

M. Rudan

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.

Concetti fondamentali della tecnologia dei circuiti integrati. 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.

Generalità sulla produzione del silicio. Tecnica CZ e tecnica FZ. Segregazione delle impurezze.

Generalità sul meccanismo di diffusione. Equazione di continuità. Equazione del trasporto: il tipo diffusivo e quello ohmico-diffusivo.

Difetti cristallografici. Relazione fra difetti e resa di produzione. Esempi di diffusione. Ossidazione del silicio. Generalità.

Descrizione qualitativa dei processi di diffusione termica dei droganti nel silicio. Soluzione dell'equazione della diffusione. Il caso del dominio illimitato da ambo i lati. Applicazioni: predep e drive-in. Il caso del dominio illimitato da uno solo lato. Condizioni di saldatura all'interfaccia. Processi termici successivi.

Modello di Deal e Grove per la cinetica dell'ossidazione termica. Calcolo della cinetica dell'ossidazione. Casi limite del modello. Dipendenza dei coefficienti dai parametri esterni. Deposizione di film sottili. Tecniche PVD e CVD.

Epitassia CVD. Calcolo della cinetica dell'epitassia CVD.

Generalità sull'impianto ionico. Schema a blocchi dell'impiantatore ionico. Filtro magnetico e filtro elettromagnetico.

Parametri tipici dell'impiantatore ionico. Collisione binaria fra ione e nucleo. Tipi di traiettorie percorse dagli ioni nel silicio. Incanalamento. Energia trasferita nella collisione con un nucleo. Potere frenante nucleare. Calcolo della lunghezza della traiettoria dello ione. Potere frenante elettronico. Andamento dei poteri frenanti. Energia critica.

Calcolo del range per mezzo del teorema del limite centrale. Distribuzione del profilo impiantato. Fenomeni che causano "code" della distribuzione.

Metodi per prevenire l'incanalamento. Annealing. Tecniche TA, LA, RTA. Confronto fra impianto ionico e diffusione termica. Generalità sulla litografia. Resist positivo e resist negativo. Litografia a contatto e litografia in prossimità. Litografia a proiezione.

Litografia ottica, a raggi X, elettronica, ionica. Confronto fra le tecniche litografiche. Fabbricazione delle maschere. Etching anisotropo. Tipi di etching anisotropo: PE e RIE, e schema dell'apparato.

Riepilogo dei vari passi di processo. Descrizione del processo CMOS.

Descrizione del processo bipolare. Descrizione 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 zincoblenda.

Forma delle bande di conduzione e valenza nel silicio. Tipi di transizioni: intravalle, intervalle, interbanda dirette, interbanda assistite da trappole.

Densità degli stati nello spazio delle fasi. Massa efficace. Relazione di dispersione  $E(k)$  in un cristallo.

Densità degli stati nello spazio  $k$ . Densità degli stati in energia. Sviluppo della relazione  $E(k)$  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. Forma delle bande nel germanio, silicio e arseniuro di gallio.

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. Cenno 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. 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.

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. Caso limite della forte ionizzazione.

Andamento del tasso di generazione ottica all'interno del materiale. 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. 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 giunzione 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 alla giunzione p-n. Transistore bipolare. Funzionamento qualitativo. Transistore bipolare. Calcolo delle correnti. Modello di Ebers e Moll. Circuito equivalente a due generatori di corrente. Ottimizzazione del guadagno di corrente.

Circuito equivalente a un generatore di corrente. Struttura del condensatore MOS. Zona neutra e zona di carica spaziale.

Relazione fra carica nel 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.

Capacità differenziale del condensatore MOS. Relazione fra potenziale superficiale e potenziale di gate nel caso impulsato.

Struttura del transistore MOS. Calcolo della corrente di drain. Ipotesi del profilo graduale e calcolo delle caratteristiche statiche del transistore MOS. Il modello parabolico-lineare. Parametri differenziali del transistore 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.

Funzionamento della cella solare. Proprietà della cella solare. Descrizione del metodo di misura dei tempi di vita basato sull'uso della generazione ottica.

Calcoli sul metodo di misura dei tempi di vita. Definizione delle velocità termiche e delle sezioni di cattura per elettroni e lacune.

Metodo di Haynes e Shockley per la misura della mobilità

Evoluzione del livello d'integrazione dei circuiti integrati. Introduzione alle regole di scala. Regole di scala a campo costante.

Progettazione assistita dal calcolatore.

Restringimento del gap causato dal drogaggio.

Complementi:

Richiami di meccanica lagrangiana e hamiltoniana. Introduzione alla dinamica di un elettrone all'interno di un cristallo.

Richiami di meccanica quantistica. Funzione d'onda. Equazione di Schroedinger dipendente dal tempo.

Equazione di continuità. Valori di aspettazione. Principio di Heisenberg.

Seminari:

Graphene-based transistors for digital and analog applications.

Phase-Change Memories.

Novel Device Concepts for Energy-Efficient Electronics.

Characterization of Power MOSFETs for Analog and Mixed-Mode Applications.