UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DI MILANO-BICOCCA

SYLLABUS DEL CORSO

Materials Spectroscopy and Microscopy

2526-1-FSM02Q003

Obiettivi

Il corso ha lo scopo di condurre gli studenti verso la comprensione dei concetti fondamentali in due ambiti principali della scienza dei materiali:
i) la spettroscopia ottica, ovvero lo studio della risposta dei materiali alla radiazione elettromagnetica, incluse le implicazioni per le applicazioni in fotonica, in optoelettronica e nelle comunicazioni in fibra ottica;
ii) la microscopia, di cui si investigheranno i principi fondamentali e le principali tecniche per lo studio dell'infinitesimamente piccolo attraverso metodi basati su interazione luce-materia, elettroni-materia, e con approcci a scansione di sonda.

Al termine del corso, lo studente avrà sviluppato una solida comprensione dei principi fondamentali che governano la propagazione della luce in diversi mezzi (conoscenza e comprensione), nonché dei fenomeni di interfaccia e di scala locale che costituiscono la base per lo studio e l'implementazione di tecniche sperimentali (applicazione di conoscenza e comprensione). Lo studente sarà in grado di valutare criticamente e selezionare i metodi spettroscopici e/o microscopici più appropriati per eseguire misure di base (autovalutazione), e sarà in grado di utilizzare un linguaggio scientifico preciso e rigoroso per comunicare efficacemente le conoscenze acquisite (capacità comunicative).

Sebbene l'enfasi principale sia posta sugli aspetti fisici, il corso promuove lo sviluppo di competenze interdisciplinari, direttamente connesse ad altre aree scientifiche, tra cui, ad esempio, la biofisica e i biomateriali. Durante il corso, gli studenti sono tenuti a svolgere un ruolo proattivo nella discussione degli argomenti di loro interesse. Gli studenti acquisiranno competenze specifiche nell'approccio interdisciplinare ai materiali che, partendo dalle basi fisiche fondamentali, porta ad applicazioni emergenti allo stato dell'arte (capacita' di apprendimento).

Contenuti sintetici

Il corso affronta gli ambiti della:

i) spettroscopia ottica, intesa come lo studio delle interazioni tra radiazione elettromagnetica e materia, considerando sia i concetti fondamentali che le sue applicazioni più estese;
e della:
ii) microscopia, principalmente focalizzata su metodi basati sulla luce, sugli elettroni e sui metodi a scansione di sonda.

Gli aspetti fondamentali della spettroscopia e della microscopia vengono trattati insieme agli approcci sperimentali che possono essere adottati. Tecniche classiche e metodi avanzati vengono proposti sia durante le lezioni che durante l'analisi di casi di studio. Gli studenti acquisiranno solide competenze e abilità in tali argomenti, diventando in grado di applicarli anche in contesti interdisciplinari. Il corso si compone di tre parti distinte:

Parte A: Spettroscopia ottica: Fondamenti
A1. Risposta dielettrica dei solidi
A2. Interfacce e film

Parte B: Spettroscopia ottica: Applicazioni
B1. Indagini sui materiali attraverso fenomeni di risonanza
B2. Introduzione alla risposta non lineare dei materiali alla radiazione elettromagnetica
B3. Spettroscopia ottica di mezzi disordinati
B4. Strutture a band-gap fotonico e metamateriali

Parte C: Fondamenti e applicazioni della microscopia
C1. Microscopie ottiche
C2. Microscopie elettroniche
C3. Microscopie a scansione di sonda

Programma esteso

Parte A: Spettroscopia Ottica: Fondamenti

A1 - Risposta dielettrica dei solidi
Ripasso delle equazioni di Maxwell nel vuoto e nella materia; equazione delle onde; spettro elettromagnetico. Propagazione della luce nei materiali; funzione dielettrica complessa e indice di rifrazione; riflettanza, trasmittanza e assorbanza. Tensore dielettrico e anisotropia; equazione delle onde in mezzi anisotropi. Origine microscopica della risposta dielettrica: modelli di Lorentz e Drude; relazioni di dispersione e relazioni di Kramers-Kronig. Effetti di schermatura e correzioni di campo locale, relazioni di Lorentz-Lorenz e Clausius-Mossotti. Modelli di Cauchy e Sellmeier. Modello semiclassico della risposta dielettrica. Comportamento dielettrico di isolanti, metalli e semiconduttori.

A2. Risposta Dielettrica di Interfacce e film
Introduzione alle interfacce; coefficienti di Fresnel; trasmittanza e riflettanza a incidenza normale; angolo di Brewster. Riflessione interna totale e onde evanescenti. Lastre spesse e film sottili: film trasparenti e assorbenti; film su substrati. Interfacce multiple, strutture multistrato e metodo della matrice di trasferimento.

Parte B: Spettroscopia ottica: Applicazioni

B1 - Indagini sui materiali attraverso fenomeni di risonanza
Interazione della luce con la materia: assorbimento, emissione spontanea ed emissione stimolata. Principi dei laser (sistema a quattro livelli, inversione di popolazione, soglia critica, modello a rate-equations). Misure di assorbimento e riflettività ottica. Luminescenza (fondamenti, efficienza quantistica, anti-Stokes). Luminescenza e fluorescenza risolte nel tempo. Conteggio di singoli fotoni correlato nel tempo. Emissione risolta nel tempo. Pump-Probe ottico risolta nel tempo.

B2 - Introduzione alla risposta non lineare dei materiali alla radiazione elettromagnetica
Fondamenti della risposta non lineare; Non linearità del secondo e terzo ordine; Effetti elettroottici e Kerr; Origine della non linearità nei materiali (cristalli, vetri, polimeri). Spettroscopia di impedenza.

B3- Spettroscopia ottica di mezzi disordinati
Propagazione delle onde in fibre ottice e fibre a reticoli di Bragg; propagazione delle onde in dielettrici stratificati; dai coefficienti di Fresnel alla matrice di trasferimento e alla matrice di scattering; dielettrici amorfi nella tecnologia ottica; quantificazione e controllo del disordine strutturale (tecniche di diffrazione e scattering della luce); Spettroscopia Raman; effetti del disordine sul gap energetico e sulle transizioni in stati localizzati; spettroscopia di ioni di metalli di transizione e ioni di terre rare in materiali vetrosi.

B4- Strutture a band-gap fotonico e metamateriali
Interferenza di Bragg in strutture planari e non planari, trasmissione e riflessione, presenza di un band-gap fotonico. Panoramica delle nanostrutture a band-gap fotonico in una e due dimensioni. Esempi di applicazioni: fibre a cristallo fotonico e generazione di supercontinuum, guide d'onda e componenti fotonici, spettroscopie ottiche, cavità laser. Fondamenti dei metamateriali: regolazione dell'elettromagnetismo. proprietà di un sistema mediante ingegneria strutturale, controllo della permeabilità magnetica, materiali singoli e doppi negativi, indice di rifrazione negativo; possibilità aperte e applicazioni prospettiche dei metamateriali in diversi campi.

Parte C: Fondamenti e applicazioni della microscopia
C1 - Microscopia ottica
Principi fondamentali dell'ottica geometrica; Diffrazione della luce e teoria di Abbe dell'imaging; Progettazione e layout di un microscopio ottico; Microscopia a fluorescenza e microscopia confocale; Oltre il limite di Abbe: microscopia a illuminazione strutturata (STED); Microscopia a super risoluzione: PALM e STORM.

C2 - Microscopia elettronica
Natura ondulatoria degli elettroni e principi fondamentali dell'ottica elettronica; Interazione tra elettroni e materia. Microscopia elettronica a trasmissione (TEM): Layout di un microscopio TEM; Modalità di imaging (campo chiaro e campo scuro), diffrazione e cristallografia; Contrasti di ampiezza, diffrazione e fase nel TEM; TEM ad alta risoluzione; TEM a scansione; Preparazione del campione TEM. Microscopia elettronica a scansione (SEM): Layout di un microscopio SEM; Contrasto elettronico secondario e modalità di imaging. Spettroscopie elettroniche analitiche in SEM e TEM: spettroscopia a raggi X a dispersione di energia (EDX); spettroscopia di perdita di energia degli elettroni (EELS); microscopia elettronica Auger (AEM); catodoluminescenza (CL).

C3 - Microscopia a scansione di sonda
Concetti generali sulle tecniche di microscopia a scansione di sonda; microscopia a scansione a effetto tunnel: fenomeno dell'effetto tunnel, metodi di rilevamento, modalità di imaging e capacità spettroscopiche. Microscopia a forza atomica: forze punta-campione e scanner piezoelettrici; cantilever, metodi di rilevamento e modalità di imaging. Campi vicini ottici e SNOM. Spettroscopia Raman con punta potenziata (TERS).

Prerequisiti

Conoscenza di fondamenti di elettromagnetismo e di struttura della materia (argomenti trattati nel corso di Laurea Triennale in Scienza dei Materiali)

Modalità didattica

Il corso prevede sia lezioni teoriche dove si definiranno i principi di base dei diversi argomenti trattati, sia esercitazioni pratiche dove si discuteranno specifici casi studio, metodi sperimentali e applicazioni, sia visite in

laboratorio in piccoli gruppi. In particolare, sono previste le seguenti attività:

- 24 ore sulla parte A (Spettroscopia ottica: fondamenti) in modalita? erogativa in presenza (didattica erogativa).
- 32 ore sulla parte B (Spettroscopia ottica: applicazioni), includendo sia lezioni in aula in presenza (didattica erogativa), che visite in laboratori di interesse (didattica interattiva).
- 36 ore sulla parte C (Fondamenti e applicazioni della microscopia), includendo sia lezioni in aula in presenza (didattica erogativa), che visite in laboratori di interesse (didattica interattiva).

Materiale didattico

1. J. Peatross and M. Ware, Physics of Light and Optics (2015), available at optics.byu.edu
2. O. Stenzel, The Physics of Thin Film Optical Spectra (Springer, 2005)
3. G. Giusfredi, Manuale di ottica (Springer, 2015)
4. E. Hecht, Optics (Addison Wesley, 2002)
5. M. Born and E. Wolf, Principles of Optics (Pergamon Press, 1989)
6. F. Wooten, Optical Properties of Solids (Academic Press, 1972)
7. J. G. Solé, L.E. Bausà, D. Jaque, "*Optical spectroscopy of Inorganic Solids*", Wiley
8. B.E.A. Saleh and M.C. Teich, "*Fundamentals of Photonics*", Wiley
9. R. Feynman, *"Lectures on Physics*" vol. 1, part 2, Inter European Editions
10. K.S. Potter, J.H. Simmons, Optical Materials, Elsevier, 3rd chapter
11. Svelto, Orazio. Principles of Lasers. New York: Springer, 2010.
12. J.D. Joannopoulos, R.D. Meade, J.N. Winn, "Photonic Crystals", Princeton University Press
13. Novotny L, Hecht B. Photonic Crystals and Metamaterials. In: Principles of Nano-Optics. Cambridge University Press; 2025:296-323.
14. D. B. Murphy, Fundamentals of Light Microscopy and Electronic Imaging, 1st Edition; Wiley-Liss, 2001.
15. D. B. Williams and C. B. Carter, Transmission Electron Microscopy; Springer, 2009.
16. R. F. Egerton, Physical Principles of Electron Microscopy: An introduction to TEM, SEM, AEM; Springer, 2008.
17. E. Meyer, H. J. Hug, R. Bennewitz, Scanning Probe Microscopy: The Lab on a Tip; Springer, 2003.

Ulteriori risorse:
Slides dei docenti, tavole, diagrammi, disponibili sulla piattaforma e-learning.

NOTA: i libri di testo 2 e 3 possono essere scaricati come file PDF dal sito web della biblioteca; anche il libro di testo 1 è disponibile gratuitamente.

Periodo di erogazione dell'insegnamento

Il corso è annuale. Le lezioni della Parte-A sono erogate nel primo semestre, insieme con una porzione delle lezione della Parte-B. La restante porzione di Parte-B e la totalita' della Parte-C sono erogate nel secondo semestre.

Modalità di verifica del profitto e valutazione

a) Prove in itinere

Il corso prevede due prove in itinere, che si terranno una alla fine del primo semestre e una alla fine del secondo semestre. Le due prove in itinere prevederanno un test scritto con alcune domande a risposta aperta sugli argomenti trattati nel primo e nel secondo semestre, rispettivamente, a cui seguira' un breve colloquio orale.

b) Prova finale
Per gli studenti che non vorranno sostenere le prove in itinere, e' previsto un esame completo alla fine del secondo semestre composto da un test scritto con alcune domande a risposta aperta, a cui seguira' un breve colloquio orale

c) Competenze valutate
Nelle prove in itinere e nella prova finale sono valutate le seguenti capacità:

1. descrivere la risposta dielettrica delle principali classi di materiali ed individuare i requisiti di risposta alla radiazione elettromagnetica necessari affinché un materiale sia idoneo per specifiche funzionalità;
2. Progettare strategie di misura per la caratterizzazione spettroscopica e microscopica delle proprietà dei materiali in relazione alle loro applicazioni.

d) Criteri per la valutazione
Sia nei test scritti che nei colloqui orali sono valutati i seguenti parametri:
i) percentuale delle domande proposte alle quali viene data risposta corretta;
ii) per ogni risposta, percentuale dei dettagli sperimentali e teorici forniti dallo studente rispetto a quelli esposti, discussi ed applicati durante il corso;
iii) per ogni argomento proposto durante la prova, percentuale dei commenti sugli aspetti applicativi rispetto a quelli discussi e compresi nei contenuti del programma.

Per coloro che sosterranno le due prove in itinere, la valutazione finale sarà data dalla media delle valutazioni raggiunte nelle due prove, ciascuna secondo tutti i criteri indicati.

Orario di ricevimento

8 - 18

Gli studenti possono prendere appuntamento con i docenti tramite e-mail per colloqui individuali.

Sustainable Development Goals

ISTRUZIONE DI QUALITÁ | IMPRESE, INNOVAZIONE E INFRASTRUTTURE | CONSUMO E PRODUZIONE RESPONSABILI