



Centro Stampa

ATTENZIONE QUESTI APPUNTI SONO OPERA DI STUDENTI , NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE. IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.

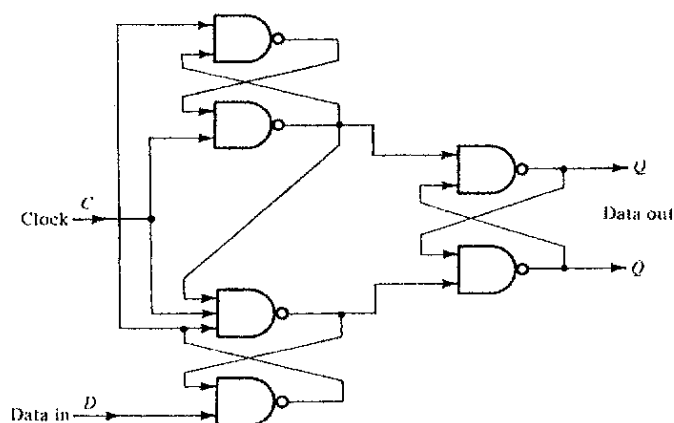
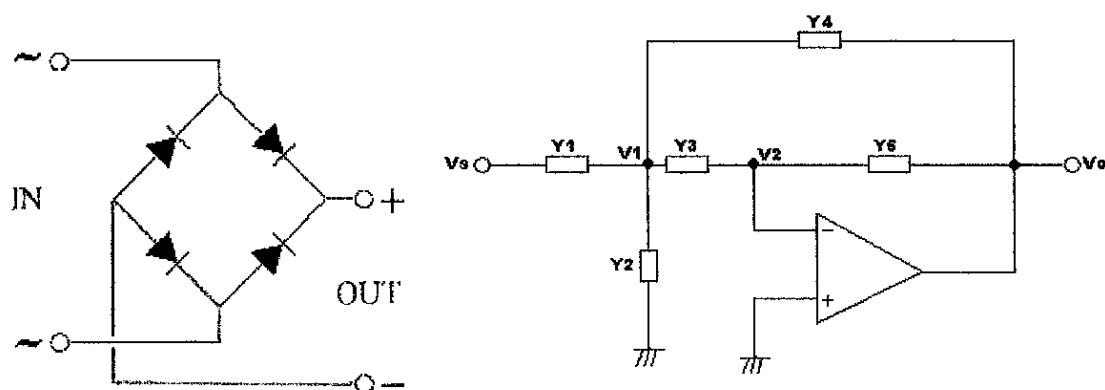
N° 3322

ELETTRONICA

DI CRESCENTI FABIO

APPUNTI DI ELETTRONICA ANALOGICA E DIGITALE

(relativi al corso tenuto dal prof. L. Reyneri
per il 3° anno di ing. aerospaziale)



INDICE**PARTE 1: Elettronica analogica**

Introduzione: II legge di Ohm.....	1
I semiconduttori.....	5
Il drogaggio.....	7
La giunzione PN	9
La caratteristica corrente-tensione.....	13
Esempio: cella Peltier.....	14
Il diodo.....	15
Il diodo Zener.....	19
Circuiti tosatori (clipping):	
Tosatore singolo.....	21
Tosatore doppio.....	23
ESERCITAZIONE 1: Diodi	26
Alimentatori o convertitori AC/DC:	
Alimentatore ad una semionda.....	30
Diodi con catodo in comune.....	34
Alimentatore a 2 semionde a presa centrale	36
Alimentatore a 2 semionde a ponte di Graetz	37
Alimentatore a 3 semionde.....	39
Alimentatore a 6 semionde.....	40
Cenni sugli alimentatori switching.....	46
ESERCITAZIONE 2: Alimentatori.....	47
Il transistor bipolare a giunzione (BJT): la giunzione n-p-n.....	53
Circuito amplificatore a transistor.....	63
Lo stadio differenziale (CM, DM).....	70
L'amplificatore operazionale (OP-AMP).....	73
Circuiti con amplificatore:	
Amplificatore non invertente.....	75
Amplificatore invertente.....	76
Amplificatore differenziale (combinatore lineare).....	79
Circuiti con guadagno unitario e guadagno compreso tra 0 e 1.....	83
Derivatore ed integratore.....	86
La tensione di offset di un integratore.....	87
ESERCITAZIONE 3: Amplificatori.....	89
Amplificatore logaritmico e logaritmico migliorato.....	97
Amplificatore esponenziale.....	100
Circuiti per: prodotto, rapporto ed elevamento a potenza.....	100
Raddrizzatore ideale.....	103
Valore assoluto.....	104

Circuiti comparatori di soglia:	
Comparatore di soglia non invertente e invertente senza isteresi.....	106
Comparatore di soglia non invertente ed invertente con isteresi.....	109
Oscillatore a rilassamento.....	113
Circuiti conclusivi con transistor.....	116
Esempio: Termostato del boiler.....	118
ESERCITAZIONE 4: Amplificatori(sommatore).....	124
Diagrammi di Bode.....	137
Filtri: passa basso, passa alto e passa banda.....	143
ESERCITAZIONE 5: Filtri	149

PARTE 2: Elettronica digitale

Introduzione: livelli logici.....	1
Le porte logiche: NOT, AND, OR, (E)XOR.....	2
Algebra booleana, codice Gray, mappa di Karnaugh.....	5
Circuiti digitali :	
Multiplexer (MUX)	10
Demultiplexer (DEMUX).....	11
Decoder.....	12
Encoder a priorità	13
Convertitore A/D e D/A a 8 bit.....	14
Esempio: sensori di temperature in un condominio.....	16
Esempio: matrice di pilotaggio di led.....	19
Flip-flop set-reset SR	20
Esempio: circuito di marcia-arresto.....	23
Esempio: circuito antirimbato	26
Flip-flop data D	27
Esempio: pulsantiera quiz televisivo	28
Flip-flop SR/D.....	30
Flip-flop toggle T	31
Flip-flop SR/T.....	31
Circuiti digitali con flip-flop (shift register):	
Linea di ritardo digitale	32
Convertitore SIPO e PISO.....	34
Contatore ad n bit.....	36
ESERCITAZIONE 1: Full adder a un bit	42
ESERCITAZIONE 2: Diagrammi temporali	51

PARTE 3

Tabella di confronto tra elettrotecnica ed elettronica

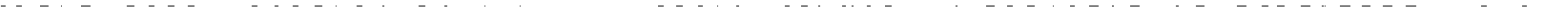
Codice dei colori per i resistori

Tema d'esame dell' 8 Gennaio 2008

Tema d'esame del 29 Gennaio 2008

Programma del corso

Esercizi svolti di elettromeccanica



PARTE 1

Elettronica analogica

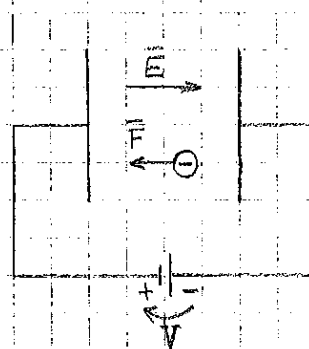
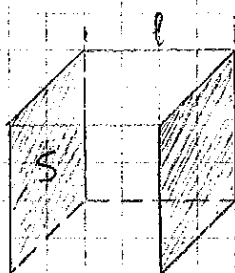
Il tuo documento è stato stampato correttamente.

INTRODUZIONE : II LEGGE DI OHM E SEMICONDUCTORI ¹

Gli elementi a semiconduttore costituiscono la base dell'elettronica. Il loro comportamento non lineare li contraddistingue dai componenti studiati in elettrotecnica: resistori, induttori e condensatori, per questo motivo, almeno direttamente, non sar  possibile applicare i teoremi gi  noti: Thevenin e Millman.

In queste prime pagine si comincia col fare delle considerazioni analitiche sulla II legge di Ohm, per arrivare ai materiali semiconduttori, comprendendo l'origine del loro comportamento.

Si consideri un cubetto di materiale dielettrico, di lato l e faccia di superficie S , come quello sotto:



si ipotizzi di metallizzare due sue facce e polarizzarli come sopra; abbiamo ottenuto un condensatore piano. La differenza di potenziale V tra le armature vale

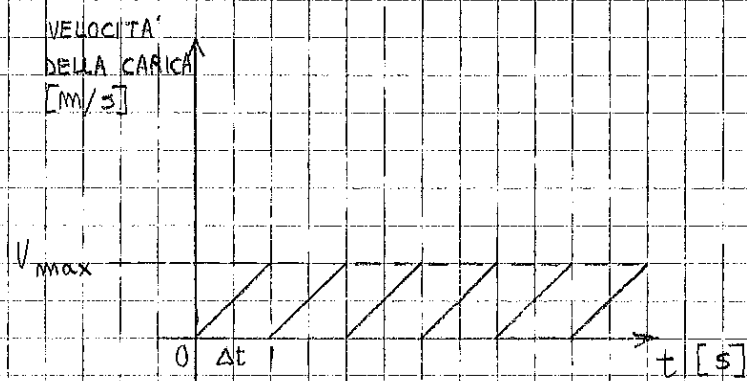
$$V = \int \vec{E} dx = \vec{E} \int dx = \vec{E} l$$

La forza sul singolo elettrone  

$$\vec{F} = \vec{E} q = \frac{V}{l} q$$

Faremo adesso alcune considerazioni cinematiche.

poiché le cariche elettriche si muovono nel reticolo cristallino del dielettrico, saranno caratterizzate da un moto irregolare dovuto in parte ad un moto uniformemente accelerato dato dall'azione del campo elettrico, in parte all'arresto improvviso per effetto degli urti con il reticolo cristallino. Ripetendo allora su un grafico la velocità della carica in funzione del tempo si ottiene una cosa come quella sotto:



$$V_{\max} = a \cdot \Delta t$$

con Δt intervallo temporale tra due urti consecutivi.

$$a = \frac{F}{m_e} \quad \text{con } m_e : \text{ massa dell'elettrone}$$

$$\bar{V} = \frac{V_{\max}}{2} = \frac{1}{2} \Delta t \frac{F}{m_e} = \frac{1}{2} \frac{\Delta t}{m_e} q \frac{V}{l}$$

$$\text{chiamiamo } \mu = \frac{1}{2} \frac{\Delta t}{m_e} q \quad \text{mobilità dell'elettrone}$$

Vogliamo, arrivati a questo punto, stabilire quanta carica passa nell'unità di tempo nel volume considerato.

$$\sigma = \frac{n^\circ \text{ elettroni liberi}}{\text{volume}} = \text{densità elettronica volumica}$$

3

$$I = \frac{Q}{t}$$

con $Q = \sigma S l$ e $t = \frac{l}{v}$

allora

$$I = \sigma S v = \underbrace{\frac{\sigma S A}{l}}_G \cdot V$$

dove G è nota come CONDUCTANZA, ed è uguale al reciproco della resistenza $G^{-1} = R$. Otteniamo così la nota relazione della II legge di Ohm

$$V = RI$$

Questa breve analisi ci consente adesso di comprendere meglio la differenza tra conduttori e semiconduttori da un punto di vista energetico. Se chiamiamo la densità volumica:

$$\sigma = N \cdot P(\text{elettrone diventa libero})$$

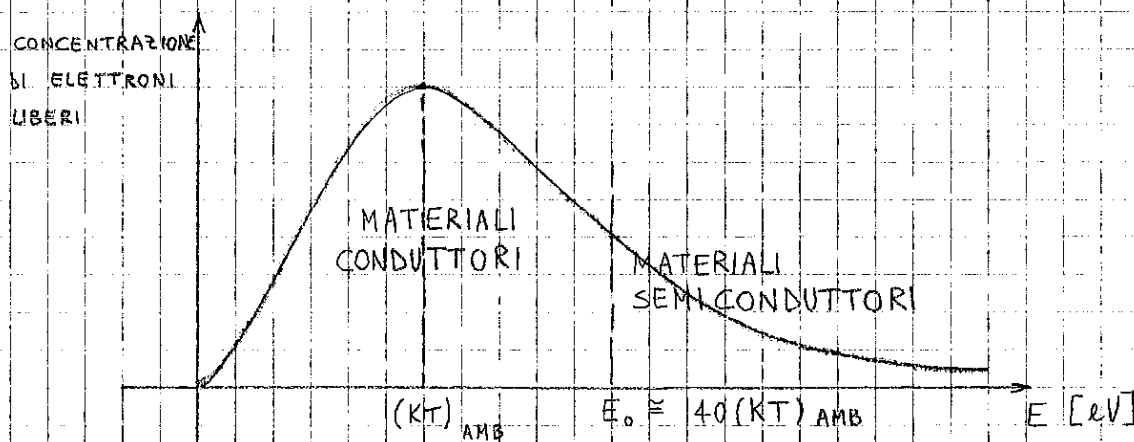
con N : numero di atomi per unità di volume.

Ripetendo il modello atomico di Bohr, un elettrone si libera dal suo orbitale solo se assorbe una energia sufficiente a vincere le forze attrattive. Tra le fonti di energia quella più significativa, da questo punto di vista, è quella termica. La relazione tra energia termica assorbita e probabilità per un elettrone di diventare libero è la nota legge di Boltzmann. In modo semplificato esprimiamo l'energia in funzione della temperatura

$$E = kT$$

k : costante di Boltzmann

riporto nel seguito il grafico della "concentrazione" di elettroni liberi in funzione dell'energia E appena definita.



$$(KT)_{AMB} = 25.9 \text{ meV} @ 25^\circ C$$

La parte di curva nella regione di semiconduttori può essere approssimata da un'esponenziale

$$\tilde{K} e^{-\frac{E}{KT}}$$

con $\tilde{K}$: conducibilità del materiale. Cosicché la P (elettroni liberi) per un semiconduttore è

$$P(\text{elettroni liberi}) = \int_{E_0}^{\infty} \tilde{K} e^{-\frac{E}{KT}} dE = \tilde{K} (-KT) e^{-\frac{E}{KT}} \Big|_{E_0}^{\infty} =$$

$$\boxed{\tilde{K} (KT) e^{-\frac{E_0}{KT}}}$$

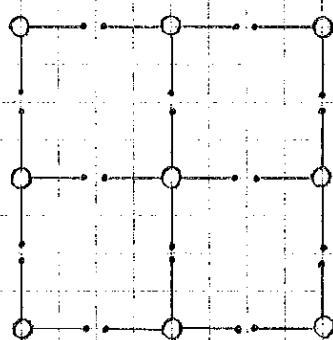
l'ultima relazione sembra evidenziare che a parità di KT ed all'aumentare di E_0 (minima energia di distacco) il termine esponenziale diminuisce determinando per i semiconduttori una forte influenza dalla temperatura.

* @: con questo simbolo si indicano le condizioni esterne.

5

I SEMICONDUTTORI

I materiali semiconduttori sono costituiti da elementi del IV gruppo, il silicio (Si) ed il Germanio (Ge) sono i più utilizzati in questo settore, soprattutto il Si negli ultimi decenni. L'appartenenza al 4° gruppo ci dice che 4 sono gli elettroni di valenza di questi elementi, per cui un reticolo cristallino di Si appare come in figura:



RETICOLO DI
Si

E' stato già accennato il fatto che l'energia termica è in assoluto la fonte più importante nel distacco di elettroni.

Si prenda ora in considerazione il reticolo del silicio puro, SEMICONDUTTORE INTRINSECO (questo termine si usa per indicare un qualunque materiale puro; nel campo dell'elettronica la purezza ha dei livelli molto alti: sino a 1 impurità ogni 10^9 atomi); a temperatura ambiente alcuni elettroni di valenza assorbono la quantità di energia sufficiente al distacco, in questo modo si svincolano dall'atomo e diventano ELETTRONI LIBERI si spezza così il legame covalente puro e al posto dell'elettrone si forma un "buco" che prende il nome di LACUNA (hole). Complessivamente questo effetto nei semiconduttori, a differenza dei conduttori, è piuttosto modesto ed è inoltre compensato dalla com-

6
 timma ricombinazione tra elettroni liberi e lacune, che ovvia-
 mente esistono sempre in ugual numero.

La cosa che è fondamentale capire è però che sia gli elettroni
 liberi sia le lacune sono portatori di carica, i primi negati-
 vi, le seconde positive.

Per capire meglio questa affermazione si immagina il distacco
 di un elettrone per effetto termico, la posizione inizialmente
 occupata dall'elettrone è diventata una lacuna. L'instabilità
 dovuta a questo primo distacco perturba l'equilibrio dei legami
 adiacenti, cosicché uno dei tanti elettroni vicini si stacca e
 va ad occupare la posizione liberata inizialmente. La lacuna
 non è scomparsa, se ne è creata una nuova dove pri-
 ma c'era questo secondo elettrone; questo trasferimento rie-
 me a tutti gli effetti pensato come uno spostamento, si fa finto
 che non si tratti di due lacune diverse ma che sia la
 stessa ad essersi spostata. Inoltre immaginando questo "sposta-
 mento" si vede che il suo verso cambia per elettroni e
 lacune, ecco perché si distinguono tra portatori negativi e posi-
 tivi.

Rimane ancora il fatto però che tale fenomeno riveste poca impor-
 tanza per un semiconduttore intrinseco.

Sia n la concentrazione di elettroni e p quella di lacune allora
 nel caso di semiconduttore puro

$$n = p = n_i$$

n_i : concentrazione intrinseca.

IL DROGAGGIO

Si tratta di una tecnica, che sfrutta prevalentemente il fenomeno della diffusione, per modificare in modo controllato le proprietà elettriche di un materiale puro attraverso la diffusione di atomi di altri elementi, i cosiddetti droganti.

Nel caso specifico, del drogaggio del silicio puro, i droganti più comuni sono Indio e Gallio (trivalenti), Arsenico (pentavalente). Il materiale drogato si chiama SEMICONDUTTORE ESTRINSECO.

Lo scopo del drogaggio è come verrà spiegato nel seguito, quello di aumentare, quanto basta, la conducibilità del semiconduttore.

DROGAGGIO DI TIPO n

Il drogaggio di tipo n consiste nell'introdurre nel semiconduttore intrinseco atomi pentavalenti (Arsenico, Fosforo, Antimonio). Uno dei 5 elettroni di valenza degli atomi di impurità non trova la possibilità di legarsi, così da rimanere libero. Nella realtà l'energia necessaria al distacco è molto bassa. Questi atomi sono detti DONATORI per il fatto che donano al materiale puro uno dei loro elettroni.

Il semiconduttore estrinseco così ottenuto è detto di tipo n per la prevalenza di portatori di carica negativi.

DROGAGGIO DI TIPO p

Gli elementi droganti più comuni sono in questo caso: boro, gallio, indio. Il principio è lo stesso descritto nel caso n.

8

si tratta però di elementi trivalenti, ed in quanto tali sono detti **ACCETTORI** perché richiedono elettroni al reticolo puro.

In entrambi i tipi di semiconduttore estrinseco si distinguono le **CARICHE MAGGIORITARIE E MINORITARIE**, in un semiconduttore di tipo p saranno indubbiamente maggioritarie le lacune.

L'entità del drogaggio è in genere limitata ad un atomo di impurità ogni $10^6 / 10^8$ atomi puri, proporzione che evidenzia l'efficacia di questa tecnica.

Siano ora n e p le concentrazioni di elettroni e lacune rispettivamente del materiale estrinseco, la **LEGGE DELL'AZIONE DI MASSA** ci dice che:

$$np = n_i^2 = \text{costante}$$

tale condizione è valida sia per il semiconduttore intrinseco sia per quello estrinseco; questo potrebbe apparentemente sembrare una contraddizione, si direbbe infatti che il drogaggio non aumenta la concentrazione di carica nel materiale; l'effetto riguarda infatti l'aumento della conducibilità conseguente ad un aumento del moto complessivo di cariche.

Concludendo il drogaggio ha due vantaggi:

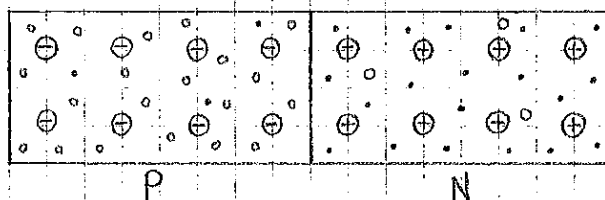
- 1) Aumento della conducibilità
- 2) Scelta del tipo di drogante e quindi delle cariche maggioritarie.

LA GIUNZIONE PN

La giunzione PN non è propriamente un componente, anche se teoricamente potrebbe essere considerata come tale, è piuttosto l'elemento a semiconduttore sul quale si basa gran parte dell'elettronica e che dà origine ai due veri componenti che studieremo più avanti: il diodo ed il transistor.

Si immagini di avere una barretta di semiconduttore intrinseco e di divagarla rendendola per metà di tipo P e per l'altra metà di tipo N, come in figura:

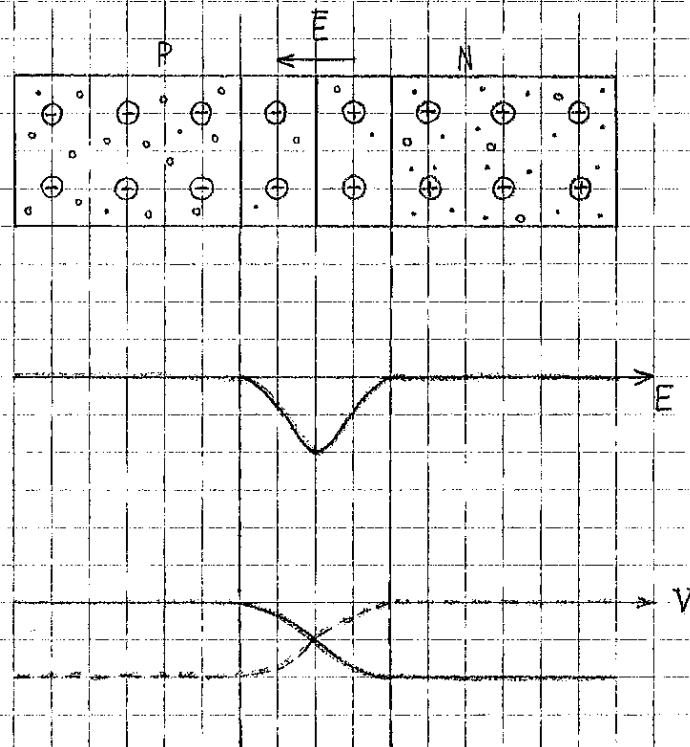
- ELETTRONE
- LACUNA
- ⊖ ANIONE
- ⊕ CATIONE



siamo interessati a capire cosa succede dopo aver effettuato un divagaggio di questo tipo.

A causa del gradiente di pressione tra le due zone, dovuto ad un eccesso di lacune a sinistra e di elettroni a destra, ipotizzando un inizio del fenomeno, si osserva che i portatori di carica maggioritari di ciascuna zona si riversano nell'altra parte provocando nella regione centrale una ricombinazione che tende a svuotare di portatori la regione circostante il contatto che prende per questa ragione il nome di **ZONA DI SVUOTAMENTO** o (depletion layer). Man mano che tale processo avanza la zona di svuotamento si allarga sempre di più ed al suo interno si trovano solo ioni del reticolo cristallino che in questa condizione prendono il nome di **CARICHE SCOPERTE**, non più

10
 neutralizzati dai portatori di carica. Il fenomeno si arresta quando la pressione dei gas di elettroni e lacune viene controbilanciata dall'intensità del campo elettrico generato per effetto delle cariche separate. Si arriva quindi ad una situazione come in figura:



La giunzione ha così raggiunto una condizione di equilibrio stabile, in cui i portatori maggioritari di ciascuna zona vedono davanti a sé una "collina" di potenziale troppo alta per essere superata con il solo contributo termico, a differenza di quelli minoritari che devono discedere questa collina e che continuano a mantenere un flusso di cariche attraverso la giunzione.

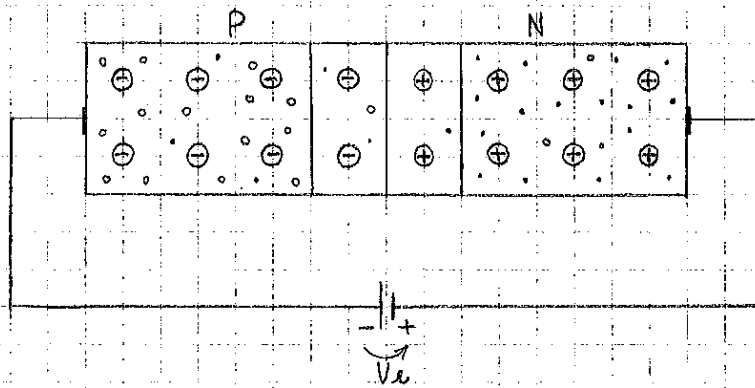
Applicando dall'esterno una tensione ai capi della giunzione in equilibrio si possono ottenere due differenti comportamenti.

POLARIZZAZIONE INVERSA

Sia V_e una tensione esterna, supponiamo di applicare il +

11

alla zona N ed il $-$ alla zona P come riportato sotto.



La tensione esterna si somma a quella già presente nella zona di svuotamento aumentando ulteriormente la barriera di potenziale di serita prima. Così le cariche maggioritarie di ciascuna zona tendono a svuotare la giunzione "defluendo" mediante i contatti esterni, in altre parole le lacune si muovono verso il $-$ della V_e e gli elettroni verso il $+$.

Le cariche minoritarie per contro mantengono il loro flusso attraverso la giunzione dando vita ad una corrente di piccola intensità (dell'ordine del μA) indicata con I_s e detta CORRENTE INVERSA DI SATURAZIONE, il suo valore $I_s \approx 1 \mu A$ e' costante a meno che quando si studierà più avanti, l'amplificatore logaritmico. Questa configurazione della giunzione PN è detta appunto polarizzazione inversa o interdizione.

Si ricordi sempre che le cariche minoritarie hanno origine termica.

POLARIZZAZIONE DIRETTA

È il tipo di polarizzazione più interessante dal punto di vista elettrico, la giunzione polarizzata in questo modo si dice in

conduzione.

Questa volta si connette il + alla parte P ed il - alla zona N. Rispetto a quanto avveniva prima la tensione V_e questa volta si ripone alla tensione interna determinando una riduzione della barriera di potenziale. In questo modo le cariche maggioritarie di ciascuna zona hanno energia sufficiente ad attraversare la giunzione determinando così una corrente non più piccola, I_0 detta **CORRENTE DIRETTA**.

NOTA IMPORTANTE

La tensione fin qui indicata come "tensione interna", ha per le giunzioni PN al Si un valore stimato a 0.6 V.

Questo valore, che tra qualche pagina assumerà un'importanza notevole, definisce quindi il valore di soglia (valore minimo) in polarizzazione diretta a partire dal quale la giunzione conduce.

13

LA CARATTERISTICA TENSIONE - CORRENTE

Nelle pagine precedenti ho dato una spiegazione qualitativa della corrente nella giunzione PN polarizzata, potendo così dedurre un comportamento bimodale.

Sperimentalmente si è visto che la corrente diretta si può esprimere come

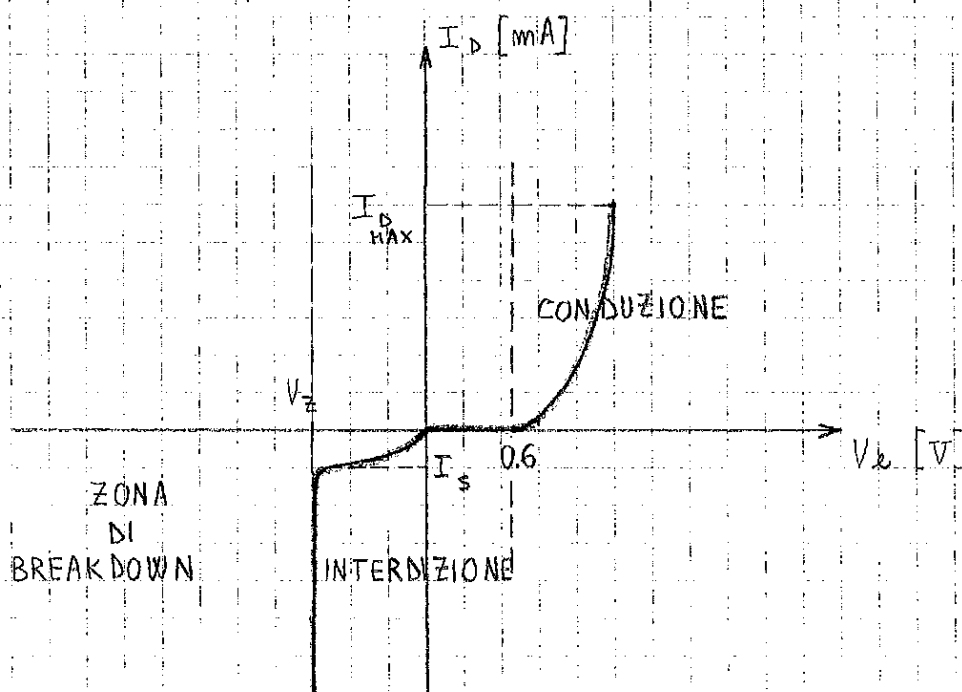
$$I_D = I_S \left(e^{V_D / \eta V_T} - 1 \right) \quad (1)$$

dove I_D , I_S e V_D sono grandezze già note, η è un coefficiente che per il silicio vale 2 (per il germanio vale 1), V_T è la tensione dovuta all'effetto termico e come già detto vale 25.9 mV @ 25°C.

In polarizzazione inversa la (1) si riduce a

$$I_D \approx -I_S \quad (2)$$

si ricava allora la seguente caratteristica



$V_D < 0$ (polarizzazione inversa)

$V_D > 0$ (polariz. diretta)

sulla caratteristica tensione - corrente appena tracciata si definiscono: 14
 $V_{Z\max}$: massima tensione inversa prima che la giunzione si bruci (breakdown).

$V_Z = 0.6\text{ V}$: tensione di soglia o di accensione, il suo significato è stato spiegato a pagina 12.

$I_{D\max}$: valore massimo della corrente diretta prima che la giunzione fonda.

Sia nel primo che nel terzo caso la fusione è dovuta all'eccesso di potenza VI che la giunzione deve dissipare.

APPLICAZIONE : CELLA PELTIER

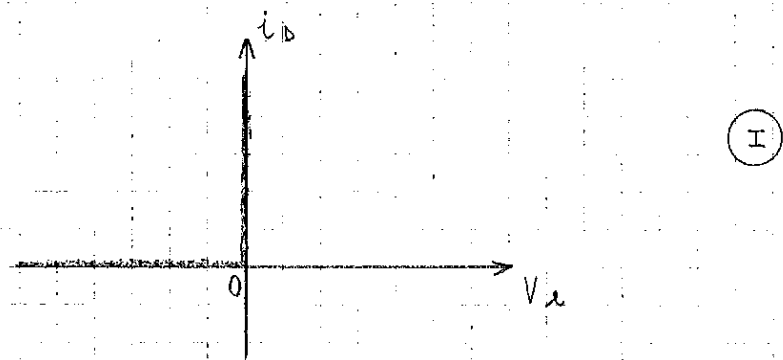
Tra le tante applicazioni della giunzione PN una piuttosto curiosa è la cella Peltier. Il principio che sta dietro questo dispositivo è poi l'appunto l'effetto Peltier secondo cui quando una corrente attraversa la giunzione tra due fili di materiale diverso, la giunzione si raffredda.

Così imponendo dall'esterno il passaggio di corrente si verifica il raffreddamento della giunzione PN.

È possibile trovare questo dispositivo all'interno di un PC portatile.

IL DIODO

Il diodo è il primo componente circuitale che studiamo. È opportuno distinguere subito tra il diodo come elemento ideale ed il cosiddetto diodo a giunzione (componente reale). Il primo, diodo ideale, è il concetto del componente, ed è identificato da un comportamento binario (ON / OFF) avente una caratteristica tensione - corrente come quella riportata in figura sotto:



è una caratteristica lineare a tratti che evidenzia chiaramente come per polarizzazione inversa ($V_D < 0$) la corrente sia nulla, o meglio: il componente impedisce il passaggio di corrente, mentre in polarizzazione diretta ($V_D > 0$) la corrente passi e sia "grande". Si può fare, per capire, il parallelo con una valvola di non ritorno di un impianto idraulico, che in base al verso del fluido impedisce o consente il passaggio del liquido stesso. Il secondo, diodo a giunzione, è invece il componente reale.

Ipotizzando infatti di aver pensato al diodo ideale e di volerlo realizzare in qualche modo, si intuirebbe subito la forte somiglianza tra la caratteristica tensione - corrente di una giunzione PN e quella riportata sopra del componente ideale.

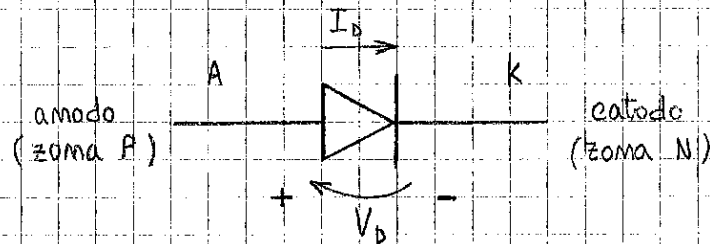
16

Ecco quindi che il diodo ideale diventa nella pratica una giunzione PN detta DIODO A GIUNZIONE. Si dà la seguente

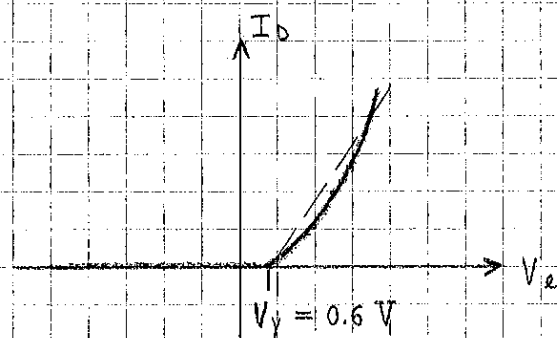
Definizione:

Si chiama DIODO A GIUNZIONE quell'elemento circuitale non lineare, unidirezionale, con comportamento binario, avente due terminali.

Il suo simbolo circuitale è:



La non linearità è ovviamente riferita alla caratteristica della giunzione PN che possiamo tracciare in modo approssimato non tenendo conto dell'asintoto a $V \approx \max$, asintoto che per di più rappresenta una condizione proibita (breakdown).



Mettiamo in evidenza ora le analogie tra le figure (I) e (II): entrambe per polarizzazione inversa hanno $I_D = 0$, cioè entrambe le caratteristiche presentano un tratto lineare fino a che dura la fase di interdizione. A questo proposito si osserva che nel caso ideale si ha interdizione finché $V_e < 0$ mentre nel

17

caso reale fino a $V_z < V_y = 0.6 V$. Ecco che come osservato nelle pagine precedenti la V_y assume un significato rilevante, definendo di fatto il passaggio tra i due comportamenti per un componente tanto importante qual'è il diodo (d'ora in avanti "a giunzione" sarà sottinteso).

Le due caratteristiche si differenziano invece nella fase di conduzione la (I) infatti presenta un secondo tratto lineare con $V_z = 0$, la (II) al contrario è definita da un tratto di esponenziale avente una espressione a noi già nota. D'altra parte è possibile pensare di linearizzare questo esponenziale con una retta (tratteggiata in figura) facendo sì che le due caratteristiche si avvicinino ancora di più.

Il passo successivo consiste nell'associare a questa caratteristica linearizzata (in realtà non sappiamo ancora come linearizzare il tratto di esponenziale) un corrispettivo reale, vogliamo in altre parole modellizzare il diodo nei due casi in un modo tale da rappresentare il comportamento peculiare su ciascun tratto.

MODELLO PER L'INTERDIZIONE

L'unica cosa che caratterizza questa retta è $I_D \neq 0$, si capisce subito allora che in interdizione un diodo si comporta come un resistore di resistenza infinita, cioè un elemento aperto.

