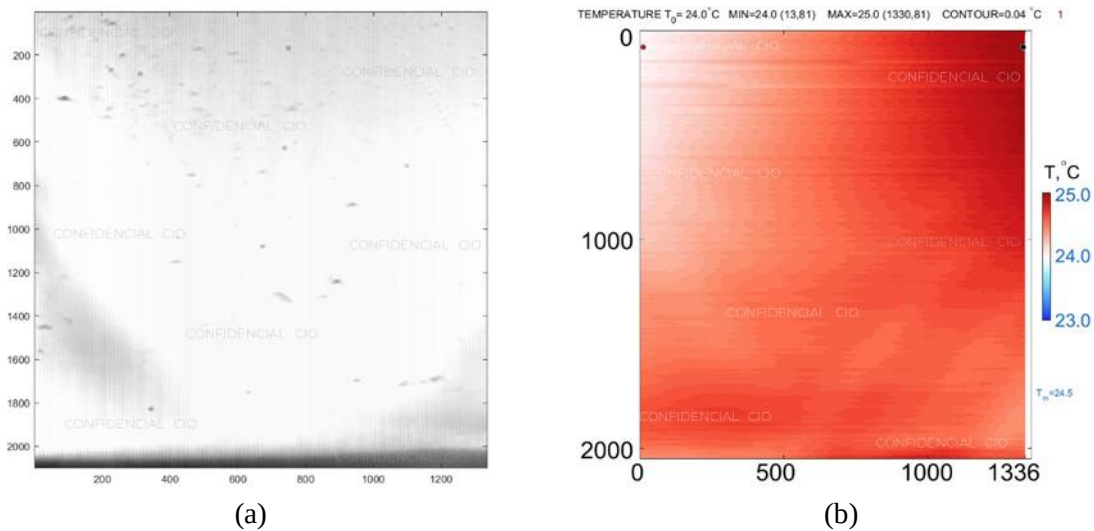
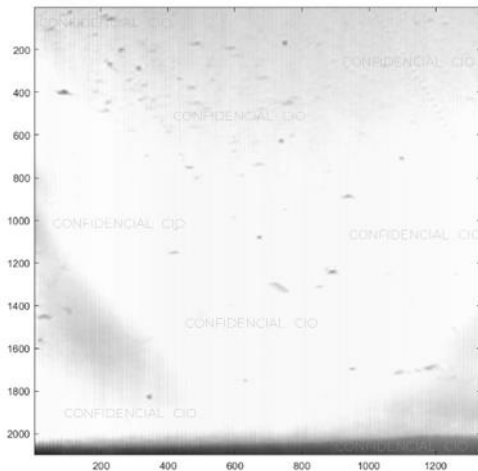


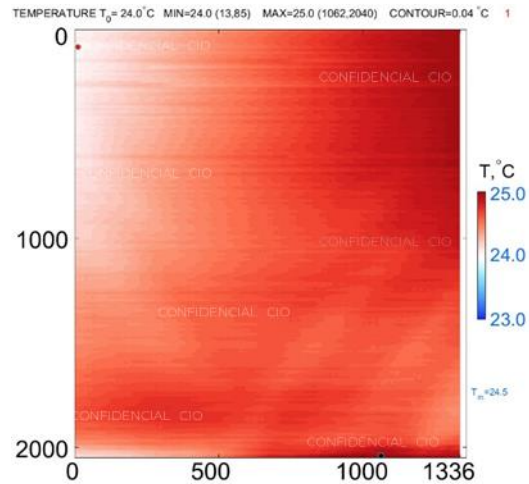
**Figura 4.24.** Imágenes capturadas para la estructura resistiva polarizada con 20V (a) imagen desplazada, (b) sustracción (c) cambio de fase y (d) temperatura medida (24.9° C).

La figura 4.25 muestra los resultados obtenidos para la estructura resistiva polarizada con 25V y 30 V, respectivamente. Como se observa, después de 25V la temperatura del sensor no cambia, es decir llegamos al límite de temperatura del sensor, este comportamiento lo podemos atribuir a la capacidad calorífica del material y al tamaño de la estructura. En comparación con un voltaje aplicado de 20V, podemos observar un incremento en la intensidad la sustracción, debido al aumento de convección de calor. Además, para 25V el incremento de temperatura no fue lineal debido a que nos acercamos a la saturación de temperatura del sensor, en este caso el incremento fue igual a 0.1° C.





(c)

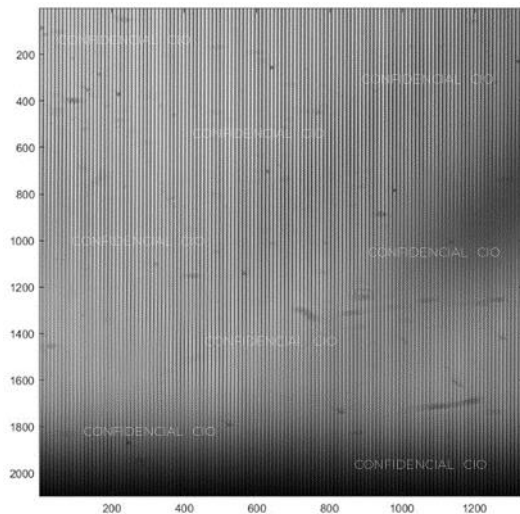


(d)

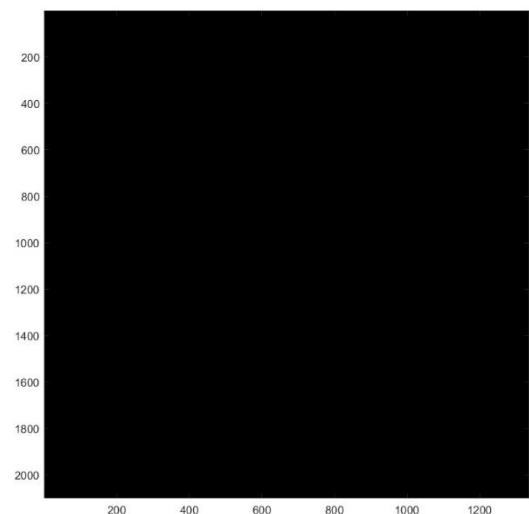
**Figura 4.25.** Imágenes capturadas para la estructura resistiva polarizada con 25V: (a) sustracción, (b) temperatura (25° C) y la estructura resistiva polarizada con 30V: (c) sustracción, (d) temperatura (25° C).

#### 4.2.2 Resultados de procesamiento espira pequeña

La estructura resistiva en espiral de menor tamaño fue caracterizado térmicamente siguiendo la metodología anterior, es decir, comenzamos con el análisis de la imagen de referencia (sensor sin polarización) como referencia y como imagen desplazada para medir la temperatura ambiente. La figura 4.26, muestra los resultados obtenidos.



(a)



(b)

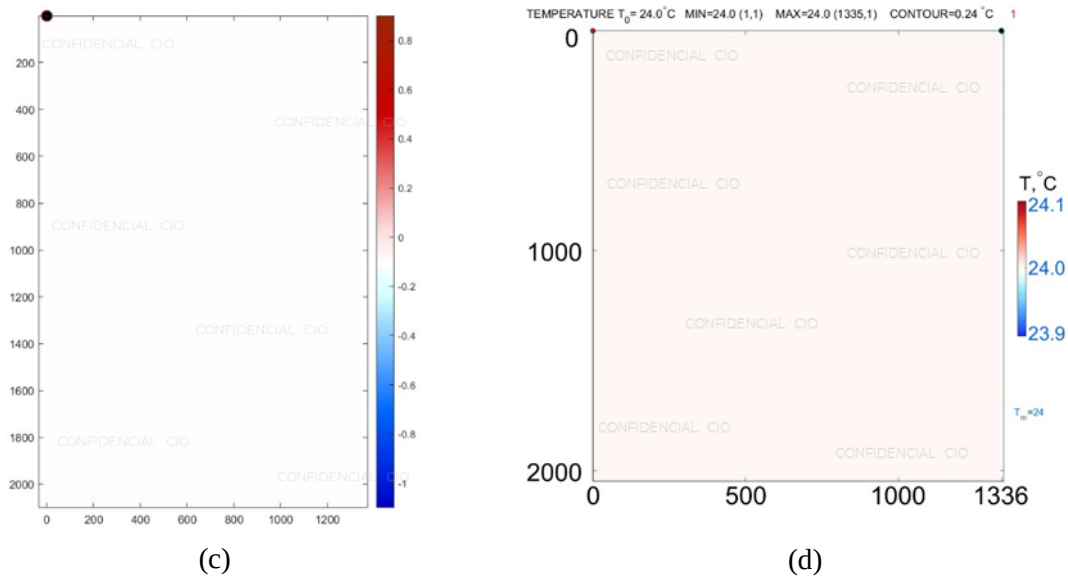


**Figura 4.26.** (a) Figura 4.19. Imagen de Referencia (sin voltaje aplicado) capturada para la estructura resistiva en forma de espiral (pequeña), (b) sustracción (referencia-referencia), (c) cambio de fase y (d) temperatura medida sin voltaje aplicado ( $24^\circ\text{C}$ ).

En la imagen anterior podemos observar, que efectivamente la temperatura ambiente en el laboratorio al realizar las mediciones térmicas de la estructura resistiva en forma de espiral pequeña fue de  $24^\circ\text{C}$ . Una vez comprobada la temperatura, se procedió a polarizar el sensor con 5V hasta 30V en pasos de 5V. Al igual que en las mediciones anteriores, se tomaron 10 capturas para cada polarización y se utilizó la misma imagen de referencia, ver figura 4.26a.

Los resultados obtenidos para la estructura resistiva polarizada con 5V se muestran en la figura 4.27. Los resultados muestran un incremento de temperatura de  $0.2^\circ\text{C}$ . En comparación con la estructura en espiral de mayor tamaño, podemos observar un menor desplazamiento  $x$  y una convección de calor mucho más pequeña (ver figura 4.27 b, c). Este comportamiento se atribuye directamente a las dimensiones del sensor, ya que la conductividad térmica de un material depende también de la conductividad eléctrica.

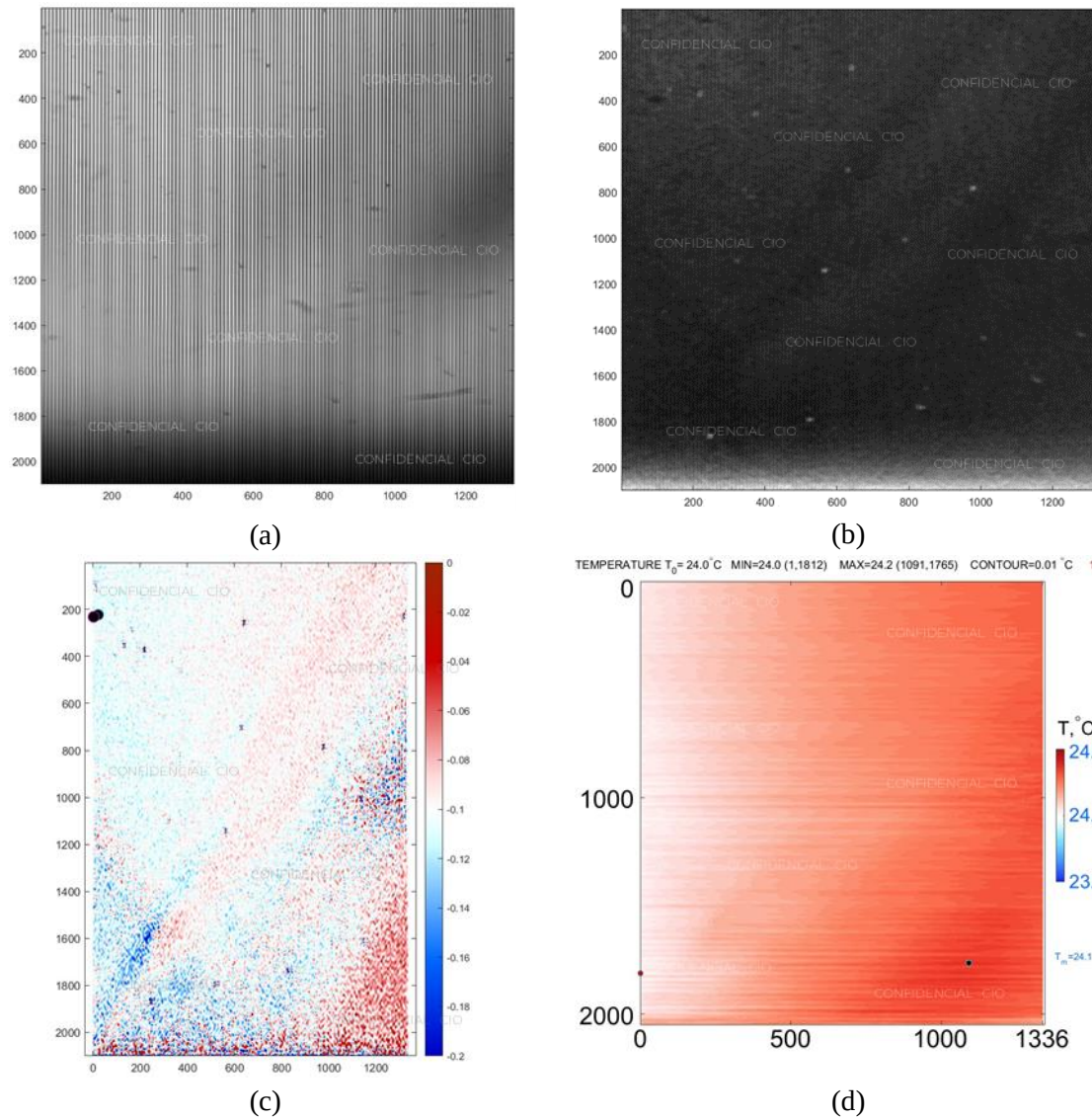


**Figura 4.27.** Imágenes capturadas para la estructura resistiva (estructura pequeña) polarizado con 5V, (a) imagen desplazada, (b) sustracción, (c) cambio de fase y (d) temperatura medida ( $24.2^\circ\text{C}$ ).

La figura 4.28, muestra los resultados obtenidos para la estructura resistiva polarizada con 10V. Como se observa, la temperatura incrementó  $0.1^\circ\text{C}$ , es decir la temperatura máxima medida fue de  $24.3^\circ\text{C}$ .

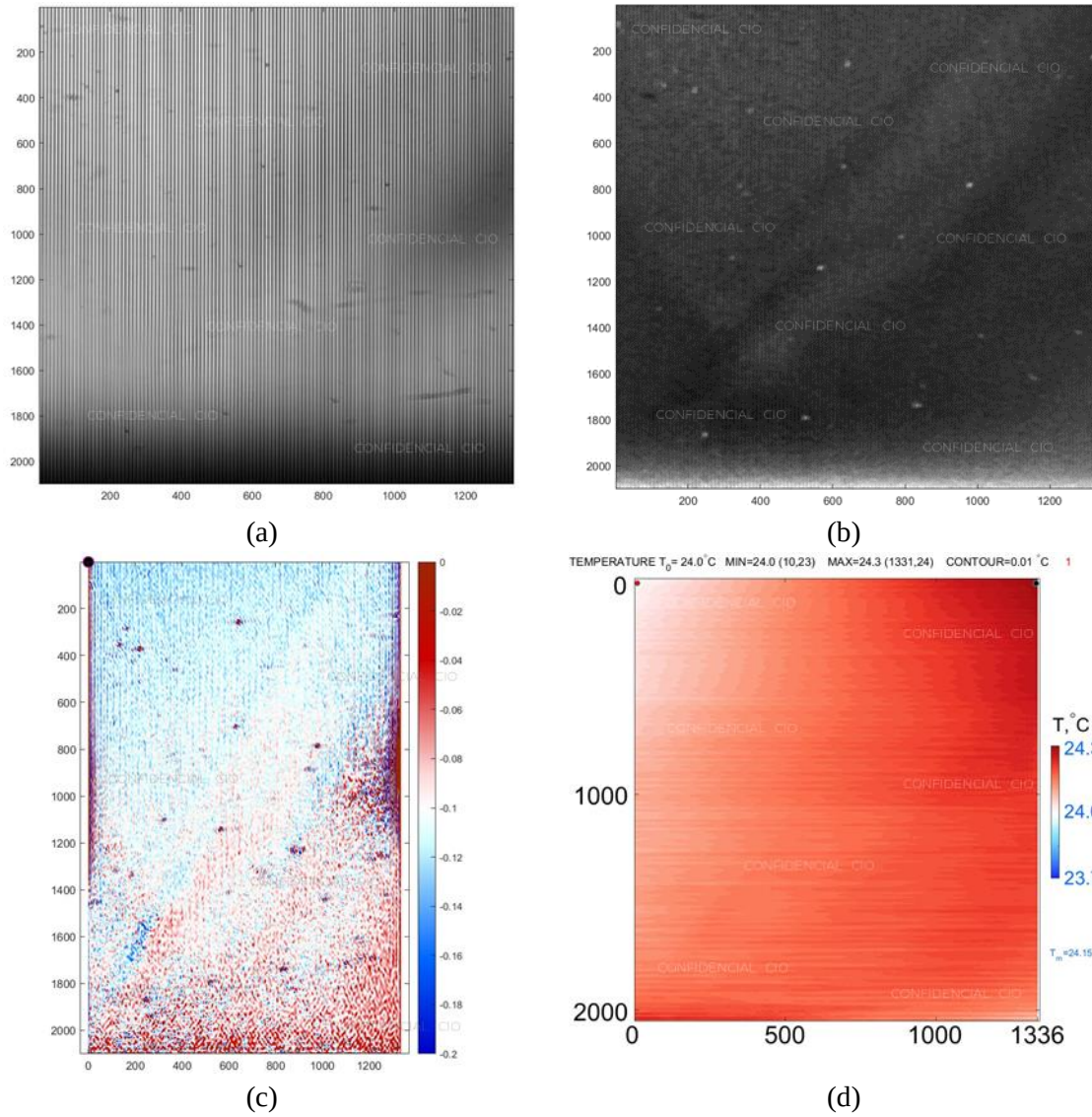


**Figura 4.28.** Imágenes capturadas para la estructura resistiva polarizada con 10V (a) imagen desplazada, (b) sustracción, (c) cambio de fase y (d) temperatura medida ( $24.3^\circ\text{C}$ ).

La figura 4.29, muestra los resultados obtenidos para la estructura resistiva polarizada con 15V. En este caso, la temperatura medida fue de  $24.4^\circ\text{C}$  (se tuvo un incremento de  $1^\circ\text{C}$ ). Hasta este punto tenemos un incremento lineal de la temperatura en función del voltaje aplicado.

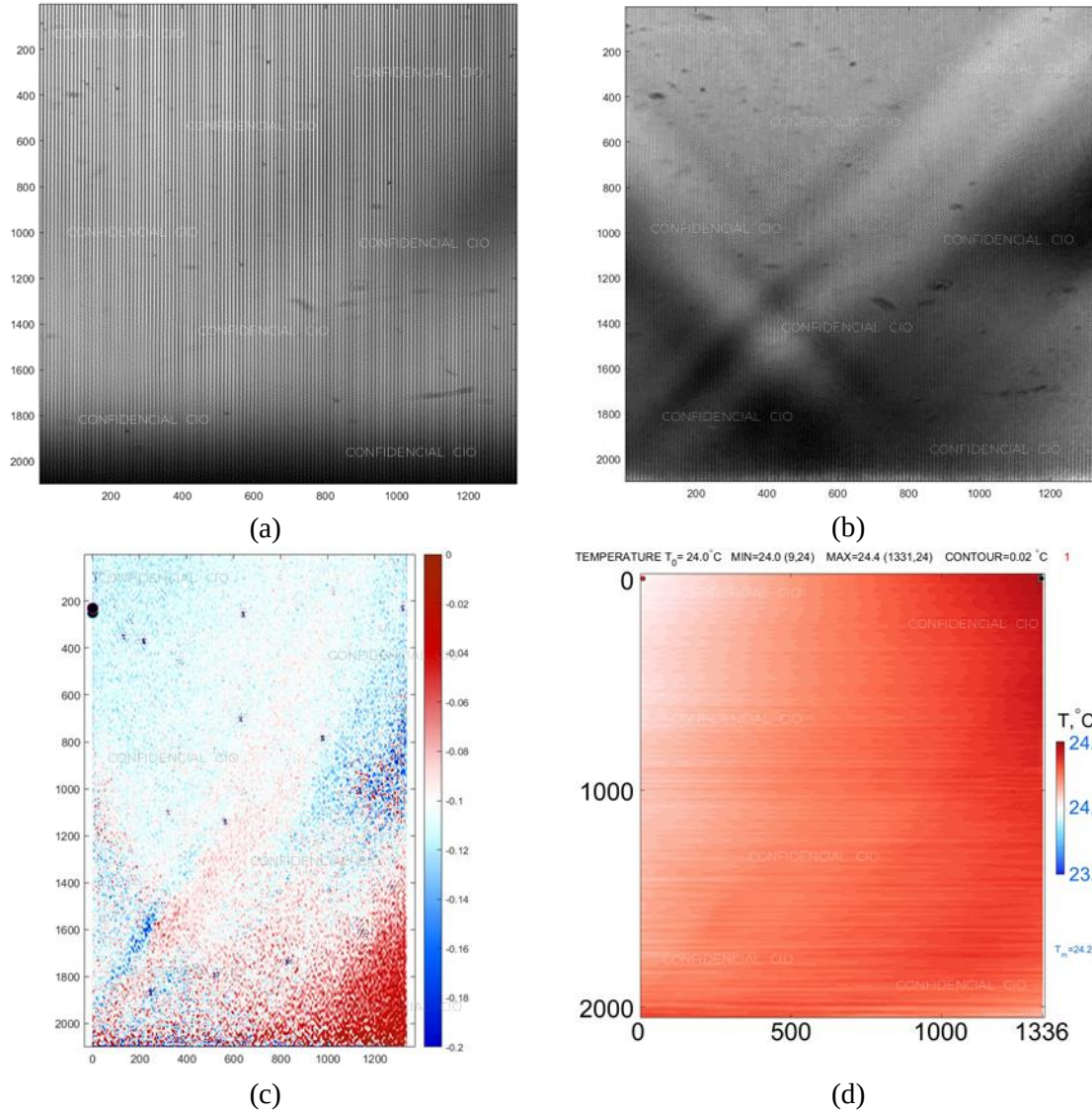
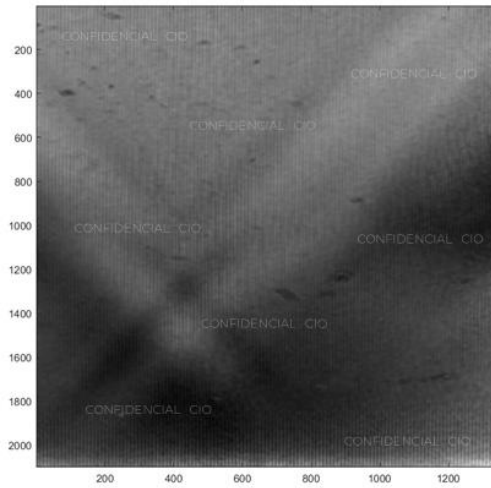
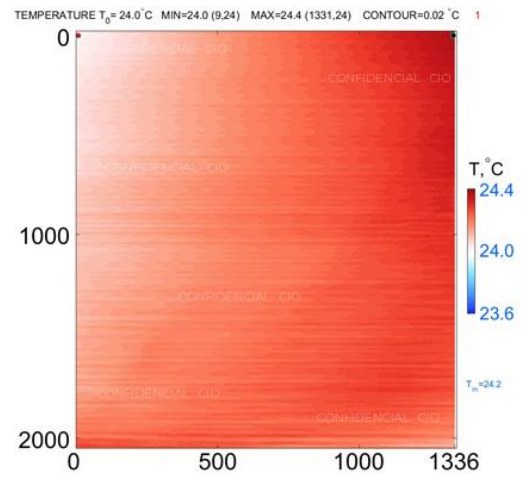


**Figura 4.29.** Imágenes capturadas para la estructura resistiva polarizada con 15V (a) imagen desplazada, (b) sustracción, (c) cambio de fase y (d) temperatura medida ( $24.4^\circ\text{C}$ ).

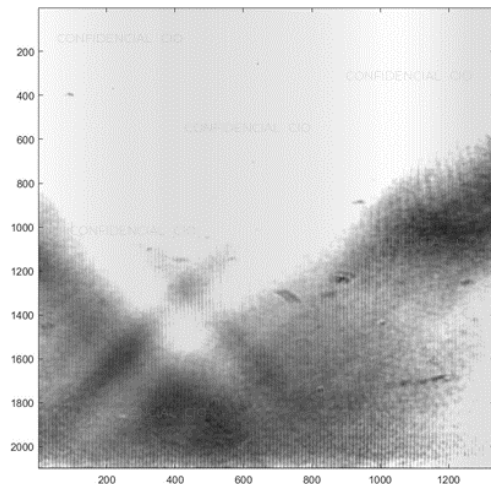
Los resultados obtenidos con una polarización de 20V, 25V y 30V se muestran en la figura 4.30. Como se observa, el valor de la temperatura medida no cambia ( $24.4^\circ\text{C}$ ), debido a que llegamos al límite de temperatura del sensor (temperatura máxima,  $T_{\text{max}}$ ). En comparación con la estructura en espiral grande, en la cual el límite de temperatura del sensor ocurrió a 25V, en la estructura de menor tamaño se observó a 15V. Como se había mencionado anteriormente, este comportamiento está estrechamente ligado al tamaño de la estructura, por lo cual, era de esperarse que el límite de saturación térmica de la estructura de menor tamaño ocurriera antes.



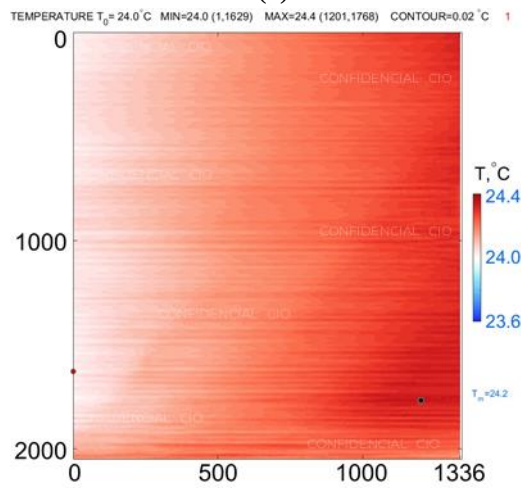
(a)



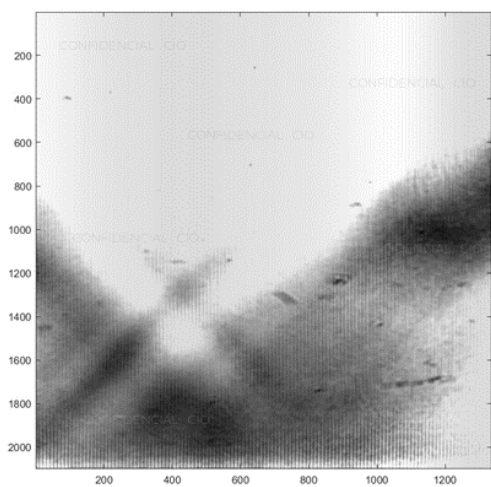
(b)



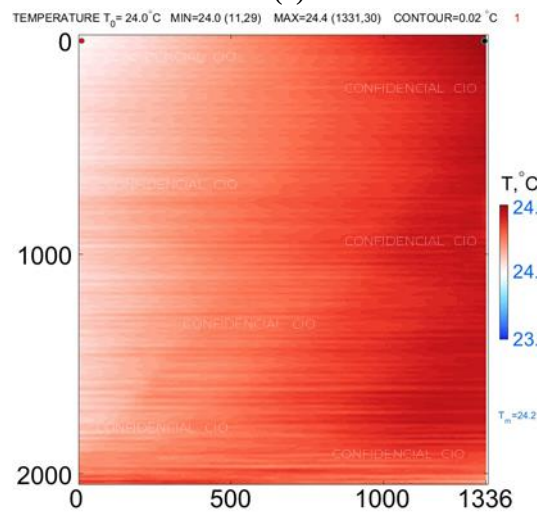
(c)



(d)



(e)



(f)

**Figura 4.30.** Imágenes capturadas para la estructura resistiva polarizada con 20V: (a) sustracción y (b) temperatura (24.4° C), polarizado con 25V: (c) sustracción y (d) temperatura (24.4° C) y polarizado con 30V: (e) sustracción y (f) temperatura (24.4° C)

La figura 4.31, muestra los resultados de medición de temperatura de los sensores fabricados (estructura en espiral grande y pequeña) bajo diferentes voltajes de funcionamiento. Los resultados muestran un rango de temperatura de 24° C a 25° C para la estructura resistiva de mayor tamaño y de 24° C a 24.4° C para la estructura de menor tamaño. Estos resultados, se obtuvieron aplicando un voltaje de 5V a 30V. Ambas estructuras presentan un comportamiento lineal, para el sensor de mayor tamaño el rango lineal va de 5V a 20V, en este rango la temperatura aumenta 0.2° C cada 5V y los resultados indican una sensibilidad de 0.04° C/V. Por otra parte, el sensor de menor tamaño presenta un comportamiento lineal de 5V a 15V, su temperatura cambia 0.1° C cada 5V y muestra una sensibilidad de 0.2 ° C/V.

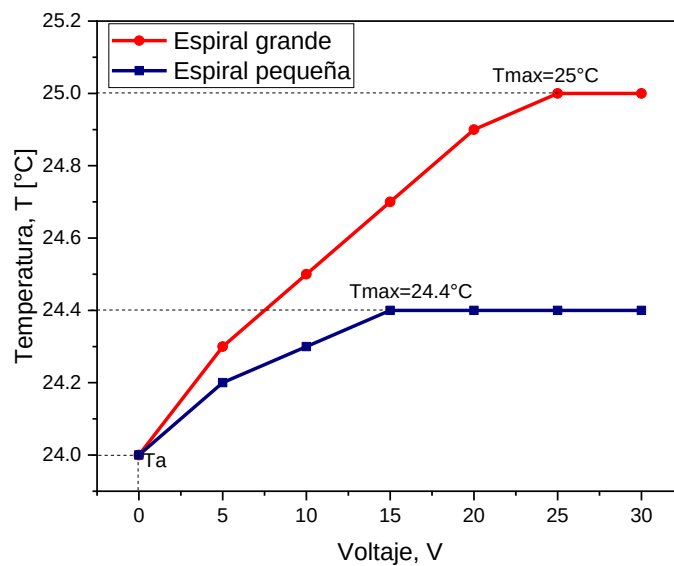


**Figura 4.31.** Curva Temperatura vs Voltaje para los sensores de flujo en forma de espiral. Tmax=Temperatura máxima y Ta=Temperatura ambiente.

Como se mencionó anteriormente, se realizaron 10 mediciones de temperatura para cada uno de los voltajes aplicados (5V a 30V, intervalos de 5V), estas mediciones se obtuvieron cada 5 minutos para comprobar la repetibilidad de cada uno de los sensores fabricados. La figura 4.32, muestra los resultados obtenidos, en la cual, podemos observar que el sensor fabricado tiene una excelente repetibilidad, ya que, en cada voltaje aplicado se mantiene el valor de la temperatura y, debido a las pruebas realizadas cada 5 minutos, en cada sensor respectivamente, en las gráficas se puede

observar que el sensor responde ante cada cambio de voltaje que se le realizó, mostrando de esta manera un tiempo de respuesta menor a 1 minuto.

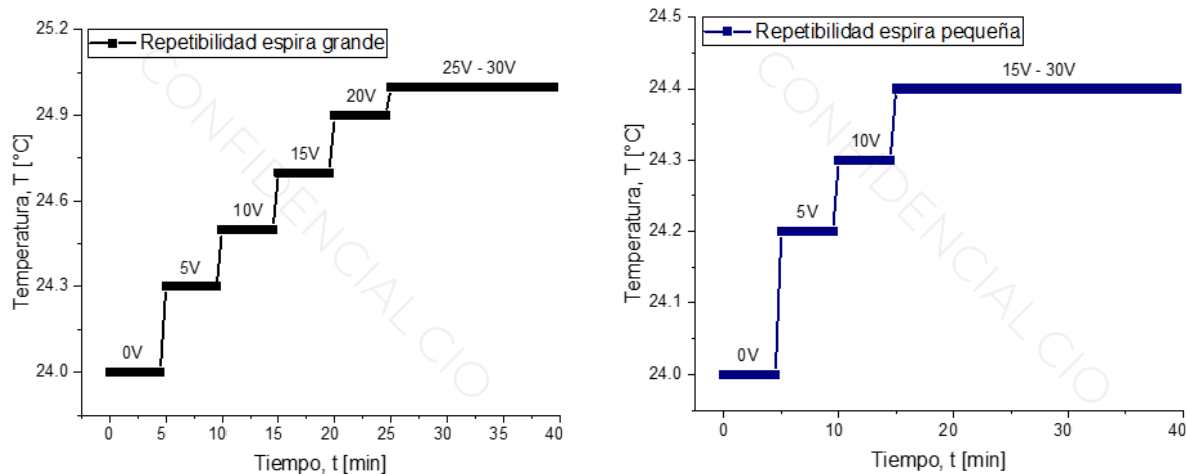


**Figura 4.32.** Repetibilidad de los sensores fabricados.

En el caso de los sensores con geometría de hilo, la medición térmica no fue posible de realizar por su pequeña área de sensado, lo que complico poder realizar el análisis de la temperatura con los voltajes aplicados usando el sistema óptico. Debido a esto solo se presentaron los resultados de las primeras dos estructuras como se mostró en los párrafos anteriores.

A partir de estos resultados, se llega a la conclusión que la espira de mayor tamaño presenta las mejores características para ser utilizada como sensor de flujo. Debido a que presenta un límite de temperatura más alto, tiene un rango lineal más grande y mejor sensibilidad, lo cual permitirá mayores variaciones de temperatura en función a un flujo de aire, podremos relacionar directamente los cambios de temperatura a una variable eléctrica medible y será capaz de responder a cambios mínimos de entrada.

## REFERENCIAS

- [1] Shimazaki, T., Ichihara, S., & Tagawa, Y., “Background oriented schlieren technique with fast Fourier demodulation for measuring large density-gradient fields of fluids”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 134, 110598, (2022).
- [2] Bernardino Barrientos García y Nkosinathi Carl Shongwe. Optimization of a helmholtz resonator for cooling, by the schlieren technique. Tesis de maestría, Centro de Investigaciones en Óptica, A.C., diciembre 2021.
- [3] Chapman, A.J. “Transmisión de calor”. 3ra edición. Madrid: Bellisco.

## CAPITULO 5. CONCLUSIONES

El objetivo general que se planteó en este proyecto de tesis fue la fabricación y caracterización de estructuras resistivas con geometría en espiral, para su aplicación como un sensor de flujo de aire de película delgada usando tecnología MEMS. Logrando con satisfacción el objetivo principal del proyecto.

Además, se enlistan las conclusiones obtenidas a partir de la fabricación y caracterización de estas estructuras.

1. Se obtuvieron estructuras resistivas con la técnica micromaquinado de superficie, obteniendo una estructura definida sobre un substrato fijo. También, se logró reproducibilidad en el proceso de fabricación. Es importante señalar que este proceso de fabricación se realizó a bajas temperaturas, usó materiales comúnmente utilizados en microelectrónica como lo es el aluminio, por lo cual se obtienen procesos de fabricación sencillos y de bajo costo.
2. Se mejoró la pérdida de calor por conducción, utilizando un substrato de baja conductividad térmica, empleando: cuarzo, NBK7 y Corning 1737. Con ello también se evaluó la adherencia, defectos y calidad en las estructuras con ayuda del microscopio digital, siendo el cuarzo y NBK7 los mejores materiales para este tipo de estructuras.
3. Al utilizar una estructura geométrica en espiral, se permitió tener mayor área de contacto entre el flujo de aire y la superficie de las resistencias, y así aumentar los valores de resistencia eléctrica de la estructura, mejor sensibilidad y consumo de energía reducido.
4. Los resultados obtenidos teóricamente por medio de la ecuación de la resistencia eléctrica, como los obtenidos por medio de la estación de pruebas Summit 1200 y el analizador de parámetros Keithley 4200A-SCS, cumplieron con lo esperado, ya que las variaciones que se presentaron fueron mínimas.
5. La estructura resistiva con mayor área de sensado, mostró un comportamiento lineal. Su límite de temperatura fue a partir de 25V, ya que a este voltaje la temperatura del sensor no mostró cambios. Esta estructura mostró una sensibilidad de  $0.04^{\circ} \text{C/V}$ .

6. La resistencia de espira pequeña cuenta con un límite de temperatura a partir de 15V. Obteniendo una sensibilidad de  $0.2^{\circ} \text{C/V}$ .
7. Ambas espiras presentaron cambios de temperatura medidos óptimos, ya que fueron capaces de medir cambios de temperatura muy pequeños. La estructura resistiva de espira grande presentó las mejores características, tales como: límite de temperatura alto, rango lineal más amplio, mayor variación de temperatura y mayor sensibilidad.
8. Se obtuvieron estructuras resistivas con alta sensibilidad, tecnológicamente factible, reproducible, mecánicamente estable y se comprobó su excelente repetibilidad, ya que en cada voltaje aplicado se mantiene el valor de temperatura, y se observó un tiempo de respuesta menor a 1 minuto.

## **TRABAJO A FUTURO**

Como trabajo a futuro se propone:

1. Medir rango de funcionamiento de las resistencias en función a la cantidad de flujo de aire.
2. Mejorar el diseño propuesto.
3. Diseñar y fabricar una interfaz electrónica basada en un puente de Wheatstone y al menos una etapa de amplificación.
4. Fabricar carcasa protectora para evitar fallas asociadas al polvo.
5. Caracterización de nuevos materiales para mejorar la respuesta del sensor, tal como el Níquel.
6. Comprobar su utilidad práctica en autos de gasolina y/o diésel.

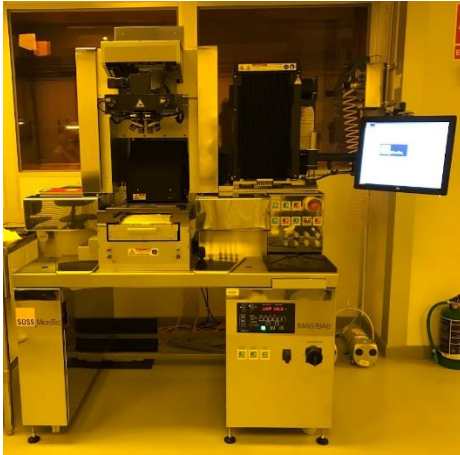
## ANEXO A

El continuo desarrollo tecnológico en dispositivos micro y nanométricos ha crecido considerablemente, ya que presentan características muy particulares, como lo son: alta precisión, bajo consumo de potencia, bajo peso y velocidad mejorada. Es por ello, que la implementación de nuevos espacios para la fabricación que permitan obtener la definición de las geometrías, control de dimensiones, flexibilidad del diseño, repetibilidad, confiabilidad y alto rendimiento, es cada vez más necesaria. Por suerte, la tecnología de microelectrónica basada en cuartos limpios cumple con todos los criterios.

El Centro de Investigaciones en Óptica cuenta con un laboratorio de micro y nanoelectrónica (cuarto limpio ISO 7), que funciona para el desarrollo de dispositivos fotónicos, sistemas microelectromecánicos, fluídicos y electrónica flexible. Actualmente se encuentra funcionando al 100%, y dentro del laboratorio se encuentran una amplia variedad de equipos para la fabricación de los dispositivos de nano y microelectrónica, como lo son: fotolitografía, depósito de películas delgadas, grabado químico húmedo y seco, oxidación térmica, limpieza de substratos y post procesamiento.

En la tabla A1. se muestran los equipos que se utilizaron para llevar a cabo el proceso del proyecto, así como una breve descripción de cada uno de ellos.

**Tabla A1.** Equipos utilizados en el Cuarto Limpio del CIO y sus características.



### **Alineadora de mascarillas**

Transferencia de estructuras por fotolitografía utilizando mascarillas de 2.5 in a 5 in y substratos de 1 cm a 4 in. Dentro de sus características principales se encuentran:

- Elevador de microscopio con manipulador.
- Estación de soporte de mascarillas.
- Etapa de alineación.
- Panel de operación con joystick.
- Lámparas con óptica de exposición.



### **Limpiador ultrasónico**

Se utiliza para la limpieza de material del laboratorio, ya que elimina partículas sobre los objetos mediante las ondas ultrasónicas por oscilación. Sus principales características son las siguientes:

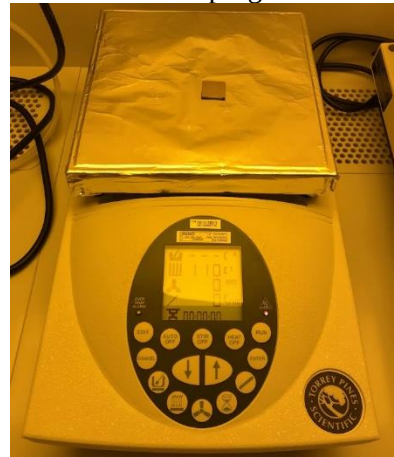
- Perilla giratoria para la selección del tiempo, función, potencia y Hz.
- Perilla giratoria para la selección de la temperatura.



### **Spin coating**

Se utiliza para el proceso de fabricación de películas delgadas, ya que se recubre por medio de centrifugación, con rangos de grosor de micrómetros a nanómetros. Dentro de sus principales características se encuentran:

- 1000- 12000 RPM.
- Dos cabezales diferentes.
- Almacenamiento para programas integrados.
- Editar o crear nuevos programas.

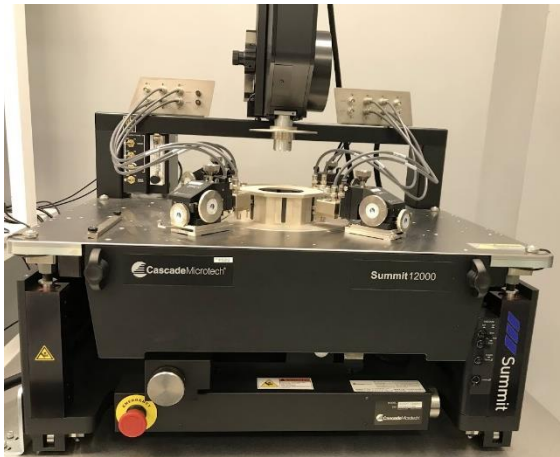


### **Hot-plate**

Generalmente utilizadas para calentar material de vidrio o su contenido de forma uniforme, así como para procesos de fabricación que requieran de curado térmico específico. Sus características principales son:

- Botones para el control de temperatura.
- Rango de temperatura ambiente de 550° C.
- Cronómetro digital integrado.
- Botón para seleccionar la temperatura.

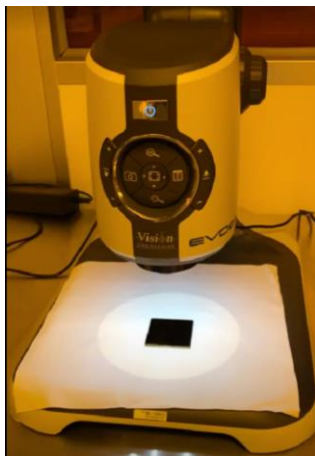
- Vasija de acero inoxidable.
- Temperatura de hasta 80° C.



### **Estación de pruebas eléctricas Summit 1200**

Permite acceder a un rango de medición completo, ya que el ruido, fugas y capacitancia parásita, son reducidos considerablemente. Sus principales características son:

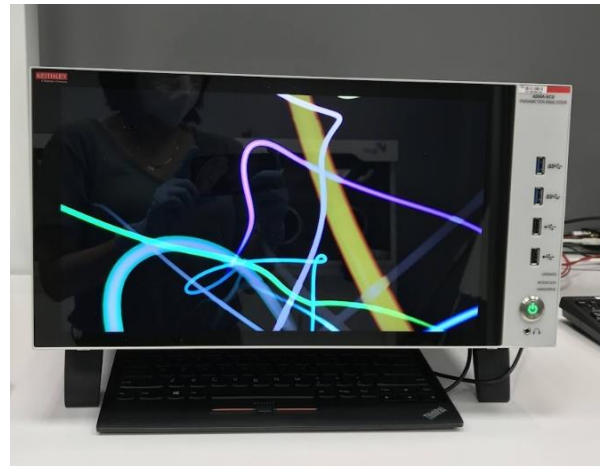
- Visualización simultanea de hasta tres cámaras y aumentos ópticos con un amplio campo de visión.
- Microscopio integrado con control de manejo en el eje z.
- Panel de control de vacío.
- Ajuste de micrómetro para configurar el contacto de la muestra con las puntas de prueba.
- Puntas micrométricas de posicionamiento.



### **Microscopio digital**

Microscopio óptico digital para realizar inspección de muestras y medición de estructuras. Sus principales características son las siguientes:

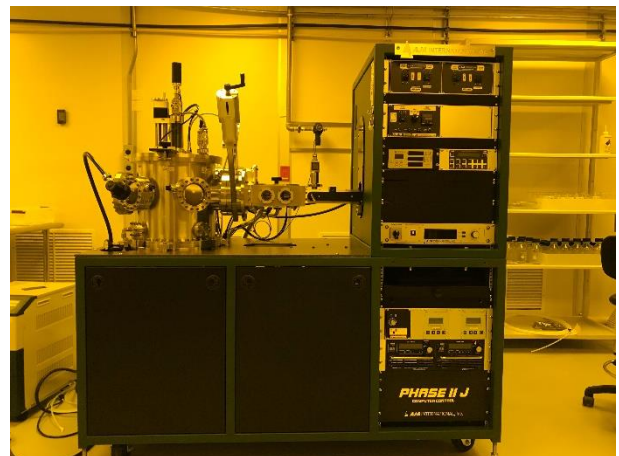
- Botón para cancelar comandos.
- Revoluciones de agitación de 100 a 1500 rpm.



### **Analizador de semiconductores 4200-scs**

Cuenta con un hardware avanzado que permite que el análisis y medición de CC I-V, C-V e I-V sea rápida y eficaz. Sus características son:

- Resolución de frecuencia de 1kHz a 10 MHz.
- Mide hasta 4 canales con el conmutador múltiple 4200A-CVIV
- Estado de la prueba en tiempo real.
- Display que muestra la interfaz gráfica del usuario, fatos, gráficos e información sobre el funcionamiento del sistema.

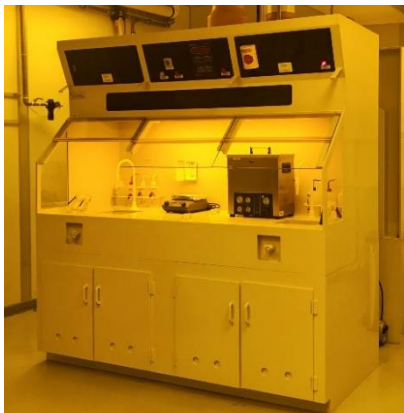


### **Atc orion series sputtering system**

Herramienta de recubrimiento PVD que ofrece deposición física de vapor en sustratos de hasta 10cm. Sus principales características son:

diferentes lentes de visión.

- Con lentes de visión 0.6x, 1x y 2x que alcanza a visualizar hasta un área de 5x5 cm.
- Zoom óptico 300x.
- Zoom digital de 800x.



### **Campana de limpieza**

Permite llevar a cabo procesos químicos que pueden involucrar solventes, reactivos y grabantes. Además, cuenta con tomas de agua DI y pistolas de aire.

- Cámara de carga.
- Sistema de enfriamiento.
- Sistema para monitoreo de vacío.
- Control de temperatura.
- Control de giro del sustrato.