



UNIVERSIDAD
COMPLUTENSE
MADRID

Proyecto de Innovación y Mejora de la Calidad Docente
Convocatoria 2015
Nº de proyecto : 240

Título del Proyecto: Aplicabilidad del software de Diferencias Finitas en el Dominio del
Tiempo (FDTD) al aprendizaje en Fotónica

Nombre del responsable: Rosa Weigand Talavera

Centro: Facultad de Ciencias Físicas
Departamento de Óptica

1. Objetivos propuestos

Globalmente se proponía incorporar una herramienta de cálculo que sirviera para mejorar la educación en Fotónica tanto a nivel de Grado como a nivel de Máster. Esta herramienta debía ser capaz de resolver problemas de propagación de radiación en diferentes sistemas por el método de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD).

Además se deseaba que el entorno de trabajo fuera visual e intuitivo y que el alumno pudiera familiarizarse con el uso de herramientas utilizadas actualmente en centros de investigación y en empresas de fotónica con actividad I+D.

El proyecto proponía generar las topografías de una serie de sistemas para que pudiera aplicarse a diferentes actividades docentes de grado y de máster. El proyecto debía evaluar a cuál de las actividades se adapta mejor el uso del software y si había peculiaridades en su uso para el Grado de Física y el Grado de Ingeniería Electrónica de Comunicaciones. Además debía valorar la repercusión que podría tener en los currícula de los alumnos el adquirir experiencia y desarrollar habilidades con este software concreto.

Las actividades que se previó incluir y evaluar se detallan en los siguientes objetivos:

O1. Ejemplificación en clase: el profesor podría llevar ejemplos de sistemas resueltos donde el alumno viera directamente cómo afecta a la radiación electromagnética la presencia del sistema fotónico en casos estándar, y dentro del temario de la asignatura.

O2. Realización de trabajos en grupo: El profesor podría proponer dentro de las actividades de evaluación continua, la resolución de problemas basada en la ejecución de un programa concreto, explorando el espacio de parámetros libres del sistema elegido.

O3. Realización de prácticas de laboratorio: Debido a la escasez de recursos económicos y de la limitación de créditos ECTS no siempre es posible realizar trabajo experimental en todos los sistemas de interés científico y tecnológico. La simulación de la propagación de radiación en sistemas que serían costosos experimentalmente podría, si no suplir, sí ampliar las posibilidades y conocimiento del alumno en el área.

O4. Autoaprendizaje: Con un planteamiento adecuado los alumnos se podrían plantear problemas por iniciativa propia y contrastar la resolución de problemas con métodos analíticos según se explicara en la asignatura y con el uso del software.

O5. Trabajos Fin de Grado (TFG) y Fin de Máster (TFM): Los alumnos podrían desarrollar sus propias topologías y profundizar en el uso del software para explicar temas de Fotónica como TFG o iniciarse en la investigación en su TFM.

O6. Las actividades anteriores podrían implantarse en la Fotónica del Grado de Física, donde dicha asignatura es obligatoria de rama, o en el Grado e Ingeniería Electrónica de Comunicaciones, donde Fotónica es una asignatura optativa. Se previó estudiar si habría peculiaridades en el uso docente del software según los intereses de cada titulación, y una adecuación al nivel de contenidos del programa.

O7. Se propuso elaborar de un manual y un CD interactivo con ejemplos clásicos de interacción radiación electromagnética con dispositivos fotónicos o con medios materiales.

2. Objetivos alcanzados

La primera tarea fue elegir el software adecuado y optamos por el software comercial LUMERICAL que concede licencias de enseñanza durante un periodo limitado. Existen otros softwares libres, pero su uso era más difícil y requería saber programar y por tanto fueron descartados para su uso en este PIMCD.

El software elegido cumple los requisitos de ser visual e intuitivo. Es de uso generalizado tanto en centros de investigación como en empresas y su aprendizaje para lograr ejecutar programas es de unos minutos y para diseñar y estudiar sistemas fotónicos básicos puede suponerle al alumno entre 5 y 10 horas, de forma que es una inversión de tiempo razonable para alumnos que cursen asignaturas de grado en el primer caso y de trabajos de fin de grado o fin de máster en el segundo.

Pudimos disponer de la licencia de software durante un tiempo limitado (1 mes), de manera que aunque se desarrollaron los programas, no han podido ser utilizados en su totalidad y el próximo curso académico 2016-17 nos seguirá dando información sobre el interés del software en docencia en fotónica. Esta limitación de tiempo ha limitado la consecución de algunos objetivos. No obstante pensamos que fue una elección acertada porque dicha licencia puede pedirse cada año (siempre con un periodo limitado de vigencia y si su uso va a ser para la docencia) y nos permitirá seguir utilizando esta herramienta para mejorar la docencia en fotónica.

La secuencia detallada de objetivos conceptuales relacionada anteriormente se expone a continuación y mencionaremos para cada uno de los objetivos su grado de cumplimiento.

O1. Ejemplos elaborados por el profesor para mostrar en clase con ejemplos dentro del temario de la asignatura. Se han desarrollado tres ejemplos: O1a) Reflexión total en dieléctricos y efecto Goos-Hähnchen, O1b) Reflexión en metales, O1c) Propagación en guías de onda. Estos tres procesos se estudian en la asignatura de Fotónica de 4º curso del Grado en Física. Se han desarrollado 3 programas y 3 guiones de laboratorio de manera que el profesor pueda utilizar los videos e imágenes generadas para explicar en clase por un lado, pero que también puedan ser utilizados como prácticas de laboratorio. Dichos guiones se encuentran en el Anexo I. Durante el curso 2016-17 podremos seguir evaluando la utilidad del software y podremos extraer conclusiones más concretas a través de encuestas al alumnado.

O2. Realización de trabajos en grupo. No se han propuesto en el curso 2015-16. Debido a la concesión de la licencia por un tiempo limitado se eligió incorporar los primeros programas a las prácticas de laboratorio, que tienen lugar al final del cuatrimestre de la asignatura y no a la resolución de problemas. Esta actividad podría realizarse por primera vez en el curso 2016-17, según los meses de concesión de licencia educativa.

O3. Realización de prácticas de laboratorio. Los contenidos del objetivo O1c) fueron añadidos en el curso 2015-16 a la realización de una práctica sobre fibras ópticas ya existente. El resultado fue que los alumnos expresaron haber entendido mucho mejor los conceptos explicados en clase sobre geometría de los modos, pérdidas de propagación, guías monomodo y multimodo etc... Para el curso 2016-17 valoraremos la implementación de O1a) y O1b) según las condiciones de la licencia que nos concedan.

O4. Autoaprendizaje. Una vez elegido el software y como consecuencia de tener la licencia un periodo limitado este objetivo no ha sido factible. Además, una vez utilizado el mismo, apreciamos que este objetivo es más adecuado para TFG o TFM que para el aprendizaje de una asignatura de grado y esto ya está propuesto en el objetivo O5.

O5. Trabajos Fin de Grado (TFG) y Fin de Máster (TFM). Hemos estudiado la viabilidad de diseñar y resolver una serie de sistemas y procesos que por su complejidad serían adecuados para realizar un TFG o un TFM. Para cada sistema/proceso se ha elaborado un ficha que serviría de guía básica al alumno para realizar su trabajo. Dichas fichas se proporcionan en el Anexo II y proponen los siguientes sistemas:

Para TFG:

O5a) Efecto Kerr óptico, autofocalización y automodulación de fase

O5b) Rotadores de polarización ultracompactos

O5c) Estructuras reflejantes y antirreflejantes

Además son adecuados los O1a) O1b) O1c)

Para TFM:

O5d) Propagación en nanoestructuras

O5e) Propagación en metamateriales

O5f) Acopladores ópticos

O5g) Guías de onda atómicas basadas en tecnología subwavelength

O5h) Cristales fotónicos

Como regla general se ha considerado que en el caso de TFG al alumno se le proporcionan los programas pero que si lo desea puede ampliarlos. En el caso del TFM el profesor conoce la solución del diseño pero es el alumno el que debe desarrollarla.

Durante el curso 2015-16 se han propuesto tanto TFG como TFM asociados a los sistemas arriba descritos. En particular el O1c) y el 05d). El O1c) fue elegido pero el alumno no llegó a realizarlo, ya que realizó un estancia Erasmus. El 05d) no fue elegido por ningún alumno del Máster de Nuevas Tecnologías Fotónicas y Electrónicas, donde se ofertó.

O6. Además no ha sido posible evaluar la diferencia de implementación e interés para el Grado en Ingeniería Electrónica y de Telecomunicaciones, ya que la matrícula en la asignatura de Fotónica en ese grado no fue abierta en el curso 2015-16.

O7. El material escrito generado se encuentra en los anexos. El resto del material son programas LUMERICAL.

3. Metodología empleada y distribución de tareas

La elección del software fue realizada teniendo en cuenta que uno de los integrantes del grupo (Dr. Aitor Villafranca) tenía experiencia previa con el mismo debido a su actividad investigadora actual y que la empresa proporciona licencias gratuitas para el aprendizaje del mismo durante un periodo limitado, lo cual se adecuaba al hecho de no tener asignado presupuesto en este PIMCD.

Debido a la facilidad de uso del software otro miembro del grupo (Prof. Rosa Weigand) aprendió a utilizarlo. Los programas fueron hechos por ambos miembros.

La realización de los guiones O1a) ha sido realizada por Isabel Gonzalo y Rosa Weigand y los programas asociados por Rosa Weigand, los O1b) y O1c) por Isabel Gonzalo y los programas asociados por Aitor Villafranca. Las fichas y programas de O5b) O5c) O5f) y O5g) por Aitor Villafranca y las fichas y programas de O5a), O5d) y O5e) por Rosa Weigand.

La profesora María Luisa Calvo es en la actualidad profesora emérita y ha participado en la elección de los fenómenos que podrían ejemplificarse en primer lugar.

Para los procesos de O1a), O1b) y O1c) se ha elaborado una versión amigable (*user friendly*) para que el alumno pueda ir cambiando parámetros en la pantalla principal.

Los asociados a TFG (O5a, b y c) se han realizado para que el alumno pueda extraer unas conclusiones mínimas con el programa y la ficha proporcionados, pero se han dejado cuestiones por explorar, para que el alumno pueda demostrar su iniciativa en la ampliación.

En los asociados a TFM (O5d, e, f, g, h) se ha probado que los diseños pueden hacerse y la propagación calcularse, pero debe ser el alumno quién los desarrolle en su trabajo. No obstante también se proporciona una ficha guía.

El uso del software en clase ha sido realizado por las dos profesoras de la asignatura de Fotónica del Grado en Física.

4. Recursos humanos

Ha sido necesaria la participación de Héctor Canabal, Técnico de Laboratorio del Dpto. de Óptica, para la activación de la licencia.

El resto de las personas involucradas han sido los enumerados en la propuesta del proyecto:

María Luisa Calvo Padilla (Catedrática Emérita)

Rosa Weigand Talavera (Profesora Titular)

Isabel Gonzalo Fonrodona (Profesora Titular)

Aitor Villafranca (Colaborador Honorífico, profesor con curriculum académico joven)

5. Desarrollo de las actividades

Como se ha descrito en el apartado 3 la primera actividad consistió en la elección del software adecuado. Este software elegido fue el denominado LUMERICAL debido a sus características de: a) poseer una interfaz para usuario manejable y no necesitar conocimientos de programación, b) la facilidad en el diseño de sistemas, c) la flexibilidad en el cambio de parámetros de entrada y de salida para caracterizar la fuente de luz, d) posibilidad de obtener licencias de uso para enseñanza, a pesar de ser un software comercial cuya licencia debe pagarse anualmente.

Después se desarrollaron los programas que iban a ser utilizados en la asignatura Fotónica del Grado en Física. Los contenidos son los que se detallaron en el apartado 2 bajo O1a), b) y c) y ya se habían decidido en el momento de la solicitud de este proyecto. A continuación se escribieron los guiones para su uso en las prácticas de laboratorio.

El segundo bloque de actuaciones fue generar los programas que representaban procesos más complicados y que por su complejidad eran más adecuados para su uso en Trabajos de Fin de Grado y Trabajos Fin de Máster. Estos contenidos se detallaron en el apartado 2 bajo O5a), b) c) y O5d), e), f), g) y h), respectivamente. Finalmente se elaboraron las fichas que describen el trabajo a realizar, según se presentarían en una oferta de los mismos.

6. Anexos: Material generado

Anexo I: Incluye los guiones de laboratorio los objetivos O1a), b) y c), según se detalló en el apartado 2.

Anexo II: Incluye las fichas de los objetivos O5a), b) c), d), e), f), g) y h), según se detalló en el apartado 2.

LABORATORIO DE FOTÓNICA. GRADO EN FÍSICA

REFLEXIÓN TOTAL Y REFLEXIÓN TOTAL FRUSTRADA

OBJETIVOS

Entender el fenómeno de la reflexión total y el de la reflexión total frustrada en una superficie plana de separación entre dieléctricos, mediante la resolución de las ecuaciones de Maxwell para un pulso de luz, por el método numérico de diferencias finitas en el dominio temporal (FDTD).

MATERIAL

Ordenador portátil y programa FDTD.

INTRODUCCIÓN

Si consideramos un haz monocromático que viaja en un dieléctrico de índice n_1 (para la frecuencia en cuestión) e incide sobre una superficie plana de separación con otro dieléctrico de índice de refracción $n_2 < n_1$, bajo un ángulo θ_i mayor que el ángulo crítico $\theta_c = n_2/n_1$, tiene lugar la reflexión total del haz. En ese caso, el flujo de radiación reflejado en dicha superficie es igual al flujo incidente sobre ella. En el medio de índice n_2 aparece una onda, llamada *onda evanescente*, que viaja paralelamente a la superficie de separación, dando lugar a un flujo nulo a través de ella, y con una amplitud que decrece fuertemente hacia el interior del medio de índice n_2 . Otro fenómeno destacable es que el eje central del haz se refleja en un punto diferente de la superficie de separación, del punto donde incide. Este desplazamiento de la reflexión respecto a la incidencia es el llamado *efecto Goos-Hänchen*, que tiene lugar en la reflexión total de un haz limitado y linealmente polarizado. Todo ello se ilustra en la primera parte de la práctica observando el resultado de la resolución numérica que realiza el programa para un pulso de luz, pudiéndose cambiar las condiciones y analizar casos diferentes.

Si el medio de índice n_2 es suficientemente delgado (unas pocas longitudes de onda de la luz), y se le añade otro medio de índice de refracción mayor que n_2 (tal como n_1 por ejemplo), ocurre que la onda evanescente en el medio n_2 pasa a este tercer medio convirtiéndose en una onda transmitida con un ángulo determinado y dejando de haber reflexión total. A este interesante fenómeno se le llama *reflexión total frustrada* y tiene aplicación en las guías de onda para extraer de éstas determinados modos. Tiene un análogo cuántico con el efecto túnel que una partícula cuántica puede sufrir en una barrera de potencial. El fenómeno de reflexión total frustrada se ilustra en la segunda parte de esta práctica

REALIZACIÓN DE LA PRÁCTICA

Consideraremos un determinado pulso de luz propagándose en un medio dieléctrico de índice n_1 separado por una superficie plana de otro medio dieléctrico de índice n_2 . Además podrá haber un tercer medio dieléctrico de índice n_3 .

Elegimos como ejemplo un pulso de perfil espacial Gaussiano y amplitud unidad, cuyas longitudes de onda están comprendidas entre 400 y 700 nm. La frecuencia central del pulso es $\nu_0 = 588.87$ THz, su anchura $\Delta\nu = 321.20$ THz y su duración 2.65 fs.

Los programas que se usan dentro del programa FDTD permiten visualizar la propagación del pulso, como resultado de la simulación numérica que realizan en las diferentes situaciones detalladas a continuación:

1. Reflexión total de un pulso. Onda evanescente y efecto Goos–Hähnchen

El pulso incide desde el medio de índice de refracción $n_1 = 1.8$ al medio de índice $n_2 = 1.1$ bajo ángulo $\theta_i = 40^\circ > \theta_c$, donde θ_c es el ángulo crítico.

El programa correspondiente es *GHI.fsp* y el vídeo obtenido de la simulación numérica es *GHI_monitor.mpg*. Algunos fotogramas del vídeo se muestran en la Fig. 1.

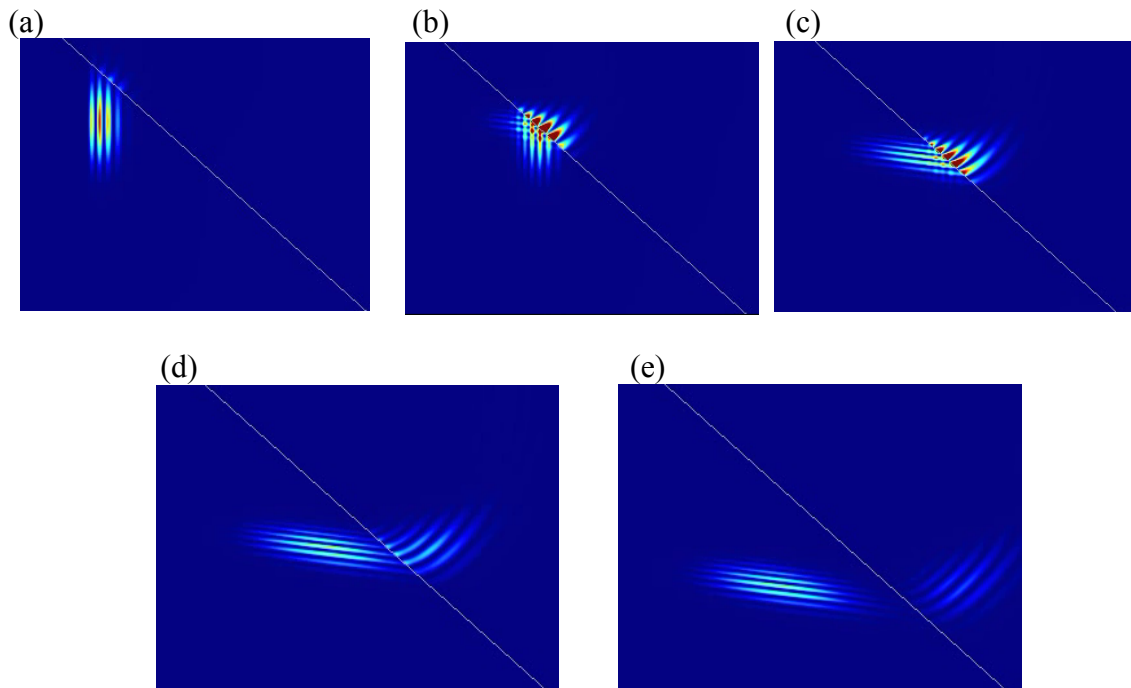


Fig. 1: Reflexión total de un pulso. La parte rojiza es la más intensa. Cinco secuencias del proceso de reflexión y de la onda evanescente en el segundo medio (véase texto).

En la Fig. 1 (a), el pulso está llegando a la interfaz. En (b) y (c) vemos cómo se ha formado la onda evanescente en el segundo medio y un patrón de interferencias en el primero consecuencia de la superposición del pulso incidiendo y reflejándose. La onda evanescente tiene los frentes de amplitud perpendiculares a la interfaz, siendo la amplitud máxima en la superficie de separación y disminuyendo rápidamente hacia el interior del segundo medio (de ahí el nombre de evanescente). La onda evanescente viaja paralelamente a la interfaz. En (d) puede apreciarse la totalidad del pulso reflejado y la onda evanescente que queda en el segundo medio. En el vídeo puede apreciarse mejor cómo el centro del pulso se refleja en un punto de la interfaz diferente, aquí ligeramente más bajo, del punto donde incide sobre dicha superficie (efecto Goos–Hähnchen). En (e), el pulso reflejado se separa de la interfaz y la onda evanescente sigue viajando paralelamente a la superficie de separación. Debido a imprecisiones numéricas, hay cierta transmisión al segundo medio, lo cual puede apreciarse en la onda evanescente, que en d) ya no tiene máxima amplitud en la interfaz sino en el interior del

segundo medio. Por ello, la intensidad del pulso reflejado ya no tiene zonas rojas debido a la ligera pérdida de intensidad que tiene lugar por la imprecisión mencionada.

Cuestiones:

- 1.1 *A partir de la observación del vídeo de la Fig. 1, determine cualitativamente los puntos de incidencia y reflexión del centro del pulso en la interfaz para apreciar el desplazamiento Goos–Hähnchen.*
- 1.2 *Suponiendo que la onda incidente fuera monocromática, explique formamente la reflexión total escribiendo las ondas incidente, reflejada y evanescente.*
- 1.3 *Intercambie los valores de los índices n_1 y n_2 y observe el vídeo correspondiente. ¿Hay reflexión total? ¿Hay onda evanescente?*
- 1.4 *Cambie las características del pulso, o el ángulo de incidencia o los índices de refracción y describa y explique los cambios que observa.*

2. Reflexión total frustrada

En este caso mantenemos las mismas condiciones que en el apartado anterior excepto que ahora el segundo medio, de índice $n_2 = 1.1$, es una fina lámina de unas $0.2 \mu\text{m}$ de espesor sobre la cual se añade un tercer medio de índice mayor que n_2 que supondremos $n_3 = 1.8$, como en el primer medio. Este tercer medio es el que frustra la reflexión total y permite que parte de la intensidad del pulso se transmita a dicho medio.

El programa correspondiente dentro del programa FDTD es *RTF.fsp* y el vídeo obtenido de la simulación numérica es *RTF_monitor.mpg*. Algunos fotogramas del vídeo se muestran en la Fig. 2.

En la Fig. 2 (a), el pulso incide desde la izquierda en condiciones de reflexión total sobre el medio de índice n_2 y se aprecia la onda evanescente que se crea en dicho medio. En (b) se observa que en el primer medio se forma un patrón de interferencia por la superposición del pulso incidiendo y reflejándose. En el segundo medio la onda evanescente tiene mayor intensidad y en el tercer medio aparece una onda transmitida frustrándose así la reflexión total del primer al segundo medio. En (c) puede apreciarse el pulso reflejado en el primer medio, la onda evanescente en el segundo medio y el pulso transmitido en el tercer medio. En (d) solo vemos el pulso reflejado y el transmitido como si no hubiera habido reflexión total.

Cuestiones:

- 2.1 *Cámbiese el grosor del segundo medio haciéndolo más ancho y describanse las diferencias que se observan respecto al ejemplo anterior.*

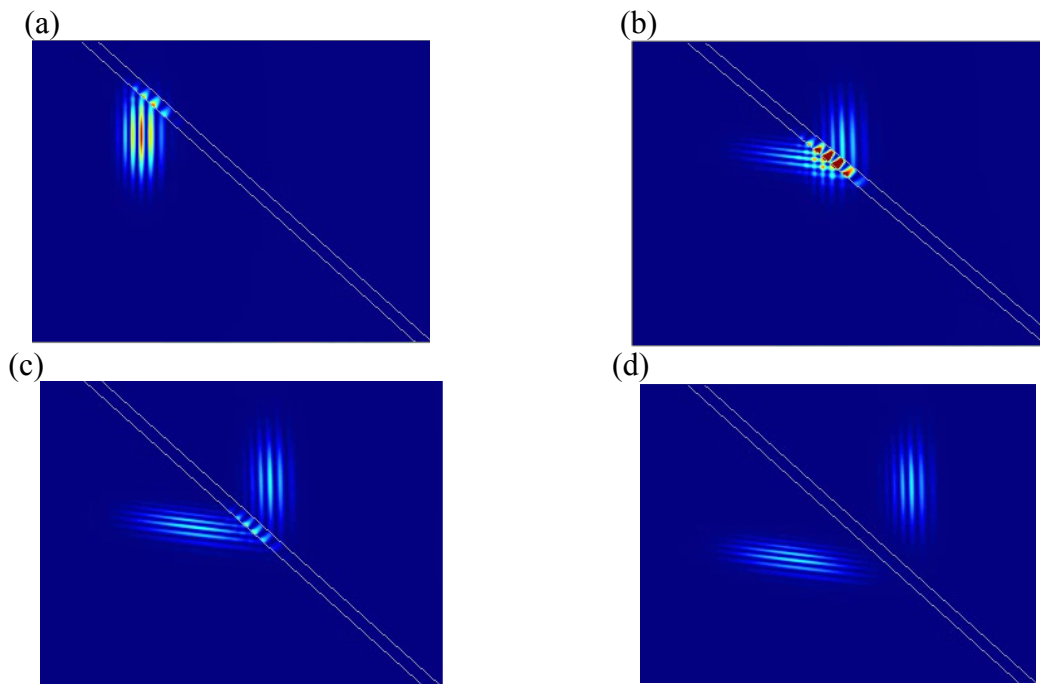


Fig. 2: Reflexión total frustrada de un pulso incidiendo desde la izquierda. La parte rojiza es la más intensa. Cuatro secuencias del proceso.

2.2 Manteniendo el grosor del segundo medio considerado en la Fig. 2, pruébense otros índices de refracción para el tercer medio y describanse las diferencias observadas en la transmisión y reflexión.

LABORATORIO DE FOTÓNICA. GRADO EN FÍSICA

REFLEXIÓN EN METALES

OBJETIVOS

Entender y visualizar el fenómeno de la reflexión en metales, mediante la resolución de las ecuaciones de Maxwell para un pulso de luz, por el método numérico de diferencias finitas en el dominio temporal (FDTD).

MATERIAL

Ordenador portátil y programa FDTD.

INTRODUCCIÓN

El gran poder reflector de los metales disminuye a frecuencias mayores que la llamada frecuencia de plasma. Por debajo de dicha frecuencia, los electrones libres siguen fácilmente las oscilaciones del campo eléctrico absorbiendo energía electromagnética que reemiten (reflejan). Sin embargo, a frecuencias mayores que la de plasma (ésta suele ser cercana o mayor que la del ultravioleta), la inercia de los electrones impide que éstos sigan las rápidas oscilaciones del campo eléctrico y por tanto éstos no absorben energía del campo, transmitiéndose la radiación a lo largo del metal.

En el ejemplo aquí expuesto consideramos dos metales, plata y oro, cada uno de ellos con frecuencias de plasma distintas. Suponemos un pulso de luz que, viniendo desde el aire (o vacío) incide perpendicularmente sobre el metal. La incidencia perpendicular sería la más favorable a la transmisión y aún así puede apreciarse que la reflexión que tiene lugar en la superficie de los metales es prácticamente el 100% para longitudes de onda por debajo de la de plasma. Por ejemplo en la plata (Ag), todas las frecuencias del visible se reflejan dándole ese color blanquecino-espejado al metal. En el oro (Au), la frecuencia de plasma es más baja y ya transmite algo a partir del violeta y ultravioleta, lo que le confiere el color amarillento.

REALIZACIÓN DE LA PRÁCTICA

Consideraremos un determinado pulso de luz propagándose en el aire o en el vacío, de índice de refracción 1, que incide perpendicularmente sobre una superficie plana de un metal. Nos centraremos en dos metales, oro y plata y para cada uno supondremos dos casos en que el pulso está aproximadamente centrado en $\lambda_0 = 200$ nm y en 600 nm. Elegimos un pulso con geometría de onda plana espacial y amplitud unidad. La frecuencia central del pulso es $\nu_0 = 1498.96$ THz, su anchura $\Delta\nu=147$ THz y su duración 3 fs.

Los programas que se usan dentro del programa FDTD permiten visualizar la propagación del pulso, como resultado del cálculo numérico que se realiza en las diferentes situaciones detalladas a continuación:

1. Reflexión en plata (Ag)

La longitud de onda asociada a la frecuencia de plasma de la plata es $\lambda_p = 310$ nm, es decir, $\nu_p = 9.67 \times 10^{14}$ Hz. Consideramos los siguientes casos:

A) Caso en que el pulso incidente está centrado en $\lambda_0 = 200$ nm $< \lambda_p$, es decir, la frecuencia central del pulso es ligeramente mayor que la de plasma y es de esperar algo de penetración en el metal. El resultado del cálculo numérico para este caso se muestra en el vídeo *R_Plata-200_video_TE.mpg* (resultado del programa *R_Plata-200.fsp* en FDTD). En la Fig. 1 se muestran algunos fotogramas de dicho vídeo, desde el inicio hasta el final del proceso de reflexión en el metal, donde se visualiza la amplitud del campo eléctrico. Las partes más rojas son las más intensas.

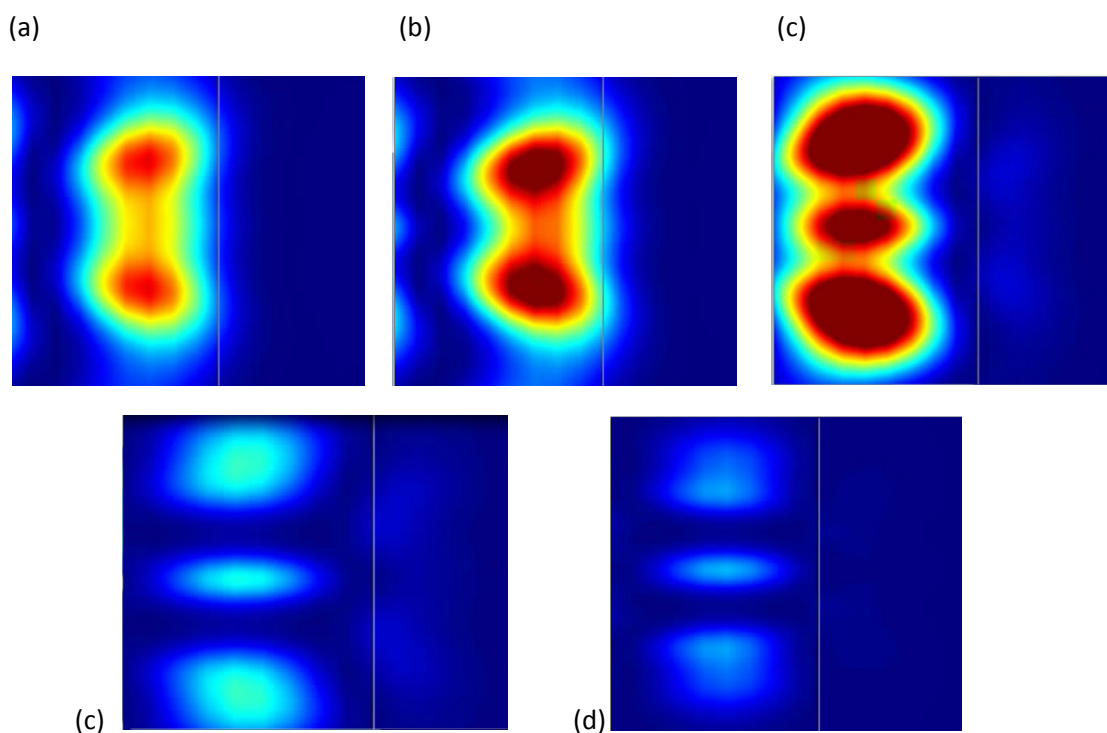


Fig. 1: Reflexión de un pulso con la $\lambda_0 = 200$ nm, sobre plata. Cinco fotogramas consecutivos en el tiempo (véase texto).

En la Fig. 1(a), el pulso viene por la izquierda e incide sobre la superficie de plata (línea vertical). Solo se ve la primera parte del pulso a la cual le siguen otras partes [como se aprecia en (b)] con una periodicidad cercana al valor de la λ_0 del pulso. El aspecto peculiar del pulso con una estructura de planos claros y oscuros perpendiculares a la superficie es debido a que el haz incidente se ha elegido plano y con sección transversal finita de $3 \mu\text{m}$, es decir es un haz difractado. Esto permite ver con mayor nitidez en las zonas de los máximos cómo el campo penetra ligeramente en el metal, como se observa en (a) – (c). En (d) ya no queda campo perceptible en el metal y el pulso se ha reflejado mayoritariamente viajando hacia la izquierda, por lo que vemos solo un extremo de él.

B) Caso en que el pulso incidente está centrado en $\lambda_0 = 600 \text{ nm} > \lambda_p$, es decir, la frecuencia central del pulso (visible) es menor que la de plasma y es de esperar que apenas penetre campo en el metal. El resultado del cálculo numérico para este caso se muestra en el vídeo *R_Plata-600_video_TE.mpg* (resultado del programa *R_Plata-600.fsp* en FDTD). En la Fig. 2 se muestran algunos fotogramas de dicho vídeo, desde el inicio hasta el final del proceso de reflexión en el metal, con objeto de compararlo con el caso anterior.

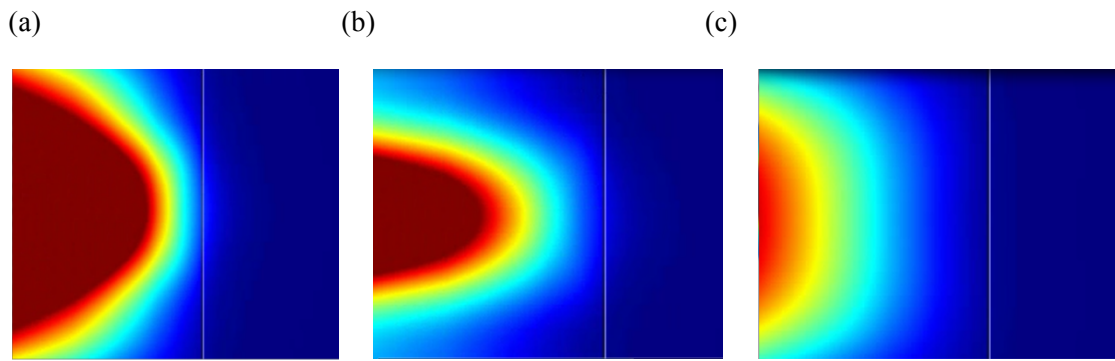


Fig. 2: Reflexión del pulso con $\lambda_0 = 600 \text{ nm}$, sobre plata. Tres fotogramas consecutivos en el tiempo (véase texto).

En la Fig. 2 (a), aparece solo uno de los lóbulos centrales de la peculiar estructura del pulso difractado. En (c) el pulso reflejado viaja ya hacia la izquierda. En general hay menos intensidad de campo en el interior del metal que en el caso anterior.

Cuestiones:

- 1.1. *Pruébense otros metales como el cobre y aluminio y considérense pulsos con λ_0 mayor y menor que la de plasma. Interprete los resultados.*
- 1.2. *Pruebe otros ángulos de incidencia. ¿Qué diferencias observa con la incidencia normal?*

2. Reflexión en oro (Au)

La longitud de onda asociada a la frecuencia de plasma del oro es $\lambda_p = 496 \text{ nm}$. Ahora la frecuencia de plasma, $\nu_p = 6 \times 10^{14} \text{ Hz}$, es más baja que en el caso anterior. Consideramos los siguientes casos:

A) Caso en que el pulso incidente está centrado en $\lambda_0 = 200 \text{ nm} < \lambda_p$. Ahora la frecuencia central del pulso es bastante mayor que la de plasma y es de esperar una penetración mayor del campo en el metal. Para verlo mejor vamos a suponer una fina lámina de Au de 30 nm de espesor inmersa en aire sobre la cual hacemos incidir el pulso perpendicularmente para ver si se transmite campo al otro lado de la lámina. El resultado del cálculo numérico se muestra en el vídeo *R_Oro_200_fino_video_TE.mpg* (resultado del programa *R_Oro_200_fino.fsp* en FDTD). En la Fig. 3 (a) se muestra el pulso difractado llegando desde la izquierda y reflejándose en la primera superficie. Se

observa cierta penetración del campo en el oro. En (b) se aprecia un débil campo en el interior de la lámina y la transmisión que ha tenido lugar a través de ella.

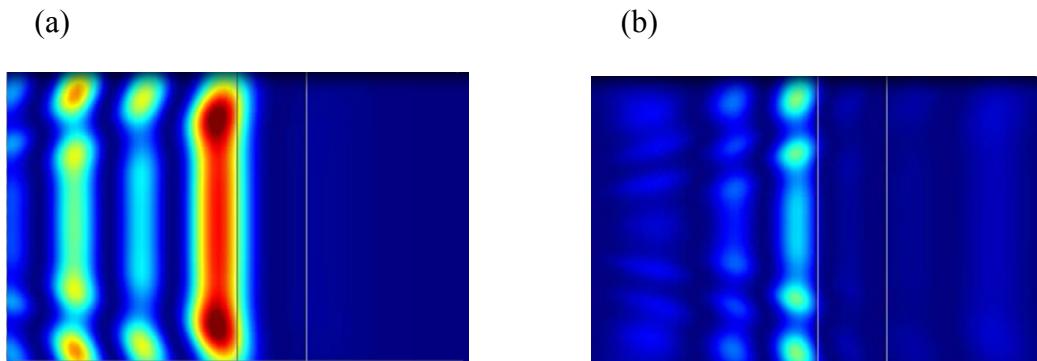


Fig. 3: Pulso con $\lambda_0 = 200$ nm, incidiendo por la izquierda, reflejándose y transmitiéndose en una lámina de oro de 30 nm de espesor. Dos fotogramas consecutivos en el tiempo (véase texto).

B) Caso en que el pulso incidente está centrado en $\lambda_0 = 600$ nm $>$ λ_p . Es de esperar que el pulso penetre menos en el metal que en el caso A). De hecho, a partir de la simulación numérica no se observa que haya transmisión a través de la lámina delgada. Sin embargo, si comparamos con la plata a esa misma longitud de onda, la intensidad de campo que penetra en el metal es mayor, como puede visualizarse en el vídeo *R_Oro_600_video_TE.mpg* (resultado del programa *R_Oro_600.fsp* en FDTD), del cual la Fig. 4 muestra un fotograma que debe compararse con la Fig. 2 (a)-(c) en el caso de la Ag.

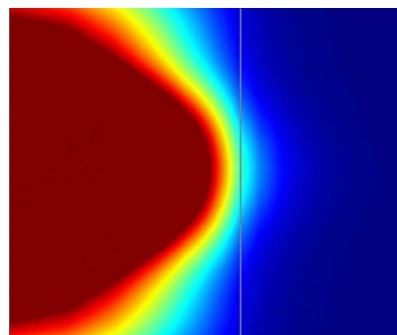


Fig. 4: Pulso con la $\lambda_0 = 600$ nm, incidiendo por la izquierda y reflejándose en Au.

Cuestiones:

- 2.1. *Relacione la frecuencia de plasma del oro con el color amarillento del mismo.*
- 2.2. *Pruebe otras longitudes de onda menores que 200 nm en el caso de transmisión a través de una lámina fina de oro e interprete el resultado.*

2.3. Compare el comportamiento del oro y de la plata para las dos longitudes de onda consideradas.

LABORATORIO DE FOTÓNICA. GRADO EN FÍSICA

PROPAGACIÓN EN GUÍAS DE ONDA

OBJETIVOS

Entender la propagación de pulsos de luz en guías de onda mediante la resolución de las ecuaciones de Maxwell por el método numérico de diferencias finitas en el dominio temporal (FDTD).

MATERIAL

Ordenador portátil y programas FDTD y MODE.

INTRODUCCIÓN

Las guías de onda están conformadas por materiales de índice de refracción mayor que el del medio que les rodea y debido a la disposición geométrica de la radiación incidente y al diseño geométrico de la guía, la radiación puede propagarse a lo largo de ésta con pocas pérdidas. En términos de óptica geométrica, el fenómeno está basado en la reflexión total que sufre el haz en el interior de la guía cuando incide sobre sus superficies con ángulos (respecto a la normal a la superficie) θ_i mayores que el crítico $\theta_c = n_{\text{guía}} / n_{\text{ext}}$, donde $n_{\text{guía}}$ es el índice de refracción del material que hace de guía y n_{ext} es el del medio exterior a la guía. Por lo tanto es necesario que $n_{\text{guía}} > n_{\text{ext}}$. En términos ondulatorios, la radiación se propaga a lo largo de la guía cuando se forman los llamados modos de la guía, que debido a las condiciones de contorno están discretizados: modo fundamental, y de órdenes superiores.

Consideraremos guías de onda planas, es decir, de caras plano-paralelas, de longitud L y sección rectangular. Ello supone el primer paso para entender la propagación de la radiación electromagnética en fibras ópticas, de sección circular, que son las que se usan normalmente en los laboratorios de investigación y en las aplicaciones, por ejemplo en las comunicaciones.

Para que se pueda guiar la radiación, se debe cumplir una relación de tamaño. Si la semi-longitud de onda es del orden de la anchura de la guía solo se podrá guiar el modo fundamental. Si la longitud de onda es mucho mayor que el ancho de la guía, la radiación correspondiente no podrá guiarse. El número de modos que pueden guiarse se ilustra con unos ejemplos en la tercera parte de esta práctica.

Otro aspecto importante es el hecho de que, para una longitud de onda dada λ_0 , se pueden propagar varios modos de la guía a la vez. Cada modo está asociado a un ángulo de entrada del haz desde el aire a la guía y hay un número finito de modos posibles dependiendo del ancho de la guía. Como cada modo viaja a una velocidad distinta, cada modo sale de la guía en instantes distintos, lo cual no es conveniente en muchos casos de transmisión de información. Una de las formas de evitar esto es que la guía sea mono-modo, que es el caso en que solo admite el modo fundamental. Para ello es necesario que $\lambda_0/2$ sea del orden de la anchura de la guía.

La longitud de onda más usada en el sistema de comunicaciones, incluyendo Internet, es $\lambda_0=1.55 \mu\text{m}$ (infrarrojo). Dicha longitud de onda apenas sufre atenuación en la sílice, a diferencia de otras longitudes de onda, y por lo tanto las pérdidas son mínimas. Este aspecto se ilustra en la segunda parte de la práctica.

Un aspecto muy ventajoso de las guías de onda es la posibilidad de integrar circuitos fotónicos en un espacio muy reducido, para lo cual es necesario implementar giros y curvaturas. Cuanto menor sea el radio de giro implementable, más compacto será el dispositivo. Sin embargo, las curvaturas que se producen pueden dar a lugar a que la reflexión interna del haz en las paredes de la guía no se haga en condiciones de reflexión total ($\theta_i > \theta_c$) en cuyo caso habrá transmisión de la onda al medio externo y por tanto pérdidas (geométricas) de radiación. Este aspecto tan importante se aborda en la primera parte de esta práctica.

REALIZACIÓN DE LA PRÁCTICA

El programa permite visualizar la propagación de ondas electromagnéticas en distintos tipos de guías en diferentes condiciones.

Nos centramos en guías planas de sección rectangular. Consideraremos como referencia un pulso de luz centrado en la longitud de onda $\lambda_0=1.55 \mu\text{m}$ (infrarrojo) para acercarnos a las condiciones de transmisión en comunicaciones ópticas, aunque después consideraremos otros valores de λ_0 para comparar.

Se observará el resultado de varias simulaciones numéricas con el programa FDTD o MODE, correspondientes a diferentes situaciones detalladas a continuación.

1. Propagación en guías de onda con diferentes curvaturas. Pérdidas geométricas

Consideramos un pequeño tramo de $3 \mu\text{m}$ de guía inmersa en aire, en tres casos distintos de curvaturas diferentes. Escogeremos silicio (Si) para el medio de la guía, aunque el programa permite elegir otros materiales.

Incide un pulso centrado en una longitud de onda $\lambda_0= 1.55 \mu\text{m}$, equivalente a una frecuencia $\nu_0 =199.41 \text{ THz}$, siendo la anchura del pulso $\Delta\nu = 43.1 \text{ THz}$ y su duración 10.24 fs . En los siguientes ficheros se pueden ver los vídeos resultantes de la simulación numérica de la propagación del pulso desde su entrada en la guía hasta su salida después de la curvatura de la guía, en un recorrido de $3 \mu\text{m}$.

- En el vídeo *bend1.movie.mpg* (resultado del programa *bend1.fsp* en FDTD), el radio interno de la curvatura es $1 \mu\text{m}$.
- En el vídeo *bend2.movie.mpg* (resultado del programa *bend2.fsp*), el radio interno de la curvatura es $0.5 \mu\text{m}$, es decir, la guía está más curvada.
- En el vídeo *bend3.movie.mpg* (resultado del programa *bend3.fsp*), la cara interna de la curvatura forma un ángulo de 90° . Es una curvatura muy pronunciada.

En los vídeos se aprecia que la propagación es distinta en cada caso, observándose grandes pérdidas de carácter geométrico en el caso c). En la Fig. 1 se muestra un fotograma de cada uno de los vídeos en los 3 casos considerados. La parte más rojiza indica mayor amplitud del campo eléctrico.

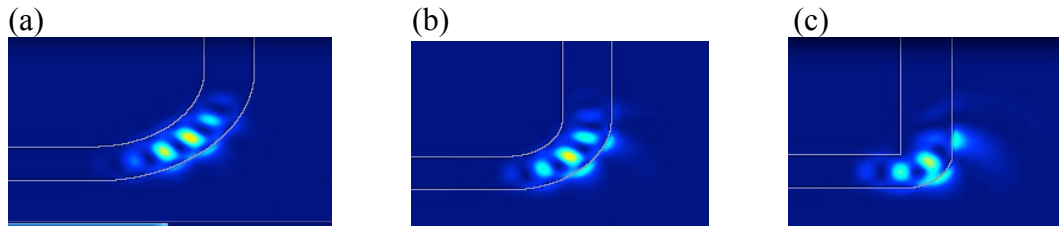


Fig. 1: Pulso propagándose en una guía con diferentes curvaturas. (a), (b) y (c) corresponden a los casos a), b) y c) respectivamente.

Cuestiones

1.1. Después de ver los tres vídeos, describa cualitativamente la propagación del pulso, indicando el número aproximado de ciclos del campo eléctrico dentro del pulso y el campo que sale al exterior de la guía en la parte más curvada (pérdidas).

1.2. Describa la diferencia de comportamiento de la propagación del pulso en los tres casos anteriores, explicando el origen de las pérdidas.

2. Influencia de la longitud de onda λ_0 en la atenuación del pulso en una guía determinada

Consideremos la guía del caso a) del anterior apartado, que es la guía de menor curvatura. Vamos a considerar diferentes casos de pulsos con diferente longitud de onda central, λ_0 , para ver la diferente atenuación que sufren. La geometría de la guía es ahora la misma, el modo guiado es también el fundamental y la diferente atenuación será debida a la diferente absorción del medio (sílice) para las diferentes longitudes de onda consideradas. Se podrá comprobar que el pulso que presenta menos absorción es el centrado en $\lambda_0=1.55 \mu\text{m}$, como es bien conocido en comunicaciones ópticas. Los casos por orden decreciente de λ_0 son:

- a) Caso en que $\lambda_0=1.8 \mu\text{m} > 1.55 \mu\text{m}$. En términos de frecuencias, $\nu_0 = 166.55$ THz y la anchura del pulso $\Delta\nu = 37,1$ THz. La duración del pulso es de 11.89 fs. Su propagación se muestra en el vídeo *Prueba_18_movie.jpg* y la distribución de intensidad de campo eléctrico a lo largo de la guía en el plano xy integrada en el tiempo se muestra en la figura *A18micron.jpg* (Fig. 2), donde las partes más rojas indican mayor valor de campo eléctrico.
- b) Caso de **referencia** en que $\lambda_0=1.55 \mu\text{m}$. Ahora $\nu_0 = 193.41$ THz, la anchura del pulso $\Delta\nu = 43.1$ THz y su duración 10.24 fs. La propagación se muestra en el vídeo *Prueba_155_movie.jpg* y la correspondiente distribución de intensidad en *A155micron.jpg* (Fig. 3). Puede apreciarse la poca atenuación.
- c) Caso en que $\lambda_0 = 1 \mu\text{m} < 1.55 \mu\text{m}$. La frecuencia central es ahora $\nu_0 = 299.8$ THz, la anchura en frecuencias $\Delta\nu = 66.8$ THz y la duración del pulso 6.6 fs. La propagación se muestra en el vídeo *Prueba_1_movie.jpg* y la distribución de intensidad en *A1micron.jpg* (Fig. 4).

d) Caso en que $\lambda_0 = 0.6 \mu\text{m} < 1.55 \mu\text{m}$. Ahora $\nu_0 = 499.65 \text{ THz}$, la anchura $\Delta\nu = 111.34 \text{ THz}$ y la duración del pulso 3.96 fs . La propagación se muestra en el vídeo *Prueba_06_movie.jpg* y la distribución media de intensidad en *A06micron.jpg* (Fig. 5).

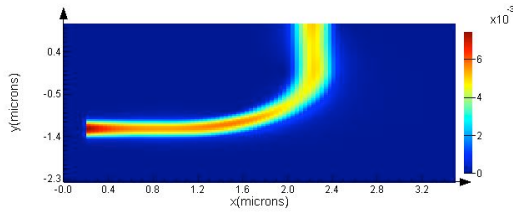


Fig. 2: $\lambda_0 = 1.8 \mu\text{m}$

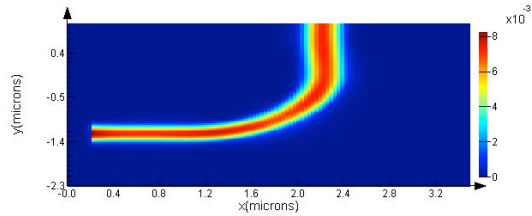


Fig. 3: $\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$

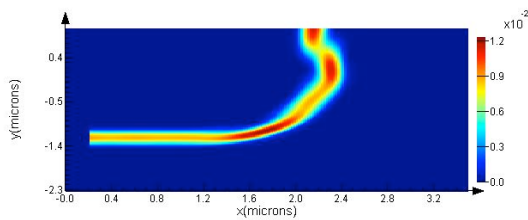


Fig. 4: $\lambda_0 = 1 \mu\text{m}$

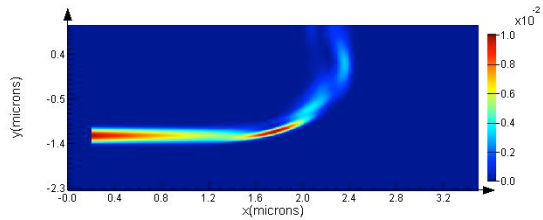


Fig. 5: $\lambda_0 = 0.6 \mu\text{m}$

Cuestiones:

2.1. Después de ver los vídeos de los cuatro casos expuestos, describa las diferencias entre ellos en cuanto al diferente aspecto del pulso dependiendo de su λ_0 , y a su diferente atenuación al viajar por la guía.

2.2. ¿Qué onda se atenúa más? ¿A qué fenómenos pueden atribuirse las pérdidas?

También puede verse el perfil del pulso a la entrada y a la salida de esta guía en los diferentes casos (activando las opciones *input*, *output* en el programa correspondiente). Por ejemplo, para el caso a), se observa cierta deformación en el perfil del campo E a la salida (Fig. 7) respecto del de la entrada (Fig. 6). En cuanto a la potencia, a la salida es menor que a la entrada, como puede deducirse de los valores de la ordenada (Figs. 8 y 9).

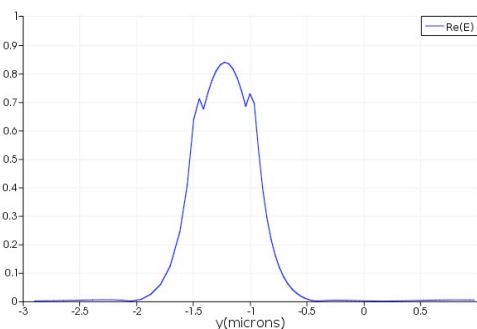


Fig. 6: Campo E a la entrada en el caso a)

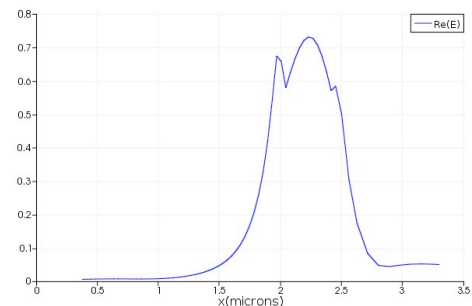


Fig. 7: Campo E a la salida en el caso a)

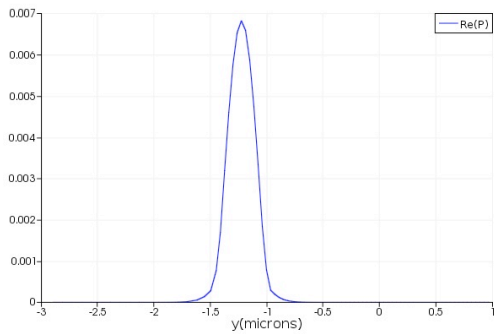


Fig. 8: Potencia P a la entrada en el caso a)

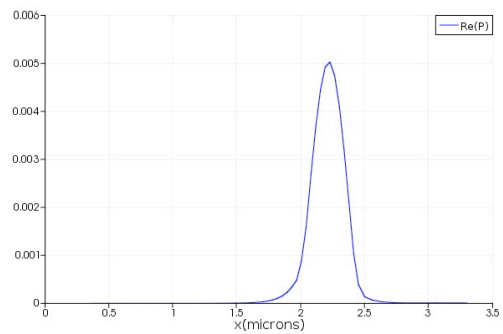


Fig. 9: Potencia P a la salida en el caso a)

Cuestión:

2.3. Para cada uno de los cuatro casos considerados en esta sección, estímate la atenuación en dB/m.

3. Guías mono-modo y multi-modo

En esta parte se empleará el programa MODE. El objetivo es calcular el número de modos que pueden ser guiados y observar su forma.

Se consideran diferentes longitudes de onda λ_0 para los pulsos y dos tipos de guías, ambas de sección rectangular pero de diferente tamaño. El tipo de guía es ahora diferente pero el método es igualmente aplicable a los materiales de los casos anteriores. Ahora es una guía usual donde el material por donde se guía la radiación es de silicio (Si) y está depositado sobre un substrato de sílice (SiO_2). Hay un recubrimiento superior de índice de refracción menor que el de la sílice. La propagación tiene lugar a lo largo del eje z. Consideremos los modos transversales del campo eléctrico (TEM) en los que el campo está polarizado en el eje x, y visualizaremos la amplitud del campo E_x en el plano xy en los siguientes casos:

- a) Las dimensiones de la sección rectangular son: Δx (ancho) = $0.45 \mu\text{m}$, Δy (alto) = $0.26 \mu\text{m}$. Para esta situación debe usarse el programa *guíalineal.lms* dentro del programa MODE, para los siguientes casos:
 - a.1) Si la longitud de onda del pulso es $\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$, como en casos anteriores, vemos que hay un solo modo en el que el campo E_x apenas tiene pérdidas. Es un modo fundamental (Fig. 10). Comparamos con este caso de referencia todos los demás. En la figura se indica con línea negra el contorno transversal de la guía. La guía es en este caso mono-modo.

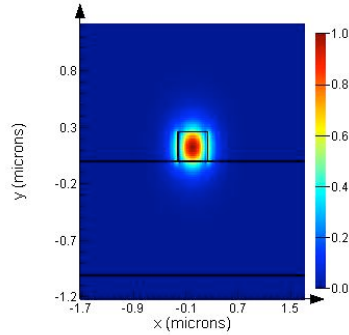


Fig. 10: Intensidad de la amplitud E_x del modo fundamental (véase el texto).

a.2) Si la longitud de onda es $\lambda_0 = 1 \mu\text{m} < 1.55 \mu\text{m}$, el resultado es que pueden guiarse varios modos eléctricos pero E_x presenta grandes pérdidas en todos ellos, ya que dicha longitud de onda está fuera de la ventana de transparencia.

a.3) Si la longitud de onda es $\lambda_0 = 4 \mu\text{m} > 1.55 \mu\text{m}$, el resultado es que no se puede guiar ningún modo.

b) Las dimensiones de la sección rectangular son **mayores** respecto al caso a): Δx (ancho) = $0.9 \mu\text{m}$, Δy (alto) = $0.4 \mu\text{m}$. Ahora debe usarse el programa *guíalinea grande.lms* dentro del programa MODE.

Para este caso consideramos $\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$ y el resultado es que se pueden guiar 4 modos con polarización mayoritariamente en el eje x. El de menor pérdidas es el estado fundamental (TEM_{00}). Su amplitud E_x aparece visualizada en la Fig. 11. Modos de orden más alto aparecen en las Figs. 12 (TEM_{01}) y 13 (TEM_{20}) respectivamente donde se representa también E_x .

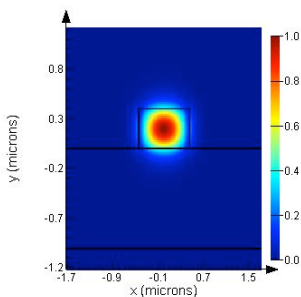


Fig. 11

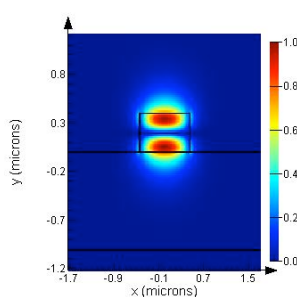


Fig. 12

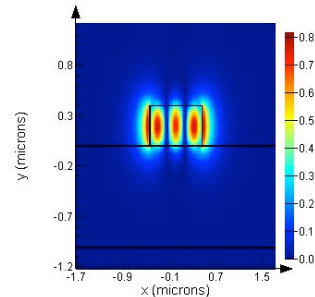


Fig. 13

Cuestiones:

3.1. Para distintos valores de la dimensión Δy de la guía, manteniendo Δx constante, explique cualitativamente el cambio en el número de modos polarizados en el eje x.

3.2. ¿Por qué el campo es no nulo en el exterior de la guía, como puede apreciarse en las Figs. 10 - 13?

3.3. Pruebe otras longitudes de onda hasta encontrar alguna para la cual la guía del caso b) sea mono-modo para E_x .

TFG 05a: EFECTO KERR ÓPTICO. AUTOFOCALIZACIÓN Y AUTOMODULACIÓN DE FASE

Introducción

La alta intensidad a la que pueden verse sometidos los materiales al ser irradiados con luz láser pone de manifiesto propiedades cuyo origen es una respuesta no lineal del medio al campo perturbador. Entre los efectos más conocidos y presentes en todo tipo de medios se encuentra el efecto Kerr óptico, que es un fenómeno causado por la susceptibilidad eléctrica de tercer orden $\chi^{(3)}$ [1]. El efecto Kerr óptico para un haz gaussiano da lugar especialmente al fenómeno de autofocalización [1] y en el dominio de frecuencias a la automodulación de fase [2].

Objetivo

El TFG consistirá en el estudio de cómo el campo electromagnético al propagarse en un medio Kerr modifica por un lado sus características espaciales y por otro las espectrales.

Al alumno se le proporcionará un programa en el que sobre un medio Kerr de espesor micrométrico caracterizado por sus susceptibilidades de orden 1 y 3 incide un haz de cierta intensidad. El programa proporciona el campo a la salida del medio.

El alumno podrá ejecutar el programa para conocer la actuación de los medios Kerr sobre el haz con los aspectos mencionados en las variables de salida, así como modificar los parámetros de entrada para ver la influencia en la propagación del haz, según indiquen los parámetros de salida.

Parámetros de entrada

- Intensidad, longitud de onda central y duración del haz/pulso
- Características geométricas del haz de entrada
- Material Kerr
- Espesor del material

Variables de salida

- Video con la propagación espacio-temporal del haz
- Campo $E(t)$ a la salida del medio
- Espectro $P(\lambda)$ a la salida del medio

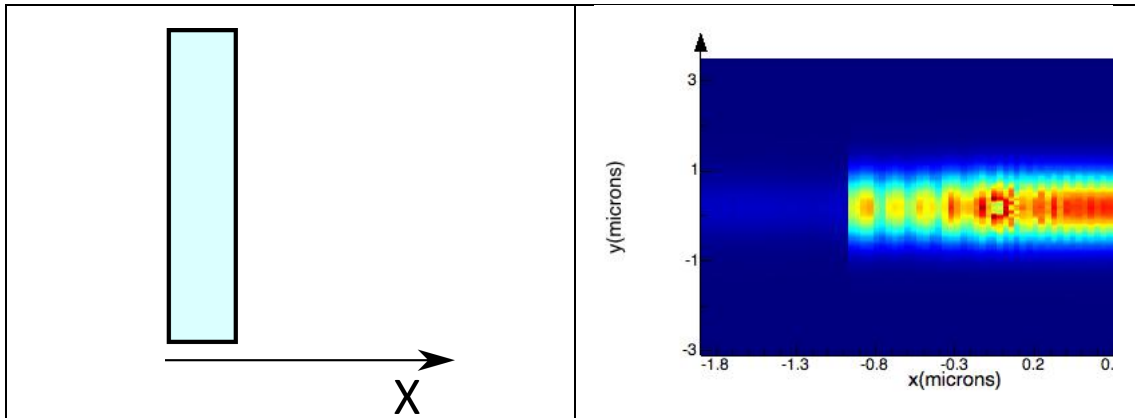


Fig. 1: Diseño para propagación en un material isótropo con efecto Kerr

Fig. 2: Captura de pantalla del software de simulación. Autofocalización

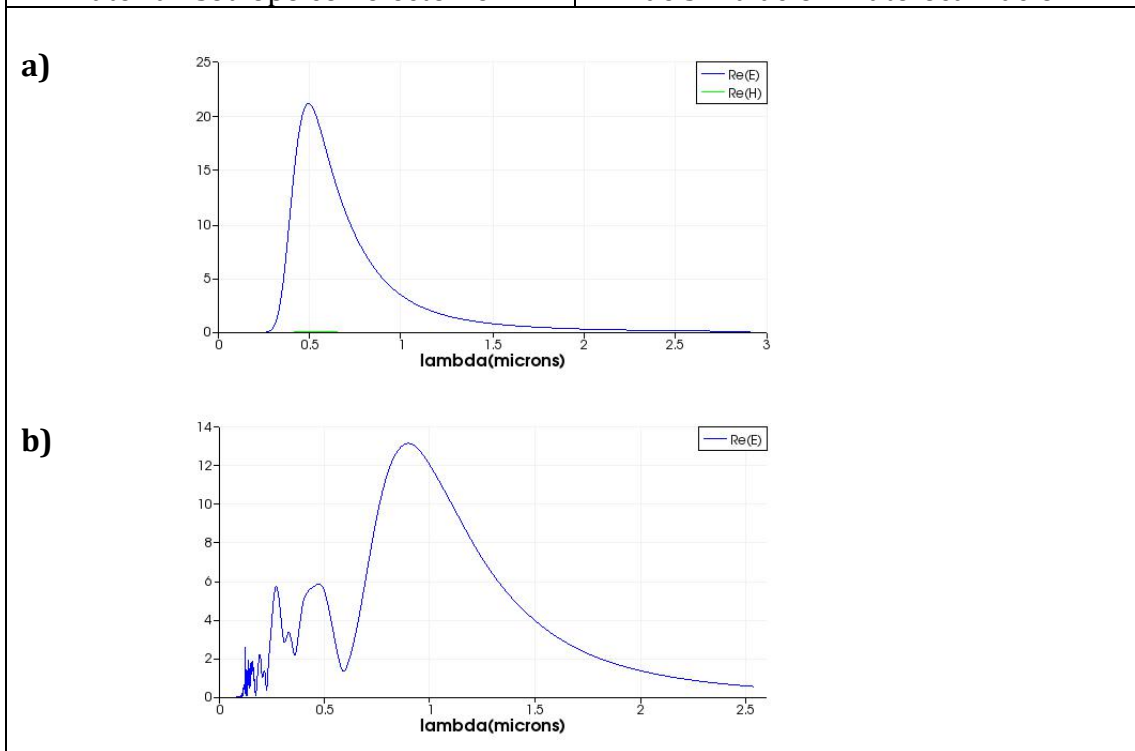


Fig. 3: Captura de pantalla del software de simulación, donde se aprecia el espectro ensanchado por automodulación de fase b) frente al espectro de entrada a).

Bibliografía

- [1] *Nonlinear Optics*, Capítulo 4. R. W. Boyd, Academic Press 2007.
 [2] *The supercontinuum laser source*. Ed. R. R. Alfano. Springer Science+Business Media 1989.

Archivos proporcionados

Medio Kerr.fsp: Medio Kerr rectangular de espesor x y haz incidente espacialmente gaussiano.

TFG 05b: ROTADORES DE POLARIZACIÓN ULTRACOMPACTOS

Introducción

La fotónica basada en guías de onda de silicio [1] ha revolucionado el campo de la óptica al proporcionar dispositivos altamente compactos y eficientes para funcionalidades tan diversas como espectroscopía, interconexiones para comunicaciones, sensores bioquímicos, o chips para análisis médicos. Como contrapartida, las guías de silicio presentan una elevada birrefringencia que hace necesario el uso de dispositivos de conversión y manejo de polarización.

Objetivo

El TFG consistirá en el estudio de estructuras ultra-compactas para control de polarización basadas en guías de onda asimétricas con diversas topologías (guías triangulares [2], guías a dos alturas [3] y guías con hendiduras [4]) mediante software de análisis modal por diferencias finitas. Todas las topologías mencionadas se basan en la generación de modos híbridos (50% de polarización TE y 50% de polarización TM) con distintas constantes de propagación.

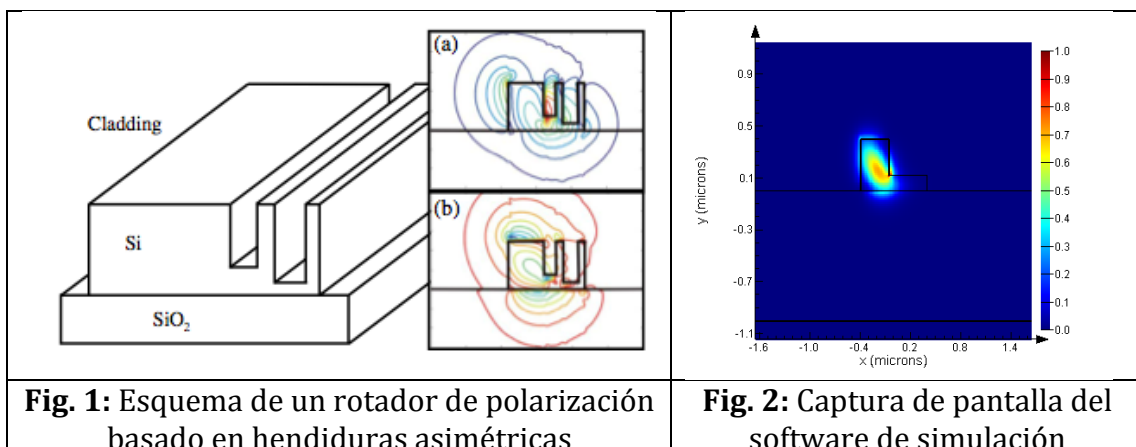
Se proporcionan al alumno archivos ya programados con diversas topologías de rotadores de polarización basados en modos híbridos. El alumno podrá ejecutarlos directamente para extraer conclusiones sobre el funcionamiento de cada uno de ellos, así como variar los parámetros de entrada para observar su efecto en las variables de salida indicadas en este documento.

Parámetros de entrada

- Dimensiones de las guías de onda
- Materiales de las guías de onda
- Longitud de onda del modo propagado

Variables de salida

- Hibridación de modos
- Longitud de conversión
- Eficiencia de conversión



Bibliografía

- [1] *Optical Waveguides: from Theory to Applied Technologies*, Eds. Maria L. Calvo and V. Lakshminarayanan, CRC Press, Taylor&Francis, 2007.
- [2] J. Yamauchi et al, *Journal of Lightwave Technology* **26**, 1708 (2008)
- [3] D. Vermuelen et al, Seventh International Conference on Group IV Photonics, Beijing, China, September 2010, paper WC6
- [4] A. V. Velasco et al., *Ultracompact polarization converter with a dual subwavelength trench built in a silicon-on-insulator waveguide*, *Optics Letters* **37**, 365 (2012).

Archivos proporcionados

rotator.lms: guía de onda triangular para conversión de polarización.
rotator2.lms: guía de onda a dos alturas para conversión de polarización.
rotator3.lms: guía de onda con hendiduras para conversión de polarización.

TFG O5c: ESTRUCTURAS REFLEJANTES Y ANTIRREFLEJANTES

Introducción

La fotónica basada en guías de onda de silicio [1] ha revolucionado el campo de la óptica al proporcionar dispositivos altamente compactos y eficientes para funcionalidades tan diversas como espectroscopía, interconexiones para comunicaciones, sensores bioquímicos, o chips para análisis médicos. Sin embargo, los elevados contrastes de índice de refracción entre núcleo y recubrimiento suponen elevadas pérdidas por reflexión en las interfaces entre ambos materiales.

Objetivo

El TFG consistirá en el estudio de estructuras reflejantes y antirreflejantes [2] implementadas mediante prismas triangulares dispuestos periódicamente con un periodo menor que la longitud de onda del haz incidente. Se consigue así una variación progresiva del índice de refracción efectivo observado por la luz, y una notable reducción de la reflexión ante la falta de discontinuidades en dicho índice.

Se proporcionan al alumno archivos ya programados tanto con interfaces tradicionales con elevadas pérdidas por reflexión como con las estructuras antirreflejantes descritas. El alumno podrá ejecutarlos directamente para extraer conclusiones sobre el funcionamiento de cada uno de ellos, así como variar los parámetros de entrada para observar su efecto en las variables de salida indicadas en este documento.

Parámetros de entrada

- Longitud de onda del haz incidente
- Ángulo del haz incidente
- Periodo y longitud de la estructura antirreflejante

Variables de salida

- Potencia transmitida
- Potencia reflejada
- Pérdidas del dispositivo

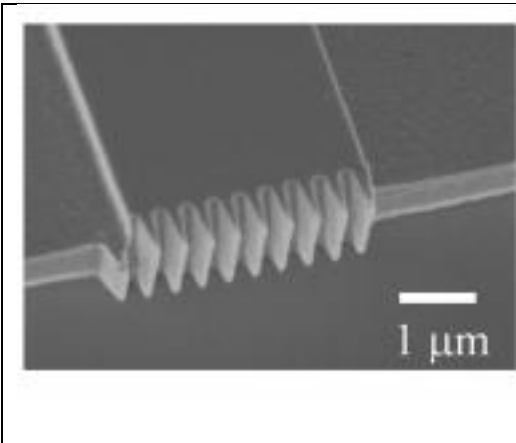


Fig. 1: Imagen de microscopía de una estructura antirreflejante *subwavelength*

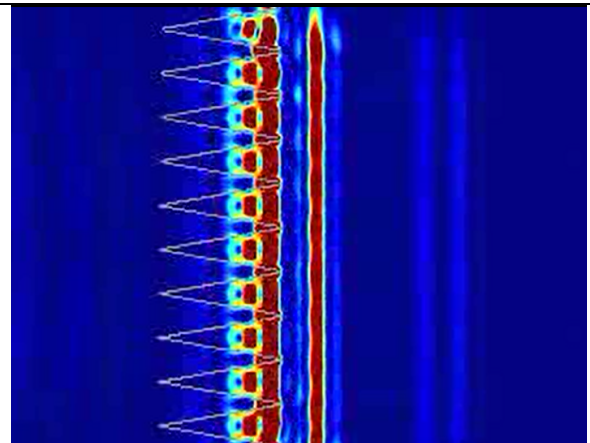


Fig. 2: Captura de pantalla del software de simulación

Bibliografía

- [1] *Optical Waveguides: from Theory to Applied Technologies*, Eds. Maria L. Calvo and V. Lakshminarayanan, CRC Press, Taylor&Francis, 2007.
- [2] P. Lalanne, G. M. Morris, "Antireflection behavior of silicon subwavelength periodic structures for visible light", *Nanotechnology* **8**, 53 (1997).
- [3] J. H. Schmid et al, "Gradient-index antireflective subwavelength structures for planar waveguide facets", *Optics Letters* **32**, 1794 (2007).

Archivos proporcionados

interfaz.lms: interfaz tradicional.
interfaz_AR.lms: interfaz con estructura antirreflejante.

TFM 05d: PROPAGACIÓN EN NANOESTRUCTURAS

Introducción

La plasmónica es un campo de estudio muy activo hoy en día que está experimentando grandes avances, debido en gran parte a los diagnósticos que pueden hacerse con láseres ultrarrápidos. Los plasmones en superficies metálicas (oscilaciones de carga) pueden excitarse adecuadamente con luz si el vector de onda del plasmón y de la luz se acoplan [1]. Esto puede conseguirse en metales nanoestructurados con estructuras de muy diversos tipos.

Objetivo

El TFM tendrá como objetivo diseñar diversas nanoestructuras metálicas, excitarlas con un pulso corto y observar las características temporales y espectrales del campo transmitido para con ello deducir características de excitación del plasmón.

Al alumno se le proporcionará una estructura ya diseñada como la propuesta aquí debajo, y hará un estudio en función de los diferentes parámetros de entrada previstos.

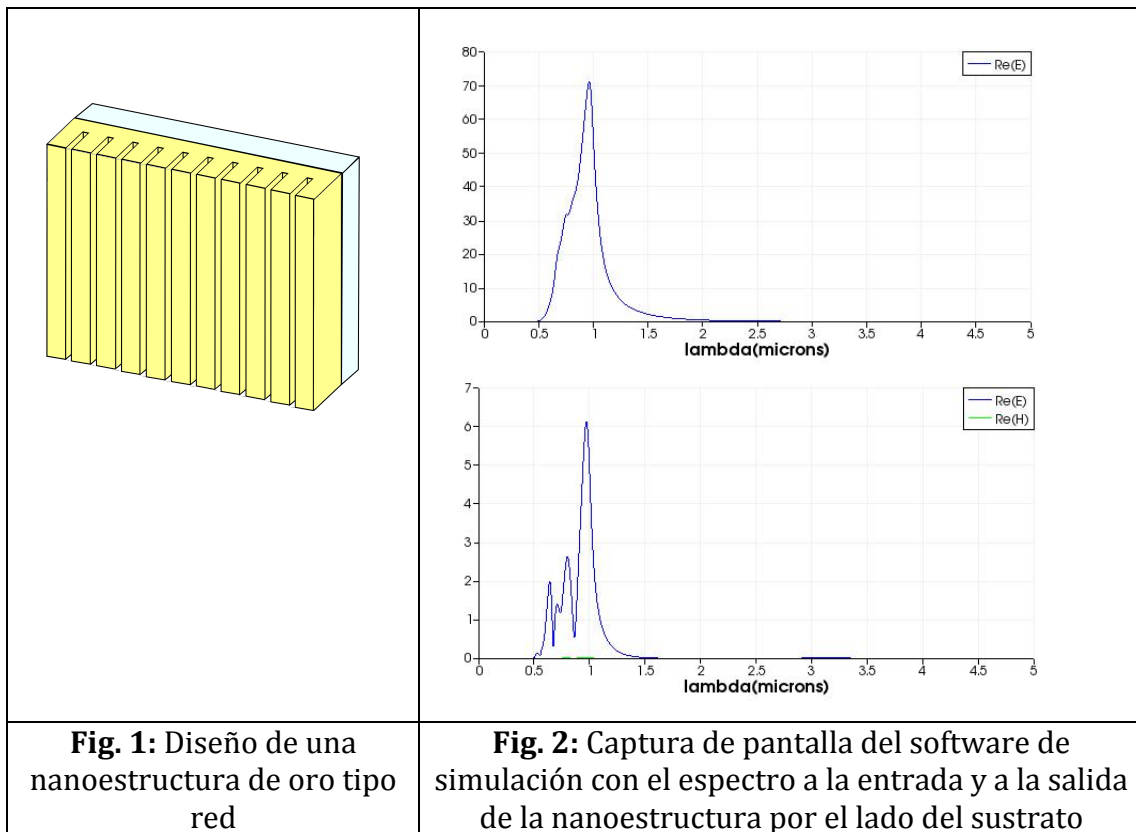
A continuación diseñará él mismo estructuras metálicas de interés que encuentre en la literatura, elegirá los parámetros relevantes y hará un estudio en función de los mismos.

Parámetros de entrada

- Intensidad, longitud de onda central y duración del haz/pulso
- Características geométricas del haz de entrada, ángulo de incidencia
- Tipo de metal
- Tamaño de la nanoestructura

Variables de salida

- Video con la propagación espacio-temporal del haz
- Campo $E(t)$ a la salida del medio
- Espectro $P(\lambda)$ a la salida del medio



Bibliografía

- [1] A. R. Melnyk, M. J. Harrison, Theory of Optical Excitation of Plasmons in Metals, *Physical Review B*, **2** 835 (1970).
- [2] C. Ropers, Th. Elsaesser, G. Cerullo, M- Zvelani-Rossi and Ch. Lienau, Ultrafast optical excitations of metallic nanostructures: from light confinement to a novel electron source, *New Journal of Physics*, **9**, 397 (2007)

Archivos proporcionados

Grating.fsp: nanoestructura de oro tipo red.

TFM 05e: PROPAGACIÓN EN METAMATERIALES

Introducción

Hoy en día la nanoestructuración de material masivo como de superficies permite fabricar materiales cuyas propiedades, en particular las ópticas, difieren enormemente de las que presentan sin dicha nanoestructuración [1].

Objetivo

El TFM tendrá como objetivo entender cómo en sistemas nanoestructurados las propiedades ópticas de los medios varían y la propagación de la radiación deja de ser intuitiva en relación a conceptos clásicos.

El sistema más sencillo que se puede proponer es el de metamateriales con índice de refracción negativo [2]. Este sistema ya está configurado en el propio software LUMERICAL y los ficheros están disponibles.

Al alumno se le proporcionará una estructura ya diseñada como la propuesta aquí debajo, y hará un estudio en función de los diferentes parámetros de entrada previstos.

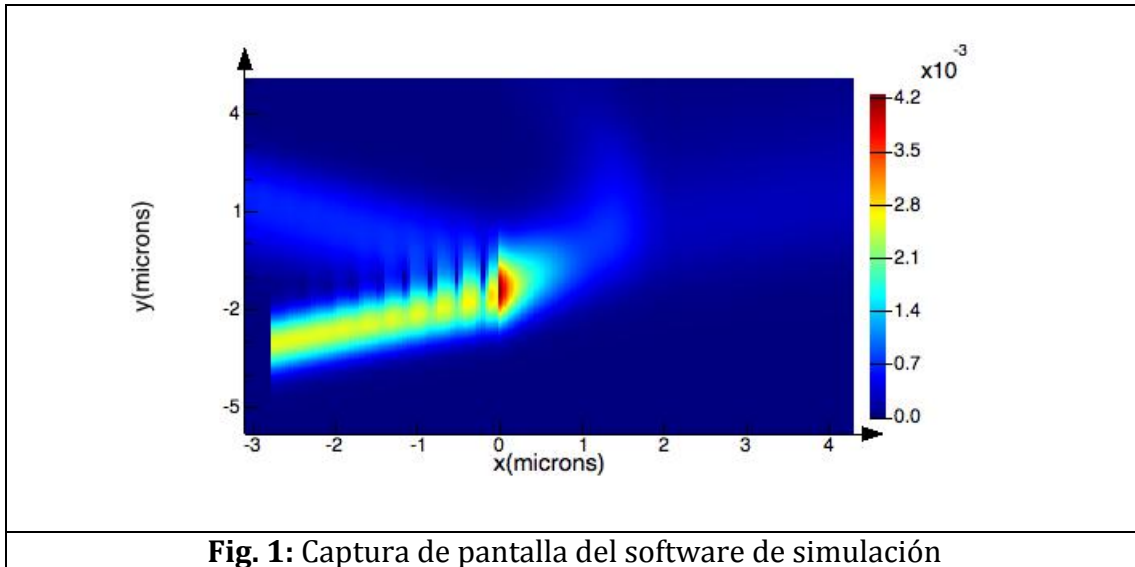
A continuación podrá diseñar él mismo otros metamateriales en base a la literatura existente, por ejemplo estructuras quirales, elegirá los parámetros relevantes y hará un estudio en función de los mismos.

Parámetros de entrada

- Longitud de onda central, duración del haz/pulso
- Características geométricas del haz de entrada, ángulo de incidencia

Variables de salida

- Video con la propagación espacio-temporal del haz
- Campo $E(t)$ a la salida del medio
- Espectro $P(\lambda)$ a la salida del medio



Bibliografía

- [1] F. Capolino ed. *Theory and Phenomena on Metamaterials*. CRC Press (2009)
- [2] W. J. Padilla, D. N. Basov and D. R. Smith, *Materials Today* **9**, 28 (2006)

Archivos proporcionados

Negative_index.fsp

TFM 05f: ACOPLADORES ÓPTICOS

Introducción

La fotónica basada en guías de onda de silicio [1] ha revolucionado el campo de la óptica al proporcionar dispositivos altamente compactos y eficientes para funcionalidades tan diversas como espectroscopía, interconexiones para comunicaciones, sensores bioquímicos, o chips para análisis médicos. Sin embargo, el reducido tamaño de las guías de onda supone un reto a la hora de acoplar luz desde guías de onda con un diámetro modal mucho más elevado.

Objetivo

El TFM consistirá en el estudio y optimización de estructuras comúnmente utilizadas para el acoplo de luz en facetas de chips fotónicos, seleccionadas entre:

- Taper [2]
- Taper inverso [3]
- Acoplador subwavelength [4]
- Acoplador en tridente [5]

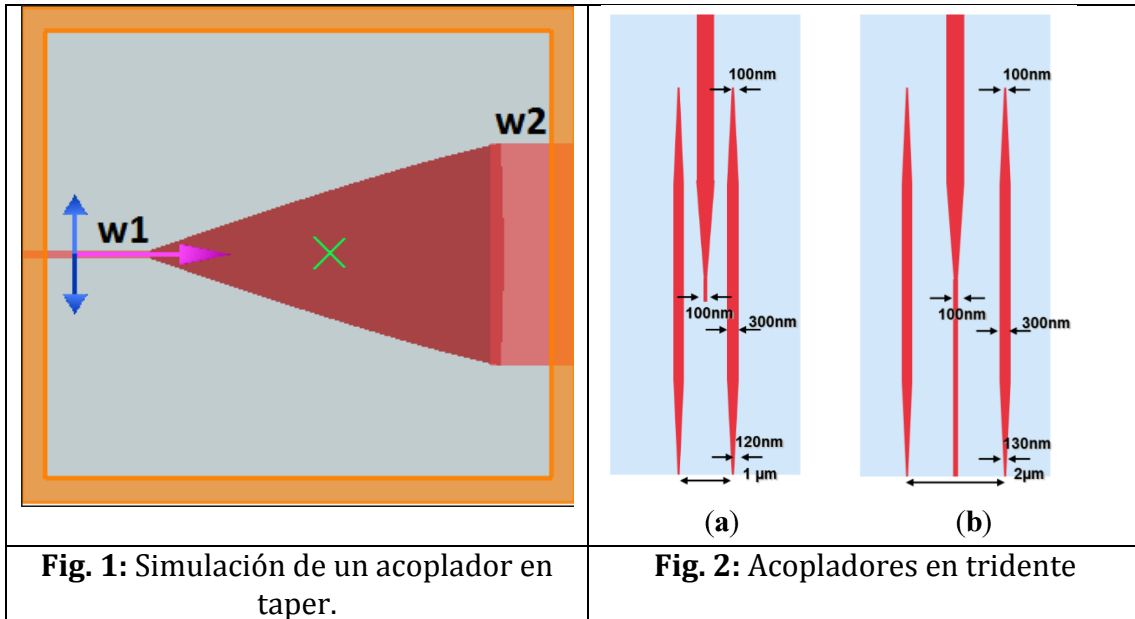
Se guiará al alumno para la simulación de dos topologías de acopladores utilizando software de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD). El alumno implementará las topologías descritas y modificará los parámetros de entrada para observar su efecto en las variables de salida indicadas en este documento, determinando así las limitaciones y fortalezas de cada opción analizada.

Parámetros de entrada

- Dimensiones de las guías de onda
- Materiales de las guías de onda
- Longitud de onda incidente
- Alineamiento lateral del haz incidente

Variables de salida

- Eficiencia de acoplo
- Pérdidas del dispositivo
- Ancho de banda de acoplo



Bibliografía

- [1] *Optical Waveguides: from Theory to Applied Technologies*, Eds. Maria L. Calvo and V. Lakshminarayanan, CRC Press, Taylor&Francis, 2007.
- [2] LAMPONI, M., et al. Low-threshold heterogeneously integrated InP/SOI lasers with a double adiabatic taper coupler. *Photonics Technology Letters, IEEE* **24**, 76 (2012).
- [3] SHOJI, T., et al. Low loss mode size converter from 0.3 μm square Si wire waveguides to singlemode fibres. *Electronics Letters* **38**, 1669 (2002).
- [4] CHEBEN, Pavel, et al. Refractive index engineering with subwavelength gratings for efficient microphotonic couplers and planar waveguide multiplexers. *Optics Letters*, **35**, 2526 (2010).
- [5] TU, Xin, et al. Low Polarization-Dependent-Loss Silicon Photonic Trident Edge Coupler Fabricated by 248 nm Optical Lithography. En *Asia Communications and Photonics Conference*. Optical Society of America, 2015. p. AS4B. 3.

TFM O5g: GUÍAS DE ONDA ATÉRMICAS BASADAS EN TECNOLOGÍA SUBWAVELENGTH

Introducción

La fotónica basada en guías de onda de silicio [1] ha revolucionado el campo de la óptica al proporcionar dispositivos altamente compactos y eficientes para funcionalidades tan diversas como espectroscopía, interconexiones para comunicaciones, sensores bioquímicos, o chips para análisis médicos.

Objetivo

El TFM consistirá en el estudio y optimización de estructuras de atermalización para guías de onda basadas en tecnología *subwavelength* (SWG) [2, 3]. El dispositivo se basa en secciones alternas de silicio y de un *cladding* de polímero con coeficientes termo-ópticos de signo contrario. Si dicha estructura tiene un periodo menor que la longitud de onda de la luz guiada, se consigue que la luz perciba un índice efectivo promedio. Variando la proporción de ambos materiales dentro de un periodo, puede encontrarse una relación con la cuál dicho índice promedio permanece constante frente a cambios de temperatura.

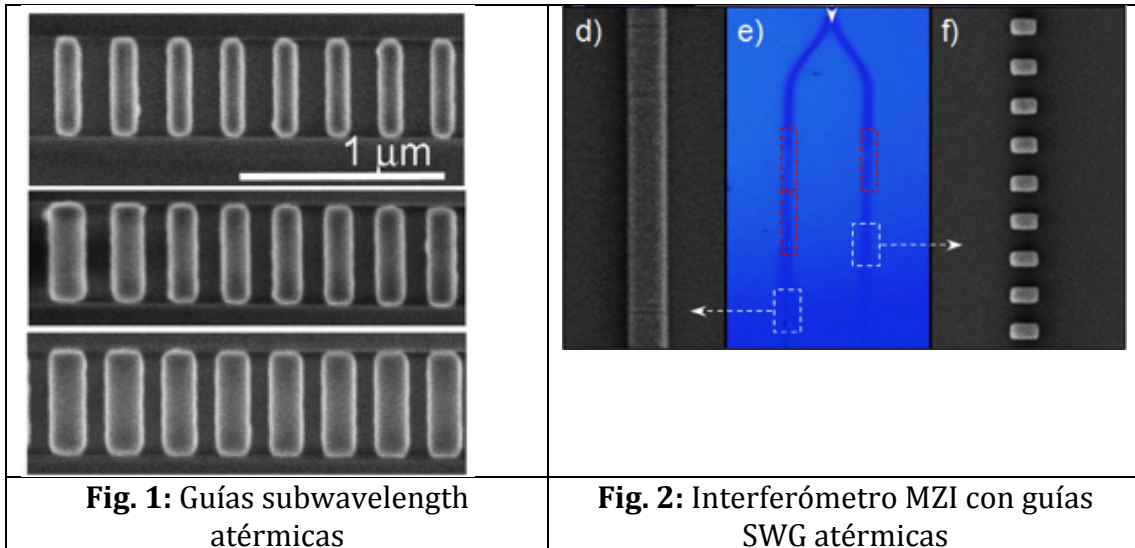
Se guiará al alumno para la simulación de la topología propuesta utilizando software de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD). El alumno implementará las topologías y modificará los parámetros de entrada para observar su efecto en las variables de salida indicadas en este documento, optimizando así el dispositivo. Asimismo, se aplicarán las guías desarrolladas a la simulación de un interferómetro Mach-Zehnder (MZI) para verificar la atermalización conseguida.

Parámetros de entrada

- Dimensiones de las guías de onda
- Periodo de la estructura *subwavelength*
- Material de *cladding*
- Longitud de onda del modo propagado
- Polarización

Variables de salida

- Atermalización de la guía
- Pérdidas de propagación
- Birrefringencia



Bibliografía

- [1] *Optical Waveguides: from Theory to Applied Technologies*, Eds. Maria L. Calvo and V. Lakshminarayanan, CRC Press, Taylor&Francis, 2007.
- [2] BOCK, Przemek J., et al. Subwavelength grating periodic structures in silicon-on-insulator: a new type of microphotonic waveguide. *Optics Express* **18**, 20251 (2010)
- [3] SCHMID, J. H., et al. Temperature-independent silicon subwavelength grating waveguides. *Optics Letters* **36**, 2110 (2011).

TFM O5h: CRISTALES FOTÓNICOS

Introducción

La fotónica basada en guías de onda de silicio [1] ha revolucionado el campo de la óptica al proporcionar dispositivos altamente compactos y eficientes para funcionalidades tan diversas como espectroscopía, interconexiones para comunicaciones, sensores bioquímicos, o chips para análisis médicos. En particular, el uso de cristales fotónicos en esta plataforma permite extender los conceptos de ingeniería de bandgap a dispositivos extremadamente compactos para guiado, plasmónica, filtrado y retardado, entre otras aplicaciones [2-4]

Objetivo

El TFM consistirá en el estudio y optimización de estructuras de cristal fotónico implementadas en silicio sobre aislante. En particular se estudiará la propagación modal y las resonancias de las estructuras mostradas en las figuras 1 y 2, basadas en oquedades distribuidas de manera periódica en un *slab* de silicio.

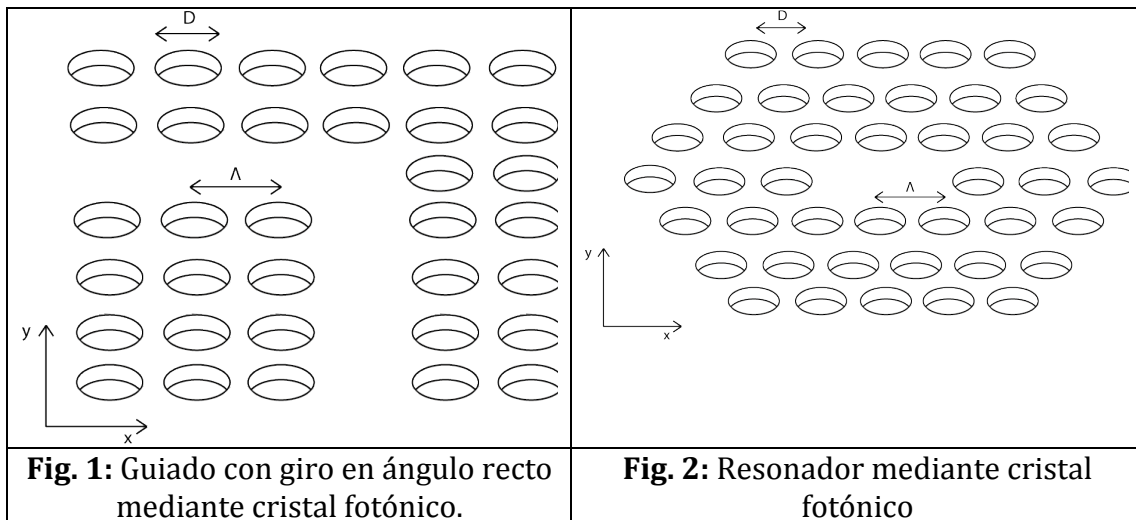
Se guiará al alumno para la simulación de dos topologías de acopladores utilizando software de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD). El alumno implementará las topologías descritas y modificará los parámetros de entrada para observar su efecto en las variables de salida indicadas en este documento, determinando así las limitaciones y fortalezas de cada opción analizada.

Parámetros de entrada

- Diámetro de las oquedades (D)
- Separación entre oquedades (Λ)
- Longitud de onda incidente

Variables de salida

- Constante de propagación
- Pérdidas
- Frecuencia de resonancia



Bibliografía

- [1] *Optical Waveguides: from Theory to Applied Technologies*, Eds. Maria L. Calvo and V. Lakshminarayanan, CRC Press, Taylor&Francis, 2007.
- [2] Masaya Notomi , et al. Structural tuning of guiding modes of line-defect waveguides of silicon-on-insulator photonic crystal slabs. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **38**, 736 (2002).
- [3] Ekmel Ozbay. Plasmonics: merging photonics and electronics at nanoscale dimensions. *Science*, **311**, 189 (2006).
- [4] Ahmad Rifqi Md Zain, et al. Ultra high quality factor one dimensional photonic crystal/photonic wire micro-cavities in silicon-on-insulator (SOI). *Optics Express* **16**, 12084 (2008).