

AA 2018/2019 — 35359 MICROELETTRONICA M — CFU 6

Corso di laurea: 0934-INGEGNERIA ELETTRONICA — Ciclo 1

M. Rudan

Nota: nel sito Docente è disponibile la registrazione audio delle lezioni dell'AA 2018-2019.

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. Calcolo della cinetica dell'ossidazione. Modello di Deal e Grove. 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.

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. 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. 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. Generalità sulla litografia. *Resist* positivo e *resist* negativo.

Litografia a contatto e litografia in prossimità. Litografia a proiezione. Riepilogo dei vari passi di processo.

Descrizione del processo bipolare. Descrizione del processo CMOS.

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 zinco-blenda.

Dinamica di una particella in un potenziale periodico.

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

Esempi della struttura delle bande in Si, Ge, GaAs.

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

Densità degli stati nello spazio \mathbf{k} . Funzione di distribuzione. Conclusioni sulla funzione di distribuzione.

Densità degli stati nel caso generale. Concetto di lacuna. Andamenti delle bande nei conduttori. Discussione qualitativa. Dipendenza della conducibilità dalla temperatura.

Calcolo della concentrazione intrinseca all'equilibrio. Stima della posizione del livello di Fermi.

Calcolo della concentrazione intrinseca all'equilibrio usando l'approssimazione esponenziale degli integrali di Fermi. Dipendenza della concentrazione intrinseca dalla temperatura. Valori dei parametri notevoli per i semiconduttori d'interesse. Spiegazione qualitativa dei contributi di elettroni e lacune alla densità di corrente del semiconduttore.

Calcolo della posizione del livello di Fermi. Definizione della velocità media degli elettroni. Definizione della velocità media delle lacune. Densità di corrente di elettroni e lacune. Dinamica di elettroni e lacune nell'approssimazione delle bande paraboliche.

Il caso del semiconduttore drogato di tipo donatore e di tipo accettore. Effetto di compensazione.

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. Varie espressioni delle concentrazioni di elettroni e lacune all'equilibrio.

Commenti sulle statistiche di Fermi-Dirac, Bose-Einstein e Boltzmann. Calcolo dell'energia media nel caso classico.

Il caso del drogante non uniforme. Equazione di Poisson nel semiconduttore nel caso non degenerato. 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 Matthiessen. 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 $p-n$.

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. Teoria di Shockley. Ipotesi di piccole iniezioni e disaccoppiamento delle zone neutre. Calcolo della relazione corrente-tensione della giunzione $p-n$.

Giustificazione dell'uso del solo termine diffusivo per la corrente dei minoritari delle zone neutre. Condizioni al contorno di Shockley.

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 della condizione di valanga.

Transistore bipolare. Funzionamento qualitativo. 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. Struttura del transistore MOS.

Calcolo della corrente di *drain*. Ipotesi del profilo graduale e calcolo delle caratteristiche statiche del transistore MOS.

Definizione del potenziale di saturazione. 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 transistore MOS in condizioni di fuori equilibrio. Giustificazione dell'ipotesi del profilo graduale. Potenziale superficiale al *source* e al *drain*.

Fotodiodo funzionante in modo continuo. Calcolo della corrente. Cenno al fotodiodo funzionante in storage mode. Fotocondensatore su substrato uniforme. Calcolo del comportamento durante l'intervallo di integrazione. Il caso del substrato epitassiale.

Dispositivi CID. Funzionamento qualitativo. Analisi del *gate* flottante. Funzionamento della cella solare. Circuito equivalente della cella solare, e proprietà di questa. *Fill factor* ed efficienza.

Calcolo del circuito equivalente della cella solare. Calcolo della costante solare. Considerazioni sui contatti.

Descrizione del metodo di misura dei tempi di vita basato sull'uso della generazione ottica. Calcoli sul metodo di misura dei tempi di vita. Metodo di Haynes e Shockley per la misura della mobilità.

Effetto Hall e metodo di misura delle concentrazioni e mobilità. Introduzione alle regole di scala. Questioni economiche legate alla produzione di dispositivi e circuiti elettronici. Evoluzione del livello d'integrazione dei circuiti integrati. Regole di scala a campo costante.

Completamento della parte sulle regole di scala. Parametri che non scalano nel modo corretto. Limiti fisici ed economici dello *scaling*. Schema di progettazione *top-down* e *bottom-up* di un circuito integrato. Progettazione assistita dal calcolatore.

Metodi numerici per la simulazione dei dispositivi a stato solido: soluzione dell'equazione di Poisson nel caso monodimensionale. Metodi numerici per la simulazione dei dispositivi a stato solido: soluzione delle equazioni di continuità e del trasporto.

Esempi in due e tre dimensioni. Prospettive della miniaturizzazione. Cenno alle memorie a cambiamento di fase.