



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI DI MILANO-BICOCCA

## SYLLABUS DEL CORSO

### Materials Spectroscopy and Microscopy

2324-1-FSM01Q003

---

#### Obiettivi

Il corso ha lo scopo di condurre gli studenti verso la comprensione dei concetti fondamentali della risposta dei materiali alla radiazione elettromagnetica, incluse le implicazioni per le applicazioni in fotonica, in optoelettronica e nelle comunicazioni in fibra ottica, unitamente alla conoscenza dei principi delle principali tecniche di microscopia. Il corso prevede lezioni, discussioni di specifici casi studio e applicazioni a esercizi di gruppo, oltre ad un'attività sperimentale svolta in piccoli gruppi.

Al termine del corso lo studente sarà in grado di:

- Comprendere i requisiti dei materiali per specifiche funzionalità in cui è implicata l'interazione con la radiazione elettromagnetica;
- Progettare una strategia per la caratterizzazione sperimentale delle proprietà dei materiali in relazione alle loro applicazioni, sia con approcci spettroscopici sia con microscopie;
- Avere un atteggiamento proattivo e responsabile durante le attività di laboratorio.

#### Contenuti sintetici

Il corso affronta i campi a) della spettroscopia, ovvero lo studio dell'interazione della radiazione elettromagnetica con la materia e le sue estese applicazioni, e b) della microscopia, principalmente le microscopie ottiche, elettroniche e a scansione. Gli aspetti fondamentali sono trattati accanto agli approcci sperimentali che possono essere adottati. Tecniche classiche e strumenti avanzati sono proposti sia durante le lezioni che durante l'analisi di casi studio e nella parte di laboratorio. Gli studenti acquisiscono mature competenze in tali argomenti, riuscendo ad applicarle anche in contesti interdisciplinari. Durante la parte di lavoro di gruppo in laboratorio, gli studenti sono invitati ad affrontare specifici problemi di ricerca e a trovare soluzioni originali in modo maturo e collaborativo.

## Programma esteso

- Primo Semestre -

### LEZIONI

#### SEZIONE A.1. INTRODUZIONE

- Illustrazione dei contenuti del corso e delle modalità d'esame

Lecture consigliate:

Presentazione del docente caricata sulla pagina e-learning del corso

#### SEZIONE A.2. INTERAZIONE DELLA RADIAZIONE ELETTROMAGNETICA CON LA MATERIA NEL REGIME DI RISPOSTA LINEARE

- Soluzione dell'equazione delle onde elettromagnetiche in un materiale
- Funzione dielettrica e indice di rifrazione
- Modelli di Lorentz e di Drude
- Relazioni di Kramers-Kronig
- Risposta alla radiazione elettromagnetica di materiali reali (metalli, semiconduttori e isolanti)

Lecture consigliate:

F. Wooten, "*Optical properties of solids*", Academic Press

J. G. Solé, L.E. Bausà, D. Jaque, "*Optical spectroscopy of Inorganic Solids*", Wiley

#### SEZIONE A.3. STUDIO DI MATERIALI ATTRAVERSO FENOMENI DI RISONANZA

- Spettroscopia d'impedenza
- Spettroscopia di risonanza di spin elettronico
- Assorbimento ottico
- Luminescenza in stato stazionario e risolta in tempo
- Luminescenza Anti-Stokes

Lecture consigliate:

J. G. Solé, L.E. Bausà, D. Jaque, "*Optical spectroscopy of Inorganic Solids*", Wiley

J.C. De Mello, "*An Improved Experimental Determination of External Photoluminescence Quantum Efficiency*", *Advanced Materials* vol. 9, 230 (1997)

G. Blasse and B.C. Grabmaier, "*Luminescent materials*", Springer Verlag

A.V. Chadwick and M. Terenzi, "*Defects in solids: Modern techniques*", NATO ASI Series B: Physics, vol. 147, Plenum Press, 1986

#### SEZIONE A.4. INTRODUZIONE ALLA RISPOSTA NON LINEARE DEI MATERIALI ALLA RADIAZIONE ELETTROMAGNETICA

- Fondamenti di risposta non lineare
- Non linearità del secondo e del terzo ordine
- Effetto elettro-ottico ed effetto Kerr
- Origine della non linearità nei materiali (cristalli, vetri, polimeri)

Lecture consigliate:

B.E.A. Saleh and M.C. Teich, "*Fundamentals of Photonics*", Wiley

R. Feynman, "*Lectures on Physics*" vol. 1, part 2, Inter European Editions

- Secondo Semestre -

### B. APPLICAZIONI ED ESERCITAZIONI DI SPETTROSCOPIA DEI MATERIALI

#### SEZIONE B.1. Dai principi alla tecnologia - aspetti pratici della relazione tra polarizzazione e trasmissione

- Perché la velocità della luce nei materiali è minore che nel vuoto

- Significato fisico e uso pratico della parametrizzazione di Sellmeier nella progettazione di materiali ottici
- coefficienti termo-ottici e elasto-ottici e loro importanza tecnologica nell'ottica in fibra e nella sensoristica ottica

Lecture consigliate:

M.B.James,D.J.Griffiths,Why the speed of light is reduced in a transparent medium,Am.J.Phys.60(1992)309

K.S. Potter, J.H. Simmons, Optical Materials, Elsevier, 3rd chapter

SEZIONE B.2. Bragg gratings - principi e applicazioni

- Meccanismi di fotosensibilità per la funzionalizzazioni di materiali dielettrici
- Ingegneria dei materiali vetrosi e strumenti per la descrizione della propagazione di onde elettromagnetiche in eterostrutture dielettriche
- dai coefficienti di Fresnel alle matrici di trasferimento e di scattering

Lecture consigliate:

A. Othonos, K. Kally, Fiber Bragg Gratings, Artech House, ch.1, ch. 2 from 2.8 to 2.9, ch. 3, from 3.1 to 3.2...

B.E.A. Saleh, M.C. Teich, Fundamentals of Photonics, Wiley, section 6.2, 7.1.

SEZIONE B.3. Ruolo della strutture, del disordine, e dello spettro fononico nella progettazione di materiali ottici a base vetrosa

- Dielettrici amorfi nella tecnologia ottica
- Quantificare e controllare il disordine strutturale – tecniche diffrattometriche e spettroscopia Raman
- Effetti del disordine sull'energy gap e transizioni localizzate
- Spettroscopia degli ioni dei metalli di transizione e delle terre rare in materiali a base vetrosa

Lecture consigliate:

N.E. Cusak, The physics of structurally disordered matter, IOP, sec. 1.1-1.9, 2.1-2.3, 10.6.

J. G. Sole?, L.E. Bausa?, D. Jaque, "Optical spectroscopy of Inorganic Solids", Wiley

F.L. Geleener, Planar Rings in Glasses, Sol. St. Commun. 44 (1982) 1037.

D. Weaire, M.F. Thorpe, Electronic properties of an amorphous solid. I. A simple tight-binding theory, Phys. Rev. B 4 (1971) 2508.

G.D. Cody et al., Disorder and the optical absorption edge of hydrogenated amorphous silicon, Phys. Rev. Lett. 47 (1981) 1480.

L. Skuja, Optical properties of defects in silica, in "Defects in SiO<sub>2</sub> and related dielectrics: science and technology" ed. G. Pacchioni, L. Skuja, D.L. Griscom, Kluwer Academic, pp. 73.

## C. PRINCIPI DI MICROSCOPIA E ATTIVITA' SPERIMENTALI

SEZIONE C.1. MICROSCOPIA OTTICA

- Principi e richiami di geometria ottica
- Diffrazione della luce e criterio di Abbe
- Progettazione e struttura di un microscopio ottico
- microscopia di fluorescenza e microscopia confocale
- Oltre il limite di Abbe: microscopia a due fotoni e structured-illumination microscopy
- Microscopia a super-risoluzione: PALM e STORM.

SEZIONE C.2. MICROSCOPIA ELETTRONICA

- Natura ondulatoria degli elettroni e principi di ottica elettronica
- Interazione tra elettroni e materia
- Microscopia elettronica a trasmissione (TEM)
  - Struttura di un microscopio TEM
  - Imaging modes (bright e dark field), diffrazione e cristallografia
  - Ampiezza, diffrazione e contrasto di fase nel TEM
  - High-Resolution TEM, magnetic TEM, Scanning TEM
  - Preparazione campioni TEM
- Scanning Electron Microscopy (SEM)

- i. Struttura di un microscopio SEM
- ii. Secondary electron contrast e imaging modes;
- iii. Electron Back-Scatter Diffraction (EBSD)
- e. Electron and Photon Spectroscopies in SEM e TEM
- i. Energy-Dispersive X-Ray spectroscopy (EDX)
- ii. Electron Energy Loss Spectroscopy (EELS)
- iii. Auger Electron Microscopy (AEM)
- iv. Cathodoluminescence (CL)

### SEZIONE C.3. SCANNING-PROBE MICROSCOPY

- a. Concetti generali sulle tecniche di scansione
- b. Tip-sample forces e piezo-electric scanners;
- c. Atomic Force Microscopy (cantilevers, detection methods, imaging modes);
- d. Scanning Tunnelling Microscopy (tunnelling phenomenon, detection methods, imaging modes, spectroscopic capabilities)
- e. Scanning Near-Field optical Microscopy (SNOM).

Lecture consigliate:

E. Hecht, *Optics*, 4th ed.; Addison-Wesley, 2002.

D. B. Murphy, *Fundamentals of Light Microscopy and Electronic Imaging*, 1st Edition; Wiley-Liss, 2001.

D. B. Williams and C. B. Carter, *Transmission Electron Microscopy*; Springer, 2009.

R. F. Egerton, *Physical Principles of Electron Microscopy: An introduction to TEM, SEM, AEM*; Springer, 2008.

E. Meyer, H. J. Hug, R. Bennewitz, *Scanning Probe Microscopy: The Lab on a Tip*; Springer, 2003.

## Prerequisiti

Conoscenza di struttura della materia (argomenti trattati nei corsi della laurea triennale in Scienza dei Materiali)

## Modalità didattica

Lezioni, discussioni, esercitazioni di gruppo, attività di laboratorio.

## Materiale didattico

F. Wooten, *Optical properties of solids*, Academic Press

J. G. Solé, L.E. Bausà, D. Jaque, *Optical spectroscopy of Inorganic Solids*, Wiley

H. Kuzmany, *Solid State Spectroscopy*, Springer

B.E.A. Saleh and M.C. Teich, *Fundamentals of Photonics*, Wiley

R. Feynman, *Lectures on Physics* vol. 1, part 2, Inter European Editions

J.C. De Mello, *An Improved Experimental Determination of External Photoluminescence Quantum Efficiency*, *Advanced Materials* vol. 9, 230 (1997)

G. Blasse and B.C. Grabmaier, *Luminescent materials*, Springer Verlag

A.V. Chadwick and M. Terenzi, *Defects in solids: Modern techniques*, NATO ASI Series B: Physics, vol. 147, Plenum Press, 1986

M.B.James,D.J.Griffiths,Why the speed of light is reduced in a transparent medium,Am.J.Phys.60(1992)309

K.S. Potter, J.H. Simmons, Optical Materials, Elsevier, 3rd chapter  
A. Othonos, K. Kally, Fiber Bragg Gratings, Artech House, ch.1, ch. 2 from 2.8 to 2.9, ch. 3, from 3.1 to 3.2...  
B.E.A. Saleh, M.C. Teich, Fundamentals of Photonics, Wiley, section 6.2, 7.1.  
N.E. Cusak, The physics of structurally disordered matter, IOP, sec. 1.1-1.9, 2.1-2.3, 10.6.  
F.L. Geleener, Planar Rings in Glasses, Sol. St. Commun. 44 (1982) 1037.  
D. Weaire, M.F. Thorpe, Electronic properties of an amorphous solid. I. A simple tight-binding theory, Phys. Rev. B 4 (1971) 2508.  
G.D. Cody et al., Disorder and the optical absorption edge of hydrogenated amorphous silicon, Phys. Rev. Lett. 47 (1981) 1480.  
L. Skuja, Optical properties of defects in silica, in "Defects in SiO<sub>2</sub> and related dielectrics: science and technology" ed. G. Pacchioni, L. Skuja, D.L. Griscom, Kluwer Academic, pp. 73.

E. Hecht, Optics, 4th ed.; Addison-Wesley, 2002.  
D. B. Murphy, Fundamentals of Light Microscopy and Electronic Imaging, 1st Edition; Wiley-Liss, 2001.  
D. B. Williams and C. B. Carter, Transmission Electron Microscopy; Springer, 2009.  
R. F. Egerton, Physical Principles of Electron Microscopy: An introduction to TEM, SEM, AEM; Springer, 2008.  
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.

## **Periodo di erogazione dell'insegnamento**

Il corso è annuale. Le lezioni della Parte A sono nel primo semestre. Le Parti B e C, riguardanti discussioni su applicazioni e casi studio, esercitazioni di gruppo, e principi di microscopia comprensiva di parte di laboratorio, sono nel secondo semestre.

## **Modalità di verifica del profitto e valutazione**

L'esame è in forma di un colloquio orale sui contenuti delle lezioni del primo semestre al termine della Parte A, e di un test scritto sui contenuti delle Parti B e C alla fine del secondo semestre.

## **Orario di ricevimento**

8 - 18

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

## **Sustainable Development Goals**

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

