UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DI MILANO-BICOCCA

COURSE SYLLABUS

Physics of Materials With Laboratory

2627-3-ESM01Q017

Obiettivi

Fornire allo studente le basi di conoscenza per la comprensione delle proprietà fisiche dei materiali e della loro misura.

I principali obiettivi formativi sono:

- conoscenza e capacità di comprensione delle proprietà fisiche dei materiali;
- conoscenza e capacità di comprensione delle proprietà fisiche dei materiali applicate ai principali utilizzi;
- autonomia di giudizio (making judgements) nell'analisi di proprietà fisiche e nell'impostazione di esperimenti scientifici;
- abilità comunicative (communication skills) nell'esposizione di teorie fisiche complesse e nella relazione di esperimenti scientifici;
- capacità di apprendere in modo autonomo dal materiale didattico aggiuntivo, dai manuali e dalle specifiche tecniche della strumentazione (learning skills).

Contenuti sintetici

- Proprietà dei materiali (meccaniche, vibrazionali, termiche, elettroniche, magnetiche, dielettriche, ottiche,..)
- Materiali (metalli, semiconduttori, dielettrici, magneti, piezoelettrici,...)
- Dispositivi a stato solido (cella fotovoltaica, LED, termocoppia, transistor, ...).
- Strumentazione di un laboratorio di fisica dei materiali (misure elettriche, misure ottiche, ...)

Programma esteso

LABORATORIO DI FISICA DEI MATERIALI

Il laboratorio consiste in una serie di esperienze della durata di due o tre pomeriggi ciascuna, incentrate principalmente sulle proprietà dei materiali semiconduttori. Lo scopo delle esperienze è soprattutto quello di sviluppare senso critico e autonomia nel processo di misura delle proprietà fisiche dei materiali.
Le esperienze comprendono:

- la misura dell'effetto Hall per la determinazione delle proprietà elettriche e del drogaggio dei semiconduttori;
- la caratterizzazione delle curve corrente–tensione di una giunzione p–n;
- la misura delle proprietà di assorbimento e riflessione ottica;
- la misura dell'efficienza delle celle fotovoltaiche in funzione della lunghezza d'onda della luce incidente;
- la misura del tempo di vita dei portatori fotoeccitati.

INTRODUZIONE AL LABORATORIO

Fotoni, spettroscopia, trasmissione, assorbimento, emissione, interferenza, sorgenti, lenti e specchi, elementi dispersivi, monocromatore, rivelatori, spettrofotometro, parametri misura spettroscopica, sicurezza, semiconduttori, elettroni e buche, droganti, giunzione pn, diodo, fotodiodo, cella fotovoltaica, LED, conducibilità, mobilità, ohmicità contatti, metodo di Hall, metodo di VanDerPauw, assorbimento ottico in semiconduttori.

TEORIA - PARTE 1

Cristalli e legami. Solidi cristallini, policristallini, amorfi, strutture cristalline, legami nei solidi: ionici, covalenti, metallici, idrogeno, van der Waals, costante di Madelung, reticoli di Bravais, cella unitaria e di wigner-Seitz, cella convenzionale, strutture ad alto impaccamento, indici di Miller, onde piane e reticolo, serie di Fourier per la descrizione di proprietà periodiche dei materiali, reticolo diretto e reciproco.

Proprietà meccaniche. Stress uniassiale-di taglio-idrostatico, curve stress-strain, elasticità, deformazione plastica, materiali fragili e duttili, snervamento, incrudimento, necking, frattura, resilienza e tostezza, modulo di Young, modulo di rigidità o scorrimento, modulo di bulk, rapporto di Poisson: significato e limiti, potenziale interatomico e modulo di Young, correlazione tra tipo di legame e modulo di Young, difetti puntuali ed estesi, dislocazioni e vettore di Burger, ferro e acciaio, tensore di strain, tensore di stress, esempio: germanio epitassiale su silicio.

Proprietà vibrazionali e termiche. Capacità termica di Dulong e Petit a partire dal teorema dell'equipartizione, oscillatori indipendenti, catena monoatomica lineare, relazione di dispersione kappa-omega, velocità di fase e di gruppo, velocità del suono, onde stazionarie, zona di Brillouin, significato della periodicità di omega(kappa) nel reticolo reciproco, cenni alla catena biatomica lineare, branca acustica e ottica, dispersione di cristali con più atomi per cella, interazione tra branca ottica e radiazione: perché si chiama branca ottica, effetti della dimensione finita del cristallo, quantizzazione delle vibrazioni e fononi, richiami statistica di Bose-Einstein, modello di Einstein, problemi del modello di Einstein e risultati del modello di Debye, relazione di dispersione in solidi 3D, reticolo reciproco del reticolo FCC e esempi di dispersione in alluminio diamante silicio, stima spannometrica delle frequenze di vibrazione del diamante a partire dal modulo di Young, espansione termica, transizioni di fase, fusione, criterio di Lindemann, definizione di conducibilità termica, modello microscopico per la conducibilità termica.

Proprietà classiche dei metalli. Modello di Drude per i conduttori, equazione del moto di un elettrone in campo elettrico statico, tempo di scattering, tempo minimo di scattering, velocità termica e velocità di deriva, mobilità, conducibilità, effetto Hall, spostamento elettrico D, polarizzazione P, relazione D E P, funzione dielettrica, suscettività elettrica, significato di parte reale e immaginaria di epsilon, indice di rifrazione e funzione dielettrica, coefficiente di estinzione, coefficiente di assorbibento, onde evanescenti, equazione del moto dell'elettrone in campo elettrico variabile, frequenza di plasma, riflessione totale nei metalli, dimostrazione riflessione a partire da numeri complessi, stima della penetrazione nell'alluminio, conducibilità termica elettronica, legge di Wiedemann-Franz, numero di Lorenz, cenni all'effetto termoelettrico, coefficiente di Seebeck, termocoppia, generatore termoelettrico, Effetto Peltier, Limiti del modello di Drude.

TEORIA - PARTE 2

Proprietà quantistiche dei materiali. Ipotesi modello di Sommerfeld, semiconduttori e metalli, elettroni liberi in una scatola, condizioni periodiche di Born-von Karman, k minimo, momento dell'onda elettronica, energia e k di Fermi, E_F per gli elettroni liberi nella scatola, densità di stati, richiami di statistica di Fermi-Dirac, capacità termica elettronica, teorema di Bloch, significato di k rispetto alla simmetria della funzione d'onda, classificazione elettroni liberi secondo Bloch, momento e momento cristallino, elettroni debolmente legati (solo risultati), velocità di fase e di gruppo degli elettroni, equazione di moto dell'elettrone nel cristallo, massa efficace, trasporto a T=0 per

semiconduttore e metallo, trasporto nei metalli reali, buche/lacune, bande in solidi 3D, bande di Al/Si/Ge/GaAs, densità di stati in solidi 3D.
Semiconduttori. impostazione del problema della statistica dei semiconduttori, posizione approssimativa del potenziale chimico. approssimazione della funzione di Fermi, densità di portatori e temperatura, densità di stati efficace, numero di coppie dell'intrinseco, posizione del potenziale chimico, modello idrogenoide per gli estrinseci: energia e raggio dell'orbita, statistica qualitativa degli estrinseci, statistica quantitativa degli estrinseci, posizione del potenziale chimico, legge di azione di massa, conducibilità nei semiconduttori.
Dispositivi a semiconduttore. Introduzione alla giunzione pn, elettrostatica della giunzione, campo elettrico e potenziale, dimensione della zona svuotata, piegamento delle bande, livellamento del potenziale chimico, equilibrio dinamico delle correnti dei maggioritari e minoritari, effetto della tensione esterna, equazione del diodo, giunzione illuminata, fotodiodo, cella fotovoltaica, efficienza e limiti, diodo a emissione di luce, transistor a giunzione pn (JFET), sistema MOS metallo-ossido-semiconduttore, transistor MOS-FET, cella di memoria, matrice di celle, tecnologia dei semiconduttori.
Materiali magnetici. Dipolo magnetico, energia magnetica del dipolo, dipoli nei materiali, magnetizzazione, classificazione fenomeni magnetici, ferro- antiferro- ferri- para- dia- magnetismo, campo magnetico esterno e interno, campo e induzione magnetica, suscettività magnetica, permettività magnetica relativa, energia di un solido para- o dia-magnetico, richiami magnetismo atomo di idrogeno, rapporto giromagnetico / fattore di Landé, atomi a più elettroni, paramagnetismo di Curie in un sistema a due livelli, paramagnetismo di Pauli, ordine magnetico spontaneo: ferro-antiferro-ferri, origine microscopica e energia di scambio, tangente iperbolica, Hamiltoniana di Heisenberg e sistema ferromagnetico a due livelli, energia magnetica e temperatura di Curie, magnetizzazione spontanea vs T, paramagnetismo oltre la temperatura di Curie: legge di Curie-Weiss, domini di Weiss, pareti di Bloch, ciclo di isteresi M vs B_0 e B vs H, potenza dissipata nel ciclo di isteresi, magneti dolci e duri.
Dielettrici. Permettività e suscettività dielettriche, spostamento elettrico, polarizzazione, polarizzabilità, polarizzabilità atomica-ionica-orientamento, campo medio e locale nei materiali, relazione di Clausius-Mossotti, problema dei dielettrici nei transistor, risposta in frequenza del dielettrico: spiegazione qualitativa, modello di Lorentz senza dissipazione, modello di Lorentz completo, epsilon immaginaria e dissipazione per effetto Joule, epsilon per due risonanze (ionica e atomica), epsilon per N risonanze, relazione tra modello di Lorentz e assorbimento nelle bande dei solidi, modello TART (trasm-assorb-rifless-trasmissione), relazione tra energy gap e epsilon statica, impurezze nei dielettrici e colore, ferroelettrici, piezoelettrici, breakdown elettrico,
Superconduttori. Cenni qualitativi ai superconduttori, resistenza nulla, temperatura critica-campo magnetico critico-corrente critica, effetto Meissner, applicazioni.

Prerequisiti

Buone conoscenze di Fisica Generale e tecniche di calcolo integrale e differenziale. Conoscenze di base di Fisica Quantistica.

Modalità didattica

34 lezioni da 2 ore svolte in modalità erogativa in presenza per il modulo di Fisica dei Materiali e l'introduzione al laboratorio;
9 attività di laboratorio da 4 ore ciascuna svolte in modalità interattiva in presenza;
Lezioni frontali e laboratori sono tenuti in lingua italiana.

Materiale didattico

Solid State Physics: An Introduction, di Philip Hofmann (Testo principale di riferimento)
Materiale distribuito dal docente.

Periodo di erogazione dell'insegnamento

II Semestre

Modalità di verifica del profitto e valutazione

In sintesi le prove si compongono di:

- Colloqui sugli argomenti svolti a lezione;
- Colloquio sulla relazione di laboratorio;
- Colloquio sulle esperienze di laboratorio.
- Di seguito vengono descritti i dettagli delle prove.
- L'esame di Fisica dei Materiali con Laboratorio si articola in prove orali con la compilazione di una relazione di laboratorio. Il corso di Fisica dei materiali con Laboratorio e' composto da 10 CFU. L'esame è diviso in moduli di laboratorio e di teoria. Questi moduli possono essere sostenuti o contemporaneamente o separatamente.

Il modulo di laboratorio prevede la valutazione di una relazione su una delle esperienze pratiche che sono state affrontate in laboratorio. La valutazione sulla relazione si basa sulla correttezza, sulla completezza e sulla chiarezza dell'esposizione delle misure. La prova orale invece va ad analizzare le conoscenze su tutte le esperienze che lo studente ha affrontato in laboratorio.

Per questo modulo non è necessario conoscere a fondo la teoria, che e' invece oggetto degli altri moduli, ma è sufficiente conoscere le minime nozioni di fisica dei materiali necessarie alla comprensione dell'esperimento. Queste minime nozioni sono quelle riportate nelle schede di laboratorio relative alle esperienze svolte. Ovviamente si dà per scontato che si conoscano gli argomenti dei laboratori degli anni precedenti. In questo modulo si va ad analizzare principalmente la comprensione della metodologia dell'esperimento, la comprensione della strumentazione (ad esempio il funzionamento, i limiti strumentali, le procedure), e l'analisi dei dati (incertezze, elaborazione, presentazione).

I moduli di Fisica dei Materiali sono invece incentrati sulla teoria della fisica dei materiali. I dettagli della suddivisione dei due moduli sono riportati nell'elearning. Per i moduli di Fisica dei Materiali verranno valutate la comprensione dei fenomeni fisici, la capacità di ricondurre fenomeni complessi a modelli semplici, l'abilità di utilizzare modelli matematici per quantificare le proprietà fisiche dei materiali.

Il modulo di Laboratorio e il primo modulo di Fisica dei Materiali vengono erogati prima e pertanto possono essere sostenuti anche prima della fine del corso (valutazione in itinere).

La graduazione dei voti sarà la seguente:
< 18: votazione insufficiente; non raggiunto il livello minimo di preparazione;
18-21: preparazione su un numero ridotto di argomenti presenti nel programma del corso, con capacità di trattazione e analisi limitate che emergono solo a seguito dell'aiuto e delle domande del docente; competenza espositiva e lessico non sempre corretti, capacità di elaborazione critica limitata;
22-24: preparazione su una parte degli argomenti presenti nel programma del corso, capacità di analisi autonoma limitata, uso di un lessico corretto anche se non del tutto accurato e chiaro e di una capacità espositiva a tratti incerta;

25-27: preparazione su un numero ampio di argomenti trattati nel programma del corso, capacità di svolgere in modo autonomo l'argomentazione e l'analisi critica, capacità di applicazione delle conoscenze ai casi concreti, uso di un lessico corretto e competenza nell'uso del linguaggio disciplinare;
28-30/30L: preparazione completa ed esaustiva sugli argomenti in programma d'esame, capacità personale di trattazione autonoma e di analisi critica dei temi, ottima capacità di pensiero critico e autonomo, piena padronanza del lessico disciplinare e di una capacità espositiva rigorosa e articolata.

Orario di ricevimento

Alla fine delle lezioni o su appuntamento.

Sustainable Development Goals

ISTRUZIONE DI QUALITÁ | ENERGIA PULITA E ACCESSIBILE | LAVORO DIGNITOSO E CRESCITA ECONOMICA | IMPRESE, INNOVAZIONE E INFRASTRUTTURE | CONSUMO E PRODUZIONE RESPONSABILI | LOTTA CONTRO IL CAMBIAMENTO CLIMATICO