



UNIVERSITÀ DI PISA

FISICA DEI MATERIALI PER LA FOTONICA

RICCARDO FARCHIONI

Anno accademico 2023/24
CdS FISICA
Codice 026BB
CFU 3

Moduli	Settore/i	Tipo	Ore	Docente/i
FISICA DEI MATERIALI PER LA FOTONICA	FIS/03	LEZIONI	24	RICCARDO FARCHIONI

Obiettivi di apprendimento

Conoscenze

Il corso non è particolarmente spinto dal punto di vista del formalismo matematico; le formule servono a illustrare in modo sintetico come le grandezze fisiche sono coinvolte nei fenomeni studiati. Verrà fatto un breve richiamo alla meccanica quantistica.

Programma (contenuti dell'insegnamento)

Introduzione al corso. Caratteristiche dei materiali utilizzati per la fotonica. Principali applicazioni: transistor, LED, LASER, celle fotovoltaiche. Materiali disponibili in natura e possibilità di loro trasformazioni per nuove applicazioni. “Ingegneria delle bande”.

Composti di semiconduttori. Metodi di crescita. Metodo di Czochralski, molecular beam epitaxy.

Strutture geometriche dei reticoli. Cella primitiva, cella di Wigner-Seitz, reticolo reciproco. Teorema di Bloch, concetto di bande di energia e gap di energia, significato del momento dell'elettrone nel cristallo. Caso di elettroni quasi liberi: ripiegamento della forma parabolica dell'energia cinetica dell'elettrone libero e rimozione delle degenerazioni dovuta agli effetti perturbativi del potenziale cristallino debole.

Bande di energie, casi di bande piene/vuote e di bande parzialmente occupate. Concetto di buca. Introduzione al metodo tight-binding del calcolo delle bande. Orbitali molecolari come sovrapposizione di orbitali atomici (LCAO). Hamiltoniana tight binding, equazione di Schroedinger, risoluzione nel caso di singola banda da orbitale s. Concetto di massa effettiva. Effetti dell'interazione spin-orbita: nuova forma dell'Hamiltoniana tight binding, rappresentazione degli stati di energia in termini dell'osservabile momento angolare in relazione agli orbitali molecolari s,p. Split dell'energia nel punto gamma della banda di valenza, bande heavy hole, light hole e split off.

Descrizione delle strutture a bande dei principali semiconduttori e leghe. Concetto di densità degli stati, densità dei portatori di carica intrinseci. Difetti nei cristalli, strain e suoi effetti sulle proprietà elettroniche. Drogaggio *n* e *p*. Dinamica dei portatori di carica dovuti al drogaggio e andamento della loro densità con la temperatura (regime intrinseco-regime di *freesout*).



UNIVERSITÀ DI PISA

Proprietà delle leghe di semiconduttori: approssimazione di cristallo virtuale (VCA), calcolo di passo reticolare, gap e masse effettive della lega a partire da quelli degli elementi costituenti. Eterostrutture di tipo I, II, III. Densità degli stati in sistemi a bassa dimensionalità. Risoluzione dell'equazione di Schroedinger nel caso di una quantum well. Densità degli stati in sistemi a bassa dimensionalità.

Equazioni di Maxwell. Hamiltoniana di un cristallo in presenza di un campo elettromagnetico. Regola d'oro di Fermi per il calcolo della probabilità di transizione in regimi perturbativi. Calcolo dei rate di assorbimento e di emissione in un cristallo in presenza di un campo elettromagnetico, discussione dei concetti di emissione spontanea e stimolata. Rate di assorbimento ed emissione in caso di quantum well.

Campi elastici nei cristalli dovuti alle vibrazioni reticolari. Definizione di fonone. Transizioni energetiche indirette in presenza di fononi. Discussione dell'andamento del coefficiente di assorbimento in caso di transizioni indirette. Concetto di eccitone. Risoluzione dell'equazione di Schroedinger, calcolo dei livelli energetici e forma della funzione d'onda. Proprietà ottiche in presenza di eccitoni, forma del coefficiente di assorbimento vicino all'onset. Rate delle transizioni ottiche in presenza di effetti eccitonici. Giunzioni p-n. LED: principio di funzionamento a partire dalla giunzione p-n polarizzata. Efficienza quantica radiativa interna e compressiva. Discussione sulle perdite nel mezzo interne e per effetti di riflessione e rifrazione alla superficie. Distribuzione spettrale al variare della frequenza di emissione. LASER: condizioni per l'inversione di popolazione fra due livelli. Coefficienti di Einstein, giunzione p-n con inversione di popolazione.

Sistemi a tre e a quattro livelli. Campo nella cavità risonante di un laser, modi risonanti, perdite. Guadagno del laser, soglia della corrente.

Sistemi organici: ibridizzazioni di tipo sp , sp^2 , sp^3 . Strutture dei più rilevanti polimeri utilizzati per la fotonica. Descrizione delle caratteristiche dell'Hamiltoniana per lo studio dei polimeri. Approssimazione di Born-Oppenheimer e riduzione agli orbitali di tipo π greco. Modello Su-Shrieffer-Heeger per lo studio del polyacetilene, stima dell'energia di gap in funzione dei parametri dell'Hamiltoniana. Stato fondamentale degenere, solitone. Difetti nel caso di stato fondamentale non degenere. Polaroni e bipolaroni e corrispondenti livelli inseriti nello spettro, interpretazione degli spettri ottici.

Bibliografia e materiale didattico

J. Singh, Electronic and Optoelectronic Properties of Semiconductor Structures, Cambridge University Press (capitoli 1, 2, 3, 9 e 10)

<https://drive.google.com/file/d/1Fc88Kgg83A3MzKJOhFv2DNGTJois6ZOP/view?usp=sharing>

Modalità d'esame

L'esame è solo orale su appuntamento e si svolge con la seguente modalità: viene inviato allo studente un articolo di ricerca sugli argomenti trattati nel corso, di cui dovranno essere riconosciute le tematiche rilevanti che saranno esposte fornendo da spunto per l'esame.

Ultimo aggiornamento 14/11/2023 12:30