

Microelettronica M

Introduzione

Presentazione del corso. Scopi del corso. Orario delle lezioni e di ricevimento. Nozioni che si suppongono già acquisite in precedenza da parte degli Studenti. Modalità dell'esame e iscrizione agli appelli. Programma. Bibliografia.

Programma

Generalità sull'importanza industriale dei sistemi elettronici. Diffusione e pervasività dei microprocessori. Volume di produzione delle memorie a semiconduttore. Costi d'impianto e di manutenzione di uno stabilimento per la produzione di circuiti integrati.

Reticoli cristallini. Definizioni generali. Vettori caratteristici. Cella elementare. Reticolo diretto e reticolo reciproco. Prima zona di Brillouin. Il reticolo cubico a facce centrate. Indici di Miller. Esempi: la struttura del diamante e quella della zinoblenda.

Richiami di meccanica lagrangiana e hamiltoniana. Cenni sulla relazione di dispersione $E(\mathbf{k})$ in un cristallo. Densità degli stati nello spazio k . Forma delle bande di conduzione e valenza nel silicio. Tipi di transizioni: intravallo, intervallo, interbanda dirette, interbanda assistite da trappole. Forma delle bande nel germanio e nell'arseniuro di gallio.

Sviluppo della relazione $E(\mathbf{k})$ nell'intorno di un estremo di una banda. Definizione e calcolo della densità degli stati in energia. Statistica di Fermi. Funzione di distribuzione. Il caso limite dell'equilibrio. Concentrazione degli elettroni nelle bande. Concetto di lacuna. Definizione della concentrazione di elettroni e lacune a partire dalla funzione di distribuzione. Classificazione dei cristalli in conduttori, isolanti e semiconduttori.

Calcolo della concentrazione intrinseca all'equilibrio. Posizione del livello di Fermi intrinseco. Valori delle grandezze notevoli per i semiconduttori di maggior interesse.

Modello intuitivo del comportamento elettrico di un semiconduttore intrinseco. Definizione della densità di corrente di elettroni e lacune a partire dalla funzione di distribuzione. Cenni alle relazioni dinamiche per elettroni e lacune. Modello intuitivo del comportamento elettrico di un semiconduttore drogato.

Il caso del drogaggio uniforme di tipo donatore. Calcolo delle concentrazioni. Approssimazioni di non degenerazione e di completa ionizzazione. Il caso del drogaggio uniforme di tipo accettore. Calcolo delle concentrazioni. Approssimazione di non degenerazione e di completa ionizzazione. Effetto della temperatura e della concentrazione del drogante sulla posizione del livello di Fermi. Condizione intrinseca, di saturazione e di congelamento del drogante.

Il caso del drogante non uniforme. Restringimento del *gap* causato dal drogaggio. Varie espressioni delle concentrazioni di elettroni e lacune all'equilibrio. Equazione di Poisson nel semiconduttore.

Il caso fuori equilibrio. Equazioni di continuità. Condizioni di quasi stazionarietà. Equazioni del trasporto di tipo ohmico-diffusivo. Deduzione euristica del termine ohmico. Modello matematico dei dispositivi a semiconduttore. Definizione e uso degli pseudopotenziali di Fermi. Condizioni al contorno del modello.

Transizioni assistite da trappole. Modello matematico comprendente la dinamica delle cariche intrappolate. Deduzione della funzione di ricombinazione SRH. Casi limite della funzione di ricombinazione SRH: completo svuotamento e debole iniezione. Ricombinazione Auger e ionizzazione per impatto. Generazioni e ricombinazioni dirette di tipo termico e ottico. Andamento del tasso di generazione ottica all'interno del materiale. Caso limite della forte ionizzazione.

Modelli macroscopici della mobilità. Collisioni con il reticolo, le impurezze ionizzate e le interfacce. Dipendenza della mobilità dalla temperatura, dalla concentrazione complessiva delle impurezze e dal campo normale all'interfaccia. Cenni alla dipendenza della mobilità dal gradiente dello pseudopotenziale di Fermi. Regola di Mathiessen. Esempio di modello macroscopico di mobilità: l'effetto delle impurezze ionizzate. Risultati di calcoli di mobilità a partire dalla soluzione dell'equazione di Boltzmann.

Giunzione *p-n*: struttura e andamento qualitativo del potenziale. Risultato della soluzione dell'equazione di Poisson nel caso dell'equilibrio. Regioni neutre e regioni di carica spaziale. Bilanciamento dei termini ohmico e diffusivo nel caso dell'equilibrio. Effetto dei contatti. Contatti ohmici ideali. Funzionamento qualitativo della giunzioni *p-n*. Teoria di Shockley. Ipotesi di piccole iniezioni e disaccoppiamento delle zone neutre. Calcolo della relazione corrente-tensione della giunzione *p-n*. Dipendenza dalla temperatura della corrente della giunzione *p-n* in polarizzazione inversa. Ipotesi di completo svuotamento della regione di carica spaziale nella condizione di polarizzazione inversa. Andamento qualitativo della densità di carica, del campo elettrico e del potenziale elettrico. Calcolo dell'estensione della regione di carica spaziale in polarizzazione inversa. Determinazione della capacità di barriera della giunzione *p-n*. Richiami sulla ionizzazione per impatto. Modello di Chynowetz dei coefficienti di ionizzazione. Calcolo degli integrali di ionizzazione. Esempio di applicazione.

Transistore bipolare. Funzionamento qualitativo. Calcolo delle correnti. Modello di Ebers e Moll. Circuito equivalente a due generatori di corrente. Circuito equivalente a un generatore di corrente. Ottimizzazione del guadagno di corrente.

Struttura del condensatore MOS. Zona neutra e zona di carica spaziale. Relazione fra carica del semiconduttore e potenziale superficiale nelle regioni di funzionamento del dispositivo. Soluzione dell'equazione di Poisson nel condensatore MOS nel caso del drogaggio costante. Condizione di banda piatta. Condizioni di svuotamento e di inversione. Relazioni approssimate fra carica per unità di area e potenziale superficiale

basate sull'ipotesi di completo svuotamento e ASCE. Andamento delle bande nella giunzione metallo-semiconduttore. Capacità differenziale del condensatore MOS. Relazione fra potenziale superficiale e potenziale di *gate* nel caso impulsato.

Struttura del transistor MOS. Calcolo della corrente di *drain*. Ipotesi del profilo graduale e conclusione del calcolo delle caratteristiche statiche del transistor MOS. Il modello parabolico-lineare. Parametri differenziali del transistor MOS a bassa frequenza. Limiti dell'ipotesi del profilo graduale. Soluzione dell'equazione di Poisson nel canale del transistor MOS in condizioni di fuori equilibrio. Giustificazione dell'ipotesi del profilo graduale. Potenziale superficiale al *source* e al *drain*.

Metodo di misura dei tempi di vita basato sull'uso della generazione ottica. Definizione delle velocità termiche e delle sezioni di cattura per elettroni e lacune. Metodo di Haynes e Shockley per la misura della mobilità.

Evoluzione dei circuiti integrati. Regole di scala a campo costante. Progettazione assistita dal calcolatore.