

INTRODUCCION A LA NANOFOTONICA 2025

A. M. Giacomotti

Resumen de la materia:

La nanofotónica estudia las propiedades físicas del campo electromagnético en medios materiales estructurados en una escala nanométrica. Esta disciplina, donde convergen el electromagnetismo, la óptica, la ciencia de materiales, la física cuántica y la electrónica, ha experimentado un crecimiento fulgurante en los últimos años. Esto obedece, por un lado, a un interés fundamental (el estudio de la interacción de la luz y la materia en el mundo nanométrico), y por otro a un gran número de aplicaciones posibles que van desde los circuitos fotónicos integrados hasta los bio-sensores.

Esta materia es una primera introducción al tema. Nos concentraremos en dos sistemas emblemáticos: la plasmónica y los cristales fotónicos, y veremos finalmente de qué manera permiten modelar “a voluntad” las propiedades del campo electromagnético, y sus interacciones con el medio material.

El objetivo es que se adquiera una base de conocimiento –a la vez fundamental pero siempre en relación con aplicaciones concretas– que será útil para todo aquél que siga una especialidad relacionada de cerca (o de lejos) con la fotónica y/o los nanomateriales. En cuanto a las aplicaciones, haremos especial hincapié en *bio-sensing* óptico. Pero no sólo eso: aprenderemos a usar códigos de simulación numérica escritos en Python de libre acceso, relativamente sencillos pero a la vez performantes: quiere decir que podremos incursionar ya en el diseño y la modelización de sistemas reales, que se estudian cotidianamente en diferentes laboratorios de todo el mundo...

La materia se organiza en tres partes: una “Introducción general”, una parte dedicada a “Plasmónica” y otra a “Óptica guiada en medios dieléctricos”. Consiste en 6 clases teóricas de 2 hs cada una, y 4 clases prácticas en computadora de entre 3 y 4 hs cada una: dos relativas a los plasmones localizados, y dos para la parte de óptica guiada y cristales fotónicos.

Programa: (duración aproximada 30 hs=26 hs teórico/práctico + 1 encuentro de evaluación)

Clase teórica 1 (2h): “Introducción”

1. Introducción general

1.1 Que es la nanofotónica?

1.1.1 La copa de Lycurgus: un ejemplo de “nanotecnología” del siglo IV...

1.1.2 De la fibra óptica a las aplicaciones recientes de la nanofotónica

1.1.3 Un puente entre la óptica y la electrónica

1.2 Propagación de la luz en un medio dieléctrico lineal y uniforme: índice de refracción y constante de absorción

1.3 Efectos de confinamiento espacial: dispersión de la luz en partículas sub-micrométricas resonantes (difusión de Rayleigh)

1.4 Confinamiento sub-longitud de onda de la luz en metales: la nanoplasmonica

1.5 La noción de “color” de un objeto iluminado

1.6 Nano-fuentes de luz: pozos, hilos y puntos cuánticos ...

Clase teórica 2 (2h): “Plasmones de superficie propagativos (SPP)”

2. Plasmónica

- 2.1 Electromagnetismo de los metales
- 2.2 La función dieléctrica del gas de electrones libres: modelo de Drude
- 2.3 Metales reales y transiciones interbanda
- 2.4 Plasmones de superficie propagativos (SPP): interface única, interfaces múltiples
- 2.5 Confinamiento de la energía y longitud efectiva de propagación
- 2.6 Métodos experimentales de excitación de SPPs

Clase teórica 3 (2h): “Plasmones localizados (LSP)”

- 2.7 Plasmones de superficie localizados (LSP). Modelo quasi-estático
- 2.8 Polarizabilidad. Secciones eficaces de absorción y extinción
- 2.9 Correcciones a la aproximación quasi-estática y tiempo de vida del LSP
- 2.10 Partículas reales: observaciones de LSPs. Acople entre plasmones

Clase práctica en computadora—simulaciones en Python (3h): “Que nanopartículas contiene la copa de Lycurgus?”

Clase teórica 4 (2h): “Tecnología y aplicaciones”

- 2.11 Tecnología de fabricación.
- 2.12 Una aplicación de la nanofotónica: color estructural
- 2.13 Introducción al *bio-sensing*
- 2.14 Nanosensores de índice de refracción basados en SPP
- 2.15 Nanosensores de índice de refracción basados en LSP
- 2.16 Materiales nano-estructurados para *bio-sensing* y *bio-imaging*

Clase práctica en computadora—simulaciones en Python (3h): “Simulación de un sensor óptico a base de nanopartículas metálicas”

Clase teórica 5 (2h): “Óptica guiada en medios dieléctricos”

3. Óptica guiada en medios dieléctricos

- 3.1 Guías de onda dieléctricas: generalidades
- 3.2 Guías de onda planares (1D): polarización TE y TM
- 3.3 Guías de onda *ridge* (2D): polarización quasi-TE y quasi-TM
- 3.4 Cristales fotónicos. Generalidades. De los espejos de Bragg a los cristales fotónicos.
- 3.5 Cristales fotónicos 1D
 - 3.5.1 Solución aproximada de las ecuaciones de Maxwell en 1D
 - 3.5.2 Teorema de Bloch
 - 3.5.2 Diagramas de bandas: banda prohibida, zonas de Brillouin, repliegue de bandas.
- 3.6 Cristales fotónicos 2D
 - 3.6.1 Generalidades: espacio real, espacio recíproco, puntos de alta simetría.
 - 3.6.2 Método de expansión en ondas planas (PWE).
 - 3.6.3 Ejemplo: red cuadrada de pilares dieléctricos.

Clase práctica en computadora—simulaciones en Python (4h): “Guías de onda 1D y 2D”

Clase teórica 6 (2h): Cristales fotónicos 2D “slab”

3.7 Cristales fotónicos tipo « slab »

3.7.1 Generalidades: necesidad tecnológica, fabricación, simetrías.

3.7.2 Método de expansión en modos guiados (GME).

3.7.3 Ejemplo: red de columnas de aire en una película delgada semiconductor.

3.8 Modos de Bloch guiados vs radiativos: pérdidas de propagación y factor de calidad

3.9 Confinamiento óptico en defectos 1D: guía de ondas W1.

3.10 Confinamiento 0D: Nanocavidades ópticas dieléctricas o semiconductoras.

3.11 Aplicaciones: nano-láseres, conmutadores ópticos...

Clase práctica en computadora—simulaciones en Python (4h): “Cristales fotónicos”

Material y modalidad de examen:

- **Clases teóricas (12 hs):**

Se utilizarán transparencias Power Point, y se harán los cálculos más importantes en el pizarrón.

- **Ejercicios numéricos (14 hs):**

Las simulaciones numéricas estarán basadas en Python, en particular los módulos de libre acceso:

- miepython para simular las secciones eficaces (Modelo de Mie)
- Legume para simular guías de onda, que utiliza el método GME (Guided Mode Expansion)

- **Evaluación:**

La evaluación consta de dos partes: la mitad es la evaluación de las prácticas (lo alumnos entregan un informe), y la otra mitad es una charla de algún tema que lo alumnos eligen (típicamente un basado en un paper), pero donde *la consigna es utilizar alguno de los códigos de simulación para ilustrar alguno de los aspectos tratados en el paper, y/o reproducir un diseño o resultado.*

Bibliografía:

- S. A. Maier, *Plasmonics: Fundamentals and Applications* (Springer, 2007)
- John D. Joannopoulos, Steven G. Johnson, Joshua N. Winn and Robert D. Meade, *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light* (Princeton University Press), Princeton, 2008
- K. Sakoda, *Optical Properties of Photonic Crystals* (Springer-Verlag), Berlin, 2005.
- L. C. Andreani, *The Guided-Mode Expansion Method for Photonic Crystal Slabs*, COST P11 Training School, Univ. of Nottingham, June 19-22, 2006. (<http://fisicavolta.unipv.it/dipartimento/ricerca/Fotonici/Index.htm>).