



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

**SCUOLA DI SCIENZE**

**Bollettino Notiziario**

Anno Accademico 2018/2019

**Laurea magistrale in Scienza dei Materiali  
(Ord. 2015)**

---

## Curriculum: Corsi comuni

---

### BREVETTAZIONE E SVILUPPO DI PRODOTTI

---

(Titolare: Dott. STEFANO MARETTO) - Mutuato da: Laurea magistrale in Chimica (Ord. 2015)

**Periodo:** Il anno, 1 semestre  
**Indirizzo formativo:** Corsi comuni  
**Tipologie didattiche:** +24E; 2,00 CFU

### CHIMICA FISICA DEI MATERIALI

---

(Titolare: Prof. VINCENZO AMENDOLA)

**Periodo:** I anno, 1 semestre  
**Indirizzo formativo:** Corsi comuni  
**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU

**Prerequisiti :**

E' necessaria una buona preparazione in chimica fisica, fisica quantistica, fisica dello stato solido.

**Conoscenze e abilita' da acquisire :**

Il corso si prefigge di fornire una ampia e approfondita trattazione delle correlazioni fra le proprietÃ strutturali e microscopiche dei materiali e le loro proprietÃ macroscopiche (ottiche, elettriche, magnetiche, ecc.).

**Attivita' di apprendimento previste e metodologie di insegnamento :**

L'attivita' principale si svolge in forma di lezioni d'aula. Viene sollecitata la partecipazione attiva degli studenti riservando tempo a domande e risposte e deviando, di tanto in tanto, dal percorso programmato per introdurre riferimenti a temi attuali e ad attivita' di ricerca applicativa.

**Contenuti :**

1. Natura tensoriale delle proprietÃ fisiche dei cristalli.
2. ProprietÃ dielettriche ed ottiche degli isolanti.
  - 2.a Transizioni di fase. Teoria di Landau
3. Diamagnetismo e paramagnetismo.
4. Ferromagnetismo, ferrimagnetismo e antiferromagnetismo.
5. ProprietÃ ottiche di metalli e semiconduttori.
  - 5.a Funzione dielettrica di Lindhard
  - 5.b Schermaggio dielettrico nei metalli
  - 5.c Costante dielettrica nei semiconduttori
  - 5.d Transizioni intrabanda e ottica di plasma
  - 5.e Transizioni interbanda e funzione densita' degli stati congiunta
  - 5.f Eccitoni di Wannier
6. Interazioni elettrone-fonone. Polaroni. Transizione di Peierls.
7. Forze intermolecolari.
  - 7.a Natura e classificazione delle f.i.. Trattamenti perturbativi.
  - 7.b Riconoscimento molecolare e autoassemblaggio
8. Fotofisica e fotochimica molecolare
9. Fotofisica e fotochimica degli stati aggregati, eccitoni di Frenkel.
  - 9.a Processi non radiativi: Processi di trasferimento di energia,
  - 9.b Trasferimento elettronico intra- ed intermolecolare.
10. Elementi di elettronica molecolare.

**Modalita' di esame :**

Esame orale finale

**Criteri di valutazione :**

Lo studente dovrebbe dimostrare una comprensione dei principi generali e una capacitÃ di utilizzarli per la descrizione di specifici materiali e particolari fenomeni.

Coerentemente con la natura interdisciplinare della laurea magistrale in Scienza dei Materiali, dovrebbe, in qualche misura, mostrare una capacitÃ di muoversi tra fisica e chimica e riconoscere sia alcune basi comuni che differenze fittizie o puramente semantiche.

**Testi di riferimento :**

Gert Strobl, *Condensed Matter Physics: Crystals, Liquids, Liquid Crystals, and Polymers*. Berlin: Springer-Verlag, Berlin, 2004  
Jacob Israelachvili, *Intermolecular and Surface Forces, second or later edition*. London: Academic Press, 1991

J.F. Nye, *Physical Properties of Crystals*. : Oxford University Press, 1964

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Vengono caricate sulla hme page del docente le raccolte di diapositive utilizzate durante le lezioni per supportarle con materiale iconografico. I testi sono redatti in inglese.

## ELETTROCHIMICA DEI MATERIALI

(Titolare: Prof. CHRISTIAN DURANTE)

**Periodo:** Il anno, 1 semestre  
**Indirizzo formativo:** Corsi comuni  
**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU

**Prerequisiti :**

Buone conoscenze di Chimica generale ed inorganica e di Chimica fisica.

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

Il corso si prefigge di fornire la conoscenza dei fondamenti dell'elettrochimica, in particolare del processo di trasferimento elettronico e delle principali tecniche elettrochimiche di caratterizzazione dei materiali, con particolare riferimento al loro impiego nei dispositivi elettrochimici per l'energetica e la sensoristica.

**Attività di apprendimento previste e metodologie di insegnamento :**

L'insegnamento sarà frontale. Inoltre sarà organizzata una visita al Laboratorio di Elettrochimica per una visione delle principali tecniche elettrochimiche e la caratterizzazione dei materiali elettrodici.

**Contenuti :**

1. Conduttori elettrici: conduttori elettronici; conduttori ionici. Materiali innovativi per applicazioni elettrochimiche.
2. Elettrodo; elettrificazione interfacciale, potenziale elettrodico, tipi di elettrodi.
3. Cinetica del processo elettrochimico; trasferimento elettronico e teoria di Butler-Volmer; trasporto di materia, diffusione.
4. Tecniche voltammetriche; voltammetria lineare e ciclica su elettrodo stazionario; elettrodo a disco rotante.
5. Elementi di spettroscopia di Impedenza, cenni generali, circuiti equivalenti; diagrammi di Nyquist e di Bode
6. Microscopia elettrochimica
7. Elettrodeposizione di metalli ed elettrodi nanostrutturati
8. Energetica elettrochimica: pile e celle a combustibile.

**Modalità di esame :**

Esame orale.

**Criteri di valutazione :**

Verrà valutato il grado di conoscenza acquisita e la capacità di descrivere in modo logico le principali applicazioni elettrochimiche dei materiali innovativi.

**Testi di riferimento :**

J.O'M. Bockris, A.K.N. Reddy,, *Modern Electrochemistry Vol. 1, 2A e 2B*. New York: Kluwer Academic/Plenum Press, 1998  
Bard, Allen J.; Faulkner, Larry R., *Electrochemical Methods, Fundamentals and applications; 2nd edition*. New York: John Wiley & Sons, 2001

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Saranno fornite dispense e lucidi di lezione su tutto il programma svolto.

## FISICA E TECNOLOGIA DEI SEMICONDUTTORI

(Titolare: Prof. DAVIDE DE SALVADOR)

**Periodo:** I anno, 1 semestre  
**Indirizzo formativo:** Corsi comuni  
**Tipologie didattiche:** 48A+24E; 8,00 CFU

**Prerequisiti :**

Conoscenza di base della fisica quantistica e dello stato solido.

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

Conoscenze: principi fisici alla base del comportamento dei materiali semiconduttori. L'obiettivo del corso è fornire i concetti di base che permettano allo studente di comprendere il principio di funzionamento di un semplice dispositivo a semiconduttore. Dopo una prima parte in cui vengono introdotti i principi fisici, verranno descritti i principali dispositivi e alcuni processi fisici che servono a fabbricarli. Lo studente alla fine del corso dovrebbe avere l'abilità di prevedere quale struttura a bande assume un semplice sistema che contenga metalli, isolanti e semiconduttori drogati e di comprendere la spiegazione di come tale struttura si comporta in presenza di sollecitazioni esterne (campi, illuminazione...).

**Attività di apprendimento previste e metodologie di insegnamento :**

Lezione frontale con esposizione delle teorie di base e dei principi di funzionamento dei dispositivi. Esempi di approfondimento che permettano di applicare le teorie esposte e di quantificare gli ordini di grandezza dei parametri fisici coinvolti. Richiamo alle attività di laboratorio parallelamente svolte nel corso di metodi fisici di caratterizzazione dei materiali e loro connessione con la teoria.

**Contenuti :**

Richiamo della struttura cristallina dei principali semiconduttori. Semiconduttori elementari, composti e leghe.

Richiamo di concetti di base (teorema di Bloch, massa efficace, concetto di buca).

Origine e specificità della struttura a bande dei semiconduttori. Le bande reali (esempi GaAs, Si, Ge, AlGaAs).

Il metodo della funzione involuppo per il calcolo degli stati quantistici provenienti da potenziali aperiodici.

Il meccanismo di drogaggio. I portatori in un semiconduttore omogeneo in funzione di drogaggio e temperatura (semic. non degenere, intrinseco, ionizzato, non ionizzato, in saturazione). La compensazione da livello profondo.

Il semiconduttore non omogeneo all'equilibrio. Il caso della giunzione p-n.

Trasporto di carica nei semiconduttori. Equazione di drift-diffusione. Fenomeni di scattering intrabanda e mobilità in un semiconduttore.

I meccanismi di generazione e ricombinazione in un semiconduttore.

L'equazione di continuità. Il caso della giunzione p-n fuori equilibrio: polarizzazione e illuminazione.

Le eterogiunzioni le giunzioni metallo/semiconduttore, metallo/ossido/semiconduttore.

Il confinamento quantistico nei semiconduttori, quantum well, quantum wire, quantum dot.

LED, LED basati su GAN, fotodetector. Le architetture dei laser a stato solido, l'effetto del confinamento quantistico sulle performance di un laser. Celle fotovoltaiche. Diverse architetture e materiali per il fotovoltaico. Efficienza. Meccanismi di perdita di efficienza. Celle a film sottile.

Tecnologie produttive. Transistor bipolare e FET. Struttura MOS.

Tecniche per il drogaggio. Impianto ionico. Diffusione e difetti.

Isolanti, ossidazione termica.

Legge di Moore e riscaldamento. Problematiche e nuovi materiali.

#### **Modalità di esame :**

Esame orale. Durante il semestre sarà possibile (a discrezione dello studente) sostenere una verifica intermedia orale sulla prima parte del corso riguardante i principi fisici e sostenere alla fine una seconda parte riguardante i dispositivi e i processi.

#### **Criteri di valutazione :**

Verranno valutate:

- le capacità di esporre una o più delle teorie di base che spiegano il comportamento fisico dei semiconduttori.

- la comprensione del principio di funzionamento di uno o più dispositivi a semiconduttore spiegati nel corso.

- la capacità di comprendere la struttura a bande e il comportamento elettrico di una semplice struttura contenente semiconduttori drogati, metalli e isolanti.

#### **Testi di riferimento :**

Sapoval, Physics of semiconductors. : Springer Verlag,

Singh, Electronic and Optoelectronic Properties of Semiconductor Structures. : Cambridge,

Sze, Simon Min, Semiconductor devices physics and technology S. M. Sze. New York: J. Wiley & sons, 0

#### **Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Saranno forniti i lucidi del corso

## **FONDAMENTI DI NANOSCIENZA**

(Titolare: Prof. GIOVANNI MATTEI)

**Periodo:** 1 anno, 2 semestre  
**Indirizzo formativo:** Corsi comuni  
**Tipologie didattiche:** 64A+20L; 8,00 CFU

#### **Prerequisiti :**

Fisica Quantistica, Fisica dello Stato Solido

#### **Conoscenze e abilità da acquisire :**

Il corso si prefigge i seguenti obiettivi formativi:

- Fornire le basi per la comprensione delle proprietà chimiche e fisiche dei materiali nanodimensionali che sono alla base delle loro potenziali applicazioni nel campo delle nanotecnologie.

- Presentare alcune tecniche di sintesi e caratterizzazione di nanostrutture confinate (nanocluster) con applicazioni nanotecnologiche in fotonica, in plasmonica e nel magnetismo.

#### **Attività di apprendimento previste e metodologie di insegnamento :**

Il corso prevede lezioni frontali tenute dal Prof. G. Mattei (Modulo A) e dai Prof. S. Agnoli e Prof. M. Meneghetti (Modulo B).

Il Modulo A prevede esercitazioni di laboratorio come applicazione dei contenuti visti a lezione (sintesi, caratterizzazione ottica e simulazione con la teoria di Mie di nanoparticelle metalliche in soluzione e loro caratterizzazione con microscopia elettronica).

#### **Contenuti :**

Modulo A (4 CFU)

- Classificazione, caratteristiche e proprietà generali dei materiali nanostrutturati: confinamento quantico e proprietà elettroniche. Equazioni di taglia.

Proprietà termodinamiche di nanostrutture: effetto di taglia termodinamico, nucleazione (equazione di Gibbs-Thomson) e crescita di nanostrutture (regimi di aggregazione limitata dalla diffusione e Ostwald ripening)

Nanostrutture in matrice solida: l'impianto ionico per la sintesi e la modifica di nanostrutture metalliche. Verifica dei regimi di nucleazione e crescita.

Proprietà ottiche di nanostrutture: (i) proprietà plasmoniche di nanostrutture metalliche (Teoria di Mie e sue estensioni); (ii) confinamento quantico e fotoluminescenza in semiconductor quantum dots.

Proprietà magnetiche di nanostrutture: super-paramagnetismo

Tecniche di caratterizzazione di nanostrutture: la microscopia elettronica in trasmissione (TEM) e in scansione (SEM).

Modulo B (4 CFU)

- Panoramica sui metodi di preparazione delle nanostrutture (sia top-down che bottom-up, con particolare enfasi sulle seconde). Aspetti strutturali ed energetici delle nanostrutture e metodi per la loro stabilizzazione. Difetti nei materiali nanodimensionali. Solidi a porosità controllata. Forme delle nanoparticelle: aspetti termodinamici e cinetici. Nanoparticelle core-shell. Autoassemblaggio ed autoorganizzazione. Metodo colloidale. Effetto template. Preparazione di nanoparticelle, nanowires, nanotubes, films ultrasottili. Self-assembled Monolayers. Films di Langmuir e Langmuir-Blodget. Interfacce coerenti, semi-coerenti, epitassiali e pseudomorfe. Metodi per crescita di films ultrasottili: CVD, MBE, PVD, ALE e PLD.

- Richiamo delle equazioni fondamentali per la descrizione della dinamica di elettroni e fotoni. Proprietà della materia che consentono il confinamento di elettroni e fotoni. Densità degli stati per sistemi confinati in una, due o tre dimensioni.

Proprietà di nanostrutture di carbonio a bassa dimensionalità: grafene e nanotubi. Descrizione tight binding delle loro proprietà di conduzione, ottiche (assorbimento ed emissione) e di scattering Raman (Kataura plots).

Modelli per il confinamento elettronico in quantum dots nel regime di debole e forte confinamento.

Confinamento di elettroni in nano particelle metalliche e proprietà plasmoniche. Condizione di Froehlich e proprietà ottiche a campo

prossimo e lontano. Effetto SERS con nano strutture plasmoniche.  
Cenni al confinamento di fotoni in cristalli fotonici.

\*\*\* MUTUAZIONE \*\*\*

Fondamenti di NanoFisica â€“ Laurea Magistrale in Fisica (6 CFU)

Il Modulo A del presente corso viene mutuato da parte del corso di 'Fondamenti di NanoFisica' della LM in Fisica. Per tale corso sono previsti 2 CFU addizionali con i seguenti contenuti:

- Richiamo delle equazioni fondamentali per la descrizione della dinamica di elettroni e fotoni;
- Confinamento di elettroni e fotoni in sistemi nanostrutturati:
  - (i) Confinamento di fotoni in cristalli fotonici;
  - (ii) Confinamento di elettroni in nanoparticelle metalliche;
  - (iii) Confinamento di elettroni in quantum dots.

Sono inoltre previste delle attivit  pratiche: (i) sintesi di nanoparticelle sferiche di Au in soluzione; (ii) misura del loro spettro di trasmittanza UV-VIS; (iii) simulazione degli spettri misurati tramite la teoria di Mie; (iv) caratterizzazione tramite microscopia elettronica.

#### **Modalit  di esame :**

Prova Scritta

#### **Criteri di valutazione :**

La valutazione della preparazione si baser  sulla comprensione degli argomenti svolti e sulla capacit  di fare collegamenti fra diversi argomenti.

Si valuteranno anche le relazioni scritte presentate sulla parte di esercitazione pratica.

#### **Testi di riferimento :**

R. Kelsall, I. Hamley, M. Geoghegan, *Nanoscale Science and Technology*. : J.Wiley& Sons, 2005

G. Cao, *Nanostructures and Nanomaterials*. : Imperial College Press, 2004

S. Maier, *Plasmonics, fundamentals and applications*. : Springer, 2007

P. Prasad, *Nanophotonics*. : Wiley-Interscience, 2004

C. Bohren, D. Huffmann, *Absorption and scattering of light by small particles*. : Wiley-Interscience, 2004

#### **Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Verranno fornite dispense da parte dei Docenti. Gli argomenti e i contenuti trattati potranno essere approfonditi e/o integrati sui testi indicati nella sezione 'Testi di Riferimento'.

## **LABORATORIO DI PREPARAZIONE E CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI 2**

(Titolare: Prof.ssa RAFFAELLA SIGNORINI)

**Periodo:** I anno, 2 semestre  
**Indirizzo formativo:** Corsi comuni  
**Tipologie didattiche:** 8A+10E+96L; 10,00 CFU

#### **Prerequisiti :**

Conoscenze acquisite nei Corsi della Laurea Triennale, in particolare: Chimica Organica I, Chimica Organica II per Scienza dei Materiali e Chimica Fisica II.

#### **Conoscenze e abilit  da acquisire :**

Competenze riguardanti la preparazione di materiali innovativi e la loro caratterizzazione, attraverso lâ€™uso prevalente di tecniche spettroscopiche.

#### **Attivit  di apprendimento previste e metodologie di insegnamento :**

Lezioni d'aula e in laboratorio volte ad introdurre lo studente alle attivit  del corso. Attivit  di laboratorio svolte autonomamente dagli studenti.

#### **Contenuti :**

Durante il corso verranno condotte esperienze di chimica organica e di chimica â€“ fisica, volte alla preparazione di materiali innovativi e alla loro caratterizzazione, attraverso lâ€™uso prevalente di tecniche spettroscopiche.

Durante il laboratorio di sintesi organica saranno preparate, purificate e caratterizzate diverse molecole che rivestono interesse in applicazioni legate a materiali innovativi, quali: fulleropirrolidine; metalloporfirine, nanoparticelle, molecole precursori per organogel; per la purificazione di tali molecole si utilizzeranno tecniche di estrazione e separazione per cromatografia; la caratterizzazione sar  basata su tecniche quali spettrometria NMR, spettrometria di massa, spettroscopie IR e UV.

La parte di caratterizzazione chimico-fisica prevede esperimenti di Spettroscopia di assorbimento ed emissione nellâ€™UV-Vis. Tecniche FT-IR per lo studio delle propriet  ottiche lineari di materiali e film sottili: riflettanza totale attenuata (ATR) e riflettanza speculare. Spettroscopia micro-Raman e Raman-SERS. Caratterizzazione delle propriet  di assorbimento non lineare di materiali molecolari con misure di z-scan ed input-output.

#### **Modalit  di esame :**

Valutazione relazioni e comportamento in laboratorio, orale/scritto.

#### **Criteri di valutazione :**

La votazione si baser  sulla valutazione del comportamento e delle relazioni di laboratorio e su un esame orale/scritto.

#### **Testi di riferimento :**

P.W. Atkins and R.S. Fridman, *Molecular Quantum Mechanics*. Oxford: Oxford University Press, 2011

J. Clayden, N. Greeves and S.G. Warren, *Organic Chemistry*. Oxford: Oxford University Press, 2012

R.M. Silverstein et al., *Spectrometric Identification of Organic Compounds*. Chichester: Wiley, 2014

H. Kuzmany, *Solid State Spectroscopy*. Heidelberg: Springer, 2009

M. Fox, *Optical Properties of Solids*. Oxford: Oxford University Press, 2010

## LINGUA INGLESE 2

(Titolare: Prof.ssa ALBERTA FERRARINI)

**Periodo:** Il anno, 1 semestre  
**Indirizzo formativo:** Corsi comuni  
**Tipologie didattiche:** ; 3,00 CFU

## MATERIALI INORGANICI FUNZIONALI

(Titolare: Prof.ssa ANTONELLA GLISENTI)

**Periodo:** I anno, 2 semestre  
**Indirizzo formativo:** Corsi comuni  
**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU

### Prerequisiti :

Conoscenze generali di chimica inorganica

### Conoscenze e abilita' da acquisire :

capacit  previsionale relativamente alle principali propriet  chimiche dei materiali inorganici

capacit  di progettare nuovi materiali, nuove procedure di sintesi, o trattamenti al fine di ottenere materiali dalle propriet  chimiche e fisiche richieste

capacit  di studiare ed approfondire i principali problemi legati agli aspetti funzionali di materiali inorganici e dei dispositivi da essi derivati

### Attivit  di apprendimento previste e metodologie di insegnamento :

Lezioni frontali

### Contenuti :

Il corso si propone di approfondire alcuni aspetti legati a materiali inorganici rilevanti da un punto di vista applicativo e funzionale.

L'approccio metodologico sar  improntato al tentativo di mettere in relazione gli aspetti funzionali con le caratteristiche chimiche, fisiche, strutturali, morfologiche del materiale da un lato e le specificit  tecnologiche ed applicative dall'altro. Nell'ampia casistica di possibili materiali e dispositivi saranno presi in considerazione principalmente quelli pi  promettenti nell'ottica di uno sviluppo sostenibile.

In particolare saranno considerati:

if,, Materiali a base ossidica utilizzabili in celle a combustibile ad ossido solido ed in elettrolizzatori ad ossido solido. In funzione di tale applicazione saranno approfonditi sia gli aspetti legati alla sintesi ed alle pi  significative caratteristiche chimiche e fisiche (reattivit  , conducibilit  , stabilit  , permeabilit  ) che le problematiche legate al settore delle celle a combustibile. In particolare le specificit  di sistemi ossidici saranno discusse in relazione al loro impiego nel settore anodico, catodico ed elettrolitico.

if,, Reazioni sostenibili per la produzione di combustibili alternativi ai combustibili fossili.

if,, L'anidride carbonica: da inquinante a risorsa.

if,, Energia dal sole: dai pannelli solari alla fotocatalisi.

if,, Materiali intercalati per lo stoccaggio, il trasporto ed il risparmio di energia.

if,, Siti attivi nelle reazioni di ossidoriduzione: la funzionalizzazione di materiali catalitici.

In tutti i casi i materiali verranno indagati nei diversi stadi che portano dalla sintesi alla realizzazione del dispositivo. A tal fine saranno richiamati, ogniqualvolta necessario, gli aspetti generali legati alle propriet  chimiche e strutturali, onde favorire il consolidarsi di un approccio costruttivo e progettuale allo studio dei materiali.

### Modalit  di esame :

Esame Orale

### Criteri di valutazione :

verr  valutata la capacit  critica e di affrontare e studiare un problema considerandone i diversi aspetti e le molteplici sfaccettature

verr  valutata la capacit  di collegare la conoscenza chimica di base alle risposte funzionali ed alla progettazione dei materiali

### Testi di riferimento :

CONTENUTO NON PRESENTE

### Eventuali indicazioni sui materiali di studio :

Indicazioni bibliografiche fornite dal docente in funzione degli argomenti affrontati

## MATERIALI ORGANICI FUNZIONALI

(Titolare: Prof.ssa MIRIAM MBA BLAZQUEZ)

**Periodo:** I anno, 1 semestre  
**Indirizzo formativo:** Corsi comuni  
**Tipologie didattiche:** 40A+10E; 6,00 CFU

### Prerequisiti :

Corsi di Chimica Organica della Laurea Triennale

### Conoscenze e abilita' da acquisire :

I materiali organici hanno una gran variet  di propriet  che dipendono dalla struttura molecolare. In questo corso studieremo la relazione

proprietà -struttura dei materiali organici.

Alla fine del corso lo studente dovrebbe essere familiarizzato con 1) struttura delle molecole organiche più utilizzate nel campo della chimica dei materiali; 2) le metodologie di sintesi principali per la loro preparazione; 3) le tecniche per la loro caratterizzazione; 4) conosciuto e compreso le applicazioni più recenti di tali molecole nel campo della chimica dei materiali

**Attività di apprendimento previste e metodologie di insegnamento :**

Il corso prevede lezioni frontali ed esercitazioni in aula. Le lezioni saranno svolte utilizzando la lavagna e attraverso l'impiego di slides per la schematizzazione dei contenuti e la discussione dei concetti che richiedono la rappresentazione di strutture molecolari complesse. Saranno inoltre svolti esercizi in aula a gruppi con correzione alla lavagna.

**Contenuti :**

1. Nanostrutture di carbonio
2. Molecole organiche per il fotovoltaico
3. Molecole organiche con proprietà ottiche non lineari
4. Molecole organiche per OLEDs
5. Materiali supramolecolari

**Modalità di esame :**

scritto

**Criteri di valutazione :**

Comprensione degli argomenti svolti e la capacità di applicarle alla progettazione, sintesi e caratterizzazione di materiali organici.

**Testi di riferimento :**

CONTENUTO NON PRESENTE

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Saranno fornite agli studenti dispense e rassegne di letteratura sugli argomenti trattati

## METODI COMPUTAZIONALI IN SCIENZA DEI MATERIALI

(Titolare: Prof. FRANCESCO ANCILOTTO)

**Periodo:** I anno, 2 semestre

**Indirizzo formativo:** Corsi comuni

**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU

**Prerequisiti :**

Fisica quantistica e dello stato solido, chimica fisica. Non sono richieste conoscenze di programmazione.

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

Il corso si propone di fornire agli studenti le basi per la comprensione dei metodi computazionali usati nell'ambito della scienza dei materiali. Questo permetterà allo studente:

- di comprendere come i metodi computazionali possano essere usati per capire e predire il comportamento dei materiali e la relazione tra le proprietà macroscopiche e la struttura microscopica della materia;
- di riconoscere le tecniche numeriche adatte per le diverse scale spaziali e temporali;
- di valutare le assunzioni e delle approssimazioni che stanno alla base delle diverse tecniche di calcolo.

Alla fine del corso lo studente sarà in grado di giudicare in maniera critica potenzialità e limiti dei metodi computazionali usati per lo studio dei materiali e di valutare la qualità delle simulazioni riportate in letteratura. Inoltre avrà raggiunto una maggiore comprensione dell'origine microscopica del comportamento fisico della materia. Infine avrà acquisito le nozioni di base per l'impiego di alcuni comuni pacchetti di calcolo.

**Attività di apprendimento previste e metodologie di insegnamento :**

Il corso verrà tenuto dal prof. Francesco Ancilotto e dalla prof. Alberta Ferrarini.

Il corso prevede lezioni d'aula ed esercitazioni al computer.

**Contenuti :**

Richiami di termodinamica e meccanica statistica classica.

Simulazioni di Dinamica Molecolare classica; integrazione numerica delle equazioni di Newton.

Metodi Monte-Carlo; algoritmo di Metropolis. Simulazioni in diversi ensemble statistici.

Aspetti comuni dei metodi di simulazione: condizioni iniziali e condizioni al contorno; calcolo delle interazioni tra particelle.

Calcolo di grandezze termodinamiche e di proprietà di trasporto.

Interazioni intermolecolari; campi di forze (force fields); modelli atomistici e 'coarse grained'.

Metodi variazionali per la soluzione di equazioni di Schrodinger.

Teoria di Hartree e Hartree-Fock.

Elementi di Teoria del Funzionale Densità (DFT).

Simulazioni "da principi primi".

I diversi metodi verranno discussi in relazione ad applicazioni a problemi di interesse per la scienza dei materiali (cristalli, superfici, soft matter, materiali nanostrutturati).

Il corso è integrato da esercitazioni al computer.

Nelle esercitazioni lo studente effettuerà semplici simulazioni usando pacchetti di calcolo impegnanti nell'ambito dello studio dei materiali, e imparerà a interpretare e a presentare i risultati.

**Modalità di esame :**

Esame orale in cui lo studente discuterà un elaborato scritto, nel quale vengono riportati i risultati di semplici simulazioni numeriche.

**Criteri di valutazione :**

Comprensione dei principali concetti che stanno alla base di metodi per la simulazione numerica di proprietà della materia condensata.

Capacità di interpretare e presentare i risultati di simulazioni fatte al computer.

### Testi di riferimento :

M. P. Allen, D. J. Tildesley, *Computer simulation of liquids*. Oxford: Oxford University Press, 1987  
D. Frenkel, B. Smit, *Understanding Molecular Simulations*, 2nd edition. San Diego: Academic Press, 2002  
R. LeSar, *Introduction to Computational Materials Science*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013

### Eventuali indicazioni sui materiali di studio :

Materiale didattico verrà fornito dai docenti.

## METODI FISICI DI CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI E LABORATORIO

(Titolare: Prof.ssa CHIARA MAURIZIO)

**Periodo:** 1 anno, 1 semestre  
**Indirizzo formativo:** Corsi comuni  
**Tipologie didattiche:** 40A+12E+48L; 10,00 CFU

### Prerequisiti :

Il contenuto del corso presuppone che lo studente sia in possesso di solide competenze di fisica classica, di fisica quantistica e nozioni di base di fisica dello stato solido. Questa preparazione è fornita dagli insegnamenti del corso di Laurea in Scienza dei Materiali e del corso di Laurea in Fisica.

### Conoscenze e abilità da acquisire :

Lo studente imparerà a utilizzare varie interazioni della radiazione con la materia allo scopo di ottenere informazioni sulla composizione di un materiale, sulla distribuzione spaziale delle specie chimiche presenti e sulla struttura cristallina. Gli esperimenti condotti in prima persona dallo studente consentiranno inoltre di misurare alcune proprietà elettroniche di materiali e imparare ad ottenere informazioni sulla topografia di superfici nanostrutturate. Alla fine del corso lo studente padroneggerà alcuni esempi di base di metodi spettroscopici e di microscopia utilizzati nello studio dei materiali e sarà in grado di discuterne criticamente i risultati.

### Attività di apprendimento previste e metodologie di insegnamento :

Lezioni frontali e sessioni di misura (sia dimostrazioni che esperimenti svolti direttamente dagli studenti) presso i laboratori di ricerca e i laboratori didattici del Dipartimento di Fisica e Astronomia.

### Contenuti :

Principi di base dell'interazione radiazione-materia.

La sezione di scattering

L'interazione coulombiana a due corpi ione-nucleo e la Spettrometria di Rutherford Backscattering.

La perdita di energia degli ioni nella materia.

La rivelazione di specie leggere: analisi con reazioni nucleari e la spettroscopia dei nuclei di rinculo.

La spettrometria di massa di ioni secondari: il fenomeno dello sputtering, gli spettrometri di massa, la quantificazione dei risultati.

Microscopia a scansione di sonda.

La diffrazione a raggi X ad alta risoluzione da materiali cristallini.

La teoria cinematica e la teoria dinamica.

Monocromatizzazione e collimazione dei raggi X.

L'intensità diffratta nello spazio reciproco.

La riflettività dei raggi X e le informazioni che se ne traggono.

Esperimenti di spettroscopia di assorbimento (visibile e vicino infrarosso) in un semiconduttore, esperimento di Heynes e Shockley

### Modalità di esame :

Esame orale e valutazione delle relazioni di laboratorio.

### Criteri di valutazione :

Si valuterà la capacità dello studente di comprendere e discutere criticamente le basi fisiche ed i possibili utilizzi di metodi fisici di analisi dei materiali, incluse le strategie sperimentali approfondite nel corso.

### Testi di riferimento :

L.C. Feldman, J.W. Mayer, *Fundamentals of Surface and Thin Film Analysis*. New York: North-Holland, 1986

P.F. Fewster, *X-ray Scattering from Semiconductors*. London: Imperial College Press, 2003

E. Meyer, H. Hug, R. Bennowitz, *Scanning Probe Microscopy*. Berlin Heidelberg New York: Springer Verlag, 2003

### Eventuali indicazioni sui materiali di studio :

A supporto dei testi consigliati saranno disponibili in rete le slides utilizzate nel corso delle lezioni e le dispense di guida agli esperimenti.

## NANOFABBRICAZIONE

(Titolare: Prof. FILIPPO ROMANATO)

**Periodo:** Il anno, 1 semestre  
**Indirizzo formativo:** Corsi comuni  
**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU

### Prerequisiti :

corsi del terzo anno di scienza dei materiali

### Conoscenze e abilità da acquisire :

Conoscenze sulle principali tecniche litografiche, sui processi e sulle metodologie di nanofabbricazione.

Abilità nel correlare fenomeni e proprietà di materiali e di tecniche per l'ottenimento e lo sviluppo di tecnologie di nanofabbricazione.

### Attività di apprendimento previste e metodologie di insegnamento :

il corso prevede sia lezioni in aula sia visite presso le facilities alcune camere pulite di nanofabbricazione per partecipare a dimostrazioni pratiche di tecniche di processo

### Contenuti :

Molti degli impressionanti progressi tecnici e scientifici degli ultime due decenni è basato sulla capacità di controllare i singoli fenomeni chimico-fisici a livello di pochi nanometri cioè alla scala di dimensioni alla quale avviene la maggior parte dei fenomeni naturali. Questo controllo è stato ottenuto sviluppando sistemi e processi di micro e nano fabbricazione per la realizzazione di dispositivi (anche denominati lab-on-chip) in grado di scambiare segnali (rivelazione e attuazione) con sistemi delle dimensioni di pochi micrometri



coniando, di fatto, la definizione di nanotecnologia.

Il corso discuterà il processo di miniaturizzazione e il processo di riduzione di scala di molti fenomeni naturali che contraddistinguono il funzionamento dei nanodispositivi. Verranno presentate le principali tecnologie di nanofabbricazione e verranno presentati esempi di applicazione per la realizzazione di dispositivi ed esperimenti di nanoscienza. Dopo una generale distinzione tra processi top-down e bottom-up, verranno illustrate le tecnologie di litografia (UV, elettronica, X-ray, ionica, imprinting, interferenziale etc), processi di deposito (plasma assisted, in fase vapore o chimica, sol-gel etc.) e di sottrazione in fase gassosa (reactive ion etching, milling) o liquida (etching chimici). Verrà rivista la tecnologia di fabbricazione di dispositivi elettronici su base silicio.

Il corso si orienta a studenti in vista della tesi di laurea per la ampia correlazione tra fenomeni fisici, chimici, bio-chimici che i processi di nanofabbricazione richiedono in vista della realizzazione di nanostrutture e nanodispositivi. Vengono trattati tematiche di apertura verso le ricerche di nanoscienze e nanotecnologie industriali.

Il corso viene completato da delle visite in laboratorio di nanofabbricazione a Padova presso il laboratorio LaNN e a Trieste presso i laboratori di nanofabbricazione del CNR presso il sincrotrone Elettra. Durante queste visite si avranno dimostrazioni pratiche dei processi litografici trattati durante il corso in aula.

Syllabus: Nanofabbricazione :

Programma

Nanofabbricazione: concetti generali

Tipi di litografie: Top down e Bottom-up

Mask "mask less", litografia parallele seriali

Tipi di processi sottrattivi

Sviluppo di processi

Il ruolo della nanofabbricazione nei processi produttivi

L'approccio metodologico della nanofabbricazione: tematica interdisciplinare.

Litografie e tipi di dispositivi

Ottiche diffrattive,

Microfluidica,

Dispositivi elettronici, lab-on chip, etc.

Litografie 2D e 3D

Risoluzioni vs throughput

Litografie tridimensioni

Combinazioni di litografie

FIB

Resist less

Mask less lithography

Primo tipo di litografia

Resist

Introduzione ai resist: proprietà litografiche e di processo

tipi di resist

Processi sui resist

Spinning

Baking

Dose and development

Contrast, resolution,

Lithographic sensibility

Photochemical Quantum efficiency

Plasma etching resistance

Electron beam lithography

Electron sources

Vector scan

Beam blanking

Interaction with electron beam

Energy dependence

Proximity effects "dose correlation

Resolution limit

Exposure time

Stitching

Overlay

Single level- multi levels

Examples

Generalità sulle tecniche litografiche parallele

Replica di pattern

Maschere

Stampi

Litografia UV

Litografia UV di prossimità

Litografia UV campo lontano

Litografia ottica  
Principi generali  
Diffrazione

Lithografia interferenziale  
Principio dell'interferenza  
Modalità™  
Proprietà™  
Litografia X-ray  
LTX di prossimità™  
Litografia X-ray campo lontano  
Deep X-ray  
Next generation Deep EUV  
Alignment and exposure  
Several step processes  
Nanoimprinting

**Modalità di esame :**

Approfondimento di una tematica, preparazione di una presentazione, discussione scritta.  
Esame orale, presentazione dell'elaborato e verifica dell'apprendimento dei principali concetti di nano litografia.

**Criteri di valutazione :**

La valutazione della preparazione si baserà sulla comprensione degli argomenti svolti e sulla capacità di fare collegamenti fra diversi argomenti. Si valuteranno anche le relazioni scritte presentate sulla parte di esercitazione.

**Testi di riferimento :**

CONTENUTO NON PRESENTE

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

vengono dispensate le presentazioni d'aula e capitoli di libri o articoli sulle specifiche tecniche litografiche.

---

## OTTICA DEI MATERIALI

(Titolare: Prof. MORENO MENEGETTI)

**Periodo:** Il anno, 1 semestre  
**Indirizzo formativo:** Corsi comuni  
**Tipologie didattiche:** 48A; 6,00 CFU

**Prerequisiti :**

Conoscenze di base della propagazione delle onde elettromagnetiche e della meccanica quantistica.

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

Gli studenti acquisiranno i concetti fondamentali per comprendere i fenomeni conseguenti all'interazione tra la radiazione elettromagnetica, anche di grande intensità, come quella di laser a impulsi ultracorti, e materiali massivi e nanostrutturati.

**Attività di apprendimento previste e metodologie di insegnamento :**

Le lezioni sono frontali e stimoleranno un dialogo con gli studenti per evidenziare lo sviluppo dell'apprendimento.

**Contenuti :**

La suscettività ottica. Modelli per la descrizione della suscettività ottica lineare e non lineare dei materiali. Propagazione di onde elettromagnetiche in mezzi lineari e non lineari. Teoria quantomeccanica della suscettività ottica. Tecniche spettroscopiche per la misura delle proprietà ottiche non lineari dei materiali. Descrizione delle proprietà al secondo ordine di mezzi non lineari. Processi dipendenti dall'indice di rifrazione non lineare. Assorbimenti multifotonici. Scattering Raman e spettroscopia SERS di materiali nanostrutturati.

**Modalità di esame :**

L'esame sarà orale.

**Criteri di valutazione :**

Gli studenti dovranno dimostrare di sapere interpretare i fenomeni di base dell'interazione della radiazione elettromagnetica con i materiali.

**Testi di riferimento :**

Boyd R., Non linear optics. : Academic Press,

---

## OTTICA E FISICA DEI LASER

(Titolare: Dott.ssa TIZIANA CESCO)

**Periodo:** Il anno, 1 semestre  
**Indirizzo formativo:** Corsi comuni  
**Tipologie didattiche:** 48A; 2,00 CFU

---

## PROVA FINALE

(Titolare: da definire)

**Periodo:** Il anno, 2 semestre  
**Indirizzo formativo:** Corsi comuni  
**Tipologie didattiche:** ; 38,00 CFU

# STRUTTURA E DINAMICA DELLE SUPERFICI

(Titolare: Prof. MAURO SAMBI)

**Periodo:** 1 anno, 2 semestre  
**Indirizzo formativo:** Corsi comuni  
**Tipologie didattiche:** 48A+10E; 6,00 CFU

## Prerequisiti :

Corsi della Laurea in Scienza dei Materiali, con particolare riferimento ai contenuti dei corsi di Fisica 2, Chimica Fisica 2, Chimica Inorganica e dello Stato Solido, Struttura dei Solidi, Fisica dello Stato Solido.

## Conoscenze e abilità da acquisire :

Il corso fornisce le basi per una comprensione del ruolo delle superfici nel determinare le proprietà dei materiali e delle nanostrutture, con particolare riferimento alla produzione di aggregati funzionali supportati su superfici inorganiche. Saranno introdotte le necessarie nozioni di chimica e struttura delle superfici e verranno considerati i fattori termodinamici e cinetici che possono favorire od ostacolare l'auto-organizzazione atomica e molecolare di superficie. Si considereranno quindi le principali classi di strutture bidimensionali self-assembled supportate, i relativi metodi di preparazione e le principali tecniche di caratterizzazione morfologica, strutturale, elettronica e funzionale degli aggregati. Verranno approfondite le tecniche di caratterizzazione strutturale di superficie che fanno uso di luce di sincrotrone.

## Attività di apprendimento previste e metodologie di insegnamento :

Didattica frontale.

## Contenuti :

Introduzione alla chimica delle superfici, necessità dell'ultra-alto vuoto. Energia libera di superficie (gamma), tensione superficiale. Modalità di crescita epitassiale. Cristalli: reticoli di Bravais, celle unitarie, indici di Miller. Anisotropia di gamma nei solidi cristallini. Metodo di Wulff per la determinazione della forma di equilibrio dei cristalli. Minimizzazione di gamma: rilassamento, ricostruzione, faceting. Superfici terminate bulk di elementi e composti: dipolo superficiale e autocompensazione. Superfici vicinali. Superstrutture: notazione di Wood e notazione matriciale. Strutture semplici, di coincidenza, incommensurate. Pattern di Moiré.

STM - principi e modalità di utilizzo: misure ad altezza e a corrente costante. Determinazione della funzione lavoro locale, spettroscopia di tunneling a scansione (STS). Current Imaging Tunneling Spectroscopy (CITS). Tecniche di nanomanipolazione. STM in soluzione ed elettrochimico. AFM.

Cinetica di superficie: eventi microscopici di diffusione. Teoria della nucleazione di campo medio. Crescita dendritica alle basse temperature. Crescita frattale, crescita a isole compatte. Limite termodinamico di Wulff. Riduzione della dispersione dimensionale con Ostwald ripening. Crescita su substrati anisotropi: step decoration di superfici vicinali. Quantum wires su superfici fcc(110), quantum dots su ricostruzioni. Quantum dots su network di dislocazioni. Strati templanti di ossidi per la crescita di nanocluster metallici. Superreticoli 3D di quantum dots di semiconduttori.

Diffrazione di elettroni a bassa energia (LEED). Approccio cinematico. Dall'immagine LEED alla periodicità nello spazio reale e conversione delle matrici. Presenza di domini. Diffrazione di elettroni ad alta energia a incidenza radente (RHEED).

Fisiorbimento e chemisorbimento. Trattazione pseudo-omogenea: isoterme. Isotherma di Langmuir per il chemisorbimento non dissociativo, dissociativo, competitivo. Isotherme BET, di Temkin, BLK, Freundlich, Fowler-Guggenheim, Hill-De Boer. Desorbimento: equazione di Polanyi-Wigner. Desorbimento termico programmato (TPD). Interpretazione degli spettri TPD.

Introduzione al self-assembly organico. Metodi di deposizione. Interazioni overlayer-substrato e inter-overlayer. Interazione O-S forte. Interazioni di VdW overlayer-substrato. Network supramolecolari vs network covalenti. Strutture supramolecolari di superficie a ponti a idrogeno. Networks nanoporosi. Network supramolecolari basati sulla coordinazione di metalli.

Luce di sincrotrone. Produzione: LINAC, booster, anello di accumulazione. Parametri caratterizzanti della sorgente. Brillanza spettrale. Proprietà della radiazione da magnete curvante: ampiezza spettrale, collimazione. Proprietà della radiazione da insertion device: ondulatori e wiggler. Dall'anello di accumulazione alla camera sperimentale - la beamline: specchi e monocromatori.

Fotoemissione ed emissione Auger. Analisi qualitative e quantitative. Il Chemical Shift. ARXPS. Applicazioni della luce di sincrotrone. Alta risoluzione energetica, temporale e spaziale (spettromicroscopia fotoelettronica). Variabilità dell'energia del fotone. Dipendenza delle sezioni d'urto di fotoemissione dall'energia del fotone. Uso dei minimi di Cooper. Diffrazione fotoelettronica angle scanned e energy scanned. Chemical shift photoelectron diffraction. Olografia fotoelettronica.

Cenni sull'assorbimento di raggi X: modalità di esecuzione dell'esperimento e assorbimento, fluorescenza, elettroni secondari. Cenni sull'assorbimento di raggi X: XANES, EXAFS, NEXAFS. Cenni al dicroismo magnetico lineare e circolare di raggi X.

## Modalità di esame :

Prova orale.

## Criteri di valutazione :

Criteri di valutazione della prova orale sono la capacità di esposizione di un argomento a scelta, il rigore quantitativo nelle dimostrazioni, il grado di approfondimento degli argomenti, la capacità di istituire nessi tra argomenti diversi trattati nel corso.

## Testi di riferimento :

G. Somorjai, Y. Li, Introduction to Surface Chemistry & Catalysis. : John Wiley & Sons, 2010

K. Kolasinski, Surface Science. : John Wiley & Sons, 2012

## Eventuali indicazioni sui materiali di studio :

Appunti e presentazioni powerpoint di lezione, articoli e review indicati dal docente.

<http://www.chimica.unipd.it/mauro.sambi/pubblica/didattica.html>

(Titolare: Prof. ALESSANDRO MARTUCCI)

**Periodo:** Il anno, 1 semestre  
**Indirizzo formativo:** Corsi comuni  
**Tipologie didattiche:** 40A+10E; 6,00 CFU

**Prerequisiti :**

Scienza dei materiali

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

Fornire le conoscenze sulle principali tecnologie impiegate nella produzione e nell'ingegnerizzazione dei materiali ceramici, dei vetri e dei compositi.

**Attività di apprendimento previste e metodologie di insegnamento :**

Lezioni frontali e di laboratorio.

**Contenuti :**

Materiali ceramici: processi di produzione, proprietà meccaniche, difetti.

Vetri: processi di produzione (vetro piano, vetro cavo, fibre), proprietà meccaniche, proprietà chimiche e degrado.

Compositi: processi di produzione dei materiali compositi a matrice polimerica e ceramica, proprietà meccaniche. Nanocompositi.

Introduzione alla selezione e progettazione dei materiali.

Laboratorio:

1. Sinterizzazione di un materiale ceramico strutturale e valutazione della sua resistenza meccanica.

2. Processo di fusione di un vetro e caratterizzazione delle sue proprietà ottiche.

**Modalità di esame :**

Esame Orale

**Criteri di valutazione :**

La valutazione dello studente si baserà sulla comprensione degli argomenti svolti, sull'acquisizione dei concetti e delle metodologie proposte e sulla capacità di applicarli in modo consapevole ed autonomo.

**Testi di riferimento :**

CONTENUTO NON PRESENTE

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

Dispense e lucidi forniti dal docente.

---

## TECNOLOGIE E MATERIALI PER LO SVILUPPO ENERGETICO SOSTENIBILE

(Titolare: Prof. GAETANO GRANOZZI)

**Periodo:** I anno, 2 semestre  
**Indirizzo formativo:** Corsi comuni  
**Tipologie didattiche:** 24A+36L; 6,00 CFU

**Prerequisiti :**

Concetti di Termodinamica e Cinetica Chimica

Concetti base di Elettrochimica

**Conoscenze e abilità da acquisire :**

-Sostenibilità Ambientale

-Efficienza energetica

-Sorgenti di energia alternative

-Produzione dell'idrogeno

-Uso dell'energia solare

-Fotocatalisi

-Elettrocatalisi

-Celle a combustibile

**Attività di apprendimento previste e metodologie di insegnamento :**

Lezioni di aula con presentazioni Powerpoint (24 ore)

Esercitazioni di Laboratorio (36 ore)

**Contenuti :**

Lezioni di aula:

Fonti di energia primarie e secondarie.

Concetto di sostenibilità .

Energy flow.

Exergia.

Concetto di life-cycle per un prodotto ed un processo.

Concetti base di economia dei materiali.

Energie rinnovabili e non rinnovabili.

Processi green.

Metodi di conversione dell'energia.

Economia dell'idrogeno.

Energia dalle biomasse.

Solar fuels.

Celle a combustibile ed elettrolizzatori.

Immagazzinamento della energia elettrochimica: batterie e capacitori.

Materiali per elettrocatalisi, fotoelettrocatalisi e catalisi termica.

*Esercitazioni di laboratorio:*

*3 esperienze su fotoelettro-decomposizione dell'acqua, produzione catalitica di idrogeno e celle a combustibili*

**Modalita' di esame :**

*colloquio orale*

**Criteri di valutazione :**

*SarÃ  valutata l'acquisizione delle conoscenze e delle abilitÃ  piÃ¹ sopra descritte.*

**Testi di riferimento :**

*Cahen, David; Ginley, David S., Fundamentals of materials for energy and environmental sustainability edited by David S. Ginley, David Cahen. Cambridge [etc.]: Cambridge university press, 2012*

**Eventuali indicazioni sui materiali di studio :**

*Dispense, presentazioni e libro di testo*