UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DI MILANO-BICOCCA

SYLLABUS DEL CORSO

Solid State Physics

2425-1-FSM01Q001

Obiettivi

Il Corso si pone come obiettivo l'apprendimento di concetti, metodi e di modelli per la fisica dei solidi cristallini, perfetti ed infiniti. A tal fine, il Corso si compone di due parti. Nella prima parte vengono introdotti i tre attori fondamentali dei solidi cristallini: il reticolo cristallino nello spazio diretto e in quello reciprococo, le vibrazioni reticolari e i loro effetti termici, gli elettroni liberi nella approssimazione di particelle non interagenti. Particolare attenzione è data alle tecniche di calcolo delle grandezze macroscopiche sulla base di variabili microscopiche. La seconda parte include quei fenomeni di trasporto di carica e di calore, legati agli elettroni che si muovone nelle bande energetiche, come prodotti dalla applicazione di campi elettrici, magnetici e di gradienti termici. Anche in questa parte, si insegna che la trattazione matematica sia lo strumento che ci permette di legare gli effetti macroscopici alle variabili microscopiche del sistema. Verso la fine del corso vengono dedicate due ore di didattica interattiva con gli studenti, l'una riferita alla prima parte e l'altra alla seconda parte, al fine di rispondere alle domande e a dubbi collettivi emersi dalla interazione tra gli studenti stessi, che viene fortemente incentivata.

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 in reticolo periodico
VI. Trasporto elettronico di carica in un campo elettrico
VII. Trasporto elettronico di calore ed effetti termoelettrici
VIII. Effetto 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

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

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

Effetti dei campi magnetici

- Effetti dei campi magnetici deboli
- Effetti dei campi magnetici forti e livelli di Landau
- Proprietà magnetiche della materia
- 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

Il corso si compone di 38 ore di lezioni frontali e 12 ore di esercitazioni di natura erogativa (DE) e di 2 ore di natura interattiva con gli studenti (DI). Tutte le ore di didattica sono previste in presenza, ma considerando la difficoltà degli studenti stranieri nell'ottenere un visto di ingresso in tempi utili per partecipare all'inizio delle lezioni, oppure alla eventualità di eventi meteorici di particolare intensità, che impediscano a gran parte degli studenti di venire in aula, alcune lezioni/esercitazioni, fino ad un massimo del 30%, potrebbero essere erogate anche in modalità remota sincrona, negli stessi orari previsti per il corso.

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

Seconda parte del primo semestre, per permettere al corso di analisi funzionale di impartire gran parte delle nozioni necessarie a seguire questo corso. Gli studenti sono invitati quindi a seguire quel corso con attenzione e costanza.

Modalità di verifica del profitto e valutazione

L'esame consiste in una prova scritta con domande aperte, poi discussa durante un colloquio orale di correzione individuale, che può vertere anche su altri argomenti svolti a lezione, o a esercitazione. In particolare, l'esame consiste in una prova scritta con quattro domande aperte, inclusa la derivazione matematica di alcuni risultati fisici, oppure il disegno di alcuni grafici e il relativo commento.

Durante il periodo delle lezioni, gli studenti frequentati il corso avranno la possibilità di suddividere l'esame in due prove parziali, 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 con 3 domande aperte, inclusa la derivazione matematica di alcuni risultati fisici, o il disegno di alcuni grafici e il relativo commento, seguita da un breve colloquio orale di discussione sullo scritto, con qualche ulteriore approfondimento, sempre relativo agli argomenti svolti a lezione. Dal momento che questo percorso assistito tramite prove parziali richiede che gli studenti studino in parallelo allo svolgimento delle lezioni, la partecipazione attiva alle lezioni è fortemente raccomandata. 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 la data di inizio del secondo semestre.

Orario di ricevimento

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

Sustainable Development Goals