

MATERIALI CONDUTTORI; ISOLANTI E SEMICONDUCTORI .....	2
<i>Conducibilità nei conduttori</i> .....	3
<i>Conducibilità negli isolanti</i> .....	3
<i>Conducibilità nei semiconduttori</i> .....	4
SEMICONDUCTORE INTRINSECO ED ESTRINSECO .....	5
<i>Conducibilità intrinseca</i> .....	5
<i>Drogaggio di tipo N (con impurità donatrici)</i> .....	6
<i>Drogaggio di tipo P (con impurità accettori)</i> .....	6
<i>Cariche fisse e mobili presenti in un semiconduttore drogato</i> .....	7
GIUNZIONE P N O DIODO A SEMICONDUCTORE.....	8
POLARIZZAZIONE DI UNA GIUNZIONE P-N .....	9
<i>Giunzione polarizzata inversamente</i> .....	9
<i>Giunzione polarizzata direttamente</i> .....	10
CARATTERISTICA V-I DI UN DIODO A SEMICONDUCTORE.....	11
<i>Influenza della Temperatura sulla caratteristica di un diodo</i> .....	11
<i>Effetto Valanga - Effetto Zener</i> .....	12
<i>Diodo Zener</i> .....	12
PARAMETRI DI UN DIODO A SEMICONDUCTORE .....	13
<i>Dati caratteristici del costruttore</i> .....	13
CIRCUITO RADDRIZZATORE AD UNA SEMIONDA .....	14
CIRCUITO RADDRIZZATORE AD ONDA INTERA .....	15
RADDRIZZATORE TRIFASE AD UNA SEMIONDA .....	16
RADDRIZZATORE TRIFASE A PONTE .....	16
IL PROBLEMA DELLA CONVERSIONE ALTERNATA CONTINUA.....	17
DIODO LED.....	18
DIODO VARICAP O VARACTOR.....	19
FOTODIODO .....	19
<i>Diodi Speciali : Tunnel e Schottky</i> .....	21
<i>Diodi Controllati</i> .....	21
TRANSISTORI .....	22
<i>Caratteristiche di uscita</i> .....	24
ANALISI DI CIRCUITI TRANSISTORIZZATI .....	25
<i>Esercizio 1</i> .....	25
<i>Esercizio 2</i> .....	25
<i>Esercizio 3</i> .....	26
BIBLIOGRAFIA.....	26

## *Semiconduttori, Diodi Transistori (parte I)*

prof. Cleto Azzani  
 IPSIA Moretto Brescia  
 Rev. 1998

### **Materiali conduttori; isolanti e semiconduttori.**

I materiali, a seconda della loro attitudine alla conduzione della corrente elettrica, possono essere suddivisi in tre categorie: *conduttori, semiconduttori e isolanti.*

Il diverso comportamento di un materiale al passaggio della corrente elettrica dipende dalla struttura atomica del materiale stesso. Secondo il modello di Bohr l'atomo è costituito da un nucleo, intorno al quale, disposti in diverse orbite circolari od ellittiche, ruotano gli elettroni, dotati di carica negativa  $e$ . Il numero degli elettroni ruotanti è uguale a quello dei protoni, di carica positiva  $+e$ , contenuti nel nucleo quindi l'atomo, in condizioni normali, è elettricamente neutro.

Gli elettroni si distribuiscono nelle varie orbite (ciascuna delle quali è caratterizzata da un numero massimo di elettroni contenibili) a partire da quella più vicina al nucleo, in modo da completarle successivamente. Gli elettroni dell'orbita più esterna, normalmente incompleta, vengono detti di valenza. Sono questi elettroni che determinano le proprietà chimiche ed elettriche di un materiale vengono chiamati di valenza in quanto sono quelli che definiscono i legami fra gli atomi di una molecola. All'interno del materiale si distinguono principalmente due bande o livelli energetici intendendo con questo termine l'insieme delle orbite i cui elettroni posseggono una certa energia, la "banda di valenza" e la banda di conduzione".

Alla banda di valenza appartengono gli elettroni che abbiamo chiamato di valenza quella di conduzione quegli elettroni che posseggono una energia tale da sfuggire all'attrazione del nucleo e che quindi, diventano liberi di muoversi all'interno del materiale. Tra queste due bande esiste una certa differenza di energia, ossia un corto numero di livelli energetici, che gli elettroni dell'atomo non possono possedere; a questa zona viene dato il nome di banda interdotta o anche di Gap energetico.

<b>Isolante</b>		<b>Gap [eV]</b>	<b>Semiconduttore</b>		<b>Gap [eV]</b>
Diamante	<b>C</b>	5,33	Silicio	<b>Si</b>	1,14
Ossido di Zinco	<b>ZnO</b>	3,2	Germanio	<b>Ge</b>	0,67
Cloruro di Argento	<b>AgCl<sub>2</sub></b>	3,2	Tellurio	<b>Te</b>	0,33
Solfuro di Cadmio	<b>CdS</b>	2,42	Arseniuro di Gallio	<b>GaAs</b>	1,43
Solfuro di Zinco	<b>ZnS<sub>2</sub></b>	3,6			

Somministrando energia al materiale è possibile far passare gli elettroni dalla banda di valenza a quella di conduzione: ciò vuol dire che gli elettroni della banda di valenza, in queste condizioni vengono a possedere un'energia tale da superare la banda interdotta per portarsi in quella di conduzione. L'energia necessaria per far avvenire questo passaggio di elettroni da una banda all'altra può essere di tipo termico, elettrico o luminoso.

Com'è noto la corrente elettrica non altro che un moto ordinato di elettroni all'interno del materiale, risulta, quindi chiaro che l'entità di questa corrente. dipenderà, dal numero di elettroni contenuti nella banda di conduzione.

## Conducibilità nei conduttori

Dall'elettrotecnica sappiamo che si chiamano conduttori quei materiali che permettono il passaggio della corrente elettrica; alla luce di quanto abbiamo finora visto saranno allora conduttori quei materiali nei quali una piccola quantità di energia permette di portare la maggior parte degli elettroni di valenza nella banda di conduzione; nei conduttori tale energia è fornita dall'agitazione termica degli atomi a temperatura ambiente, in queste condizioni possiamo allora dire che, nei conduttori, banda di valenza e banda di conduzione sono praticamente sovrapposte ossia il gap tra le due bande è nullo.

Sono materiali conduttori i metalli quali l'Argento (Ag), l'Oro (Au), il Rame (Cu), il Ferro (Fe), l'Alluminio (Al) ecc. ecc. ; la migliore conducibilità è offerta dall'Argento, seguono il Rame, l'Alluminio, l'Oro.

A temperatura ambiente gli elettroni di valenza sono praticamente tutti liberi di muoversi all'interno della struttura atomica del metallo; il moto è disordinato e casuale in quanto non essendo presente alcun campo elettrico, non può dare luogo a corrente.

Sovente nei testi specializzati si sente parlare di "gas elettronico" per dare un'idea del grado di libertà di movimento degli elettroni di valenza all'interno del reticolo cristallino del metallo.

E' sufficiente applicare un piccolo campo elettrico per orientare in una determinata direzione il moto, altrimenti disordinato, di tutti gli elettroni liberi presenti; l'intensità di corrente prodotta dal movimento degli elettroni liberi è notevole e la resistenza elettrica  $R$  di questi materiali è di conseguenza molto bassa.

Al crescere della temperatura nei metalli solitamente si riscontra un aumento della resistenza elettrica  $R$ ; si dice che un metallo è un PTC (Positive Temperature Coefficient - materiale con coefficiente di temperatura positivo). Il fenomeno si spiega ricordando che l'aumento di temperatura provoca un aumento della vibrazione degli atomi che costituiscono la struttura cristallina di un metallo; aumenta la probabilità di collisione fra elettroni liberi e atomi della struttura cristallina con conseguente riduzione della carica elettrica media trasportata dagli elettroni e conseguente aumento della resistenza elettrica del materiale.

## Conducibilità negli isolanti

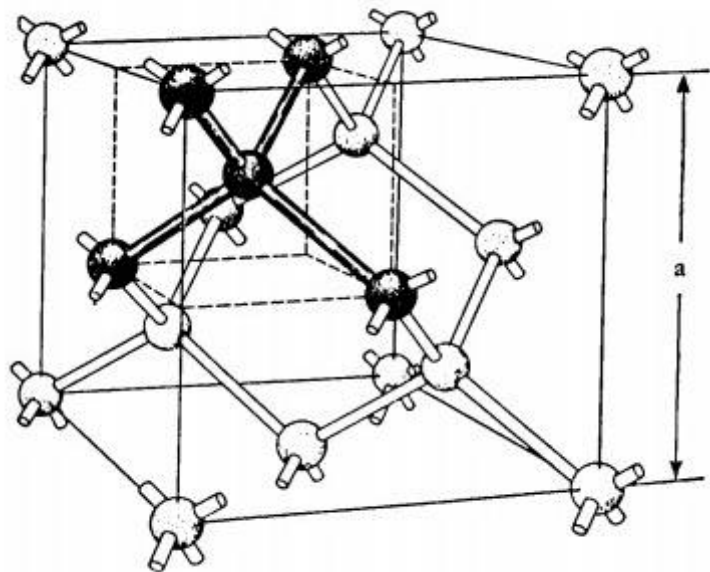
Analogamente sappiamo che si chiamano isolanti quei materiali che non permettono il passaggio della corrente elettrica. Agli isolanti appartengono allora quei materiali nei quali è necessaria una notevole energia per far passare gli elettroni dalla banda di valenza a quella di conduzione, ossia quelli in cui il gap esistente tra le due bande è molto grande. E' allora impossibile in condizioni

normali, far passare elettroni dalla banda di valenza a quella di conduzione; in questo caso la banda di conduzione risulta vuota e quindi non vi può essere passaggio di corrente all'interno del materiale. Sono materiali isolanti le sostanze quali la Gomma, la Bachelite, la Ceramica, il Vetro, il Legno (secco), la Carta, l'Olio, le Materie Plastiche in genere, l'Acqua distillata e l'Aria secca.

Per far sì che un materiale isolante conduca è necessario vincere la "rigidità dielettrica" del materiale (massima intensità di campo elettrico applicabile) vale a dire si deve letteralmente "strappare" gli elettroni di valenza dai propri atomi vincendo le forze di attrazione atomiche. Quando ciò avviene il materiale isolante solitamente si distrugge; sono esempi di questo fenomeno la carbonizzazione prodotta sulle materie plastiche da una violenta scarica elettrica; la distruzione degli isolatori ceramici o di vetro dei tralicci dell'alta tensione provocata da un fulmine (campo elettrico elevatissimo).

### Conducibilità nei semiconduttori

Un materiale che presenta proprietà intermedie a quelle degli isolanti e dei conduttori viene detto semiconduttore. In questi materiali si ha il passaggio di una debole corrente elettrica anche a temperatura ambiente, ciò vuol dire che un certo numero di elettroni di valenza può passare dalla banda di valenza alla Banda di conduzione; il gap esistente tra le due bande non è quindi molto grande. A questa categoria



**Fig. 1 Reticolo cristallino di un semiconduttore**

appartengono materiali di tipo cristallino aventi quattro elettroni nell'orbita di valenza (vedi figura). Per le loro particolari proprietà tali sostanze vengono utilizzate per la costruzione di dispositivi a semiconduttore come diodi e transistor. Le principali di tali sostanze sono il Germanio ed il Silicio.

## **Semiconduttore intrinseco ed estrinseco**

Il germanio ed il silicio hanno una struttura cristallina che, rappresentata su un piano, assume la configurazione di figura 2. In tale configurazione ogni atomo è equidistante da altri quattro atomi e ciascun elettrone dell'orbita esterna si associa ad un elettrone appartenente all'orbita esterna di uno dei quattro atomi adiacenti, formando un *legame di tipo covalente*. Questo tipo di legame dà origine ad una struttura particolarmente stabile.

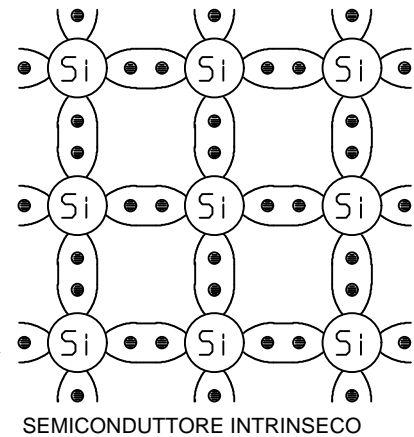


Fig. 2

### Conducibilità intrinseca

Allo stato puro il germanio (Ge) ed il silicio (Si) sono *semiconduttori intrinseci* in essi è possibile una piccola conduzione elettrica a causa della rottura di alcuni legami covalenti dovuta all'agitazione termica a temperatura ambiente. La rottura di un legame covalente comporta la liberazione di un elettrone che passa nella banda di conduzione e la formazione di una lacuna nel posto lasciato libero dall'elettrone. La lacuna equivale ad una carica positiva nella struttura cristallina del semiconduttore (vedi fig. 3).

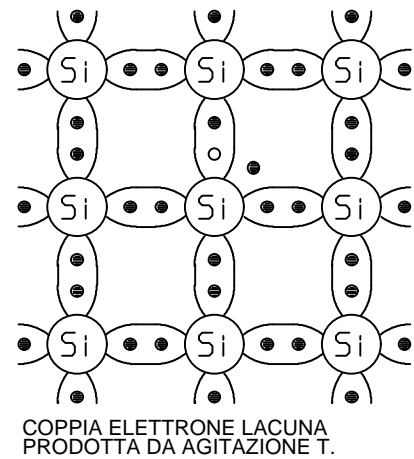


Fig. 3

Al crescere della temperatura nei semiconduttori solitamente si riscontra una diminuzione della resistenza elettrica  $R$ ; si dice che un semiconduttore ha un comportamento NTC (Negative Temperature Coefficient - materiale con coefficiente di temperatura negativo). Il fenomeno si spiega ricordando che l'aumento di temperatura provoca un aumento del numero di coppie elettrone lacuna che si originano dalla rottura dei legami covalenti degli atomi di semiconduttore; ciò provoca un aumento della corrente con conseguente diminuzione della resistenza.

Il semiconduttore puro non viene normalmente usato per la costruzione di diodi o transistor in quanto questi ultimi per le loro caratteristiche, richiedono l'utilizzazione di cristalli drogati da impurità che alterino le proprietà intrinseche di conducibilità del cristallo stesso. In definitiva si tratta di aumentare fortemente la conducibilità del semiconduttore iniettando nel reticolo cristallino delle sostanze che aumentino le cariche libere presenti nel semiconduttore.

Una tale operazione viene detta di drogaggio, le sostanze iniettate nel reticolo si chiamano impurità ed il semiconduttore nelle nuove condizioni viene chiamato *estrinseco*.

Le impurità iniettate nel reticolo cristallino possono essere di due tipi: trivalenti o pentavalenti e, a seconda del tipo, prendono il nome di “accettori” o di “donatori”.

#### Drogaggio di tipo N (con impurità donatrici)

Le impurità pentavalenti (ossia con cinque elettroni nella banda di valenza), vengono anche dette di tipo N (negative) in quanto generano nel semiconduttore un eccesso di *cariche mobili negative*; quelle comunemente impiegate sono il selenio, l'arsenico, il fosforo e l'antimonio.

Esaminando fig. 4 si vede che solo quattro dei cinque elettroni di valenza dell'impurità, possono formare legami covalenti, di conseguenza il quinto elettrone risulta debolmente legato al proprio

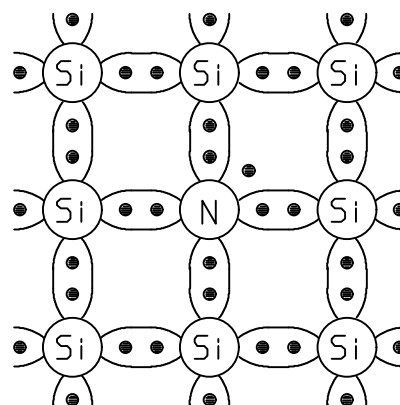


Fig. 4 Drogaggio N

nucleo può passare, già a temperatura ambiente nella banda di conduzione. Il numero di elettroni liberi che così si forma è praticamente uguale a quella dei donatori immessi nel reticolo e risulta molto maggiore di quelli delle coppie elettrone-lacuna proprie del semiconduttore; anche in questo caso la conducibilità del materiale risulta notevolmente aumentata essendo maggiore il numero delle cariche che possono partecipare alla conduzione. Il semiconduttore così drogato viene detto di tipo N, i droganti vengono chiamati *donatori*.

#### Drogaggio di tipo P (con impurità accettori)

Le impurità trivalenti, vengono anche dette di tipo P (positive) in quanto generano nel semiconduttore un eccesso di *cariche mobili positive*; quelle comunemente impiegate sono il Boro (Bo), il Gallio (Ga), l'Indio (In) e l'Alluminio (Al). Queste sostanze hanno tre elettroni nell'orbita di valenza e, inserite nel reticolo cristallino, danno luogo ad una configurazione del tipo di fig. 5.

Come appare dalla figura tutti e tre gli elettroni di valenza dell'impurità formano legami covalenti con altrettanti atomi di semiconduttore. Di conseguenza nel reticolo cristallino uno dei legami *non può essere completato* (mancando un elettrone) pertanto a causa dell'assenza di tale elettrone, si forma una lacuna che equivale ad una carica positiva debolmente legata al proprio nucleo.

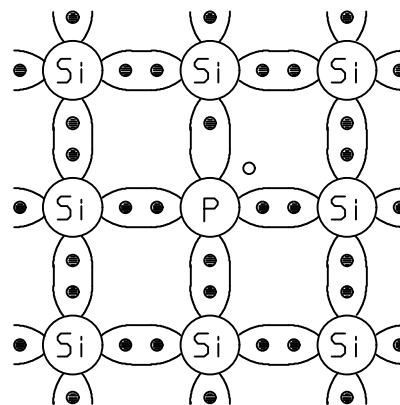
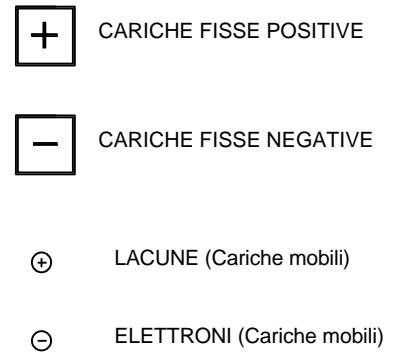


Fig. 5 Drogaggio P

Il numero di lacune che si formano è uguale al numero degli atomi di impurità trivalente immessi nel reticolo, numero che risulta essere molto maggiore di quello delle coppie elettrone-lacuna proprie del semiconduttore e dovute alla rottura di legami covalenti a causa dell'agitazione termica a temperatura ambiente; per questo motivo la conducibilità, del materiale viene notevolmente aumentata. Il semiconduttore così drogato viene detto di tipo P, il materiale drogante : accettore.



**Fig. 6**

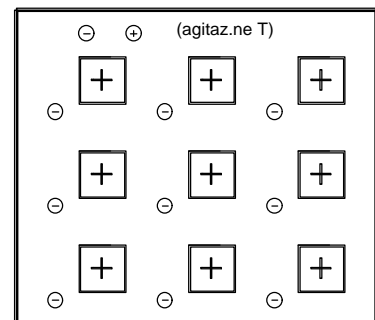
### Cariche fisse e mobili presenti in un semiconduttore drogato

E' da tener presente che il semiconduttore drogato si mantiene dal punto di vista elettrico, neutro in quanto è costituito da atomi di semiconduttore o di impurità che sono singolarmente neutri.

Nel semiconduttore drogato è opportuno però effettuare suddivisioni come di seguito riportato (vedi anche fig. 6) :

- 1) Cariche fisse (ioni positivi o negativi a seconda del materiale drogante) costituiti da *atomi di impurità drogante* che hanno perso o acquistato un elettrone (divenuto libero entro il cristallo);
- 2) Cariche mobili provenienti dagli atomi di impurità drogante;
- 1) Cariche mobili provenienti dalla agitazione termica : si tratta delle coppie elettrone-lacuna presenti anche in un semiconduttore intrinseco; esse crescono notevolmente con la temperatura.

Le cariche mobili è opportuno suddividerle in : cariche maggioritarie e cariche minoritarie a seconda del livello di concentrazione presente nel semiconduttore. Le cariche maggioritarie sono dovute al materiale drogante sono normalmente tutte dello stesso segno, praticamente non dipendono dalla temperatura in quanto sono già tutte libere a temperatura ambiente.



**Fig. 7 N**

Nel semiconduttore drogato la conduzione è dovuta prevalentemente alle cariche maggioritarie.

*In un semiconduttore drogato con materiale di tipo N (vedi fig. 7) le cariche fisse sono ioni positivi : l'atomo donatore (elettricamente neutro) cedendo un elettrone (che diviene libero entro il cristallo) si carica di elettricità positiva. Le cariche mobili maggioritarie sono elettroni (cariche negative) esse provengono in maggior parte dagli atomi di impurità drogante e in minima parte dalla rottura dei legami covalenti del semiconduttore (Ge o Si) provocate dall'agitazione termica.*

In un semiconduttore drogato con materiale di tipo N (vedi fig.8) le cariche fisse sono ioni negativi : l'atomo accettore (elettricamente neutro) cedendo una carica positiva (lacuna) (che diviene libera entro il cristallo) si carica di elettricità negativa. Le cariche mobili maggioritarie sono lacune (cariche positive) esse provengono in maggior parte dagli atomi di impurità drogante e in minima parte dalla rottura dei legami covalenti del semiconduttore (Ge o Si) provocate dall'agitazione termica.

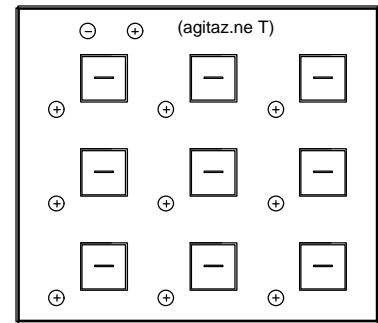


Fig. 8 P

## Giunzione P N o diodo a semiconduttore

Un diodo a semiconduttore si può costruire teoricamente unendo due cristalli uno di tipo P ed uno di tipo N, la zona di tipo N si chiama catodo quella di tipo P, anodo. Il simbolo elettrico del diodo è quello di figura 9.

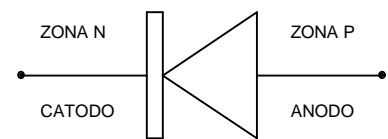


Fig. 9

Per capire il funzionamento del diodo a semiconduttore vediamo cosa accade quando si pongono a contatto due zone, una di tipo P ed una di tipo N.

Dopo il contatto le lacune che sono maggioritarie nella zona P, tendono a dirigersi verso la zona N; gli elettroni che sono maggioritari nella zona N, tendono a dirigersi verso la zona P (principio analogo a quello dei “vasi comunicanti”) dando origine ad una “corrente di diffusione” diretta dalla zona P verso la zona N. A cavallo della giunzione le cariche maggioritarie si ricombinano; nasce una zona di svuotamento (“depletion layer”) nella quale si manifesta l’azione di un campo elettrico prodotto dalle “cariche fisse” presenti che si oppone al flusso delle cariche maggioritarie. Il campo elettrico prodotto dalle “cariche fisse” nella zona di svuotamento favorisce il movimento delle “cariche minoritarie” che danno origine alla “corrente di drift” diretta dalla zona N verso la zona P. Se una giunzione non è polarizzata (collegata ad un generatore) non può essere attraversata da corrente per cui le due correnti di diffusione e di drift devono bilanciarsi esattamente.

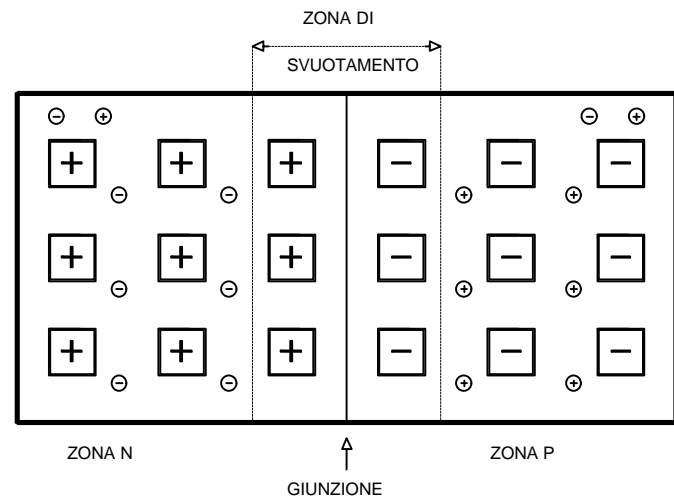


Fig. 10

$$I_{diff} + I_{drift} = 0$$





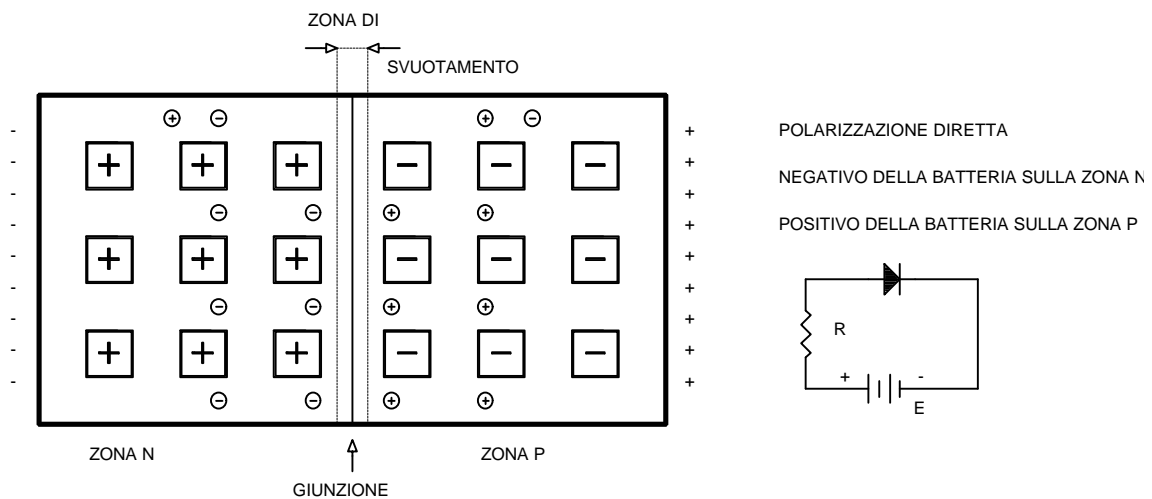
Per diodi al silicio tale corrente è dell'ordine dei nA, per quelli al germanio e dell'ordine dei  $\mu\text{A}$ .

### Giunzione polarizzata direttamente

Quando la giunzione è polarizzata direttamente, le lacune libere della zona P e gli elettroni liberi della zona N vengono sospinti verso la giunzione dal campo elettrico del generatore esterno. La configurazione assunta è quella di figura 12.

Si nota una diminuzione dello spessore della zona di svuotamento e quindi della “barriera di potenziale” prodotta dalle cariche fisse.

E' sufficiente vincere completamente la barriera di potenziale prodotta dalle cariche fisse (con una d.d.p. esterna di 0,2 - 0,3 V nel caso di giunzioni al Germanio e di 0,5 V nel caso di giunzioni al Silicio) per ridurre a zero lo spessore della zona di svuotamento. In queste condizioni attraverso la giunzione circola la “corrente di diffusione” essa è molto intensa tanto che è necessario limitarla a valori ragionevoli ponendo in serie al circuito di polarizzazione una resistenza R di valore opportuno altrimenti la giunzione potrebbe anche distruggersi.



**Fig. 12**

La corrente circolante viene detta “corrente diretta”; essa dipende principalmente della tensione applicata ai capi del diodo e, in minor misura, della temperatura.

### Caratteristica V-I di un diodo a semiconduttore

Quanto visto finora sulla conduzione o interdizione di un diodo può essere rappresentato graficamente su di un piano cartesiano portando in ascisse il valore V della tensione ai capi del diodo ed in ordinate il valore della corrente circolante nel diodo come appare in figura. Si sono indicate con  $V_f$  (forward) ed  $I_f$  rispettivamente la tensione diretta e la corrente diretta (I° quadrante), con  $V_r$  ed  $I_r$  (reverse) tensione e corrente inversa (III° quadrante).

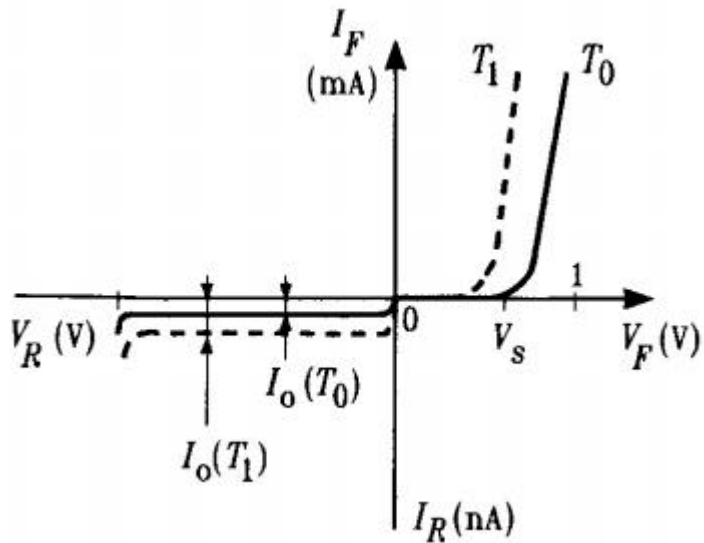


Fig. 13

Nel I° quadrante il diodo risulta

polarizzato direttamente; per piccoli valori di tensione la corrente risulta nulla in quanto non è ancora stata vinta la barriera di potenziale prodotta dalle cariche fisse presenti nella zona di svuotamento. Superato un valore di tensione cosiddetto di soglia  $V_s$  che vale 0,2 - 0,3 V nei diodi al Germanio e 0,5 - 0,6 V nei diodi al Silicio la corrente  $I$  cresce decisamente. si vede che anche per piccoli valori di  $V$  la corrente  $I$  può assumere valori rilevanti. *In condizioni di massima conducibilità del diodo ossia quando  $I_f = I_{max}$  la caduta di tensione ai capi del diodo si aggira attorno ad 1 V.* Nel 3° quadrante il diodo è sottoposto a “polarizzazione inversa”, si vede che per tensioni inverse relativamente basse (inferiori al valore di breakdown) si ha circolazione di corrente inversa che nel caso di giunzioni al silicio è dell'ordine dei nA, per quelli al germanio e dell'ordine dei  $\mu$ A.

### Influenza della Temperatura sulla caratteristica di un diodo

In fig. 13 è evidenziata la dipendenza dalla temperatura della caratteristica diretta (I° quadrante) e inversa (III° quadrante). In particolare si può osservare che :

a) nel primo quadrante al crescere di  $T$ , decresce la caduta di tensione ai capi del diodo. Il tasso di diminuzione è pari a -2,5 mV per ogni grado centigrado di aumento della temperatura ossia :

$$\Delta V = -2,5 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta T$$

b) nel terzo quadrante al crescere di  $T$ , aumenta la corrente inversa che raddoppia per ogni aumento di 10° C della temperatura ambiente (legge empirica approssimata).

$$I_0(T_1) = I_0(T_0) \cdot 2^{\frac{T_1 - T_0}{10}}$$

## Effetto Valanga - Effetto Zener

Se in condizioni di “polarizzazione inversa” si aumenta la ddp ai capi di un diodo, i portatori minoritari, vengono accelerati dal campo elettrico applicato alla giunzione. Ora può accadere che quando l’energia posseduta è sufficientemente elevata, l’urto di questi portatori contro il reticolo cristallino del semiconduttore produce la rottura di più di un legame covalente che libera altre cariche che vengono accelerate e

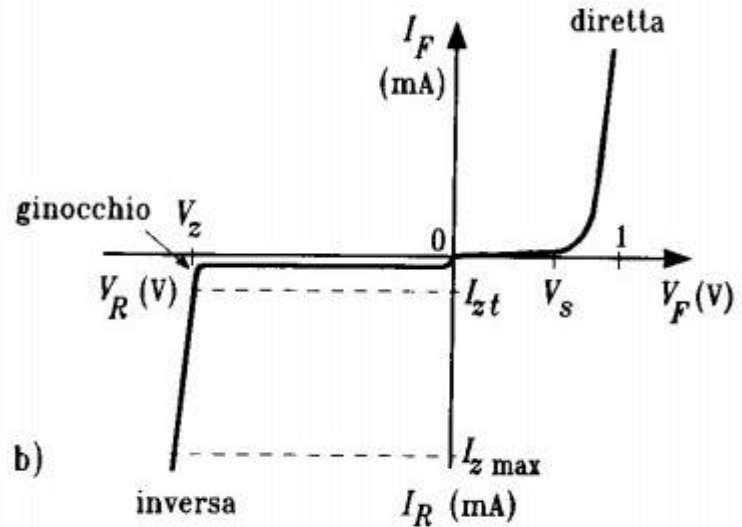


Fig. 14

che a loro volta producono la rottura ai altri legami covalenti dando così origine al cosiddetto “effetto valanga” che ha come conseguenza un brusco aumento della corrente inversa ad tensione pressoché costante denominata “tensione di break-down”. Normalmente bisogna prestare molta attenzione perché un diodo non viene costruito per funzionare nella regione di break-down pertanto se accidentalmente lo si fa funzionare in questa zona, il brusco aumento di potenza dissipata lo distrugge irrimediabilmente.

Un effetto analogo all’effetto valanga lo si può ottenere anche a tensioni relativamente basse drogando fortemente il semiconduttore. Tale effetto prende il nome di “effetto zener” in questo caso l’aumento di corrente è dovuto al forte campo elettrico presente all’interno della zona di svuotamento che indebolisce i legami degli elettroni di valenza del semiconduttore per cui quando si applica un valore di tensione opportuno esternamente, gli elettroni già indeboliti si liberano e producono un aumento della corrente inversa a tensione applicata praticamente costante.

*L’effetto zener (che si verifica per  $V_Z < 5\text{ V}$ ) e l’effetto valanga (che si verifica per  $V_Z > 6\text{ V}$ ) vengono sfruttati per la costruzione di diodi Zener che trovano largo impiego nei circuiti elettronici, in particolare nella costruzione di alimentatori stabilizzati.*

## Diodo Zener

Prendono il nome di Diodi Zener quei particolari componenti costruiti per funzionare normalmente nel III° quadrante della caratteristica di fig. 14. Si noti che, quando si aumenta la tensione inversa ai capi del diodo, si giunge ad un

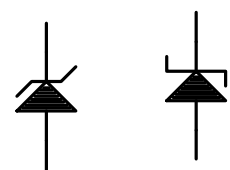


Fig. 15

valore  $V_Z$  tale che il diodo stesso inizia a condurre pur essendo polarizzato inversamente. La tensione a cui ciò avviene viene chiamata “tensione di Zener” e può variare da alcuni volt a centinaia di volts. Si osservi che, ad una piccola variazione della  $V_Z$  corrisponde una grande variazione della corrente per cui tali diodi sono caratterizzati dal fatto di mantenere praticamente costante la tensione ai loro capi, mentre la corrente circolante può variare di molto. Questi diodi sono utilizzati nei circuiti “stabilizzatori di tensione”. Il simbolo elettrico è quello di fig. 15. E’ da tenere presente che, per il corretto funzionamento del diodo Zener, la tensione applicata ai suoi capi deve essere tale da polarizzare inversamente il diodo stesso.

### **Parametri di un diodo a semiconduttore**

#### Dati caratteristici del costruttore

I parametri fondamentali che caratterizzano un diodo sono la corrente massima  $I_{max}$  (polarizzazione diretta I° quadrante); la tensione massima inversa o tensione di breakdown (polarizzazione inversa III° quadrante); eventualmente la potenza massima dissipabile  $P_{dmax}$ .

In tabella sono sinteticamente riportati i dati più significativi che caratterizzano alcuni diodi raddrizzatori fra i più diffusi (dati evidenziati).

<b>Sigla</b>	<b>Tipologia</b>	<b><math>I_{max}</math></b>	<b><math>V_{max}</math></b>	<b><math>P_{dmax}</math></b>
1N4001	usi generali	1.0 A	50V	1W
<b>1N4004</b>	<b>usi generali</b>	<b>1.0 A</b>	<b>400V</b>	<b>1W</b>
1N4005	usi generali	1.0 A	600V	1W
<b>1N4007</b>	<b>usi generali</b>	<b>1.0 A</b>	<b>1000V</b>	<b>1W</b>
<b>1N4148</b>	<b>alta velocità</b>	<b>10mA</b>	<b>75V</b>	<b>0,5W</b>

Nel caso di diodi Zener il costruttore ci fornisce il valore della tensione di zener  $V_Z$  e la massima potenza dissipabile  $P_{dmax}$ . Noti questi valori è possibile ricavare la massima corrente che posso fare circolare in quello Zener usando la relazione:

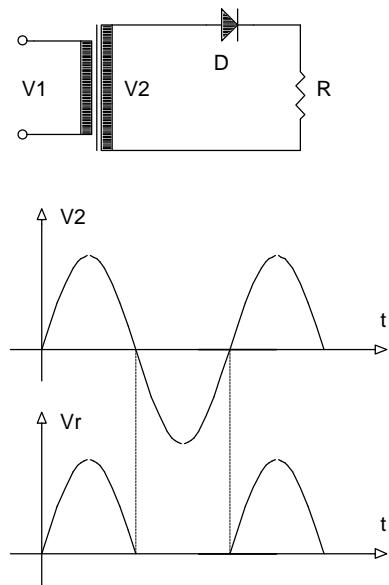
$$I_{ZMAX} = \frac{P_{DMAX}}{V_Z}$$

Nella tabella che segue sono sinteticamente riportati i dati più significativi di alcuni diodi zener fra quelli maggiormente diffusi.

Sigla	Vz	Pdmax
BZX55C3V3	3,3V	500 mW
BZX55C4V7	4,7V	500 mW
BZX55C5V1	5,1V	500 mW
BZX55C6V8	6,8V	500 mW
BZX55C8V2	8,2V	500 mW
BZX55C12	12V	500 mW
BZX55C15	15V	500 mW
BZX55C24	24V	500 mW
BZX55C33	33V	500 mW

### **Circuito raddrizzatore ad una semionda**

In figura è riportato un circuito raddrizzatore ad una semionda; esso è costituito da un trasformatore con tensione primaria V1 e tensione secondaria V2 (ad esempio primario 220V e secondario 12V), un diodo a semiconduttore D ed una resistenza R che simula per così dire il nostro utilizzatore o carico. Con riferimento ai grafici riportati osserviamo che :



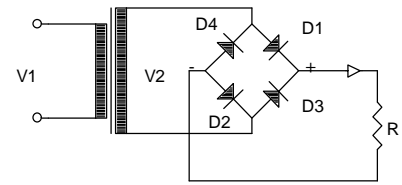
**Fig. 16**

- durante il semi periodo in cui V2 risulta positiva, il diodo D è polarizzato direttamente e perciò si comporta da circuito chiuso; circola corrente nel carico R; la tensione ai capi del carico risulta all'incirca uguale alla tensione V2 (a meno della cdt sul diodo D).
- durante il semi periodo in cui V2 risulta negativa, il diodo D è polarizzato inversamente e perciò si comporta da circuito aperto; non circola corrente nel carico; la tensione ai capi di R è praticamente nulla. La tensione Vr ha un andamento di tipo "unidirezionale" o "pulsante"; abbiamo compiuto un primo passo nel processo di conversione di una tensione alternata in una continua.

*Il Diodo conduce per un solo semiperiodo pari a 180° (360° sono pari ad un periodo).*

## Circuito raddrizzatore ad onda intera

In figura è riportato un circuito raddrizzatore ad onda intera cosiddetto a “Ponte di Graetz”; esso è costituito da un trasformatore con tensione primaria  $V_1$  e tensione secondaria  $V_2$  (ad esempio primario 220V e secondario 12V), un ponte raddrizzatore costituito da 4 diodi a semiconduttore opportunamente collegati ed una resistenza  $R$  che rappresenta il carico.



PONTE DI GRAETZ

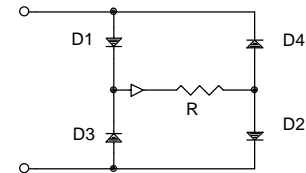
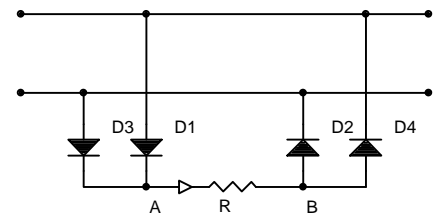


Fig. 17

1) Nel semi periodo in cui  $V_2$  risulta positiva  $D_1$  e  $D_3$  sono polarizzati direttamente e perciò conducono,  $D_2$  e  $D_4$  sono polarizzati inversamente e non conducono; circola quindi corrente nel carico  $R$ ; la tensione  $V_r$  risulta all'incirca uguale alla tensione  $V_2$  (a meno delle cdt sui diodi che in quel momento conducono).



1) Nel semi periodo in cui  $V_2$  risulta negativa  $D_2$  e  $D_4$  sono polarizzati direttamente e perciò conducono,  $D_1$  e  $D_3$  sono polarizzati inversamente e non conducono; circola quindi corrente nel carico  $R$ ; la tensione  $V_r$  risulta all'incirca uguale alla tensione  $V_2$ .

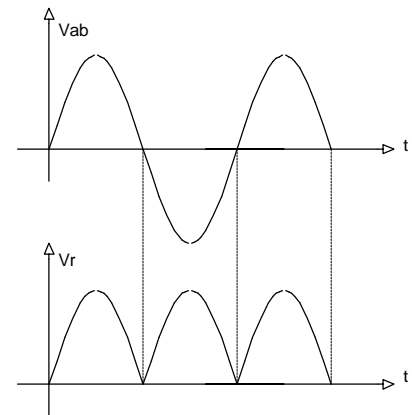


Fig. 18

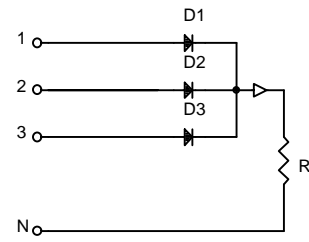
La tensione  $V_r$  ha un andamento di tipo “unidirezionale” o “pulsante” certamente più regolare rispetto alla tensione di uscita in un raddrizzatore ad una semionda.

*E' opportuno infine osservare che poiché il periodo del segnale di uscita ad un raddrizzatore a ponte è la metà del periodo del segnale di ingresso, la frequenza del segnale in uscita al ponte di Graetz è doppia rispetto a quella d'entrata.*

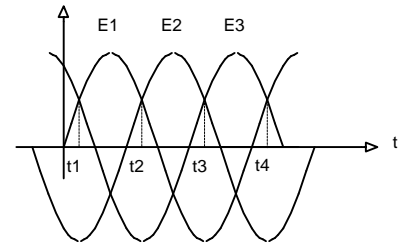
Ogni diodo del ponte conduce per un solo semiperiodo pari a  $180^\circ$ .

### **Raddrizzatore trifase ad una semionda**

In figura 19 è riportato un circuito raddrizzatore trifase ad una semionda; esso è alimentato da un sistema trifase di tensioni stellate (con centro stella accessibile) a 4 fili (tre fasi più neutro); è costituito da tre diodi a semiconduttore D1, D2, D3 (uno per fase) e da una resistenza R che rappresenta l'utilizzatore connessa fra il punto in comune fra i diodi e il conduttore N (neutro).



Le tre tensioni di fase o stellate E1, E2, E3 sfasate di  $120^\circ$  sono rappresentate nel grafico di figura 19.



**Fig. 19**

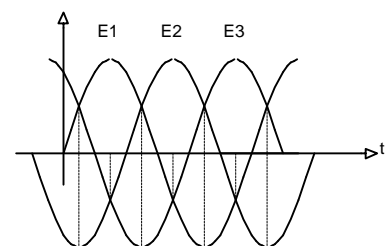
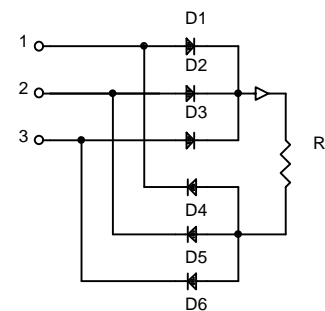
Nell'intervallo di tempo compreso fra  $t_1$  e  $t_2$  delle tre tensioni E1 risulta quella più elevata, perciò D1 conduce D2 e D3 risulteranno interdetti; nell'intervallo  $t_2 - t_3$ , E2 risulta la tensione più elevata perciò D2 conduce, D1 e D3 saranno interdetti; nell'intervallo  $t_3 - t_4$  E3 risulta la tensione più elevata perciò D3 conduce, D1 e D2 saranno interdetti.

La tensione  $V_r$  ha un andamento di tipo "unidirezionale" o "pulsante" certamente più regolare rispetto alla tensione di uscita in un raddrizzatore ad una semionda.

Ogni diodo del ponte conduce per un terzo di periodo pari a  $120^\circ$ .

### **Raddrizzatore trifase a ponte**

In figura è riportato un circuito raddrizzatore trifase a ponte; esso è alimentato da un sistema trifase di tensioni (con centro stella non accessibile) a 3 fili (tre fasi senza neutro); è costituito da sei diodi a semiconduttore (due per fase) e da una resistenza R che rappresenta l'utilizzatore connessa fra il punto in comune fra i primi tre diodi D1, D2, D3 e il punto in comune del secondo gruppo di tre diodi D4, D5, D6.



**Fig. 20**

Nell'intervallo in cui E1 prevale su E2 ed E3, D1 conduce; contemporaneamente a D1 conduce D5 nell'intervallo di tempo in cui E2 risulta più negativa e poi D6 quando E3 risulta maggiormente



negativa. Ogni diodo del ponte conduce ancora per un terzo di periodo pari a  $120^\circ$ .

### Il problema della conversione alternata continua

In tutte le apparecchiature elettroniche c'è la necessità di disporre di una alimentazione continua generalmente a bassa tensione (es.: 6V, 9V, 12V, 15V, 24V) di adeguata potenza, eventualmente duale (alimentazione doppia una positiva ed una negativa). All'interno di un apparato elettronico è sempre presente una sezione alimentatrice che ha il compito di soddisfare questa necessità. Un sistema di alimentazione è costituito da vari blocchi che vengono rappresentati nello schema di figura. In esso si nota la presenza di un trasformatore che provvede a ridurre in genere la tensione di rete solitamente 220V o 380V a valori più consoni al circuito (12V, 15V, 24V) il trasformatore

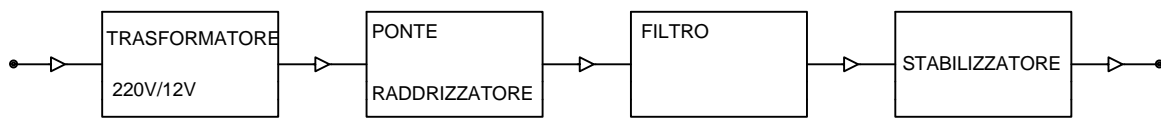


Fig. 21

provvede pure ad isolare galvanicamente il circuito dalla rete di alimentazione a 220V. A valle del trasformatore si nota la presenza di un circuito raddrizzatore solitamente a ponte di Graetz che trasforma l'alternata in un segnale unidirezionale. Per ridurre l'ondulazione residua o "ripple" di un raddrizzatore si utilizzano filtri a pi-greca (fig. 22) o semplicemente ad ingresso capacitivo (fig. 23). In questi ultimi la capacità di filtro si carica, nella fase di conduzione del diodo raddrizzatore e quindi accumula energia elettrostatica data dall'espressione :

$$W_c = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2$$

energia che viene restituita nella fase di interdizione del diodo. Se l'assorbimento del carico aumenta, è come dire che  $R_L$  diminuisce e con essa diminuisce la costante di tempo  $t = C \cdot R_L$  di scarica del condensatore; in tale situazione l'ampiezza picco-picco del "ripple" aumenta.

Il valore di C viene fissato con una legge empirica scegliendo un valore proporzionale all'assorbimento di corrente del carico (da 3000 a 5000  $\mu\text{F}$  per ogni ampere di assorbimento); il valore scelto

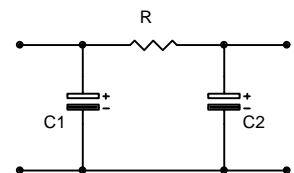


Fig. 22

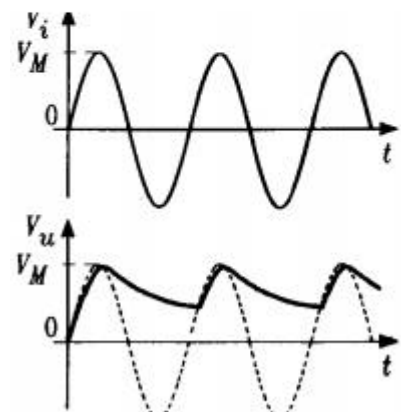
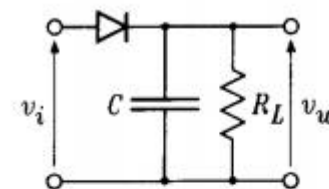


Fig. 23

per C deve tenere conto anche del tipo di circuito raddrizzatore cui C è abbinato; infatti è più facile livellare l'uscita di un raddrizzatore a ponte o di un raddrizzatore trifase piuttosto che l'uscita di un raddrizzatore ad una semionda. I filtri, tuttavia, non eliminano completamente ma riducono il "ripple"; è necessario utilizzare uno stadio stabilizzatore (a diodo zener se il circuito è a basso assorbimento) per ridurre l'ondulazione residua a valori trascurabili.

### Diodo LED

Letteralmente LED significa "Light Emitting Diode" ossia diodo emettitore di luce. Il simbolo elettrico è riportato in figura 21. Un diodo LED funziona nel I° quadrante quindi deve essere polarizzato direttamente. Il passaggio di corrente attraverso di esso produce l'emissione di raggi luminosi di lunghezza d'onda (colore della luce) che dipende dal tipo di materiale usato e dalle modalità di drogaggio del materiale. Nella tabella che segue sono riportati i materiali impiegati per realizzare i diodi LED più comuni. Con la sigla IRED si

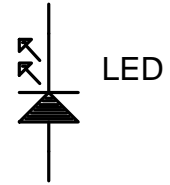


Fig. 24

	IRED	Rosso	Verde	Giallo	Blu
Simbolo	Ga As	Ga As P	Ga P	Ga P	Si C
materiale	Arseniuro di Gallio	Arseniuro Fosforo di Gallio	Arseniuro Fosforo di Gallio	Fosforo di Gallio	Carburo di Silicio
If max	150 mA	100 mA	60 mA	60 mA	50 mA
Vr	3 V	3V	3V	3V	3V
Vf con If=20mA	1,1 V	1,6 V	2,1 V	2,1 V	3,5 V
lungh. Onda	898 nm	665 nm	565 nm	575 nm	475 nm

deve intendere diodo LED a raggi infrarossi (Infra Red LED). In figura 22 sono riportate le caratteristiche voltamperometriche dei vari LED per poterle confrontare fra loro e per poterle confrontare con la caratteristica di un normale diodo al Silicio.

Da sottolineare il basso valore di tensione inversa massima applicabile (3V) e il basso consumo di potenza (decine di mW). I diodi LED sostituiscono da tempo in molte applicazioni le tradizionali lampade spia ad incandescenza; in questa applicazione vengono denominati : "lampade allo stato solido" rispetto

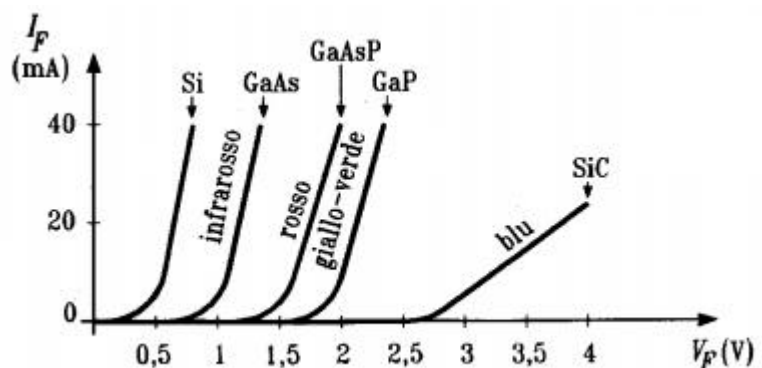
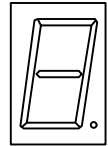


Fig. 25 Caratteristiche I V diodi LED

alle quali hanno indubbi vantaggi : bassissimi consumi e vita illimitata. I diodi LED vengono usati per allestire display luminosi a 7 segmenti usati come elementi indicatori in pannelli degli strumenti di misura di tipo digitale.



### **Diodo Varicap o Varactor**

Il diodo Varicap (simbolo elettrico in figura) sfrutta la proprietà della variazione della capacità  $C_d$  della giunzione in funzione della tensione inversa  $V_i$  applicata. Un diodo polarizzato inversamente infatti è assimilabile ad un condensatore piano il cui dielettrico è la zona di svuotamento; le armature sono rappresentate dalla zona P e zona N che delimitano la zona di svuotamento. Ora come è noto la capacità di un condensatore piano è data dalla relazione:

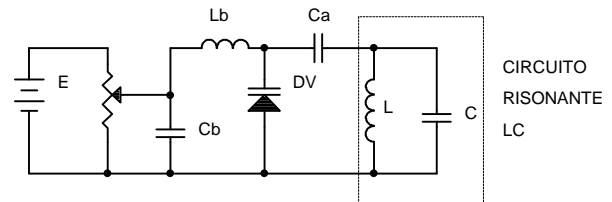


$$C = \epsilon \cdot \frac{S}{d}$$

Al crescere della tensione inversa applicata, la zona di svuotamento si allarga,  $d$  aumenta e  $C$  diminuisce; al diminuire della tensione inversa applicata,  $d$  diminuisce e  $C$  aumenta.

Il diodo Varicap, detto anche varactor, viene utilizzato in circuiti oscillatori come capacità variabile, al variare della tensione inversa applicata al Varicap varia la frequenza di risonanza del circuito; in particolare il diodo varicap viene utilizzato nei sintonizzatori dei canali sui ricevitori televisivi commerciali. Nel circuito di figura 23, la frequenza

di risonanza del gruppo LC parallelo viene modificata variando la polarizzazione inversa del diodo varicap DV. Nel circuito è presente un filtro passa basso ( $L_b$   $C_b$ ) che blocca le componenti ad alta frequenza che andrebbero a interessare il



**Fig. 26 Oscillatore LC con Varicap**

generatore E; tale filtro consente alla componente continua di giungere sul diodo varicap. La capacità  $C_a$  si comporta da corto circuito alle frequenze di lavoro del gruppo LC (e consente quindi alla capacità di DV di essere in parallelo al gruppo LC) e contemporaneamente si comporta da circuito aperto in continua evitando che le componenti di polarizzazione vengano cortocircuitate dalla induttanza L.

### **Fotodiodo**

Il fotodiodo (simbolo elettrico in figura 27) è un diodo la cui giunzione è accessibile a raggi luminosi nel campo visibile o invisibile provenienti dal mondo esterno. I raggi luminosi colpendo la giunzione liberano coppie elettrone lacuna e fanno quindi



**Fig. 27**

aumentare le cariche minoritarie presenti. Il fotodiode funziona perciò nel III° quadrante in condizioni di polarizzazione inversa. In figura 28 è riportata la famiglia di curve caratteristiche del fotodiode BPW34 della Telefunken (ora TEMIC).

In ascisse è riportata la tensione inversa misurata in Volts, in ordinate la corrente inversa espressa in  $\mu\text{A}$ ; come parametro sulle curve viene usato l'irraggiamento ossia la potenza luminosa della sorgente per unità di superficie ( $\text{mW}/\text{cm}^2$ ); la sorgente di prova ha una lunghezza d'onda di 950nm.

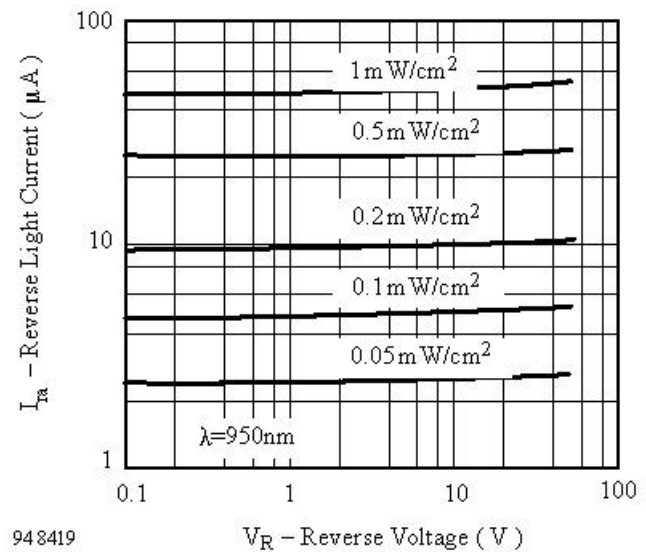


Fig. 28

In figura 29 è riportata la curva caratteristica che pone in relazione la corrente inversa  $I_R$  al variare del flusso luminoso che colpisce la giunzione nell'ipotesi di polarizzare inversamente con una tensione pari a 5V.

Il fotodiode viene utilizzato per realizzare sistemi di lettura ottica dei codici a barre, barriere fotoelettriche (antifurti, apertura cancelli, ecc.).

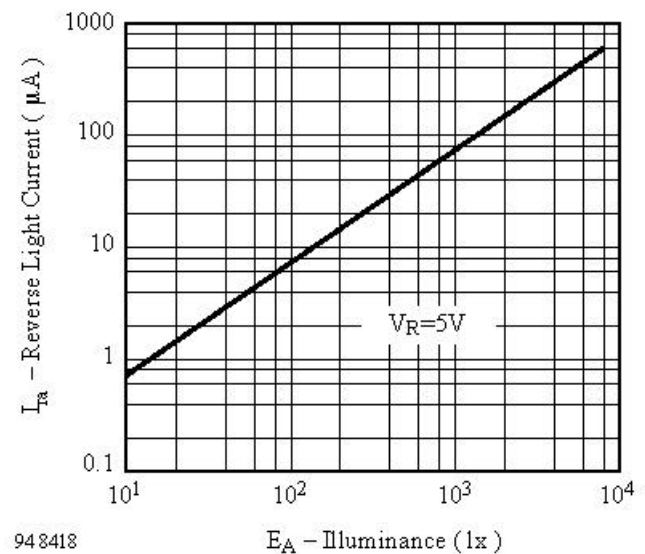


Fig. 29

### Diodi Speciali : Tunnel e Schottky

Il diodo Tunnel ed il diodo Schottky sono due particolari diodi; il primo presenta una zona a resistenza dinamica negativa per tensioni applicate inferiori alla tensione di soglia di un normale diodo al Silicio (0,5 - 0,6 V) per questa sua particolarità viene usato in circuiti oscillatori ad altissima frequenza.



Diodo Tunnel

Il diodo Schottky viene costruito realizzando una giunzione metallo semiconduttore-drogato esso presenta una tensione di soglia di valore all'incirca metà rispetto a quella di un diodo al Silicio tradizionale ma soprattutto presenta tempi di commutazione da ON ad OFF molto minori rispetto a diodi al Silicio normali ed è questo il motivo che lo vede applicato in circuiti logici ad elevata velocità di commutazione.

Fig. 30

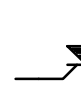


Diodo Schottky

Fig. 31

### Diodi Controllati

Sono particolari diodi che hanno un terzo elettrodo denominato gate. In condizioni normali sono interdetti OFF; facendo giungere su gate un impulso di corrente di valore opportuno,



SCR



TRIAC

Fig. 32

essi possono passare dallo stato OFF allo stato ON . Ne esistono di due tipi uno denominato SCR (Silicon Controlled Rectifier) o tiristor che viene utilizzato per regolare il flusso di potenza su carichi che normalmente funzionano con tensioni continue (motori in corrente continua), uno denominato TRIAC che viene utilizzato per regolare il flusso di potenza su carichi che normalmente funzionano in corrente alternata (resistenze elettriche etc.). Questi ultimi tipi di diodi vengono trattati in una apposita dispensa.

## Transistori

I transistor si riconducono a tre tecnologie fondamentali:

BJT (Bipolar Junction Transistor)

JFET (Junction FET Field Effect Transistor)

MOSFET (Metal Oxide Semiconductor FET)

Esamineremo in questa sede unicamente i transistor BJT.

Essi sono costituiti da tre zone di semiconduttore drogate in modo alterno. Si possono quindi realizzare in questo modo transistori BJT di tipo NPN o PNP (vedi figura 33).

La zona centrale viene detta Base le zone laterali

Collettore ed Elettore. Un transistor BJT presenta quindi due giunzioni la JBE (giunzione Base Elettore) e la JBC (giunzione Base Collettore). Il simbolo elettrico dei BJT NPN e PNP sono riportati in figura; la freccia rappresenta il verso positivo della corrente di Elettore  $I_e$  (uscende nel BJT NPN, entrante nel BJT PNP). Dobbiamo precisare che **la zona centrale detta Base è molto sottile e poco drogata** rispetto alle zone laterali (Elettore e Collettore).

Nel normale funzionamento di un BJT le giunzioni vanno polarizzate come segue:

- JBE polarizzata direttamente
- JBC polarizzata inversamente

Se ipotizziamo di polarizzare inversamente la giunzione JBC come indicato in figura 34, lasciando l'Elettore aperto, la zona di svuotamento della regione Base Collettore si allargherà estendendosi maggiormente in Base in quanto questa è meno drogata della regione di collettore. Attraverso la giunzione Collettore Base circolerà la corrente inversa denominata  $I_{CB0}$

(corrente che circola fra Collettore e Base con elettore aperto Open). L'entità di tale corrente è dell'ordine dei  $\mu A$  nei BJT al Germanio e dei nA nei BJT al Silicio e risulta dipendente dalla temperatura.

Supponiamo ora di polarizzare entrambe le giunzioni come riportato in figura 35. Gli elettroni (cariche maggioritarie dell'elettore) vengono iniettati in base a causa della polarizzazione diretta della giunzione Elettore Base; in Base solo una piccola quantità si ricombina: la Base è infatti

sottile, poco drogata e prevalentemente occupata dalla regione di svuotamento della giunzione Collettore Base. Gli elettroni che in Base non si sono ricombinati risentono dell'azione del campo

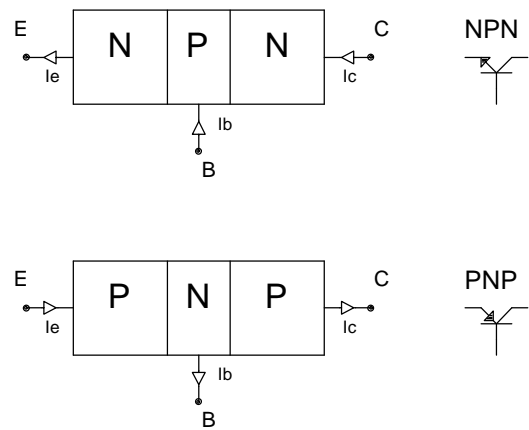


Fig. 33

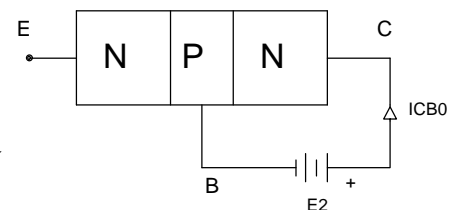


Fig. 34

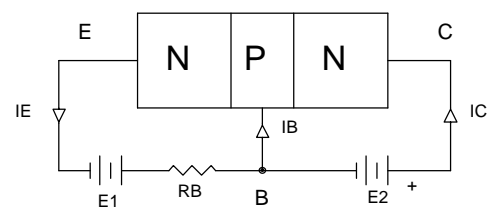


Fig. 35

elettrico di collettore (sono dello stesso segno delle cariche minoritarie della Base e perciò si dirigono verso il collettore dando origine alla corrente di collettore. In definitiva possiamo scrivere :

$$I_C = \alpha \cdot I_E + I_{CBO}$$

dove  $\alpha$  rappresenta un numero inferiore ad 1 ma prossimo ad 1 (compreso fra 0,98 e 0,998) che esprime il rapporto fra gli elettroni che in base non si sono ricombinati e il numero totale degli elettroni partiti dall'emettitore. Scrivendo il I° principio di Kirchhoff (KCL) al BJT

$$I_E = I_C + I_B$$

e sostituendolo nella relazione precedentemente scritta si ottiene

$$I_C = \alpha \cdot (I_C + I_B) + I_{CBO} = \alpha \cdot I_C + \alpha \cdot I_B + I_{CBO}$$

da cui ricavando  $I_C$  si ottiene

$$I_C = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_B + \frac{1}{1-\alpha} I_{CBO} = b \cdot I_B + (1+b) \cdot I_{CBO}$$

avendo posto:

$$\frac{\alpha}{1-\alpha} = b$$

risulta anche

$$\frac{1}{1-\alpha} = \frac{(1-\alpha) + \alpha}{1-\alpha} = 1 + b$$

$\alpha$	$\beta$
0,9	9
0,95	19
<b>0,98</b>	<b>49</b>
<b>0,99</b>	<b>99</b>
<b>0,995</b>	<b>199</b>
<b>0,998</b>	<b>499</b>

In Tabella viene posto in relazione il valore del parametro  $\beta$  per diversi valori del parametro  $\alpha$ . Si noti che più  $\alpha$  si approssima ad 1 più  $\beta$  aumenta.  $\beta$  viene denominato “guadagno statico di corrente” del BJT nella connessione ad “emettitore comune”. La relazione

$$I_C = b \cdot I_B + (1+b) \cdot I_{CBO}$$

esprime il legame matematico esistente fra corrente di collettore, corrente di base in un BJT.

Ponendo nella relazione ora scritta  $I_B=0$  si ottiene:

$$I_{CEO} = (1+b) \cdot I_{CBO}$$

$I_{CEO}$  rappresenta la corrente che circola fra collettore ed emettitore con base aperta (Open). In un BJT al Germanio come s'è detto  $I_{CBO}$  è dell'ordine dei  $\mu A$  e  $I_{CEO}$  è dell'ordine delle centinaia di  $\mu A$  mentre nei BJT al Silicio  $I_{CBO}$  è dell'ordine dei nA e  $I_{CEO}$  è dell'ordine delle centinaia di nA. Nel caso di BJT al Silicio la relazione fondamentale del BJT può essere riscritta in forma approssimata:

$$I_C = b \cdot I_B + (1+b) \cdot I_{CBO} \cong b \cdot I_B$$

da cui si deduce :

$$b = \frac{I_C}{I_B}$$

Il costruttore di BJT fornisce il parametro  $h_{FE}$  così definito:

$$h_{FE} = \frac{I_C}{I_B} \quad \text{che come si è visto coincide con}$$

la definizione di  $\beta$  appena data (ovviamente solo nel caso di BJT al Silicio). Nei transistor al Germanio, ora non più utilizzati, la relazione soprascritta non vale ma conserva la sua validità la relazione generale:

$$I_C = \mathbf{b} \cdot I_B + (1 + \mathbf{b}) \cdot I_{CBO} = \mathbf{b} \cdot I_B + I_{CBO} + \mathbf{b} \cdot I_{CBO}$$

portando a primo membro  $I_{CBO}$  e raccogliendo

$\beta$  al secondo membro si ha:

$$I_C - I_{CBO} = \mathbf{b} \cdot (I_B + I_{CBO})$$

da cui deriva immediatamente :

$$\mathbf{b} = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_B + I_{CBO}}$$

### Caratteristiche di uscita

Le caratteristiche di uscita  $I_C = f(V_{CE}, I_B)$  sono riportate in figura 36. Esse esprimono graficamente il legame matematico che sussiste fra  $I_C$ ,  $V_{CE}$ ,  $I_B$  ad una determinata temperatura di lavoro del BJT. Nel piano  $I_C$ ,  $V_{CE}$  si individuano tre zone di possibile funzionamento:

- Zona di saturazione prossima all'asse  $I_C$ ; tale zona può essere individuata dalla condizione di lavoro  $V_{CE} < V_{BE}$  (vedi figura)
- Zona di linearità in cui le caratteristiche sono approssimabili a rette parallele fra loro e "quasi parallele" all'asse  $V_{CE}$  in tale zona la corrente di collettore risulta costante (indipendente da  $V_{CE}$ ) e dipendente solo da  $I_B$ . Nella zona di linearità vale la relazione :  $I_C = \mathbf{b} \cdot I_B$  (BJT al Silicio).
- Zona di Interdizione; coincide con l'asse  $V_{CE}$  in sostanza è la zona in cui si può ritenere nulla la corrente di collettore  $I_C$ .

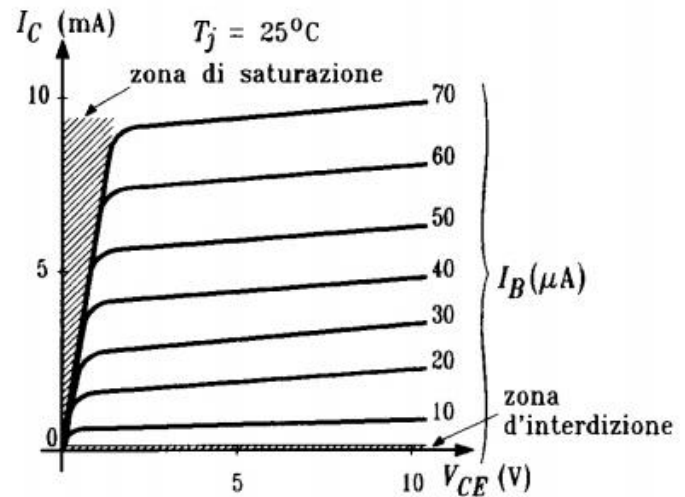


Fig. 36



### Analisi di circuiti transistorizzati

Analizzare un circuito significa partire dalla conoscenza dei valori dei componenti elettronici e dei generatori per risalire ai valori delle correnti e al calcolo delle cadute di tensione parziali. Le leggi che hanno sempre validità sono i pilastri dell'Elettrotecnica ossia:

1. Il principio di Kirchhoff ai nodi KCL (Kirchhoff's Current Law - Legge di Kirchhoff sulle correnti);
2. Il principio di Kirchhoff alle maglie KVL (Kirchhoff's Voltage Law - Legge di Kirchhoff sulle tensioni);
3. La legge di Ohm;
4. I Teoremi dei generatori equivalenti di Thevenin (generatore equivalente di tensione) e Norton (generatore equivalente di corrente);

Particolare attenzione deve essere prestata nell'applicare relazioni del tipo

$$I_C = \mathbf{b} \cdot I_B$$

la cui validità è subordinata al fatto che il BJT lavori effettivamente in zona lineare

### Esercizio 1

Nel circuito di fig. 37 il valore di  $E=12V$ , DL è un LED Rosso per il quale il costruttore consiglia di assumere  $I_D=10mA$ . Dimensionare la resistenza R1.

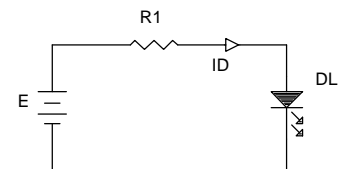


Fig. 37

### Esercizio 2

I circuiti riportati in fig. 38 a) e b) vengono utilizzati per alimentare un diodo LED in corrente alternata. Commentare le modalità di funzionamento degli stessi prestando particolare attenzione alla funzione svolta dai diodi presenti nei due circuiti.

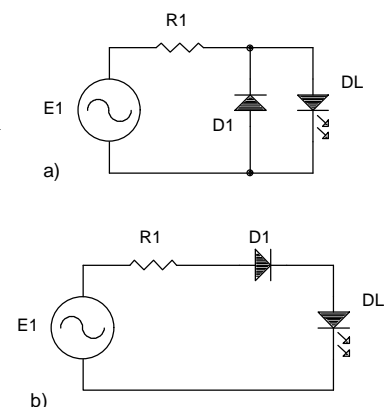
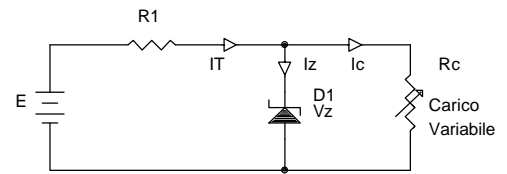


Fig. 38

### Esercizio 3

Nel circuito riportato in fig. 39  $E=12V$ ,  $V_z=9V$ , il carico  $R_c$  varia da un valore massimo pari a  $9K$  ad un valore minimo  $900$  Ohm. Determinare il valore di  $R_1$  e la potenza che deve dissipare il diodo Zener. (Assumere corrente di ginocchio pari ad  $1\text{ mA}$ ).



### **Bibliografia**

Giometti Frascati

Elettrotecnica Elettronica e Telecomunicazioni vol. I° e II° per IPSIA - Calderini Bologna

Giometti Frascati

Elettronica Analogica - Calderini Bologna