UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DI MILANO-BICOCCA

SYLLABUS DEL CORSO

Solid State Physics

2526-1-FSM02Q001

Obiettivi

l corso si propone di far acquisire agli studenti concetti, metodi e modelli della fisica dei solidi cristallini, perfetti e infiniti. A questo scopo, gli argomenti sono suddivisi in due parti. Una prima parte del corso è dedicata alla trattazione di fenomeni più semplici, descritti in termini di periodicità del cristallo, senza interazione tra elettroni e ioni. Particolare attenzione sarà dedicata al calcolo delle proprietà macroscopiche sulla base di quelle microscopiche. La seconda parte comprende i fenomeni in cui gli elettroni interagiscono con il reticolo cristallino e le variazioni della sua periodicità, generando, rispettivamente, la struttura a bande dei cristalli e le proprietà di trasporto dei solidi. Alla fine di ogni macro-argomento, un'adeguata quantità di tempo sarà dedicata al ripasso, per familiarizzare con i concetti e rinfrescare le derivazioni matematiche, anche attraverso una discussione con gli studenti. L'integrazione di un libro principale con la presentazione in powerpoint delle lezioni, caricata sulla pagina web del corso, è un aspetto importante del metodo didattico che mira anche a far acquisire agli studenti un linguaggio tecnico corretto.
In sintesi, i principali risultati raggiunti dagli studenti saranno:

1. Conoscenza e comprensione dei concetti relativi alla periodicità del reticolo e allo spazio reciproco.

2. Applicazione della conoscenza e della comprensione di approssimazioni e delle espansioni di Taylor per ricavare l'espressione microscopica di proprietà macroscopiche.

3. La capacità di giudicare il potere predittivo dei modelli, in relazione ai dati sperimentali, e decidere quale teoria si adatti meglio ad essi.

4. Abilità comunicative, basate su un uso corretto dei termini tecnici, ponendoli all'interno di una narrazione che presenti fatti e ipotesi.

5. Capacità di apprendimento, incentivata da una ricca bibliografia e dalle indicazioni degli scienziati maggiormente responsabili di esperimenti, teorie, o modelli.

Contenuti sintetici

Parte 1
I. Strutture cristalline e diffrazione
II. Dinamica reticolare e teoria elastica dei solidi
III. Proprietà termiche dei solidi
IV. Gas di elettroni liberi

Parte 2
V. Bande elettroniche
VI. Trasporto elettronico di carica
VII. Trasporto elettronico di calore ed effetti termoelettrici
VIII. Effetti di campi magnetici deboli e forti

Programma esteso

PARTE 1

I. Strutture cristalline e diffrazione

- Reticoli di Bravais e strutture cristalline notevoli
- Teoria della diffrazione e tecniche sperimentali
- Costruzione di reticolo reciproco e zona di Brillouin, in particolare per strutture FCC, BCC e HCP
- Calcolo della distanze tra punti ad alta simmetria nella zona di Brillouin del Silicio.

II. Dinamica reticolare

- Elementi di dinamica reticolare: matrice delle costanti di forza e sue simmetrie, matrice dinamica ed equazioni di moto
- Relazioni di dispersione e spostamenti di una catena lineare biatomica
- Teoria della elasticità ed onde sonore
- Costruzione e diagonalizzazione matrice dinamica per fcc monoatomico: autovalori e displacement patterns
- Modi normali come modi collettivi
- Fononi e loro statistica.
- Scattering inelastico e misura della dispersione dei fononi tramite scattering neutronico

III. Proprietà termiche dei solidi

- Densità di stati vibrazionali
- Calore specifico di Debye e di Einstein
- Potenziali anarmonici e loro effetti: espansione termica e calore specifico di oscillatore 1-D
- Espansione termica e parametro di Gruneisen in 3-D
- Conducibilità termica tramite vibrazioni reticolari in 3-D

IV. Gas di elettroni liberi

- Modello degli elettroni liberi
- La statistica di Fermi-Dirac per gli elettroni
- Densità degli stati: definizione e calcolo per gas 3-D, 2-D e 1-D.
- Andamento del potenziale chimico con la temperatura

- Contributo elettronico al calore specifico e i fermioni pesanti
- Emissione termica di elettroni: fisica ed applicazioni

PARTE 2

V. Bande elettroniche

- Potenziale periodico, equazione centrale e stati di Bloch
- Costruzione dello schema a bande nel caso di reticolo-vuoto
- Bande nel modello di elettrone quasi-libero: apertura del gap al bordo della zona di Brillouin ed interpretazione
- Introduzione al modello Tight-Binding (TB)
- Calcolo di bande nel modello TB: ruolo dei vicini e della base di orbitali atomici e integrali di hopping
- Costruzione e diagonalizzazione della matrice tight binding a primi vicini per silicio
- Interpretazione di bande reali e loro densità di stati
- Misura della dispersione di bande per fotoemissione risolta in angolo

**VI. Trasporto elettronico di carica **

- Il modello semiclassico e moto degli elettroni in banda in presenza di un campo elettrico
- Il tensore di massa efficace e il concetto di buca positiva
- L'equazione di Boltzman: bilancio tra processi di drift e quelli di scattering
- L'approssimazione del tempo di rilassamento per i processi di scattering
- Meccanismi microscopici che presiedono allo scattering di cariche
- La conducibilità elettrica nei metalli
- Dipendenza della conducibilità elettrica dalla temperatura
-
- **VII. Trasporto elettronico di calore **
- Equazione di Boltzman generalizzata ai gradienti termici
- Trasporto di calore da elettroni e relazione di Wiederman-Franz
- Effetti termoelettrici (Peltier e Seebeck) e applicazioni

VIII. Effetti di campi magnetici deboli e forti

- Campi magnetici deboli
- Campi magnetici forti
- Derivazione dei livelli energetici di Landau
- Proprietà magnetiche dei materiali
- Magnetismo degli elettroni liberi

Prerequisiti

Struttura della materia, fisica quantistica di atomi e di molecole

Introduzione elementare alla fenomenologia dei materiali

Elementi di analisi complessa, funzioni speciali, serie e trasformate di Fourier

Modalità didattica

40 Lezioni di un'ora, svolte in modalità erogativa in presenza e 12 esercitazioni di un'ora, svolte in modalità erogativa in presenza. Nel caso sia richiesto dall'Ateneo, alcune Lezioni o esercitazioni potranno anche essere svolte in modalità erogativa in remoto (sincrona, nello stesso orario), per gli studenti che non fossero ancora in Italia.

Materiale didattico

TESTO PRINCIPALE

H. IBACH AND H. LUTH, *Solids State Physics*, Springer Verlag

CAPITOLI AGGIUNTIVI PRESI DAI SEGUENTI TESTI, COME RESI DISPONIBILI SULLA PIATTAFORMA E-LEARNING O DISPONIBILI DALLA BIBLIOTECA DI ATENEO:

N.W ASHCROFT AND N.D. MERMIN, *Solid State Physics*, Saunders College Publishing

F. BASSANI E U. GRASSANO, *Fisica dello Stato Solido*, Casa Editrice Boringhieri

A.P. SUTTON, *Electronic Structure of Materials*, Oxford University Press

J.R. HOOK and H.E. Hall, *Solid State Physics*, John Wiley & Sons

Periodo di erogazione dell'insegnamento

Primo semestre.

Modalità di verifica del profitto e valutazione

L'esame consiste in una prova scritta con quattro domande aperte, inclusa la possibile derivazione matematica di alcuni risultati fisici, il tracciamento di grafici, o la descrizione di esperimenti. La valutazione della prova scritta viene fatta, in ordine di decrescente importanza, sulla corrispondenza della risposta alla domanda, sulla esattezza e la coerenza delle argomentazioni, e sulla ricchezza dei commenti appropriati. Il voto finale viene deciso anche sulla base di una discussione della prova scritta con lo studente, che segue di pochi giorni la pubblicazione della valutazione della prova scritta e che insiste principalmente nel richiedere completamento o correzione di quanto è carente nello scritto. Completato il Corso, vengono offerte nove sessioni annuali d'esame, previste durante le pause delle lezioni.

Durante il periodo delle lezioni del Corso, tuttavia, gli studenti iscritti in quell'anno accademico avranno la possibilità di suddividere l'esame in due prove parziali in itinere, una relativa agli argomenti della Parte 1 del corso e l'altra relativa agli argomenti della Parte 2. Tali prove parziali consisteranno di una prova scritta di 3 domande aperte, con le stesse modalità di valutazione delle prove scritte di cui sopra, seguita da un breve colloquio orale di discussione sullo scritto, nelle stesse modalità di cui sopra. Per agevolare la preparazione, organizzare e spiegare le modalità d'esame e rispondere a qualsiasi domanda sugli argomenti delle lezioni, prima di ciascun esame parziale verrà organizzato un incontro con gli studenti iscritti, e aperto a tutti gli altri. Se uno studente fallisce il test sulla prima parte, avrà una (sola) ulteriore occasione di riprovarlo, prima che le lezioni della seconda parte del corso siano terminate; se fallisce il test sulla seconda parte,, avrà una (sola) ulteriore occasione di riprovarlo, entro il termine di

inizio del secondo semestre.

Orario di ricevimento

Per appuntamento, scrivendo una e-mail a leo.miglio@unimib.it, oppure - per domande riguardati la organizzazione degli esami - a roberto.bergamaschini@unimib.it

Sustainable Development Goals

ENERGIA PULITA E ACCESSIBILE | IMPRESE, INNOVAZIONE E INFRASTRUTTURE