



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

División de Ingenierías
Campus Irapuato - Salamanca

“Diseño y Simulación de un
Interferómetro Fabry-Perot (FPI) Basado
en una Oblea de Material Semiconductor
para Detectar SF₆”

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

PRESENTA:

Ing. Marco Ivan Estrada Pintor

ASESORES:

Dr. Juan Manuel Sierra Hernández

Dra. Eloisa Gallegos Arellano

Diseño y Simulación de un Interferómetro Fabry-Perot (FPI) Basado en una Oblea de Material Semiconductor para Detectar SF₆

Por

Ing. Marco Ivan Estrada Pintor

Asesores:

Dr. Juan Manuel Sierra Hernández

Dra. Eloisa Gallegos Arellano

Universidad de Guanajuato, DICIS

Diciembre 2019

Resumen

En este trabajo se presenta el diseño y la simulación de un interferómetro tipo Fabry-Perot con una oblea de material semiconductor para su aplicación como modulador en un sensor de gas de Hexafluoruro de Azufre. Para el diseño del interferómetro se utilizó la técnica de correlación espectroscópica y se midieron las bandas de absorción del gas con un FTIR. Se eligió la banda de 1260 cm^{-1} para el diseño del modulador. Por medio de simulaciones y aplicando la técnica escogida, se calculó el grosor de una oblea de 3 materiales semiconductores en el rango espectral de análisis. Finalmente se obtuvieron obleas de silicio, germanio y arseniuro de galio con grosores de 7, 9 y 6 micras respectivamente. Analizando los datos y los proveedores de obleas, la oblea de silicio es la más recomendable para el diseño del modulador y para la implementación de un sensor de gas de Hexafluoruro de Azufre.

PALABRAS CLAVE: Interferómetro Fabry-Perot, oblea de material semiconductor, Hexafluoruro de Azufre.

Agradecimientos...

A mi familia, por apoyarme y creer en mí en todos los proyectos realizados, especialmente a mi hermano David por ser mi principal apoyo y a mi hermano Daniel por ser la mejor guía y ejemplo a seguir.

A mi esposa Santa Miriam, porque no se ha rendido y por estar conmigo cada día saliendo adelante juntos.

A mi hijo David Estrada Escobar, por ser lo más importante en mi vida.

A mis compañeros de maestría, M.I. Jorge Andrés Ortega Contreras, M.I. Daniel Jaimes Moreno, M.I. Jorge Eduardo Moreno Moreno, M.I. Erick Ángel Raya, M.I. Heriberto Vázquez Mosqueda, fue un gusto conocerlos y trabajar con ustedes.

Al capítulo estudiantil IEEE Photonics por hacerme parte de su excelente grupo, especialmente al Dr. Roberto Rojas y Dr. Daniel Jáuregui por sus consejos y enseñanzas.

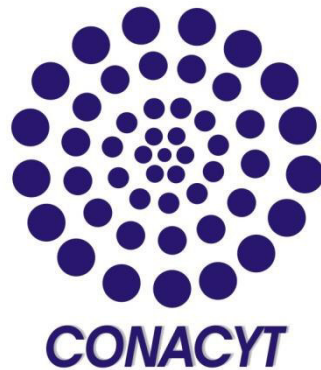
A mis sinodales el Dr. Julián Moisés Estudillo Ayala y Dr. Juan Gabriel Aviña Cervantes por la revisión de este trabajo.

A mis asesores, Dr. Juan Manuel Sierra Hernández y Dra. Eloisa Gallegos Arellano por su paciencia y comprensión, por enseñarme y despertar nuevos horizontes, por creer en mí y por ser las grandes personas que son.

Muchas gracias a todos.

Marco Ivan Estrada Pintor.

Agradezco de manera muy especial al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT, por el apoyo brindado a mi persona con número de registro 819144.



A la Universidad de Guanajuato por los apoyos otorgados para la asistencia a congresos nacionales e internacionales.



A la División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca de la Universidad de Guanajuato, por haber puesto a mi disposición todos los recursos y medios necesarios para continuar mis estudios y desarrollar mi trabajo de tesis.

ÍNDICE

1. Introducción General	1
1.1. Antecedentes.....	2
1.2. Hexafluoruro de Azufre.....	4
1.2.1. Características del SF ₆	5
1.2.2. Medición de la condición del SF ₆	5
1.3. Sensores optoelectrónicos no dispersivos.....	8
1.3.1. Análisis de un sensor optoelectrónico no dispersivo.....	9
1.3.2. Modulador FPI en un NDS.....	11
1.4. Objetivo del trabajo de tesis	11
1.5. Justificación.....	11
1.6. Organización de la tesis.....	12
2. Marco Teórico	13
2.1. Interferencia.....	13
2.1.1 Interferencia de dos ondas.....	14
2.1.2 Interferómetros por división de frente de onda.....	16
2.1.3 Interferómetros por división de amplitud.....	18
2.1.4 Interferencia de haces múltiples.....	19
2.2. Interferómetro Fabry-Perot.....	22
2.2.1 Características del FPI.....	25
2.2.1.1 Efectos al variar la reflectividad.....	26
2.2.1.2 Efectos al variar la cavidad óptica.....	27
2.2.1.3 Efectos al variar el ángulo de incidencia.....	29
2.3 Espectroscopía.....	30
2.3.1 Reflexión.....	30
2.3.2 Transmisión.....	31
2.3.2.1 Transmitancia.....	32
2.3.3 Absorción.....	33
2.3.3.1 Absorbancia.....	33
3. Metodología.....	35
3.1. Líneas de absorción vibracionales.....	35
3.1.1 Absorciones vibracionales del SF ₆	36
3.2 Modelo matemático y principio de operación del sensor no dispersivo.....	49
3.3 Diseño del FPI.....	51
3.4 Simulación del sistema completo con oblea de silicio como modulador.....	58
3.5 Simulación del sistema completo con oblea de Ge y GaAs como modulador.....	63

4. Análisis de resultados obtenidos y conclusiones generales.....	67
4.1. Análisis de resultados obtenidos	67
4.2. Conclusiones.....	68
4.3. Trabajo futuro	69
4.4. Trabajos presentados en congresos nacionales e internacionales.....	69
Referencias.	73

Capítulo I

1. Introducción General

Los sistemas de medición de gases existentes en la actualidad, están basados en sensores que pueden tener diferentes diseños, desde electroquímicos [1], hasta ópticos por mencionar algunos [2]. El interferómetro Fabry-Perot (FPI) es un elemento óptico que ha demostrado ser de gran utilidad en la modulación de sensores de gas basados en espectroscopia correlacional [3].

Por otro lado, encontramos que los sistemas eléctricos de potencia dependen en gran medida del aislamiento que ofrece un gas inerte, utilizado como medio aislante y de extinción del arco eléctrico, el Hexafluoruro de Azufre (SF₆). Este gas, el cual se utiliza en interruptores de potencia de alta y media tensión así como en subestaciones aisladas en gas (GIS), debe de ser monitoreado constantemente ya que una degradación del mismo ocurrida dentro de los interruptores o algún otro elemento que lo utilice, podría terminar en una falla eléctrica del sistema de potencia. Los métodos de medición de la condición del SF₆ que existen en la actualidad, son demasiado costosos para que las mediciones se realicen en tiempo real, por lo cual estas se realizan durante paros programados y en condiciones de equipos desenergizados [4, 5].

En el presente trabajo se presenta el diseño de un interferómetro Fabry-Perot que servirá como modulador en un sensor de Hexafluoruro de Azufre cuya aplicación final se pretende sea para mediciones en tiempo real, lo cual ayudaría a la predicción de fallas por aislamiento del SF₆ en sistemas eléctricos de potencia.

1.1 Antecedentes

La detección y medición de la concentración de gases específicos es de gran importancia en diversas aplicaciones, algunas aplicaciones requieren que se realice la detección del gas objetivo simplemente por que ese gas en particular podría ser dañino para el ser humano y su sola presencia implica un riesgo. Otras aplicaciones requerirán por ejemplo, que se realice el monitoreo de la concentración de ciertos gases ya que podrían afectar en algún cambio del tipo ambiental. Todas estas detecciones, mediciones y monitoreo de gases tendrán que realizarse por medio de sensores que nos indiquen los niveles o presencia de los gases objetivos. Existe una gran variedad de sensores de gas basados en diferentes fenómenos físicos, desde sensores electroquímicos [1], sensores de estado sólido [6], sensores basados en óxidos metálicos [7], sensores piro eléctricos [8], sensores ópticos [2], opto electrónicos [9] y sensores basados en nano materiales [10], entre otros.

En el caso particular del Hexafluoruro de Azufre, se utilizan equipos de medición y detección de SF₆ los cuales están basados en sistemas mecánicos medidores de presión y densidad así como sistemas ópticos basados en espectroscopía de infrarrojo que miden la pureza y humedad del SF₆ [11].

Los equipos de medición basados en sistemas mecánicos llamados densímetros, generalmente se encuentran instalados en los interruptores de alta tensión y pueden monitorear la presión y densidad del gas aún cuando los interruptores se encuentran energizados, sin embargo estos equipos de medición no pueden aportar información acerca de la condición del SF₆, es decir no nos aportan información acerca del contenido de humedad, pureza o productos de descomposición en el gas. Por otro lado los equipos comerciales basados en espectroscopía de infrarrojo, pueden aportar información acerca de la condición del SF₆ pero la gran mayoría de estos no pueden funcionar cuando los interruptores se encuentren energizados [12]. Esto es de cierta manera una gran desventaja de los equipos comerciales existentes que se utilizan para monitorear el estado o condición del SF₆.

Dadas las condiciones en que se realiza la medición y monitoreo del SF₆ en la práctica, es necesario contar con un instrumento que sea capaz de realizar un monitoreo completo en condiciones de interruptores energizados.

Los sensores optoelectrónicos parecen ser una opción para la medición y monitoreo del SF₆ en tiempo real, pueden diseñarse en base a diferentes arreglos y/o estructuras. En diversas aplicaciones, se han diseñado sensores optoelectrónicos que utilizan en su arreglo un interferómetro Fabry-Perot (FPI) como modulador en sensores de gases no dispersivos [13-14]. La utilización de este dispositivo óptico de alto poder de resolución hace que la detección de gas sea mucho más precisa. En trabajos previos podemos encontrar por ejemplo la utilización del FPI para sensar CO, CO₂ o Acetileno [3], obteniendo resultados con alta calidad de sensado. En dichos trabajos se utiliza la configuración básica del FPI (con 2 espejos) lo cual podría implicar una desventaja en situaciones prácticas.

La desventaja de utilizar la configuración básica del FPI reside en la separación de los espejos ya que el interferómetro se diseña con una distancia de separación específica entre ellos para que este pueda sensar el gas objetivo. Si dicha separación entre espejos llegara a descalibrarse, el FPI ya no detectará el gas objetivo debido a la mala alineación y descalibración del sistema. Por lo tanto la separación entre espejos es un factor determinante en el diseño para la detección del gas objetivo.

Trabajos previamente realizados en DICIS [15-18], muestran que obleas de materiales tales como Germanio, Silicio, Arseniuro de Galio, bien pueden comportarse como un FPI en zonas como el cercano y mediano infrarrojo, al tener ahora esta nueva configuración del FPI se tiene una nueva opción para la implementación de sensores con FPI como modulador, con la ventaja de tener la separación entre espejos constante y que difícilmente pueda ser descalibrada. En esta configuración cada cara de la oblea funge como uno de los espejos y el propio espesor de la oblea funge como la separación entre ellos.

Para el diseño del FPI es fundamental conocer las características y las bandas de absorción del gas objetivo, en este caso el SF₆.

En las siguientes secciones primeramente se verán las características del gas objetivo para posteriormente describir el arreglo experimental en el que se basa el diseño del FPI que servirá como modulador en un sensor de SF₆.

1.2 Hexafluoruro de Azufre.

El gas hexafluoruro de azufre ha sido utilizado en equipo eléctrico por más de 50 años. Este es un gas casi ideal para utilizarse en equipos de alta y media tensión. Desempeña una excelente combinación eléctrica en cuanto al aislamiento y a la extinción de arco, con buenas propiedades térmicas.

Los equipos eléctricos de media y alta tensión (desde 1 hasta 400 kV) dependen en gran medida principalmente del medio aislante utilizado en ellos, ya que debido a los niveles de voltaje que manejan, deben estar todo el tiempo aislados. Por otro lado, el fenómeno de arco eléctrico ocurrido durante las maniobras de conexión y desconexión de interruptores de potencia debe ser controlado en todas las condiciones.

El gas SF₆ es el medio ideal para resolver estas dos condiciones en dichos equipos, además es químicamente estable, no tóxico ni combustible. Es utilizado a presiones que aseguran que no ocurre licuefacción, para evitar problemas de condensación, gotas, etc. Los dispositivos llenos de SF₆, tales como interruptores de soplo de gas, subestaciones aisladas en gas, barras aisladas, tienen muchas características apropiadas y su aplicación está basada en razones específicas que difieren de un caso a otro [19].

Si el SF₆ está sujeto a altos esfuerzos eléctricos o térmicos momentáneos de arcos u otras descargas eléctricas, ocurre ionización y disociación de moléculas neutras e inertes, seguido de procesos de neutralización y recombinación que producen nuevamente moléculas neutras e inertes de SF₆. Sin embargo una pequeña cantidad de estas moléculas no se recombina y reacciona químicamente formando productos de descomposición. Algunos de estos productos reaccionan con otras sustancias y se vuelven tóxicos, por lo que se necesita tener algunas precauciones en la operación normal del equipo, así como también después de una falla.

Los productos de descomposición son producidos por arcos, cortocircuitos y desconexión de interruptores. Estos productos normalmente son neutralizados con filtros activos. Algunas fallas como descargas parciales o puntos calientes, generan una cantidad muy pequeña de productos de descomposición en comparación con una falla por arcos internos, donde se produce una considerable concentración de estos productos.

1.2.1 Características del SF₆

El SF₆ es uno de los gases menos reactivos. A temperatura ambiente, no ataca a ninguna sustancia con la que tenga contacto. El flúor es el elemento más electronegativo que se conoce. La electronegatividad es la afinidad que tiene un elemento para absorber electrones. El SF₆ puede calentarse hasta 500 °C sin sufrir descomposición, no reacciona con el hidrógeno, cloro, oxígeno, ácidos o álcalis.

El SF₆ tiene excelentes características dieléctricas, debido a que, por el carácter electronegativo de su molécula, tiene la tendencia a capturar electrones libres que forman iones pesados con una baja movilidad. Este mecanismo impide el desarrollo de avalanchas de electrones, que son el primer paso para iniciar una descarga. La tensión no disruptiva del SF₆, bajo condiciones de campo uniforme, es casi 25 veces más alta que la del aire a la misma presión. A presiones mayores de 300 kPa, el SF₆ aísla mejor que el aceite dieléctrico.

El Hexafluoruro de Azufre es también un gran agente intensificador del efecto invernadero si este se libera a la atmosfera, es por eso que el manejo del SF₆ es controlado evitando realizar emisiones.

1.2.2 Medición de la condición del SF₆

Durante la formación y extinción de un arco eléctrico en un interruptor, el SF₆ se ioniza y se recombina para formar de nuevo el gas. Sin embargo, los vapores formados por un arco reaccionan con el Flúor del SF₆, formando gases de descomposición que son muy activos y reaccionan con la humedad en el gas, para formar compuestos altamente tóxicos y

corrosivos. La descomposición de una molécula muy estable de SF₆ comienza si se aplica una temperatura suficientemente alta [20].

El tipo y la concentración de los productos de descomposición generados dependen de muchos parámetros, por ejemplo, de las características de la fuente de descomposición, el diseño del equipo, los materiales utilizados, intensidad y duración del arco, el contenido de humedad, el contenido de impurezas, etc.

Cuando el SF₆ se somete a un arqueo con la presencia de humedad y oxígeno, se forman productos de descomposición tóxicos, los productos de descomposición de SF₆ que se llegan a encontrar son HF, SO₂, S, SO₂F₂, WO₃, SiO₂, CF₄ los cuales se identifican por su olor característico a “huevo podrido”. Cuando se detecte este olor en un equipo fallado, se aconseja cercar el área, utilizar guantes de hule, mascarillas apropiadas con filtro y lentes de seguridad [21].

Los equipos eléctricos que están aislados con SF₆, son prácticamente dependientes del estado del gas, es decir, si las propiedades de aislamiento del gas empiezan a disminuir debido a una degradación del gas o a una simple pérdida de presión de gas debido a una pequeña fuga, el equipo eléctrico puede incurrir en una falla eléctrica por falta de aislamiento lo que puede llevar incluso a la explosión de los equipos [11]. Por esta razón es de suma importancia conocer en qué condiciones se encuentra el gas aislante. Actualmente se cuentan con diversos métodos de pruebas y análisis de SF₆.

Existen equipos analizadores de SF₆ que son utilizados para conocer las propiedades de humedad en el gas y contenido de gases de descomposición del mismo. El método de prueba es relativamente sencillo pues los analizadores de SF₆ están construidos para soportar presiones de hasta 10 bar. En la tabla 1 se muestran los límites permisibles de humedad y productos de descomposición de SF₆ que debe contener una muestra de gas aislante para considerarlo en condiciones de operación [11, 22-23].

Tabla 1. Niveles máximos aceptables para análisis de SF₆.

Impureza	Niveles Máximos Aceptables
Aire / CF ₄	< 5000 ppm
Humedad	< 200 ppm
SO ₂ + SOF ₂	< 12 ppm
HF	< 25 ppm
Productos de descomposición	< 50 ppm
Porcentaje de SF ₆	> 99.5 %

Para el caso en que el SF₆ no está en condiciones de continuar en operación, se cuenta con una alternativa para reutilizar el gas aislante. Así como existen máquinas que eliminan humedad y presencia de gases en aceites aislantes, existe su homólogo para el gas SF₆. En el mercado se puede encontrar una extensa línea de máquinas purificadoras de Hexafluoruro de Azufre.

Este tipo de máquinas se componen de filtros y desecantes por el cual el SF₆ contaminado fluye, la duración del proceso de filtrado y secado del gas aislante dependerá de su nivel de contaminación y humedad. Una vez terminado el proceso de purificación se vuelve a analizar el gas SF₆ corroborando que efectivamente la presencia de humedad en el gas así como los productos de descomposición se encuentran por lo menos dentro de rangos de tolerancia [19].

Una desventaja de este método de análisis del SF₆ es que, aunque es posible realizarlo con el interruptor energizado, es preferible y de hecho se realiza en la mayoría de los casos (salvo emergencias) con los equipos desenergizados, es decir en paros programados por mantenimiento que generalmente se realizan en el mejor de los casos anualmente. Sin

embargo en el lapso de un año es posible que el gas pueda de manera gradual o repentina elevar su contenido de humedad o de productos de descomposición, por lo que un monitoreo en línea y en tiempo real de las condiciones del gas aislante en equipos eléctricos sería trascendental.

Actualmente los únicos dispositivos de monitoreo en línea del gas SF₆ son sensores de presión y densidad que se instalan en los interruptores o subestaciones GIS sin embargo, aunque es importante conocer la presión de gas que existe, lo ideal sería conocer además el estado de la composición del gas, es decir, conocer la cantidad de humedad y gases de descomposición presentes en el equipo energizado en tiempo real.

Existen sistemas de medición basados en microprocesadores que realizan la medición de presión, temperatura, densidad y también porcentaje de SF₆ contenido. Estos dispositivos además pueden calcular la relación de SF₆ que se ha comenzado a perder o bien si se presentan fugas en el sistema. Sin embargo, estos sistemas de medición son demasiado costosos para la implementación, mucho más que los dispositivos medidores de presión que se utilizan comúnmente por lo que la instalación de un sistema de medición en tiempo real es realizada únicamente cuando el usuario así lo solicite [12].

Un sensor de gas Hexafluoruro de Azufre de bajo costo capaz de realizar mediciones en tiempo real de la condición de SF₆ contenido en equipos de alta tensión en operación, aportaría información necesaria para predecir tendencias y fallas por aislamiento en equipos de alta tensión.

1.3 Sensores optoelectrónicos no dispersivos

Los sensores optoelectrónicos de gas reaccionan a los cambios cuando la luz interactúa con las moléculas del gas objetivo. Existen diferentes arreglos utilizados para la de detección de gases basados en espectroscopía como lo son los sensores dispersivos y los no dispersivos, sensores de espectro fotometría, sensores de laser sintonizable y los sensores basados en espectroscopía foto acústica [2].

Los sensores optoelectrónicos de gas del tipo no dispersivos (NDS), se componen de manera general de una fuente de luz, una muestra del gas objetivo (celda con gas), un filtro

y un detector óptico. Esta configuración de sensor utiliza todas las longitudes de onda de la luz proveniente de la fuente, permitiendo que su configuración e implementación sea mas sencilla. Las figura 1 muestra la configuración de un sensor no dispersivo.

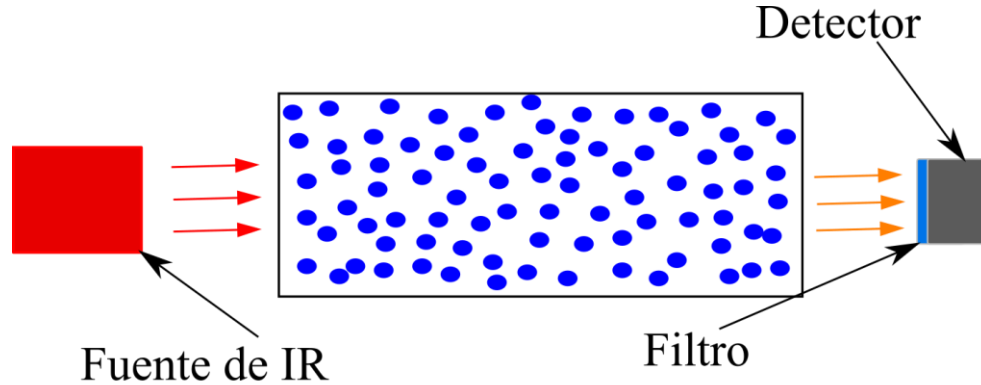


Figura 1. Arreglo de un sensor optoelectrónico de gas tipo no dispersivo.

Las ventajas de utilizar estos sensores son varias, pues además de ser de una configuración simple, requieren poco espacio, no es necesario un mantenimiento constante y pueden operar sin complicaciones en la región del mediano infrarrojo la cual abarca de los 2.5 μm a los 14 μm de longitud de onda [15].

Por las ventajas ya mencionadas, en el presente trabajo se utilizará la configuración de un sensor NDS para realizar el diseño del FPI.

1.3.1 Análisis de un sensor optoelectrónico no dispersivo

La concentración del gas en los sensores optoelectronicos no dispersivos puede ser determinada por medio de los cambios medidos en la transmisión de la luz ya que la cantidad de luz que llega al detector estará en función de la concentración del gas. Si la presión del gas permanece constante y la concentración del gas aumenta, la absorción de la luz será fuerte. La transmisión total de la luz a través de la celda de gas está descrita por la ley de Beer-Lambert, la cual se define como:

$$T(\nu) = e^{-lC\alpha(\nu)} \quad (1)$$

Donde l es la distancia en centímetros que recorre la luz a través de la celda de gas, C es la concentración del gas en moléculas/cm³, $\alpha(\nu)$ es el coeficiente de absorción monocromática (1/molécula-cm⁻²) la cual describe las frecuencias donde las transiciones ocurren (usualmente llamadas posiciones de la línea) y sus intensidades. De acuerdo a la ecuación (1) conforme C incrementa menor será la cantidad de energía que logra atravesar el gas. Estos sensores por lo general usan filtros pasabanda para limitar el rango de frecuencia de operación, generalmente cubren el rango de frecuencias donde ocurren las líneas de transición mas intensas. De esta manera, la transmisión que mide el detector será un valor máximo cuando la concentración del gas sea cero e irá decreciendo conforme la concentración del gas aumente [24].

En este tipo de sensores el filtro pasabanda dejará pasar la zona de frecuencias en las cuales se presentan las absorciones vibracionales del gas objetivo, así el sensor no detectará las absorciones vibracionales de otro gas. En la figura 2 se muestra la simulación de las absorciones vibracionales del CO y del CO₂ y un filtro pasabanda que deja pasar las frecuencias en las que absorbe el CO₂ atenuando las absorciones del CO.

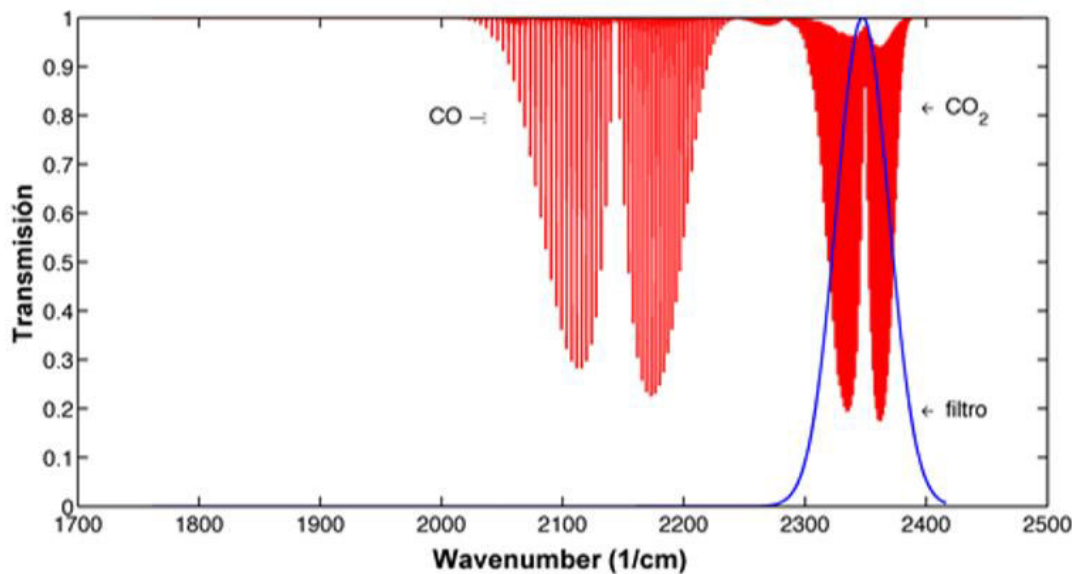


Figura 2. Simulación de las absorciones vibracionales del CO y CO₂ con un filtro pasabanda en la región del CO₂.

De esta manera el espectro de transmisión a través de la celda de gas está dado por:

$$I_T = \int_{\nu_1}^{\nu_2} S(\nu)T(\nu)Fil(\nu)d\nu \quad (2)$$

donde $S(\nu)$ es el perfil espectral de la fuente de luz, $T(\nu)$ es la transmisión de la luz a través de la celda de gas, descrita por la ley de Beer-Lambert (ecuación 1), $Fil(\nu)$ es la respuesta espectral del filtro pasabanda.

Cuando la concentración del gas se incrementa en la celda, las absorciones vibracionales son mas intensas. Así considerando que el gas a sensar está mezclado en el aire y que el aire fluye a través de la celda de gas, la cual se mantiene a presión constante, cuando la concentración del gas se incrementa la transmisión total I_T se reduce. En consecuencia los cambios en I_T son directamente relacionados con la concentración del gas. La principal ventaja que tienen estos arreglos es su diseño óptico que es muy simple. Sin embargo este tipo de sensor puede presentar una limitante en la selectividad dado que la transmisión total es afectada por todas las absorciones que ocurran dentro del rango de frecuencias permitidas por el filtro pasabanda [15].

1.3.2 Modulador FPI en un NDS

La integración de un interferómetro Fabry-Perot que funcione como modulador en un sensor de gas no dispersivo, ayuda en gran manera con el problema de la selectividad mencionado anteriormente. Para ello es necesario realizar el diseño del interferómetro el cual tendrá que hacer coincidir su espectro de transmisión con las líneas de absorción vibracionales del gas objetivo, este mismo podrá modularse en algunos de sus parámetros para complementar su respuesta en el sensor. Se tendrá una respuesta a lo largo del tiempo que será acotada entre los límites máximos y mínimos dados por la transmisión del FPI. En otras palabras, el FPI deberá ser diseñado para que en un punto, su espectro de transmisión coincida exactamente con los picos de absorción vibracionales del gas objetivo y al ser

modulado, su espectro de transmisión se encuentre en un punto totalmente contrario a los picos de absorción vibracionales. De esta manera el FPI estará modulando la respuesta del sensor mejorando la selectividad al sensar el gas objetivo. De esta manera bajo este principio de operación se realizará el diseño del FPI.

1.4 Objetivo del trabajo de tesis

Diseñar y simular un interferómetro Fabry-Perot con una oblea de material semiconductor para ser implementado como modulador en un sensor de gas de Hexafluoruro de Azufre.

1.5 Justificación

Los resultados de este trabajo sentarían las bases para la implementación de un sensor de Hexafluoruro de Azufre que en una etapa final podría realizar mediciones de la condición del gas en tiempo real. Este hecho beneficiaría el desempeño de los sistemas de potencia para revisar tendencias y prevenir fallas por aislamiento en interruptores de potencia y subestaciones aisladas en gas.

1.6 Organización de la tesis

En el capítulo 2 se describen las bases teóricas que implican el diseño del FPI, las cuales abarcan los temas de la interferometría y espectroscopía.

En el capítulo 3 se describe la metodología que se utilizó para realizar el diseño del FPI utilizando una oblea de material semiconductor.

Finalmente en el capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos del diseño propuesto y las conclusiones.

Capítulo II

2. Marco Teórico

En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos que hacen posible el diseño del FPI basado en una oblea de material semiconductor. Esta teoría está basada en la interferometría y la espectroscopía.

2.1 Interferencia

La teoría de interferencia trata, en su mayor parte, de la superposición de campos eléctricos coplanares. Los fenómenos ondulatorios se describen por una ecuación diferencial lineal de segundo orden por lo que puede aplicarse el principio de superposición. Así en el punto donde se superponen dos o más campos ópticos, la intensidad **E** del campo eléctrico resultante es el vector suma de las perturbaciones. Más que las ondas sobre un estanque, los campos en algunas regiones se anularán parcial o completamente los unos con los otros, mientras que en otras posiciones los valles y las crestas se acentuarán en la resultante. Se llegará a una distribución de la irradiancia que generalmente difiere de la simple suma algebraica de las irradiancias de las ondas contribuyentes.

Existen diferentes tipos de interferencia de ondas, los cuales se analizarán en las siguientes secciones [25].

2.1.1 Interferencia de dos ondas

Se tienen dos ondas coplanares polarizadas linealmente de la misma longitud de onda, dadas por:

$$\mathbf{E}_1(\mathbf{r}, t) = E_{01} \cos(\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r} - \omega t + \varepsilon_1) \quad (3)$$

$$\mathbf{E}_2(\mathbf{r}, t) = E_{02} \cos(\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r} - \omega t + \varepsilon_2) \quad (4)$$

donde \mathbf{k}_1 y \mathbf{k}_2 son el vector de propagación de las ondas 1 y 2, respectivamente \mathbf{r} el vector de posición ε_1 y ε_2 la diferencia de fase entre las ondas.

Estas se superponen al punto P como se muestra en la figura 3. Aquí, desde luego, \mathbf{k}_1 , \mathbf{k}_2 , ω , ε_1 y ε_2 son todas constantes. Estas ondas pueden surgir, por ejemplo, de dos fuentes puntuales distantes. El campo resultante es simplemente:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 \quad (5)$$

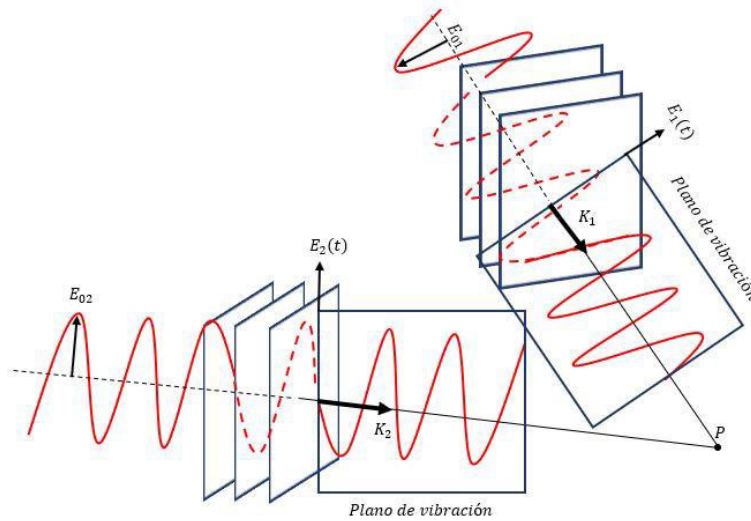


Figura 3. Superposición de dos ondas.

Pero dado que a las frecuencias ópticas los campos oscilan a una frecuencia superior de 10¹⁴ Hz la irradiancia viene a ser la cantidad de interés práctico, ya que es medible directamente. Salvo un factor constante, se puede escribir simplemente la irradiancia como el promedio durante un cierto tiempo del campo total:

$$I = \langle \mathbf{E}^2 \rangle \quad (6)$$

donde $\mathbf{E}^2 = \mathbf{E} \cdot \mathbf{E}$. En consecuencia,

$$\mathbf{E}^2 = (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2) \cdot (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2) = \mathbf{E}_1^2 + \mathbf{E}_2^2 + 2\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2 \quad (7)$$

formando el promedio se obtiene:

$$I = I_1 + I_2 + I_{12} \quad (8)$$

en donde $I_1 = \langle \mathbf{E}_1^2 \rangle$, $I_2 = \langle \mathbf{E}_2^2 \rangle$, $I_{12} = 2\langle \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2 \rangle$, al último término se le conoce como el término de interferencia. Es a causa de este último término por lo que I difiere de la simple suma de las irradiancias de las ondas componentes.

El promedio durante cierto tiempo de alguna función $f(t)$ está dado por:

$$\langle f(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} f(t') dt' \quad (9)$$

Aquí el intervalo de detección de I es mucho mayor que el periodo de oscilación de las ondas. Así, si se llevara a efecto el cálculo indicado para las ondas planas dadas anteriormente, el término de interferencia sería:

$$I_{12} = 2\langle \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2 \rangle = \mathbf{E}_{01} \cdot \mathbf{E}_{02} \cos \delta \quad (10)$$

en donde la diferencia de fase δ está dada por

$$\delta = (\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r}) - (\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r}) + \varepsilon_1 - \varepsilon_2 \quad (11)$$

Todo esto indica que a medida que uno se desplaza de un punto a otro en el espacio, \mathbf{r} varía, así como δ , y en consecuencia tanto I_{12} como I varían igualmente.

La contribución $(\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r}) - (\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r})$ a la diferencia de fase surge de una diferencia de longitud de trayectoria sufrida por las ondas al ir desde las fuentes puntuales hasta P. La contribución $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$ es debida a una diferencia de fase inicial en los emisores, y si es constante como se ha asumido, se dice que las fuentes son coherentes, es decir, si las ondas que se superponen son coherentes, sus campos eléctricos se pueden combinar uno al otro en una forma continuada y serán sumados primero y después elevados al cuadrado para obtener la irradiancia. Si las ondas son incoherentes, los campos individuales, que son efectivamente independientes, serán elevados al cuadrado primero y después estas componentes de las irradiancias se sumarán [25].

2.1.2 Interferómetros por división de frente de onda

Se puede imaginar que una fuente de luz ordinaria se encuentra emitiendo un gran número de trenes de onda casi sinusoidales, no correlacionados, de una duración aproximada de 10^{-8} s. La onda de luz resultante mantiene una fase constante algo menor que este tiempo de coherencia, Δt . Las ondas provenientes de tales fuentes pueden interferir, pero la imagen será sostenida por un tiempo menor que Δt . A medida que las ondas varían de fase rápidamente y al azar la imagen se correrá erráticamente, desvaneciéndose durante el intervalo de detección comparativamente grande. Aunque dos

láseres fijos en fase pueden generar una imagen de interferencia detectable, la aproximación más usual es simplemente separar una onda simple en dos partes coherentes.

En el más amplio sentido, un dispositivo que genera franjas de interferencia se llama interferómetro. La subclase de los interferómetros por separación de frentes de onda se caracteriza por el hecho de que dos segmentos separados de una onda llevan a la superposición después de haber atravesado diferente trayectoria.

Los interferómetros por separación de frentes onda pueden entenderse más fácilmente por el experimento de Young, el cual se ilustra en la figura 4. Las fuentes S, S₁, y S₂ son, pequeños huecos o bien ranuras largas perpendiculares al plano del dibujo. La onda emerge de S incide sobre S₁ y S₂ las cuales sirven a su vez como emisores coherentes de fase. Para cualquier punto distante P no muy retirado del eje central, la diferencia de longitud de trayectoria óptica ($n \approx 1$) es $\overline{S_1P} - \overline{S_2P} = r_1 - r_2$.

Esta es aproximadamente igual a $\overline{S_1A} = a \sin\theta$ o, simplemente, $a\theta$. Puesto que $\tan\theta \approx \theta = y/s$, cuando y es pequeña comparada con s ,

$$r_1 - r_2 = \frac{a}{s}y \quad (12)$$

Las dos ondas que llegan hasta P están en fase e interfieren constructivamente siempre que $r_1 - r_2 = m\lambda_0$, donde $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$. Así los máximos de interferencia ocurren siempre que:

$$y_m = \frac{sm\lambda_0}{a} \quad (13)$$

y el plano de observación se cubre de bandas paralelas oscuras y brillantes que están en sentido perpendicular al plano de la imagen. En realidad, la imagen de interferencia llena la región del espacio entre Σ_a y Σ_0 .

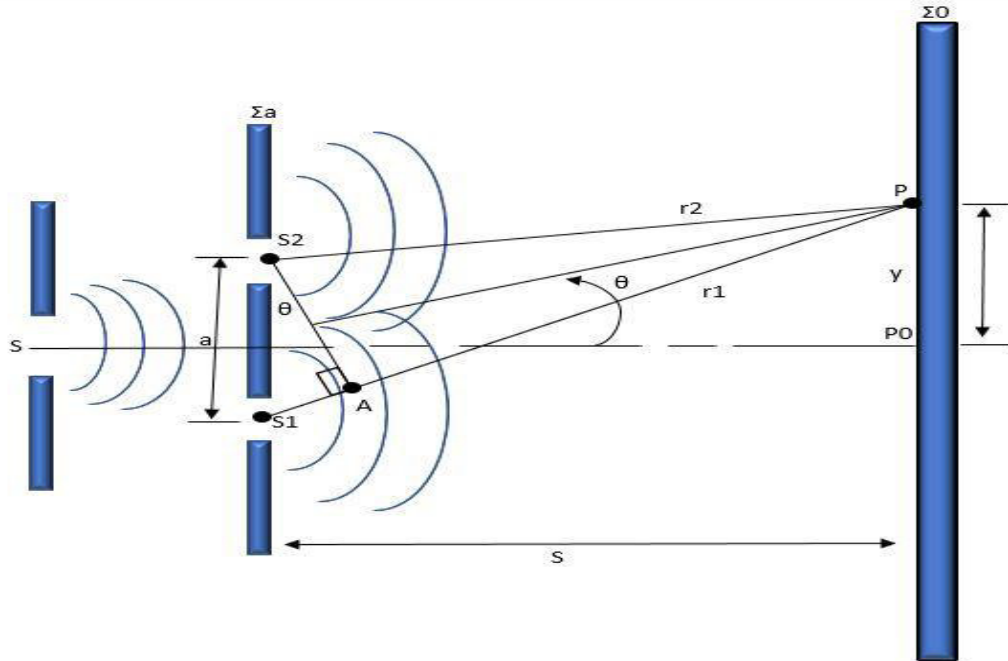


Figura 4. Experimento de Young

2.1.3 Interferómetros por división de amplitud

Los interferómetros basados en división de amplitud, hacen uso de espejos, capaces de separar el haz de luz de tal manera que estos haces resultantes pueden ser manipulados individualmente antes de ser recombinados.

El interferómetro de Michelson (1881) de la figura 5 por ejemplo, es representativo de este grupo numeroso de aparatos y es a su vez uno de los instrumentos ópticos de mayor importancia sin duda alguna desde el punto de vista histórico. Como se muestra, la luz que proviene de una fuente externa incide sobre el partidor de haz y es seccionada en amplitud en dos ondas. Una onda se refleja sobre el espejo E₂, pasa a través del partidor del haz B y continua hacia el detector. Otra onda se refleja primero sobre el espejo E₁ y después sale del partidor del haz y se dirige hacia el detector. La lámina del compensador es idéntica en espesor y orientación a la del partidor del haz. Su función es igualar las longitudes de trayectoria óptica cuando E₁ y E₂ están a la misma distancia de B [26].

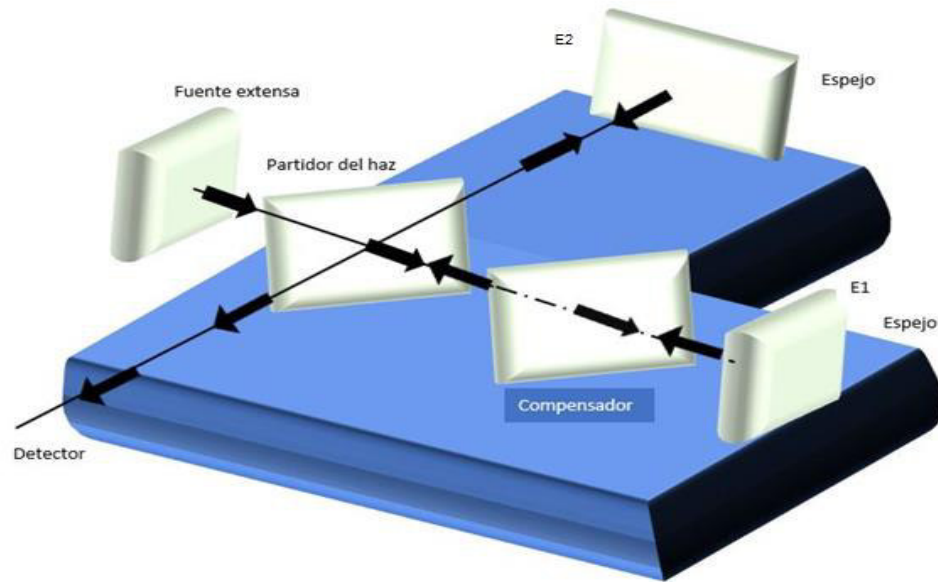


Figura 5. Interferómetro por división de amplitud

2.1.4 Interferencia de haces múltiples

En los ejemplos anteriores, las dos ondas que interferían tenían casi la misma amplitud del campo eléctrico que la primera onda de la cual provenían. Ahora se muestra cómo cortar el frente de onda primario total en dos segmentos, cada uno con una amplitud disminuida.

En la figura 6, la luz de una fuente puntual cuasi-monocromática incide sobre una lámina transparente delgada. Debido a que los coeficientes de reflexión son generalmente pequeños, la demostración se limita a los dos rayos mostrados, cada uno de los cuales sufre solamente una reflexión y se omiten los rayos más débiles reflejados varias veces. Estas ondas, E_{1r} y E_{2r} , tienen casi las mismas amplitudes y se puede considerar que han sido originadas en dos fuentes puntuales coherentes virtuales.

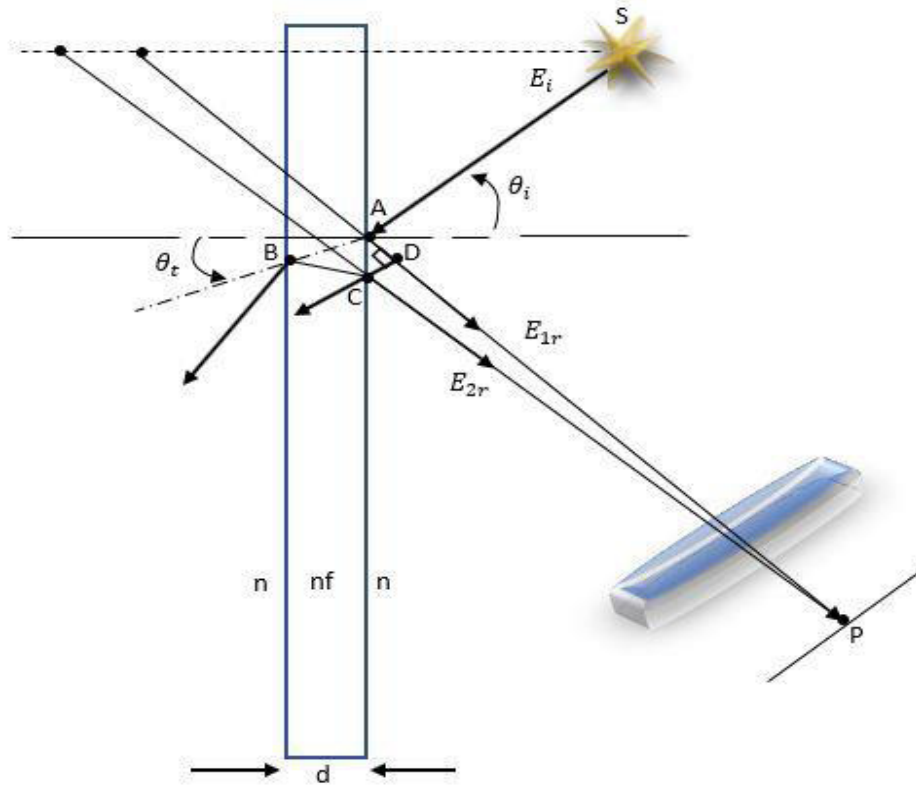


Figura 6. Interferencia de haces múltiples

La diferencia de longitud de trayectoria óptica (D.T.O.) de S a P para estos rayos está dada por

$$\Delta = n_f(\overline{AB} + \overline{BC}) - n(\overline{AD}) \quad (14)$$

o, puesto que $\overline{AB} = \overline{BC} = d/\cos\theta_t$,

$$\Delta = \frac{2n_f d}{\cos\theta_t} - n(\overline{AD}) \quad (15)$$

por la ley de Snell,

$$\overline{AD} = \overline{AC} \sin\theta_i = \overline{AC} \frac{n_f}{n} \sin\theta_t \quad (16)$$

Además, $\overline{AC} = \tan \theta_t$. En consecuencia,

$$\Lambda = \frac{2n_f d}{\cos \theta_t} (1 - \sin^2 \theta_t) = 2n_f d \cos \theta_t \quad (17)$$

Hay un desplazamiento de fase relativo adicional de π radianes entre las ondas, puesto que una es reflejada internamente mientras que la otra lo es externamente. En consecuencia,

$$\delta = k_0 \Lambda \pm \pi = \frac{4\pi n_f}{\lambda_0} d \cos \theta_t \pm \pi \quad (18)$$

o en términos de θ_i ,

$$\delta = \frac{4\pi d}{\lambda_0} (n_f^2 - n^2 \sin^2 \theta_i)^{1/2} \pm \pi \quad (19)$$

Nuevamente se presenta una imagen de interferencia de doble haz. Como δ es constante para todos los valores de θ_i que son los mismos, estas franjas se llaman franjas de igual inclinación. Nuevamente, tomando los dos campos como iguales se tiene

$$I = 4I_0 \cos^2 \delta / 2 \quad (20)$$

y siempre que θ_i sea tal que $\delta = (2m + 1)\pi$ existirá un mínimo. Por otra parte, cuando $\delta = 2m\pi$, la irradiancia será máxima. El número m ($m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$) se llama el número de orden de la franja oscura brillante. Debe observarse que la franja de orden m no necesariamente corresponde a la m -ésima franja contada sobre la pantalla de observación.

Como consecuencia de ser δ independiente de θ_i y no de la localización S , otras fuentes puntuales podrían contribuir a la imagen sin oscurecerla y desde luego, también podría utilizarse una fuente extendida de amplio espectro [26].

2.2 Interferómetro Fabry-Perot

El primer interferómetro de haces múltiples construido por Charles Perot y Alfred Fabry a finales de 1800 es de considerable interés en los tiempos modernos dado que, además de ser un dispositivo espectroscópico con un poder de resolución extremadamente alto, sirve también como cavidad resonante básica para el láser. Este utiliza el principio de división de amplitud, pero a diferencia del Michelson, se analiza considerando la interacción de múltiples haces.

En principio, el instrumento consta de dos superficies planas, paralelas, altamente reflectoras y separadas por una distancia d . La figura 7 muestra un arreglo del interferómetro Fabry-Perot (FPI) en su configuración más simple. Además de esta configuración simple, también se utiliza ampliamente en otras formas.

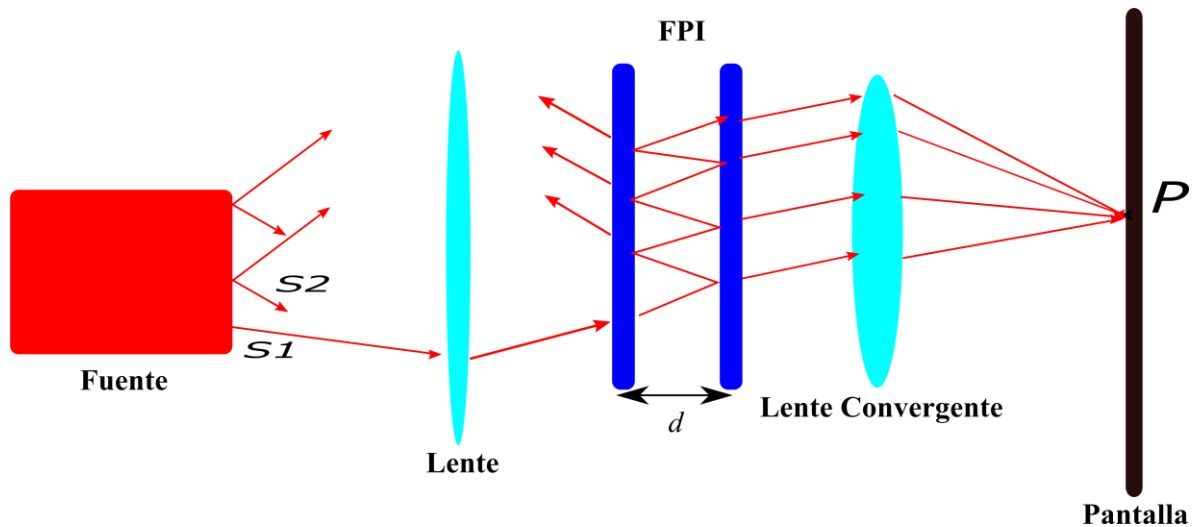


Figura 7. Arreglo básico de un FPI

El FPI de la figura 7 se muestra iluminado por una fuente de amplio espectro. A través del FPI se traza únicamente un rayo emitido desde algún punto S_1 . Entrando por la placa parcialmente plateada, se refleja varias veces dentro del espacio. Los rayos transmitidos son recogidos por una lente y enfocados sobre una pantalla, donde interfieren para formar un punto brillante u oscuro. Considerando este plano de incidencia en concreto que contiene

todos los rayos reflejados. Cualquier otro rayo emitido desde un punto diferente S_2 , paralelo al rayo original y en el mismo plano de incidencia, formará un punto en el mismo punto P sobre la pantalla. Las ondas múltiples generadas en la cavidad y que llegan a P , ya sea de S_1 o de S_2 , son coherentes entre sí. Sin embargo, los rayos que salen de S_1 son totalmente incoherentes con respecto a los de S_2 , de modo que no hay interferencia mutua. La contribución a la irradiancia I_t en P es precisamente la suma de las contribuciones de las dos irradiancias.

Se puede observar que, cuando en un FPI un haz incide, una parte del haz es reflejado y otra parte es transmitido. La parte que fue transmitida a su vez, es reflejada nuevamente y transmitida y así sucesivamente de manera que ocurren múltiples reflexiones internas. Se llamarán r y t a las amplitudes fraccionales reflejada y transmitida, respectivamente y r' y t' el coeficiente de reflexión y el coeficiente de transmisión de amplitudes, respectivamente y tomando en cuenta las relaciones de Stokes:

$$tt' = 1 - r^2 \quad (21)$$

y

$$r' = -r \quad (22)$$

de la última ecuación el signo negativo indica una diferencia de fase de 180° entre las ondas reflejadas interna y externamente.

Analizando dos casos, el primero cuando $\Delta = m\lambda$, en este caso la luz no se refleja y toda la energía incidente será transmitida, pues todos los rayos están en fase excepto el primero, en cambio en el segundo caso cuando $\Delta = (m + 1/2)\lambda$, el primer y el segundo rayo están en fase mientras que todas las demás ondas adyacentes se encuentran desfasadas $\lambda/2$, es decir la segunda está desfasada con la tercera, la tercera con la cuarta y así sucesivamente. El espectro de transmisión del FPI se puede describir con la función de Airy:

$$T_{FPI} = \frac{1}{1 + F \text{sen}^2(\delta/2)} \quad (23)$$

Si llamamos a F el coeficiente de fuerza de modo que

$$F = \left(\frac{2r}{1 - r^2} \right)^2 \quad (24)$$

y a R la reflectancia, donde

$$R = r^2 \quad (25)$$

Sustituyendo tenemos

$$F = \frac{4R}{(1 - R)^2} \quad (26)$$

De acuerdo a la ecuación y al análisis realizado en el segundo caso tenemos que

$$\delta = \frac{4\pi n d \cos\theta}{\lambda} \quad (27)$$

Finalmente, si sustituimos las ecuaciones y consideramos que $\nu = 1/\lambda$ (frecuencia en wavenumbers o números de onda) [15].

$$T_{FPI} = \frac{1}{1 + \frac{4R}{(1 - R)^2} \text{sen}^2 \left(\frac{4\pi n d \cos(\theta) \nu}{2} \right)} \quad (28)$$

La figura 8 muestra el espectro de transmisión de un FPI cuando $R = 0.8$, $\theta = 0^\circ$, $n = 4.00$ y $d = 15\mu\text{m}$.

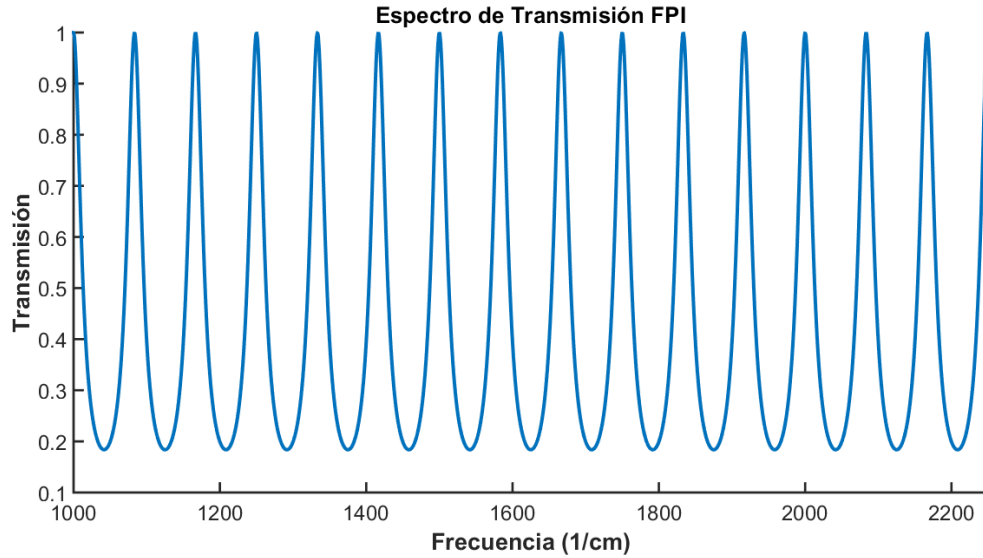


Figura 8. Espectro de Transmisión de un FPI

2.2.1 Características del FPI

El FPI tiene algunas características importantes como son: la separación entre dos picos consecutivos, conocido como rango espectral libre (FSR por su siglas en inglés), el contraste (ϑ), la fineza (\mathcal{F}) y FWHM (Full Width at Half Maximum) [26].

El FSR es inversamente proporcional al espesor óptico, se puede decir que es el periodo el FPI.

$$FSR = \frac{1}{2\pi nd} \quad (29)$$

La razón entre la transmisión máxima y mínima transmitida representa el factor de contraste ϑ , como se puede ver de la ecuación (30) depende directamente del coeficiente de reflectividad de los espejos.

$$\vartheta = 1 + F = \left(\frac{1 + R}{1 - R} \right)^2 \quad (30)$$

El FWHM es la anchura de la franja definida como la distancia medida entre los dos puntos que estén a media altura del punto de transmisión máximo. La ecuación (31) es una aproximación de FWHM al analizar ciertas características de la ecuación (28).

$$FWHM = \frac{4}{F} \quad (31)$$

Finalmente la fineza está definida como la relación de la separación de las franjas adyacentes y el FWHM, la ecuación (32) muestra que también está en función de la reflectividad de los espejos.

$$\mathcal{F} = \frac{FSR}{FWHM} = \frac{\pi\sqrt{F}}{2} = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R} \quad (32)$$

Al hacer variar los diferentes parámetros del FPI (Reflectividad, cavidad óptica y ángulo de incidencia) se verán afectadas las características del mismo (FSR, FWHM, θ , \mathcal{F}) y por consiguiente, el espectro de transmisión será diferente para cada caso en particular. Se analizarán los efectos que ocurren al variar dichos parámetros.

2.2.1.1 Efectos al variar la Reflectividad

La gran mayoría de las características del FPI dependen del valor de reflectividad de los espejos, si se analizan las ecuaciones (29) a (32) se puede deducir que al variar la reflectividad se verán afectados en magnitud los valores de fineza, FWHM y contraste, mientras que el FSR no se ve afectado [15].

La figura 9 muestra una simulación del espectro de un FPI en el cual se han variado diferentes valores de reflectividad y para el cual se supone un valor de índice de refracción de 4.0, un valor de separación entre placas de 15 μm y un valor de ángulo de incidencia de 0°.

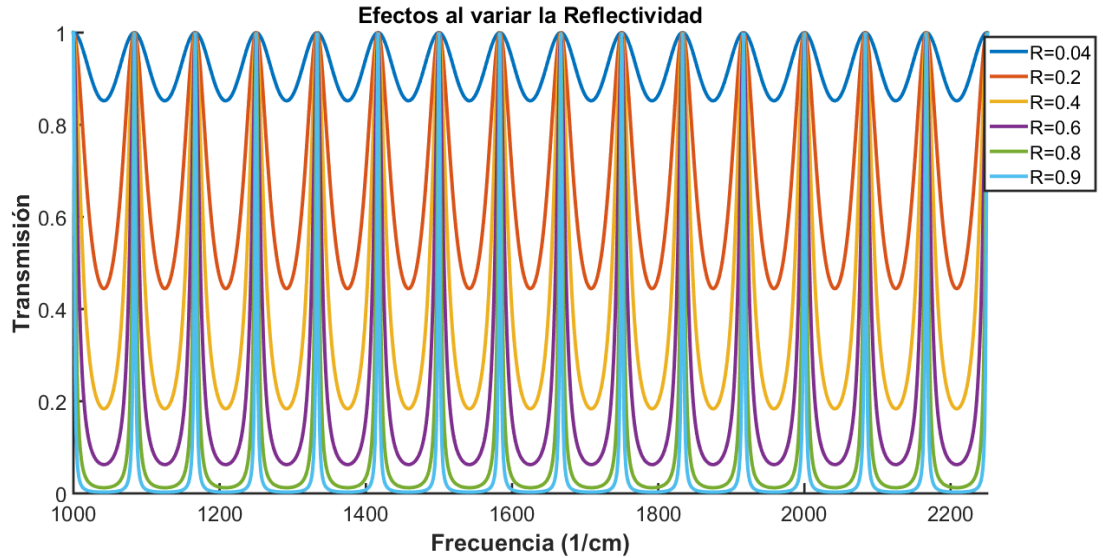


Figura 9. Efectos al variar la reflectividad de un FPI

En una aplicación real, el cambio de reflectividad de los espejos sugiere la adición de una o varias películas delgadas, estas pueden aumentar o disminuir la reflectividad de la cavidad óptica en ciertas frecuencias. Debido a que el índice de refracción de cada material está relacionado con la reflectividad, se deberá tener en consideración este hecho cuando se pretendan realizar combinaciones de sustratos y materiales en el diseño de un FPI.

2.2.1.2 Efectos al variar la cavidad óptica

A diferencia del caso anterior, cuando uno de los dos parámetros que definen la cavidad óptica (nd) es modificado, el FSR automáticamente se verá afectado en magnitud. En la figura 10 se muestran los efectos al cambiar la separación entre espejos con valores de 7, 15 y 23 μm . Se consideran valores de $R = 0.8$, $n = 4.0$ y $\theta = 0^\circ$.

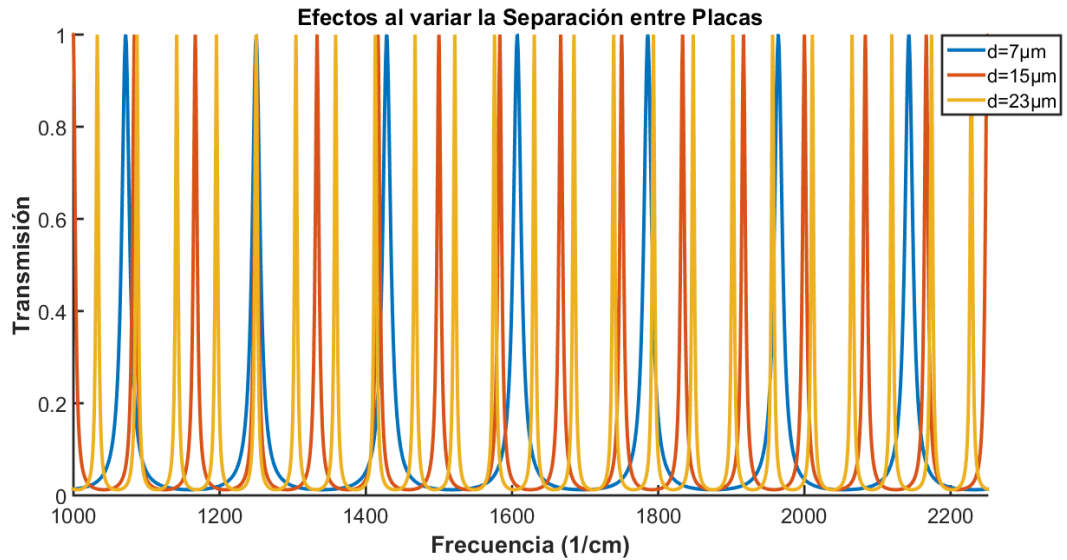


Figura 10. Efectos al variar la separación entre placas de un FPI.

Por otro lado, se observa un comportamiento muy diferente al modificar el índice de refracción ya que la reflectividad depende del índice de refracción del o los materiales involucrados. En la figura 11 se muestran los efectos al variar el índice de refracción en valores 1.33, 3.42 y 4.00.

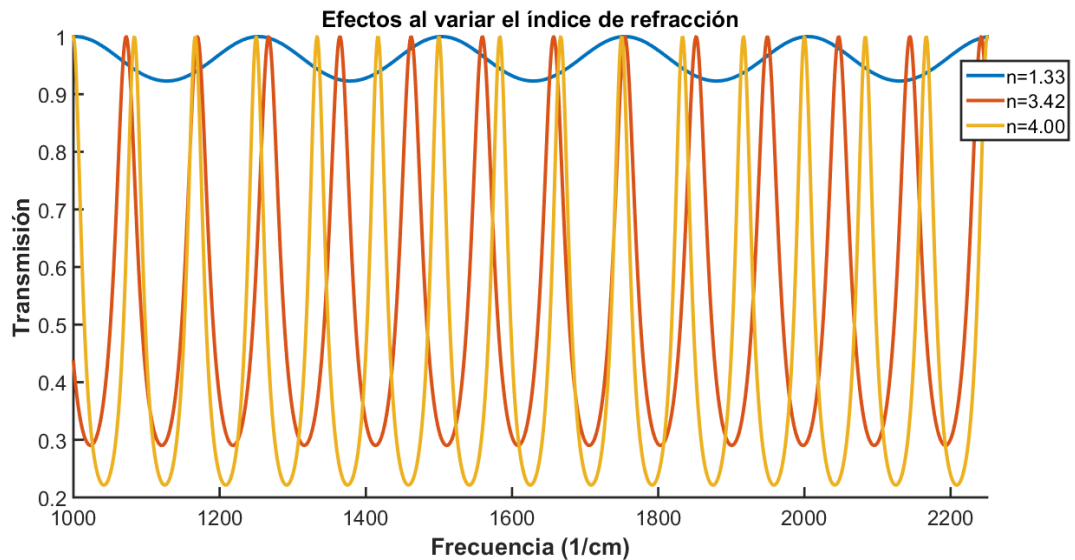


Figura 11. Efectos al variar el índice de refracción en un FPI.

2.2.1.3 Efectos al variar el ángulo de incidencia

Finalmente en la figura 12 se muestran los efectos al variar el ángulo de incidencia. Se puede observar en la figura que existe un corrimiento a la derecha en las franjas del FPI. Generalmente la modulación de un FPI se realiza con la modificación del ángulo de incidencia de la luz o en algunas otras ocasiones, se realiza variando la separación entre espejos. En este caso el FPI se diseñará en base a una oblea de material semiconductor, donde no se podrá cambiar la separación entre espejos, por lo que se hará la modulación por cambio en el ángulo de incidencia de la luz.

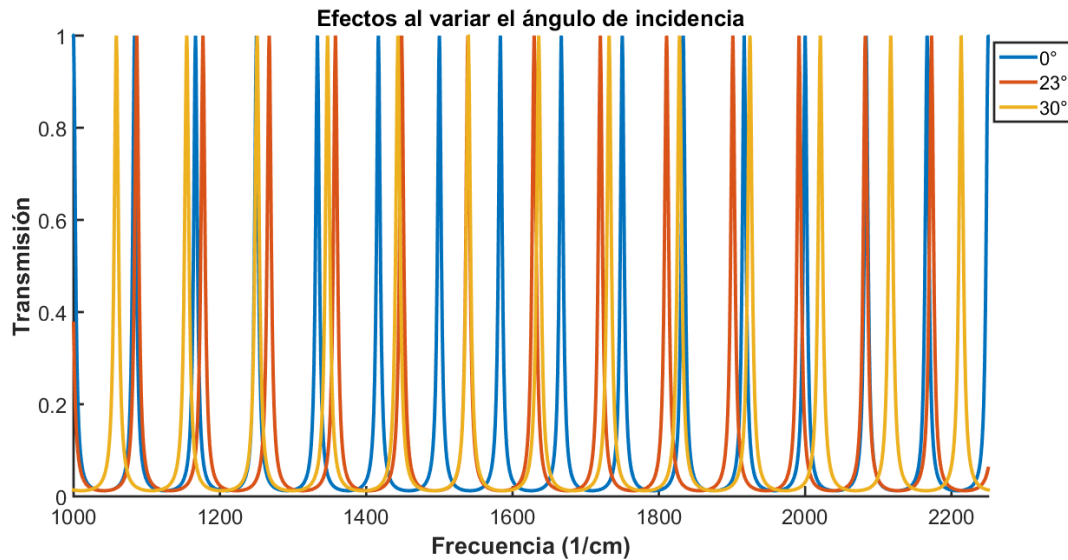


Figura 12. Efectos al variar el ángulo de incidencia

Como se mencionó, al utilizar una oblea de material semiconductor como FPI, las caras de esta funcionarán como los espejos reflejantes y el espesor de la misma será el equivalente a la cavidad óptica, por lo cual se deberá conocer el comportamiento de películas delgadas ante un espectro óptico [27].

2.3 Espectroscopía

La espectroscopía es el estudio de la interacción de la materia y la radiación electromagnética. La luz interacciona con la materia de tres maneras, puede ser reflejada, puede ser transmitida o puede ser absorbida. Se ignorarán los efectos de dispersión los cuales ocurren en menos de 1 en 10,000 fotones. De hecho la dispersión es un proceso de absorción-emisión por lo que se tiene otra razón más para ignorar dicho proceso.

La interacción de la luz con la materia podría expresarse matemáticamente de la siguiente manera

$$I_0 = I_r + I_t + I_a \quad (33)$$

donde I_0 representa la intensidad original de la luz y esta puede ser separada solamente en tres partes: I_r intensidad reflejada, I_t intensidad transmitida e I_a intensidad absorbida. Los tres procesos suelen ocurrir simultáneamente hasta cierto punto, así que aunque podemos discutirlos de forma independiente, debemos de tener en cuenta que los tres procesos tienen lugar al mismo tiempo [28].

2.3.1 Reflexión

Para una definición simple de reflexión podemos decir que esta ocurre cuando una onda de luz rebota en la superficie. Aunque el proceso global puede ser interpretado como la completa absorción de un fotón y luego la reemisión de un fotón de exactamente la misma longitud de onda y reflejado a un ángulo igual al ángulo incidente, es más fácil pensar en la reflexión simplemente como el fotón rebotando en la superficie. Sin embargo, la reflexión no es tan simple. Aunque el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión y la longitud de onda de la luz no es afectada, las propiedades de polarización del haz reflejado pueden ser modificadas.

La luz no polarizada puede considerarse una combinación aleatoria de luz polarizada perpendicular al plano del reflejo superficie (luz s-polarizada) y luz polarizada paralela al plano del reflejo de la superficie (luz p-polarizada). Entonces, ya que una superficie tiene

diferentes reflectividades por las dos polarizaciones de la luz, el haz reflejado puede tener diferentes propiedades de polarización respecto al incidente. Esta propiedad es especialmente importante para las superficies que también pueden transmitir longitudes de onda en particular.

2.3.2 Transmisión

Todos los materiales transmiten una porción del espectro electromagnético. Muchos materiales son completamente transparentes a los rayos X, por ejemplo, mientras que otros materiales absorben luz infrarroja. Aunque la luz viaja a la velocidad característica a través del vacío ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$), la luz viaja a diferentes velocidades en diferentes medios. Por ejemplo, la luz viaja aproximadamente a $2.25 \times 10^8 \text{ m/s}$ en agua, mucho más lento que en el vacío.

Como consecuencia, cuando la luz entra al nuevo medio con un ángulo de incidencia, su camino se “dobla” un poco; este fenómeno se conoce como refracción, fue descubierto (y aparentemente medido) por el antiguo filósofo griego Ptolomeo y fue cuantificado en 1621 por Snell a través de su conocida ley:

$$n_i \sin \theta = n_r \sin \phi \quad (34)$$

Donde θ es el ángulo de incidencia y ϕ es el ángulo de salida de la luz. El índice de refracción n es definido como el cociente de la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en algún medio, bajo estas condiciones el índice de refracción siempre será >1 :

$$n = \frac{c}{v} \quad (35)$$

Donde v es la velocidad de la luz en algún medio y c es la velocidad de la luz en el vacío. Cuando la luz pasa de un medio a otro, por ejemplo de aire a agua, cada fase tiene su propio índice de refracción.

Si se reorganiza la ley de Snell y se supone que la luz incidente está en el medio con mayor índice de refracción, para cualquiera de los dos medios dados hay un ángulo de incidencia en el que el ángulo de reflexión θ se convierte en 90°. En este punto la luz no se transmite al medio sino que pasa paralela a la superficie, y los ángulos de incidencia más grandes simplemente se reflejan fuera de la superficie del medio “transmisor”. Este ángulo θ_c se llama ángulo crítico y viene dado por la expresión (36):

$$\theta_c = \text{sen}^{-1} \frac{n_r}{n_i} \quad (36)$$

El ángulo crítico es independiente de la longitud de onda y la polarización (aunque los índices de refracción pueden no serlo). En ángulos superiores al crítico la luz no se transmite; se refleja desde la superficie. Los rayos de luz siempre son refractados cada vez que pasan de un medio a otro. El efecto de refracción es mas evidente cuando la interface entre el medio es curva.

2.3.2.1 Transmitancia

La transmitancia se define como la cantidad de energía que atraviesa un cuerpo en determinada cantidad de tiempo. La transmitancia óptica se refiere a la cantidad de luz que atraviesa un cuerpo, en una determinada longitud de onda. El valor de la transmitancia óptica de un objeto se puede determinar según la siguiente expresión:

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (37)$$

Donde I es la cantidad de luz transmitida e I_0 es la cantidad total de luz incidente. La transmitancia de una muestra normalmente está dada porcentualmente, definida como:

$$T = \frac{I}{I_0} \cdot 100\% \quad (38)$$

2.3.3 Absorción

En ciertas longitudes de onda, un medio de transmisión normal absorberá la luz. En tal caso, el fotón es "destruido" y su energía se convierte en un proceso atómico o molecular, un electrón cambia la órbita, una molécula vibra o gira de manera diferente, o puede existir algún otro efecto.

Por lo general, la longitud de onda de la luz absorbida es característica de la especie absorbente. Aquí es donde radica el verdadero poder de la espectroscopia, pues tiene la capacidad de diferenciar entre diferentes formas de materia porque cada uno tiene un espectro único de luz absorbida. Para el más simple proceso espectroscópico, dos diferentes niveles de energía son involucrados de tal manera que la diferencia entre sus niveles, ΔE , está relacionado a la frecuencia de la luz absorbida por la condición de frecuencia de Bohr:

$$E = h\nu \quad (39)$$

Donde h es la constante de Planck ($6.62607015 \times 10^{-34} \text{ kg.m}^2/\text{s}$) y ν es la frecuencia de la luz absorbida. La expresión básica que relaciona la intensidad de la luz absorbida con el coeficiente de absorción se conoce como la ley de Beer-Lambert [28]:

$$\ln \frac{I_0}{I_a} = \alpha c l \quad (40)$$

Donde I_0 es la intensidad de luz original, I_a es la intensidad de la luz después de pasar a través del medio absorbente, c es la concentración del medio absorbente, l es la longitud del medio absorbente y α son los coeficientes de absorción monocromática de gas objetivo. La ley de Beer-Lambert forma la base de gran parte de la espectroscopía [28].

2.3.3.1 Absorbancia

Cuando un haz de luz incide sobre un cuerpo traslúcido, una parte de esta luz es absorbida por dicho cuerpo y el haz de luz restante atraviesa a este. A mayor cantidad de luz absorbida, mayor será la absorbancia del cuerpo, y menor cantidad de luz será transmitida por dicho cuerpo. Como se ve la absorbancia y la transmitancia son dos

aspectos del mismo fenómeno. La absorbancia, a una determinada longitud de onda, se define como:

$$A_{\lambda} = -\log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (41)$$

Donde I es la intensidad de la luz que pasa por la muestra e I_0 es la intensidad de luz incidente.

La absorbancia y transmitancia pueden relacionarse de la siguiente manera:

$$A_{\lambda} = -\log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right) = -\log_{10} T \quad (42)$$

O

$$A_{\lambda} = 2 - \log_{10} T\% \quad (43)$$

El términos transmisión y absorción se refieren a procesos físicos de la luz pasando por una muestra, los términos transmitancia y absorbancia se refieren a cantidades matemáticas, las cuales, por su gran exactitud, son ampliamente usadas en múltiples aplicaciones para detección de sustancias, sensores ópticos y caracterización de materiales.

Capítulo III

3. Metodología

En el presente capítulo se muestra la metodología que se siguió para realizar el diseño del interferómetro Fabry-Perot, basado en una oblea de material semiconductor. El primer paso es obtener las bandas de absorción del gas objetivo y determinar bajo que banda se diseñará el FPI. Después se realizan simulaciones en Matlab del comportamiento de cada uno de los interferómetros diseñados así como del comportamiento del sistema completo, donde el FPI diseñado funciona como un modulador en un sensor no dispersivo para detectar SF₆.

3.1 Líneas de absorción vibracionales

Los niveles sub-atómicos de la materia en condiciones normales sugieren cierto orden y características determinadas para cada sustancia, cuerpo o elemento existente, en condiciones normales. Cuando la materia se somete a algún proceso determinado tal como aplicación de voltaje o corriente eléctrica, elevación de temperatura etc., los niveles sub-atómicos de esta, cambiarán y ese orden mencionado anteriormente se verá alterado.

Para el caso particular de este trabajo, se requiere conocer el comportamiento del gas dieléctrico Hexafluoruro de Azufre cuando está expuesto al espectro electromagnético. El SF₆ presentará ciertas zonas de absorción en alguna parte específica del espectro electromagnético, dichas zonas de absorción son sus bandas de absorción vibracionales las cuales serán únicas para este gas y lo definirán como tal. Para cada sustancia existen específicas líneas de absorción vibracionales.

3.1.1 Absorciones vibracionales del SF₆

Una de las partes fundamentales del diseño del FPI es conocer el comportamiento óptico del gas objetivo, es decir, conocer en qué parte del espectro electromagnético tiene sus bandas de absorción. El Hexafluoruro de Azufre tiene varias bandas de absorción las cuales son mostradas en la Tabla 2, también se muestran las zonas de absorción vibracional de gases productos de descomposición del SF₆. Los cuales también son importantes analizar pues la presencia de estos gases, como se mencionó en el capítulo 1, modifican el comportamiento y desempeño del SF₆. El presente trabajo únicamente está enfocado en la detección del SF₆ en su estado puro, sin embargo es evidente que si se requiere saber la cantidad existente de alguno de estos gases en una muestra de SF₆, se tendría que realizar un sensor específico para cada gas.

Tabla 2. Bandas de Absorción vibracionales del SF₆ y sus productos de descomposición.

Gas	Absorción máxima en wavenumbers (cm ⁻¹)
SF ₆	610, 860, 950, 1260, 1560
SO ₂	494, 497, 500, 506
SOF ₂	530, 808
SO ₂ F ₂	539, 544, 552
SOF ₄	570, 752
SF ₄	532, 730
CF ₄	1283, 2186
HF	3644, 3693

Como se mencionó, el presente trabajo únicamente se enfocará en detectar SF₆ puro y la presencia de gases de descomposición se podrá saber en base a la pureza o concentración detectada en la muestra de SF₆. Al basarnos en la Tabla 2 podemos saber que una muestra de Hexafluoruro de Azufre 100% puro tendrá zonas de absorción vibracionales en 610 y 1260 wavenumbers, por nombrar algunas. Si la muestra de SF₆ contiene otros gases, entonces tendrá absorciones en diferentes zonas o bien, estas absorciones serán menos marcadas.

Para poder visualizar las bandas de absorción vibracionales del SF₆, se realizaron gráficas utilizando datos obtenidos al realizar mediciones reales de una muestra de SF₆ en estado puro así como utilizando los datos proporcionados por la base de datos HITRAN.

La base de datos HITRAN (High Resolution Transmisión) es una compilación de datos y parámetros espectroscópicos los cuales aportan información acerca del comportamiento de la transmisión y emisión de la luz en medios gaseosos ya sea en la atmosfera o en ambientes de laboratorio. HITRAN es el estándar mundial para calcular o simular la transmisión molecular atmosférica y la radiación desde la zona de microondas hasta la región del ultra violeta.

HITRAN se encuentra vigente desde el año 1960 cuando fue compilada por primera vez por los laboratorios de investigación de la fuerza aérea de Cambridge [29].

La figura 13 muestra una simulación del espectro de absorción del SF₆, esta simulación se realizó con los datos tomados de la base de datos HITRAN, los cuales solo muestran únicamente una banda de absorción muy marcada entre 1200 y 1300 wavenumbers. Conocidos los datos presentados en la tabla 2, se esperaría poder visualizar mas zonas de absorción, sin embargo HITRAN únicamente proporciona los datos mostrados en la figura 13 para el caso del SF₆, pues no hay mucha información sobre sus otras bandas.

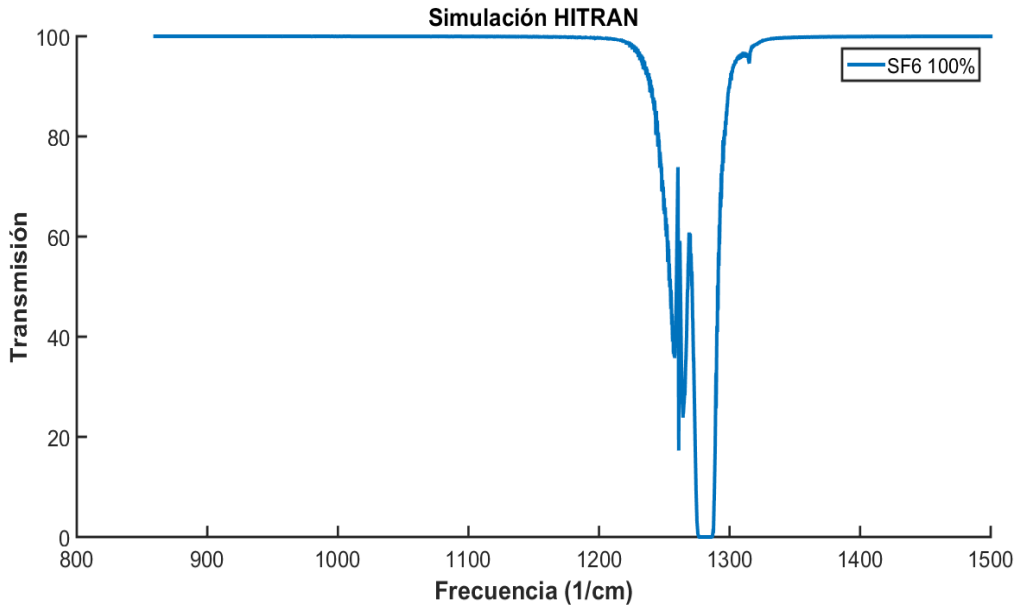


Figura 13. Espectro de absorción del SF₆ basado en datos de HITRAN

Al no poder visualizar con los datos de HITRAN todas las zonas de absorción que la literatura menciona, se realizaron distintas mediciones de muestras de SF₆ en estado puro utilizando diferentes instrumentos FTIR (Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier) en diferentes lugares.

La primer medición se realizó en la sede Yuriria de la División de Ingenierías Campus Irapuato Salamanca de la Universidad de Guanajuato. Se utilizó una celda de cristal de 5 cm de longitud, especial para realizar mediciones de gases en laboratorio. La figura 14 muestra una imagen de la celda utilizada.

Los resultados de las primeras mediciones realizadas se muestran en la figura 15, donde se puede observar la presencia de varias bandas de absorción del SF₆ coincidiendo con los datos teóricos.



Figura 14. Celda para realizar mediciones de gases en laboratorio.

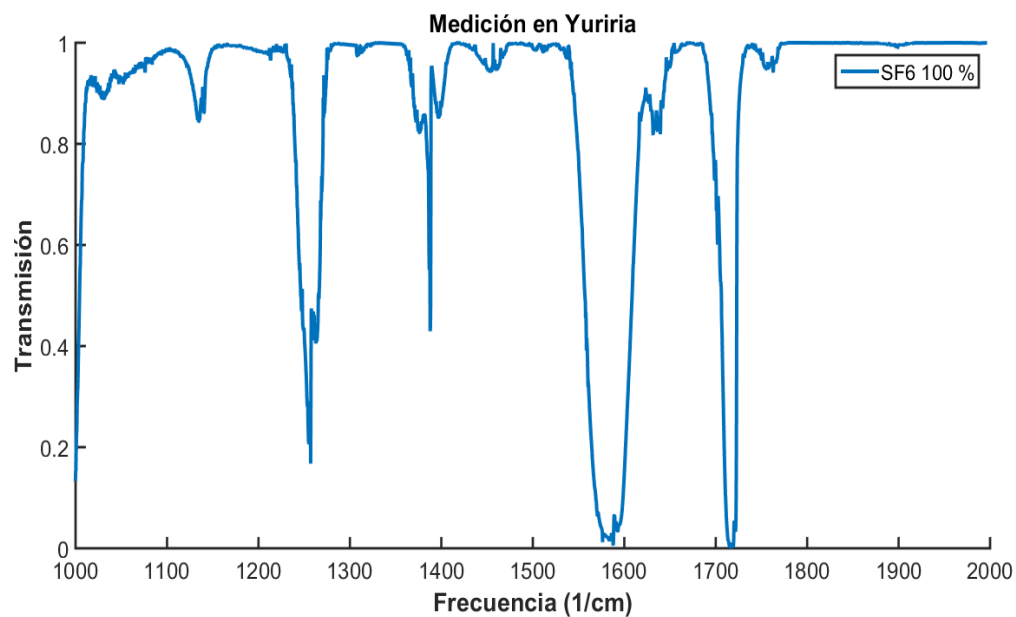


Figura 15. Espectro de transmisión de SF₆ al 100%.

En esta primer medición se pudieron observar cuatro bandas de absorción por arriba de los 1200 wavenumbers. En la zona límite de los 1000 wavenumbers se puede apreciar un decaimiento hasta cero en transmisión, esto no es un indicativo de una zona de absorción

sino una acción de filtrado ya que la celda utilizada para la medición utilizaba ventanas con una capa de Fluoruro de Calcio (CaF₂).

El CaF₂ actúa como filtro en la zona del infrarrojo precisamente en los 1000 wavenumbers razón por la cual al utilizar dicha celda solo se podrían observar las zonas de absorción superiores a dicho valor.

También se realizaron mediciones adicionales agregando aire a la celda de gas para obtener una mezcla y disminuir la concentración del SF₆ y así corroborar que se cumpla con la ley de Beer-Lambert (sección 1.3.1), la cual señala que las bandas o picos de absorción serán menos intensos conforme disminuya la concentración de SF₆. La figura 16 muestra el espectro del SF₆ al combinarse con aire dentro de la celda y así obtener una concentración aproximada del 60%. Se pueden observar diferencias en forma y tamaño de las zonas de absorción así como la aparición de pequeños picos de absorción a partir de los 1300 wavenumbers.

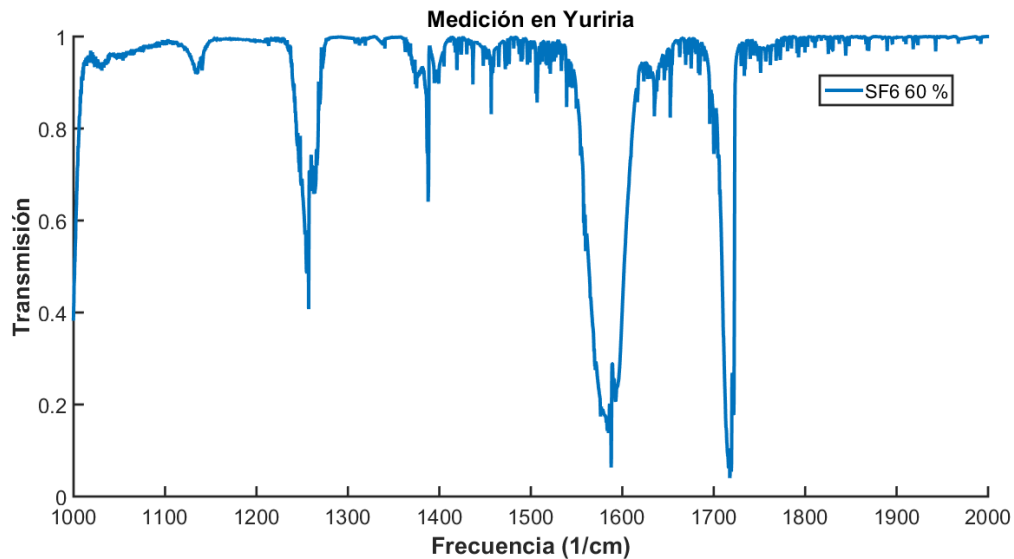


Figura 16. Espectro de transmisión de SF₆ al 60% de concentración.

Se realizó una medición llevando la concentración del SF₆ en la celda al 20%, la figura 17 muestra el espectro del SF₆. Se puede apreciar un cambio drástico en la forma y tamaño de las zonas de absorción así como el crecimiento y aparición de más picos de absorción a partir de los 1300 wavenumbers. Cabe señalar que estos picos de absorción no son debidos al Hexafluoruro de Azufre sino a la combinación del aire introducido. Finalmente la figura 18 muestra una comparativa con las tres concentraciones analizadas, donde se corrobora la ecuación 1 y se observa como las bandas de absorción se atenúan al disminuir la concentración del gas. En la figura 18 se pueden apreciar a detalle los cambios ocurridos en el espectro de absorción del SF₆ al modificar la concentración del gas y manteniendo una presión constante dentro de la celda. Así mismo se nota la intensidad de los picos de absorción en la zona de 1400 a 1800 wavenumbers, producto de la combinación del SF₆ con el aire suministrado a la celda.

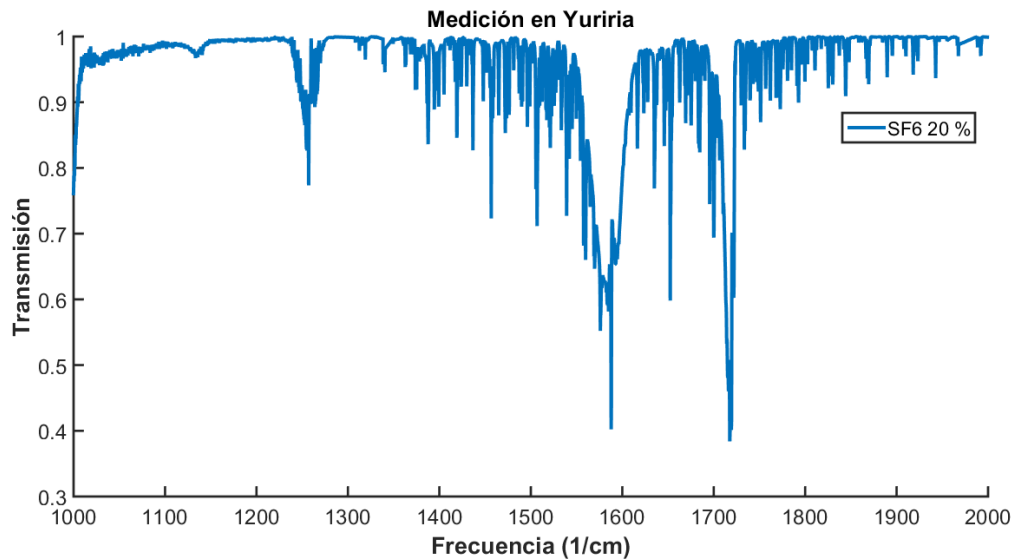


Figura 17. Espectro de transmisión del SF₆ al 20% de concentración.

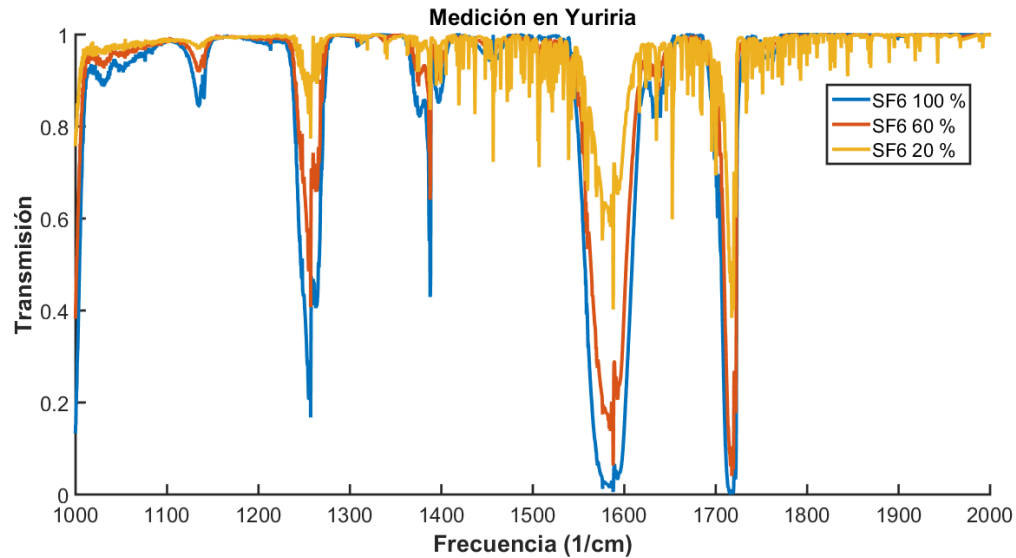


Figura 18. Espectro del SF₆ a diferentes concentraciones.

Una segunda serie de mediciones se realizaron en el Centro de Investigaciones en Óptica en la ciudad de León, Guanajuato. Durante estas mediciones se utilizó la misma celda de gas y SF₆ proveniente del mismo tanque de la muestra analizada en la ciudad de Yuriria, Guanajuato. Se utilizó un FTIR con mayor resolución, esto debido a que se quería verificar si era posible observar los picos de absorción de alguna de las bandas del SF₆. La figura 19 muestra el espectro de absorción del SF₆ al 100% obtenido durante estas mediciones en la ciudad de León, Guanajuato. Comparando la figura 19 con la figura 15, las cuales corresponden a una medición de SF₆ en las mismas condiciones pero con instrumentos FTIR diferentes, se puede apreciar una gran similitud entre ambas mostrando las mismas bandas de absorción y no se pudo observar picos de absorción del gas esto debido a que se necesita una resolución mayor a 0.002 cm⁻¹ [30].

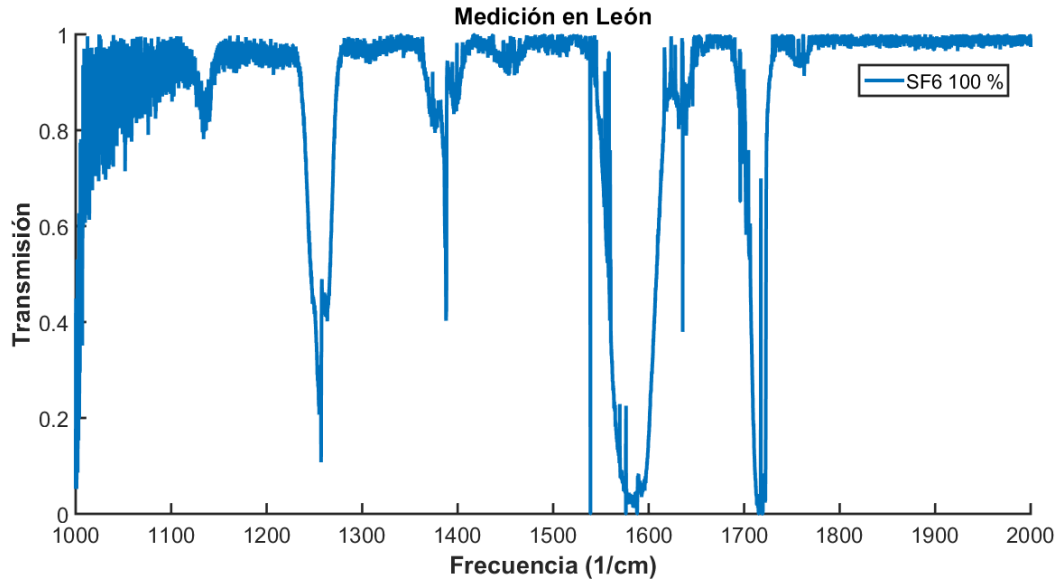


Figura 19. Espectro de absorción de SF₆ al 100 % medido en el CIO.

La figura 20 muestra el espectro de absorción del SF₆ después de mezclarlo con aire y tener una concentración del gas objetivo del 60%. De igual manera, se puede apreciar una gran similitud entre los espectros de absorción del SF₆ mostrados en las figuras 16 y 20 ya que las absorciones del gas objetivo disminuyen y aparecen zonas de absorción a partir de los 1300 wavenumbers, esto debido a la mezcla de aire.

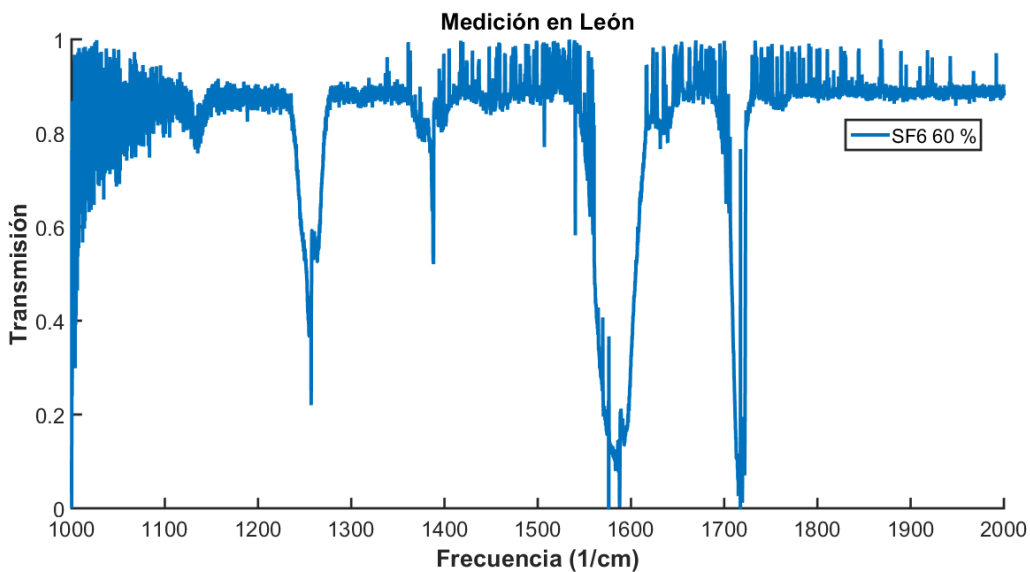


Figura 20. Espectro de absorción de SF₆ al 60 % medido en el CIO

Finalmente en la locación del CIO en León Gto, se realizó la medición del SF₆ con una concentración del 20%, este espectro de absorción se aprecia en la figura 21, así mismo se realizó la comparación de los tres espectros obtenidos en una sola figura lo cual se representa en la figura 22.

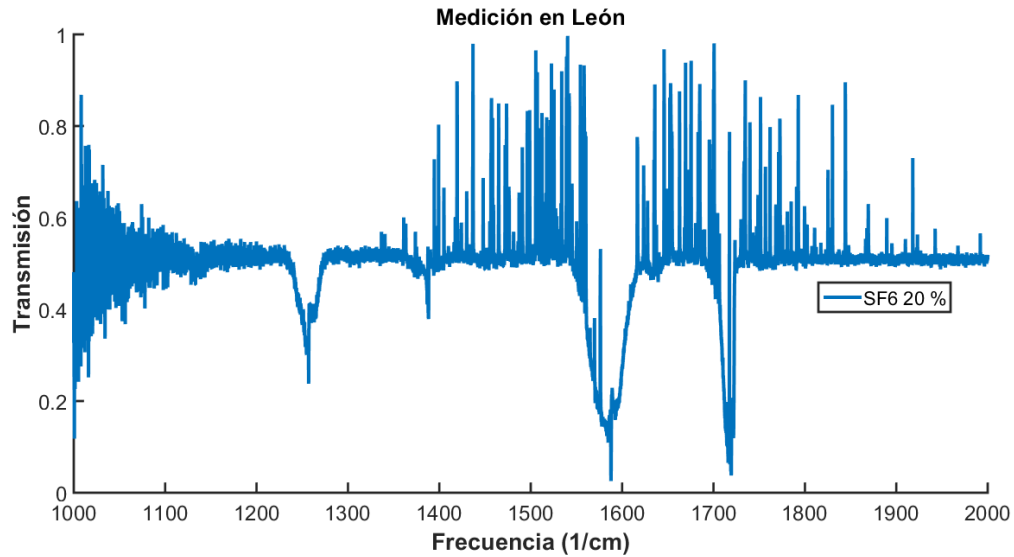


Figura 21. Espectro de absorción de SF₆ al 20 % medido en el CIO

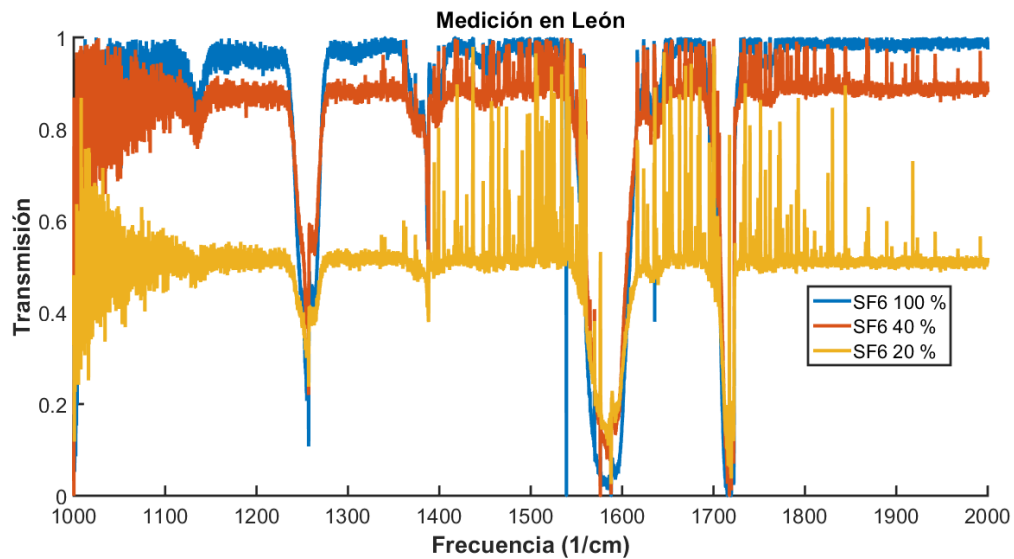


Figura 22. Comparación de los resultados obtenidos en el CIO.

Cabe señalar que en las mediciones realizadas en el CIO, la presión no se mantuvo constante y es por eso que en la figura 22 se observa pequeños desplazamientos en el eje vertical y las mismas bandas de absorción.

Finalmente se realizaron mediciones del espectro de absorción de SF₆, en la Universidad Tecnológica de Salamanca con un instrumento FTIR distinto a los dos anteriores. Además se utilizó la misma celda (5 cm) y una celda adicional con ventanas de Bromuro de Potasio y con una longitud de 10 cm. El KBr no tiene acción de filtrado en la zona de 1000 wavenumbers por lo que las mediciones realizadas con esta celda permitirán observar las zonas de absorción del SF₆ que existan por debajo de los 1000 wavenumbers.

La figura 23 muestra el espectro de absorción del SF₆ al 100% utilizando la celda de 5 cm de longitud. Se esperaba obtener un comportamiento muy similar a las mediciones en Yuriria y León a pesar de que la resolución del instrumento utilizado en Salamanca es menor a la de los dos anteriores, lo cual se puede observar. Parte del objetivo de esta tercera serie de mediciones es el poder visualizar las zonas de absorción del SF₆ que la teoría nos indica que existen por debajo de los 1000 wavenumbers. Por lo cual se utilizó la celda de medición de gases de 10 cm de longitud y ventanas de KBr (figura 24).

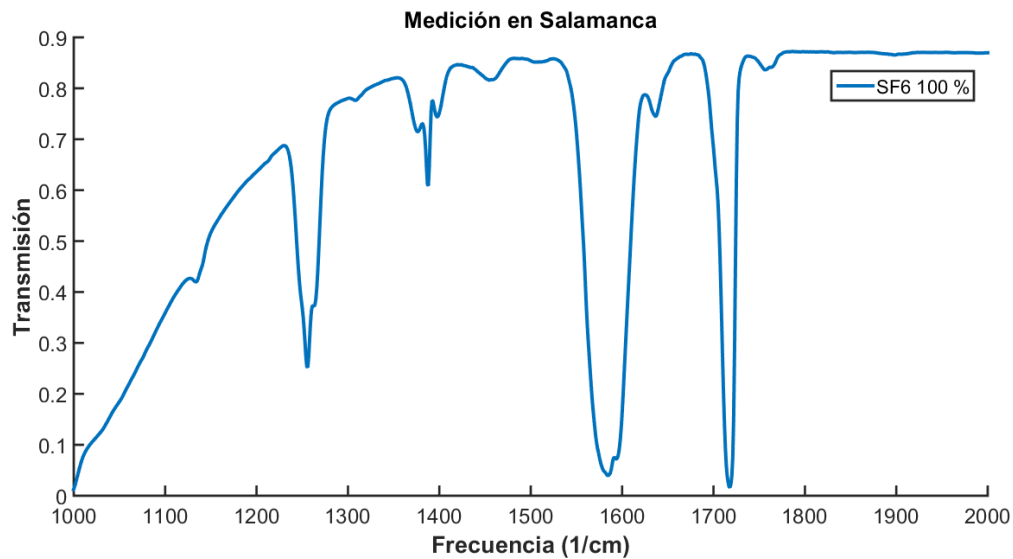


Figura 23. Espectro de absorción de SF₆ al 100% medido en la UTS.



Figura 24. Celda de 10 cm con ventanas de KBr

La figura 25 muestra las bandas de absorción de SF₆ al 100 % mostradas en el FTIR, en ella se pueden observar todas las bandas de absorción que indica la tabla 2 las cuales corresponden a los 610, 860, 950, 1260, 1560 wavenumbers (cm⁻¹). También se observan pequeñas zonas de absorción que ocurren alrededor de los 1130, 1380 y de la zona con gran absorción que ocurre en los 1700 wavenumbers. Cabe mencionar que estas últimas tres zonas de absorción no se encuentran reportadas en la literatura, puede ser que no se trate de bandas de absorción sino más bien de picos de absorción, lo que sí se puede inferir es que son parte del SF₆ y que en esas longitudes de onda también tiene absorciones.

De igual manera se realizaron mediciones y comparaciones de SF₆ al 100 % en estado puro y al 60% y 20% de concentración al ser mezclado con aire y manteniendo una presión constante dentro de la celda.

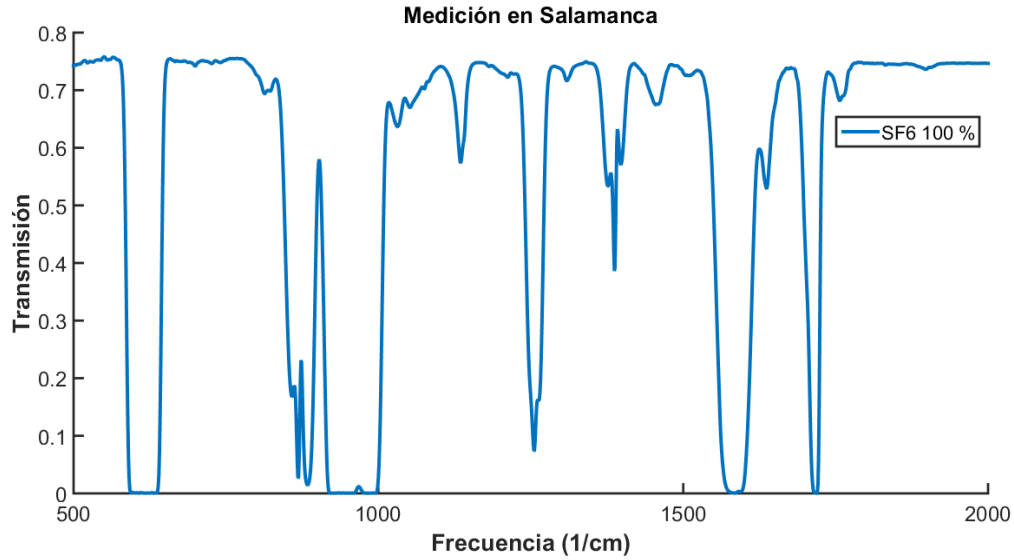


Figura 25. Espectro de absorción completo del SF₆, concentración al 100%.

Las figuras 26 y 27 muestran el espectro de absorción del SF₆ cuando se encuentra a una concentración del 60 % y 20% respectivamente, Se puede observar una clara disminución en la absorción en todas las zonas del SF₆ en comparación con la de la figura 25.

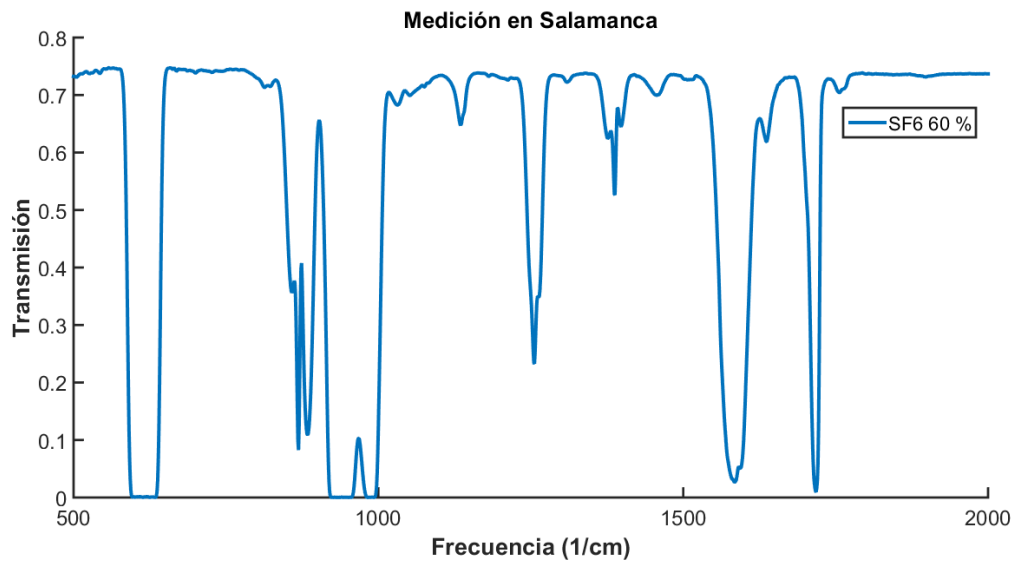


Figura 26. Espectro de absorción completo del SF₆, concentración al 60%.

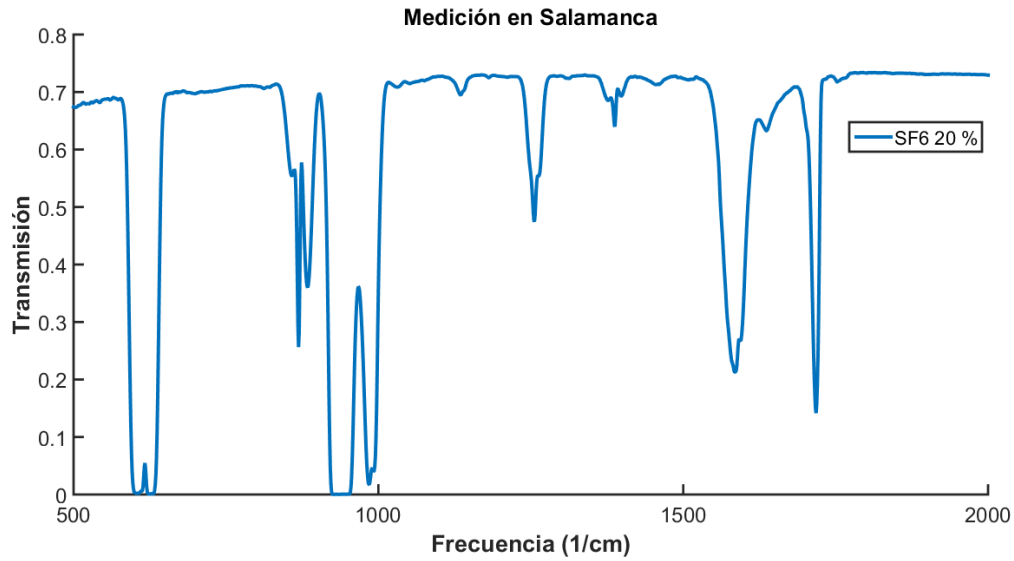


Figura 27. Espectro de absorción completo del SF₆, concentración al 20%.

Finalmente la figura 28 muestran el espectro de absorción completo del gas objetivo cuando varía su concentración.

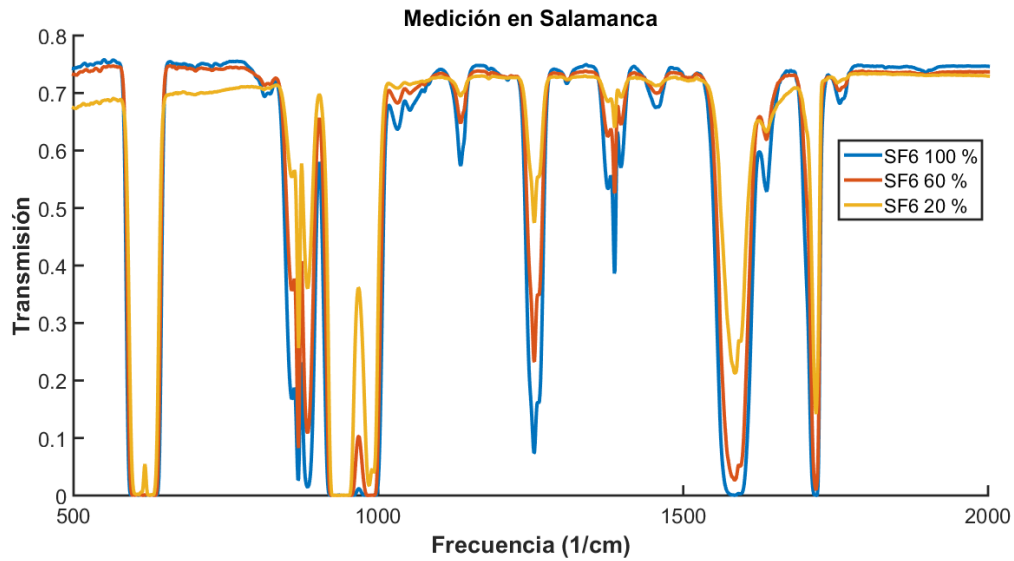


Figura 28. Comparación de los resultados obtenidos en la UTS.

Con las mediciones realizadas se comprobaron las bandas de absorción del SF₆ que menciona la literatura y se visualizaron zonas de absorción que no son mencionadas en la literatura. Para el diseño del FPI se va a tomar en cuenta la banda de 1260 y la técnica de correlación espectroscópica.

3.2 Modelo matemático y principio de operación del sensor no dispersivo

El sensor no dispersivo está basado en el arreglo de la figura 29. Donde para el diseño del sensor se utiliza una fuente térmica (fuente IR), una celda de gas con una longitud de trayectoria (l), una lente plano convexa para colimar los haces de luz, una oblea de silicio (FPI), un filtro pasabandas y un detector [15].

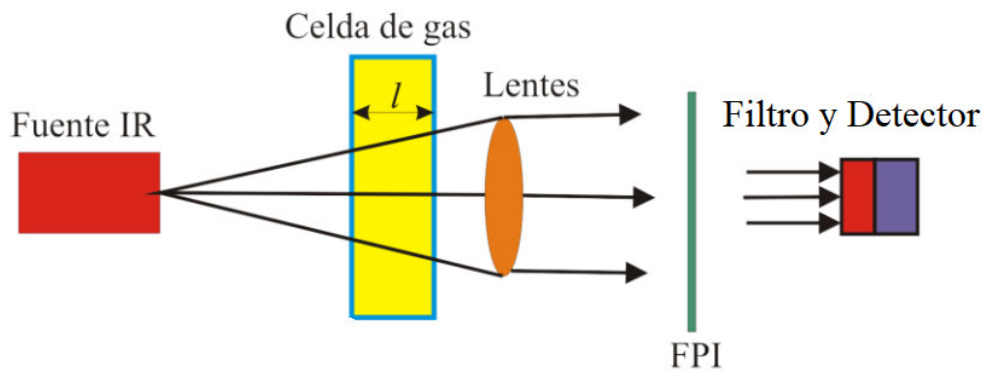


Figura 29. Arreglo del sensor no dispersivo con un FPI como modulador.

Para el arreglo mostrado, la luz emitida por la fuente de infrarrojo pasará a través de la celda que contiene el SF₆ parte de la luz será absorbida por el gas objetivo, el resto será colimado hacia el modulador (FPI) el cual estará diseñado para coincidir con una (o varias) bandas de absorción vibracional del SF₆. Finalmente el filtro pasabandas dejará llegar ciertas zonas del espectro de luz hacia el detector.

La potencia total que llegará al detector, podrá ser calculada por la siguiente ecuación:

$$P(\theta, C) = \int_{v_1}^{v_2} S(v)T(v, C)I_{FPI}(v, \theta)Fil(v)dv \quad (44)$$

Donde v es la frecuencia expresada en números de onda (1/cm), $I_{FPI}(v, \theta)$ es la transmisión a través del modulador (FPI), $T(v, C)$ es la transmisión de la celda de gas dada por la ecuación (1), $Fil(v)$ es la transmisión del filtro pasabanda y $S(v)$ es el perfil espectral de la fuente.

La forma de onda de la señal de potencia que recibirá el sensor $P(C, \theta)$, cambiará cuando el ángulo de incidencia (θ) sea modificado, es decir cuando se realice la modulación. Respecto a la magnitud de la onda, esta se relaciona directamente con la concentración del gas y será llamada amplitud de modulación.

El principio de correlación espectroscópica, en el cual se basa el diseño del modulador [3, 24] consiste en desplazar las franjas espectrales del FPI sobre el eje de la frecuencia de tal manera que estas coincidan con la posición de las líneas de absorción vibracionales del gas objetivo. De esta manera, la salida del detector óptico mostrará una señal modulada en amplitud que será función de la concentración del SF₆.

Las franjas espectrales del FPI deben coincidir con las zonas de absorción del SF₆, cuando el FPI sea rotado las franjas espectrales se desplazarán. Esto creará un patrón en el cual en un primer momento las franjas del FPI se empalman con las zonas de absorción y en un segundo momento no. En el primer momento la transmisión será menor y en el segundo momento la transmisión será mayor. La razón de utilizar un filtro óptico pasabandas es debido a que las franjas espectrales del FPI se mantienen equidistantes en un rango de longitudes de onda mucho mayor que el de las líneas vibracionales del gas, de esta manera se delimita la región del espectro donde se encuentra la zona de absorción del gas objetivo de interés.

La figura 30 muestra un ejemplo de la modulación de un sensor de CO₂, donde las líneas de absorción del CO₂ mostradas en azul, coinciden en un primer momento con las líneas espectrales de un FPI mostrado en rojo y no coinciden en un segundo momento cuando el FPI es rotado (franjas espectrales mostradas con línea negra punteada), realizando así la modulación.

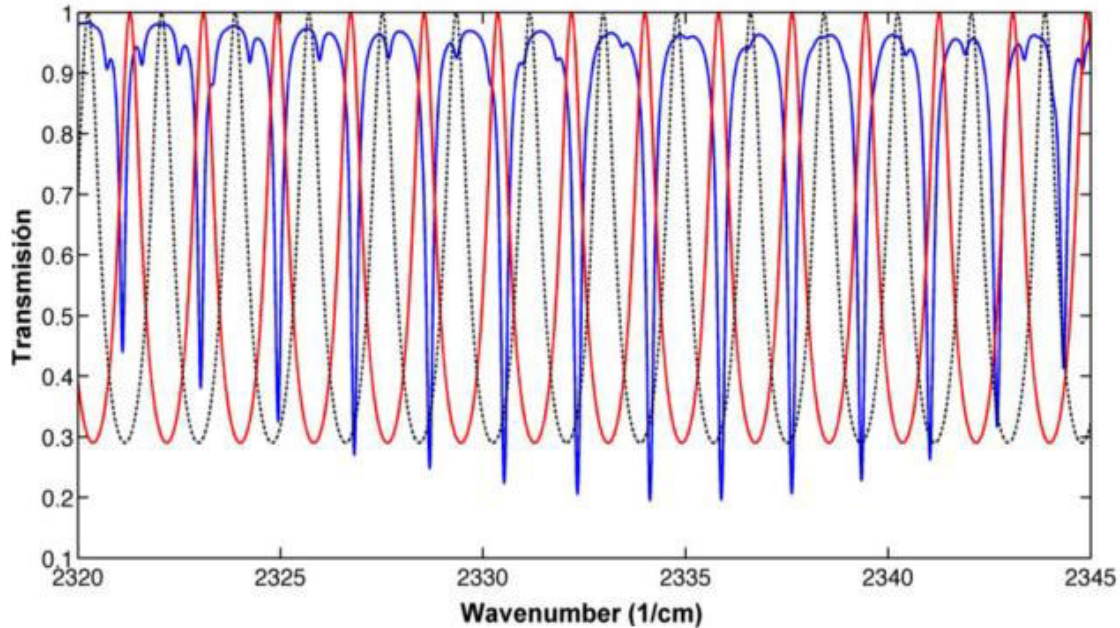


Figura 30. Ejemplo de modulación de un sensor de CO₂.

De la ecuación 43 se observa que la potencia recibida por el detector es función de la concentración y el ángulo de rotación del FPI, lo cual tiene sentido ya que todo cambio realizado en la amplitud de modulación se deberá únicamente a la profundidad de las líneas de absorción del gas y a la modulación inducida por la rotación del FPI.

3.3 Diseño del FPI

Para el diseño del FPI, se requiere determinar el espesor de la oblea de material semiconductor que permita que sus franjas de transmisión espectrales coincidan con las líneas de absorción vibracionales del SF₆. Para esta técnica de diseño es también utilizado el principio de correlación espectroscópica, con este método los parámetros óptimos del

FPI como son la longitud de la cavidad óptica y la reflectividad, pueden ser fácilmente determinados.

En este método se analiza la información por medio de la transformada de Fourier. Para iniciar con el método se analiza la transmisión de energía a través de un gas la cual está dada por la ley de Beer Lambert (ecuación 1) y se aplica un filtro pasabandas para seleccionar solo cierta zona de absorción del gas objetivo. La figura 31 muestra la aplicación de un filtro pasabandas en la zona de absorción del SF₆ correspondiente a la banda de absorción en los 1260 wavenumbers.

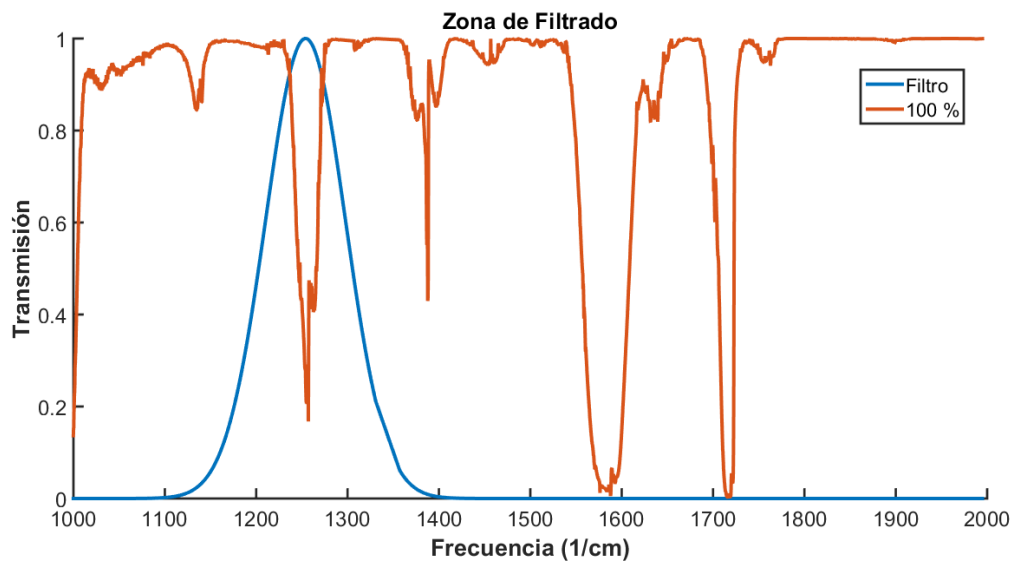


Figura 31. Filtro pasabandas aplicado al SF₆.

Debido a que las líneas espectrales del FPI deben coincidir con las zonas de absorción vibracionales del SF₆ y ya que estas no son equidistantes en su banda de absorción se recurre a la transformada de Fourier (FFT) para determinar la separación promedio efectiva entre las zonas de absorción vibracional.

La figura 32 muestra la magnitud de la transformada de Fourier del espectro completo del SF₆.

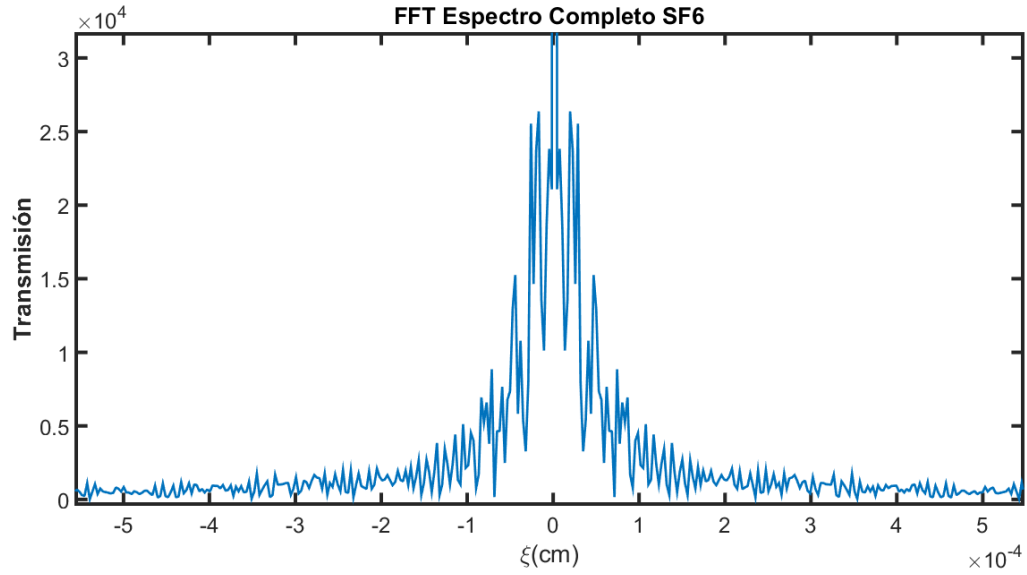


Figura 32. FFT del espectro completo del SF₆.

Debido a que el FPI se diseñará exclusivamente para la zona de absorción de SF₆ correspondiente a los 1260 cm⁻¹, se tendrá que considerar entonces, la transformada de Fourier de dicha zona, la cual se ilustra en la figura 33.

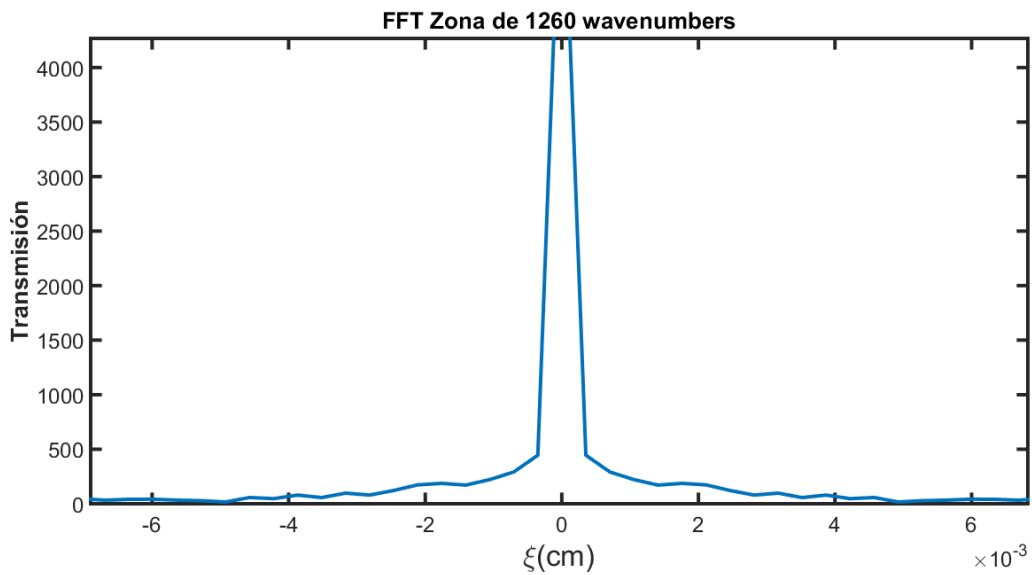


Figura 33. FFT de la zona de absorción de 1260 cm⁻¹.

Para realizar el cálculo del grosor de la oblea de material semiconductor se debe aplicar la siguiente ecuación:

$$\xi_m = m2n \quad (45)$$

Donde $m = 0, 1, 2, \dots$, d es la distancia de la cavidad del FPI y n es el índice de refracción del material semiconductor. ξ_m se deduce de la figura tomando el valor en el primer pico. De esta manera, la fórmula para calcular el espesor del FPI se muestra a continuación:

$$d = \frac{\xi_m}{2mn} \quad (46)$$

Con la ecuación 45 es posible diseñar moduladores de diferentes materiales. Los materiales semiconductores a considerar para el diseño del modulador deberán cumplir con ciertas características ópticas en primera instancia y de igual manera tendrán que ser comerciales y de bajo costo.

Los materiales que mejor se adaptan a las necesidades que se requieren en este caso son el Silicio, el Germanio y el Arseniuro de Galio. Estos tres materiales pueden operar sin problemas con longitudes de onda pertenecientes a la región del mediano infrarrojo además son comerciales y relativamente fáciles de conseguir. En la tabla 3 se muestran las características ópticas de los materiales mencionados [31].

Tabla 3. Propiedades ópticas de materiales seleccionados

Material	Región de transparencia óptica (μm)	Índice de refracción
Silicio	1.1 – 6.5	3.415
Germanio	1.8 – 15	4.001
Arseniuro de Galio	0.90 – 17.3	3.32

Con la ecuación 45 se puede calcular el espesor de obleas de los materiales mencionados, se tomará el valor de 0.003167 cm como el valor de primer pico, esta información se tomó de la FFT de la zona de 1260 cm⁻¹ mostrada en la figura 33. Se realizan las operaciones para calcular el espesor de la oblea de silicio:

$$d_{Si} = \frac{\xi_m}{2mn} = \frac{0.003167 \text{ cm}}{(2)(1)(3.415)} = 4.636 \times 10^{-4} \text{ cm}$$

El cálculo realizado muestra que el espesor óptimo de una oblea de Silicio tendrá que ser de aproximadamente 5 micras, de igual manera se calcularon los espesores óptimos para el resto de los semiconductores a considerar el Ge y GaAs. La tabla 4 muestra los valores del espesor calculado para cada material.

Tabla 4. Espesores de obleas de diferentes materiales

Material	Espesor (µm)
Silicio	5
Germanio	4
Arseniuro de Galio	5

Se realizaron las simulaciones para verificar que el espesor óptimo de cada material hará coincidir el FPI en los puntos buscados del espectro de absorción del SF₆, la figura 34 muestra un FPI de oblea de Silicio de un espesor de 5 micras. De la figura 34 se puede observar que el FPI diseñado no coincide exactamente con el punto buscado, que es la zona de absorción de los 1260 cm⁻¹, por lo cual con este valor de espesor de la oblea no se tendría una correcta modulación en el sensor de SF₆. Para tener una correcta modulación, se realizó un ajuste con la simulación para encontrar el espesor óptimo que nos haga coincidir los picos máximos de transmisión del FPI con la zona de absorción deseada. La figura 35 muestra un FPI de 6 micras de espesor, el cual se acerca más a la zona de absorción de los 1260 cm⁻¹.

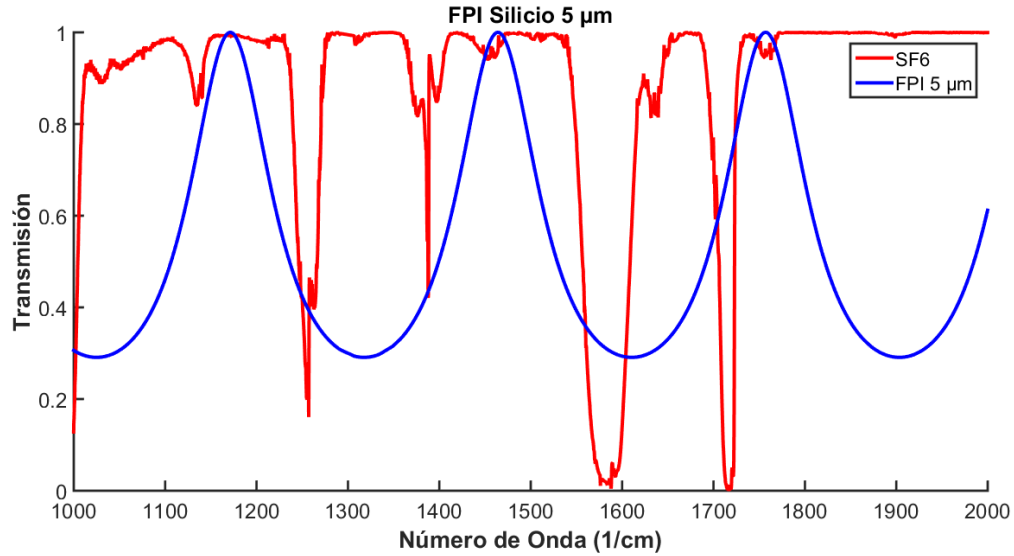


Figura 34. FPI de 5 micras de espesor

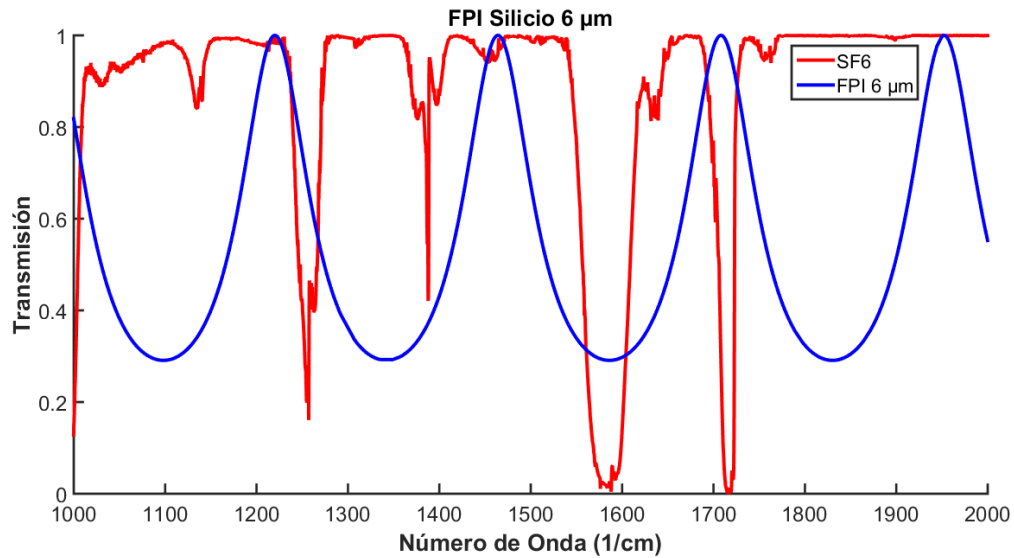


Figura 35. FPI de 6 micras de espesor.

El FPI de Silicio de 6 micras de espesor se acerca un poco mas a la zona de absorción de interés, sin embargo aún no coincide del modo necesario, la figura 36 muestra que el espesor óptimo necesario del FPI tendrá que ser de 7 micras para lograr una correcta modulación.

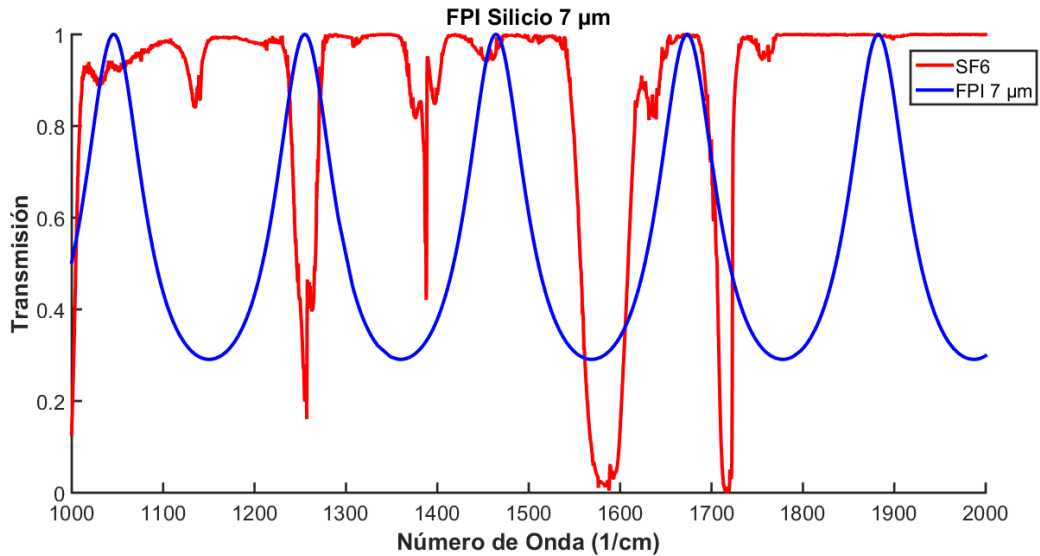


Figura 36. FPI de Silicio de 7 micras.

Para el caso del Germanio y el Arseniuro de Galio, se realizó el mismo ajuste por medio de la simulación para lograr el espesor óptimo que realice una correcta modulación, los cuales se indican en la tabla 5.

La razón del por que ajustar los espesores de las obleas por medio de la simulación es debido a que el método utilizado es aplicable cuando se detectan los picos de absorción del gas objetivo, en nuestro caso no es posible apreciar dichos picos, únicamente las bandas de absorción. Si bien los espesores calculados con el método utilizado no son lo suficientemente exactos para realizar una correcta modulación, sí aportan datos muy aproximados que son fácilmente ajustables simulando sus comportamientos.

Para poder visualizar los picos de absorción del SF₆ es necesario contar con un FTIR de alta resolución, el cual no se tenía en ninguna de las instituciones donde se realizaron las mediciones del gas, con el método presentado es posible llegar al resultado correcto sin la necesidad de tener un instrumento FTIR de alta resolución y alto costo. En las siguientes secciones se muestran las simulaciones del sistema completo para cada FPI diseñado.

Tabla 5. Espesores óptimos de los FPI diseñados

Material	Espesor (μm)
Silicio	7
Germanio	9
Arseniuro de Galio	6

3.4 Simulación del sistema completo con oblea de Silicio como modulador

La tabla 5 muestra que 7μm es el espesor necesario para que la oblea de Silicio funcione como modulador de un sensor de SF₆. La ecuación 28 indica que los dos parámetros que modificarán el comportamiento del FPI son el espesor de la oblea y el ángulo de incidencia de la luz. Una vez que el espesor de la oblea es calculado, ya no es posible modificarlo en la implementación, por lo cual el parámetro restante con el cual se realizará la modulación será el ángulo de incidencia de la luz.

Al graficar el espectro de absorción del gas objetivo junto con el FPI diseñado se puede observar la clara coincidencia del pico de transmisión del FPI con el pico de absorción del espectro del SF₆, la figura 37 muestra un FPI de oblea de Silicio de 7μm de espesor a un ángulo de 0° de incidencia de la luz.

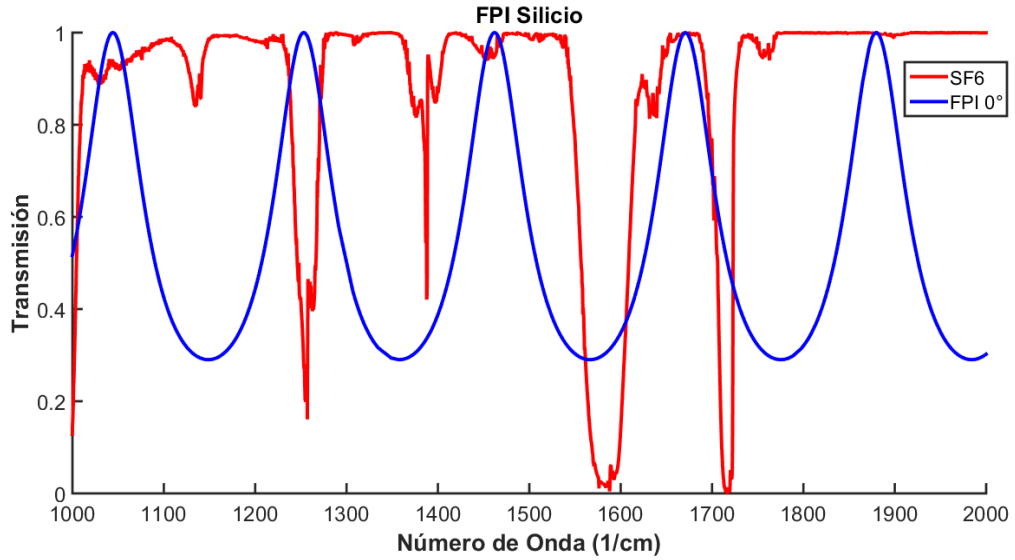


Figura 37. FPI de oblea de Silicio a 0°

Para realizar la modulación adecuadamente, será necesario encontrar el ángulo de incidencia de la luz en el cual coincidan exactamente el pico de absorción en cuestión y uno de los mínimos del FPI, para el caso del Silicio esto ocurre a los 19° (ver figura 38).

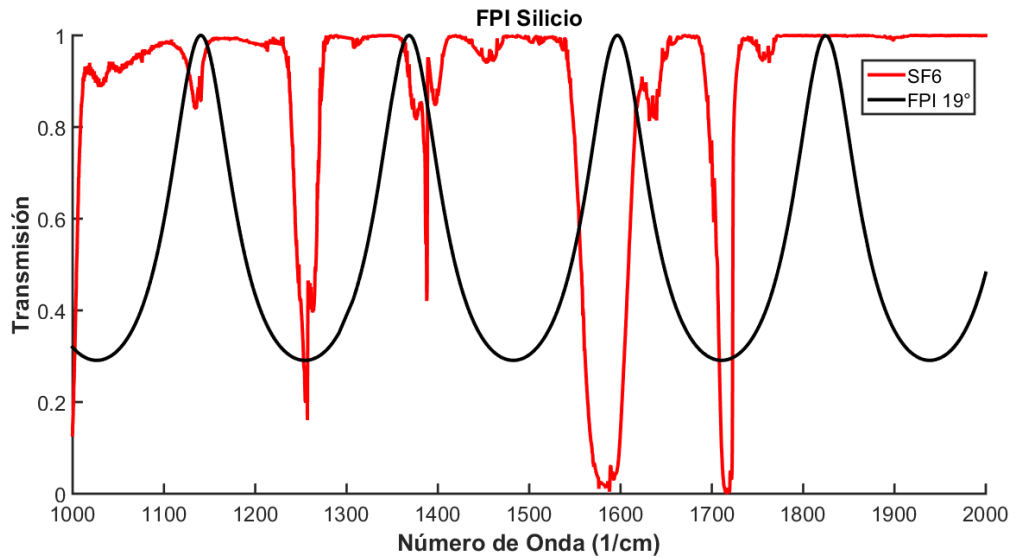


Figura 38. FPI de oblea de Silicio a 19°

Al tener bien definidos los parámetros de modulación se puede realizar la simulación del sistema completo utilizando una oblea de Silicio como un FPI y modulador. La figura 39 muestra el espectro de absorción del SF₆ a diferentes concentraciones, la simulación del sistema completo se realizó utilizando la ecuación 43, para cada una de las concentraciones.

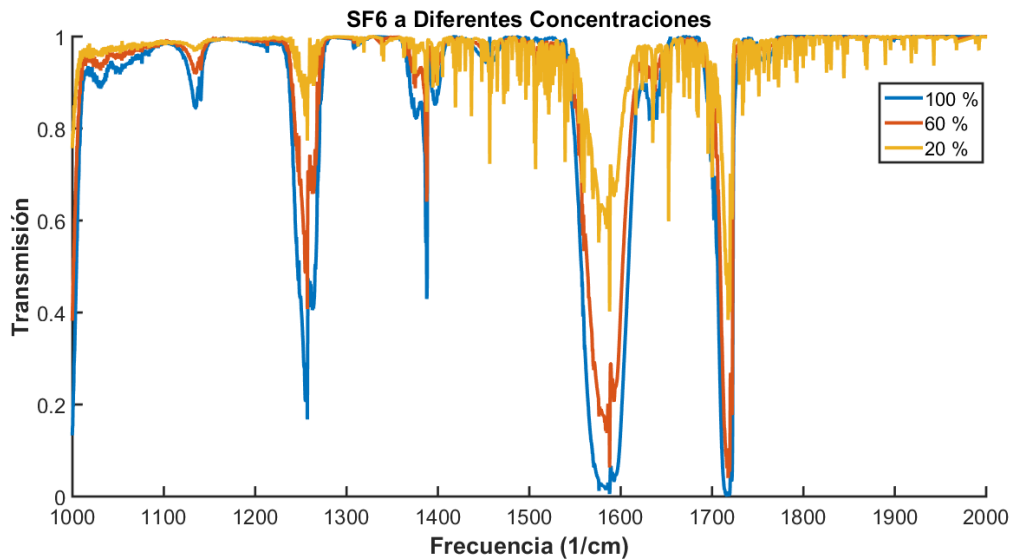


Figura 39. Espectro de absorción del SF₆ a diferentes concentraciones

De esta manera se aplica un filtro pasa banda para delimitar la zona de absorción para la cual se calculó el espesor de la oblea (1260 wavenumbers). La figura 40 muestra la zona donde se aplicará el filtro y la figura 41 la acción del filtro cuando se aplica al espectro de absorción.

Una vez que se ha filtrado únicamente la zona de absorción vibracional de interés, se realiza la modulación con el FPI diseñado, en la figura 42 se muestra el FPI calibrado a los valores exactos de ángulo de incidencia para realizar la modulación de forma apropiada.

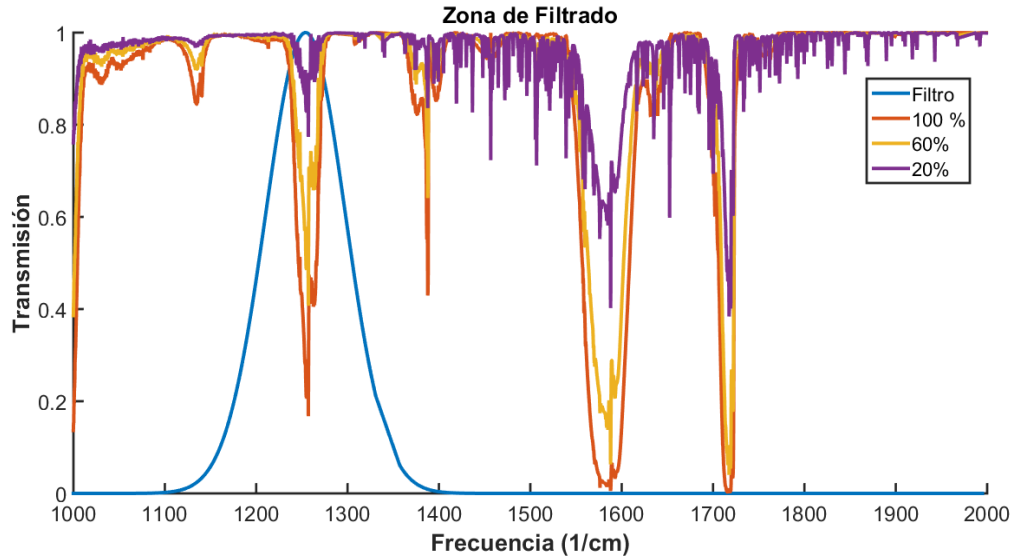


Figura 40. Zona del filtrado.

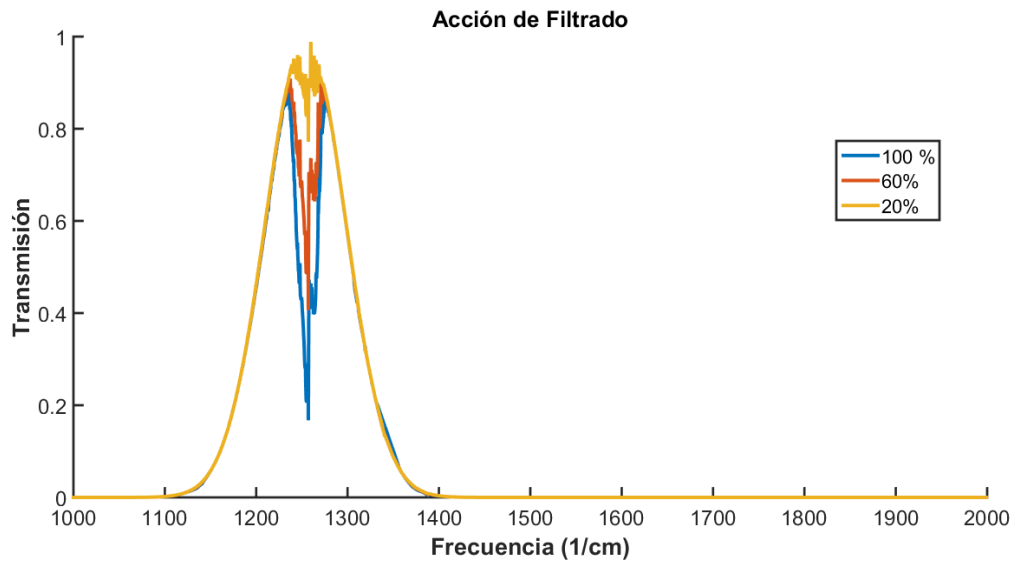


Figura 41. Acción del filtrado.

Finalmente, una vez realizada la modulación se presenta en la figura 43 la potencia de salida que proporciona el detector, en la cual se observa la forma de onda de un ciclo completo de modulación, es decir, cuando el FPI inicia en 0° y rota hasta llegar a los 19° y regresa nuevamente a 0°. También se puede observar que cuando el pico de transmisión máxima del FPI coincide exactamente con la zona de absorción, la potencia que arribará al detector óptico será mínima, mientras que cuando el valle de transmisión mínima del FPI

coincide con la zona de absorción, la potencia en el detector óptico será máxima. De igual manera mientras mayor sea la concentración de la muestra de gas, mayor será la potencia que recibe el detector óptico.

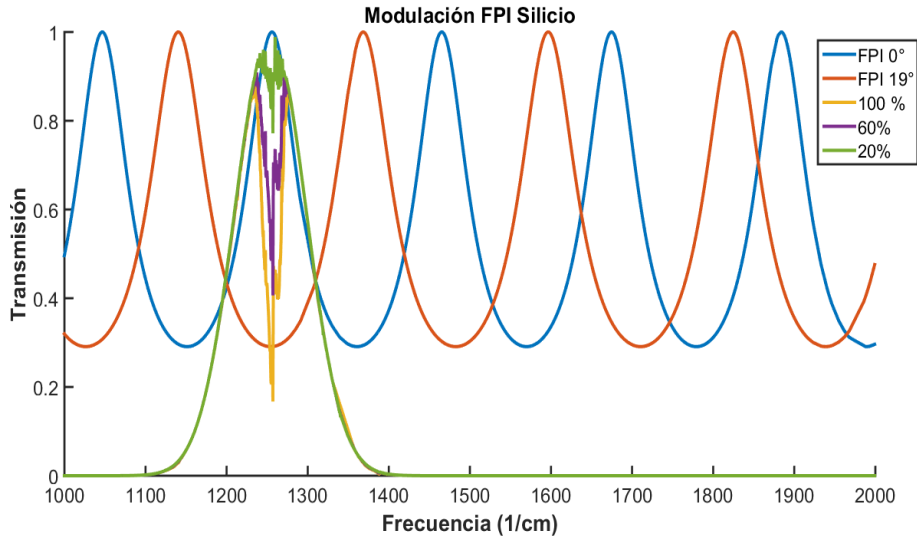


Figura 42. Acción de modulación del FPI Silicio.

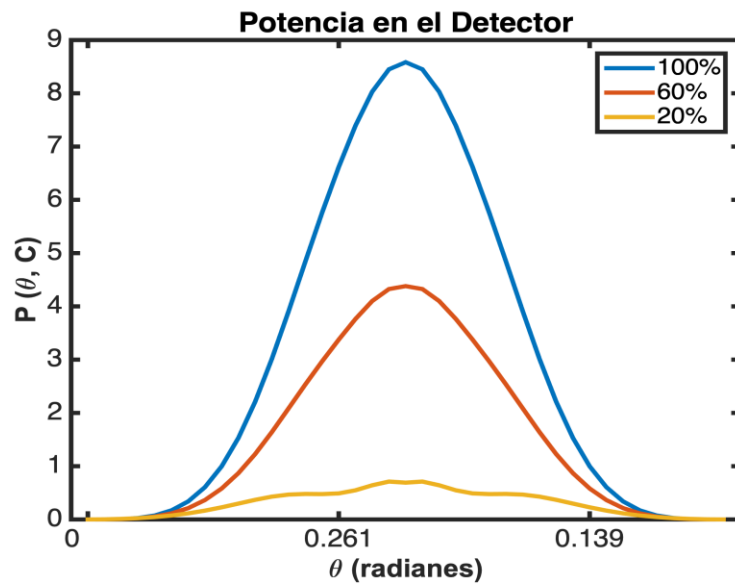


Figura 43. Potencia recibida por el detector óptico.

En la siguiente sección se analizará el mismo procedimiento utilizando el Germanio y el Arseniuro de Galio como FPIs.

3.5 Simulación del sistema completo con oblea de Germanio y Arseniuro de Galio como modulador

En esta sección se muestran las simulaciones realizadas utilizando obleas de Germanio y de Arseniuro de Galio, siguiendo el mismo procedimiento que con la oblea de Silicio. Primeramente se simuló utilizando una oblea de Germanio, donde se muestran sus características en las tablas 3 y 5. En la figura 44 se aprecia la acción de modulación de una oblea de Germanio sobre la zona de absorción de 1260 cm⁻¹. Para el caso del Germanio se realiza una rotación de la oblea comenzando con un ángulo inicial de 5° y terminando en un ángulo de 19.5°.

La potencia que llegará al detector se presenta en la figura 45, de igual manera se ilustra un ciclo de modulación completo desde el ángulo inicial hasta el ángulo final. Se puede notar que la forma de onda de la señal recibida por el detector es diferente en comparación con la onda provocada por la modulación a través de una oblea de Silicio. Por otro lado, la magnitud de ambas señales es diferente, ya que se puede observar que el Germanio genera una señal de magnitud mayor en comparación con el Silicio.

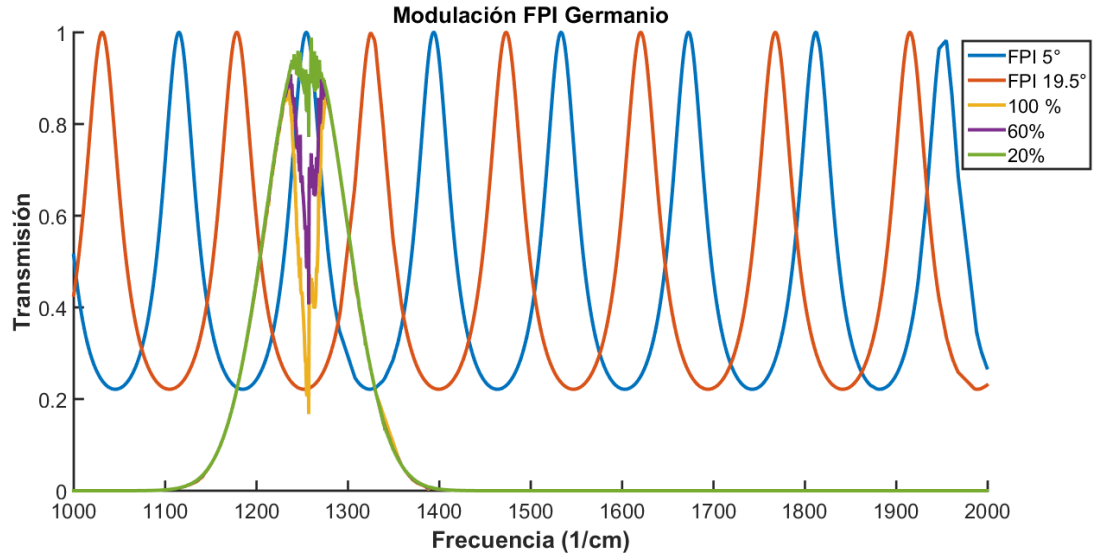


Figura 44. Modulación de FPI con oblea de Germanio.

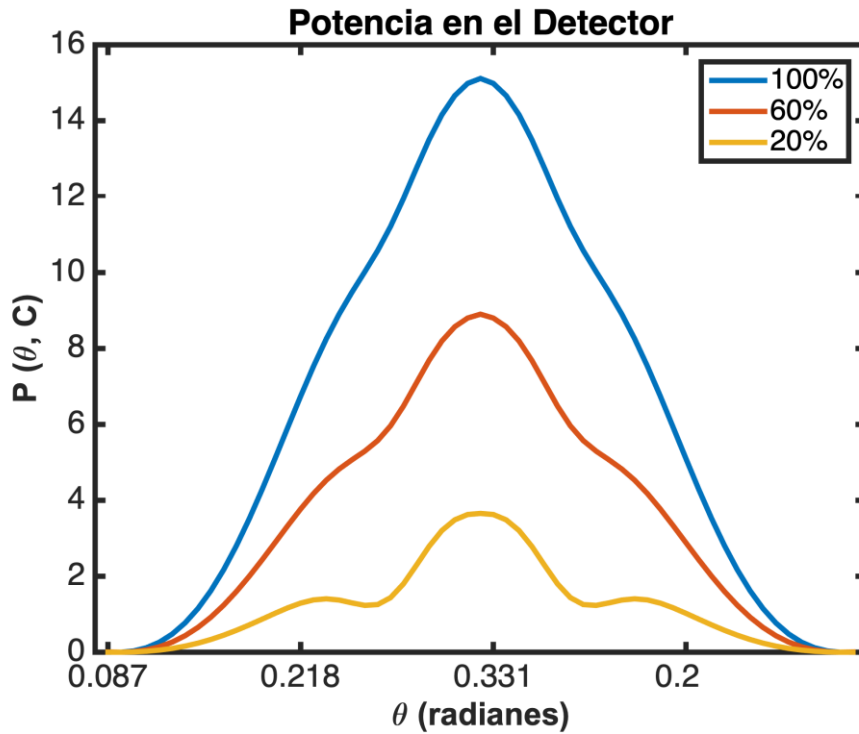


Figura 45. Potencia recibida en el detector óptico por modulación con oblea de Germanio.

La modulación del sistema con oblea de Arseniuro de Galio se presenta en la figura 46. Esta oblea se diseñó de un espesor de 6 micras y se realiza la rotación iniciando en un ángulo de 0° y terminando en un ángulo de 20°.

En la figura 47 se muestra la potencia recibida por el detector para este caso. Dicha forma de onda es un poco mas similar a la forma de onda provocada por el Silicio. Esta similitud es debido a que sus valores de diseño e índice de refracción son muy parecidos. Así mismo se puede observar que el comportamiento es el mismo, es decir la potencia que llega al detector es mayor conforme aumenta la concentración.

Se compararán los tres resultados con los diferentes materiales y se elegirá un FPI óptimo para su futura implementación, tomando en cuenta los valores de potencia recibida en el detector óptico así como su costo y accesibilidad para su implementación.

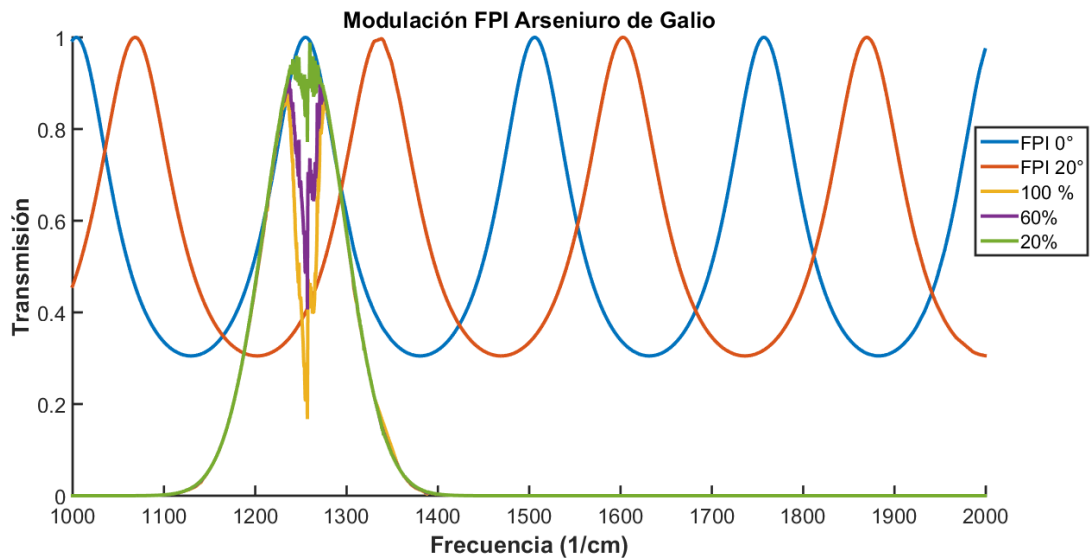


Figura 46. Modulación con FPI de GaAs

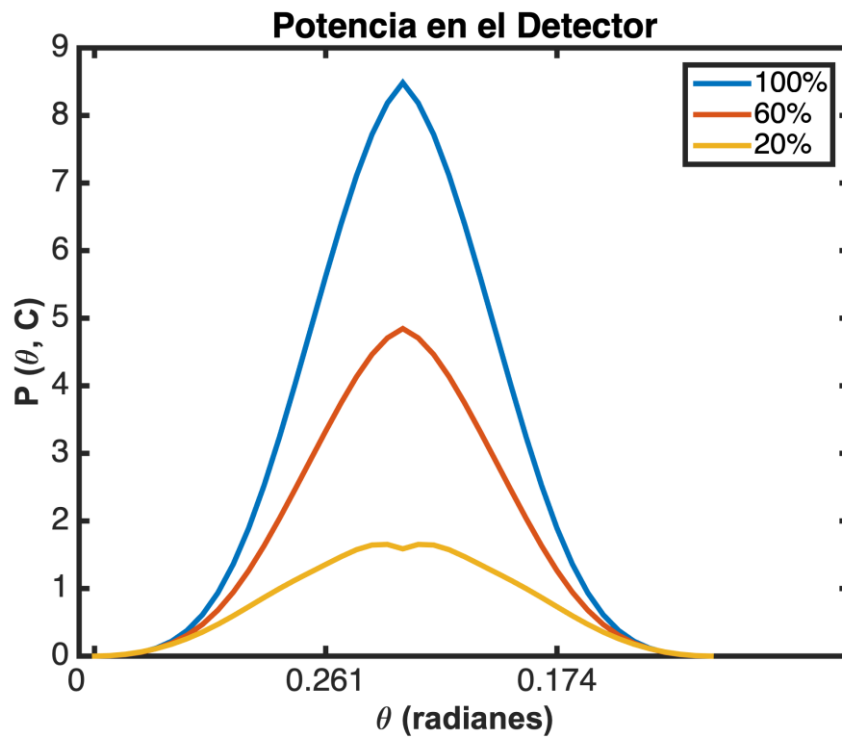


Figura 47. Potencia recibida en el detector por modulación con FPI de GaAs.

Capítulo IV

4. Análisis de resultados obtenidos y conclusiones generales

En la esta sección se presenta un análisis de los resultados obtenidos en el diseño de un interómetro Fabry-Perot basado en una oblea de material semiconductor para sensar SF₆ así como las conclusiones del trabajo.

4.1 Análisis de resultados obtenidos

Como se mostró en el capítulo 3, se realizó el diseño de un FPI basado en una oblea de material semiconductor utilizando tres materiales diferentes (Silicio, Germanio y Arseniuro de Galio). Los espesores obtenidos para cada material fueron muy similares entre sí por lo cual se podría esperar una respuesta muy parecida para los tres materiales.

Para el caso del Silicio del cual se obtuvo un espesor de oblea de 7 micras, se observa que la potencia que arribará en el detector estará en el orden de los 8.5 u.a. cuando la concentración de SF₆ se máxima, el ángulo de rotación para lograr la modulación es muy apto para su implementación. Por otro lado la potencia recibida en el detector cuando la concentración de SF₆ es mínima, es muy pequeña y se podrían tener ciertas complicaciones en su posible implementación.

El caso de la oblea de Aseniuro de Galio es muy similar al Silicio debido a que estos dos materiales tienen un índice de refracción muy parecido y por ende el espesor obtenido es también muy similar para ambos. Existe una diferencia para cuando la concentración de SF₆ es mínima, pues a diferencia del Silicio, el Arseniuro de Galio hace que la potencia en el detector sea un poco mayor y pueda así diferenciarse de posibles señales de ruido blanco

durante su implementación. El ángulo de rotación para lograr la modulación, es también muy similar al necesario para el Silicio, por lo cual el GaAs se puede considerar como material para implementación.

Los resultados del diseño de la oblea de Germanio muestran mayores cantidades de potencia que arribarán al detector óptico razón por la cual podría considerarse como la mejor opción, adicionalmente el ángulo requerido para lograr la modulación es de un tamaño adecuado para evitar complicaciones durante su implementación.

4.2 Conclusiones

El análisis de los resultados podría llevarnos a la conclusión de que la oblea de Germanio es la mejor opción para la implementación de un sensor de Hexafluoruro de Azufre, sin embargo, es necesario considerar que en el mercado exista una oblea de material y características requeridas y que no sea costosa o difícil de conseguir.

Un análisis realizado con algunos proveedores de obleas y películas delgadas de algunas partes del mundo, arrojó que las obleas y películas delgadas de Silicio son mas accesibles, económicas y fáciles de conseguir que las obleas de los otros materiales utilizados en el diseño. Por este motivo se considera al Silicio como la mejor opción para la implementación del sensor. Sin embargo las obleas de Germanio podrían en un futuro muy cercano igualarse en precio y accesibilidad con el Silicio, en ese caso la oblea de Germanio sí sería la mejor opción para la implementación.

La oblea de GaAs, por su costo y difícil accesibilidad sería la última opción en este momento para la implementación, sin embargo si estas condiciones mejoran para tal material, se podría convertir en la segunda opción para la implementación del sensor.

Finalmente, es posible realizar un sensor de SF₆ utilizando el diseño propuesto en este trabajo, dicho sensor podría en una etapa avanzada, ser utilizado para realizar diagnósticos de la condición del SF₆ de equipos energizados en tiempo real.

4.3 Trabajo futuro

Como trabajo futuro se considera la implementación de un sensor de SF₆ basado en el diseño propuesto, dicho sensor podría en su primera etapa, utilizarse como un equipo de medición de la calidad de SF₆ por muestreo de gas, una segunda etapa del sensor sería la implementación del mismo, instalado en un equipo energizado y realizando monitoreo en línea de la condición del gas.

4.4 Trabajos presentados en congresos nacionales e internacionales

Se presentan los comprobantes de asistencia a congresos nacionales e internacionales donde se realizaron exposiciones orales y de póster del presente trabajo.



Advancing Technology
for Humanity

SECCION MEXICO

OTORGA EL PRESENTE:

RECONOCIMIENTO

A:

Estrada Pintor M.I.

POR SU AMABLE PARTICIPACION EN LA:



TRIGESIMAPRIMERA REUNION INTERNACIONAL DE VERANO
DE POTENCIA, APLICACIONES INDUSTRIALES
Y EXPOSICION INDUSTRIAL

LA EVOLUCION DEL MERCADO ELECTRICO MEXICANO

CON LA PONENCIA:

SENSOR DE SF6 PARA APLICACIONES EN SUBESTACIONES ELECTRICAS

ING. AGUSTIN VILLAVICENCIO VALADEZ
PRESIDENTE
IEEE SECCION MEXICO

M.C. GILBERTO ENRIQUEZ HARPER
COORDINADOR GENERAL
RVP-AI/2018

15 al 20 de Julio de 2018, Acapulco, Gro.



CONNECTING MINDS.
ADVANCING LIGHT.

www.SPIE.org
help@spie.org

Tel: +1 360 676 3290
Fax: +1 360 647 1445

Mail: PO Box 10, Bellingham, WA, 98227-0010 USA
Ship: 1000 20th Street, Bellingham, WA, 98225-6705 USA

August 19, 2018

Mr. Marco Estrada
Univ de Guanajuato
Div de Ingenierias Campus Irapuato Salamanca
Ctra Salamanca-Valle km 3.5+1.8 Com Palo Blanco
Salamanca GU 36885
Mexico

CONFIRMATION OF ATTENDANCE

This is to confirm that Mr. Marco Estrada
Univ de Guanajuato
attended

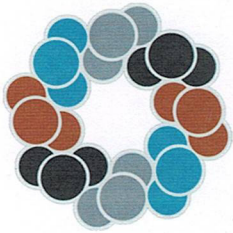
SPIE Optical Engineering + Applications
19 - 23 August 2018
San Diego, California, USA

**Title of the Paper Presented Design of a Fabry-Perot interferometer
based on silicon wafer for dielectric gas sensing applications**

Paper Number: 10766-27

Marilyn Gorsuch
Event Manager

**SPIE. OPTICS+
PHOTONICS**



CONACYT



Tecnológico de Monterrey



BUAP



PUEBLA
ES MI DESTINO

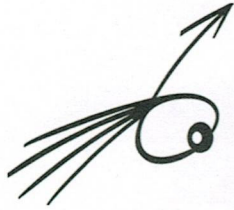


CONSEJO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
DEL ESTADO DE PUEBLA
GOBIERNO DE PUEBLA

SPIE. STUDENT
CHAPTER
BENEMÉRITA UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA DE PUEBLA

UDLAP

SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



LA SOCIEDAD MEXICANA de FÍSICA

Agradece la asistencia y participación de:

Marco Ivan Estrada Pintor
Universidad de Guanajuato

en el **LXI Congreso Nacional de Física**

Centro Cultural Universitario
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
del 7 al 12 de octubre de 2018


Dr. Darío Núñez Zúñiga
Presidente de la SMF

Referencias

- [1] Das, S., & Jayaraman, V. (2014). SnO₂: A comprehensive review on structures and gas sensors. *Progress in Materials Science*, 66, 112–255. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2014.06.003>
- [2] Hodgkinson, J., & Tatam, R. P. (2013). Optical gas sensing: A review. *Measurement Science and Technology*, 24(1). <https://doi.org/10.1088/0957-0233/24/1/012004>
- [3] Vargas-rodríguez, E., & Rutt, H. N. (2009). Sensors and Actuators B : Chemical Design of CO , CO 2 and CH 4 gas sensors based on correlation spectroscopy using a Fabry – Perot interferometer, 137, 410–419. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2009.01.013>
- [4] Flores R, Delgado F, & Romero V. (2012). Aplicaciones del SF 6 en la Industria Eléctrica y su Impacto en el Medio Ambiente Applications of SF6 in the Electrical Industry and its Impact on the Environment. *Ingenieria*, 16(3), 229–241.
- [5] Glaubitz, P., Stangherlin, S., Biasse, J., Meyer, F., Dallet, M., Prüfert, M., Dufournet, D. (2014). CIGRE Position Paper on the Application of SF 6 in Transmission and Distribution Networks. *Electra*, (274), 34–39.
- [6] Science, M. (2012). Solid State Gas Sensors - Industrial Application, 11. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-28093-1>
- [7] Korotcenkov, G., & Cho, B. K. (2017). Metal oxide composites in conductometric gas sensors: Achievements and challenges. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 244, 182–210. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.12.117>
- [8] Schreiter M., Gabl R., Lerchner J., Hohfeld C., Delan A., Wolf G., Blurher., Katzschner B., Mertig M., Pompe W. (2006). Functionalized pyroelectric sensors for gas detection. *Sensors and actuators B: Chemical*, (119), 255-261. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2005.12.042>
- [9] Arshak, K., Moore, E., Lyons, G. M., Harris, J., & Clifford, S. (2004). A review of gas sensors employed in electronic nose applications. *Sensor Review* (Vol. 24). <https://doi.org/10.1108/02602280410525977>
- [10] Llobet, E. (2013). Gas sensors using carbon nanomaterials: A review. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 179, 32–45. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2012.11.014>
- [11] Committee, S., Power, I., & Society, E. (2008). *IEEE Guide for Gas-Insulated Substations* (Vol. 1993).
- [12] McDonald, J. D. (2007). *Electric Power Substation Engineering* (Vol. 1). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- [13] Vargas-Rodriguez, E., May-Arrijoja, D. A., Estudillo-Ayala, J. M., Laguna, R. R., Mata-Chavez, R. I., & Mendez, E. A. (2009). Viability analysis of a dual gas sensor based on a single Fabry-Perot

- Interferometer. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 7499, 1–5. <https://doi.org/10.1117/12.849126>
- [14] Vargas-Rodriguez, E., Rutt H. N., Claudio-Gonzalez D., Rojas-Laguna R., Andrade-Lucio J.A. (2008). *Analytical approaches to optimization of gas detection using Fabry-Perot interferometers*. <https://doi.org/10.5643/9781606503201/ch8>
- [15] Gallegos, E. (2016). *Sensores Optoelectrónicos para Gases*.
- [16] Arredondo-Acosta J. P. (2010). *Diseño de un filtro óptico sintonizable optimizado para el sensado de dos gases*.
- [17] Cano-Rodríguez S. (2009). *Diseño de un sensor óptico no dispersivo para acetileno*.
- [18] Arredondo-Acosta J. P. (2011). *Sensor de gas dual*.
- [19] Vicente Montes de Oca Puzio. (2006). *Manual de fluidos aislantes*. Improsa SA de CV.
- [20] Cai, J., Na, Y., Ni, W., Li, G., Feng, K., & Song, G. (2011). Study of SF₆ gas decomposition products based on spectroscopy technology, (September 2011), 81932K. <https://doi.org/10.1117/12.900483>
- [21] Okabe, S. (2012). Mitsubishi Electric Corp . Tokyo Electric Power Company, 1–8.
- [22] Power, I., Society, E., & C, I. S. (2016). *IEEE Guide for Specifications for High-Voltage Gas-Insulated Substations Rated 52 kV and Above, 2016*.
- [23] Power, I., & Society, E. (2012). *IEEE Guide for Sulphur Hexafluoride (SF 6) Gas Handling for High-Voltage (over 1000 Vac) Equipment*.
- [24] Vargas, E. (2007). *Optical Gas Sensors Based on Correlation Spectroscopy Using a Fabry-Perot Interferometer*, in *University of Southampton*, 2007, Thesis, PHD, Southampton: Gran Bretaña.
- [25] Eugene Hetch. (2002). *OPTICS* (4th ed.). Addison Wesley.
- [26] Born, M., Wolf, E., Bhatia, A. B., Clemmow, P. C., Gabor, D., Stokes, A. R., Wilcock, W. L. (1999). *Principles of Optics* (7th ed.). <https://doi.org/10.1017/CBO9781139644181>
- [27] Vargas-Rodriguez, E., & Rutt, H. N. (2005). A Method to Minimise Spurious Background Signals in Gas Detectors based on Correlation Spectroscopy using a Fabry Perot by bandpass Filter Shape Optimisation. *Optical Engineering, Accepted to Be Published.*, 1–29.
- [28] Ball David W. (2001). *The Basics of Spectroscopy*. SPIE The International Society for Optical Engineering. ISBN 0-8194-4104-X.
- [29] Kochanov, R. V., Gordon, I. E., Rothman, L. S., Weislo, P., Hill, C., & Wilzewski, J. S. (2016). HITRAN Application Programming Interface (HAPI): A comprehensive approach to working with spectroscopic data. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 177, 15–30. <https://doi.org/10.1016/J.QSRT.2016.03.005>

- [30] Rinsland, C. P., Goldman, A., Stephen, T. M., & Chiou, L. S. (2003). SF 6 ground-based infrared solar absorption measurements : long-term trend , pollution events , and a search for SF 5 CF 3 absorption, 78, 41–53.
- [31] Waynant, R. W., Ediger, M. N., (2000). *ELECTRO-OPTICS HANDBOOK* (2nd edition). Mc. Graw Hill.