

AA 2008–2009

**Elettronica L**  
**Elettronica applicata L**

*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 e bibliografia.

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.

*Programma*

Generalità sulla produzione del silicio. Tecniche CZ e FZ. Segregazione delle impurezze. Generalità sul meccanismo di diffusione. Equazione di continuità. Equazione del trasporto: il tipo diffusivo e quello ohmico-diffusivo. Calcolo della distribuzione del drogante durante la cristallizzazione. Il caso del coefficiente di segregazione costante e quello del coefficiente di segregazione variabile. Difetti cristallografici. Relazione fra difetti e resa di produzione.

Ossidazione del silicio. Generalità. 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. Esercizi sull'ossidazione termica.

Deposizione di film sottili. Tecniche PVD e CVD. Epitassia CVD. Calcolo della cinetica dell'epitassia CVD.

Generalità sulla diffusione dei droganti. Nozioni preliminari necessarie per la soluzione dell'equazione della diffusione nel caso generale. 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.

Generalità sulla litografia. *Resist* positivo e *resist* negativo. Litografia ottica, a raggi X, elettronica, ionica. Confronto fra le tecniche litografiche. Fabbricazione delle maschere. Litografia a contatto e litografia in prossimità. Litografia a proiezione.

*Etching* isotropo. Tipi di *etching* anisotropo: PE e RIE, e schema dell'apparato.

Esempi di calcolo di passi di processo.

Descrizione del processo bipolare. Descrizione del processo CMOS. Descrizione di uno stabilimento per la produzione di circuiti integrati.

Funzioni generatrici della "delta" di Dirac.

Introduzione al trasporto di carica nei solidi. Legge di Ohm. Conducibilità elettrica. Concetto di drogante. Materiali droganti usati nella tecnologia del silicio. Definizioni del vettore densità di corrente elettrica e della corrente elettrica. Legge di Ohm locale. Espressione del campo elettrico nel caso statico o a bassa frequenza. Esempio di applicazione di questi concetti al caso del resistore.

Semiconduttori di tipo intrinseco, di tipo estrinseco  $n$  e di tipo estrinseco  $p$ . Materiali droganti di tipo donatore e di tipo accettore. Concetto di lacuna. Struttura della giunzione  $p-n$ . Caratteristica statica della giunzione  $p-n$ . Struttura del transistor bipolare a giunzione di tipo  $n-p-n$  e di tipo  $p-n-p$ . Struttura del condensatore MOS. Struttura del transistor MOS a canale  $n$  e a canale  $p$ .

Simboli usati per i dispositivi illustrati. Convenzioni tipiche adottate per la descrizione di tensioni e correnti nei dispositivi illustrati. Concetto di caratteristica statica e di famiglia di caratteristiche nel caso di dispositivi con più di due morsetti.

Funzionamento qualitativo del transistor MOS a canale  $n$  e a canale  $p$ . Struttura dell'invertitore CMOS a  $n$ -well. Struttura dell'invertitore CMOS a  $p$ -well.

Esercizi riassuntivi sulla prima parte del corso.

Richiami sulle equazioni di Maxwell. Deduzione dei parametri circuitali concentrati: conduttanza differenziale e capacità differenziale. Deduzione dell'induttanza differenziale. Esempi: transitorio di carica di un condensatore, circuito LC risonante.

Definizioni e proprietà generali dei bipoli. Definizioni e proprietà generali dei circuiti. Simboli utilizzati per la descrizione dei bipoli fondamentali. Esempi di circuiti patologici. Partizione di un circuito in due bipoli. Partizione di un circuito in due bipoli e un doppio bipolo. Equazioni differenziali risultanti dalle partizioni di un circuito.

Trasformata di Laplace. Proprietà dei bipoli trasformati secondo Laplace. Equazioni algebriche risultanti dalle partizioni di un circuito nel campo delle trasformate di Laplace. Circuiti equivalenti di Thevenin e di Norton. Determinazione dell'impedenza equivalente e del generatore equivalente di Thevenin, e degli analoghi di Norton. Esempio di determinazione di un circuito equivalente di Thevenin.

Doppio bipolo: matrice delle impedenze, matrice delle ammettenze e matrice mista. Definizione dell'impedenza d'ingresso e dell'impedenza di uscita. Circuiti equivalenti di Thevenin e di Norton per i doppi bipoli. Circuito equivalente di Thevenin per un bipolo formato dalla cascata di un doppio bipolo e di un bipolo. Definizione dell'impedenza di ingresso e dell'impedenza di uscita. Sistema formato da una sorgente, doppi bipoli connessi in cascata, e un carico. Approssimazioni consentite dalla condizione di non reciprocità. Calcolo del guadagno di tensione.

Circuito equivalente per piccoli segnali del transistor bipolare nella connessione a emettitore comune. Calcolo del guadagno di tensione, di corrente e di potenza. Circuito equivalente per piccoli segnali del transistor bipolare nella connessione a collettore comune. Calcolo del guadagno di tensione, di corrente e di potenza. Commenti conclusivi sull'uso delle connessioni a emettitore o collettore comune per realizzare l'amplificazione o il disaccoppiamento.

Esempio di calcolo di un circuito lineare col metodo della trasformata di Laplace. Formula di Carson. Comportamento asintotico. Il caso della sollecitazione sinusoidale.

Esempi di calcolo di circuiti analogici.

Concetto di filtro. Esempio di un filtro passa-basso e calcolo della funzione di trasferimento. Altri esempi di filtri: passa-alto, passa-banda, elimina-banda.

Richiami sulle caratteristiche statiche dei dispositivi a semiconduttore. Richiami sul transistor MOS a canale  $n$  e a canale  $p$ . Modello lineare-parabolico del transistor MOS. Tensione di soglia e tensione di saturazione. Concetto di interruttore comandato. Concetto di invertitore. Esempio: l'invertitore realizzato con un transistor MOS a canale  $n$  a carico resistivo. Esempio: l'invertitore realizzato con un transistor MOS a canale  $p$  a carico resistivo. Caratteristica ingresso-uscita dei due invertitori descritti. Problemi legati al *range* dinamico, alla potenza dissipata e alla pendenza della caratteristica ingresso-uscita nella regione intermedia. L'invertitore CMOS. Caratteristica ingresso-uscita.

Operatori logici NOT, AND, NAND, OR, NOR. Definizione di operatore logico universale. Esempio: il caso del NAND. Operatore logico EXOR.

Variabili binarie e funzioni binarie. Teoremi dell'Algebra booleana. Circuiti analogici e circuiti sequenziali. Il *flip-flop* come elemento di memoria. Il *flip-flop* SR realizzato con operatori NOR. Il FLIP-FLOP SR realizzato con operatori NAND. Problemi di sincronizzazione nei circuiti logici. Il segnale di *clock*.

Memoria ad accesso casuale realizzata in tecnologia CMOS. Segnali delle *bit line* e delle *word line*. Segnali di lettura e scrittura. Necessità del decodificatore.

Esempi di calcolo di funzioni logiche.