



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

**INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y
APLICADAS
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS
APLICADAS**

**DETECCIÓN DE VIBRACIONES EN OBJETOS
SÓLIDOS TRANSPARENTES POR
FOTODETECCIÓN ADAPTIVA**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRÍA EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
I.M. ÁNGEL MANUEL GÓMEZ CORONEL**

DIRECTORES DE TESIS:

**DR. DARWIN MAYORGA CRUZ
DR. HORACIO MARTÍNEZ VALENCIA**

SINODALES

**FERNANDO ZENAIDO SIERRA ESPINOZA
JESÚS CASTRELLÓN URIBE
JUAN CARLOS GARCÍA CASTEJÓN**

**CUERNAVACA, MORELOS
OCTUBRE 2020.**



UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL ESTADO DE MORELOS
INSTITUTO DE INVESTIGACION EN CIENCIAS BASICAS Y APLICADAS
CENTRO DE INVESTIGACION EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

DETECCIÓN DE VIBRACIONES EN OBJETOS
SÓLIDOS TRANSPARENTES POR
FOTODETECCIÓN ADAPTIVA

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRÍA EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
I .M. ÁNGEL MANUEL GÓMEZ CORONEL

DIRECTORES: DR. DARWIN MAYORGA CRUZ
DR. HORACIO MARTÍNEZ VALENCIA

SINODALES: DR. FERNANDO ZENAIDO SIERRA ESPINOZA
DR. JESÚS CASTRELLÓN URIBE
DR. JUAN CARLOS GARCÍA CASTREJÓN

CUERNAVACA, MORELOS

OCTUBRE, 2020

Cuernavaca, Morelos, a 07 de septiembre de 2020.

DR. ROSENBERG JAVIER ROMERO DOMÍNGUEZ
COORDINADOR DEL POSGRADO EN
INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
P R E S E N T E

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS titulada: “Detección de Vibraciones en Objetos Sólidos Transparentes por Fotodetección Adaptiva”, que presenta el alumno **ÁNGEL MANUEL GÓMEZ CORONEL**, para obtener el título de **MAESTRÍA EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**.

Nos permitimos informarle que nuestro voto es **APROBATORIO**.

Atentamente
Por una humanidad culta
Una universidad de excelencia

DR. FERNANDO ZENAIDO SIERRA ESPINOSA

DR. JUAN CARLOS GARCÍA CASTREJÓN

DR. J. JESÚS CASTRELLÓN URIBE

DR. HORACIO MARTÍNEZ VALENCIA (ICF-UNAM)

DR. DARWIN MAYORGA CRUZ

Se adiciona efirma UAEM

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

DARWIN MAYORGA CRUZ | Fecha:2020-09-07 16:56:57 | Firmante

HE/AZKrlwLAEOTQ8r8rXitkwqQw3tR0Z9dU4A1SwRPu2ZlqG45S7ERT+I8ZWDIBhThKF1rCgDMkwnNALGFg6Yq8jjxZZlq/4bh6ToQGSF3MvnP3AQKRfAhw8fsLojg2O6XBGKn9wVWNdf1iocZXROhyneNMrjy4uXa+2RFJPGgEHijb0h+lequPT4fpdNji/2tN//aZ5z+5718y+o9s69eioXm6osjo0jAhlC12G43/GP5u/aVvdlXGsqsvsmGllzMrTWCqg6XvdDXxT/4DB95kXXMGRKclFR+0UfCHhFQPGlua3+mRB6x9hHURGZEWEXaCTH5hFImNs2W4QWu7w==

JUAN CARLOS GARCIA CASTREJON | Fecha:2020-09-07 17:57:56 | Firmante

SJW6pgl9f8jL7m4qRfmd+4yBn1fJckURQ6XEMd2+NVoj0Xhuo/485Zcull8pXwVQbtKJpGmlTKS1HA579cw7M7VKPC8STyaQMj5RC5XjQVLw2f5OYZ3ldSO6h0V+hxW+j01EBOPWAZgqENe60Jb5Oj06j+T838wUuFmkC4y3qZ/uRd0I5qPGuhimKKeKoaW+KFrLJgQ8VYUHMHM/CrO9aFWksiuNUK11/dxWpbDHYien+PHZ/qvF1e511KQaqzyutSguOziUxs/Zid1wFB7aGkd3NVteUj9sZkPz4LkTGKbiQbQKlMe0OQQfo6ukb2CFbRa9r/G2eHxllIXBgQ==

HORACIO MARTINEZ VALENCIA | Fecha:2020-09-07 20:23:43 | Firmante

ZJ4Xyp5/0VAubuFFOlzUKdyBm7Q8CLjO5sfV98AqlqbdDA2LBip+mXnSEI5mV0qpvHdBe6/OEGYKgz3p0VMqRV1Ap2rPPYUHGYYfkgGBaeRgal5k4Yu9AB18nfokuPen1+65atdheTkp1lux862rjt30rfh3ULI7IfiNISOiD9x+qXM468D/0Bi/chD6wlpqgEa7R4ABDQlp1XJ1wIFWPH0Lw76OQaglfVdZA8chOKpiMMwYIXCAIANQ1iINNa6F9+DzgL8cxUgA7wug+vovCLMnJPFgKoGg7ztfNOfkvYR5KTFGOZ+EhOfVSh4hVzSfgykWFwTLChIX5AdiaA==

FERNANDO ZENAIDO SIERRA ESPINOSA | Fecha:2020-09-08 13:47:59 | Firmante

YrqMwNZx7G8vp+RNCbR9UaE5u2VrR0wZeCEa5m0vdDgPIS1imW24PQysBujuHXhON//fRPw+MkAotnlBOov2rlQlpCxlHptrNZwxDUhETrXcc7msZCokCLgtWQyT5+P15EV1MXC2U19fJrsbakutECDL4XpAf54qVAu5cGZ3WJ9JRPY17vL+bxNqvPWpjrrzHoTLFSLVOZZkfANr4NSwTKlkaedXzg8As6WxfS2xCTlgJZnk0oPJmKwk5IAJnFoN4rMBdwGzB1x0U1YPW0H1QUuivZ5u1mTJW9WnGvDZYgrNSLU8RZkc0riPAMfT3aBP6g09e3iQxKwYNnsD8wT/w==

J. JESUS CASTRELLON URIBE | Fecha:2020-09-10 18:13:19 | Firmante

QwrlelUAF3A/b5CzyN42lwpGCU8hBtP7bRDMtGtodfXFKZzL60DJTnwMKZ5gybp2fDQ1FPgRKGKe9SvVjHaMlbKRMz4PRnexQxrP2lZPIKLDAzUU7TFa+JPB6yCu5QBIN26krC+3kn1surbXbaNHKwq5+NZgVhqPHwfm7PmSCfhlaonEOLw6XOQkQP4LTUPJa26ogAHmGzGLqdw6rElhafc7M2HBDL8P1GShPEFSJpZu5N4mxw8FRjqvLdsqiiQjz6Qs8r555H9gI3YECbu6TUfhhxcqbfStfKclfVGmT5/7DRsTm5/iK9JYqSSEWFbB+kH7ymOUi+7jL3mHLHyg==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



4Hp3lu

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/IRkBJCrF4Qy0jQ8B6mP6WnFmd33QCszp>

No creo que haya alguna emoción más intensa para un inventor que ver alguna de sus creaciones funcionando. Esa emoción hace que uno se olvide de comer, de dormir, de todo
- Nikola Tesla.

Agradecimientos

Agradezco al posgrado del **centro de investigación en ingeniería y ciencia aplicadas (CIICAp-UAEM)**, por permitirme realizar mi trabajo de tesis para la maestría dentro de sus instalaciones.

Agradezco al **Dr. Darwin Maryoga Cruz**, quien siempre estuvo como un buen profesor para guiarme durante este proceso, al **Dr. Horacio Martínez Valencia**, por su asesoría y amistad constante, quien desde la parte final de la licenciatura deposito su confianza en mi, al **Dr. Juan Carlos García Castrejón** quien durante las materias de *instrumentación* y *vibraciones mecánicas* logro transmitir parte de su amplio conocimiento a mi formación académica, al **Dr. Fernando Senaido Sierra Espinosa** que durante la materia de *instrumentación* me dedico tiempo oportuno y esfuerzo, al **Dr. Jesús Castrellón Uribe** que en la materia de *interacción de la radiación con la materia* puso a prueba mis habilidades para expresarme en publico y tener pleno dominio del tema, al **Dr. Omar Palillero Sandoval** que durante la materia de *óptica geométrica* mostró un gran interés por mi aprendizaje, al **Dr. Víctor Manuel Juárez Núñez** quien el lo inicios de este trabajo me ayudo incondicionalmente en la introducción al trabajo de laboratorio de interferometría y al **Dr. José Antonio Marbán Salgado** quien durante la parte experimental de este trabajo brindo su experiencia para poder caracterizar el cristal de GaAs que funciono como detector.

Agradezco al **Dr. Rosenberg Javier Romero Domínguez**, al **Dr. Jesús Escobedo Alatorre**, a la **Lic. Mayumi Sotelo Rivera** y a la **Lic. Raquel Sotelo Urueta**, por su apoyo durante los tramites de certificación y titulación.

Agradezco a **CONACYT** por el apoyo económico (*CVU 662018*), que sin lugar a dudas fue piedra angular para este trabajo.

Dedicatorias

A Dios, quien me da la fuerza para iniciar cada nuevo día.

En memoria de padre Prof. Bartolomé Gómez , a quien le debo las más valiosas lecciones de vida, te amo pa' y te extraño.

A mi madre Sra. Cecilia Coronel, de quien siempre recibo amor incondicional y una suave caricia cuando todo parece no tener solución.

A mi esposa Viridiana Morales, por tenerme una infinita paciencia y amor, quien me apoya en los momentos más oscuros de mi vida.

A mi tan amada hija la niña Ángela Gómez, por tener para mi siempre un sonrisa, porque eres lo que siempre soñe. Te amo mi hermosa bebé

A mi hermano Álvaro Gómez, a quien amo con todo mi ser, por ser mi compañero en esta hermosa vida.

Resumen

En el presente trabajo de investigación, se estudiaron los efectos de la fuerza foto-electromotriz no estacionaria, para determinar frecuencias de vibraciones en un objeto sólido transparente (acrílico). Usando la técnica de interferometría, en particular un arreglo derivado del interferómetro *Mach-Zehnder*. Se utilizó un cristal de **GaAs** como detector, de naturaleza fotoconductive, al inducir un patrón de interferencia no estacionario, este responde con una señal proporcional a la vibración inducida en la muestra de acrílico.

Por las características ópticas del cristal de arseniuro de galio, fue necesario realizar una caracterización, con varias configuraciones ópticas, las cuales son dependientes una de otra, partiendo desde una dependencia angular hasta la amplitud suministrada a un piezoeléctrico que modula uno de los caminos ópticos.

Para adquirir datos y analizarlos fue necesario el desarrollo de un software en la plataforma *LabVIEW*. Se usó una DAQ-NI 6009. La velocidad de adquisición de señal fue un periodo de 10 ms. Los datos fueron almacenados en un archivo .tdms, para su posterior manipulación.

Los resultados mostraron la detección de las siguientes frecuencias de vibraciones a 1.2kHz, 1.3kHz, 1.4kHz y 1.5kHz.

Palabras clave:interferometría, interferómetro, fotoconductividad, patrón de interferencia, fuerza electromotriz no estacionaria .

Abstract

In this work, the non-steady-state photo-electromotive force effect (P-EMF) was studied in order to determine natural vibration frequencies in transparent solid objects, acrylic in our case. Using optical interferometry, a Mach-Zehnder experimental configuration was setup. A gallium-arsenide photoconductor cristal (GaAs) was used to generate the P-EMF signal which is proportional to the induced mechanical vibration on an acrylic sample.

Additionally, an optical characterization of GaAs was performed using some optical interferometric configurations in order to obtain and optimize its main physical parameters like vibration frequencies, optical incident angle, fringe visibility and modulation amplitude among others. A piezoelectric mirror was introduced in one of the optical beams to achieve amplitude and frequency modulation of interferometric fringes.

For further data analysis, an application software for experimental data acquisition was developed in a LabVIEW platform using a DAQ-NI 6009 device. The speed data acquisition was 10 ms and int.tdms data files were used for store and further data processing.

As a result, 1.2, 1.3, 1.4 and 1.5 kHz vibration frequencies were detected using the experimental interferometric setup.

Keywords: Interferometry interferometry, interferometer, photo conductivity, interference pattern, non-stationary electromotive force.

Contenido

| | |
|---|-------------|
| Resumen | XI |
| Abstract | XIII |
| Lista de Figuras | XVII |
| Lista de Tablas | XIX |
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Justificación | 3 |
| 1.2. Objetivos | 4 |
| 1.2.1. Objetivo General | 4 |
| 1.2.2. Objetivos Particulares | 4 |
| 1.3. Organización de capítulos | 5 |
| 2. Conceptos Fundamentales | 7 |
| 2.1. Vibraciones mecánicas y métodos de detección | 7 |
| 2.2. Semiconductores y teoría de bandas | 13 |
| 2.3. Fundamentos Ópticos | 14 |
| 2.3.1. Fotoconductividad | 14 |
| 2.3.2. Efecto electroóptico | 15 |
| 2.3.3. Patrón de interferencia | 15 |
| 2.3.4. Efecto fotorrefractivo | 16 |
| 2.4. Interferometría óptica | 16 |
| 2.4.1. Experimento de Young | 18 |
| 2.4.2. Interferómetros | 18 |
| 2.5. Efecto de la fuerza fotoelectromotriz no estacionario | 21 |
| 2.6. Aplicaciones del Efecto de la Fuerza Fotoelectromotriz No Estacionario | 23 |
| 2.7. Técnica de medición de un amplificador lock-in | 25 |
| 2.8. Sistemas de adquisición por medio de LabVIEW | 27 |
| 3. Desarrollo experimental | 29 |
| 3.1. Cristal de GaAs | 30 |
| 3.2. Equipo Experimental | 31 |
| 3.3. Arreglos experimentales | 31 |

| | |
|--|-----------|
| 3.3.1. Arreglo experimental para caracterización de ángulo de incidencia y frecuencia de trabajo | 32 |
| 3.3.2. Arreglo experimental para caracterización de visibilidad de franjas | 33 |
| 3.3.3. Arreglo experimental para la caracterización de la amplitud de modulación | 35 |
| 3.3.4. Arreglo para la detección de frecuencia de modulación de objetos sólidos transparentes | 36 |
| 3.4. Diagrama de conexión para experimentos | 37 |
| 3.5. Asistente Interferométrico (AI) | 38 |
| 4. Resultados | 41 |
| 4.1. Resultados de caracterización de GaAs | 41 |
| 4.1.1. Caracterización de ángulo de incidencia y frecuencia de trabajo | 42 |
| 4.1.2. Caracterización de visibilidad de franjas | 44 |
| 4.1.3. Caracterización de amplitud de modulación | 45 |
| 4.1.4. Parámetros fijos para la experimentación | 46 |
| 4.2. Resultados de detección de vibraciones en objetos sólidos transparentes | 47 |
| 5. Conclusiones | 49 |
| Referencias | 51 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| 2.1. Diagrama esquemático del acelerómetro piezoeléctrico | 8 |
| 2.2. Diagrama esquemático del acelerómetro inductivo [1] | 9 |
| 2.3. Principio de corriente de Eddy | 10 |
| 2.4. Diagrama esquemático de un capacitor | 10 |
| 2.5. Detección de objetos conductores y dieléctricos | 11 |
| 2.6. Principio ultrasónico | 11 |
| 2.7. Efecto Hall [2] | 12 |
| 2.8. Clasificación de materiales según sus bandas [3] | 13 |
| 2.9. Fotogeneración de par electrón-hueco | 14 |
| 2.10. Patrón de interferencia óptico | 15 |
| 2.11. Experimento de la doble rejilla del Dr. Thomas Young | 18 |
| 2.12. Interferómetro, doble espejo de Fresnel | 19 |
| 2.13. Interferómetro, doble prisma de fresnel | 19 |
| 2.14. Interferómetro, espejo de Lloyd | 20 |
| 2.15. Interferómetro de Michelson | 20 |
| 2.16. Interferómetro Mach-Zehnder | 21 |
| 2.17. Efecto de la fuerza fotoelectromotriz no estacionario [4] | 21 |
| 2.18. Comportamiento de la fuerza fotoelectromotriz no estacionario | 22 |
| 2.19. Configuración para la detección de ondas ultrasónicas láser | 24 |
| 2.20. Diagrama de bloques de un amplificador lock-in | 25 |
| 2.21. Señales de un amplificador lock-in | 26 |
| | |
| 3.1. Dimensiones de cristal de GaAs | 30 |
| 3.2. Arreglo para caracterización angular y frecuencial | 32 |
| 3.3. Arreglo para caracterización de la visibilidad m de franjas | 33 |
| 3.4. Arreglo para la caracterización de frecuencia de modulación | 35 |
| 3.5. Arreglo experimental para la detección de vibraciones en objetos sólidos transparentes | 36 |
| 3.6. Diagrama de conexiones | 37 |
| 3.7. Diagrama de flujo AI | 38 |
| | |
| 4.1. Resultados de dependencia angular y frecuencia de trabajo, 1 | 42 |
| 4.2. Resultados de dependencia angular y frecuencia de trabajo, 2 | 43 |
| 4.3. Resultados de caracterización por visibilidad de franjas | 44 |
| 4.4. Resultados de caracterización de amplitud de modulación | 45 |
| 4.5. Detección de vibraciones en un objeto sólido transparente | 47 |

Lista de Tablas

| | |
|---|----|
| 3.1. Propiedades Ópticas de GaAs | 30 |
| 3.2. Equipo utilizado | 31 |
| 3.3. Cálculos de visibilidad m | 34 |
| 4.1. Resultado de caracterización | 46 |

Capítulo 1

Introducción

La tendencia actual al desarrollo de máquinas con altas velocidades rotativas y de estructuras más ligeras hacen del análisis de vibraciones mecánicas [5] una necesidad inherente en toda la industria y aplicaciones que se vean afectadas por el exceso de vibraciones mecánicas inusuales. Aproximadamente el 50 % de las averías en máquinas rotativas se debe a desalineación de los ejes, la cual es causada por vibraciones mecánicas excesivas, esto genera pérdidas por reparación.

Otras de las consecuencias menos radicales de la vibración mecánica excedentes, son daños prematuros en rodamientos, obturaciones, acoplamientos y aumento en el consumo de energía. [6]. Algunas otras aplicaciones que se ven afectadas por las vibraciones mecánicas no deseadas son; tuberías de fluidos, líneas de ensamble de automóviles, hélices de barcos, máquinas dedicadas a la manufactura, líneas de transmisión de potencia, etc. [6].

Todas estas máquinas se encuentran en continuo movimiento, razón por la cual presentan una vida útil limitada. Determinar el tiempo de vida útil es prácticamente imposible si no se cuenta con un sistema de monitoreo, pero si es posible programar mantenimientos preventivos, los cuales han cobrado gran importancia en las últimas décadas, debido a que las exigencias de calidad en la producción son cada vez más altas y al hecho de que las empresas necesitan ser más competitivas en el ámbito del comercio internacional [7]. Por ello es necesario emplear un sistema de mantenimiento preventivo, el cual tiene los siguientes efectos positivos en las máquinas [1]:

- Programación del mantenimiento durante el tiempo muerto o paradas rutinarias.
- Reducción del tiempo de mantenimiento en los elementos de interés, puesto que están plenamente identificados.
- Planificación del replazo de refacciones.
- Incremento de producción por disminución del número de paros y tiempos muertos.

Aun cuando el mantenimiento preventivo provee una buena planeación para la prevención de pérdidas innecesarias es forzoso contar con un sistema de monitoreo que coadyuve a obtener datos para realizar un análisis del comportamiento de los elementos de interés. Ahora, la problemática se traslada a la selección del adecuado sistema que monitoree las vibraciones mecánicas, tales como los efectos de cavitación en máquinas rotativas [8].

Antes de la selección de la instrumentación para el monitoreo es necesario tomar en cuenta los siguientes aspectos básicos [6]:

- Temperatura de operación.
- Máxima frecuencia de vibración.
- Tipo de superficie a monitorear.
- Tiempo de respuesta necesario.

Tomando en cuenta lo anteriormente descrito, se puede decir que el monitoreo de vibraciones mecánicas es medular en la estimación de la vida útil de los elementos que se encuentran en movimiento. En este trabajo de investigación se hacen describen los distintos tipos de métodos de medición. Así como, la aportación de un método de monitoreo no contactivo que presenta amplias ventajas con respecto a los dispositivos ya existentes.

1.1. Justificación

El análisis de vibraciones permite diagnosticar el estado de las máquinas y sus componentes mientras funcionan normalmente dentro de una planta de producción, es una de las tecnologías más utilizadas en el mantenimiento predictivo de las máquinas rotativas.

El mantenimiento predictivo aplica técnicas no destructivas en las máquinas para predecir cuándo requieren operaciones de reparación o cambio de piezas. Una de ellas, y quizás la más utilizada es el análisis de vibraciones, que sirve para determinar el estado de cada uno de los componentes de los equipos con el fin de programar las actividades de mantenimiento respectivas, sin afectar al desarrollo normal de la planta de producción.

Con el desarrollo de esta tecnología, se consiguen equipos analizadores de vibración y paquetes informáticos que agilizan y facilitan el análisis de vibraciones, porque entregan al usuario las gráficas de las señales de las vibraciones ya sea en el dominio del tiempo o en la frecuencia para que se pueda realizar su interpretación y emitir un diagnóstico acertado.

Todas las máquinas generan vibraciones como parte normal de la actividad, sin embargo, cuando falla alguno de sus componentes, las características de estas vibraciones cambian, permitiendo bajo un estudio detallado identificar el lugar y el tipo de falla que se está presentando, su rápida reparación y mantenimiento.

El análisis de vibraciones está basado en la interpretación de las señales de vibración tomando como referencia los niveles de tolerancia indicados por el fabricante o por las normas técnicas.

La fotodetección adaptiva es una técnica óptica de reciente creación [9], este método está basado en el efecto de la fuerza foto-electromotriz no estacionario en donde al incidir un patrón de interferencia óptico de un campo de carga espacial, no genera por sí mismo corrientes eléctricas en dicho material. Por el contrario, si uno de los haces del patrón de interferencia oscila a una frecuencia distinta al haz de referencia, se observa una corriente alterna a través del material, esta señal es analizada para determinar la frecuencia de vibración de objeto.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Estudiar los efectos de la fuerza foto-electromotriz no estacionaria, para aprovechar el efecto de fotodetección adaptiva en la detección de vibraciones mecánicas inducidas en un objeto sólido transparente. Realizar las modificaciones necesarias al interferómetro de Mach-Zehnder para usarlo en este trabajo de investigación.

1.2.2. Objetivos Particulares

- Caracterizar el cristal de arseniuro de galio (**GaAs**) para determinar los parámetros que den como resultado mediciones confiables.
 - Detectar frecuencias de vibraciones inducidas de manera forzada sobre una pieza circular de acrílico.
 - Desarrollar un software para procesar la señal de salida del cristal de **GaAs** y determinar la frecuencia de vibración inducida.
-

1.3. Organización de capítulos

En este trabajo de investigación la estructura por capítulos es la siguientes:

- **Capítulo 2.** Se presentarán los conceptos fundamentales necesarios para entender la metodología experimental, se explican temas como vibraciones mecánicas, se realiza revisión bibliográfica sobre los materiales útiles en la interferometría, la explicación de la técnica lock-in, la cual se usa para el procesamiento de la señal de respuesta del cristal de arseniuro de galio (**GaAs**).
- **Capítulo 3.** Trata todo lo referente al desarrollo de la metodología experimental, desde la descripción de los equipos utilizados, así como los arreglos implementados para la caracterización del cristal de **GaAs**.
- **Capítulo 4.** Los resultados de los experimentos, explicando a detalle lo observado en las gráficas obtenidas.
- **Capítulo 5.** Analiza y discute las conclusiones obtenidas.
- **Referencias.** Muestra las fuentes bibliográficas consultadas y citadas para la realización del presente trabajo de investigación..

Capítulo 2

Conceptos Fundamentales

En este capítulo, se describen todos los principios físicos involucrados en este trabajo de investigación, incluyendo, conceptos de *vibraciones mecánicas y los diferentes métodos para la medición de la misma*, se encuentra un apartado que explica la *teoría de bandas*, la teoría que rodea a la parte óptica del trabajo, se realiza la revisión de temas tales como *materiales fotorefractivos y fotoconductivos* hasta las *aplicaciones de la fuerza fotoelectromotriz no estacionario*. Finalizando con temas como la *técnica de medición lock-in amplifier* y el software *LabVIEW*.

2.1. Vibraciones mecánicas y métodos de detección

Se dice que un cuerpo vibra cuando experimenta cambios alternativos, de tal modo que sus puntos oscilen sincrónicamente en torno a sus posiciones de equilibrio [5]. Algunas de las razones por las cuales un objeto vibra son las siguientes:

- Desequilibrio de máquinas rotatorias.
- Entrada de energía acústica.
- Circulación de fluidos o masas.
- Energía electromagnética.

No importa la causa de la vibración, su monitoreo y reducción es necesario debido a las siguientes razones [6] :

- La excesiva vibración sobre un elemento puede limitar la velocidad del proceso, en el que se encuentre involucrado.
- La vibración inusual es responsable de la pobre calidad de los productos elaborados por las máquinas-herramientas.
- Causan ruidos innecesarios que resultan en daños a la salud de quienes operan la maquinaria.

- Pueden alcanzar otros elementos causando daños en varias partes a la vez.

Por lo descrito anteriormente es necesario medir las vibraciones mecánicas. La medición de vibraciones se define como el estudio de las oscilaciones mecánicas de un sistema dinámico [6].

Los sistemas y métodos de medición se dividen en dos grandes grupos, a) *técnicas de contacto* y b) *técnicas de no contacto*, ambos métodos tienen como principio, convertir la energía de movimiento en electricidad [1].

Técnicas de contacto Los principios de funcionamiento que se encuentran en esta categoría, tiene como principal requerimiento, el tener contacto directo con la pieza que se necesita monitorear:

- *Acelerómetro piezoeléctrico* [10], el principio físico se basa en la *ley d Hook* y la *segunda ley de Newton*. La aceleración que genera una fuerza sobre una masa, denominada masa de prueba, al desplazarse deforma un piezoeléctrico, de esta forma una aceleración ocasiona que la masa se desplace, o viceversa. Hay que señalar que este sistema solo responde a la aceleración a lo largo de una dirección, razón por la cual se necesitan múltiples acelerómetros si se quiere medir la vibración en más de un eje.

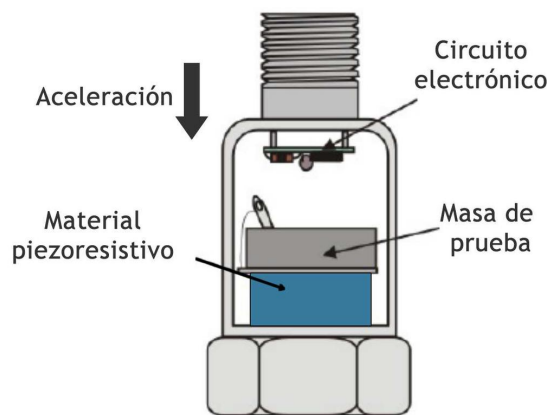


Figura 2.1: Diagrama esquemático del acelerómetro piezoeléctrico

En la Figura 2.1, se puede observar cómo está constituido de manera general un acelerómetro piezoeléctrico, el circuito electrónico es el que interpreta la variable física (desplazamiento) a una señal eléctrica.

- *Acelerómetro inductivo* [1], este principio es conocido también como medición de velocidad de desplazamiento de la vibración, mide la velocidad con la cual la vibración cambia, de este modo es posible determinar la frecuencia de la vibración. Tiene (en lo general) la misma estructura que el principio anterior, pero haciendo uso de la inductancia variable. El instrumento consta de una bobina (**B**) la cual se divide

en tres secciones, con la conexión central se tiene una bobina primaria (**b**) y con las conexiones (**a** y **c**), se tienen bobinas secundarias; se tiene un núcleo (**NH**), el cual esta acoplado a una masa de prueba (**m**), cuando se induce una corriente eléctrica por la bobina (**B**), se genera una inductancia, si la masa (**m**) percibe un desplazamiento el núcleo (**NH**) se mueve en la misma dirección, ocasionando una diferencia en el valor de la inductancia, debido a esto es posible estimar el valor de la frecuencia de vibración del objeto de prueba. Observe la Figura 2.2.

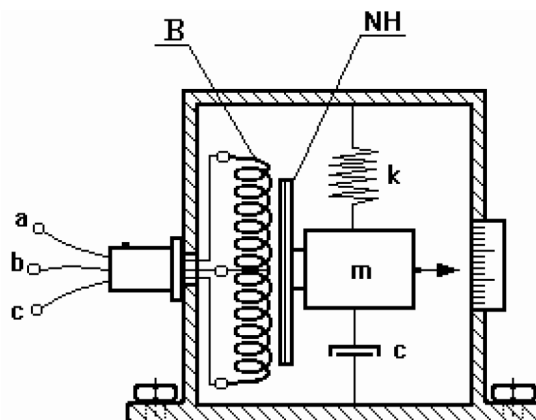


Figura 2.2: Diagrama esquemático del acelerómetro inductivo [1]

Técnicas de no contacto Este modo de medición, da una estimación de las frecuencias de vibraciones mecánicas. Presentan la gran ventaja de no tener la necesidad de contacto directo con el objeto a monitorear, esto resulta útil cuando no es posible acceder por razones de diseño y/o seguridad.

- *Sensores electromagnéticos* [11], contienen en su interior una bobina, por la cual al hacer circular una corriente eléctrica, el conductor genera un flujo de campo magnético. Cuando el sensor se encuentra cerca de un material conductor (por lo general un metal), este genera un campo magnético de menor magnitud en dirección contraria al generado por la bobina, este campo se conoce como corrientes parásitas o *corrientes de eddy*; las corrientes de Eddy hacen que el campo magnético de la bobina disminuya su magnitud, por lo tanto esta razón de cambio se convierte en la señal de respuesta, para poder cuantificar la frecuencia de vibración del objeto monitoreado, se tomando en cuenta la velocidad con la que se mueve el objeto con respecto al sensor. Observe la Figura 2.3.

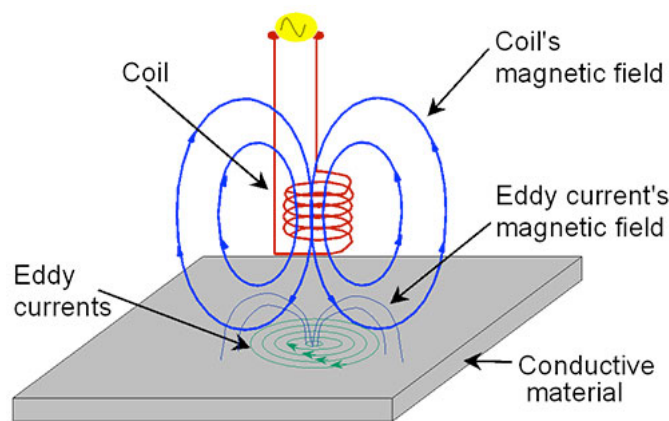


Figura 2.3: Principio de corriente de Eddy

- *Sensores capacitivos* [2]. El principio físico de un capacitor, es el que consta de un par de placas conductoras paralelas, entre ellas se encuentra un material dieléctrico, al inducir una corriente por las terminales de las placas, el capacitor se carga, observe la Figura 2.4.

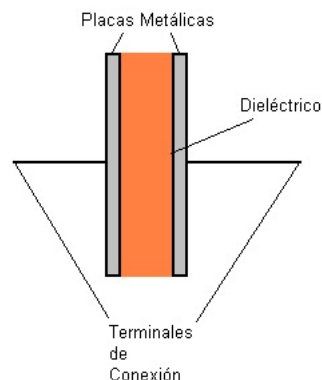


Figura 2.4: Diagrama esquemático de un capacitor

Los sensores capacitivos operan bajo el principio anteriormente descrito, son capaces de detectar materiales conductores, como no conductores, con la única diferencia que, si se trata de un conductor, la distancia a la que se encuentra el objeto puede ser mayor que la distancia necesaria para detectar un dieléctrico. Las frecuencias de vibraciones son estimadas cuando el objeto bajo medición presenta desplazamiento, de este modo la capacitancia varía, haciendo posible estimar la rapidez y por lo tanto la frecuencia a la cual el objeto está vibrando. Observe la Figura 2.5.

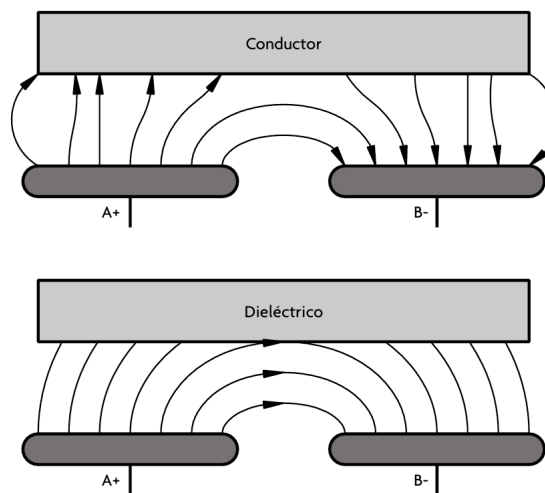


Figura 2.5: Detección de objetos conductores y dieléctricos

- *Sensores ultrasónicos*, las ondas de sonido, ultrasónicas presentan frecuencia superior a 20 kHz , el oído humano no es capaz de percibir las. Este tipo de sensores tiene dos partes fundamentales, las cuales constan de un emisor el cual origina las ondas ultrasónicas; la segunda parte es un receptor el cual estima el tiempo y la distorsión con la cual las ondas regresan. De este modo es posible estimar la presencia de un objeto, si este se desplaza, se puede deducir su frecuencia de vibración. Observe la Figura 2.6.

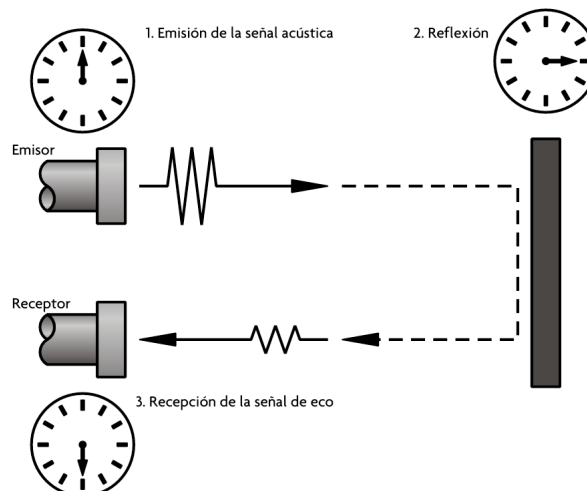


Figura 2.6: Principio ultrasónico

- *Sensores de efecto Hall* [12]. El efecto Hall, fue descubierto por el físico estadounidense Edwin Herbert Hall. Cuando se hace circular una corriente eléctrica por una placa y se acerca un imán, este cambia de dirección volviéndose perpendicular con respecto a la placa, esto se debe al campo magnético del imán, a este fenómeno físico se conoce como efecto Hall. Los sensores que usan este principio de funcionamiento tienen dos tipos de configuración, la primera es que para estimar las frecuencias de las vibraciones de un objeto es necesario acoplar un imán permanente sobre el objeto a monitorear, la velocidad con la que el objeto se desplaza genera una frecuencia de cambio en el voltaje Hall, de esta manera es posible estimar la frecuencia de vibración del objeto. La segunda configuración sigue el mismo principio, pero no acopla un imán permanente a la muestra, solo es necesario que esta sea de un material ferromagnético. Observe la Figura 2.7.

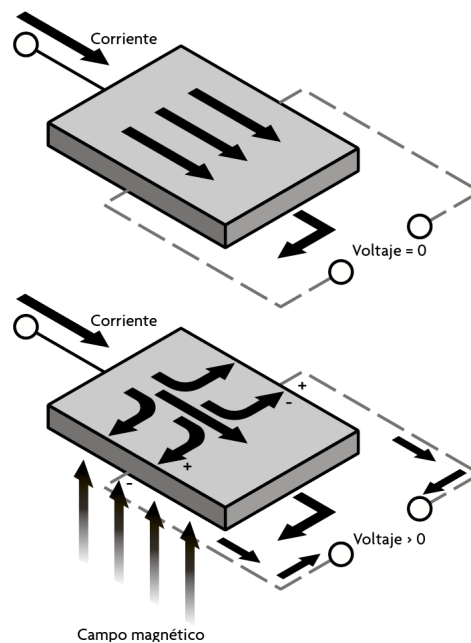


Figura 2.7: Efecto Hall [2]

2.2. Semiconductores y teoría de bandas

El comportamiento de los materiales ante la transferencia de electrones, hace que se puedan clasificar de tres maneras distintas, conductores, aislantes y semiconductores. Esta clasificación los discrimina por sus propiedades eléctricas. A continuación se presenta la descripción de los diferentes materiales [13]:

- *Conductores*: este tipo de materiales tienen una extensa población de electrones libres, tomando en cuenta que el espacio entre la banda de valencia y la banda de conducción es despreciable, hace que los electrones fluyan libremente, como ejemplo de materiales conductores se pueden encontrar a los metales, tales como el cobre, hierro, plata, oro, etc.
- *Aislantes*: estos materiales son el caso opuesto de los conductores debido a que carecen de una extensa población de electrones y la distancia entre su banda de valencia y conducción no es despreciable (banda prohibida), a los pocos electrones existentes no les es posible fluir con facilidad, como ejemplo de estos materiales se encuentran: la madera, corcho, polímeros, etc.
- *Semiconductores*: estos materiales no tienen electrones libres en la banda de conducción, pero cuentan con algunos electrones en la banda de valencia, la banda prohibida tiene una distancia considerable, los efectos de esta distancia pueden atenuarse si el material se ve afectado por un campo eléctrico o iluminación. Algunos ejemplos son: silicio, dióxido de titanio, sulfuro de hierro, entre otros.

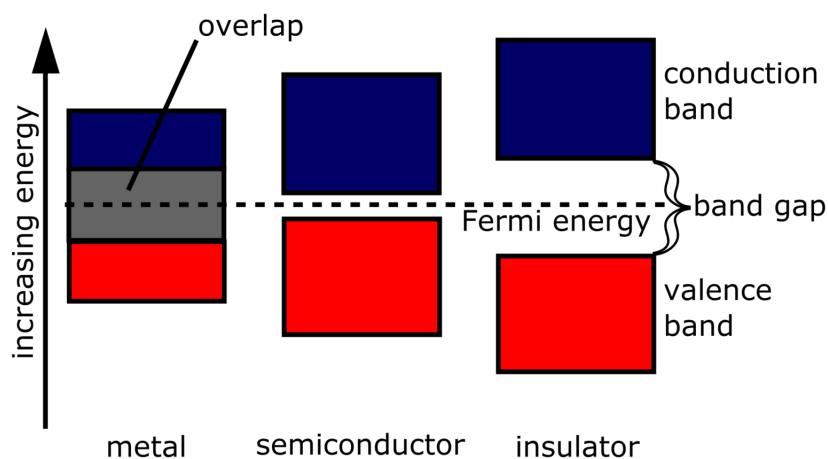


Figura 2.8: Clasificación de materiales según sus bandas [3]

2.3. Fundamentos Ópticos

2.3.1. Fotoconductividad

La fotoconductividad se da cuando un fotón con energía mayor o igual a la de la banda prohibida del semiconductor. Incide en el material ocasionando que un electrón de la banda de valencia sea promovido a la banda de conducción (Figura 2.9), mejorando la continuidad del material semiconductor; este efecto se observa como consecuencia de la incidencia de la radiación electromagnética, la cual puede ser clasificada como sigue [14]:

- Luz infrarroja
- Luz ultravioleta
- Luz visible
- Radiación gamma

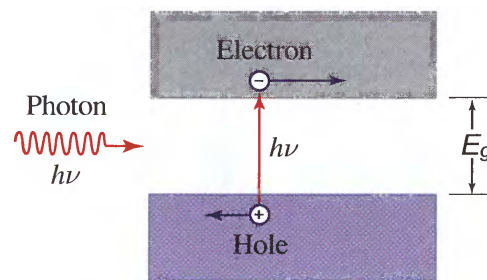


Figura 2.9: Fotogeneración de par electrón-hueco

Por lo tanto, un material fotoconductor es aquel que, en ausencia de luz, se comporta como aislante, pero cuando es iluminado absorbe fotones y generan portadores de carga libre, así la conductividad del material aumenta y se genera una corriente de respuesta.

Existen dos tipos de fotoconductividad una *intrínseca*, que se da cuando un fotón es de mayor o igual energía que la banda prohibida y la *extrínseca* que se presenta cuando, en materiales con defecto o impurezas, induce un fotón con menor energía que la banda prohibida ocasiona que un electrón sea promovido a la banda de valencia, generando solo un portador, a diferencia de la conductividad extrínseca, donde intrínseca son dos portadores los que aumentan la conducción del material.

2.3.2. Efecto electroóptico

En algunos materiales transparentes es posible cambiar sus propiedades ópticas cuando se someten a un campo electromagnético. Esto es resultado de las fuerzas que distorsionan la posición, orientación o formas de las moléculas que constituyen el material [14].

El efecto electroóptico es un cambio en el índice de refracción de un material, como resultado de la aplicación de un campo eléctrico estable o de baja frecuencia; es decir que, cuando en un material anisotrópico se aplica un campo eléctrico, la luz que lo atraviesa cambia de dirección al afectar su índice de refracción. El efecto electro-óptico puede ser de dos tipos:

- Efecto Pockels
- Efecto Kerr

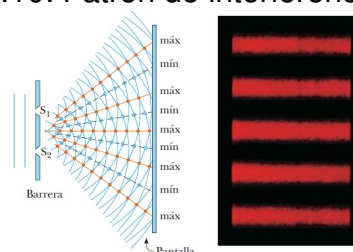
El **efecto Pockels** tiene lugar cuando debido al campo eléctrico, el índice de refracción del material varía proporcional y linealmente. **Efecto Kerr** se da cuando el índice de refracción varía en proporción al cuadrado de la magnitud del campo eléctrico.

2.3.3. Patrón de interferencia

Un patrón de interferencia se observa cuando una fuente de luz es dividida por dos rejillas (experimento de Young) luego, las ondas se superponen, dando como resultado un patrón de interferencia que consta de franjas brillantes y oscuras.

Cuando las ondas se superponen, dan como resultado una región oscura y cuando no lo hacen, una región brillante. Observe la Figura 2.10

Figura 2.10: Patrón de interferencia óptico



2.3.4. Efecto fotorrefractivo

Los cristales foto-refractivos son materiales electroópticos y foto-conductivos, ya que estos dos efectos se manifiestan en ellos cuando un haz de luz coherente (en forma de patrón de interferencia) incide en tales cristales. El patrón de interferencia excita portadores de carga (centros foto-refractivos) que se encuentran localizados en la banda prohibida y los mueven a la banda de conducción o de valencia, donde se mueve y quedan atrapados, luego son excitados nuevamente y así sucesivamente, hasta que el patrón de interferencia desaparece. Durante el proceso las cargas de un signo se acumulan en la región oscura del material mientras que las de signo opuesto se acumulan en la región brillante a tal, fenómeno se conoce como modulación espacial de carga [15].

El ritmo al que la recombinación se desprende o difunden los electrones, es la intensidad del efecto foto-refractivo en el material [16]. **Peculiaridades foto-refractivas vs ópticos no lineales [17]**

- La intensidad de la luz necesaria para el fenómeno es menor respecto a los materiales ópticos no lineales, debido a que su sensibilidad y eficiencia de difracción son mayores.
- Debido a que la respuesta es no-local desde el punto de vista espacial, es decir, el cambio en el índice de refracción aparece desplazado en muchas distancias atómicas respecto a la región iluminada, existe un desfase entre las redes de la luz y del índice de refracción, que da lugar a la transferencia de energía.
- La existencia de portadores de carga posibilita el borrado de los cambios, lo que se traduce como reversibilidad.

2.4. Interferometría óptica

La interferometría óptica es un fenómeno basado en la naturaleza ondulatoria de la luz que permite realizar medidas precisas de las formas o de las distancias, al proporcionar una resolución extraordinaria además no requiere un contacto físico directo con la superficie sometida a estudio. La interferencia óptica es una interacción de dos o más ondas de luz que producen una intensidad resultante, la cual se desvía de la suma de las intensidades componentes [18]. Observa la Ecuación 2.1.

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi \quad (2.1)$$

Donde:

I_1, I_2 : intensidad óptica de los haces uno y dos, respectivamente.

φ : diferencias de fase de los haces.

Entre las técnicas ópticas empleadas para la medida de desplazamientos micrométricos la más conocida es la interferometría láser, la cual suele

emplearse en la medida de espesores y análisis de superficies. La interferometría proporciona precisiones por debajo de la longitud de onda del láser que se emplea, es decir, por debajo de $0.5\mu m$ cuando se utilizan láseres dentro del espectro visible. No obstante, uno de los principales inconvenientes de las técnicas interferométricas es que proveen un valor indirecto del espesor o desplazamiento medido, ya que se deben contar el número de interferencias (máximos y mínimos) de la señal obtenida para determinar la distancia absoluta. El principio fundamental de la interferometría consiste en la interacción o interferencia entre dos ondas luminosas que se encuentran una con otra, de forma parecida a lo que sucede cuando se encuentran dos ondas superficiales en el agua. En cualquiera de estos casos, cuando la cresta de una onda coincide con el valle de la otra, la interferencia es destructiva y las ondas se anulan. Cuando coinciden las dos crestas o los dos valles, las ondas se refuerzan mutuamente, la interferencia es constructiva y las ondas se suman. Los interferómetros pueden dividirse en dos clases:

- a) Los basados en la división del frente de onda: En este caso se usan porciones del frente de onda primario bien sea directamente como fuentes para emitir ondas secundarias o conjuntamente con sistemas ópticos para producir fuentes virtuales de ondas secundarias. Luego se hace que se encuentren estas ondas secundarias para interferir. Como ejemplo de esto se pueden mencionar el biprisma de Fresnel, los espejos de Fresnel y el espejo de Lloyd.
 - b) Los que se fundamentan en la división de la amplitud: en este caso la onda primaria se divide en dos segmentos los cuales viajan por diferentes caminos antes de recombinarse e interferir. Los dos interferómetros más destacados en esta clasificación son el de Michelson y Mach-Zehnder.
-

2.4.1. Experimento de Young

El experimento de *Grimaldi*, consistió en hacer entrar un haz de luz del sol, por dos agujeros diminutos cercanos, cada uno producía una imagen del sol, sobre una superficie blanca distante. Lo que quería demostrar era que donde los círculos se superponían, se generaba obscuridad [19]. Este experimento fue un fracaso hasta que *Young*, ciento cuarenta años más tarde, repitió el experimento, pero esta vez, utilizó un agujero inicial que hizo que la luz solar se convirtiera en espacialmente coherente, así este se convirtió en la fuente de luz primaria, para después incidir en los agujeros que lograron interferir en una pantalla. [19]. Observe la Figura 2.11

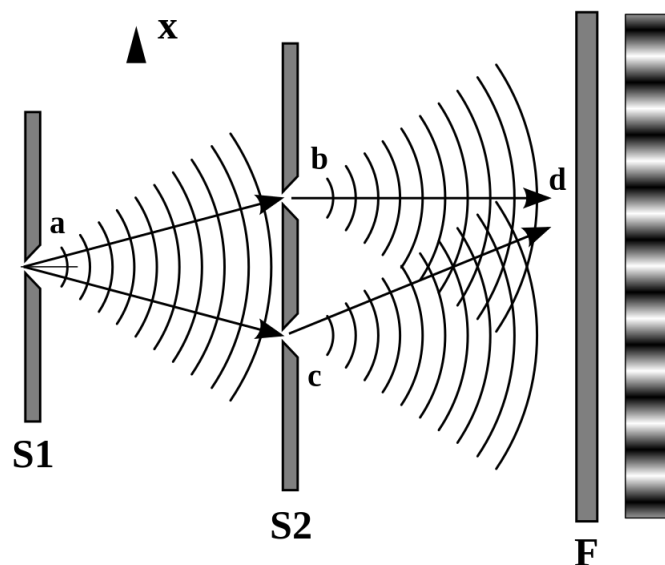


Figura 2.11: Experimento de la doble rejilla del Dr. Thomas Young

2.4.2. Interferómetros

Un interferómetro es un instrumento óptico que divide a una onda en dos, usando un divisor de haz, que los retrasa en distancias diferentes, luego se recombinan usando otro o el mismo divisor de haz de este modo detecta la intensidad de superposición [14].

Los interferómetros, son instrumentos que tiene una muy buena sensibilidad a los cambios de las variables a medir, sin embargo su principal problema es que se necesitan fuentes de luz coherente para conseguir la interferencia [19]. Este problema fue resuelto por *Dr. Thomas Young*, quien realizó un experimento basado en el experimento de *Grimaldi* realizado en 1655.

División de frente de onda

Espejo doble de Fresnel [19] Este interferómetro consta de una fuente de luz coherente que, en una parte es bloqueada por un protector. Sobre la otra parte se encuentran un par de espejos plateados sobre la cara que se encuentra en contacto con el haz de luz, estos espejos están separados a un ángulo, una porción de haz, se refleja sobre el primer espejo y la luz es dirigida a la parte superior de la pantalla, mientras que la otra parte se refleja por el espejo inclinado, cuando los dos frentes de onda se encuentran de nuevo se produce la interferencia. Observe la Figura 2.12.

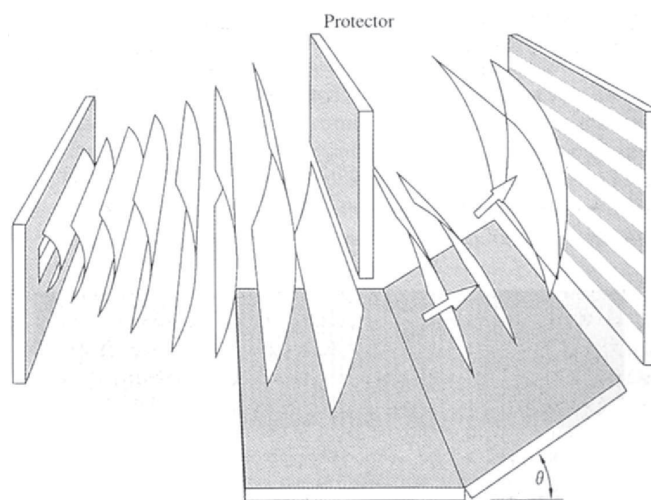


Figura 2.12: interferómetro, doble espejo de Fresnel

Prisma doble de Fresnel [19]

Un frente de onda cilíndrico viene de una fuente de luz coherente. La parte superior de frente de onda, se refleja con el prisma de abajo y llega a la pantalla, mientras que la parte superior del frente de onda se refleja hacia arriba y hace interferencia con el otro frente de onda, observe la Figura 2.13

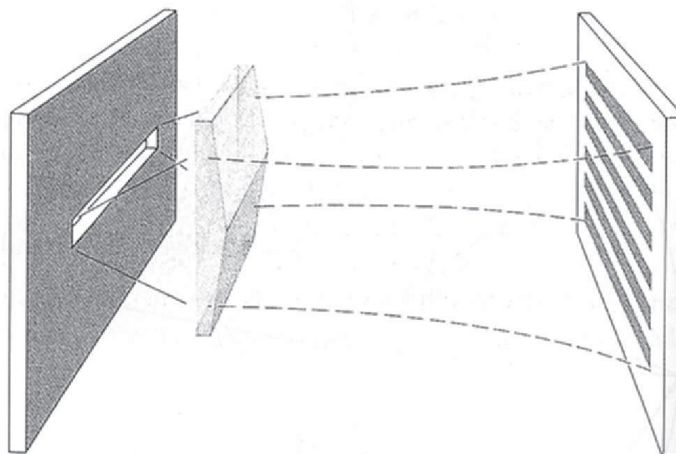


Figura 2.13: Interferómetro, doble prisma de fresnel

Espejo de Lloyd

El espejo de Lloyd, tiene la configuración que se muestra en la Figura 2.14, la cual consta de un dieléctrico o metal, que se usa como espejo, una parte del frente de onda cilíndrico, se refleja en esta y luego en la pantalla, la otra parte va directo a la pantalla y así es como se consigue la interferencia.

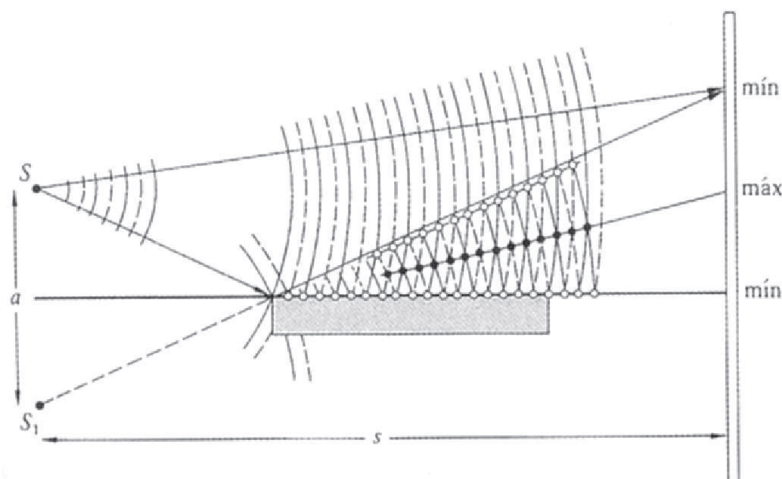


Figura 2.14: Interferómetro, espejo de Lloyd

División de amplitud

Interferómetro de Michelson. [18] Este interferómetro se puede observar en la Figura 2.15, su función es la siguiente: el espejo semiplateado en el punto O divide la onda en dos, una parte viaja a la derecha y otra hacia arriba, al fondo. Las dos ondas serán reflejadas por los espejos $M1$ y $M2$ y regresadas al divisor de haz. Parte de la onda que viene de $M2$ pasa a través del divisor de haz hacia abajo y parte de la onda proveniente de $M1$ es desviada por el divisor de haz hacia el detector. Por lo tanto, las ondas se unen y se produce interferencia.

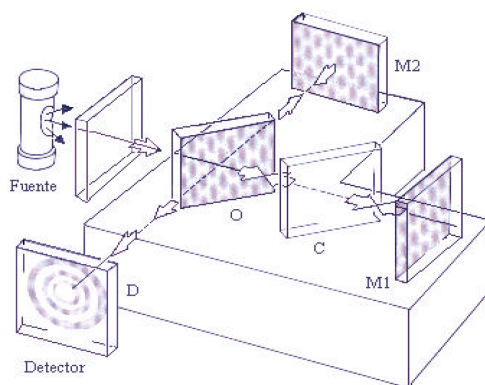


Figura 2.15: Interferómetro de Michelson

Interferómetro de Mach-Zehnder [19] Este interferómetro, tiene la configuración que se muestra en la Figura 2.16, el cual funciona conforme a la

siguiente lógica: cuando el haz de una fuente coherente, pasa por el divisor de haz, de este se producen los haces, uno reflejado y otro transmitido, ambos a través, se unen de nuevo en un segundo divisor de haz, por el cual los dos haces se recombinan y se produce interferencia.

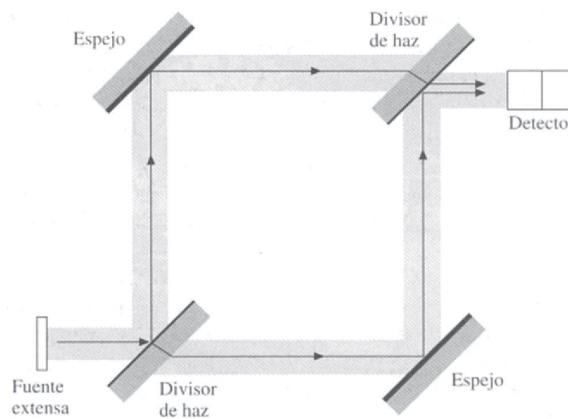


Figura 2.16: Inteferómetro Mach-Zehnder

2.5. Efecto de la fuerza fotoelectromotriz no estacionario

El efecto de la fuerza foto-electromotriz no estacionario, se genera cuando una corriente eléctrica A.C. ilumina a un material fotoconductor. Esta iluminación debe ser un patrón de interferencia oscilante. Esto se consigue cuando uno de los haces que forman el patrón se modulan en fase [9]. La configuración experimental para observar el del efecto de la fuerza foto-electromotriz no estacionario se puede observar en la Figura 2.17.

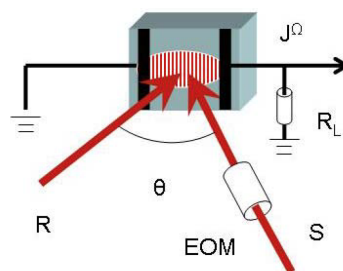


Figura 2.17: Efecto de la fuerza fotoelectromotriz no estacionario [4]

En la Figura 2.17 se muestra como un patrón de interferencia incide en un material fotoconductor. El patrón se compone de dos haces coherentes **R** y **S**, los cuales forman un ángulo de incidencia θ . El haz **S** es modulado por un *OEM* (Electro-Optic Modulator), dando como resultado un patrón oscilante. J^Ω es la señal (corriente) que se genera como respuesta del material, al pasar por la resistencia R_L , con lo que es posible obtener una tensión eléctrica de corriente alterna que es fácil de cuantificar [4].

Gráficamente el efecto de la fuerza fotoelectromotriz no estacionario sigue los siguientes pasos:

1. Un patrón de interferencia incide sobre el material foto-conductivo con una intensidad $I(x)$ (línea continua, fig. 2.18a).
2. Después de $I(x)$, los portadores de carga libre se mueven de las zonas brillantes a las zonas oscuras (fig. 2.18b).
3. Por consecuencia del movimiento de portadores de carga, se genera una distribución de carga espacial. Y por lo tanto, la fotoconductividad se ve afectada (líneas sólidas, fig. 2.18c).
4. Tomando en cuenta el tiempo de relajación dieléctrica del material, al mismo tiempo que se genera una distribución de carga espacial, es posible ver un campo eléctrico dentro del mismo. El campo eléctrico tiene un desfase con respecto a las señales generadas de un cuarto del periodo espacial ($\Lambda/4$) (fig. 2.18d).

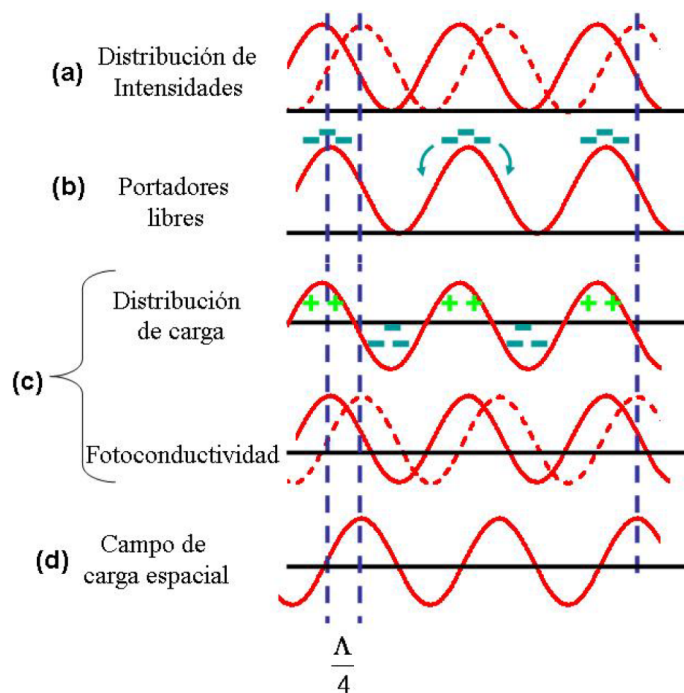


Figura 2.18: Comportamiento de la fuerza fotoelectromotriz no estacionario

Ahora si se supone un movimiento rápido del patrón de intensidad y el cambio es de $(\Lambda/4)$ a la derecha (fig. 2.18a y b, líneas punteadas), los máximos de foto-conductividad y campo eléctrico coinciden, de tal modo se genera un pulso de corriente eléctrica alterna si los desplazamientos son oscilatorios. Lo mismo ocurre si los desplazamientos son a la izquierda, la única diferencia es que la corriente es negativa.

Las ecuaciones([20]) que relacionan lo anteriormente descrito son las Ecuaciones 2.2 y 2.3:

$$j_{\Sigma}^{\Omega} = \frac{m^2 \Delta}{2} \frac{\sigma_0}{1 + k^2 L_D^2} E_D \frac{-i\Omega/\Omega_0}{1 + i\Omega/\Omega_0} \quad (2.2)$$

$$\Omega_0 = [\tau_{di}(1 + k^2 L^2)^{-1}] = \tau_{sc}^{-1} \quad (2.3)$$

Donde:

- τ_{sc} , tiempo de formación de campo de carga espacial.
- k , frecuencia espacial del patrón de luz.
- Δ , amplitud de modulación de fase.
- Ω , frecuencia de modulación.
- m , contraste del patrón de franjas.
- σ_0 , fotoconductividad oscura del cristal.
- τ_{di} , tiempo de relajación dieléctrica.
- L , longitud de difusión.
- E_D , campo de difusión.

2.6. Aplicaciones del Efecto de la Fuerza Foto-electromotriz No Estacionario

Se hizo una breve revisión de las aplicaciones del efecto de la fuerza foto-electromotriz en foto-detectores adaptivos. La descripción de la configuración de cada aplicación y los datos obtenidos forman parte del escrito. **Detección de vibraciones mecánicas** El primer experimento que reporto la detección de vibraciones mecánicas en escalas picométricas, usando un cristal de **GaAs**, fue hecha por Korneev y Stepanov [21]. La modulación de fase para el haz de láser es asegurada por un piezoelectrico, que forma parte de un arreglo experimental interferométrico, como contactos para el **GaAs** se utilizo plata, el experimento se realizo en un rango de 1-50 kHz para la frecuencia de modulación, una sensibilidad, de $\simeq 0.1$ nm, con un láser

de 3 mW de potencia de salida y rango de detección de $\Delta f \simeq =3\text{Hz}$. Otro uso que se puede aprovechar es cuando la frecuencia de modulación (Ω) es mas baja que el inverso del tiempo de formación de carga espacial (τ^{-1}). La configuración interferometrica funciona como un velocímetro, debido a que no mide los desplazamientos laterales, estos experimentos se logran con un **Nd:YAG** láser y un fotodetector de **GaAs:Cr**.

La detección de diferentes tipos de vibraciones mecánicas acústicas, como transversales y laterales, siendo reportada por *Korneev* y *Stepanov* en [22]. Ellos detectan ambos desplazamientos cuando los haces que inciden tiene un ángulo de inclinación.

Detección de ondas ultrasónicas láser. La alta sensibilidad de la detección de ondas ultrasónicas láser, es considerado un problema práctico de gran importancia, ya que los ambientes industriales son hostiles. Esta técnica resuelve algunos de los problemas en ambientes industriales tales como, superficies rugosas, calientes y que pueden moverse o vibrar a altas frecuencias. El rango de frecuencia para la detección usando este método es de *1-30 MHz*

Es posible detectar movimientos en objetos que vibran a una velocidad de 1 m/s, esta velocidad es $\simeq 10$ veces más grande que la velocidad usada en los sistemas de soldadura láser. Para que el detector sea capaz de detectar altas frecuencias, este debe garantizar una sensibilidad de por lo menos $\simeq 1$ nm (correspondiente a una amplitud de modulación $\Delta \simeq 10^{-2}$ rad). Observe la Figura 2.19, para ver la configuración experimental. La detección de modulación de fase en el rango de frecuencia de MHz con GaAs fue reportada por primera vez en (S. Mansurova et al, 1995) [23]

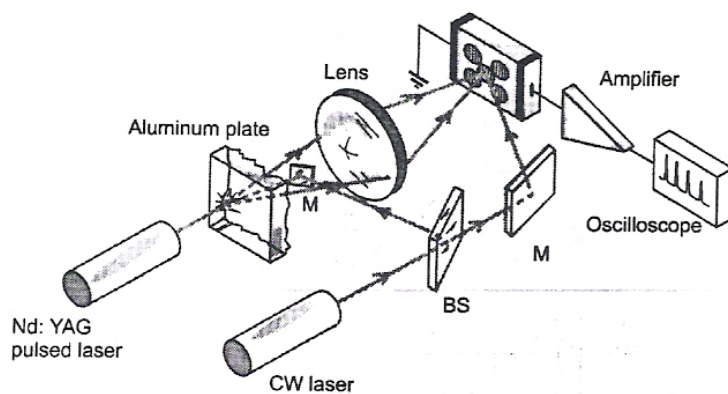


Figura 2.19: Configuración para la detección de ondas ultrasónicas láser

Las buenas propiedades del **GaAs** como fotodetector adaptivo, se debe a que presenta una gran absorción óptica en el espectro de la luz visible. Esto asegura una constante de relajación dieléctrica en frecuencias de megahertz.

2.7. Técnica de medición de un amplificador lock-in

El uso de sensores y actuadores es indispensable para ejercer control y monitoreo sobre los procesos físicos, químicos y biológicos, pero frecuentemente la respuesta de estos fenómenos es más baja que el ruido con el que se encuentra inmerso el proceso. Como solución a este problema se hace uso de la técnica de detección sensible a fase (PSD con sus siglas en inglés) usada por los instrumentos de medición llamados *amplificadores lock-in* (P.M. Maya-Hernández, 2014.) [24].

Los amplificadores lock-in fueron inventado al rededor de 1930 y comercializado a la mitad del siglo 20, como un instrumento eléctrico capaz de extraer la amplitud de una señal y fase en ambientes extremadamente ruidosos [25].

Observe la Figura 2.20, para poder entender porque el **PSD** es el principio físico de funcionamiento del amplificador lock-in.

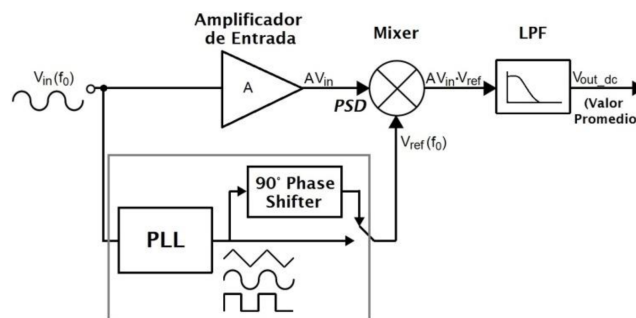


Figura 2.20: Diagrama de bloques de un amplificador lock-in

Una señal de entrada (V_{in}) con una frecuencia (f_0), luego un circuito (PLL) genera una señal (V_r) con una amplitud fija y una frecuencia igual a la entrada [26], ambas señales se dirigen a un multiplicador que genera una combinación ($V_{in}V_r$), para finalizar en un filtro pasa bajas (**LPF por sus siglas en inglés**) que hace un promedio entre las magnitudes de las señales combinadas, dando como resultado una señal de respuesta **D.C** [25]. El **LPF** discrimina el ruido eléctrico de la señal y por lo tanto la señal de respuesta no se ve afectado por el mismo [27].

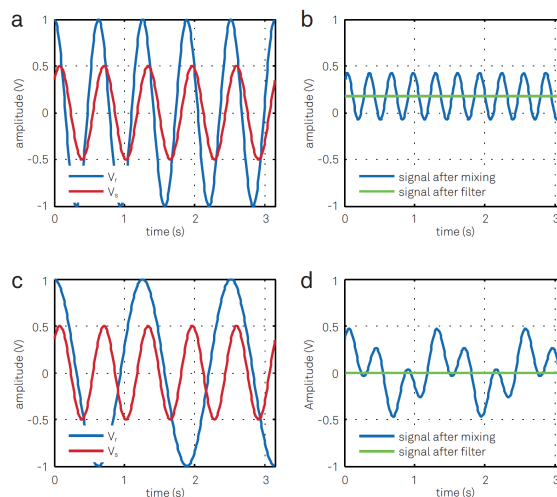


Figura 2.21: Señales de un amplificador lock-in

Si se observa la Figura 2.21 se puede ver un grupo de gráficas que explican lo anterior. **a)** muestra las dos señales en fase; **b)** muestra el resultado del promedio siendo la respuesta del proceso; en **c)** las señales están fuera de fase, por lo tanto en **d)** vemos que la respuesta es 0 [25].

Otros usos del amplificador lock-in son [27]:

- Instrumento de recuperación de señal A.C.
- Fasímetro.
- Medidos de ruido.
- Voltímetro vector.
- Analizador de espectros.

2.8. Sistemas de adquisición por medio de LabVIEW

National Instrument (N.I.) es una empresa dedicada al monitoreo, control y automatización. Su principal producto es *LabVIEW*, el cual es un acrónimo de *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*, este es un software que tiene como base una programación gráfica, la cual funciona por medio de bloques que se conectan, el uso de ella es intuitivo y tiene las mismas estructuras programables que los lenguajes escritos [28].

La versatilidad de **N.I.**, no se limita únicamente en el software, cuenta también con una amplia gama de tarjetas de adquisición, entre las cuales se pueden encontrar [29]:

- CompacRio
- Sistemas PXI
- Sistemas basados en PC
- Compac DAQ

Los usos de toda esta instrumentación son útiles en muchos campos, tales como, la ingeniería, automatización, medicina, robótica, aeronáutica, etc.

Los sistemas de adquisición desarrollados con la tecnología de **N.I.**, tiene ventajas, tales como, velocidad de procesamiento que puede llegar hasta aplicaciones en tiempo real, robustez ante los ambientes hostiles y sobre todo una interfaz intuitiva para el usuario, quien no debe ser un experto. Otra de las grandes ventajas, es que el uso de este software como sistema de adquisición tanto en laboratorios, como en la industria no tiene una diferencia abismal, ya que desde la primera percepción, las herramientas y lógica son las mismas, para ambos ambientes de trabajo.

Cuando el sistema adquirente está completo, es posible trasladar una versión ejecutable para poder ser instalada en cualquier otro ordenador, sin la necesidad de instalar toda la paquetería con la que fue desarrollado el sistema.

Capítulo 3

Desarrollo experimental

Debido a que el cristal de **GaAs**, no es un material estandarizado en cuanto a sus características electrónicas (en este caso), es necesario realizar una caracterización de estas antes de comenzar con la detección de vibraciones. También es necesario desarrollar una metodología, la cual se presenta a continuación:

1. Caracterización en función de frecuencia de modulación (**F_m**) y ángulo de incidencia (α).
2. Caracterización en función de la visibilidad (**m**) de franjas en el patrón de interferencia.
3. Caracterización en función de la amplitud de modulación (**A_m**).

Una vez realizado lo anterior, es posible comenzar con la detección de las vibraciones en el objeto de prueba.

3.1. Cristal de GaAs

El material responsable de interpretar los cambios de fase dados por el patrón de interferencia está compuesto por **arseniuro de galio**, este material es fotoconductor, observe la Figura 3.1

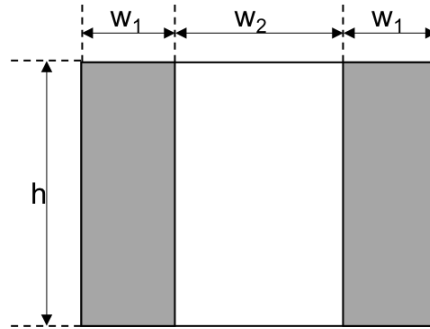


Figura 3.1: Dimensiones de cristal de GaAs

Las dimensiones son la siguientes:

- $h=3\text{mm}$.
- $W_1=0.5\text{mm}$
- $W_2=1\text{mm}$

Las características ópticas del cristal de **GaAs** se encuentran en la Tabla 3.1

| No. | Parámetro | Valor |
|-----|----------------------------|-------------------------------------|
| 1 | Longitud de onda | $\lambda=1.1\mu\text{m}$ |
| 2 | Coefficiente Electroóptico | $r=1.43 \times 10^{-12} \text{m/V}$ |
| 3 | Índice de Refracción | $n=3.4$ |
| 4 | Constante dieléctrica | $\epsilon/\epsilon_0=12.3$ |
| 5 | Tiempo de relajación | $\tau_{SC}=0.1 \text{ mS}$ |

Tabla 3.1: Propiedades Ópticas de GaAs

3.2. Equipo Experimental

El equipo experimental con el que se realizaron las diversas caracterizaciones y las pruebas de detección de vibraciones se presentan en la Tabla 3.2

| No. | Equipo | Características/Modelo |
|-----|-------------------------------|---|
| 1 | Láser He-Ned | $\lambda=632.8\text{nm}$ P=30mW <i>Melles Griot</i> |
| 2 | Divisor de haz | 60/40(CBNotas) <i>Edmund</i> |
| 3 | Espejos | Planos <i>Thorlabs</i> |
| 4 | Cristal de GaAs | No aplica |
| 5 | Bocina moduladora | No aplica |
| 6 | Bocina inductora de vibración | No aplica |
| 7 | PC | No aplica |
| 8 | Software LabView | No aplica |
| 9 | Daq-NI | <i>USB6009</i> |
| 10 | Osciloscopio | <i>TBS-2000</i> |
| 11 | Generador de funciones | <i>Stanford Research DS345</i> |
| 12 | Generador de funciones | <i>Tektronix CFG253</i> |
| 13 | Lock-in Amplifer | <i>Stanford Research SR830</i> |
| 14 | Muestra circular | <i>Vidrio 32mm, 6mm</i> |

Tabla 3.2: Equipo utilizado

3.3. Arreglos experimentales

En las siguientes secciones se presentan los arreglos experimentales, de los cuales se obtuvieron parámetros importantes para detectar frecuencia de vibraciones. Cada uno de ellos, tiene el propósito de experimentar con una variable hasta encontrar el intervalo donde los datos obtenidos son los deseados. El orden de cada arreglo implementado fue definido por la independencia de cada variable, por lo cual cada variable fijada al terminar una caracterización es un dato fijo en el subsecuente experimento de caracterización, teniendo como resultado un arreglo con datos bien definidos de cada una de las variables que intervienen en la detección de la frecuencia de vibración.

Todas las configuraciones experimentales presentadas, son una variante del *interferómetro de Mach-Zehnder*, el cambio que se hizo, es quitar el ultimo divisor de haz del *Mach-Zehnder* (observe la figura 2.16) y en esta parte se coloca el cristal de arseniuro de galio, otra diferencia es que el cristal de **GaAs**, no se encuentra en la misma posición que el elemento que sustituye, esto se debe a que por la dependencia al ángulo de incidencia de los haces que actúan sobre el **GaAs**, estos muestran diferentes niveles de respuesta, por lo cual es necesario hacer la correspondiente caracterización. Lo que es importante conservar como en cualquier interferómetro son las mismas distancias en los caminos ópticos.

3.3.1. Arreglo experimental para caracterización de ángulo de incidencia y frecuencia de trabajo

El arreglo usado para realizar esta caracterización se puede observar en la Figura 3.2, el arreglo cuenta con un láser **He-Ne**, $\lambda = 632.8nm$, el haz posteriormente se divide mediante un divisor (**BS**), de este salen dos haces: uno es dirigido al espejo M_1 , el cual es transmitido (H_T) y sirve como referencia, por otro lado el que se dirige al espejo montado en un piezoeléctrico BM se denomina reflejado (H_R). Con apoyo de ambos espejos los haces son dirigidos al cristal de **GaAs**. El ángulo alfa (α), puede aumentar o disminuir si la distancia (**D**) del cristal de arseniuro de galio cambia, este ángulo se denomina ángulo de incidencia (α). La frecuencia de trabajo, es posible determinarla también con este arreglo, entiéndase por frecuencia de trabajo, el rango de frecuencia donde la señal se observa más estable y lineal. Observe la Figura 3.2.

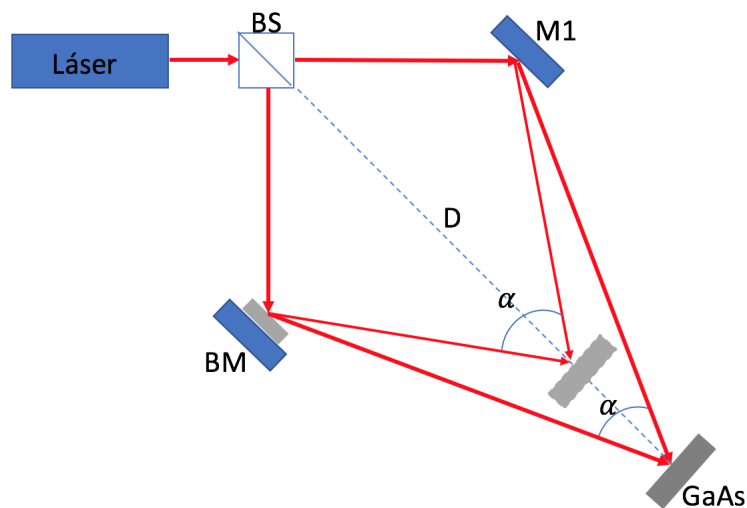


Figura 3.2: Arreglo para caracterización angular y frecuencial

El **BM** modula la fase del H_R , realizando un barrido de frecuencia en un rango de 0-2kHz, con pasos de 10 Hz, en el intervalo de 0-100 Hz y pasos de 100 Hz en el intervalo de 100 Hz-2 kHz; este experimento se repitió para diferentes ángulos los cuales se compararon para decidir cual presentaba el nivel de respuesta más alto. La frecuencia de trabajo se define por medio del mismo experimento, pero en este se casó, se buscó el intervalo donde la señal fuera lo más estable posible, el análisis de este experimento se realizó en la Sección 4.1.1.

3.3.2. Arreglo experimental para caracterización de visibilidad de franjas

La caracterización de visibilidad de franjas es necesaria para compensar la relación entre la potencia del haz transmitido y reflejado. Como se puede observar, en la Figura 3.3, esta es similar a la del arreglo anterior, pero con la variante de que esta presenta atenuadores logarítmicos (**AL**), los cuales compensan la potencia óptica de los haces, estos atenuadores solo se usan uno a la vez.

Tomando en cuenta la Ecuación 3.1, es posible calcular la visibilidad, siendo I_1 y I_2 intensidades de los haces, de la misma manera P_1 y P_2 , son las potencias ópticas de cada haz. Siendo P_1 el haz reflejado (H_R) y P_2 el haz transmitido (H_T).

$$m = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2} = \frac{2\sqrt{P_1 P_2}}{P_1 + P_2} \quad (3.1)$$

La posición del atenuador logarítmico, se alternó para lograr visibilidades desde 0-1, en pasos de 0.1, en la Tabla 3.3 se pueden observar las relaciones necesarias para cada haz.

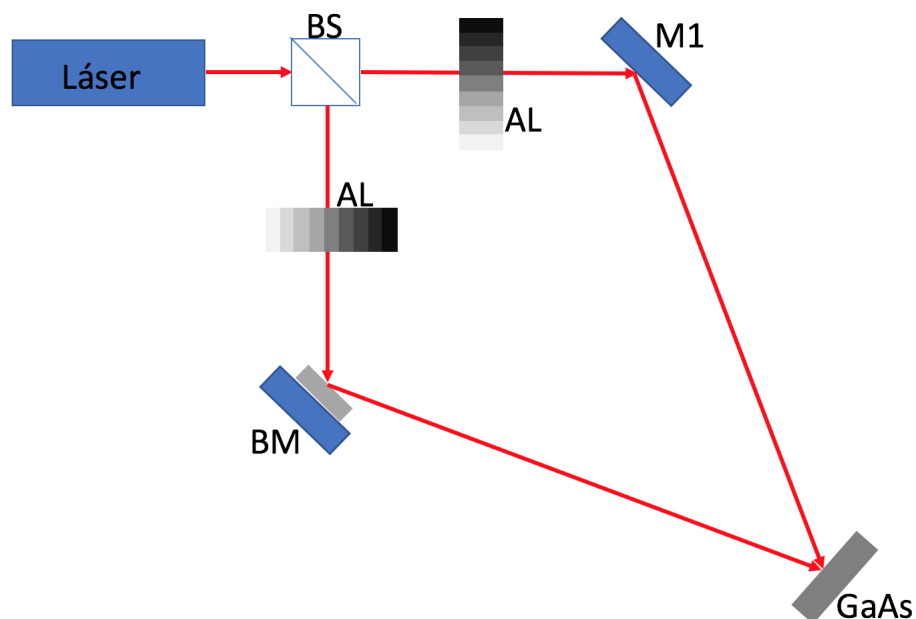


Figura 3.3: Arreglo para caracterización de la visibilidad m de franjas

| No. | m | P_1 (mW) | P_2 (mW) |
|-----|-----|------------|------------|
| 1 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0.1 | 8.42 | 0.0202 |
| 3 | 0.2 | 8.42 | 0.0821 |
| 4 | 0.3 | 0.0412 | 1.61 |
| 5 | 0.4 | 0.0761 | 1.61 |
| 6 | 0.5 | 8.42 | 0.571 |
| 7 | 0.6 | 8.42 | 0.88 |
| 8 | 0.7 | 8.42 | 1.31 |
| 9 | 0.8 | 6.94 | 1.61 |
| 10 | 0.9 | 4.0 | 1.61 |
| 11 | 1 | 1.67 | 1.61 |

Tabla 3.3: Cálculos de visibilidad m

El nivel más alto de P_1 fue de $8.42mW$, para P_2 de $1.61mW$, todos los valores para ambas variables P_1 y P_2 se observan en la Tabla 3.3, si se tiene una magnitud diferente es por que el haz fue atenuado. Los resultados de este experimento, así como la conclusión sobre la mejor visibilidad es descrita en la Sección 4.1.2.

3.3.3. Arreglo experimental para la caracterización de la amplitud de modulación

Este experimento se realizó con los parámetros fijos de visibilidad, frecuencia de trabajo y ángulo de incidencia, por lo cual la última variable a fijar es la amplitud de modulación.

El nivel de amplitud (V_{pp}) enviado a **BM**, es directamente proporcional a la cantidad de franjas disponibles para formar el patrón de interferencia, por ello se realizó un barrido de amplitud de modulación de 0-1 V_{pp} , en pasos de 0.1 V_{pp} , con el propósito de encontrar la amplitud de modulación que dé como respuesta el nivel más alto de voltaje en comparación con los demás datos. La configuración del arreglo se puede ver en la Figura 3.4.

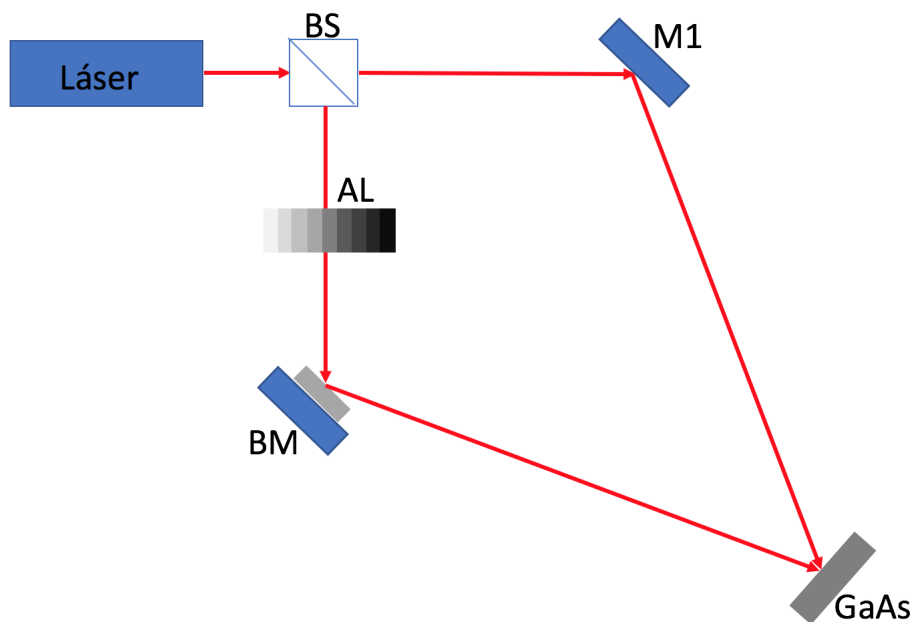


Figura 3.4: Arreglo para la caracterización de frecuencia de modulación

Después del análisis adecuado (Sección 4.1.3) se fija este factor y el arreglo experimental está listo para la detección de frecuencia de vibraciones.

3.3.4. Arreglo para la detección de frecuencia de modulación de objetos sólidos transparentes

Tomando en cuenta los arreglos anteriores, fue posible llegar al arreglo final, el cual se utilizó para detectar las vibraciones por el método de interferometría y fotodetección adaptiva.

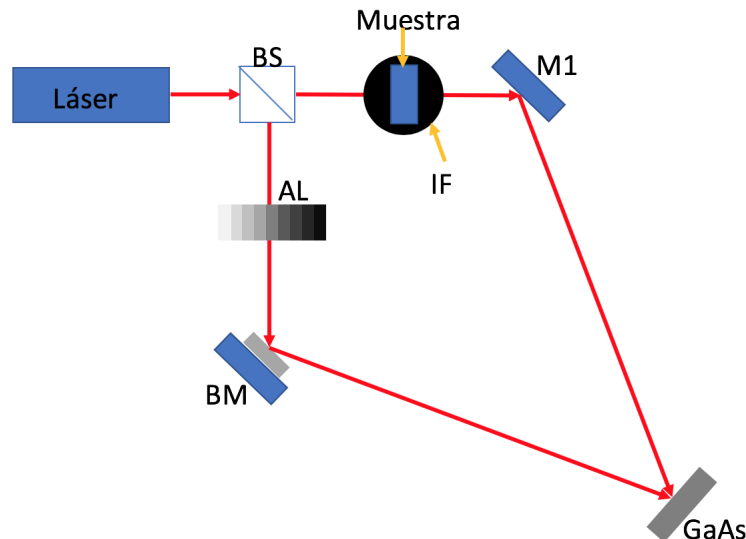


Figura 3.5: Arreglo experimental para la detección de vibraciones en objetos sólidos transparentes

En la Figura 3.5 se observan los elementos que tuvieron origen en los arreglos utilizados para la caracterización del cristal de **GaAs**, se observa por ejemplo que el atenuador logarítmico se colocó finalmente sobre el haz H_R , otro elemento añadido es la configuración para inducir la vibración sobre el objeto sólido transparente, que consta de un piezoeléctrico y un círculo hecho de acrílico.

La detección de frecuencias de vibración es detectada de la siguiente manera, el haz del láser se divide con el **BS**, este da como resultado dos haces uno transmitido H_T y otro reflejado H_R , el H_T incide en la muestra examinada, a esta muestra se le induce una vibración con la asistencia de **IF** (inductor de frecuencia), esto resulta en una modulación del H_T en fase, posteriormente este haz, es dirigido al cristal de **GaAs** con ayuda de **M1**; por otro lado el H_R , se dirige a **BM**, el cual tiene un piezoeléctrico que induce una frecuencia de vibración al espejo, esto modula en fase al haz, luego se dirige a el cristal de **GaAs**, en ese momento se da un patrón de interferencia no estacionario que excita al cristal, que a su vez responde con una corriente alterna, la cual al pasar por una resistencia de carga causa que sea cuantificada como voltaje. Para iniciar el experimento la frecuencia se induce en la muestra se fija, posteriormente la frecuencia que modula la fase del haz reflejado hace un barrido con el propósito de encontrar la frecuencia que se induce en la muestra, para este punto existen dos casos, *el primero* es cuando la señal que pasa por la muestra y la que viene de

BM no coinciden por lo tanto el nivel de respuesta no resulta de nuestro interés, *el segundo* escenario es cuando los dos haces coinciden, en ese momento la respuesta del **GaAs**, muestra un nivel de señal superior al del primer caso; en ese instante se puede decir que se detectó la frecuencia de vibración del objeto de muestra. Para este trabajo de investigación se realizaron numerosos experimentos dando como resultado la detección de algunas frecuencias de vibración, este análisis se presenta posteriormente en la Sección 4.2.

3.4. Diagrama de conexión para experimentos

Las señales y datos obtenidos dan información necesaria para el análisis de este trabajo de investigación, los cuales se describen en la Figura 3.6,

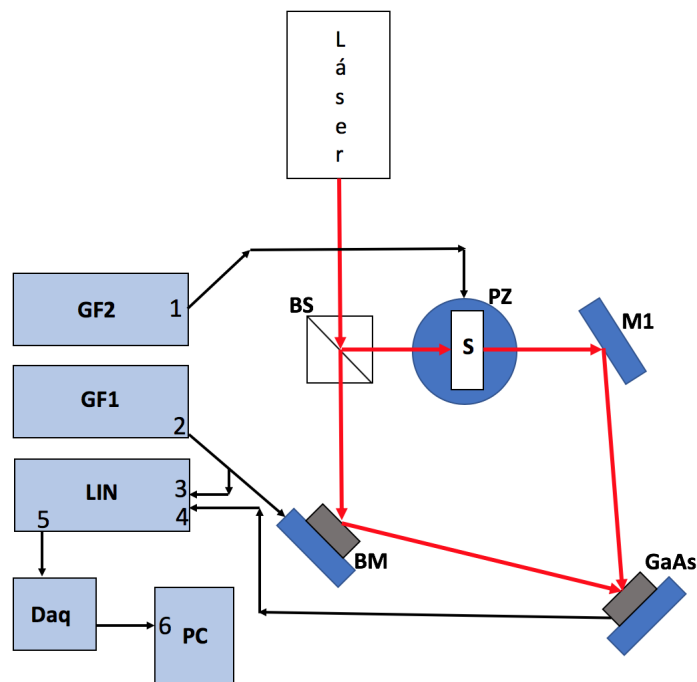


Figura 3.6: Diagrama de conexiones

La Figura 3.6, muestra las conexiones para hacer posible la adquisición de datos, estas siguen el orden que se presenta en la siguiente lista:

- **GF2**, *generador de funciones 2* se encarga por medio de (1) de fijar la frecuencia con la que es modulado en fase el H_T .
- **GF1**, *generador de funciones 1* por medio de (2) es posible enviar la frecuencia a **BM**, que hace el barrido para buscar la frecuencia que se fija con **GF2**, a su vez este barrido en frecuencia es enviado como referencia al **LIN** en (3).

- **LIN**, *Lock-In Amplifier* o amplificador de bajo ruido Lock-in, es el aparato encargado de procesar en una primera etapa las señales que se producen en el experimento, tales como en (3) que es la referencia de barrido en frecuencia, (4) la respuesta de corriente alterna que produce el detector de **GaAs** que por medio de una resistencia de carga es convertida en voltaje A.C. y (5) es la señal procesada y enviada al adquiredor **Daq**.
- **Daq**, *Data acquisition* o adquiredor de datos, es el dispositivo encargado de acondicionar la señal que viene de (5) para enviarla como una señal digital a (6).
- **PC**, *Personal computer* o computadora personal, es usada para hacer el procesamiento final de la señal por medio del software *Asistente Interferométrico (AI)* descrito en 3.5

3.5. Asistente Interferométrico (AI)

El **AI**, es un software desarrollado con el propósito de adquirir los datos que salen del **Lock-In Amplifier**, para posteriormente procesarlos, fue desarrollado en la plataforma gráfica LabView, de la compañía *National Instrument*, para hacer posible la conversión de una señal analógica a digital fue usada una **Daq-6009**, el diagrama mostrado en la Figura 3.7, se puede observar la lógica que sigue el **AI**.

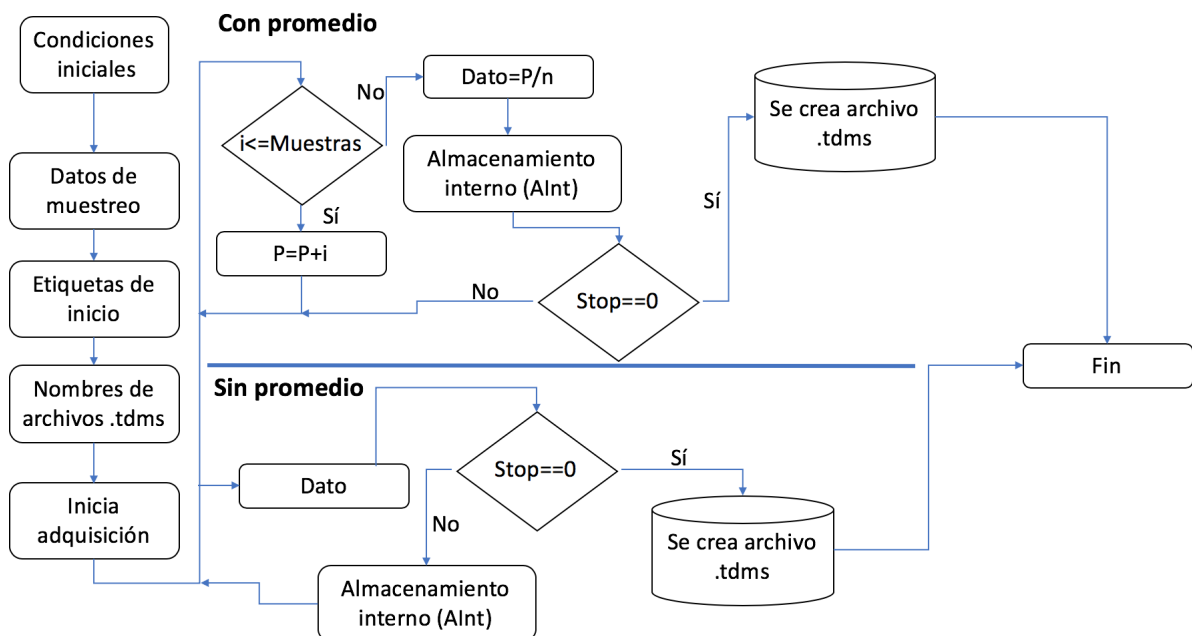


Figura 3.7: Diagrama de flujo AI

Como se observa en la Figura 3.7, si se sigue la programación estructurada, el desarrollo es el siguiente:

1. Se establecen parámetros iniciales

Datos de muestreo

- a) Establecer la frecuencia de muestreo en Hz.
- b) Sensitividad del **Lock-In Amplifier**.
- c) Promedio de muestras.

Etiquetas de inicio

- a) Se fija la frecuencia de excitación de la muestra.
- b) Se establece el punto inicial de la frecuencia de barrido.
- c) Amplitudes de trabajo, de ambos piezoeléctricos.

Nombre de archivos .tdms

- a) Se establecen los nombres de archivos de salida, con y sin promedio.
2. Todos los datos anteriores se envían a la **Daq**, para inicializarla.
 3. Se hace un promedio de muestras, para luego enviarla a un archivo .tdms.
 4. Se envía cada dato sin promediar a un archivo .tdms.
 5. El programa finaliza y los archivos .tdms, son creados y almacenados en la **PC**.
-

4.1. Resultados de caracterización de GaAs

A continuación, se muestran gráficas de los resultados de este trabajo de investigación; de cada gráfica se extrae uno o dos parámetros que se dejaron fijos para el siguiente experimento, el dato o datos obtenidos se justifica con un análisis sustentado en el resultado de los experimentos. El orden de las gráficas coincide con el orden de los arreglos presentado en el Capítulo 3. Antes de presentar las gráficas de detección de vibraciones, se presenta una Tabla donde se indica cuáles fueron los parámetros con los cuales se hicieron los experimentos. Como parte final de este capítulo se muestran las gráficas donde se puede observar las frecuencias de vibración que se detectaron.

4.1.1. Caracterización de ángulo de incidencia y frecuencia de trabajo

Los resultados mostrados a continuación se obtuvieron del arreglo explicado en la Sección 3.3.1. Observe las Figuras 4.1 y 4.2

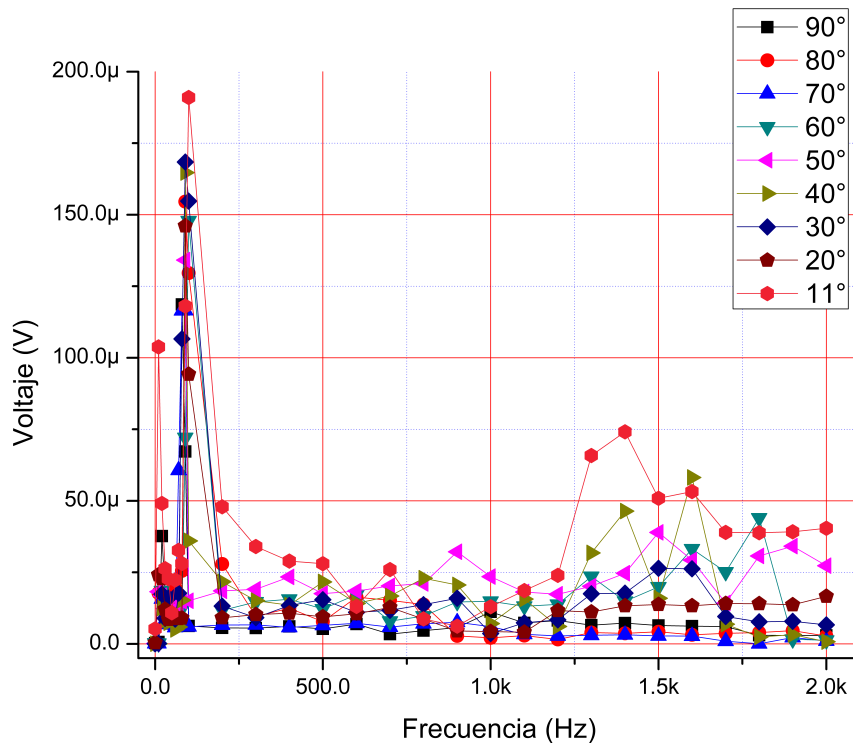


Figura 4.1: Resultados de dependencia angular y frecuencia de trabajo, 1

Se puede ver en la Figura 4.1 el comportamiento de la respuesta dada por el detector de **GaAs**, al cual se le realizó una serie de experimentos para encontrar el ángulo con la respuesta más lineal posible y de mayor magnitud. En el eje x se encuentra el barrido en frecuencia, para el eje y se tiene la respuesta en μV del cristal de arseniuro de galio. Los experimentos se hicieron con las siguientes características:

- Barrido en frecuencia de 0 - 2 kHz.
 - a) en el intervalo de 0-100 Hz, pasos de 10 Hz
 - b) en el intervalo de 100-2kHz, pasos de 100 Hz.
- Barrido de ángulos de 20°-90°, en pasos de 10°.
- Iniciando con un único ángulo de 11°.

En la Figura 4.1, no se aprecia de manera sencilla cual es el ángulo bajo el cual el cristal de arseniuro de galio respondió mejor, ya que señales como

la de 11° , 40° y 50° , son de un nivel alto con respecto a las otras, sin embargo exhiben un comportamiento irregular. Para poder apreciar de manera gráfica cual es el ángulo con mejor respuesta se realizó una modificación a la gráfica, observe la Figura 4.2

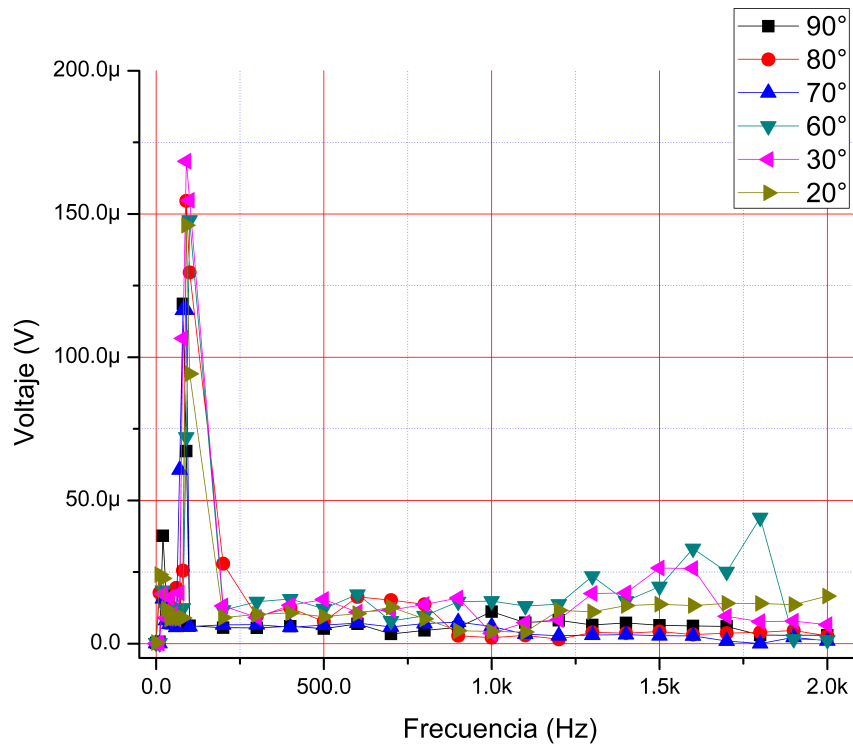


Figura 4.2: Resultados de dependencia angular y frecuencia de trabajo, 2

Suprimiendo las señales mencionadas de la Figura 4.1, se puede ver que el ángulo con mejor respuesta es el de 20° , ya que se puede ver en la gráfica que esta curva es la que presenta un comportamiento que tiende a ser lineal a partir de **1 kHz**, comparado con los otros ángulos. Por lo cual se determina que el ángulo de incidencia óptimo y la frecuencia de trabajo para los experimentos posteriores y la frecuencia de trabajo será de $\alpha = 20^\circ$ y $F_t = 1 \text{ kHz}$, respectivamente.

4.1.2. Caracterización de visibilidad de franjas

Con los parámetros de F_t y α ya definidos, se realizó el experimento para la caracterización de la visibilidad de franjas (m), con ayuda del arreglo descrito en la Sección 3.3.2 y la Tabla 3.3, se obtuvo como resultado la gráfica de la Figura 4.3. Las condiciones bajo las cuales se realizó el experimento fueron $\alpha = 20^\circ$ y **1.5 kHz**.

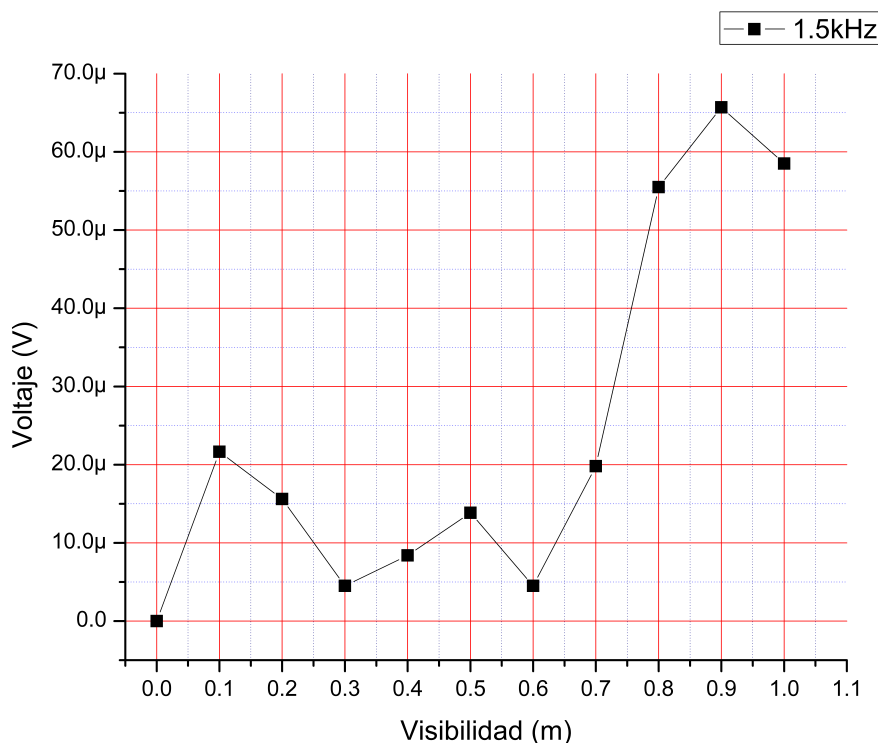


Figura 4.3: Resultados de caracterización por visibilidad de franjas

Tomando en cuenta la gráfica anterior calculada a partir de la Ecuación 3.1, se concluye concluir que la mejor relación de potencia óptica entre los haces incidentes en el cristal de **GaAs**, es la obtenida en $m=0.9$, ya que es el valor más alto que se observa.

Si se tomamos en cuenta los valores de la Tabla 3.3 y recordando que el valor máximo de potencia óptica de H_R es $8.42mW$, la visibilidad $m=0.9$, es resultado de atenuar H_R , de este modo además de tener la visibilidad fija, se puede asegurar que el atenuador logarítmico queda situado sobre el camino óptico de H_R .

4.1.3. Caracterización de amplitud de modulación

Por último es necesario determinar la amplitud de modulación del haz H_R , que es el encargado de hacer el barrido en frecuencia hasta encontrar la del objeto analizado, con ayuda del arreglo descrito en la Sección 3.3.3 se encontró este valor, observe la Figura 4.4

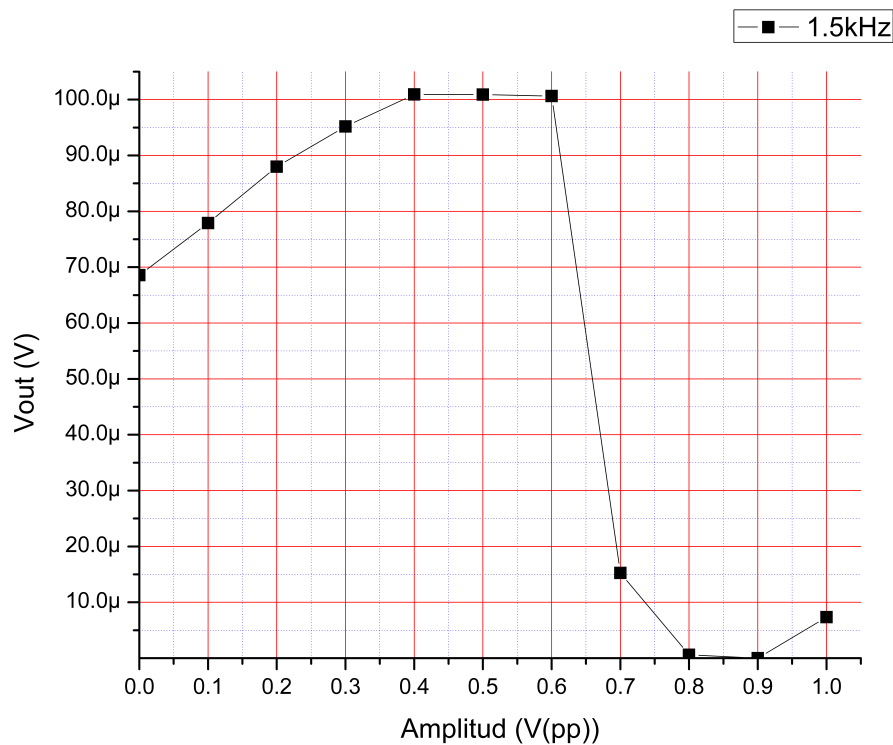


Figura 4.4: Resultados de caracterización de amplitud de modulación

De la Figura 4.4 observamos que, el valor de **Vpp** que presenta una respuesta más alta y estable es el de **0.6 Vpp**, por lo cual se fija ese valor para los experimentos posteriores.

4.1.4. Parámetros fijos para la experimentación

Para tener claro cada uno de los valores con lo que se ejecutaron los experimentos de detección de vibraciones se presenta en la Tabla 4.1, un resumen de los resultados de las caracterizaciones realizadas.

| No. | Parámetro | Valor |
|-----|---------------------------------------|--------------|
| 1 | Frecuencia de trabajo Ft | 1kHz |
| 2 | Ángulo de incidencia α | 20° |
| 3 | Visibilidad de franjas m | 0.9 |
| 4 | Amplitud de modulación para AM | 0.6 V_{pp} |

Tabla 4.1: Resultado de caracterización

Es importante mencionar que la **Ft**, es a partir de **1 kHz**, todos los demás parámetros de la Tabla 4.1 quedan fijos. En cuanto la amplitud de modulación es la misma que se suministra para ambos inductores de frecuencia, es decir para **BM**, que es el que modula el haz H_R y el piezoeléctrico que induce la vibración a la muestra.

4.2. Resultados de detección de vibraciones en objetos sólidos transparentes

Con base a los resultados resumidos en la Tabla 4.1, se realizaron los experimentos de la detección de vibraciones en objetos sólidos transparentes, este arreglo es resultado de cada una de las caracterizaciones hechas previamente, el mismo se describe a detalle en la Sección 3.3.4.

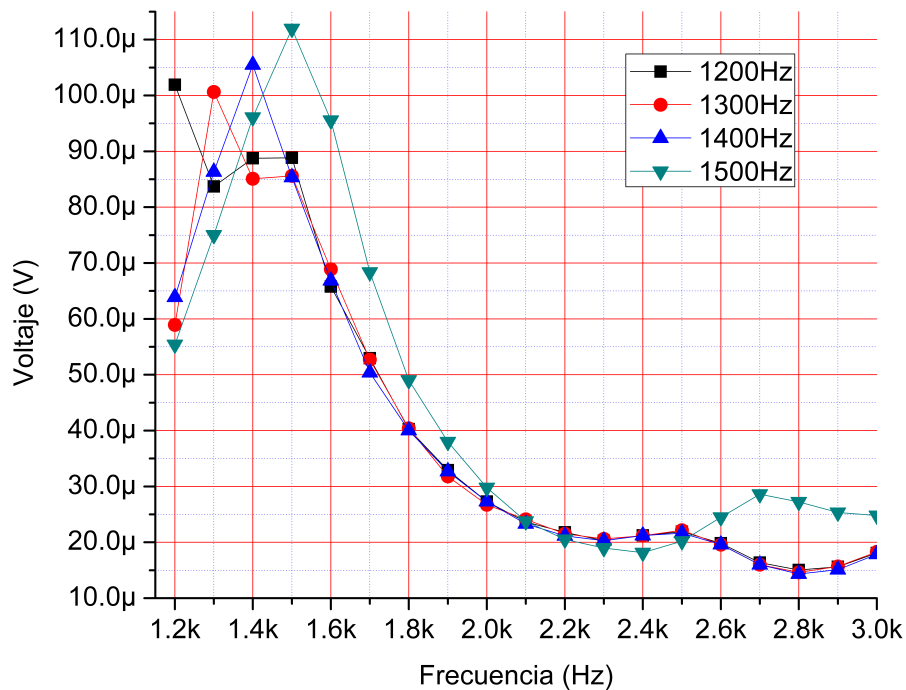


Figura 4.5: Detección de vibraciones en un objeto sólido transparente

Como se observa en la Figura 4.5, fue posible detectar cuatro diferentes frecuencias de vibración inducidas en la muestra de acrílico, cada pico representa una vibración inducida que fue detectada con el barrido de la frecuencia hecho por **BM**.

Capítulo 5

Conclusiones

Se logró caracterizar al cristal de **GaAs** y trabajar con los parámetros adecuados para detectar una señal confiable.

Los parámetros óptimos encontrados fueron los siguientes:

- Frecuencia de trabajo **Ft** 1 kHz
- Ángulo de incidencia α : 20°
- Visibilidad de franjas **m** 0.9
- Amplitud de modulación de **AM**: $6V_{pp}$

Fue posible detectar cuatro frecuencias de vibración distintas, 1.2 kHz, 1.3 kHz, 1.4 kHz y 1.5 kHz, con estos resultados fue posible asegurar que el efecto de la fuerza foto electromotriz no estacionario resulta útil para detectar frecuencias de vibraciones en objetos sólidos transparentes.

Se implemento un **AI**, el cual fue el intermediario entre la señal de respuesta física del **GaAs** y los datos manipulables para un mejor análisis e interpretación de resultados.

Trabajo a Futuro

- Mejorar el mecanismo de interacción entre el piezoelectrico (inductor de vibraciones) y la muestra, para restringir el movimiento de la muestra en un solo eje.
- Reproducir el experimento para otros materiales transparentes.
- Realizar el experimento con materiales de diferentes formas.
- Cambiar los mecanismos de inducción de vibraciones, tanto en el que excita a la muestra como el que modula a H_R , esto con el fin de poner excitar a ambos piezoeléctricos con una mayor frecuencia.

Referencias

- [1] GENARO Mosquera, M De la Victoria, and R Armas. Las vibraciones mecánicas y su aplicación al mantenimiento predictivo. *Centro de Altos Estudios Gerenciales ISID. Caracas*, 2001.
- [2] Leonel Germán Corona Ramírez, Griselda Stephany Abarca Jiménez, and Jesús Mares Carreño. *Sensores y actuadores*. Grupo Editorial Patria, 2014.
- [3] Wikimedia Commons. Band gap comparison, 2015. Accedido 17-05-2017.
- [4] Iván Hernández Romano. *Efecto de fuerza foto-electromotriz en presencia de dos frecuencias*. PhD thesis, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, 2007.
- [5] Russell C Hibbeler. *Mecánica vectorial para ingenieros: dinámica*. Pearson Educación, 2004.
- [6] Daniel Pernia-Márquez. Introducción a la medición de vibración. *Facultad de Ingeniería. Universidad de los Andes. Venezuela*, 2004.
- [7] Francisco Ernesto Moreno-García, José Armando Becerra-Vargas, and Carlos Andrés Rendón-Echeverri. Diseño de un sistema de análisis temporal y espectral para detectar fallas por vibración en motores eléctricos. *Facultad de Ingeniería*, 24(38):41–51, 2015.
- [8] Carlos M García Lara, Rubén A Vázquez Sánchez, Sergio Mendoza Vázquez, and Jorge Camas Anzueto. Acelerómetro mediante el efecto foto-fem.
- [9] Serguei Stepanov. Photo-electromotive-force effect in semiconductors. In *Handbook of advanced electronic and photonic materials and devices*, pages 205–272. Elsevier, 2001.
- [10] Pilar Ochoa, Marina Villegas, José Luis Pons Rovira, José Francisco Fernández Lozano, and MA Bengochea. Piezocomposites metal-cerámica como elementos activos en acelerómetros. 2002.
- [11] Yuqing Lai. *Eddy current displacement sensor with LTCC technology*. PhD thesis, Verlag nicht ermittelbar, 2005.

-
- [12] JE Hirsch. Spin hall effect. *Physical Review Letters*, 83(9):1834, 1999.
- [13] Martha Viridiana Morales Gallardo. Síntesis y caracterización de nanopartículas de Cu_2S y Fe_2S_3 para su aplicación en dispositivos de aprovechamiento de energía solar y remediación ambiental. Master's thesis, Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, 2017.
- [14] Bahaa EA Saleh and Malvin Carl Teich. *Fundamentals of photonics*. John Wiley & sons, 2019.
- [15] Jaime Frejlich. *Photorefractive materials: fundamental concepts, holographic recording and materials characterization*. John Wiley & Sons, 2007.
- [16] Rafael Torres-Córdoba and Liliana Abril Amador Cabrera. Cristales fotorefractivos, quasi-solitones espaciales y grabado holográfico. *Coordinador*, page 13.
- [17] Fernando Fernández Lázaro and Angela Sastre Santos. Materiales fotorefractivos orgánicos. In *Anales de la Real Sociedad Española de Química*, number 1, pages 5–13. Real Sociedad Española de Química, 2002.
- [18] Julio Enrique Duarte, FH Fernández, and M Moreno. Caracterización de membranas termoneumáticas mediante interferometría óptica. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales*, 31(2):79–87, 2007.
- [19] Eugene Hecht. *Óptica*. Pearson Educación,, 2000.
- [20] MP Petrov, IA Sokolov, SI Stepanov, and GS Trofimov. Non-steady-state photo-electromotive-force induced by dynamic gratings in partially compensated photoconductors. *Journal of applied physics*, 68(5):2216–2225, 1990.
- [21] NA Korneev and SI Stepanov. Non-steady-state photoelectromotive force in semiconductor crystals with high light absorption. *Journal of applied physics*, 74(4):2736–2741, 1993.
- [22] A Gerwens, K Buse, E Krätzig, N Korneev, and S Stepanov. Hall measurements with photorefractive strontium barium niobate by application of a non-steady-state photocurrent method. *JOSA B*, 15(7):2143–2146, 1998.
- [23] S Mansurova, D Mayorga Cruz, I Sokolov, and S Stepanov. Technical digest of photorefractive materials, effects, and devices conference. *Aspen Lodge, USA*, pages 196–199, 1995.
-

-
- [24] P.M. Maya-Hernández, M.T. Sanz-Pascual, A. Díaz-Sánchez, and B. Calvo. Diseño integrado de un amplificador lock-in compacto de bajo consumo para aplicaciones portátiles. *Superficies y vacío*, 27:66 – 73, 00 2014.
- [25] Zurich Instruments. Principles of lock-in detection and the state of the art. *CH-8005 Zurich, Switzerland, Accessed*, 2016.
- [26] R Pindado. Phase locked-loop (pll): Fundamento y aplicaciones. *Universitat Politècnica de Catalunya Departament dEnginyeria Electronica*. v, 33, 2001.
- [27] PerkinElmer Instruments. What is a lock-in amplifier. *Technical Note, TN 1000*, 2000.
- [28] Chance Elliott, Vipin Vijayakumar, Wesley Zink, and Richard Hansen. National instruments labview: a programming environment for laboratory automation and measurement. *JALA: Journal of the Association for Laboratory Automation*, 12(1):17–24, 2007.
- [29] National Instruments Corporation. Soluciones simples para retos complejos, 2020.
-