

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
PROGRAMA DE FÍSICA.

ACTA DE SUSTENTACIÓN TESIS DE GRADO

Ante el jurado evaluador, y Jefe de Programa, con participación de estudiantes, docentes e invitados, se hizo presente en la sala virtual <https://meet.google.com/ysm-gchv-kfz> el día trece (13) del mes de septiembre del 2021, a las 11:00 a.m., el estudiante Bryan Steven Hoyos Giraldo, identificado con la cédula de ciudadanía No. 1.116.267.666 y Código 20132121438, con el propósito de presentar y sustentar el trabajo de grado: “*Sintonización de Espectro de Transmitancia con la Salinidad del Agua de Mar en un Cristal Fotónico Unidimensional*”, bajo la dirección del profesor Francis Segovia Chávez, presentes en la sustentación. Actuaron como Jurados, los profesores, Hernando González Sierra y. Carlos Eduardo Cuéllar Santanilla, docentes adscritos al Departamento de Ciencias Naturales de la Universidad Surcolombiana.

El estudiante presentó una ilustración ante el Comité evaluador y asistentes, sobre la actividad realizada en este proyecto de grado y, entre otros, sobre los siguientes aspectos: Introducción, Planteamiento del Problema, Pregunta de Investigación, Área de Estudio, Objetivo General, Marco Teórico, Metodología, Resultados y Conclusiones.

Los jurados y asistentes realizaron algunas preguntas al Tesista, las cuales respondió satisfactoriamente y el jurado otorgó al trabajo de grado la calificación de Aprobado.



MAG. CARLOS EDUARDO CUÉLLAR SANTANILLA
Jurado



Ph.D. HERNANDO GONZALEZ SIERRA
Jurado



Ph.D. JOSÉ MIGUEL CRISTANCHO FIERRO
Jefe de Programa



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 1

Neiva, 12/10/2021

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Neiva

El suscrito:

Bryan Steven Hoyos Giraldo, con C.C. No. 1.116.267.666,

Autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado

Titulado: "Sintonización del Espectro de Transmitancia con la Salinidad del Agua de Mar en un Cristal Fotónico unidimensional" presentado y aprobado en el año 2021 como requisito para optar al título de Físico;

Autorizo al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que, con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales "open access" y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, "Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores", los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma:

Bryan Steven Hoyos

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: Sintonización de Espectro de Transmitancia con la Salinidad del Agua de Mar en un Cristal Fotónico Unidimensional

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
HOYOS GIRALDO	BRYAN STEVEN

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
SEGOVIA CHAVEZ	FRANCIS ARMANDO

ASESOR:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
SEGOVIA CHAVEZ	FRANCIS ARMANDO

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: FISICO

FACULTAD: CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

PROGRAMA O POSGRADO: FISICA

CIUDAD: NEIVA

AÑO DE PRESENTACIÓN: 2021

NÚMERO DE PÁGINAS:51

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	2 de 4
--------	--------------	---------	---	----------	------	--------	--------

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas Fotografías Grabaciones en discos ___ Ilustraciones en general ___ Grabados ___ Láminas ___
Litografías ___ Mapas ___ Música impresa ___ Planos ___ Retratos ___ Sin ilustraciones ___ Tablas o Cuadros

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento: Adobe o cualquier programa que permita visualizar PDF.

MATERIAL ANEXO:

PREMIO O DISTINCIÓN (En caso de ser LAUREADAS o Meritoria):

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

Español

Inglés

1. Cristal fotónico

1. Photonic crystal

2. Matriz de transferencia

2. Transfer matrix

3. Salinidad

3. Salinity

4. Modo defecto

4. Defect mode

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

Los cristales fotónicos (CFs) son medios periódicos que tienen como característica principal la periodicidad espacial en la constante dieléctrica. Esto hace que el cristal controle la propagación de la onda electromagnética en cierta dirección, lo cual, produce efectos que son de gran relevancia para estudiar y desarrollar aplicaciones en diferentes campos como las telecomunicaciones, ciencia, en varios campos de la ingeniería y la electrónica. En el presente trabajo, se calcula el espectro de transmitancia de un cristal fotónico unidimensional (CF-1D), utilizando el método de matriz de transferencia (MMT). El CF está formado por una modulación periódica de sílica fundida estudiado por Qiang Liu [1] en su trabajo "sensor de temperatura plasmónico de alta sensibilidad basado en fibra de CF recubierta con una película de oro a nano escala" y agua de mar estudiado por Xiaohong Quan [2] en su trabajo "ecuación empírica para el índice de refracción del agua de mar". Aplicando el MMT, para polarización transversal eléctrica (TE) y transversal magnética (TM) de igual manera como lo implementa F. Segovia [3] en su trabajo "dependencia del modo de defecto de la temperatura y el ángulo de incidencia en un CF-1D". Numéricamente se calcula la dependencia del espectro

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO

CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	3 de 4
--------	--------------	---------	---	----------	------	--------	--------

de transmitancia sobre la región visible para las diferentes concentraciones de agua de mar, temperaturas, ángulos de incidencia y espesor del defecto, en función de la longitud de la onda electromagnética que incide.

ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

Photonic crystals (PCs) are periodic media whose main characteristic is the spatial periodicity in the dielectric constant. This makes the crystal control the propagation of the electromagnetic wave in a certain direction, which produces effects that are of great relevance to study and develop applications in different fields such as telecommunications, science, in various fields of engineering and electronics. In the present work, the transmittance spectrum of a one-dimensional photonic crystal (CF1D) is calculated using the matrix transfer method (MMT). The CF is formed by a periodic modulation of fused silica studied by Qiang Liu [1] in his paper "high-sensitivity plasmonic temperature sensor based on CF fiber coated with nanoscale gold film" and seawater studied by Xiaohong Quan [2] in his paper "empirical equation for the refractive index of seawater".



DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO

CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	4 de 4
---------------	---------------------	----------------	----------	-----------------	-------------	---------------	---------------

APROBACION DE LA TESIS

Nombre Presidente Jurado:

Firma:

Nombre Jurado:

Firma:

Nombre Jurado:

Firma:

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



UNIVERSIDAD
SURCOLOMBIANA

**SINTONIZACIÓN DE ESPECTRO DE TRANSMITANCIA CON LA
SALINIDAD DE AGUA DE MAR EN UN CRISTAL FOTÓNICO
UNIDIMENSIONAL**

Bryan Steven Hoyos Giraldo

Universidad Surcolombiana
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Programa de Física
Neiva, Colombia
2021

**SINTONIZACIÓN DE ESPECTRO DE TRANSMITANCIA CON LA
SALINIDAD DE AGUA DE MAR EN UN CRISTAL FOTÓNICO
UNIDIMENSIONAL**

Bryan Steven Hoyos Giraldo

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Físico

Asesor:

Francis Armando Segovia Chaves

Línea de Investigación:

Óptica

Grupo de Investigación:

Física Teórica

Universidad Surcolombiana

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Programa de Física

Neiva, Colombia

2021

Dedicatoria

A mis padres por su apoyo incondicional durante este proceso, quienes con su esfuerzo me han dado todas las herramientas necesarias. A mi hermana y a toda mi familia por sus buenos deseos y el apoyo que me han brindado.

Agradecimientos

Agradezco a todas las personas que estuvieron brindándome su ayuda cuando lo fue necesario, a las personas que de alguna forma me colaboraron para la realización de este trabajo de grado. Principalmente quiero agradecer a mis padres, mi hermana, y mi familia por darme todo el apoyo necesario en este gran paso de mi vida. A mi asesor Francis A. Segovia Chaves, por confiar en mí, en mis capacidades, por su enseñanza y colaboración, que me permitió fortalecer mis conocimientos y me dio las pautas para la realización de este trabajo de grado. Quiero agradecer a cada uno de los profesores que me han brindado su conocimiento para mi formación, a mis compañeros que hicieron parte de este proceso de aprendizaje, y en particular al grupo de semillero Física matemática. Por último, doy gracias a la Universidad Surcolombiana, por su apoyo económico y al programa de física, por su gestión en las solicitudes realizadas.

Resumen

Los cristales fotónicos (CFs) son medios periódicos que tienen como característica principal la periodicidad espacial en la constante dieléctrica. Esto hace que el cristal controle la propagación de la onda electromagnética en cierta dirección, lo cual, produce efectos que son de gran relevancia para estudiar y desarrollar aplicaciones en diferentes campos como las telecomunicaciones, ciencia, en varios campos de la ingeniería y la electrónica.

En el presente trabajo, se calcula el espectro de transmitancia de un cristal fotónico unidimensional (CF-1D), utilizando el método de matriz de transferencia (MMT). El CF está formado por una modulación periódica de silica fundida estudiado por Qiang Liu [1] en su trabajo “sensor de temperatura plasmónico de alta sensibilidad basado en fibra de CF recubierta con una película de oro a nanoescala” y agua de mar estudiado por Xiaohong Quan [2] en su trabajo “ecuación empírica para el índice de refracción del agua de mar”. Aplicando el MMT, para polarización transversal eléctrica (TE) y transversal magnética (TM) de igual manera como lo implementa F. Segovia [3] en su trabajo “dependencia del modo de defecto de la temperatura y el ángulo de incidencia en un CF-1D”. Numéricamente se calcula la dependencia del espectro de transmitancia sobre la región visible para las diferentes concentraciones de agua de mar, temperaturas, ángulos de incidencia y espesor del defecto, en función de la longitud de la onda electromagnética que incide.

Palabras clave: Cristal fotónico, Matriz de transferencia, Salinidad, Modo defecto .

Abstract

Photonic crystals (PCs) are periodic media whose main characteristic is the spatial periodicity in the dielectric constant. This makes the crystal control the propagation of the electromagnetic wave in a certain direction, which produces effects that are of great relevance to study and develop applications in different fields such as telecommunications, science, in various fields of engineering and electronics.

In the present work, the transmittance spectrum of a one-dimensional photonic crystal (CF-1D) is calculated using the matrix transfer method (MMT). The CF is formed by a periodic modulation of fused silica studied by Qiang Liu [1] in his paper “high-sensitivity plasmonic temperature sensor based on CF fiber coated with nanoscale gold film” and seawater studied by Xiaohong Quan [2] in his paper “empirical equation for the refractive index of seawater”.

Applying the MMT, for transverse electric (TE) and transverse magnetic polarization (TM) in the same way as implemented by F. Segovia [3] in his paper “defect mode dependence on temperature and angle of incidence in a CF-1D”. Numerically, the dependence of the transmittance spectrum over the visible region is calculated for different seawater concentrations, temperatures, incident angles and defect thickness, as a function of the incident electromagnetic wavelength.

Keywords: Photonic crystal, Transfer matrix, Salinity, Defect mode.

Contenido

Resumen	IX
Lista de figuras	XIV
Lista de tablas	XVI
1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del Problema	3
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo General	3
1.2.2. Objetivos Específicos	4
2. Cristales Fotónicos	5
2.1. Cristales Fotónicos unidimensionales	6
2.2. Fundamentación Teórica y descripción de los Cristales Fotónicos	7
2.2.1. Ecuaciones de Maxwell	7
2.3. Estructura de Bandas Fotónicas	10
2.4. Defectos y Dependencia de Factores Externos	11
2.5. Método de Matriz de Transferencia	12
2.6. Matriz de Transferencia para Cristales Fotónicos Unidimensionales	13
2.7. Formulación Matricial para los Modos de Polarización TE y TM para un CF-1D	13
2.7.1. Modo de Polarización TE	14
2.7.2. Modo de Polarización TM	17
2.7.3. Matriz Característica de una Multicapa	18
3. Planteamiento y Solución del Problema	20
3.1. Resultados y Discusión	22
3.1.1. Cristal Fotónico Regular	22
3.1.2. Cristal Fotónico Defectivo	25

4. Conclusiones y Recomendaciones	27
4.1. Conclusiones	27
4.2. Recomendaciones	27
5. Participaciones y Eventos	29
Bibliografía	31

Lista de Figuras

2-1. Representación gráfica de cristales fotónicos en sus tres dimensiones. Los cristales unidimensionales 1D, son unidimensionales porque la permitividad relativa solo varia en la dirección del eje z. Los cristales bidimensionales 2D, se organizan en una red cuadrada de columnas y con una permitividad relativa o constante dieléctrica periódica en dos de las tres direcciones. Los cristales tridimensionales 3D, la estructura que se muestra se conoce como woodpile (pila de leña) en la permitividad relativa varia en las tres dimensiones. (figuras tomadas de [26])	5
2-2. A) y B): CF-1D de silicio [34,35]. C): fibra de cristal fotónico [36].	6
2-3. Estructura multicapas periódica e infinita, con capas alternadas de diferente material, índice de refracción n_1 y n_2 y espesores d_1 y d_2 respectivamente.	6
2-4. Espectro de transmitancia para un CF-1D periódico [34].	11
2-5. A): Representación de un esquema de multiplexación por longitud de onda (WDM) por una fibra óptica [45]. B): Imagen de una fibra de cristal fotónico con núcleo hueco [46].	12
2-6. Modos de polarización definidos para un CF-1D periódico [56]	14
2-7. Campo electromagnético en la frontera entre dos medios. Representación de la polarización TE [55]	15
2-8. Campo electromagnético en la frontera entre dos medios. Representación de la polarización TM [57]	17
2-9. Campo electromagnético en la frontera entre dos medios. Representación de la polarización TM [58].	18
3-1. Estructura de CF-1D defectivo.	20
3-2. Espectro de transmitancia CF-1D regular para $T = 25^{\circ}\text{C}$, $N = 15$, $d_1 = 1000\text{nm}$, $d_2 = 500\text{nm}$, $\theta = 0^{\circ}$ (línea negra), $\theta = 30^{\circ}$ (línea roja), $\theta = 60^{\circ}$ (línea azul) y $s = 0$ (a) Espectro de transmitancia polarización TE, (b) Espectro de transmitancia polarización TM.	24

-
- 3-3.** Espectro de transmitancia CF-1D regular con $s = 0$ (línea negra) y $s = 20$ (línea roja), con valores constantes $T = 25^{\circ}\text{C}$, $N = 15$, $d_1 = 1000\text{nm}$, $d_2 = 500\text{nm}$, $\theta = 0^{\circ}$ 24
- 3-4.** Espectro de transmitancia CF-1D defectivo para $T = 20^{\circ}\text{C}$ (línea negra), $T = 50^{\circ}\text{C}$ (línea roja), $T = 80^{\circ}\text{C}$ (línea azul), $N = 15$, $d_1 = d_2 = 500\text{nm}$, $d_{\mathfrak{D}} = 200\text{nm}$ $\theta = 0^{\circ}$, $s = 20$ 26
- 3-5.** Espectro de transmitancia CF-1D defectivo para $d_{\mathfrak{D}} = 100\text{nm}$ (línea negra), $d_{\mathfrak{D}} = 200\text{nm}$ (línea roja), $d_{\mathfrak{D}} = 5000\text{nm}$ (línea azul), $T = 25^{\circ}\text{C}$, $N = 15$, $d_1 = d_2 = 500\text{nm}$, $\theta = 0^{\circ}$, $s = 20$ 26

Lista de Tablas

3-1. Parámetros utilizados en el cálculo del espectro de transmitancia en un CF-1D sin defecto.	23
3-2. Parámetros utilizados en el cálculo del espectro de transmitancia en un CF-1D defectivo con variación de temperatura.	25

1. Introducción

En 1887 los primeros estudios que se registraron sobre la propagación de ondas en medios periódicos estratificados fueron realizados por Lord Rayleigh, los cuales determinan teóricamente la existencia de rangos de frecuencias de alta reflectividad hoy conocidos como bandas prohibidas ya que en los últimos siglos se ha convertido en un tema de interés tanto en la física teórica como en la experimental [4]. Con anterioridad ya se habían realizado varios estudios importantes sobre los fenómenos ondulatorios. Abelès, interesado en la respuesta óptica de sistemas de multicapas periódicos, realizó importantes contribuciones teóricas, como el método de la matriz de transferencia, redescubierto posteriormente en física cuántica [5, 6]. Entre los métodos numéricos para el tratamiento de los sistemas de multicapas, cabe destacar el modelo de modos acoplados, modelos perturbativos o de dispersión [7–9]. Durante la década de 1970, el estudio de medios periódicos unidimensionales recibió un fuerte impulso debido a la posibilidad de utilizar materiales con diversas respuestas (no lineales, anisótropos, magneto-ópticos, electro-ópticos, etc.). En las últimas décadas el avance de la fotónica ha permitido el manejo de los fotones en estructuras cristalinas a escalas nanométricas. En el año 1987 se realizaron los primeros estudios con cristales fotónicos (CFs) que surgieron por parte de Eli Yablonovitch y Sajeev Jhon mostrando que las estructuras periódicas podrían ser relevantes para una gran cantidad de estudios en la física; el reto de Yablonovitch era la inhibición de la emisión de luz espontánea, mientras que Sajeev investigaba sobre la localización fotónica y el control de la propagación de la luz [10, 11]. Muchos trabajos experimentales y teóricos han sido dedicados al estudio de las propiedades físicas de estos cristales, debido a la variación periódica del índice de refracción y la distribución espacial de la constante dieléctrica, se crean rangos de frecuencia y direcciones en las cuales la propagación de la onda electromagnética es prohibida (band gaps fotónicos) o permitida [12]. Los CFs son estructuras con propiedades dieléctricas que permiten controlar la propagación de las ondas electromagnéticas (EM) en cierta dirección. La analogía entre materiales semiconductores y cristales fotónicos surge de considerar que en un material semiconductor el electrón se ve sometido a la acción de un potencial periódico originado por la red atómica cristalina. De-

bido a este potencial periódico, la relación de dispersión del electrón exhibe una estructura de bandas de energías permitidas y prohibidas. De manera análoga, en los cristales fotónicos la distribución periódica de materiales dieléctricos modifica la relación de dispersión del fotón, generando bandas de frecuencias donde su propagación está permitida o prohibida [13].

Cuando se trata de una situación macroscópica como es el caso de la propagación de la luz que atraviesa un cristal fotónico, debemos hacer uso de las ecuaciones de Maxwell [14]. Se puede restringir dichas ecuaciones para el caso particular de una propagación a través de medios de constante dieléctrica periódica, sin cargas ni corrientes. Se considera que la constante dieléctrica del medio se mide con relación a la del vacío, esta constante dieléctrica relativa es la encargada de llevar la periodicidad espacial en el cristal; por ende, se han desarrollado varios métodos numéricos para estudiar la estructura de bandas fotónica (EBF) y el confinamiento de fotones de los CFs, como lo son: la expansión de ondas planas, diferencias finitas en el dominio de frecuencias, método de matriz de dispersión, método de matriz de transferencia, entre otros [15,17]. Los CFs son medios ópticos que tienen propiedades convenientes las cuales permiten efectuar varias aplicaciones, dependiendo de la formación estructural del cristal.

Los CFs son estructuras artificiales, al tratarse de materiales nanofotónicos produce una dificultad para su fabricación. Existen sistemas hechos de capas alternas de materiales como el Si, AlGaAs, GaAs, SiO_2 , etc [18,19]. Encontrar impurezas o defectos en un CF rompe la periodicidad de su estructura y da origen a la presencia de modos defectivos en el BFP que concede la localización o guía de la onda EM (Luz) [20]. La investigación de los cristales fotónicos se ha vuelto muy prometedora en las áreas de las telecomunicaciones y gran variedad de aplicaciones ópticas debido a la necesidad de transmitir información con una mayor velocidad y con menor pérdida de energía, cambiando así la idea actual de utilizar los electrones como los portadores de la información teniendo esta ventaja la de viajar a mayor velocidad que un electrón en un metal, transportar mayor información por segundo y su ancho de banda en los materiales dieléctricos es mayor que en los metales.

En este caso los CF son importantes en desarrollos tecnológicos y científicos, con estas estructuras se pueden fabricar filtros, laser, diodos emisores de luz, guías de onda con pérdidas bajas, guías de luz a través de circuitos ópticos y resonadores de Fabry Perot, que son de mucha importancia para los dispositivos optoelectrónicos; Además los biosensores ópticos para la detección de sustancias biológicas empleadas en la biomedicina [21–23].

En el presente trabajo de grado es empleado el método de matriz de transferencia para el cálculo numérico de la BFP en un CF unidimensional compuesto de silica fundida y agua de mar. Se introducirá un modo defecto con la salinidad del agua de mar y la concentración de salinidad de las muestras [3, 24]. Con el método de la matriz de transferencia se efectúa una representación matricial para el campo eléctrico (CE) y también para el campo magnético (CM), en la que se caracteriza la interfaz entre las capas que conforman el CF, de modo que se tiene una matriz dinámica y de propagación para cada tipo de polarización como lo implementó F. Segovia et al [24]. Por lo tanto se logró obtener el espectro de transmitancia para la polarización TE y TM del CF-1D mencionado anteriormente, además los parámetros externos aplicados como la variación del ángulo de incidencia, la temperatura y la concentración de salinidad provocan picos de resonancia en el espectro de transmitancia.

1.1. Planteamiento del Problema

Se estudia el espectro de transmitancia para un CF unidimensional compuesto de capas alternadas de silica fundida y agua de mar que ha sido estudiado por F. Segovia [24], para el desarrollo de este proyecto se implementara el método de matriz de transferencia aplicado por F. Segovia et al. [3]. De acuerdo a este planteamiento se busca estudiar el cambio del espectro de transmitancia al modificar algunos factores del índice de refracción que posee un cristal fotónico compuesto por dos materiales diferentes, para la polarización TE y TM. Así que, ¿Cual será la respuesta óptica de un CF-1D compuesto de silica fundida y agua de mar bajo los efectos que producen la variación del ángulo de incidencia, temperatura y salinidad?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Estudiar el cambio del espectro de transmitancia usando el método de la matriz de transferencia, en un CF-1D compuesto de silica fundida y agua de mar.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Determinar el espectro de transmitancia en un CF-1D regular, compuesto de capas alternadas de silica fundida y agua de mar variando el ángulo de incidencia.
- Analizar el efecto de la variación de la concentración de salinidad de las muestras en el espectro de transmitancia para un CF-1D regular, compuesto de silica fundida y agua de mar.
- Calcular el espectro de transmitancia en un CF-1D regular y defectivo, compuesto de capas alternadas de silica fundida y agua de mar utilizando el método de la matriz de transferencia.
- Investigar los efectos de la temperatura sobre el espectro de transmitancia en un CF-1D defectivo, compuesto de capas alternadas de silica fundida y agua de mar.

2. Cristales Fotónicos

Un cristal fotónico es una distribución periódica que en su estructura se conforma por átomos o moléculas. El patrón con el que se repite esta estructura atómica o molecular, manteniendo las mismas propiedades geométricas en el espacio es lo que constituye una red cristalina. El cristal tiene como característica principal la modulación de un potencial periódico que permite la propagación de un electrón, en el que las propiedades de su constante dieléctrica y su forma geométrica de red indican su dirección de propagación, de esta forma se puede producir un rango de frecuencias prohibidas, en el que no existe propagación de electrones [25]. Los cristales fotónicos son capaces de modular el flujo de luz y por lo tanto es posible localizarla en regiones específicas [10, 11], esto hace posible encontrar grandes fenómenos ópticos. Este modelo estructural se caracteriza por tener una distribución periódica en la constante dieléctrica, con una variación periódica que puede presentarse en una, dos o las tres direcciones del espacio [26] (figura 2-1).

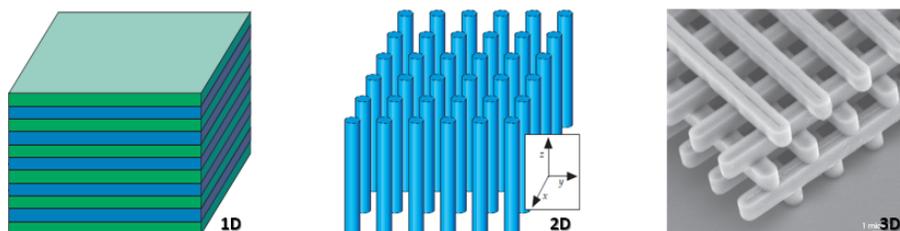


Figura 2-1: Representación gráfica de cristales fotónicos en sus tres dimensiones. Los cristales unidimensionales 1D, son unidimensionales porque la permitividad relativa solo varía en la dirección del eje z . Los cristales bidimensionales 2D, se organizan en una red cuadrada de columnas y con una permitividad relativa o constante dieléctrica periódica en dos de las tres direcciones. Los cristales tridimensionales 3D, la estructura que se muestra se conoce como woodpile (pila de leña) en la permitividad relativa varía en las tres dimensiones. (figuras tomadas de [26])

La fabricación de los cristales fotónicos es bastante compleja debido a las dimensiones nanométricas que presenta la distribución de los materiales. Regularmente los CFs se fabrican

sobre un sustrato conformado por un semiconductor o un aislante con técnicas de grabado [27–29]. Por lo tanto, la atención general se dirige a la estructura de los CF-1D por su simplicidad en el proceso de fabricación por lo que se han explorado diferentes dispositivos 1D como lo son el multiplexador [30], el resonador [31], el refractómetro [32], controlador de polarización [33], etc. Por ejemplo en la figura (2-2) muestra fotografía de CFs reales, tomado con la técnica de microscopía electrónica (SEM).

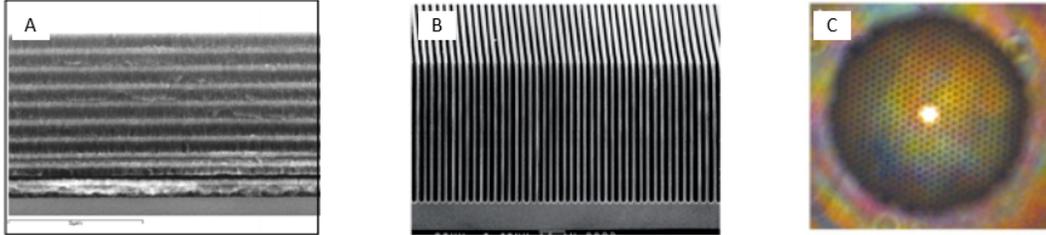


Figura 2-2: A) y B): CF-1D de silicio [34, 35]. C): fibra de cristal fotónico [36].

2.1. Cristales Fotónicos unidimensionales

Se entiende que un cristal fotónico es una estructura que posee una modulación periódica en la constante dieléctrica, en el cual, para una dimensión, su constante dieléctrica varía solamente en una dirección; por lo tanto, un cristal fotónico unidimensional es posible construirlo mediante el arreglo periódico de capas alternas de dos o más materiales distintos con diferentes constantes dieléctricas. En la figura (2-3) se muestra una representación de una estructura multicapas con índices de refracción (n) diferentes.

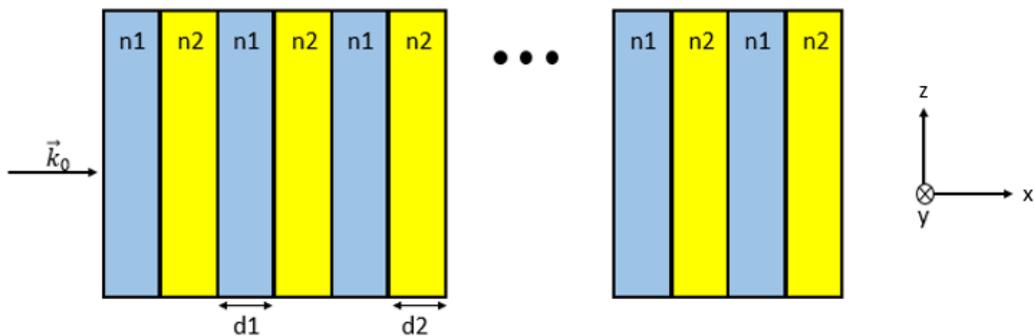


Figura 2-3: Estructura multicapas periódica e infinita, con capas alternadas de diferente material, índice de refracción n_1 y n_2 y espesores d_1 y d_2 respectivamente.

Donde \vec{k}_0 representa en vector de onda incidente y la dirección de propagación.

2.2. Fundamentación Teórica y descripción de los Cristales Fotónicos

2.2.1. Ecuaciones de Maxwell

Las ecuaciones de Maxwell describen el comportamiento del campo electromagnético, en el vacío y en la materia. Estas ecuaciones nos permiten analizar teóricamente los fenómenos físicos asociados a los cristales fotónicos.

Las ecuaciones de Maxwell se escriben como [37]:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (2-1)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{J} \quad (2-2)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \quad (2-3)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2-4)$$

Los vectores de campo están representados por \vec{E} que es el campo eléctrico, \vec{D} es el vector de desplazamiento eléctrico, \vec{H} es el campo magnético y \vec{B} es el vector de inducción magnética, ρ es la densidad de carga eléctrica y \vec{J} es el vector de densidad de corriente eléctrica.

La ecuación (2-1) hace referencia a la ley de Gauss, en la que la densidad volumétrica de carga es fuente del campo eléctrico. La ecuación (2-2) es la ley de Ampere-Maxwell, establece que se forman campos magnéticos por la variación de los campos eléctricos respecto al tiempo. La ecuación (2-3) es la ley de Faraday, la cual establece que la variación de campos magnéticos en el tiempo son fuentes de campo eléctrico y la ecuación (2-4) nos indica la inexistencia de monopolos magnéticos. Las ecuaciones de Maxwell, en medios no magnéticos, lineales, homogéneos e isótropos se complementan con las ecuaciones constitutivas:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad \vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2-5)$$

En la ecuación (2-5) ϵ es la constante dieléctrica, la cual depende de la estructura del cristal y μ es la permeabilidad magnética. Además al ser el CF una estructura periódica dieléctrica, las ecuaciones de Maxwell no tendrán densidades de carga y tampoco de corrientes, es decir, se asume una región libre de fuentes con $\rho = 0$ y $\vec{J} = 0$.

Con estas consideraciones, las ecuaciones de Maxwell quedan así:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = 0 \quad (2-6)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = 0 \quad (2-7)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \quad (2-8)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2-9)$$

Para encontrar la ecuación de onda del campo eléctrico, aplicamos el rotacional en la ecuación (2-8) y teniendo en cuenta la ecuación (2-7)

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{E} + \frac{\partial(\vec{\nabla} \times \vec{B})}{\partial t} = 0 \quad (2-10)$$

Usando propiedad vectorial ¹, se obtiene

$$\nabla^2 \vec{E}(\vec{r}, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}(\vec{r}, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (2-11)$$

¹ $\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{A}) = \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A}$

El resultado que se obtiene en (2-11), es la ecuación de onda para el campo eléctrico y de manera análoga podemos obtener la ecuación de onda para el campo magnético, aplicando la propiedad vectorial ¹ en la ecuación (2-7) y teniendo en cuenta la ecuación (2-8), se obtiene:

$$\nabla^2 \vec{H}(\vec{r}, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{H}(\vec{r}, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (2-12)$$

Las ecuaciones de Maxwell son lineales, permitiendo separar los campos como una parte espacial y otra temporal expandiéndolos en un conjunto de modos armónicos.

$$\begin{aligned} \vec{E}(\vec{r}, t) &= \vec{E}(\vec{r})e^{-i\omega t} \\ \vec{H}(\vec{r}, t) &= \vec{H}(\vec{r})e^{-i\omega t} \end{aligned} \quad (2-13)$$

Sustituyendo la ecuación (2-13) en las ecuaciones (2-12),(2-11), se obtiene las ecuaciones de onda para los campos electromagnéticos en un CF.

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{E}(\vec{r}) = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \epsilon(\vec{r})\vec{E}(\vec{r}) \quad (2-14)$$

$$\vec{\nabla} \times \left(\frac{1}{\epsilon(\vec{r})}\vec{\nabla} \times \vec{H}(\vec{r})\right) = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \vec{H}(\vec{r}) \quad (2-15)$$

Donde c es la velocidad de la luz en el vacío y se define como $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}}$. Además se define $\hat{\theta}_H$ como:

$$\hat{\theta}_H = \vec{\nabla} \times \left(\frac{1}{\epsilon(\vec{r})}\vec{\nabla} \times\right) \quad (2-16)$$

Donde $\hat{\theta}_H$ es el operador Hermítico o ecuación maestra que en electrodinámica se le conoce como el operador de Maxwell. Esta ecuación describe las características de la onda electromagnética de un CF determinado por las componentes del campo $\vec{H}(\vec{r})$ en función de la constante dieléctrica con distribución periódica que a su vez depende de los factores externos e internos del cristal [34]. Además, el operador de Maxwell satisface las ecuaciones de onda y son válidas para los modos de polarización TE y TM.

$$\epsilon(\vec{r}) = \epsilon(\vec{r} + \vec{R}) \quad (2-17)$$

Donde \vec{R} se define como el vector de red del cristal fotónico.

Además, tomando las ecuaciones (2-7), (2-8), aplicando la propiedad vectorial y sustituyendo las relaciones constitutivas para medios lineales Ec. (2-5), se obtiene las relaciones del campo eléctrico y magnético con dependencia mutua de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\vec{E}(\vec{r}) &= -\frac{i}{\omega\epsilon(\vec{r})}\vec{\nabla} \times \vec{H}(\vec{r}) \\ \vec{H}(\vec{r}) &= -\frac{i}{\omega\mu\mu_0}\vec{\nabla} \times \vec{E}(\vec{r})\end{aligned}\tag{2-18}$$

2.3. Estructura de Bandas Fotónicas

En la física de estado sólido, como también para los cristales fotónicos, existe una estructura de bandas de energía, esta describe propiedades electrónicas y ópticas de un material, la estructura de bandas está separada por regiones de energía en las que no existe propagación de electrones, esa separación entre la banda de valencia y de conducción se conoce como banda prohibida o band gap, en los cristales fotónicos estos fenómenos surgen como interferencia de las ondas electromagnéticas que se propagan en el CF [38]. Para los CFs la propagación de la luz en ciertos rangos de frecuencia están prohibidos, lo que representa una de las principales características de los cristales fotónicos. Las propiedades de la banda prohibida se pueden describir mediante el espectro de transmitancia y/o el espectro de reflectancia del cristal fotónico, además son de gran importancia para la caracterización del band gap, debido a que, proporciona la posición, el rango de frecuencia, ancho de la banda fotónica prohibida y la transmitancia (o reflectancia) de la banda. Por lo tanto, la transmitancia y el espectro de reflectancia son de gran importancia para la caracterización de la banda prohibida fotónica [34]. Por ejemplo, la figura (2-4) muestra las bandas fotónicas en un CF periódico.

La información que posee la estructura de bandas sobre el comportamiento de la onda electromagnética cuando se propaga a través del cristal fotónico es completa, con esto se pueden determinar con precisión los valores de los parámetros del cristal para sus aplicaciones en los diferentes campos de estudio. Las estructuras fotónicas que poseen una banda prohibida también se pueden encontrar en la naturaleza y explican la diversidad de colores que poseen algunos animales [39].

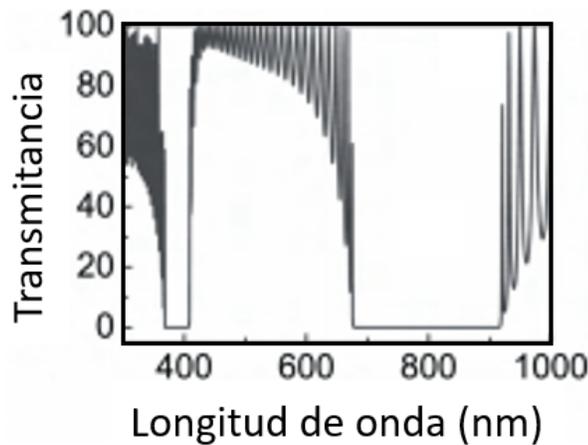


Figura 2-4: Espectro de transmitancia para un CF-1D periódico [34].

2.4. Defectos y Dependencia de Factores Externos

La modificación de la estructura periódica, provoca diferentes efectos dentro del cristal fotónico, es decir, cuando se introducen defectos que interrumpen la periodicidad del cristal, se produce la localización de nuevos modos electromagnéticos dentro de la estructura de banda fotónica, el cual se localiza en la banda fotónica prohibida (BFP), lo que permite confinar o guiar la luz. Los defectos se introducen en el cristal fotónico cambiando los parámetros de su estructura cristalina original insertando otro dieléctrico a su estructura, eliminando una capa del cristal o cambiando el espesor de las capas. [40, 41]

La posibilidad de sintonizar la onda electromagnética en los cristales fotónicos debido a los defectos en su estructura cristalina, hace que los fotones viajen a través del cristal con una frecuencia que puede estar restringida en algunas regiones [42]. Esto permite su implementación en filtros sintonizables lo que es importante en la multiplexación por división de longitud de onda de sistemas de comunicación óptica [43, 44]. La multiplexación es una tecnología que permite transmitir varias señales independientes sobre una sola fibra óptica figura (2-5), cuya eficiencia es mayor que una fibra convencional [45]

Por otro lado, los cristales fotónicos son sensibles a los cambios de su estructura cristalina, es decir, cuando se cambian las condiciones que se aplican externamente a la constante dieléctrica, tales como el ángulo de incidencia, la temperatura, la presión hidrostática, los campos eléctricos y magnéticos, lo que posibilita la sintonización de la estructura de bandas fotónica [47–49]. Aunque, tales variaciones dependen esencialmente del material que se está utilizando, ya que los resultados son obtenidos experimentalmente. En nuestro caso

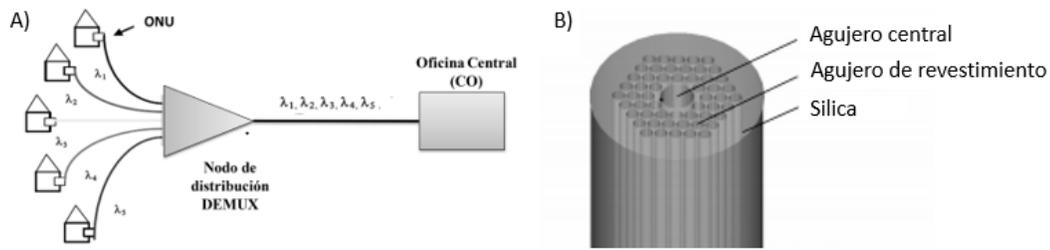


Figura 2-5: A): Representación de un esquema de multiplexación por longitud de onda (WDM) por una fibra óptica [45]. B): Imagen de una fibra de cristal fotónico con núcleo hueco [46].

estudiaremos el comportamiento de nuestro cristal fotónico formado por silica fundida y agua de mar, bajo los efectos de la temperatura, ángulo de incidencia y concentración de salinidad. [1, 2, 50]

2.5. Método de Matriz de Transferencia

Los métodos numéricos son aplicaciones de algoritmos que nos permite realizar análisis matemáticos extensos y en ocasiones difíciles de solucionar analíticamente; es de gran utilidad en todos los campos de la física y la ingeniería. En el presente capítulo abordaremos el método de la matriz de transferencia (MMT) que se puede utilizar para realizar el análisis de la propagación de ondas o partículas, electrones cuando se trata de casos cuánticos, ondas acústicas, ondas elásticas y ondas electromagnéticas en el campo de la óptica, en nuestro caso, esta técnica es desarrollada para una onda electromagnética plana monocromática por lo tanto, se determina bajo las ecuaciones de Maxwell ². El método será empleado para calcular numéricamente el espectro de transmitancia en un CF-1D. [51–54]

Este método matricial se aplica a una estructura multicapa que se compone de capas homogéneas e isotrópicas, con caras planas y paralelas [55]. El índice de refracción varía en magnitud de una capa a la otra, debido a que las amplitudes de las ondas se escriben del lado izquierdo del potencial en términos de las del lado derecho, lo cual define la matriz de transferencia M . La matriz de transferencia es una matriz 2×2 ; una vez calculada la matriz de transferencia para un potencial, esta se puede calcular analíticamente para N potenciales idénticos. Por lo tanto al aumentar la cantidad de potenciales las ondas viajeras crean bandas, mientras que las ondas estacionarias crean gaps en el espectro de energía del sistema [53].

²Ver capítulo 2.2.1

2.6. Matriz de Transferencia para Cristales Fotónicos Unidimensionales

En el presente trabajo se implementa el MMT, el cual consisten en describir la interfaz capa por capa que conforma el CF-1D, por lo tanto, se tiene una matriz llamada matriz dinámica, la cual brinda información de la onda electromagnética al atravesar de una capa a la otra. Además, las capas que conforman el cristal poseen un espesor, donde las ondas se transmiten por la interfaz de propagación, presentan un cambio de fase en la dirección de propagación, este cambio de fase se representa matricialmente con una matriz llamada matriz de propagación, por lo tanto, para representar matricialmente el sistema multicapas o el CF-1D se construye una matriz general de la siguiente manera:

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = D_0^{-1} \prod_{l=1}^N M_l D_0 \quad (2-19)$$

Donde M es la matriz de transferencia del cristal fotónico. Como nuestro CF está cubierto de aire, se tiene que D_0 es la matriz dinámica para el aire y M_l es la matriz de transferencia que caracteriza cada capa del cristal y se define de la siguiente manera:

$$M_l = D_l P_l D_l^{-1} \quad (2-20)$$

Por lo tanto M_l se compone de la matriz dinámica D_l y la matriz de propagación P_l , que serán determinadas en la siguiente sección, donde se estudia la formulación matricial para los modos de polarización TE y TM.

2.7. Formulación Matricial para los Modos de Polarización TE y TM para un CF-1D

Debido a que la matriz dinámica y la matriz de propagación dependen de la constante dieléctrica y de la polarización que presenta la onda electromagnética incidente, se modifican las expresiones matriciales en la matriz de transferencia dependiendo del modo de polarización. Ver figura (2-6)

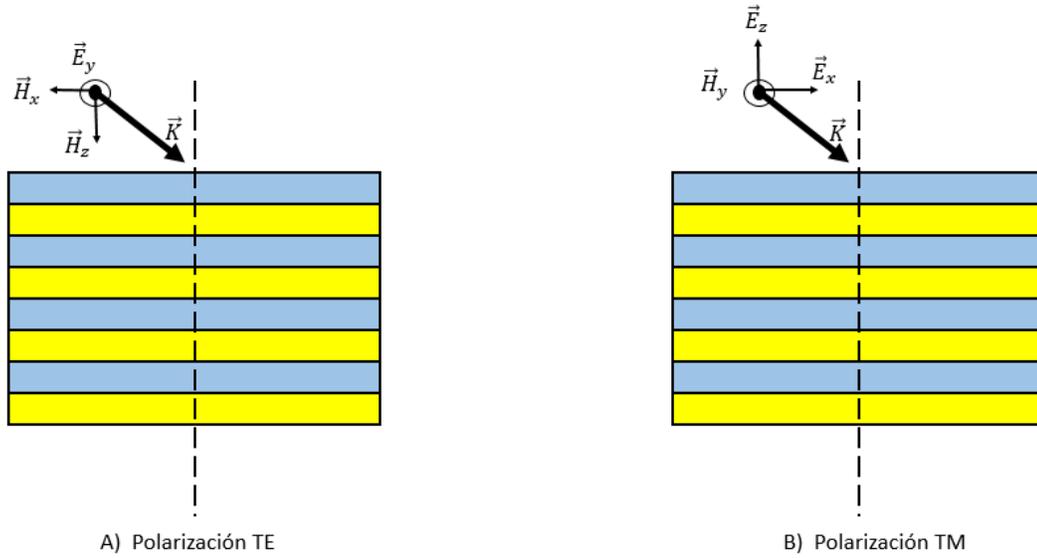


Figura 2-6: Modos de polarización definidos para un CF-1D periódico [56]

La polarización del campo electromagnético provoca un cambio en las expresiones matriciales para la matriz de transferencia, por lo tanto, se estudiará de forma independiente cada modo de polarización.

2.7.1. Modo de Polarización TE

La onda electromagnética incide sobre dos medios diferentes, en el que el vector de onda \vec{k}_0 indica la dirección en la que se propaga la onda. El campo eléctrico es perpendicular a la dirección de propagación. Ver figura (2-7)

En la figura (2-7), el campo eléctrico es perpendicular al plano y se representa con la ecuación de onda E_y que se desplaza en x , donde se definen los sentidos de propagación, de izquierda a derecha es positivo (+ x) y de derecha a izquierda es negativo (- x). por lo tanto la ecuación de onda que describe las trayectorias es (se escribe como Cabrera, [55]):

$$E_y = E_d(x)e^{ik_{jx}x} + E_i(x)e^{-ik_{jx}x} = A(x) + B(x) \quad (2-21)$$

Donde $j = 1, 2$ que se refiere a los medios 1 y 2, y homogeneizando la ecuación (2-21) con las condiciones de varias fronteras, se tiene que $E_d(x)e^{ik_{jx}x} = A(x)$ es la onda que viaja de izquierda a derecha y $E_i(x)e^{-ik_{jx}x} = B(x)$ es la onda que viaja de derecha a izquierda. Por lo tanto, para especificar los campos en cada medio se tiene en cuenta la siguiente notación.

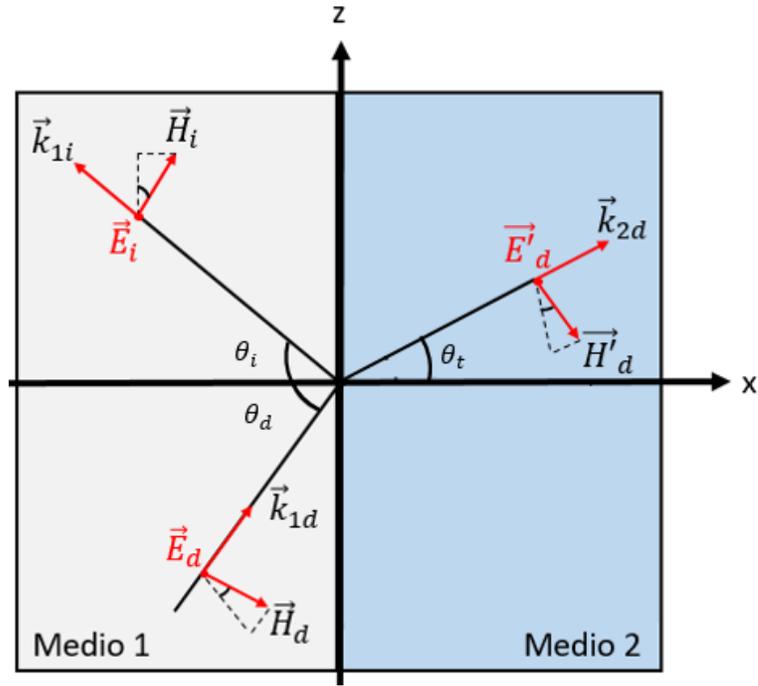


Figura 2-7: Campo electromagnético en la frontera entre dos medios. Representación de la polarización TE [55]

$$\begin{aligned}
 A_1 &= A(0^-) \\
 B_1 &= B(0^-) \\
 A'_2 &= A(0^+) \\
 B'_2 &= B(0^+)
 \end{aligned}
 \tag{2-22}$$

Aplicando las condiciones de frontera para el campo eléctrico con polarización TE.

$$A_1 + B_1 = A'_2 + B'_2 \tag{2-23}$$

Partiendo de la ecuación (2-18) en la que se representa el campo magnético en términos del campo eléctrico, en la que las condiciones de frontera del campo magnético impone que las componentes z deben conservarse [56].

$$\begin{aligned}
 \vec{H}_{(\vec{r})} &= -\frac{i}{\omega\mu\mu_0} \vec{\nabla} \times \vec{E}_{(\vec{r})} = -\frac{i}{\omega\mu\mu_0} \left[0, 0, \frac{\partial E_y}{\partial x} \right] \\
 \vec{H}_{(\vec{r})} &= -\frac{i}{\omega\mu\mu_0} \frac{\partial E_y}{\partial x}
 \end{aligned}
 \tag{2-24}$$

Resolviendo las derivadas correspondientes para las fronteras de campo eléctrico, se obtiene el campo magnético y además aplicando las condiciones de continuidad para la parte real se tiene que el campo magnético es:

$$\vec{H}_1 = \vec{H}'_2 \quad (2-25)$$

Reemplazando en la ecuación (2-23) se obtiene:

$$\frac{[A_1(x) - B_1(x)]k_{jx}}{\omega\mu_1\mu_0} = \frac{[A'_2(x) - B'_2(x)]k_{jx}}{\omega\mu_2\mu_0} \quad (2-26)$$

Donde el vector de onda \vec{k} yace en el plano xz, así

$$\vec{k}_j = [\vec{k}_{jx}, 0, \vec{k}_{jz}] = \frac{\omega n_j}{c} [\cos\theta_j, 0, \sin\theta_j] \quad (2-27)$$

Donde \vec{k}_{jx} es la componente x del vector de onda, dada por:

$$\vec{k}_{jx} = \frac{\omega n_j}{c} \cos\theta_j \quad (2-28)$$

Reemplazando la ecuación (2-28) en (2-26), se determina las relaciones de continuidad para el campo magnético.

$$\frac{[A_1(x) - B_1(x)]\omega n_1 \cos\theta_1}{c\omega\mu_1\mu_0} = \frac{[A'_2(x) - B'_2(x)]\omega n_2 \cos\theta_2}{c\omega\mu_2\mu_0} \quad (2-29)$$

Simplificando la expresión y teniendo en cuenta que los medios son no magnéticos en el que la permeabilidad $\mu_0 = 1$, $n_j = \sqrt{\frac{\epsilon_j}{\mu_j}}$ y $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_j\mu_j}}$ se obtiene:

$$[A_1(x) - B_1(x)]n_1 \cos\theta_1 = [A'_2(x) - B'_2(x)]n_2 \cos\theta_2 \quad (2-30)$$

Por ultimo, podemos escribir en forma matricial las ecuaciones (2-23) y (2-30) de la siguiente forma:

$$D_1 \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{bmatrix} = D_2 \begin{bmatrix} A'_2 \\ B'_2 \end{bmatrix} \quad (2-31)$$

Por lo tanto, se define la matriz dinámica para TE en un medio j ($j = 1, 2$) como:

$$D_j = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ n_j \cos \theta_j & n_j \cos \theta_j \end{bmatrix} \quad (2-32)$$

2.7.2. Modo de Polarización TM

De forma análoga al caso TE, se puede obtener las relaciones equivalentes para la polarización TM. Teniendo en cuenta las componentes de la onda incidente de los campos E y H, reflejada y transmitida para el caso de polarización paralela al plano de incidencia, en el que el campo magnético no tiene ninguna componente en la dirección de propagación [57], como se ve en la figura (2-8)

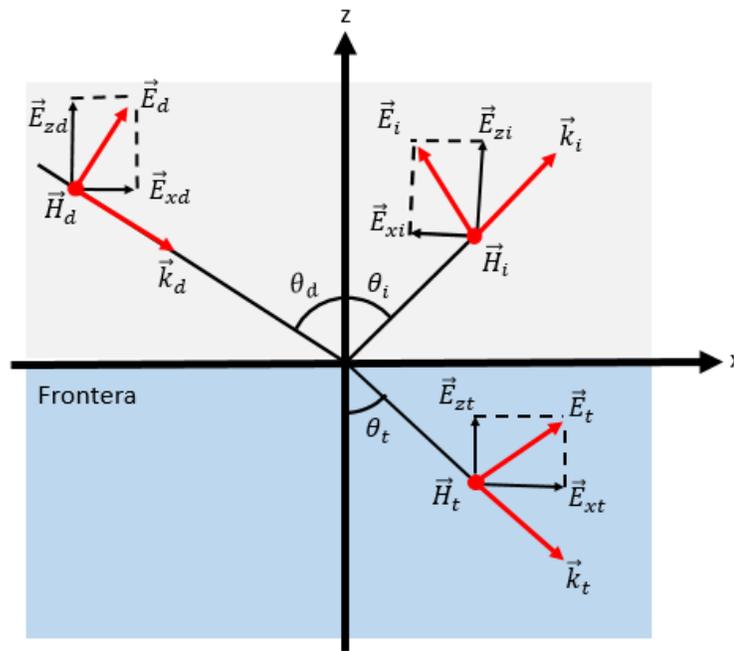


Figura 2-8: Campo electromagnético en la frontera entre dos medios. Representación de la polarización TM [57]

Siguiendo el procedimiento descrito anteriormente para la polarización TE, la matriz dinámica para la polarización TM viene dada por:

$$D_j = \begin{bmatrix} -\cos \theta_j & \cos \theta_j \\ n_j & n_j \end{bmatrix} \quad (2-33)$$

2.7.3. Matriz Característica de una Multicapa

Este método se centra en conectar las amplitudes de la onda incidente y la onda reflejada en una capa, con las amplitudes de la interfaz posterior, por medio de las condiciones de continuidad del campo electromagnético en cada una de las capas que conforman la estructura periódica [51]. En las secciones anteriores se determinaron las matrices dinámicas para los modos de polarización TE y TM, la cual caracteriza las amplitudes de la onda al paso por las fronteras de la estructura multicapa de diferentes medios dieléctricos. Ahora en esta sección se estudiará el cambio de fase en cada capa que sufre la onda a lo largo de la dirección de propagación x como se representa en la figura (2-9)

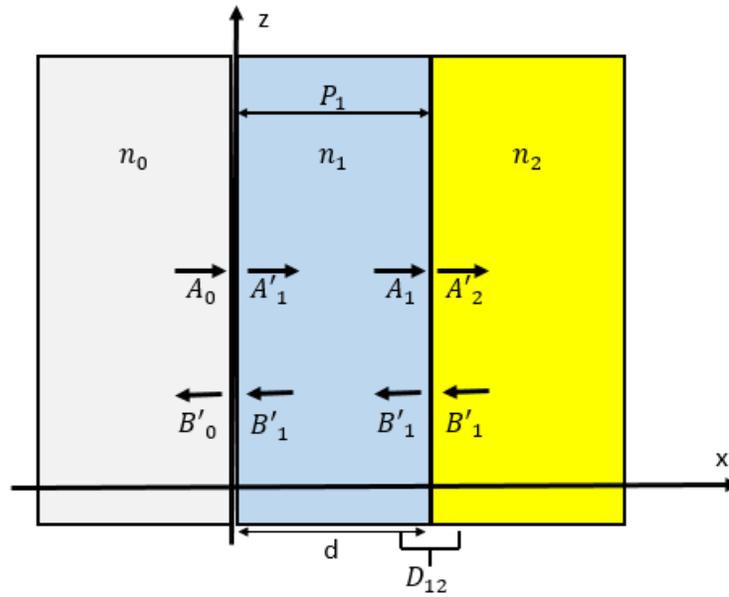


Figura 2-9: Campo electromagnético en la frontera entre dos medios. Representación de la polarización TM [58].

Al introducir los espesores (d) de las capas en un medio j , se produce un cambio de fase donde las ondas que se transmiten por la interfaz de propagación sufren dicho cambio. Este cambio de fase se representa de la siguiente manera:

$$\phi_j = \vec{k}_{jx} d_j \quad (2-34)$$

La ecuación (2-34), es positiva cuando la onda se propaga de izquierda a derecha y negativa en sentido contrario, de derecha a izquierda y d representa el espesor de los medios j que conforman la estructura periódica. El cambio de fase se puede representar de forma matricial, mediante una matriz de propagación así:

$$P_j = \begin{bmatrix} e^{i\phi_j} & 0 \\ 0 & e^{-i\phi_j} \end{bmatrix} \quad (2-35)$$

Por lo tanto, la matriz que describe la figura (**2-9**), viene dada por:

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} = D_0^{-1} D_1 P_1 D_1^{-1} D_2 \quad (2-36)$$

La ecuación (2-36), es la matriz característica de una película. Así mismo se puede proceder para cuando se extiende a una estructura multicapas.

Con la matriz M de la ecuación (2-36) se puede obtener el espectro de transmitancia, con los elementos m_{11} de la matriz, así

$$\tau = \left| \frac{1}{m_{11}} \right|^2 \quad (2-37)$$

Normalmente, las propiedades de la banda prohibida fotónica se pueden caracterizar mediante el uso de relaciones de dispersión, espectro de transmitancia y espectro de reflectancia del cristal fotónico. Para nuestro estudio la banda prohibida se caracteriza mediante la transmitancia [34]. El espectro de transmitancia nos brinda la información de la posición, el rango de frecuencia y el tamaño de la banda fotónica prohibida [59].

3. Planteamiento y Solución del Problema

Teniendo en cuenta el sistema descrito en las secciones anteriores para un CF-1D, consideramos una estructura periódica que tiene un medio de entrada y salida de aire en la que el medio 1 está compuesto por silica fundida y el medio 2 es agua de mar. A esta estructura se le adicionará una capa defectiva ver figura **3-1**, donde el defecto introducido consiste en adicionar una capa defectiva rellena por agua de mar D , que será estudiada mediante el método de la matriz de transferencia para estudiar y analizar el cristal defectivo, estudiado por F. Segovia en su trabajo “Transmittance spectrum in a 1D photonic crystal composed fused silica and sea water” [24]. También se tendrá en cuenta factores externos de cada material, temperatura, espesor, ángulo de incidencia de la onda electromagnética y la variación de la concentración de salinidad de las muestras.

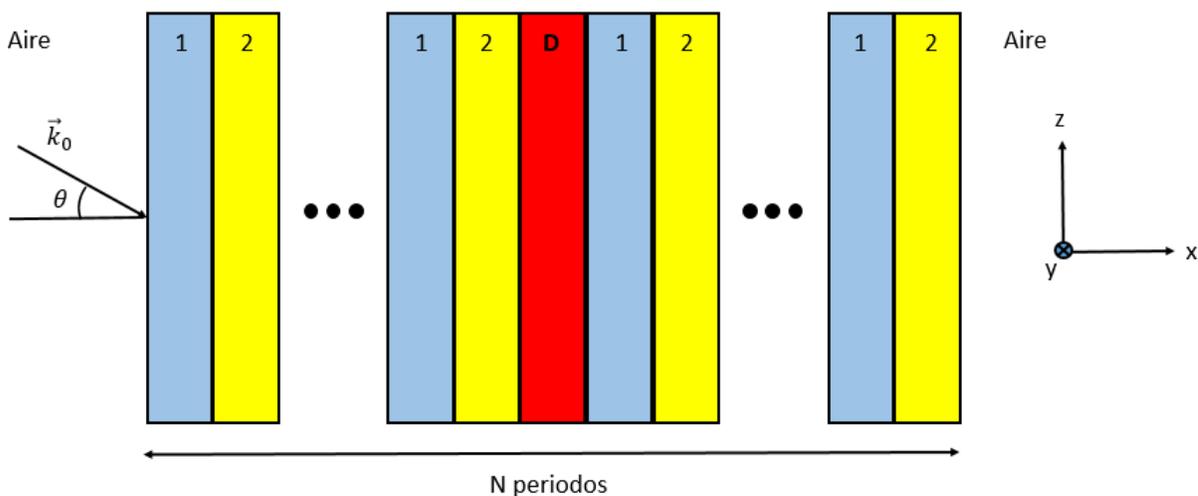


Figura 3-1: Estructura de CF-1D defectivo.

En el que la silica fundida está representada por el medio 1, su índice de refracción está dado en función de la longitud de onda (λ) y la temperatura (T) [1], que viene dado por la

siguiente formula:

$$n_1^2(\lambda, T) = (1.31552 + 6.90754 \times 10^{-6}T) + \frac{(0.788404 + 23.5835 \times 10^{-6}T)\lambda^2}{\lambda^2 - (0.0110199 + 0.584758 \times 10^{-6}T)} + \frac{(0.91316 + 0.548368 \times 10^{-6}T)\lambda^2}{\lambda^2 - 100} \quad (3-1)$$

El medio dos representa el agua de mar y su índice de refracción esta dado en función de la salinidad (s), longitud de onda (λ) y la temperatura (T) [2], viene dado por la siguiente formula

$$n_2(s, \lambda, T) = 1.3140 + (1.779 \times 10^{-4} - 1.05 \times 10^{-6}T + 1.6 \times 10^{-8}T^2)s - 2.025835 \times 10^{-6}T^2 + \frac{15.868 + 0.01155s - 0.00423T}{\lambda} - \frac{4382}{\lambda^2} + \frac{1.1455 \times 10^{-6}}{\lambda^3} \quad (3-2)$$

Por otra parte se define la matriz de transferencia para la solución del cristal fotónico con defecto de la figura (3-1):

$$M = D_A^{-1}[D_1 P_1 D_1^{-1} D_2 P_2 D_2^{-1}]^N D_{\mathfrak{D}} P_{\mathfrak{D}} D_{\mathfrak{D}}^{-1} [D_1 P_1 D_1^{-1} D_2 P_2 D_2^{-1}]^N D_a \quad (3-3)$$

Donde D_A representa la matriz dinámica del aire, D_1 y P_1 son la matriz dinámica y la matriz de propagación para el medio 1 (silica fundida), así mismo para el medio 2 (agua de mar) D_2 y P_2 y las matrices dinámica y de propagación para el medio defectivo se representan por $D_{\mathfrak{D}}$ y $P_{\mathfrak{D}}$, estas matrices fueron determinadas en el capítulo 3; por ultimo N, representa el número total de bicapas.

A continuación, se realizara la representación matricial de la ecuación (3-3).

$$\begin{aligned}
M = & \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2n_A \cos \theta_A} \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{2n_A \cos \theta_A} \end{bmatrix} \left[\begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2n_1 \cos \theta_1} \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{2n_1 \cos \theta_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{i\phi_1} & 0 \\ 0 & e^{-i\phi_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2n_1 \cos \theta_1} \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{2n_1 \cos \theta_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ n_2 \cos \theta_2 & -n_2 \cos \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{i\phi_2} & 0 \\ 0 & e^{-i\phi_2} \end{bmatrix} \right. \\
& \left. \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2n_2 \cos \theta_2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{2n_2 \cos \theta_2} \end{bmatrix} \right]^N \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ n_2 \cos \theta_2 & -n_2 \cos \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{i\phi_D} & 0 \\ 0 & e^{-i\phi_D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2n_2 \cos \theta_2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{2n_2 \cos \theta_2} \end{bmatrix} \left[\begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2n_1 \cos \theta_1} \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{2n_1 \cos \theta_1} \end{bmatrix} \right. \\
& \left. \begin{bmatrix} e^{i\phi_1} & 0 \\ 0 & e^{-i\phi_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2n_1 \cos \theta_1} \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{2n_1 \cos \theta_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ n_2 \cos \theta_2 & -n_2 \cos \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{i\phi_2} & 0 \\ 0 & e^{-i\phi_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2n_2 \cos \theta_2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{2n_2 \cos \theta_2} \end{bmatrix} \right]^N \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2n_A \cos \theta_A} \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{2n_A \cos \theta_A} \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3-4}$$

En la ecuación (3-4), se representa la forma matricial de la ecuación (3-3). Por otro lado, la construcción de la matriz de transferencia para la polarización TM se determina de igual forma que la polarización TE. Por último el espectro de transmitancia se determina mediante la ecuación (3-4), para un rango de longitud de onda λ de $600nm$ a $950nm$, este intervalo de longitud de onda se encuentra dentro del espectro de luz visible e infrarrojo.

$$\tau = \left| \frac{1}{m_{11}} \right|^2 \tag{3-5}$$

3.1. Resultados y Discusión

En este capítulo, se presentarán los resultados obtenidos al realizar un análisis computacional de la ecuación (2-19) para un CF-1D regular y la ecuación (3-3) para un CF-1D con defecto, para encontrar de forma teórica la sintonización del espectro de transmitancia, el cristal trabajado tendrá variaciones en el ángulo de incidencia, temperatura, salinidad y espesor de la muestra. Para nuestro análisis numérico se escogen los valores del ángulo de incidencia, la temperatura y el espesor de la muestra. Con un índice de refracción para el aire, constante e independiente de las variaciones de temperatura.

3.1.1. Cristal Fotónico Regular

Para el primer estudio que se realiza, se toma el CF-1D regular con los siguientes parámetros constantes, ver tabla (3-1)

Tabla 3-1: Parámetros utilizados en el cálculo del espectro de transmitancia en un CF-1D sin defecto.

	Símbolo	Valor
Índice de refracción del aire	n_A	1
Temperatura	T	25°C
Grosor de la capa medio 1	d_1	1000nm
Grosor de la capa medio 2	d_2	500nm
Numero de bicapas	N	15

En la figura (3-2) se muestra el efecto del espectro de transmitancia que se obtiene con la variación de la onda electromagnética incidente sobre la estructura periódica regular (sin defecto) con los parámetros de la tabla (3-1). El estudio se ha realizado para la polarización TE y TM, y a medida que se aumenta del ángulo de incidencia de 0^0 , 30^0 y 60^0 el espectro de transmitancia cambia dependiendo de la polarización. En la figura ((3-2)a) cuando se aumenta el ángulo de incidencia se presenta un corrimiento hacia longitudes de onda más cortas que se ubican dentro de la región del infrarrojo, el tamaño del gap fotónico crece linealmente, restringiendo la propagación de fotones a longitudes de onda menores, para la figura ((3-2)b) la banda prohibida disminuye a medida que aumenta el ángulo de incidencia aumenta, además, por lo que se deduce que el espectro de transmitancia para la polarización TM es inversamente proporcional a la variación del ángulo de incidencia. Los máximos y mínimos de la resonancia son producidos por interferencia constructiva y destructiva de la luz reflejada al atravesar las capas del cristal.

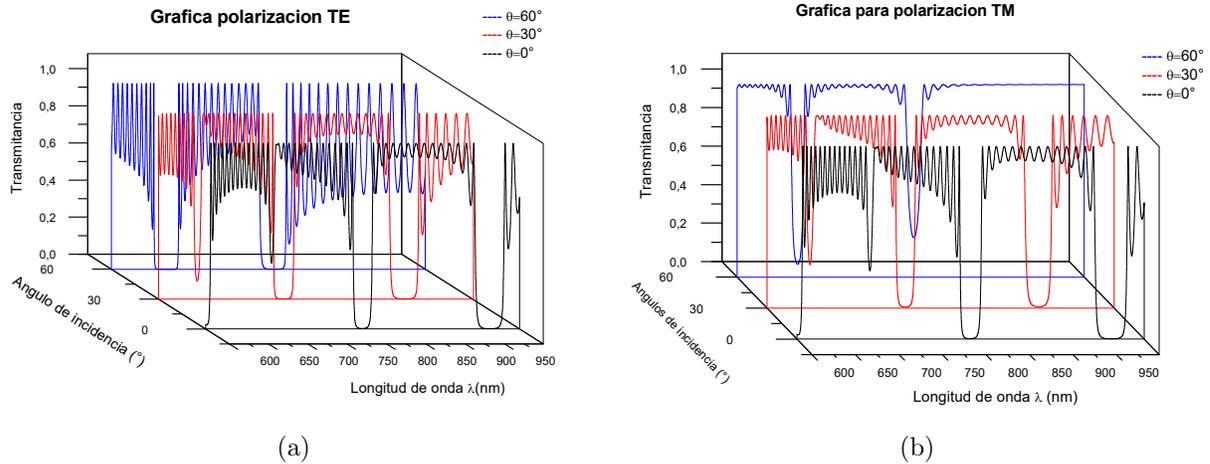


Figura 3-2: Espectro de transmitancia CF-1D regular para $T = 25^{\circ}\text{C}$, $N = 15$, $d_1 = 1000\text{nm}$, $d_2 = 500\text{nm}$, $\theta = 0^{\circ}$ (línea negra), $\theta = 30^{\circ}$ (línea roja), $\theta = 60^{\circ}$ (línea azul) y $s = 0$ (a) Espectro de transmitancia polarización TE, (b) Espectro de transmitancia polarización TM.

En la figura (3-3) Al aumentar la concentración de salinidad de $s = 0$ a $s = 20$ y teniendo constantes los parámetros de la tabla (3-1) y a incidencia normal, se tiene un resultado muy similar a la figura ((3-2)a) en la que se presenta un corrimiento en la longitud de onda. Los espectros de transmitancia se encuentran en las regiones de 720.35nm (línea roja) a 789.55nm (línea negra) y 880.42nm (línea roja) y $942,50\text{nm}$ (línea roja).

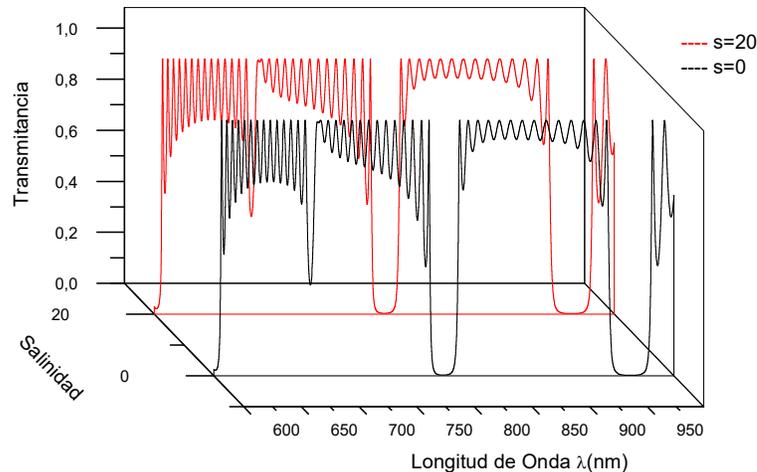


Figura 3-3: Espectro de transmitancia CF-1D regular con $s = 0$ (línea negra) y $s = 20$ (línea roja), con valores constantes $T = 25^{\circ}\text{C}$, $N = 15$, $d_1 = 1000\text{nm}$, $d_2 = 500\text{nm}$, $\theta = 0^{\circ}$.

3.1.2. Cristal Fotónico Defectivo

Ahora consideramos un CF-1D defectivo, en el que se toma un ángulo de incidencia normal, es decir, $\theta = 0^0$, en este caso se determina el espectro de transmitancia variando factores internos y externos del CF-1D para el modo de polarización TE y TM, sin embargo, se presenta una igualdad en el espectro cuando la incidencia es normal, por lo tanto no se tendrá en cuenta los resultados para la polarización TM. Cuando se rompe la periodicidad del cristal introduciendo una capa de agua de mar con espesor d_D , se crea un pico de resonancia dentro del band gap, que se conoce como modo defecto. La figura (3-4) representa el espectro de transmitancia para el cristal defectivo, en el que se varia la temperatura y se mantiene constante los siguientes parámetros, ver tabla (3-2).

Tabla 3-2: Parámetros utilizados en el cálculo del espectro de transmitancia en un CF-1D defectivo con variación de temperatura.

	Símbolo	Valor
Salinidad	s	20
Grosor de la capa medio 1	d_1	500nm
Grosor de la capa medio 2	d_2	500nm
Grosor de la capa medio D	d_D	200nm
Numero de bicapas	N	15

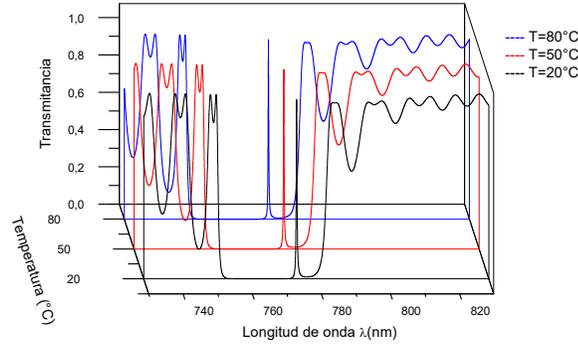


Figura 3-4: Espectro de transmitancia CF-1D defectivo para $T = 20^{\circ}\text{C}$ (línea negra), $T = 50^{\circ}\text{C}$ (línea roja), $T = 80^{\circ}\text{C}$ (línea azul), $N = 15$, $d_1 = d_2 = 500\text{nm}$, $d_{\mathfrak{D}} = 200\text{nm}$, $\theta = 0^{\circ}$, $s = 20$.

En el interior del gap fotónico se encuentra un pico de resonancia con una transmitancia de 0,97268 y se ubica en un rango de $776\text{nm} - 766\text{nm}$. Con el aumento de la temperatura, el modo defectivo varia a longitudes de onda más cortas. Por ultimo abordamos el efecto que tiene la variación del espesor en la capa defectiva del CF-1D, en el que se toman los parámetros constantes de $T = 25^{\circ}\text{C}$, espesores $d_1 = d_2 = 500\text{nm}$ y salinidad $s = 20$ ver figura (3-5).

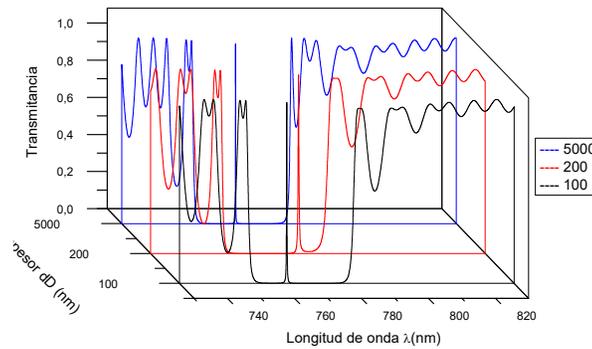


Figura 3-5: Espectro de transmitancia CF-1D defectivo para $d_{\mathfrak{D}} = 100\text{nm}$ (línea negra), $d_{\mathfrak{D}} = 200\text{nm}$ (línea roja), $d_{\mathfrak{D}} = 5000\text{nm}$ (línea azul), $T = 25^{\circ}\text{C}$, $N = 15$, $d_1 = d_2 = 500\text{nm}$, $\theta = 0^{\circ}$, $s = 20$.

Al incrementar el espesor del defecto el pico de resonancia se va corriendo a longitudes de onda más grandes, entre más grande sea el espesor del defecto, se demuestra que en el interior del gap aumenta el número de picos de resonancia, ver (línea azul).

4. Conclusiones y Recomendaciones

4.1. Conclusiones

Mediante el método de matriz de transferencia se calcula numéricamente el espectro de transmitancia para los modos de polarización TE y TM en un CF-1D compuesto de silica fundida y agua de mar.

Al romper la periodicidad del cristal se forman picos de resonancia dentro del gap fotónico, el cual a medida que aumenta la temperatura presenta corrimientos hacia longitudes de ondas más cortas.

Al aumentar el grosor de la capa defectiva, se incrementan los modos al interior de la banda fotónica, mientras que el tamaño del gap no cambia.

La revisión de los datos obtenidos para la polarización TE y TM nos conlleva a que cuando el cristal está a una incidencia normal, es decir, la onda incidente tiene un ángulo $\theta = 0^\circ$ el espectro de transmitancia es igual para los modos de polarización. Pero cuando se varía el ángulo de incidencia los gaps que se forman en los modos TE y TM tienen un corrimiento a longitudes de onda más cortas.

4.2. Recomendaciones

Se recomienda extender el cálculo del espectro de transmitancia en una estructura bidimensional y tridimensional, debido a que la mayor parte de las aplicaciones ópticas son posibles en sistemas multidireccionales. También se recomienda ampliar el estudio de las propiedades cristalinas del agua de mar ya que es un tema del que se tiene poca literatura. Igualmente, se recomienda abarcar estudios particulares con el fin de obtener filtros o sensores con frecuencias específicas.

5. Participaciones y Eventos



CERTIFICA QUE

Bryan S. Hoyos G., F. Segovia

participaron en la modalidad mural con el trabajo “**Sintonización de espectro de transmitancia con la salinidad de agua de mar en un cristal fotónico unidimensional**” en el XXVIII Congreso Nacional de Física llevado a cabo en el Centro de Convenciones de la ciudad de Armenia, durante los días comprendidos entre el 9 y el 12 de septiembre de 2019.



HERNANDO ARIZA CALDERÓN
Director XXVIII
Congreso Nacional de Física



Bibliografía

- [1] Q. Liu, S. Li, H. Chen, J. Li, Z. Fan, High-sensitivity plasmonic temperature sensor based on photonic crystal fiber coated with nanoscale gold film, *Appl. Phys. Exp.* 8 (2015) 046701.
- [2] X. Quan, E. Fry, Empirical equation for the index of refraction of seawater, *Appl. Optics* 34 (1995) 3477.
- [3] Francis Segovia-Chaves, Herbert Vinck-Posada (2018). Dependence of the defect mode on the temperature and the angle of incidence in a one-dimensional photonic crystal. *Optik*, 163, 16-21.
- [4] J. W. Strutt (Lord Rayleigh) (1887), On the Maintenance of Vibrations by Forces of Double Frequency, and on the Propagation of Waves Through a Medium Endowed with a Periodic Structure, *Phil. Mag.*, S.5, 24, 145-59.
- [5] F. Abelès (1950), Recherches sur la propagation des ondes électromagnétiques sinusoidales dans les milieux stratifiés, *Ann. Phys. (Paris)* 5, 706782.
- [6] D. J. Griffiths (2001), C. A. Steinke, Waves in locally periodic media, *Am. J. Phys.* 69, 137-154.
- [7] D. L. Jaggard, C. Elachi (1976), Floquet and coupled-waves analysis of higher-order Bragg coupling in a periodic medium, *J. Opt. Soc. Am.* 66, 674-682.
- [8] A. H. Nayfer (1981), *Introduction to Perturbation Techniques*, Wiley New York.
- [9] D. Ager, H. P. Hughes (1991), Optical properties of stratified systems including lamellar gratings, *Phys. Rev. B* 44, 13452-13465.
- [10] E. Yablanovitch (1987). Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics, *Phys. Rev. Lett.* 58 2059.

-
- [11] John, S. (1987). Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices. *Physical Review Letters*, 58(23), 2486.
- [12] J. D. Joannopoulos et al., *Photonic Crystals, (1995): Molding the Flow of Light*, (Princeton University Press, Princeton).
- [13] Otfried Madelung. *Introduction to Solid State Theory*. Springer, 3 edition, 1996.
- [14] Maxwell, J. C. (1873). *A treatise on electricity and magnetism (Vol. 1)*. Oxford: Clarendon Press.
- [15] Danner, A. J. (2002). *An introduction to the plane wave expansion method for calculating photonic crystal band diagrams*. University of Illinois.
- [16] Vasco, J. P., & Vinck-Posada, H. (2010). Método de diferencias finitas en el dominio de las frecuencias para cristales fotónicos 1D y 2D. *Tecnológicas*, (24), 125-141.
- [17] Li, Z. Y., & Lin, L. L. (2003). Photonic band structures solved by a plane-wave-base transfer-matrix method. *Physical Review E*, 67(4), 046607.
- [18] Inoue, K., & Ohtaka, K. (Eds.). (2013). *Photonic crystals: physics, fabrication and applications (Vol. 94)*. Springer.
- [19] López, C. (2003). Aspectos materiales de cristales fotónicos. *Materiales avanzados*, 15 (20), 1679-1704.
- [20] Sánchez, A., Porta, A. V., & Orozco, S. (2017). Photonic band-gap and defect modes of a one-dimensional photonic crystal under localized compression. *Journal of applied Physics*, 121(17), 173101.
- [21] Rusell, P. (2003). Photonic crystal fibers. *Science*, 299(5605), 358-362.
- [22] Akahane, Y., Asano, T., Song, B. S., & Noda, S. (2003). High-Q photonic nanocavity in a two-dimensional photonic crystal. *Nature*, 425(6961), 944.
- [23] Porras González, Y. M., Puentes Ossa, A., & Rodríguez Patarroyo, D. J. (2015). Cristales fotónicos empleados en tratamientos médicos. *Revista Avances: Investigación en Ingeniería*, 12.
- [24] Francis Segovia-Chaves, Herbert Vinck-Posada, Vigneswaran Dhasarathanc, M.S. Mani Rajand. (2019). Transmittance spectrum in a 1D photonic crystal composed fused silica and sea water. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 185, 930-935.
- [25] Charles Kittel. *Introduction to Solid State Physics*. John Wiley and Sons, 8 edition, 2005.

-
- [26] J. D. Joannopoulos et al., *Photonic Crystals, (1995): Molding the Flow of Light*, (Princeton University Press, Princeton).
- [27] Wang, W., Yang, X., Luk, T. S., & Gao, J. (2019). Enhanced quantum dots spontaneous emission with metamaterial perfect absorbers. *Applied Physics Letters*, 114(2), 021103.
- [28] Shi, B., Wang, L., Taylor, A. A., Suran Brunelli, S., Zhao, H., Song, B., & Klamkin, J. (2019). MOCVD grown low dislocation density GaAs-on-V-groove patterned (001) Si for 1.3 μm quantum dot laser applications. *Applied Physics Letters*, 114(17), 172102.
- [29] Chang, H., Liu, L., Song, Y., Zhang, C., & Hu, X. (2018). Design and fabrication of low-loss antireflection structures for Si windows in 10–30 THz. *AIP Advances*, 8(5), 055328.
- [30] Anirudh Banerjee, Novel applications of one-dimensional photonic crystal in optical buffering and optical time division multiplexing, *Optik*, vol. 122, PP. 355-357, 2011.
- [31] Majid Sodagar, Mehdi Miri, Ali A. Eftekhar, and Ali Adibi, Optical bistability in a one-dimensional photonic crystal resonator using a reverse-biased pn-junction, *Optics Express*, Vol. 23, PP 2676-2685, 2015
- [32] Banerjee, A., "Enhanced refractometric optical sensing by using one-dimensional ternary photonic crystals," *Progress In Electromagnetic Research, PIER* 89, 11-22, 2009.
- [33] J.S. Patel, K. Rastani, Electrically Controlled Polarization Independent Liquidcrystal Crystals Fresnel Lens Arrays, *Opt. Lett.* 16 (1991) 532-534.
- [34] Qihuang Gong, Xiaoyong Hu, (2013). *Photonic Crystals Principles and Applications*. Pan Stanford Publishing.
- [35] E. Xifré Pérez, J. Pallarés, J. Ferré-Borrull, T. Trifonov, L.F. Marsal, "Low refractive index porous silicon multilayer with a high reflection band", *Phys. Stat. Sol.(c)* 4, 2034-2038 (2007)
- [36] Knight, J. C. (2003). "Photonic crystal fibres". *Nature*, 424 (6950), 847–851.
- [37] Jackson, J. D. 1998. *Classical Electrodynamics*. 3rd ed. New York: Wiley.
- [38] Pierre R. Villeneuve, Michel Piché, Photonic bandgaps in periodic dielectric structures, *Progress in Quantum Electronics*, Volume 18, Issue 2, 1994, Pages 153-200, ISSN 0079-6727.
- [39] I. V. Shadrivov, A. A. Sukhorukov, Y. S. Kivshar, "Complete band gaps in onedimensional left-handed periodic structures", *Phys. Rev. Lett.* 95, 193903 (2005)

-
- [40] Braun, P. V., Rinne, S. A., & García-Santamaría, F. (2006). Introducing defects in 3D photonic crystals: state of the art. *Advanced Materials*, 18(20), 2665-2678.
- [41] Segovia-Chaves, F., & Vinck-Posada, H. (2018). The effect of the hydrostatic pressure and temperature on the defect mode in the band structure of one-dimensional photonic crystal. *Optik*, 156, 981-987.
- [42] Fan, S. (2007). Manipulating light with photonic crystals. *Physica B: Condensed Matter*, 394(2), 221-228.
- [43] Q. Zhu, Y. Zhang, Defect modes and wavelength tuning of one-dimensional photonic crystal with lithium niobate, *Optik* 120 (2009) 195.
- [44] H. Nemeč, L. Duvillaret, F. Garet, P. Kuzel, P. Xavier, J. Richard, D. Raully, Thermally tunable filter for terahertz range based on a one-dimensional photonic crystal with a defect, *J. Appl. Phys.* 96 (2004) 4072
- [45] Serpa Imbett, C., Gómez Cardona, N., & Guerrero González, N. (2010). Análisis e implementación de un multiplexor basado en redes de Bragg en fibra óptica en una red óptica pasiva de topología tipo estrella. *Ingeniería y Desarrollo*, (28), 47-65
- [46] Huang, Yanyi & Xu, Yong & Yariv, Amnon. (2004). Fabrication of functional microstructured optical fibers through a selective-filling technique. *Applied Physics Letters*. 85. 10.1063/1.1828593.
- [47] Jahani, D., Soltani-Vala, A., Barvestani, J., & Hajian, H. (2014). Magneto-tunable one-dimensional graphene-based photonic crystal. *Journal of Applied Physics*, 115(15), 153101.
- [48] Schmidt, M., Eich, M., Huebner, U., & Boucher, R. (2005). Electro-optically tunable photonic crystals. *Applied Physics Letters*, 87(12), 121110.
- [49] Tian, H., & Zi, J. (2005). One-dimensional tunable photonic crystals by means of external magnetic fields. *Optics communications*, 252(4-6), 321-328.
- [50] N.R. Ramanujam, I.S. Amiri, S.A. Taya, S. Olyaei, R. Udaiyakumar, A. Pasumpon Pandian, K.S. Joseph Wilson, P. Mahalakshmi, P.P. Yupapin, Enhanced sensitivity of cancer cell using one dimensional nano composite material coated photonic crystal, *Microsyst. Technol.* (2018) 1–8
- [51] P. Yeh, *Optical Waves in Layered Media*, Wiley-Interscience, 2005.
- [52] S. Orfanidis, *Electromagnetic Waves and Antennas*, NJ Rutgers University, New Brunswick, 2002.

-
- [53] Charalambos C. Katsidis & Dimitrios I. Siapkas, General transfer-matrix method for optical multilayer systems with coherent, partially coherent, and incoherent interference, *Appl. Opt.* 41, 3978-3987 (2002)
- [54] Peter Markos & Costas M. Soukoulis (2008), *Wave Propagation: From Electrons to Photonic Crystals and Left-Handed Materials*, (Princeton University Press, Princeton).
- [55] Cabrera, J. M., Agulló López, F., & López, F. J. (2000). *Óptica electromagnética Vol.II: Materiales y aplicaciones*. Madrid: Addison-Wesley/ Universidad Autónoma de Madrid.
- [56] Martínez Ricci, M. L.(2009). *Respuesta electromagnética de cristales fotónicos 1D con metamateriales*. Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Física.
- [57] Cabrera, J. M., Agulló López, F., & López, F. J. (1998). *óptica electromagnética Vol.I: Fundamentos*. Madrid: Addison-Wesley/ Universidad Autónoma de Madrid.
- [58] Encyclopedia Britannica, inc. (February 13, 2018). Meissner effect. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/science/Meissner-effect>
- [59] Katsidis, C. C., & Siapkas, D. I. (2002). General transfer-matrix method for optical multilayer systems with coherent, partially coherent, and incoherent interference. *Applied Optics*, 41(19), 3978. doi:10.1364/ao.41.003978