

APPUNTI UTILISSIMI

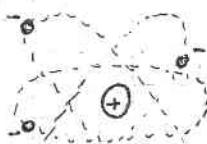
...ma occhio all'inglese

SEMICONDUTTORI

Per studiare le caratteristiche corrente-tensione dei circuiti basati su struttura e semiconduttore bisogna studiare il flusso di carica degli elettroni che si muovono su materiali.

↳ Gli elettroni fanno parte della struttura di un singolo atomo

Struttura dell'atomo



Il nucleo è formato da un agglomerato di neutroni e di protoni con carica complessiva positiva attorno al quale ruotano gli elettroni con carica negativa.

L'elettrone che orbita attorno al nucleo ha una propria energia cinetica. La sua "potenziale" deriva dal bilanciamento di due forze: una dovuta all'attrazione centrale, che allontana l'elettrone dal nucleo, l'altra è la forza coulombiana generata dalle due cariche di segno opposto che è inversamente proporzionale al quadrato delle loro distanze.

Più "veloce" l'elettrone gira attorno al nucleo più grande è la sua orbita e quindi minore è l'energia di legame con i protoni in quanto è inversamente proporzionale al quadrato delle distanze.

L'elettrone, oltre ad avere proprietà di natura corpuscolare (noi ha una massa discreta che risponde alle leggi della meccanica classica), ha proprietà ondulatorie ed inoltre non tutte le orbite sono possibili e quindi, siccome ad un orbita l'elettrone ha una particolare energia, l'elettrone può avere solo alcuni valori di energie.

↳ L'energia è quantizzata: i livelli di energia permessi sono

- diversi per ogni tipo di atomo
- distanziati non continuamente
- occupati al più da due elettroni (con spin opposto) \Rightarrow il numero di elettroni per ogni livello è finito

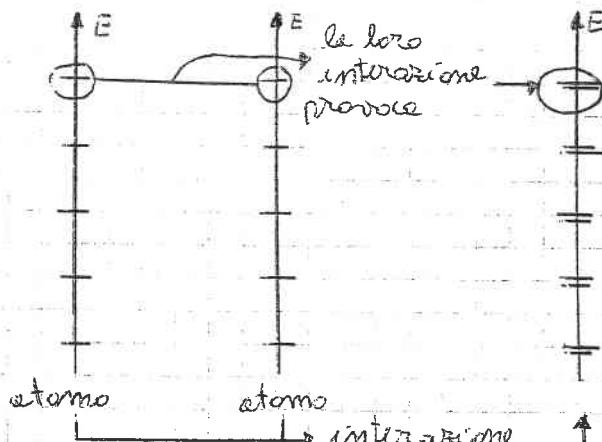


\hookrightarrow per semplicità ogni livello può avere un solo elettrone.

livelli di energia permessi dove tra un livello e l'altro esiste una "banda energetica" proibita

In un sistema in quiete, non perturbato, gli elettroni tendono spontaneamente ad accorciare la distanza con il livello di energia inferiore.

Un materiale è un insieme di atomi che interagiscono tra di loro con gli elettroni di un atomo sentono le presenze degli altri atomi attraverso la repulsione e l'attrazione. Le orbite variano perché il bilancio delle forze è diverso (più cariche positive, nuclei e più cariche negative, elettroni) e quindi le energie si modificano. Il sistema costituito da due atomi, per esempio, ha diversi livelli energetici dai due atomi isolati.



Il numero di livelli di due atomi che interagiscono non può variare in quanto non varia il numero di elettroni grazie soltanto la struttura. Tipicamente ad ogni livello energetico di un singolo atomo ne corrispondono due vicini e distanti.

Le proprietà rimangono uguali in particolare l'energia è discreta e le livelle in cui può stare un solo elettrone (coppie di spin opposti).

• Modello a bande energetiche

L'interazione di più atomi provoca l'avvicinamento dei rispettivi livelli → si formano "gruppi" di livelli nel quale c'è sempre un intervallo tra regioni ricche di livelli e regioni vuote.



Modello a bande: ci sono intervalli in cui c'è un elevato numero di livelli tutti discreti.

↳ la distribuzione NON È CONTINUA

↳ Ogni banda ha un numero finito di livelli e quindi (siccome le proprietà di un singolo atomo valgono anche) ha un numero finito di elettroni che riempiono varie bande portando da quelle con poca energia.

↳ livello energetico di Fermi: livello limite al di sotto del quale, in assenza di perturbazione, tutte i livelli energetici sono occupati al di sopra del quale tutte i livelli energetici sono vuoti.

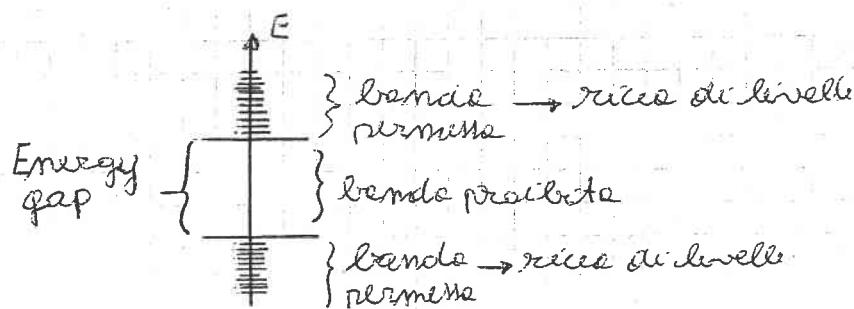
↳ la caratteristica di un materiale dipende dalla posizione del livello energetico di Fermi.

• Tipologie di un materiale

Per indurre corrente in un materiale bisogna perturbarlo per poter accelerare gli elettroni → la perturbazione varia le velocità degli elettroni che cembano energia cinetica → varia la posizione dell'elettrone che "salta" in un altro livello energetico.

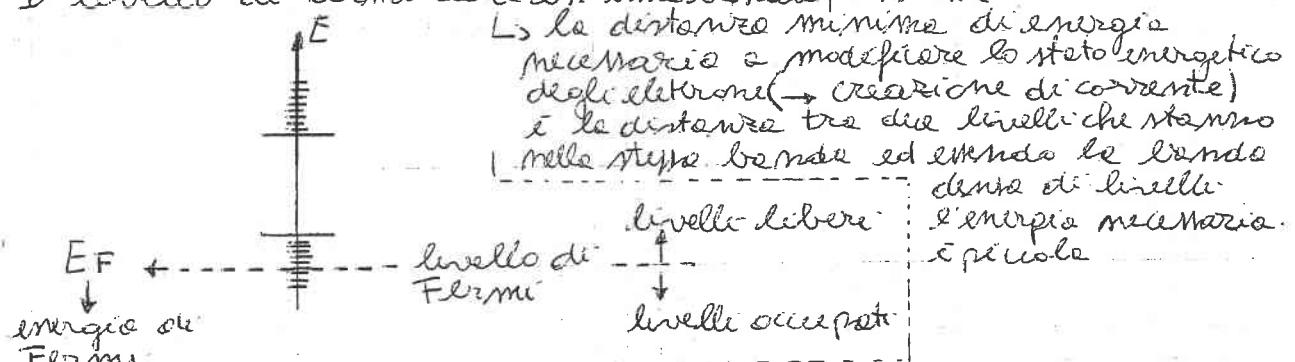
↳ Per avere corrente, quindi, occorre che

- ① ci sia energia prodotta da una sorgente esterna
- ② l'energia sia sufficiente a far "saltare" l'elettrone da un livello ad un altro.



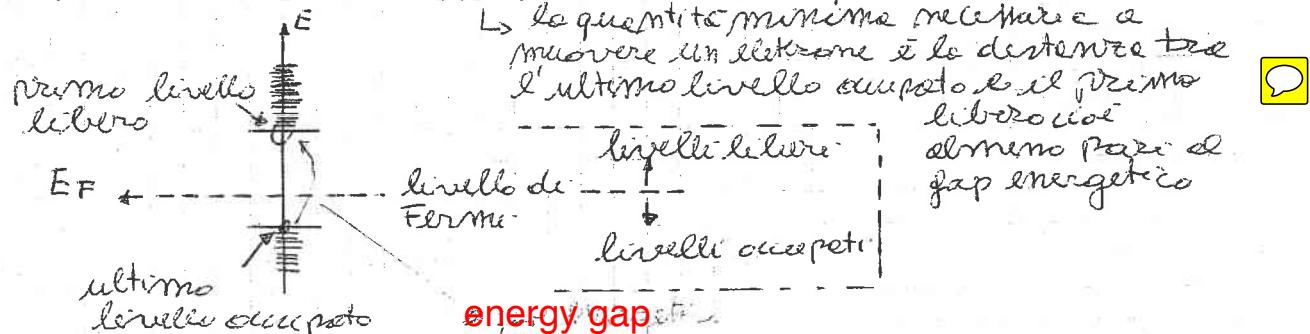
Materiali conduttori:

Il livello di Fermi cade in una banda permessa



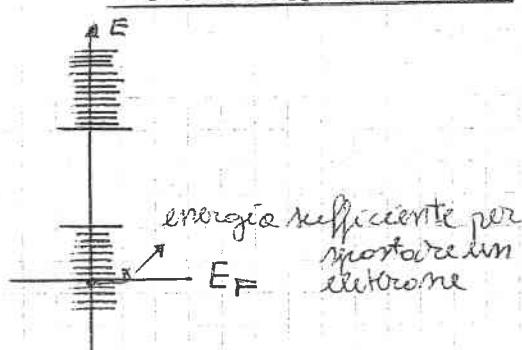
Materiali isolanti:

Il livello di Fermi cade in una banda proibita

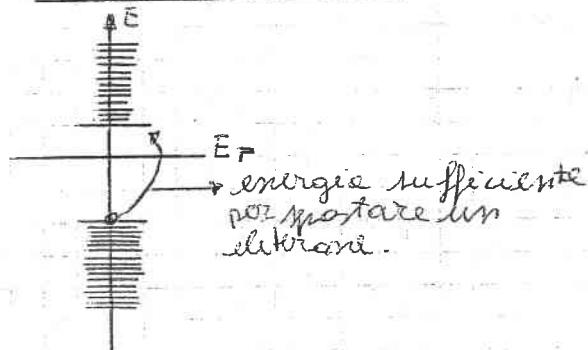


L'energy gap è molto più grande delle distanze minime tra due livelli energetici delle stesse bande e per questo i materiali isolanti conducono molto più difficilmente elettroni rispetto ai materiali conduttori.

Materiali conduttori:



Materiali isolanti:



Però un materiale isolante può sempre condurre elettroni ma, al contrario dei materiali conduttori, ha bisogno di più energia (pari almeno all'energia E_F)

Si può notare che un elettrone per potersi muovere deve avere in una banda con alcune livello energetici liberi quindi una banda completamente vuota e completamente piena non ha nessun contributo alla corrente.

- ↳ Le bande completamente piene vengono tracciate dall'analisi delle correnti in quanto i loro elettroni hanno una remota possibilità di "saltare" in un livello energetico libero.
- ⇒ La situazione è come quella di una bottiglia: il liquido non può muoversi perché ad una perturbazione se la bottiglia non è completamente vuota o piena (il liquido "è" ma non ha spazio per muoversi).
- ↳ Vengono definite le due bande fondamentali (quelle a cavallo del livello energetico di Fermi):
 - Banda di conduzione → sopra il livello di Fermi
 - Banda di valenza → sotto il livello di Fermi
- ↳ Semiconduttori

La differenza tra i semiconduttori e gli altri materiali è la diversa interazione con il mondo esterno.

Metodi di perturbazione

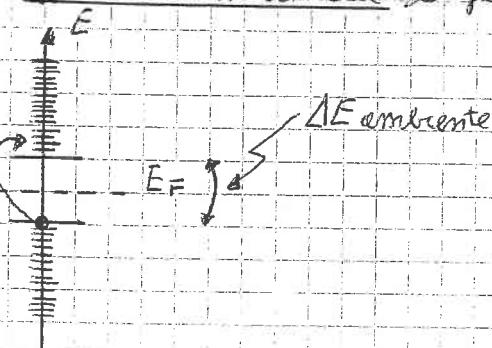
- ↳ termica: (si nome la temperatura i distorsi dalla $T=0$ assoluto gli elettroni che compongono le molecole del vostro materiale si muovono in funzione della temperatura in modo caotico)
- ↳ ottica (un fotone porta una certa energia che viene trapporata da una radiazione)

Il livello teorico di Fermi è in condizione di equilibrio con la perturbazione cioè allo $T=0$ assoluto, il buco...

Nella realtà ci sono continui scambi di energia

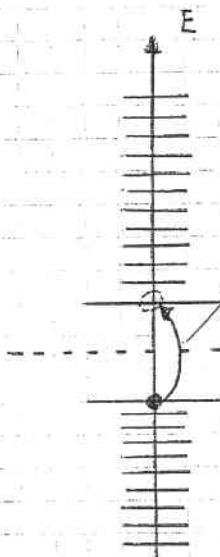
↳ in un isolante l'energia media scambiata non è sufficiente a far "saltare" un elettrone dalla banda di valenza a quella di conduzione

↳ in un semiconduttore il gap energetico è paragonabile all'energia media scambiata con l'ambiente per un semplice effetto termico



Caratteristiche del semiconduttore

- ① il livello energetico di Fermi cede nella banda proibita
- ② l'energia E_F è paragonabile all'energia media scambiata con l'ambiente esterno.

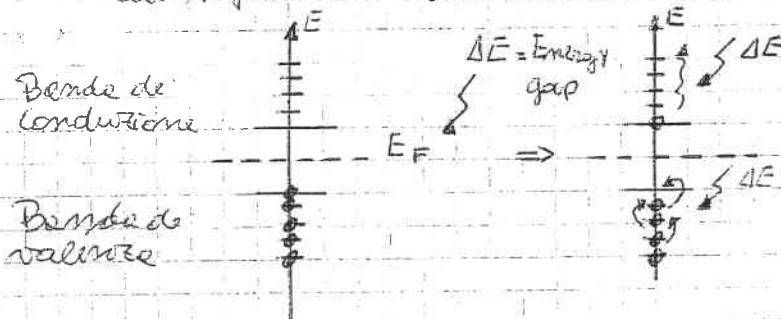


La probabilità dell'elettrone che riceve un'energia pari ad ΔE è elevata in un semiconduttore a temperatura ambiente.

\rightarrow si può generare corrente in questo

- ① l'elettrone (che si trova in un livello energetico più alto e ha quindi una maggiore energia cinetica \rightarrow maggiore velocità) si trova in una banda con molti livelli energetici vuoti, dove può uscire per farlo salire in un altro livello energetico (per questo la banda si chiama di conduzione \rightarrow si comporta come un conduttore)

- ② la banda di valenza diventa parzialmente occupata in cui si può creare un moto di elettroni con piccola energia



Differenze tra un conduttore e un semiconduttore

- In un conduttore esiste solo una banda parzialmente occupata che costituisce il trasporto di corrente
- In un semiconduttore necessariamente esistono due bande entrambe parzialmente occupate \Rightarrow questo provoca le caratteristiche non lineari.

Osservazione

La quantità di elettroni presenti nelle bande di conduzione dipende dalla temperatura \rightarrow la conducibilità elettrica è proporzionale all'esponente delle temperature (in quanto esponente al N° di elettroni che saltano "voltare" nella banda di conduzione).

\rightarrow questo effetto può essere utilizzato per misurare la temperatura in quanto è funzione della temperatura.

\rightarrow questo effetto può essere pericoloso perché la corrente produce calore per effetto Joule \rightarrow il componente si surriscalda

$$I \rightarrow \text{Temp} \uparrow \rightarrow \sigma \uparrow \rightarrow R \downarrow \rightarrow I \uparrow$$

\rightarrow è un meccanismo instabile che può provocare la rottura di un dispositivo (problema dell'elettronica di potenza)

MECCANISMO DI CONDUZIONE NEI SEMICONDUTTORI

I materiali semiconduttori sono prevalentemente delle quarta colonne p della tavola periodica degli elementi.

↳ Silicio, Germanio

o anche di leghe di materiali delle 3^a e 5^a colonne p

↳ GaAs, arsenuro di gallio

InP, sulfuro di indio.

Il silicio è il materiale più diffuso in natura. Per poterlo

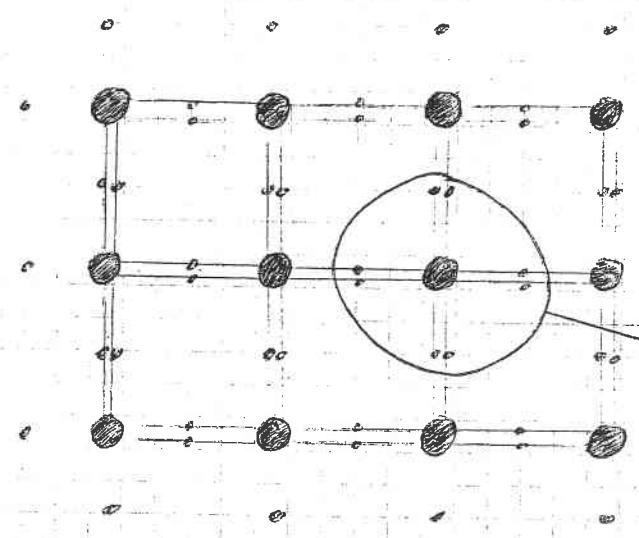
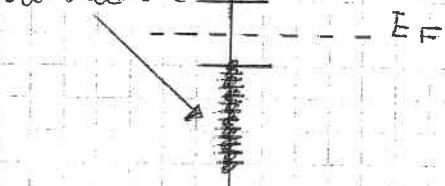
utilizzarla bisogna lavorarlo in maniera complessa
↳ Il numero atomico è 14

↳ Gli atomi di silicio si legano tra di loro formando un reticolo regolare. Gli elettroni di valenza (quelle interni) formano un legame covalente (cioè gli atomi condividono una coppia di elettroni costituendo un legame forte).

↳ Il silicio ha 4 elettroni di valenza disponibili a stabilire un legame formando una struttura cristallina (reticolo cubico). Ogni nucleo ha 4 legami covalenti.

Gli elettroni di legame sono quelli più lontani dal nucleo e quindi con una maggiore energia cinetica ed una minore energia di legame.
↳ Sono nelle bende di valenza (due volte due elettroni di valenza che formano le legami con gli altri atomi)

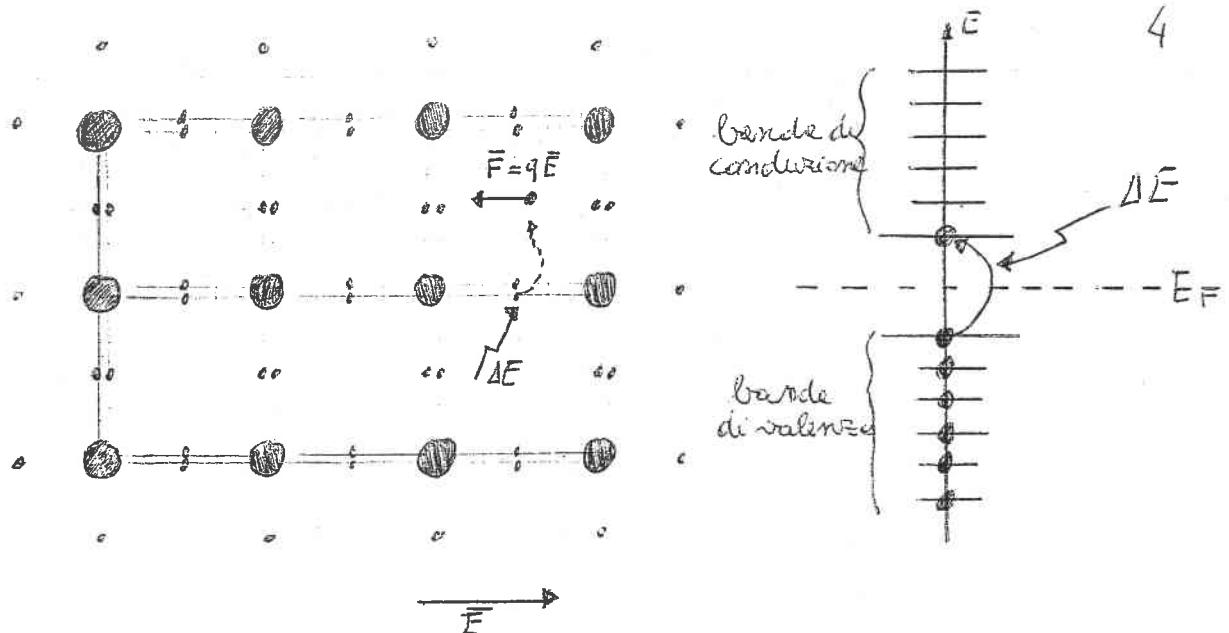
questi elettroni si trovano nelle bende di valenza



In condizione di perturbazione (termico o ottico) un elettrone può ricevere energia salendo nella banda di conduzione → entra in un livello energetico superiore e questa ha un orbita più grande e un minor legame con il nucleo → ha bisogno di un ulteriore piccola energia per cambiare il suo nuovo stato orbitale.

In presenza di un campo elettrico esterno ($\vec{F} = q\vec{E}$) l'elettrone riuverte ed abbandona dall'atomo.

Il moto dell'elettrone è ostacolato dal reticolo cristallino.

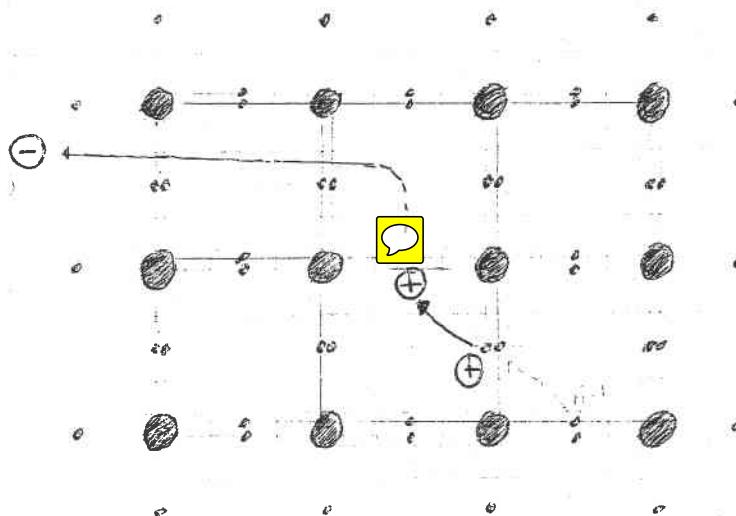


→ L'elettrone che dalla banda di valenza entra nella banda di conduzione è debolmente legato al suo nucleo e sotto ad una forza esterna (campo elettrico) può facilmente lasciare il suo stato di moto ⇒ elettrone libero → può contribuire alla corrente.

↳ Per il principio di conservazione della carica quando l'elettrone si allontana globalmente la carica totale è esattamente riequilibrata ma localmente no → l'assenza di un elettrone comporta uno sfalsamento di carica portante

↳ Il legame regente è il livello legato libero dell'elettrone che è andato nella banda di conduzione.

↳ Questo livello libero può essere facilmente riempito e spese di una piccola energia



grazie al campo elettrico esterno

E_F

Matematicamente si ha che

- ① un elettrone si muove in banda di conduzione
- ② tanti elettroni si muovono in piccoli scatti morti (nella banda di valenza) provocando un apparente spostamento di una corrente positiva nella direzione opposta della variazione negativa in banda di conduzione

\Rightarrow i meccanismi di conduzione nei semiconduttori sono diversi dai meccanismi di conduzione nei conduttori.

Nelle bande di conduzione il moto è dovuto dello scorrimento di una carica negativa dal nucleo. (libera di muoversi sotto l'effetto di un campo elettrico)

Nelle bande di valenze il moto è dovuto ad una successione di piccoli movimenti di elettroni ai quali corrisponde macroscopicamente un moto in direzione contraria di una carica positiva.

Lecune (= carenza di carica negativa) corrisponde ad un moto inverso di deviazioni elettroniche che rappresenta macroscopicamente un moto di un'una particella priva dotata di carica positiva.

Elettrone viene considerato saltando l'elettrone libero dal nucleo nella banda di conduzione.

\Rightarrow In un conduttore esiste un'unica specie di portatore (trasporto di elettroni).

\Rightarrow In un semiconduttore esistono due meccanismi di conduzione \rightarrow carica negativa (elettrone) e carica positiva (lecune).
 \hookrightarrow esistono due specie di portatori di carica.

La generazione di un elettrone provoca la mancata di una lecune.

$$N = N^0 \text{ di elettroni per cm}^3$$

$$P = \text{quintità di lecune per cm}^3$$



$$N = P$$

perché il materiale è uniforme
(SILICIO PURO)

- L'evento di simultanea generazione di un elettrone libero e delle corrispondenti lecune si chiama evento di generazione di una coppia elettrone - lecune (coppia e-h dove h = hole, buco)

\hookrightarrow può essere prodotto sia in maniera elettrica (campo elettrico) che termica (grazie a dei fotoni come nelle macchine fotografiche digitali) che per via acustica/mecanica.

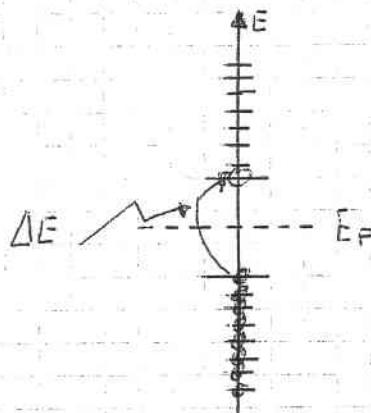
- Si deve avere il fenomeno opposto alla generazione in quanto il sistema è costante nel tempo cioè l'elettrone può cadere in eccesso che lo avverte liberasi e tornare nella banda di valenze. L'elettrone dopo una lecune.
 \hookrightarrow effetto di recombinazione.
L'energia viene ridotta sotto forma di calore o radiazione luminosa (LED).

Dipende che $q = 1,602 \cdot 10^{-19} C$ per conoscere le dimensioni 5
di carica

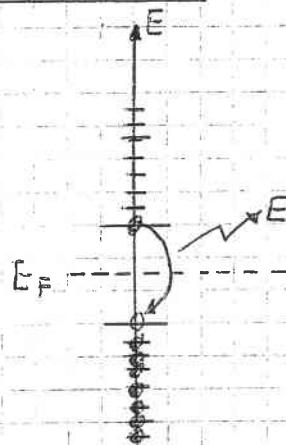
→ degli elettroni liberi $\Rightarrow -q \cdot n$

→ delle lacune $\Rightarrow +q \cdot P$

Evento di generazione di una coppia elettrone-lacuna



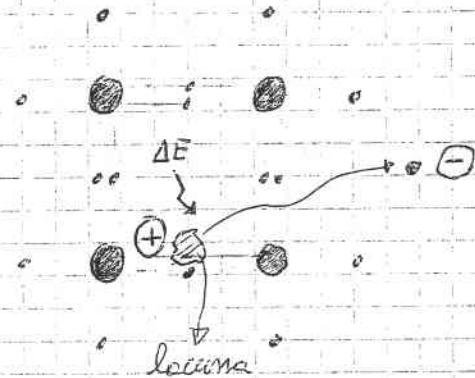
Effetto di recombinazione



G = tasso di generazione

↪ è il numero di coppie elettrone-lacuna che vengono generate nell'unità di volume e nell'unità di tempo (velocità di generazione)
↪ dipende dalla temperatura

⇒ l'elettrone, ricevendo energia, si allontana dal legame covalente creando una lacuna interpretate come una carica positiva in esilio

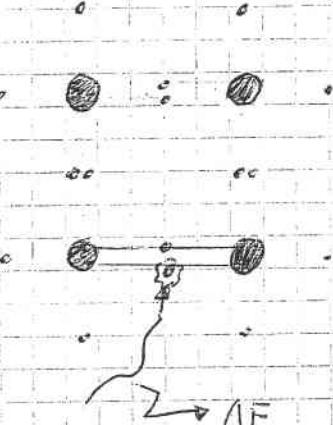


R = tasso di ricombinazione

↪ è il numero di coppie elettrone-lacuna che si ricombinano nell'unità di volume e nell'unità di tempo

↪ dipende dalla temperatura e dalla velocità norma di ricombinazione

⇒ un elettrone libero incontrando una lacuna, cede energia e dà uno stato libero di legame.
L'energia può essere ceduta sotto forma di energia termica o radiazione (licht)



Siccome il sistema è in una condizione stazionaria

$G = R$ poiché la velocità con cui vengono generate le coppie è uguale a quella con cui vengono ricombinate

↪ Il tempo di "sovravvenuta" delle coppie si chiama tempo di vita medio delle coppie



Siccome in condizione stazionaria $p = n$ potranno avere lo stesso nome:

$n_i(T)$ = concentrazione intrinseca di portatori (lacune o elettroni)
↳ dipende in prima approssimazione dalla temperatura (in modo esponenziale)

Valore tipico $n_i = 10^{10} \frac{\text{carrier}}{\text{cm}^3}$ a $300\text{ K}, 27^\circ\text{C}$

Densità degli atomi del reticollo cristallino di silicio = $10^{23} \frac{\text{atomi}}{\text{cm}^3}$

↳ è estremamente più grande di n_i che è però sufficiente a cominciare completamente il comportamento elettrico del dispositivo.

Per poter spiegare le presenze di lacune ed elettroni bisogna utilizzare l'equazione $p = n$ cioè non bisogna utilizzare il silicio puro.

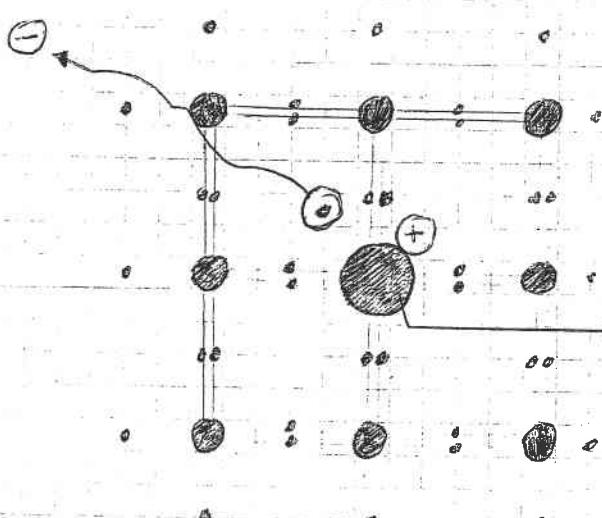
MATERIALI ESTRINSECI

Atomi Donatori (5 colonne P)

Si introduce nel reticollo cristallino di silicio una piccola quantità di atomi della 5^a colonna P della tavola periodica degli elementi (FOSFORO).

↳ Questi atomi hanno 5 elettroni di valenza.

↳ le piccole quantità non influenzano la struttura del reticollo.



L'atomo di Fosforo è un atomo donatore e non forma una lega covalente in quanto la propria carica è anomala: il numero di atomi inseriti deve essere tellemente piccolo da non perturbare alle strutture reticolari.

atomo di Fosforo → quattro elettroni di valenza formano un legame covalente col Silicio.

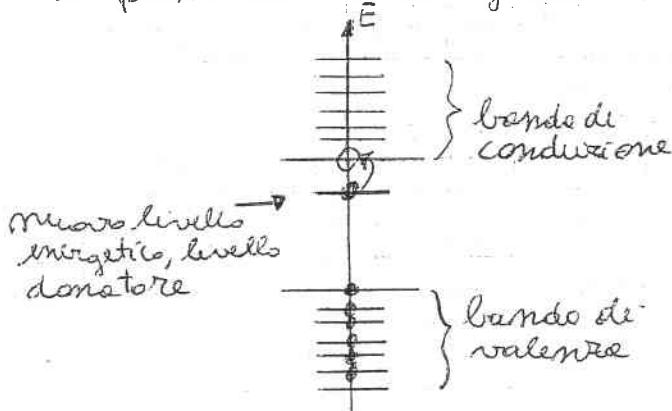
↳ il quinto elettrone non forma legami, è debolmente legato al nucleo e si allontana da esso non con una lacuna (= portatore negativo in un legame covalente).

Il nucleo e la carica negativa (che si allontanerà) è un protone del nucleo, è una carica fissa ⇒ il fosforo ti ionizza positivamente.

↳ la carica positiva non può spostarsi, come faceva la lacuna, in quanto nessun legame covalente ha un "buco".

↳ si genera un elettrone ma non una lacuna.

Del punto di vista energetico le strutture e bande cambiano: l'atomo di Fosforo introduce dei nuovi livelli caratteristici della sua natura.



- ↳ le bande presenti per il Silicio cambiano grazie alla introduzione di qualche molecola di Fosforo che raggiungono qualche livello energetico in prossimità delle bande di conduzione.
- ↳ l'elettrone che occupa il nuovo livello può facilmente "saltare" nelle bande di conduzione senza creare una lacuna nelle bande di valenza.

Il Fosforo è un atomo donatore perché "regala" un elettrone libero senza modificare la struttura.

$$N_D = \text{concentrazione di atomi donatore} = \frac{\text{n° di atomi donatore}}{\text{cm}^3}$$

Siccome la struttura del cristallo deve essere quella del Silicio $N_D <$ densità degli atomi del reticolato cristallino di Silicio e, siccome il n° di elettroni è spontaneamente N_i allora

$$10^{10} < N_D < 10^{20} \quad (\text{quando } N_D = 10^{20} \text{ non riesce a modificare la struttura del Silicio})$$

Siccome l'energia utile per far saltare l'elettrone dal livello donatore alle bande di conduzione è molto piccola alla temperatura ambiente tutte gli elettronni di quel livello sono già nelle bande di conduzione quindi $N_D \approx N_i$ (cioè ogni atomo donatore cede un elettrone, operazione quasi istante)

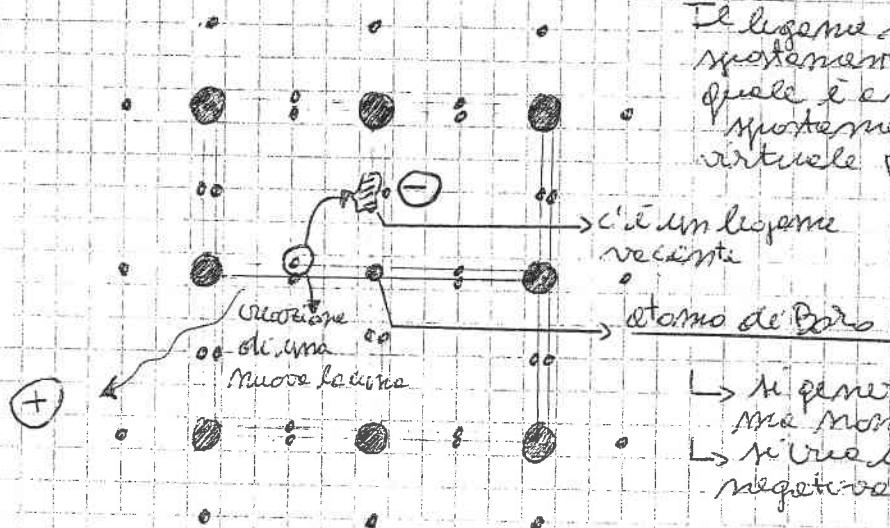
$N_D \approx n > P$ con atomi donatori (5^a colonna p)

• Atomi Accettori (3^a colonna p)

Se si introduce nel reticollo cristallino di silicio una piccola quantità di atomi della 3^a colonna p della tavola periodica degli elementi (Boro)

→ Questi atomi hanno 3 elettroni da valenza

→ La piccola quantità non influenza la struttura del reticolo



Il legame recente comporta lo spostamento di un elettrone al quale è affidato ad una spettacolare carica virtuale positiva

c'è un legame recente
Atomo di Boro

→ Si genera una lacuna
ma non un elettrone mobile.
→ Si crea una carica fissa (D)
negativa (ione di Boro negativo)

Dal punto di vista energetico il Boro introduce un nuovo livello energetico (livello accettore) vicino alla banda di valenza.

→ Questo livello è stato lasciato ad una posizione cioè gli elettroni nel nuovo livello non si spostano.

→ Questo nuovo livello "attira" facilmente un elettrone a spese di uno piccolo energie.

(+) → livello accettore \rightarrow la popolazione di lacune è maggiore

$$N_A = \text{concentrazione di atomi accettore} = \frac{\text{no atomi accettore}}{\text{cm}^3}$$

$$10^{10} < N_A < 10^{20}$$

$$N_A \approx P > M \quad \text{con atomi accettore: (3^a colonna p)}$$

• Per un materiale intrinseco (solo silicio puro)

↳ ci sono solo le coppie elettrone - lacuna

$$P = M = m_i \quad e \quad P \cdot M = m_i^2 \quad N_D = N_A = 0$$

• Per un materiale extrinseco (dopato con atomi accettori o donatori)

$$P \neq m \neq m_i \quad e \quad P \cdot M = m_i^2$$

↳ Densità di carica \Rightarrow è dovuta da → un elettrone libero $m \cdot (-q)$

↳ una lacuna $P \cdot q$

↳ atomi donatori

ionizzati parzialmente $N_D = q$
perché hanno ceduto

un elettrone

ionizzati completamente
a temperatura ambiente

negativamente

$N_A = (-q)$

carica
fissa

carica
fissa

carica
mobile

carica
mobile

$$P = N_D \cdot q - N_A \cdot q - M \cdot q + P \cdot q$$

carica fissa carica mobile

↳ solo la carica mobile può produrre corrente

↳ In condizione di equilibrio sia per materiali intrinseci che extrinseci

$$P \cdot M = m_i^2$$

→ concentrazione intrinseca di portatori

↳ n^2 di elettroni per cm^{-3}

↳ n^2 di lacune per cm^{-3}

• Prova di dimostrazione di $P \cdot M = m_i^2$

In condizione di equilibrio, stazionario $G = R$

↳ in questo modo il n^2 di elettroni e di lacune non varia nel tempo

↳ tasso di ricombinazione

zione

↳ tasso di generazione

G è funzione della temperatura $G = \alpha(T)$

R è funzione sia delle temperature sia del numero di elettroni e di lacune (più elettroni liberi sono presenti e più è alta la probabilità che trovino una lacuna)

$$R = \beta(T) \cdot n \cdot p$$

$$G = \alpha(T) = \beta(T) \cdot n \cdot p = R \quad \leftarrow \text{questa equazione è indipendente dal dopaggio del materiale}$$

$$m \cdot p = \frac{d(T)}{\beta(T)} = \gamma(T) = m_i^2$$

In condizione di equilibrio ed a una temperatura fixata $\gamma(T)$ è una costante indipendente da N_D e N_A e siccome per $N_D = N_A$ $m \cdot p = m_i^2$ allora $\gamma(T)$ è uguale a m_i^2 in quanto non varia al variare del drogaggio.

↳ Se come $m \cdot p = m_i^2 = \text{cost}$ in condizione stazionaria aumentando la concentrazione di elettroni $n \uparrow\uparrow$; $p \uparrow\uparrow$ la concentrazione di elettroni $m \uparrow\uparrow$; $p \uparrow\uparrow$ la carica cala.

in questo $m = \frac{m_i^2}{p}$

• Calcolo di $m(N_D, N_A)$ all'equilibrio se N_D e N_A costanti

• N_D e N_A non sono variabili nello spazio

• A livello globale la carica è nulla \rightarrow siccome il materiale è uniforme la carica totale è nulla $\Rightarrow p = 0$

$$\left\{ \begin{array}{l} p = q(N_D - N_A - m + p) = 0 \\ p = \frac{m_i^2}{m} \end{array} \right.$$

$$\rightarrow \text{perché } n \text{ è all'equilibrio}$$

$$N_D - N_A + \frac{m_i^2}{m} - m = 0 ; \quad m(N_D - N_A) + m_i^2 - m^2 = 0$$

$$m^2 - m(N_D - N_A) - m_i^2 = 0 \quad m = \frac{N_D - N_A}{2} \pm \sqrt{\frac{(N_D - N_A)^2}{4} + m_i^2}$$

da trascurare perché $m > 0$ per definizione.

$$m = \frac{N_D - N_A}{2} + \sqrt{\frac{(N_D - N_A)^2}{4} + m_i^2}$$

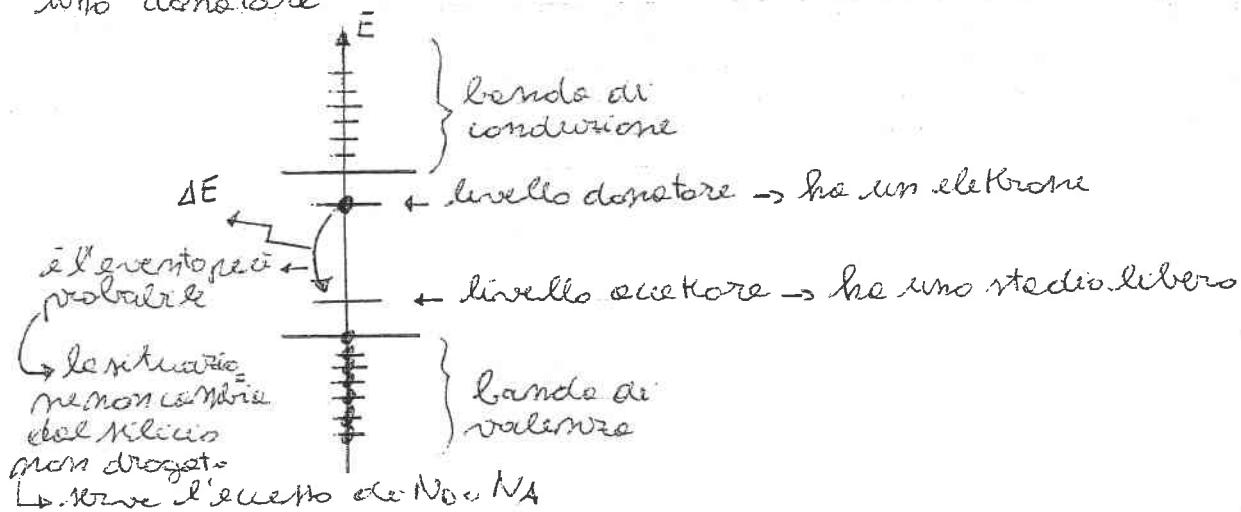
$$p = \frac{N_D - N_A}{2} + \sqrt{\frac{(N_D - N_A)^2}{4} + m_i^2}$$

È importante la differenza tra N_D e N_A e non i loro valori.

↳ princípio di compensazione

↳ bisogna tenere entro certi limiti (non bisogna alterare la struttura cristallina del silicio)

Dal punto di vista energetico se c'è un atomo elettrone e uno donatore



→ questo è utile per realizzare zone diversamente drogati: prima si droga con un tipo di atomo tutto il materiale e dove serve si aggiunge l'altro atomo drogante

• con $N_D = N_A$ allora $m = p = m_i$

$$\bullet \text{con } N_D \gg N_A \text{ e } N_D \gg m_i \quad m = \frac{N_D - N_A}{2} + \sqrt{\left(\frac{N_D - N_A}{2}\right)^2 + m_i^2} \quad m \approx N_D$$

$$\bullet \text{con } N_A \gg N_D \text{ e } N_A \gg m_i \quad p = \frac{N_A - N_D}{2} + \sqrt{\left(\frac{N_A - N_D}{2}\right)^2 + m_i^2} \approx N_A$$

⇒ Esempio numerico

$$\begin{cases} N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3} \\ N_A = 0 \\ m_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3} \end{cases} \quad \begin{cases} m = 10^{15} \text{ cm}^{-3} \\ p = \frac{m^2}{N_D} = 10^5 \text{ cm}^{-3} \end{cases}$$

gli atomi donatori incrementano la popolazione di elettroni e decrementano la popolazione di lacune.

MATERIALI ESTINSESSI DI TIPO N

→ Il nucleo è drogato con atomi donatori con concentrazione superiore a quella degli atomi elettrone

→ predominano gli elettroni rispetto alle lacune

$$(N_D \text{ de } 10^{14} \text{ a } 10^{20} \text{ cm}^{-3})$$

$$N_D \gg N_A, m_i$$

$$m \approx N_D \quad p = \frac{m^2}{N_D}$$



MATERIALI ESTINSESSI DI TIPO P

→ Il nucleo è drogato con atomi elettrone con concentrazione superiore a quella degli atomi donatori

→ predominano le lacune rispetto agli elettroni

$$N_A \gg N_D, m_i$$

$$p \approx N_A \quad m = \frac{m^2}{N_A}$$

EFFETTO DI UN CAMPO ELETTRICO SU UN SEMICONDUTTORE

$$\begin{array}{c} \vec{E} \\ \bullet \\ -q \end{array}$$

Il campo elettrico esercita una forza sulla carica elettrica pari a

$$\vec{F} = -q \cdot \vec{E} \quad (\text{Forza Coulombiana})$$

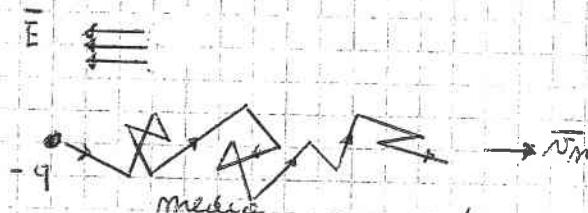
$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad \text{con } m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

$$-q \cdot \vec{E} = m \cdot \vec{a} \Rightarrow \vec{a} = -\frac{q}{m} \cdot \vec{E}$$

Se il campo elettrico è uniforme il moto è uniformemente accelerato (accade solo nel vuoto come nel tubo catodico delle televisioni).

L'elettrone all'interno di un materiale interagisce con gli altri atomi (forze attrattive del nucleo e forze repulsive degli altri elettroni).

Il moto dell'elettrone all'interno di un materiale sotto l'effetto di un campo elettrico esterno è



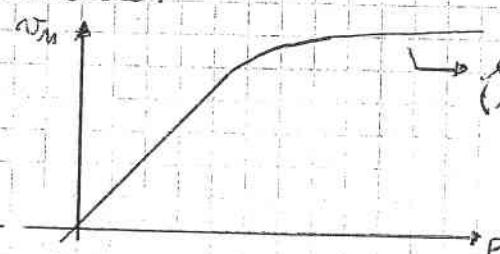
Dove la velocità è costante ($v_m = \text{cost}$) e dipende dal campo elettrico.

↳ la velocità media si raggiunge quando si instaura un equilibrio tra le forze coulombiane e la reazione del moto (come il paracadutista che cammina su un aereo rende la velocità costante quando la forza di gravità è bilanciata dalla reazione dell'aria)

$$\bar{v}_m = -\mu_m E \quad \mu_m = \text{mobilità degli elettroni}$$

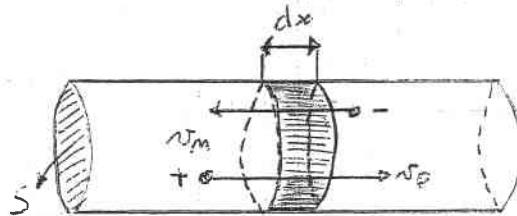
↳ costante caratteristica del materiale
↳ dipende dalla concentrazione dei dopanti (più sono gli atomi dopanti e più è difficile lo spostamento e quindi più è piccolo) e dalla temperatura (maggiore è la vibrazione per effetto termico delle particelle maggiore è la probabilità di moto e quindi minore è la mobilità)

Per approssimazione μ_m è una costante solo entro certi limiti del campo elettrico.



↳ la curva tende a rettangolare (retta parallela alla velocità)

- Calcolo della densità di corrente in un materiale uniforme soggetto ad un campo elettrico uniforme



Materiale uniforme

$\rightarrow E$ (campo elettrico uniforme)

caso monodimensionale (nessun simbolo di vettore)

$$J = \frac{I}{S} \quad I = \frac{dQ}{dt}$$

se $n_m \gg p$

$$dQ = -qn_m dV$$

$$dx = n_m dt$$

$$dV = S dx$$

$$n_m = -\mu_m E$$

$$J_m = \frac{-q n_m S dx}{dt \cdot S} = \frac{-q n_m}{-\mu_m}$$

$$J_m = q n_m \mu_m E$$

se $n_m \ll p$

$$dQ = q \cdot p \cdot dV \quad (\text{questo è valido perché solo la carica mobile può provocare una corrente})$$

$$dx = n_p \cdot dt$$

$$dV = S dx$$

$$n_p = \mu_p \cdot E$$

$$J_p = \frac{q p S dx}{dt \cdot S} = q p n_p$$

$$J_p = q \cdot p \cdot \mu_p \cdot E$$

Un semiconduttore segue la legge di ohm ($J = \sigma \cdot E$)

\hookrightarrow la conducibilità dipende dal droggaggio

μ_p è un nome diverso μ_p è 203 volte più piccola di μ_m

perché le lacune sono elettroni che si muovono in bandiera di valenza al contrario degli elettroni liberi che si muovono in banda di conduzione e quindi il moto delle lacune è più completo \rightarrow serve più tempo \rightarrow mobilità μ_p più piccola

Siccome la resistività è inversamente proporzionale al principio di sovrapposizione degli effetti e quindi

$$J = J_m + J_p = q(\mu_m \cdot n + \mu_p \cdot p) E$$

trasporto ohmico
in effetto del campo elettrico

Per materiali uniformemente drogati (n e p sono indipendenti dalla posizione) vale la legge di ohm con le possibilità di variare la conducibilità σ \rightarrow si possono avere delle reazioni

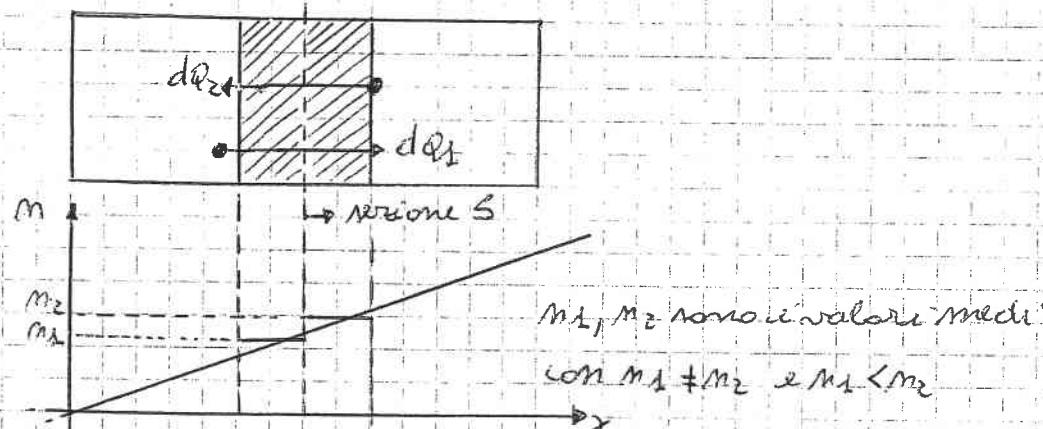
conduttrive e zone isolanti nello stesso materiale

→ è l'elemento di base per la creazione dei circuiti integrati (cioè nello stesso materiale si sono vari circuiti inseriti tra di loro e interconnessi opportunamente)

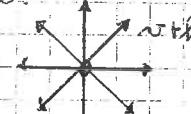
Calcolo delle densità di corrente in un materiale non uniforme non soggetto ad un campo elettrico

Se considero un materiale semiconduttore in cui lo concentrazione degli elettroni dipende dalle coordinate e non soggetto ad un campo elettrico (studio monodimensionale)

$$E = 0$$



Gli elettroni mediamente occupano una posizione fra n_1, n_2
e livellano il croce punto M misurando per effetto delle temperature
→ scorrano con una velocità v_{th} che dipende dalle temperature
→ quando equiprobabile ciascuno avanza mediamente
l'elettrone è fermo.



→ nel caso monodimensionale

$$v_{th} \quad v_{th} \quad v_{th}$$

$$J_m = \frac{I_m}{S}$$

$$I_m = \frac{dQ_m}{dt}$$

dQ_1 e dQ_2 sono i contributi di carica che attraversano la sezione S in un tempo dt con due direzioni diverse

$$dQ_m = dQ_1 - dQ_2 \quad (\text{se si considera ponendo la corrente che segue l'asse } x)$$

→ sono le cariche che attraversano la sezione S nell'arco di tempo dt

Sono le metà delle cariche contenute nel volume dV che stanno

rispettivamente a sinistra e a destra della sezione S
→ le metà perché il moto delle cariche è aleatorio e metà delle cariche avanza in una direzione e metà nell'altra

$$\left. \begin{array}{l} dQ_1 = \frac{q}{2} (-q) m_1 dV \\ dQ_2 = \frac{q}{2} (-q) m_2 dV \end{array} \right\} \quad \left. \begin{array}{l} dQ_1 = -\frac{q}{2} m_1 S_{\text{with}} dt \\ dQ_2 = -\frac{q}{2} m_2 S_{\text{with}} dt \end{array} \right\}$$

$$\left. \begin{array}{l} dV = S dx \\ dx = v_{\text{th}} dt \end{array} \right\} \quad dV = S \cdot v_{\text{th}} \cdot dt$$



$$dQ_m = dQ_1 - dQ_2 = \frac{q}{2} (m_2 - m_1) S v_{\text{th}} dt$$

$$I_m = \frac{dQ_m}{dt} = \frac{q}{2} (m_2 - m_1) S v_{\text{th}}$$

$$J_m = \frac{q}{2} (m_2 - m_1) n_{\text{th}}$$

Fenomeno di diffusione termica

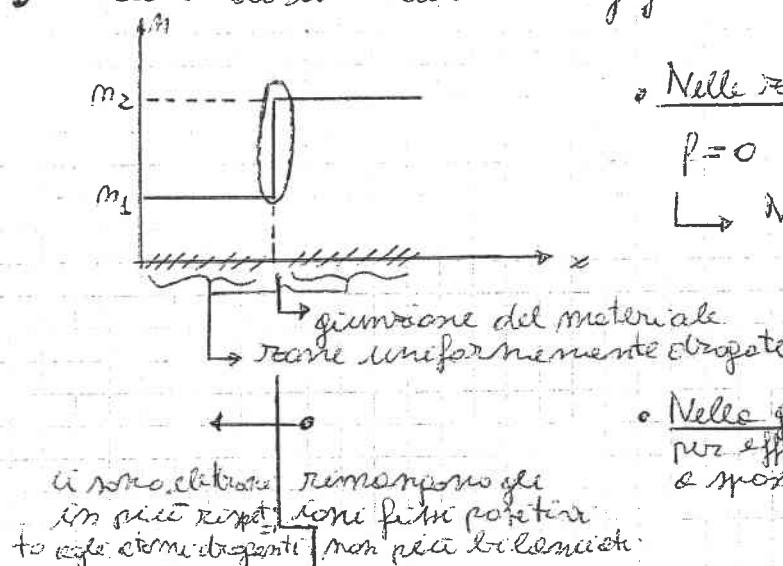


Siccome per ipotesi $m_2 \neq m_1$ allora $J_m \neq 0$

Lo stesso moto degli elettroni vuole di spostarsi dalla regione dove sono tanti e dove sono pochi in quanto con $m_2 > m_1$
 $J_m > 0$ e quindi la corrente va verso destra e di conseguenza le coriche verso sinistra

- la situazione è identica a quella di una goccia d'inchiostro immersa in un bicchiere d'acqua: la goccia diffondono.
 All'inizio l'inchiostro è concentrato in un unico punto e successivamente si estende e diffondono all'interno del liquido → diffusione termica (una goccia d'inchiostro su un cubo di ghiaccio non riesce a diffondersi)
- la situazione è identica anche a quella di una scatola con dentro delle sabbie ammuciate solo da un lato: quando si scatta la scatola (agitazione termica) le sabbie si distribuiscono in maniera uniforme
- la differenza con i due esempi è che il moto è dovuto a particelle careiche

- Studio di una diversa configurazione delle densità di elettroni



- Nelle zone uniformemente elargite

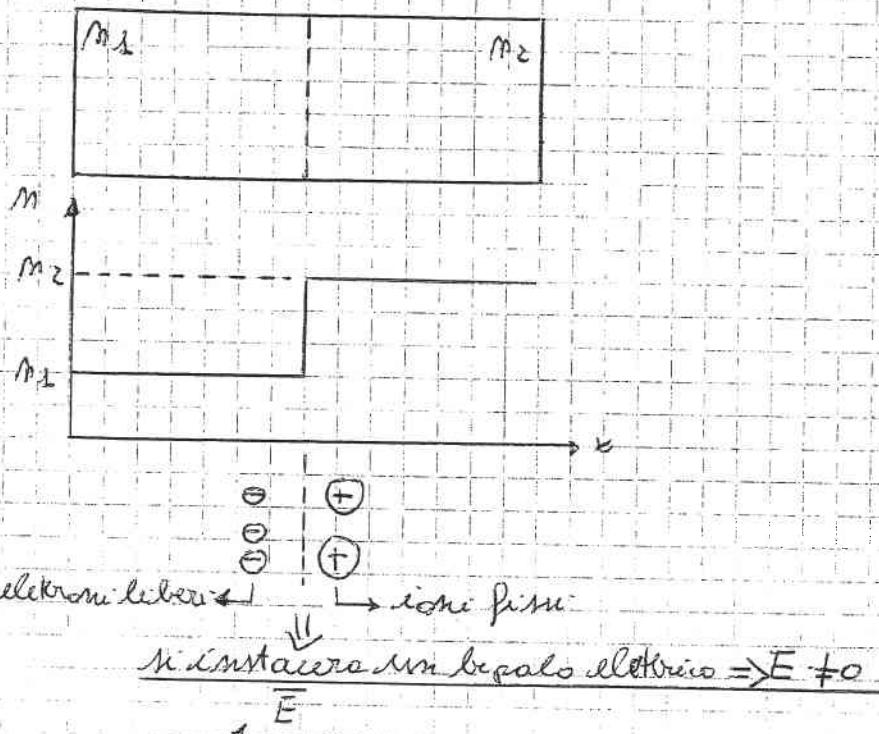
$$\rho = 0 \quad \text{dove } \rho = q (N_D + N_A + n)$$

$$\hookrightarrow N_D \approx n \quad \text{e} \quad N_A \approx \rho \approx 0$$

- Nelle giunzioni gli elettroni per effetto della diffusione tensano e ritornano verso sinistra

$$\rho \neq 0$$

Vicino alle giunzione gli elettroni tendono ad andare nelle Zone in cui ci sono meno atomi donatori per diffusione (eccesso di carica negativa) lasciando gli atomi donatori che creano trivieti degli elettroni che si spostano (eccesso di carica positiva)



- Il campo elettrico non è indotto dall'esterno ma è intrinseco legato alla diversa distribuzione degli atomi donatore.
- Il campo elettrico intrasce una forza Coulombiana sugli

$$\vec{F}$$

elettroni (è come se l'elettrone si legge all'atomo donatore da un elettrico e se si allontana il campo elettrico lo riporta indietro).

Campo built-in (incorporato) \Rightarrow è il campo elettrico che si instaura per effetto della diffusione

Quando le due differenze fondamentali: tra semiconduttore e conduttore sono:

- ① In un semiconduttore ci sono due specie di carica (elettrone e lacuna) in quanto gli elettroni si possono muovere in due bande diverse (conduzione e valenza)
- ② In un conduttore la carica si muove per effetto del campo elettrico in un semiconduttore la carica si muove sia per effetto di un campo elettrico sia per effetto di diffusione (i due effetti interagiscono tra loro perché la diffusione genera un campo elettrico)

Densità di corrente dovuta delle differenze

$$J_{m, \text{diff}} = q \cdot D_m \cdot \frac{dm}{dx}$$

D_m = coefficiente di diffusione per gli elettroni

↳ dipende dalle temperature
In questo la diffusione è più intensa più aumenta le temperature

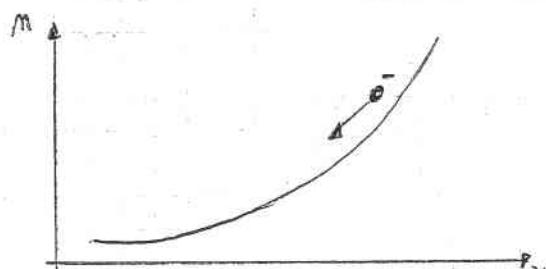
Prima relazione di Einstein

$$D_m = \frac{kT}{q} \cdot \mu_m$$

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K} \text{ (costante di Boltzmann)}$$

$\& T = 300 \text{ K}$

$$D_m = V_T \cdot \mu_m \text{ con } V_T = 26,1 \text{ mV}$$



gli elettroni tendono a spostarsi a sinistra
Lo contributo verso l'area di corrente

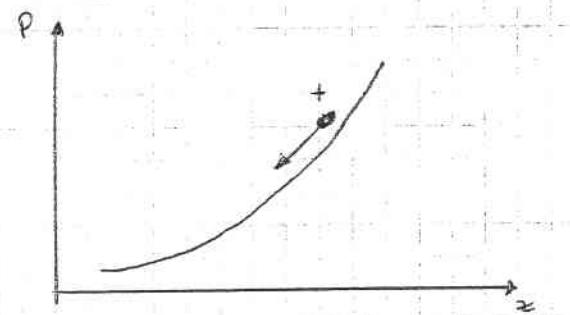
$$J_{p, \text{diff}} = -q D_p \frac{dp}{dx}$$

D_p = coefficiente di diffusione per le lacune

(c'è il legno messo perché le lacune con carica positiva si muovono nella direzione opposta alle convezioni della corrente)

Seconda relazione di Einstein

$$D_p = \frac{kT}{q} \mu_p$$



le lacune tendono a spostarsi a sinistra
↳ contributo di corrente in direzione opposta all'area di



MODELLO DRIFT - DIFFUSION

Per un materiale non uniforme non vale la legge di Ohm perché c'è sia un effetto del campo elettrico sia un effetto diffusivo
Si ha

$$\bar{J} = J_m + J_p$$

$$J_m = q \mu_m \cdot n E + q D_m \frac{dn}{dx}$$

$$J_p = q \mu_p \cdot p E - q D_p \frac{dp}{dx}$$

→ trasporto di tipo
chimico-diffusivo

↓ ↓
effetto chimico effetto diffusivo

→ è un modello semplificato utile a trattare i circuiti digitali.

→ Nell'ione ci sono due portatori con caratteristiche diverse e due tipi di trasporto di carica si possono considerare componenti non lineari.

Strumenti per l'analisi da semiconduttore:

$$E = - \frac{d\phi}{dx} \quad e \frac{dE}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (\text{equazione di Poisson})$$

In 3 dimensioni

$$\bar{J}_m = q \mu_m \cdot n \bar{E} + q D_m \operatorname{grad} n$$

$$\bar{J}_p = q \mu_p \cdot p \bar{E} - q D_p \operatorname{grad} p$$

$$\bar{E} = - \operatorname{grad} \phi$$

$$\operatorname{div} \bar{E} = \frac{\rho}{\epsilon}$$

In una dimensione (Riassunto equazioni)

$$\bar{J} = J_m + J_p \quad ; \quad J_m = q \mu_m n E + q D_m \frac{dn}{dx} \quad ; \quad J_p = q \mu_p p E - q D_p \frac{dp}{dx}$$

$$; \quad E = - \frac{d\phi}{dx} \quad ; \quad \frac{dE}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad ; \quad \rho = q (N_D - N_A + P - n)$$

$$D_m = \frac{kT}{q} \mu_m = V_T \mu_m$$

\hookrightarrow tensione termica

$$D_p = \frac{kT}{q} \mu_p = V_T \cdot \mu_p$$

$\approx 26 \text{ mV} @ 300^\circ K$

$\approx 26 \text{ mV} @ 300^\circ K$

STUDIO DI UN SEMICONDUTTORE DROGATO ALL'EQUILIBRIO

(Equilibrio = appunto di fonti di energia)

La concentrazione di n e di p dipende dello spazio x

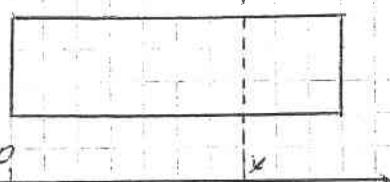
↳ Celido dell'andamento del potenziale

Siccome non ci sono fonti di energia, la corrente è nulla in quanto una corrente dissipata energia (effetto Joule) che nessuno droga $\Rightarrow J = 0$

$\rightarrow J = J_n + J_p \rightarrow$ siccome c'è equilibrio non si può avere $J_n = -J_p \neq 0$ perché non ci sono fonti di energia. Ormai si avrà l'eq. di Fornari

$$\hookrightarrow 0 = J_n = q \mu_n m E + q D_n \frac{dn}{dx} = q \mu_p \cdot p \cdot E - q D_p \frac{dp}{dx} = J_p = 0$$

Siccome il potenziale è definito a meno di una costante si può scegliere un punto di riferimento in cui vale 0



Sot. D_n, E

$$\rightarrow q \mu_n m \left(-\frac{d\phi}{dx} \right) + q \frac{kT}{q} \mu_p \frac{dp}{dx} = 0$$

$$m \frac{d\phi}{dx} = \frac{kT}{q} \frac{q \mu_n}{m} \left(-m \frac{d\phi}{dx} + \frac{kT}{q} \frac{dm}{dx} \right) = 0$$

$$\text{dividi tutto per } m \int_0^x \frac{d\phi}{dx} dx = \int_0^x \frac{1}{m} \frac{dm}{dx} dx$$

$$\frac{q}{kT} \int_{\phi(0)}^{\phi(x)} d\phi = \int_{m(0)}^{m(x)} \frac{1}{m} dm$$

$$\frac{q}{kT} (\phi(x) - \phi(0)) = \log \left(\frac{m(x)}{m(0)} \right)$$

$$\rightarrow \phi(x) = \frac{kT}{q} \log \left[\frac{m(x)}{m(0)} \right] \quad \text{oppure}$$

se $m(x) = f(N)$
allora c'è
una $\phi(x)$
che varia sul
di potenziali

$$\rightarrow m(x) = m(0) \cdot e^{\frac{q\phi(x)}{kT}}$$

(Dove $m(0)$ non è la concentrazione
alle coordinate 0 ma al punto
in cui arbitrariamente si pone
il potenziale a 0)



$$q \mu_p \cdot p \left(-\frac{d\phi}{dx} \right) - q \frac{kT}{q} \mu_p \frac{dp}{dx} = 0$$

$$q \mu_p \left(-p \frac{d\phi}{dx} - \frac{kT}{q} \frac{dp}{dx} \right) = 0$$

comincia solo questo segno, quindi

$$\phi(x) = -\frac{kT}{q} \ln \left(\frac{p(x)}{P(0)} \right)$$

$$- \frac{q\phi(x)}{kT}$$

$$p(x) = P(0) \cdot e^{-\frac{q\phi(x)}{kT}}$$

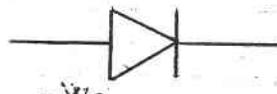
$$p(x) \cdot m(x) = m(0) \cdot e^{\frac{q\phi(x)}{kT}} \cdot P(0) \cdot e^{-\frac{q\phi(x)}{kT}}$$

$$p(x) \cdot m(x) = P(0) \cdot m(0) = \text{cost}$$

all'equilibrio



STUDIO DELLA GIUNZIONE PN, DIODO, ALL'EQUILIBRIO



V_m



Le giunzione è nello stesso cristallo di materiale semiconduttore drogato in modo relativamente in modo da avere una breve variazione di droganti.

N_A

N_D . Non è necessario che N_A sia uguale a N_D .

P

TUNA NEUTRA
di TIPO P

$q N_D$

1° grafico

$-q N_A$

P, N

$P=N_A$

$$m = \frac{m_i^2}{N_A}$$

$$M = N_D$$

2° grafico

retta

E

parabola

$$m = \frac{q N_A}{\epsilon_0 r}$$

3° grafico

ψ_B

4° grafico

Lo studio delle grandezze fondamentali ha come punti di partenza

- ① l'equilibrio cioè corrente nulla \Rightarrow campo esterno nullo
- ② la distribuzione dei droganti o gredini

HQ: le considerazioni nelle regioni uniformi sono valide e grande distanza dalla giunzione \rightarrow gli effetti perturbativi, prodotti dalle piccole variazioni di atomi droganti, sono trascurabili a grande distanza (in quanto l'effetto diffusivo è contenuto nella curvatura di un campo elettrico intrinseco)

\hookrightarrow esistono due coordinate che delimitano le zone nelle quali sono trascurabili gli effetti di perturbazione della giunzione

W_m = margine delle regioni perturbate nelle zone m

- W_p = margine delle regioni perturbate nelle zone p

\hookrightarrow ipotesi da verificare (la verifica consiste nel valutare se le dimensioni di W_m e W_p sono $W = W_{\text{BH}}$ molto più piccole delle dimensioni di un diodo)

$x < -W_p$

La zona è per ipotesi uniformemente drogata

\hookrightarrow Siccome c'è equilibrio e uniformità, lo carico è bilanciato in ogni punto e quindi $f = 0$ (1° grafico)

\hookrightarrow Siccome $N_A \gg N_D \Rightarrow P \approx N_A$ e $M \approx \frac{m_e^2}{N_A}$ (2° grafico)

\hookrightarrow Siccome il semiconduttore è uniformemente drogato

$$\varphi_2 - \varphi_1 = - \frac{kT}{q} \log \left[\frac{P(x_2)}{P(x_1)} \right] \quad \text{e } P(x_2) = P(x_1) \quad \text{quindi}$$

$\varphi_2 - \varphi_1 = - \frac{kT}{q} \log(1) = 0 \rightarrow$ il potenziale che dipende dalla variazione della concentrazione è costante

Si neglie, in modo arbitrario, il potenziale delle zone drogata P nullo. Quindi

$$f = \text{cost} = 0 \quad (4^{\circ} \text{ grafico})$$

$\hookrightarrow P_{(0)} = N_A$ e $M_{(0)} = \frac{m_e^2}{N_A}$ (valori delle concentrazioni quando il potenziale è nullo)

$$E = - \frac{df}{dx} = 0 \quad (3^{\circ} \text{ grafico})$$

\hookrightarrow ZONA NEUTRA DI TIPO P



$x > x_m$

↪ si comporta come un materiale uniformemente drogato e quindi è neutro $p = 0$ (1° grafico)

↪ Si assume $N_D \gg N_A$ $n = N_D$ e $p = \frac{n_e^2}{N_D}$ (2° grafico)

$$\hookrightarrow \varphi(x) = \frac{kT}{q} \log \left[\frac{n(x)}{n_{(0)}} \right] = \frac{kT}{q} \log \left(\frac{N_D}{n_e^2} \right) = \frac{kT}{q} \log \frac{N_D N_A}{n_e^2} = \text{cost}$$

Il potenziale è costante infatti la concentrazione di elettroni è costante.

si assume $\begin{cases} N_D > n_e \\ N_A > n_e \end{cases} \Rightarrow \frac{N_D N_A}{n_e^2} \gg 1 \rightarrow$ il logaritmo è positivo e un numero pura ma varia poco se varia di N_D e N_A .

$$\frac{kT}{q} = V_T = 26 \text{ mV} \quad (\text{tensione termica})$$

$$\boxed{\varphi(x) = \frac{kT}{q} \log \frac{N_D N_A}{n_e^2} = 0,5 \leftrightarrow 0,7 \quad (4^{\circ} \text{ grafico})}$$

$$\varphi(x) = \varphi_B \quad \text{barriera di potenziale}$$

$$E = -\frac{d\varphi}{dx} = 0 \quad (3^{\circ} \text{ grafico})$$

↪ ZONA NEUTRA DI TIPO A

$-W_p \leq x \leq x_m$

ZONA PERTURBATA

✗ Il potenziale varia da 0 a φ_B

$$P(x) = P_{(0)} e^{-\frac{q\varphi(x)}{kT}} \quad \text{essendo } \varphi(x) \text{ inizia ad aumentare}$$

$$\frac{\varphi(x)}{kT} \approx \frac{\varphi(x)}{26 \text{ mV}} \rightarrow \text{diventa significativamente meglio che uno quando } \varphi(x) = \varphi_B$$

↪ basta che $\varphi(x)$ sia di poco superiore a 100 mV (pari a quasi $4 V_T$) che l'esponente diventa negativo.

↪ essendo x entro nella zona perturbata il potenziale inizia a salire e $P(x)$ diminuisce rapidamente portandosi a 0

$$\underline{P(x) \ll P_{(0)}} \quad (2^{\circ} \text{ grafico})$$

$$m(x) = m_{(0)} e^{\frac{q\varphi(x)}{kT}}$$

nella zona neutra ($n = N_D$)

$$\frac{m(x)}{N_D} = \frac{e^{\frac{q\varphi(x)}{kT}}}{e^{\frac{q\varphi_0}{kT}}} \rightarrow m(x) = N_D e^{\frac{q(\varphi(x) - \varphi_0)}{kT}}$$

Nelle zone perturbate $\varphi(x) < \varphi_B$ e l'esponente è minore di 0
 $\hookrightarrow m(x) \ll N_D \rightarrow$ la concentrazione cala rapidamente fino a 0.
 \Rightarrow nella regione neutra ogni portatore mobile compensa una ion fissa
 \Rightarrow nelle zone perturbate nasce una regione SVUOTATA
 \hookrightarrow cioè non ci sono più portatori mobili.
 Lo rimangono solo gli ioni fissi.

• $-W_P \leq x < 0$ ZONA PERTURBATA DI TIPO P

$$\text{De } p = q(N_D - N_A + p - n)^D = -qN_A \quad (1^\circ \text{ grafico})$$

\hookrightarrow perché nelle zone P $N_A \gg N_D$
 \hookrightarrow la curva di transizione è rapida in quanto le variazioni sono esponenziali

\rightarrow calcolo del campo elettrico

$$\text{de } \frac{dE}{dx} = \frac{p}{\epsilon_s} = -\frac{qN_A}{\epsilon_s} \rightarrow \text{costante dielettrica del silicio}$$

$$\int_{-W_P}^x \frac{dE}{dx} dx = \int_{-W_P}^x -\frac{qN_A}{\epsilon_s} dx = \begin{cases} \text{verso} \\ \text{verso} \end{cases} \int_{E(-W_P)}^{E(x)} dE \Rightarrow E(x) - E(-W_P) = -\frac{qN_A}{\epsilon_s}(x + W_P)$$

Secondo $E(-W_P) = 0$ allora

$$E(x) = -\frac{qN_A}{\epsilon_s}(x + W_P) \quad (3^\circ \text{ grafico}) \quad (\text{usata l'ipotesi di variazione lineare di } p(x))$$

$$\text{dove } E(0) = -\frac{qN_A}{\epsilon_s} W_P$$

$m_{\text{attiva}} \text{ dipende dal dragaggio}$

\rightarrow calcolo del potenziale

$$-\frac{d\varphi}{dx} = E(x) = -\frac{qN_A(x + W_P)}{\epsilon_s} \quad \text{quando risolvendo un eq. differenziale}$$

$$\int_{-w_p}^x \frac{d\varphi}{dx} dx = \int_{-\infty}^{\varphi(x)} d\varphi = \int_{-w_p}^x \frac{qN_A}{\epsilon_s} (x + w_p) dx$$

$$\varphi(x) - \varphi(-w_p) = \frac{qN_A}{\epsilon_s} \frac{(x + w_p)^2}{2} \quad \text{con } \varphi(-w_p) = 0 \text{ allora}$$

$$\underline{\underline{\varphi(x) = \frac{qN_A}{2\epsilon_s} (x + w_p)^2}} \quad (4^\circ \text{ grafico})$$

$0 \leq x \leq w_m$ ZONA PERTURBATA DI TIPO N

$$\text{Da } p = q(N_D - N_A + \rho \gamma_1) = qN_D \quad (1^\circ \text{ grafico})$$

perché le regioni sono in contatto
perché nelle zone N $N_D \gg N_A$

→ calcolo del campo elettrico

$$\text{Da } \frac{dE}{dx} = \frac{p}{\epsilon_s} = \frac{qN_D}{\epsilon_s}$$

$$\int_x^{w_m} \frac{dE}{dx} dx = \int_{E(x)}^{E(w_m)} dE = E(w_m) - E(x) = \frac{qN_D}{\epsilon_s} \int_x^{w_m} dx = \frac{qN_D}{\epsilon_s} (w_m - x)$$

Sapendo che $E(w_m) = 0$ allora

(3° grafico)

$$E(x) = \frac{qN_D}{\epsilon_s} (x - w_m) \rightarrow E(0) = -\frac{qN_D}{\epsilon_s} w_m \quad (\text{la pendente dipende dalla concentrazione } N_D)$$

→ calcolo del potenziale

$$-\frac{d\varphi}{dx} = \frac{qN_D}{\epsilon_s} (x - w_m)$$

$$-\int_x^{w_m} \frac{d\varphi}{dx} dx = -\int_{\varphi(x)}^{\varphi(w_m)} d\varphi = \int_x^{w_m} \frac{qN_D}{\epsilon_s} (x - w_m) dx = \frac{qN_D}{\epsilon_s} \left[-\frac{(x - w_m)^2}{2} \right]$$

$$\varphi(w_m) - \varphi(x) = \frac{qN_D}{\epsilon_s} \frac{(x - w_m)^2}{2} \quad \text{Sapendo che } \varphi(w_m) = \varphi_B$$

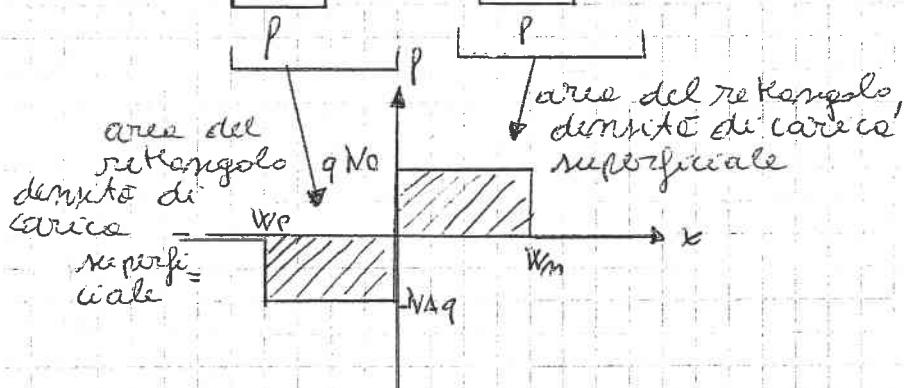
$$\underline{\underline{\varphi(x) = \varphi_B - \frac{qN_D}{\epsilon_s} \frac{(x - w_m)^2}{2}}} \quad (4^\circ \text{ grafico})$$

• Studio di W_p e W_m

Bisogna stimare i loro valori in quanto ha loro dimensione e alle base dell'ipotesi di partenza de cui si sono calcolati le caratteristiche del diodo e giunzione p-n.

$$E(0^-) = E(0^+) \text{ e quindi } + \frac{q N_A W_p}{\epsilon_s} = + \frac{q N_D W_m}{\epsilon_s}$$

$$S \cdot q N_A \cdot W_p = q N_D \cdot W_m \rightarrow \text{azione trasversale}$$



$$S \cdot q N_A \cdot W_p = S \cdot q N_D \cdot W_m$$

$$\downarrow \quad = \quad \downarrow$$

$$Q_p = Q_m$$

carica fine delle zone n
carica fine delle zone p

La carica fine nelle zone p è uguale ed opposta alle cariche fine nelle zone n \rightarrow è come un condensatore a parte che la carica non è superficialie ma distribuita su un volume.

$$N_A W_p = N_D W_m$$

$$\text{Da } E = - \frac{d\psi}{dx} \rightarrow \int_{-W_p}^{W_m} E(x) dx = \int_{-W_p}^{W_m} - \frac{d\psi}{dx} dx = -(\psi(W_m) - \psi(-W_p))$$

\downarrow
area del campo di tracce

$$\frac{(W_m + W_p) \cdot E(0)}{2} = -\psi_B \quad \text{con } E(0) = -\frac{q N_A W_p}{\epsilon_s} \text{ da cui}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_B = \frac{q N_A W_p}{2 \epsilon_s} (W_m + W_p) \\ \text{e da } N_A W_p = N_D W_m \end{array} \right.$$

$$W_m = \frac{N_A}{N_D} W_p$$

$$\psi_B = \frac{q N_A w_p^2}{2 \epsilon_s} \left(\frac{N_A}{N_D} + 1 \right) \text{ da cui } w_p = \sqrt{\frac{2 \epsilon_s \psi_B}{q N_A \left(1 + \frac{N_A}{N_D} \right)}}$$

$$w_p = \frac{1}{N_A} \sqrt{\frac{2 \epsilon_s \psi_B}{q \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)}} \quad w_m = \frac{1}{N_D} \sqrt{\frac{2 \epsilon_s \psi_B}{q \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)}}$$

$$\text{con } N_D = N_A = 10^{15} \text{ cm}^{-3} \quad \psi_B = 0,676 \text{ V}$$

$$m_i = 10^{-10} \text{ cm}^{-3}$$

$$\epsilon_s = 1,2 \cdot \epsilon_0 \quad \text{con } \epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}}$$

$$w_p = 0,606 \mu\text{m}, \quad w = w_m + w_p = 1,12 \mu\text{m}$$

\hookrightarrow ipotesi valida

$$w = w_p + w_m = \sqrt{\frac{2 \epsilon_s \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) \psi_B}{q}}$$

$$\psi_B = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_A N_D}{m_i^2} \right) \rightarrow \text{se varia } N_A \text{ e } N_D \text{ il logaritmo varia di poco quindi } \psi_B \approx \text{cost}$$

$N_A, N_D \uparrow \uparrow$ allora $w \downarrow$

$N_A, N_D \downarrow \downarrow$ allora $w \uparrow$ → le regioni sottute si estende di più dove la regione è meno sottuta

$$w_m = \frac{N_A}{N_D} w_p \quad \text{se } N_A > N_D \rightarrow w_m > w_p$$

$$\text{se } N_A < N_D \rightarrow w_p > w_m$$



ricorre la densità ($p = N_A q$ e $p = N_D q$) varia e può essere diverse → per avere le stesse cariche ($Q_p = Q_m$) bisogna avere dei volumi diversi

\hookrightarrow se aumenta la densità di carica il volume diminuisce

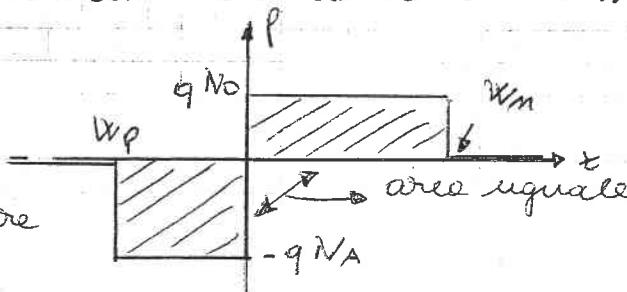
Esempio

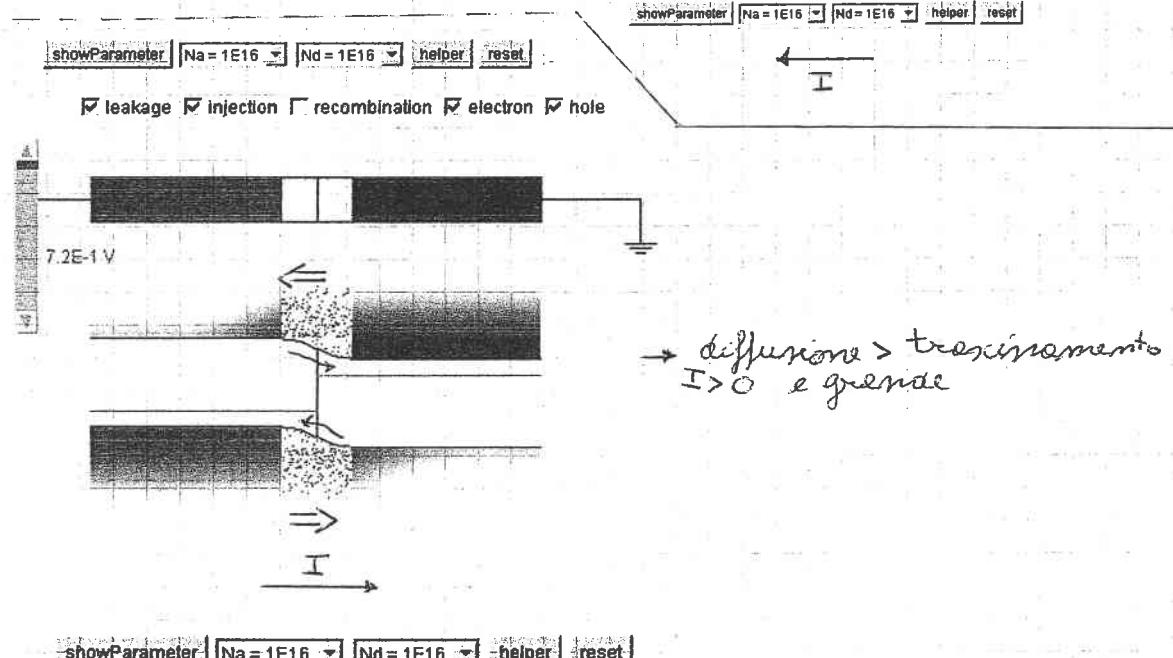
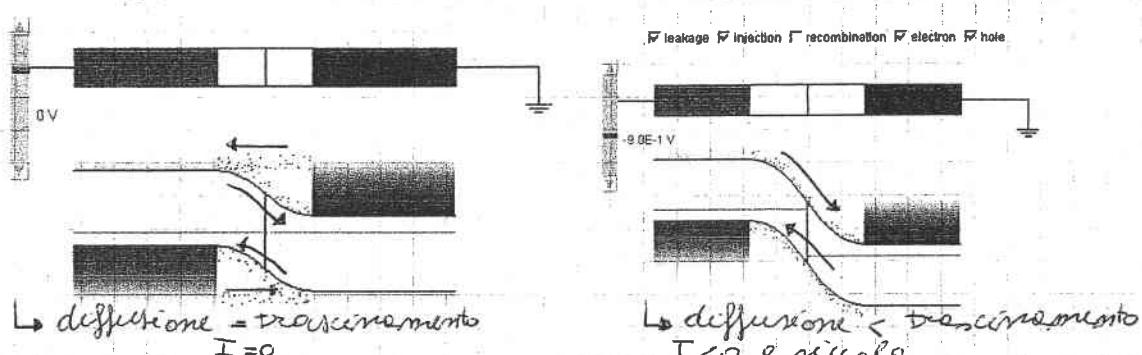
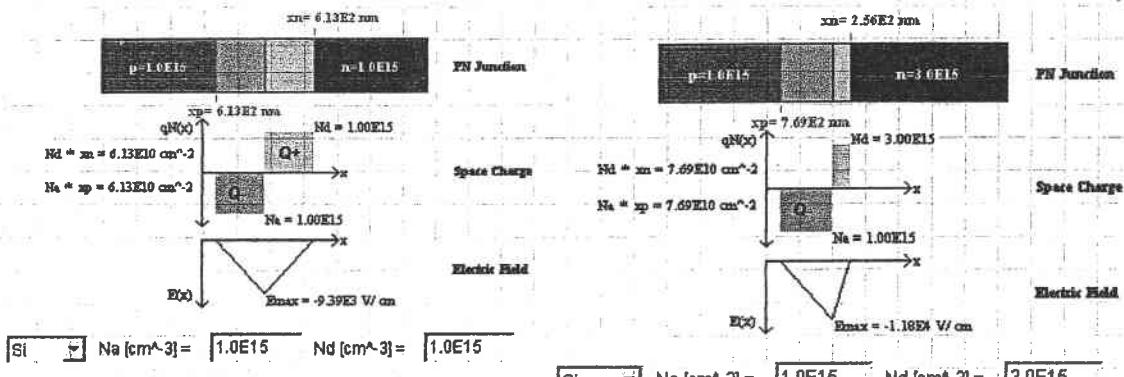
con $N_A > N_D$



$w_m > w_p$ per avere

$$Q_p = Q_m$$

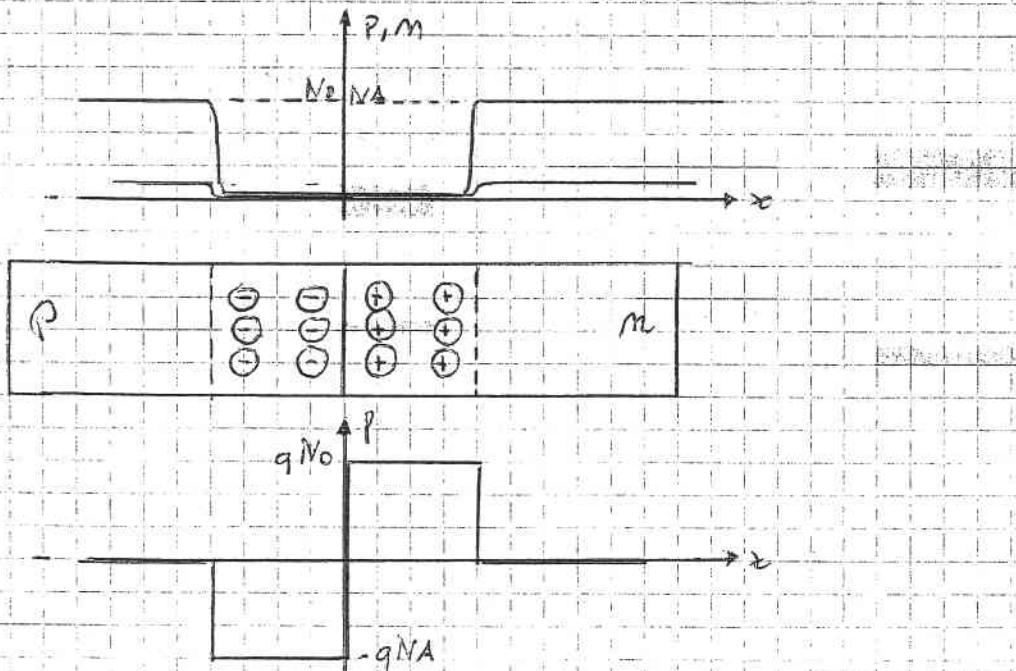




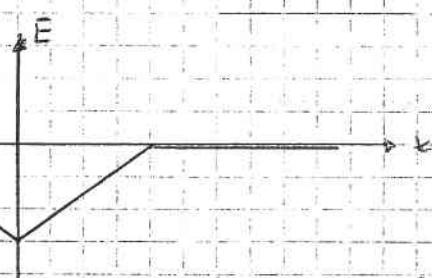
→ del sito <http://jas.eng.buffalo.edu/education/pn/performation2/performation2.html>

STUDIO DELLA GIUNZIONE PN NON ALL'EQUILIBRIO

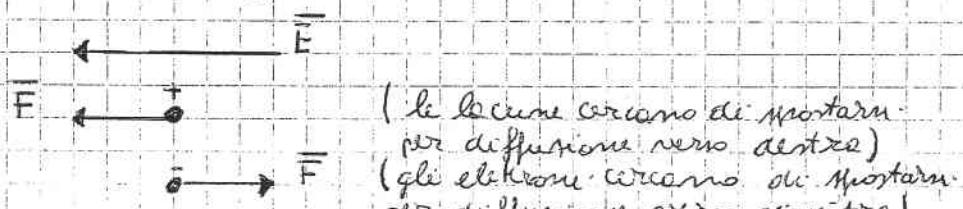
Quando c'è una discontinuità di atomi si sposta la carica mobile tende a spostarsi verso il lato della regione dove c'è maggiore concentrazione alle regioni in cui c'è una minore concentrazione. (sarebbe lungo le curve di concentrazione) \hookrightarrow separando la carica con la sorgente che lo ha "creato" si instaura un dipolo elettrico \rightarrow si crea un campo elettrico.



\hookrightarrow gli elettroni cercano di diffondersi (si spostano verso sinistra)
 \hookrightarrow creano dei vuoti positivamente fermi che non sono più compensati \rightarrow si instaura un dipolo di carica



\hookrightarrow il campo elettrico controlla la sorgente di diffusione degli elettroni e le carene. Siccome il campo è inverso alla sorgente di diffusione quale direzione?



\hookrightarrow Il potenziale serve a sostenere il campo elettrico antagonista

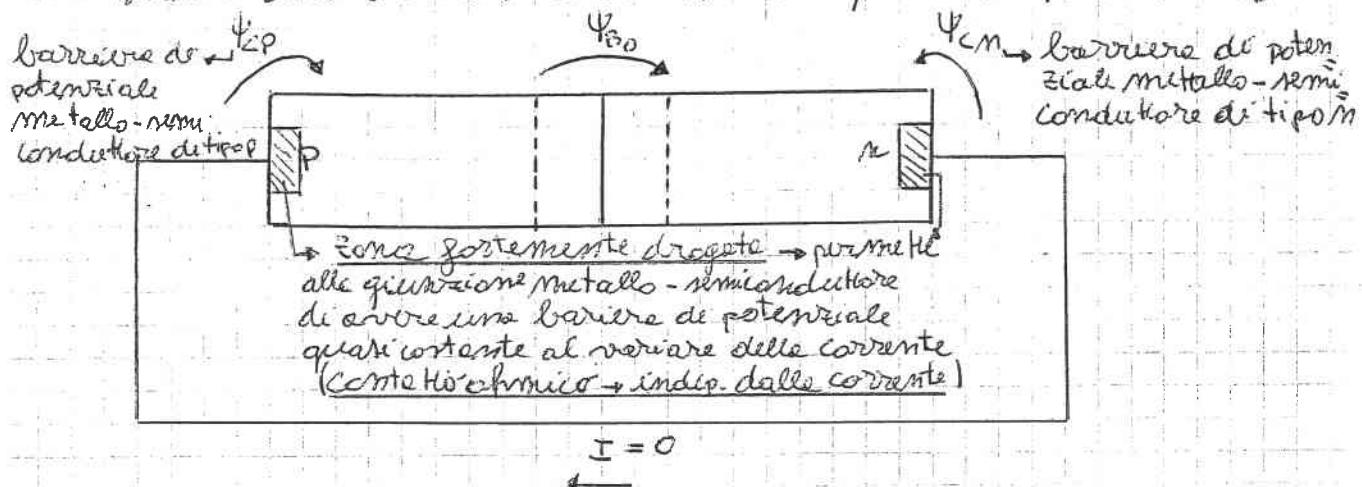
Si instaura un equilibrio in cui le componenti diffusione e bilanciata delle componenti chimiche generate dal campo elettrico intrinseco

↳ il potenziale di barriera Ψ_B frena la diffusione delle cariche

↳ nasce spontaneamente

↳ anche se tra le zone n e la zona p c'è una differenza di potenziale il diodo non si comporta come una batteria in quanto al suo interno non c'è nessuna reazione chimica che produce energia (come succede nella batteria)

Infatti se la giunzione pn, diodo, viene chiusa da un filo non si instaura una corrente in quanto il potenziale Ψ_B



viene bilanciato dai due potenziali di contatto metallo-semiconduttore se non realizzaranno

Tecnologicamente: potenziale di contatto approssimativamente costante → contatto chimico (quando il potenziale non dipende dalle correnti) → nel contatto chimico non vale la legge di ohm

$$\Psi_{B0} + \Psi_{CP} - \Psi_{CN} = 0 \rightarrow \text{non c'è corrente. (diodo cortocircuitato da un filo)}$$

potenziale necessario a frenare la diffusione.

$\leftarrow \rightarrow$ per diffusione

per trascinamento

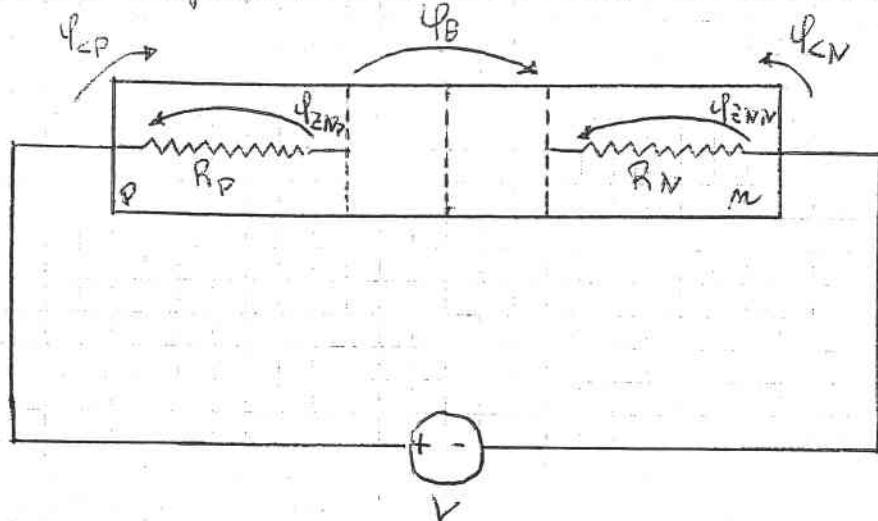
$\leftarrow \rightarrow$ per diffusione

$\leftarrow \rightarrow$ per trascinamento

All'equilibrio le due componenti (diffusione e trascinamento) sono eguali. \Rightarrow non c'è corrente

$$I = 0$$

Studio della giunzione p-n e ci si applica una tensione V



Saranno cercate una corrente, nella zona neutra (contornata dalla giunzione) uniformemente distribuita (solo le leggi di ohm)

$$J_m = \frac{q \mu_m n E}{L_m} \quad \text{e} \quad J_p = \frac{q \mu_p p E}{L_p} \quad \text{e quindi c'è una ceduta}$$

di tensione che dipende dalla lunghezza e larghezza delle due zone neutre.

$$\Psi_{ZNP} = I \cdot \frac{1}{L_p} \cdot \frac{\text{lunghezza}}{\text{Sezione}} \quad ; \quad \Psi_{ZNN} = I \cdot \frac{1}{L_n} \cdot \frac{\text{lunghezza}}{\text{Sezione}}$$

\downarrow
zona neutra p

$$R_p = \rho \frac{L}{S}$$

\downarrow
zona neutra n

$$R_n = \rho \frac{L}{S}$$

H_P : ① ϕ_{Cp} e ϕ_{Cn} sono contatti ohmici, indipendenti dalla corrente e quindi costanti.

② piccoli scostamenti dall'equilibrio $\Rightarrow \Psi_{ZNP}, \Psi_{ZNN} \ll \Psi_B$

- barriera di potenziale dell'giunzione met-nutre $\Psi_{Cp} - \Psi_{ZNP} + \Psi_B - \Psi_{ZPN} - \Psi_{Cn} + V = 0$

- barriera di potenziale della giunzione met-nutre, in cui $I = 0$ $\Psi_{Cp} + \Psi_{B0} - \Psi_{Cn} = 0 \rightarrow$ legge di diodi considerando il diodo cortocircuitato da un filo

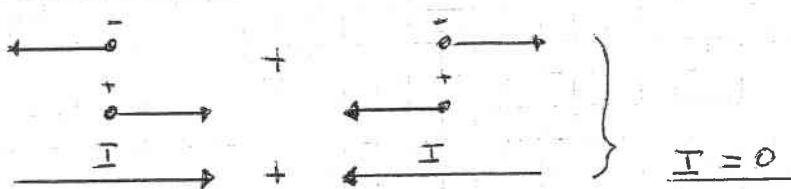
~~$$(\Psi_{Cp} - \Psi_{Cn}) + \Psi_{B0} - \Psi_B - \Psi_{ZNP} + \Psi_{ZNN} - V = 0$$~~

\rightarrow si può fare cancellare per ipotesi di contatto ohmico (sono uguali anche se scorre corrente diversa)

$$\boxed{\Psi_B = \Psi_{B0} - V} \rightarrow \text{valido se valgono le due ipotesi}$$

All'equilibrio ($V=0$)

$\Psi_B = \Psi_{B0} \rightarrow \text{componente diffusiva} = \text{componente di trascinamento}$



$\boxed{V > 0}$

$\Psi_B < \Psi_{B0} \rightarrow$ si riduce l'area del campo elettrico in quanto $\frac{-qNA}{\epsilon s}(x + w_p)$ per $-w_p \leq x \leq 0$

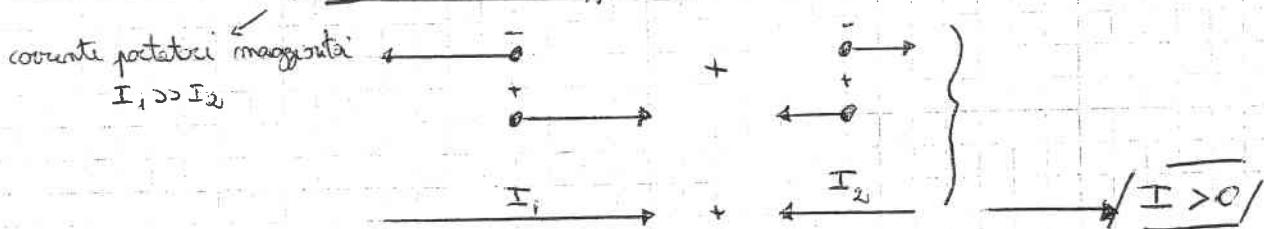
$$\int_{-w_p}^0 E(x) dx = -\Psi_B. \text{ Siccome } E(x) = \begin{cases} \frac{qND}{\epsilon s}(x - w_m) & \text{per } 0 \leq x \leq w_m, \\ \end{cases}$$

la dipendenza $\frac{dE(x)}{dx} = \begin{cases} -\frac{qNA}{\epsilon s} & \text{per } -w_p \leq x \leq 0 \\ q\frac{ND}{\epsilon s} & \text{per } 0 < x \leq w_m \end{cases}$ è costante,

riducendo l'area di missione w_m e Δp .

\hookrightarrow Se come il campo elettrico che contrasta la diffusione diminuisce

$\hookrightarrow \text{componente diffusiva} > \text{componente di trascinamento}$

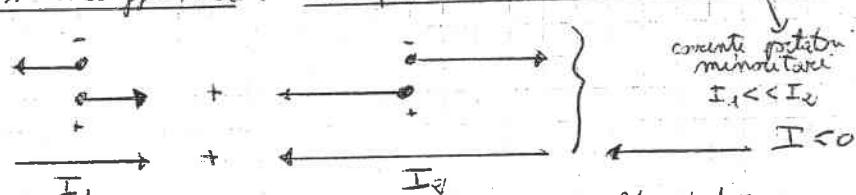


La diffusione sposta gli elettroni dalla zona N e le lacune delle zone P verso la zona ricezione \rightarrow corrente positiva

$\boxed{V < 0}$

$\Psi_B > \Psi_{B0} \rightarrow$ aumenta l'area del campo elettrico, aumentano w_m e Δp

$\hookrightarrow \text{componente diffusiva} < \text{componente di trascinamento}$



\hookrightarrow La differenza tra il diodo e un bipolo resistivo è l'entità della corrente.

$\boxed{V > 0}$ prevale la diffusione che sposta i portatori maggioritari.

$\boxed{V < 0}$ prevale il trascinamento che sposta i portatori minoritari.

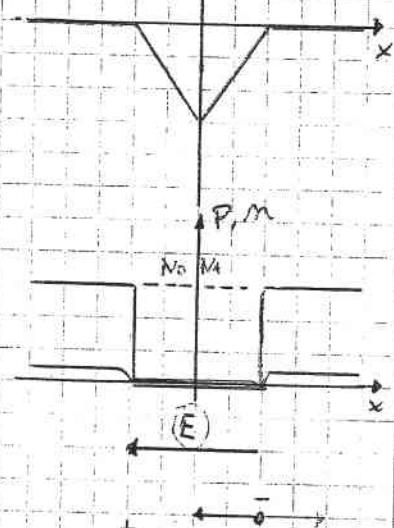
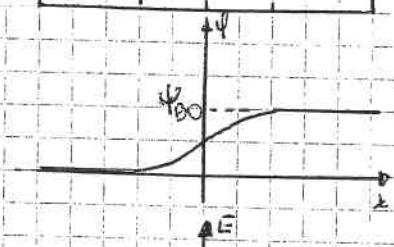
I portatori minoritari sono $10 \div 12$ ordini di grandezza inferiori a quelli maggioritari (ad esempio con $N_D = N_A = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ e $n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ nella zona N, $n = N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $P = \frac{n_i^2}{N_D} = 10^5 \text{ cm}^{-3}$)

- $V > 0$ → si instaura un moto di portatori maggioritare (per diffusione)
 - ↳ in modulo $I \gg 0$
- $V < 0$ → si instaura un moto di portatori minoritare (per trascinamento)
 - ↳ in modulo $I \approx 0$ ($10 \div 12$ ordini di grandezza inferiore alle correnti dovute per il moto dei portatori maggioritari)

$V=0$

$$\Psi_B = \Psi_{B0}$$

P	00000	00000	m
	00000	00000	m



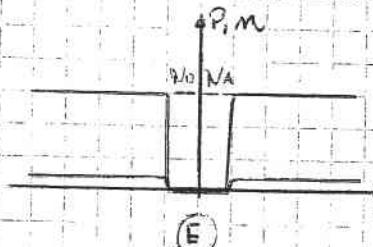
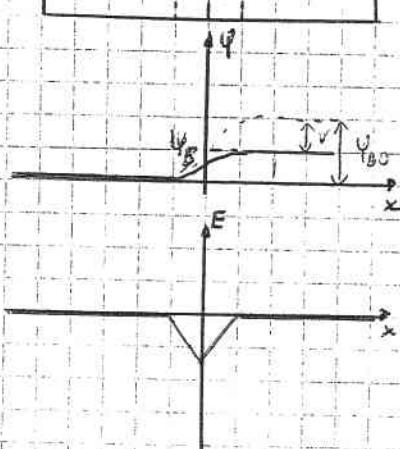
$$I=0$$

→ no carrier transport

$V > 0$

$$\Psi_B < \Psi_{B0}$$

P	00000	00000	m
	00000	00000	m

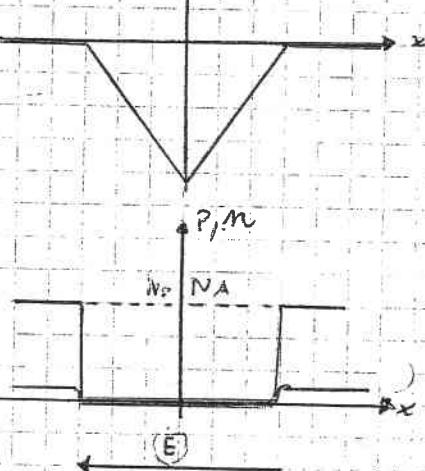
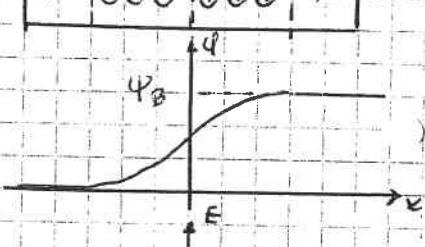


$$I \gg 0$$

$V < 0$

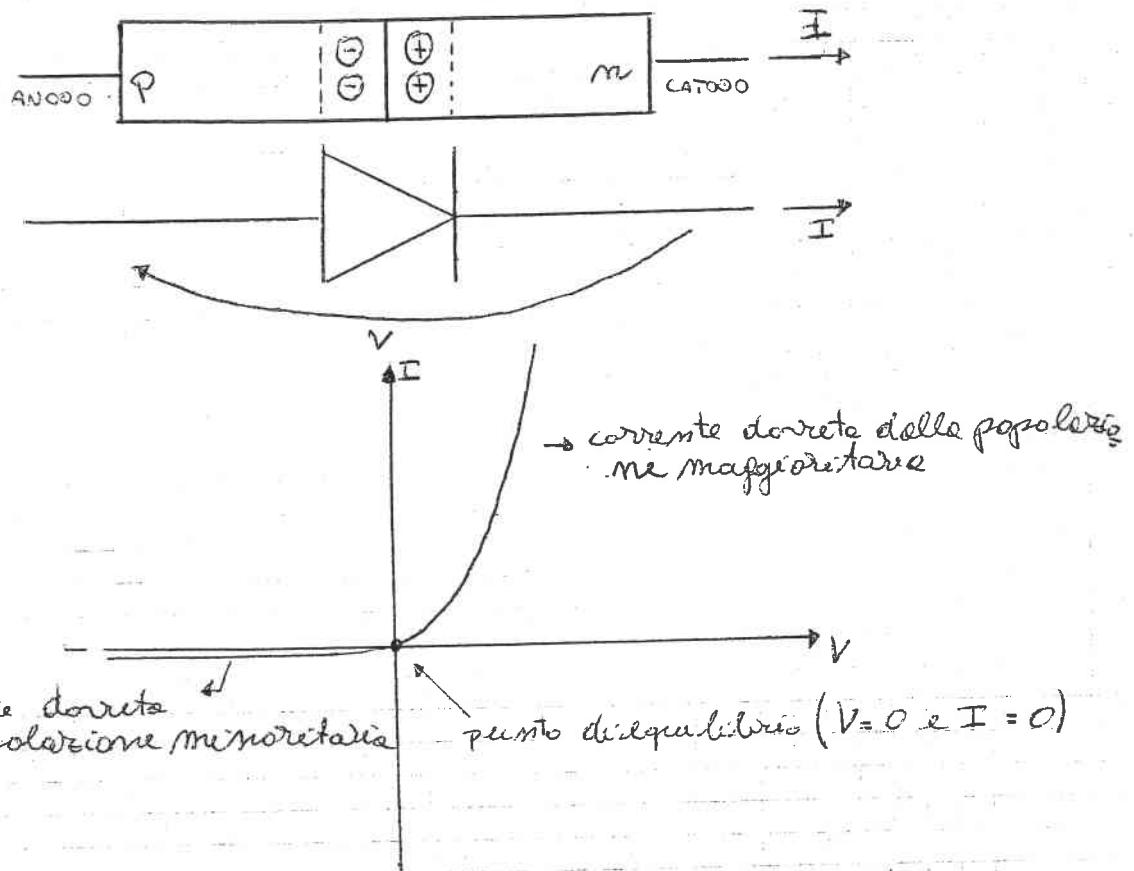
$$\Psi_B > \Psi_{B0}$$

P	00000	00000	m
	00000	00000	m



$$I \approx 0$$

EQUAZIONE DEL DIODO A GIUNZIONE PN

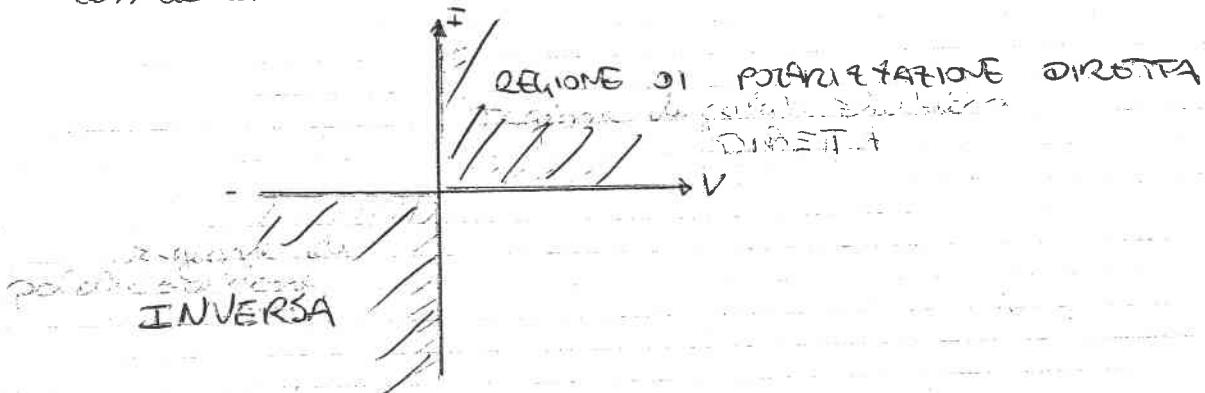


→ IMPORTANTE: ciò è valido se valgono le due ipotesi di partenza, in particolare se ci sono delle recette strettamente dall'equilibrio.

→ il diodo è come un resistore variabile in funzione della tensione applicata:

- se $V > 0$ $R \rightarrow 0$ (cortocircuito) → da questo ne deriva il simbolo che indica (con la freccia) la direzione unica dove può circolare la corrente e (con il muro) la direzione in cui non può circolare corrente.
- se $V < 0$ $R \rightarrow +\infty$ (circuito aperto)

Le curve $I = f(V)$ ha due regioni di funzionamento con caratteristiche diverse che hanno due nomi distinti:



Si può dimostrare che:

(Modello esponenziale per $V \leq 0.8$)
 $-10 \leq V \leq 0.8$)

$$I = I_s \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) \quad \text{con}$$

$$V_T = \frac{kT}{q} \approx 25 \div 26 \text{ mV}$$

$$I_s \approx 10^{-14} \div 10^{-16} \text{ A}$$

→ valido solo in un
piccolo intorno del
punto di equilibrio
(dato per i dispositivi
digitali)

Il I serve ad avere per $V=0$, $I=0$ cioè la condizione di
equilibrio, dove trovare l'esponente pu' forse parso in $0(0)$

Per $V < 0$ $e^{\frac{V}{V_T}} \ll 1 \Rightarrow I \approx -I_s \rightarrow$ è la corrente inversa di
retrocessione (di retrore-
zione perché è il valore minimo
che può raggiungere la corrente
sempre nell'intorno di piccoli mostri-
menti dell'equilibrio).

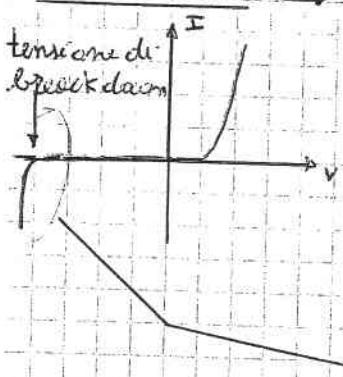
→ polarizzazione inversa → predominio del trasferimento
nella direzione che ageva nella polarizzazione di minoritari
che dipendono da $N_i^2 \rightarrow N_i$ è la concentrazione intrinseca
per effetto della generazione termica → Maggiore è la temperatura
più è maggiore è $N_i^2 \rightarrow$ aumenta la polarizzazione dei minoritari
→ I_s dipende dalla temperatura (in modo esponenziale
al quadrato in questo
 $I_s \propto N_i^2 \propto (T \text{ temp})^2$)

→ i dispositivi sono sensibili con la temperatura.

↳ il diodo si comporta come un circuito aperto

• L'intorno del punto di equilibrio

Per $V < 0$



→ la barriera di potenziale aumenta ($\Phi_B = \Phi_{B0} - V$)

↳ aumenta il campo elettrico e la regione invertita

↳ un campo elettrico elevato può generare
focalmente una coppia elettrone-hole

↳ non vale più il modello (dove la generazione di coppia elettrone-hole è solo
dipendenza della temperatura)

→ nessuno varia minimamente (come l'effetto
Zener e di ionizzazione per simmetria)

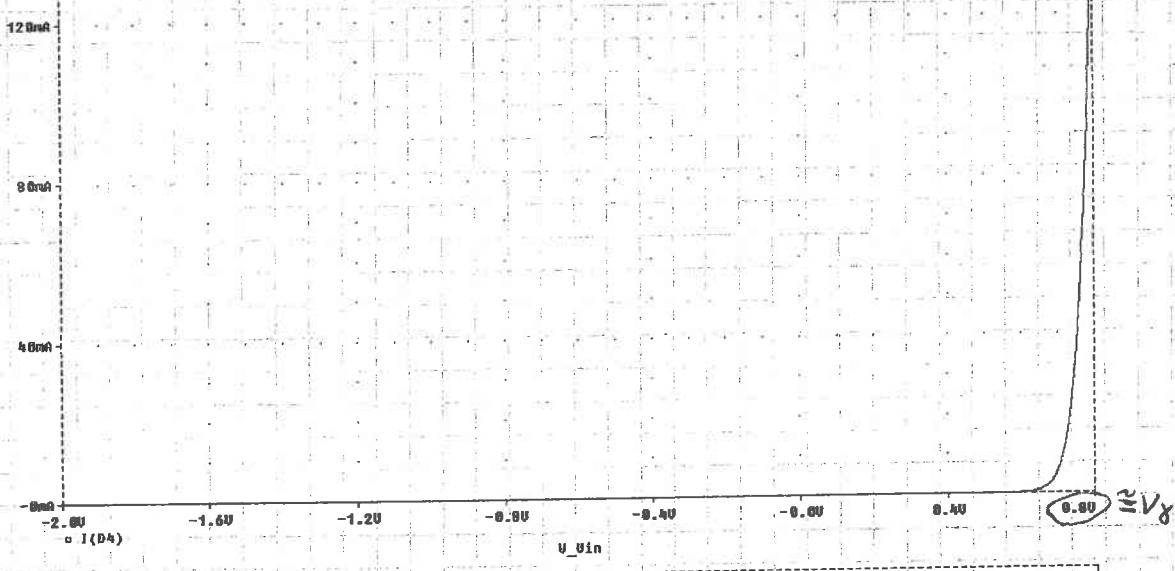
→ la corrente aumenta in modulo in modo
esponenziale.

Fenomeno di rotura della giunzione,
break down (la tensione di break down è 10^{-20} V)

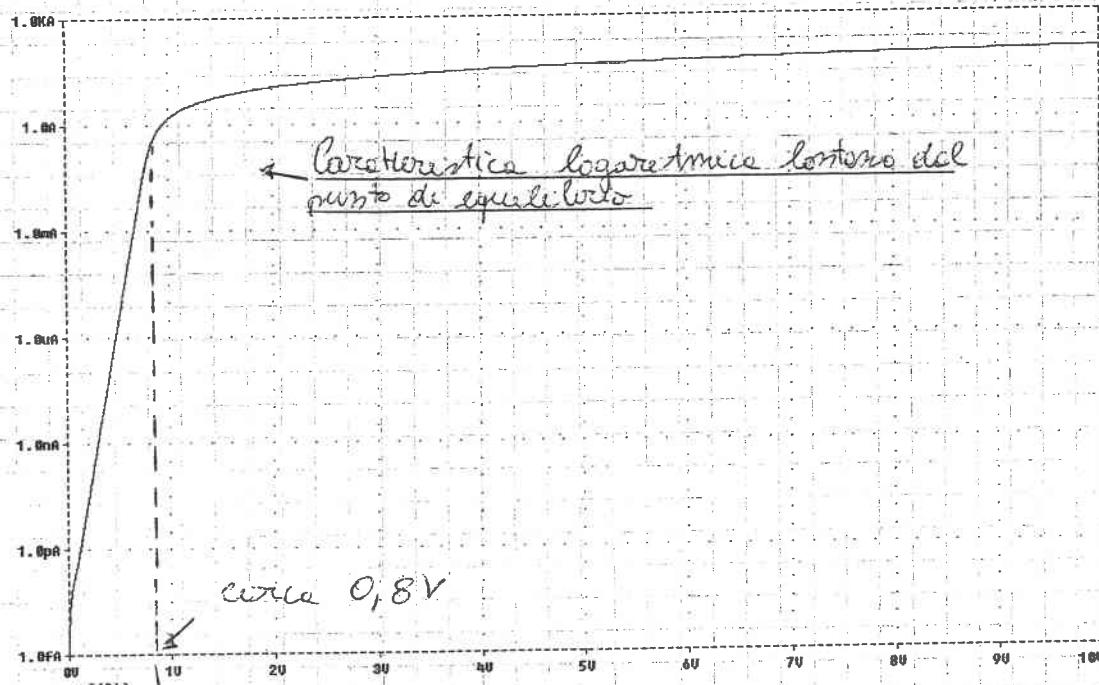
Per $V > 0$

→ usando una scala logaritmica per le ordinate (invece
di una retta) il grafico delle correnti è una retta
la cui pendenza cala all'aumentare della tensione.

Caratteristica diodo nell'intorno del punto di equilibrio



Caratteristica logaritmica lontano dal punto di equilibrio



limite massimo per cui vale il -modello esponenziale

→ questo è dovuto dalle cadute non più trascurabili sulle zone neutre (Φ_{ZNP} e Φ_{ZNN}) in quanto per $V=0,8V$ la corrente è già $160mA$.

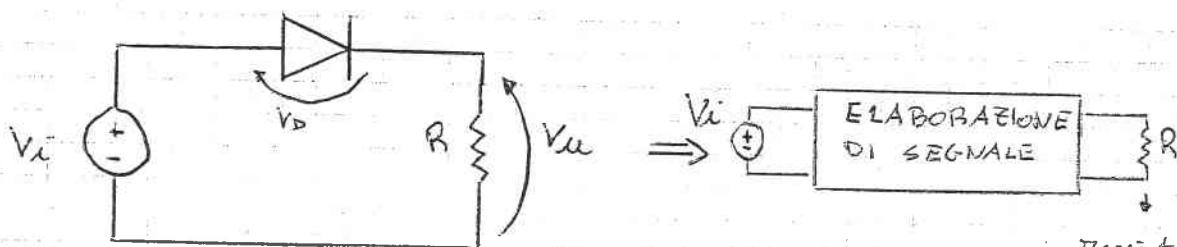
↳ Per $V > 0,8V$ l'aumento delle cadute di potenziale sulle giunzione, responsabile dello scorrimento tra diffusione e trascinamento, è minore di quello applicato al diodo, perché una parte va alle cadute Φ_{ZNP} e Φ_{ZNN} corrente cresce meno velocemente

↳ l'effetto è dovuto sia dall'elevata intensità di corce che circola sulle giunzioni, sia in quanto cade l'ipotesi di completo neutralamento.

UTILIZZO DEL DIODO

RAPPRESENTAZIONE A SINGOLA SEMIONDA

$$I = I_s \left(e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right)$$



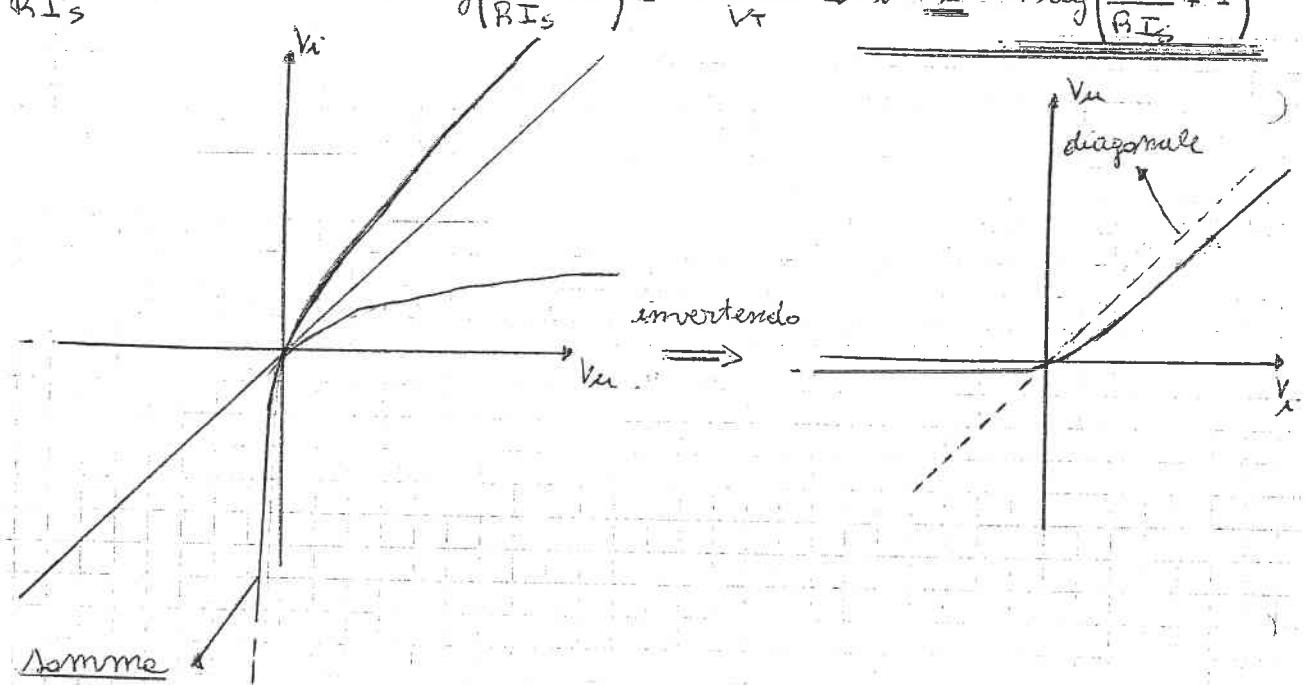
resistenza
di carico

→ Bisogna calcolare la relazione $V_u(V_i)$ cioè
la caratteristica di trasferimento

$$\begin{aligned} V_i - V_D - V_u &= 0 \rightarrow V_D = V_i - V_u \\ I &= \frac{V_u}{R} \end{aligned} \quad \left\{ \frac{V_u}{R} = I_s \left(e^{\frac{V_u}{V_T}} - 1 \right) \right.$$

è difficile isolare V_u . Si può isolare V_i e calcolare $V_i = f^{-1}(V_u)$ e poi si "rebalza" graficamente per ottenere $f(V_i) = V_u$

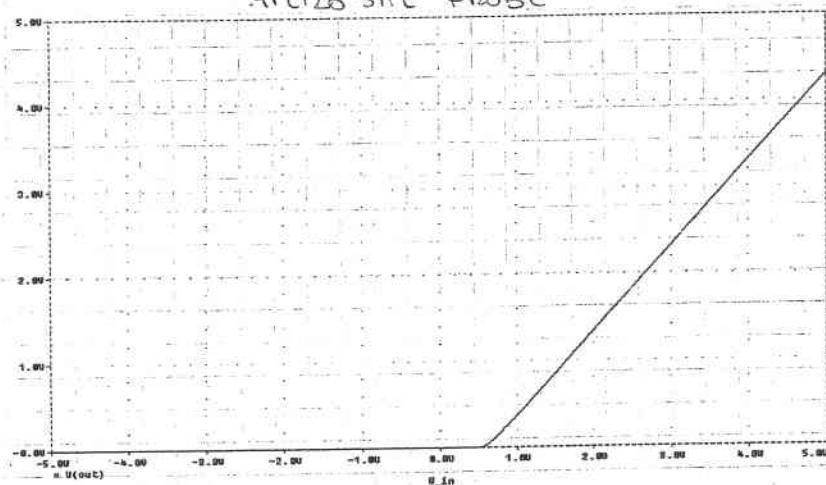
$$\frac{V_u - V_i}{R I_s} + 1 = e^{\frac{V_u}{V_T}} \rightarrow \log \left(\frac{V_u - V_i}{R I_s} + 1 \right) = \frac{V_u - V_i}{V_T} \rightarrow V_i = V_u + V_T \log \left(\frac{V_u - V_i}{R I_s} + 1 \right)$$



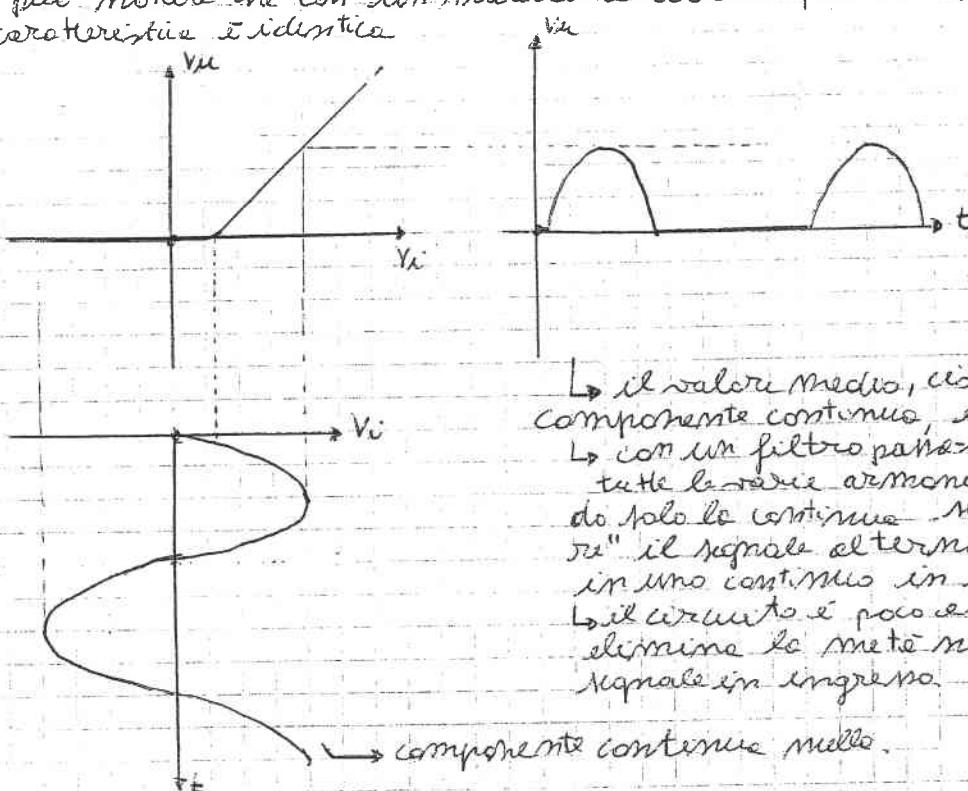
MICRO SIM PROBE

21

Simulazione
Spice →

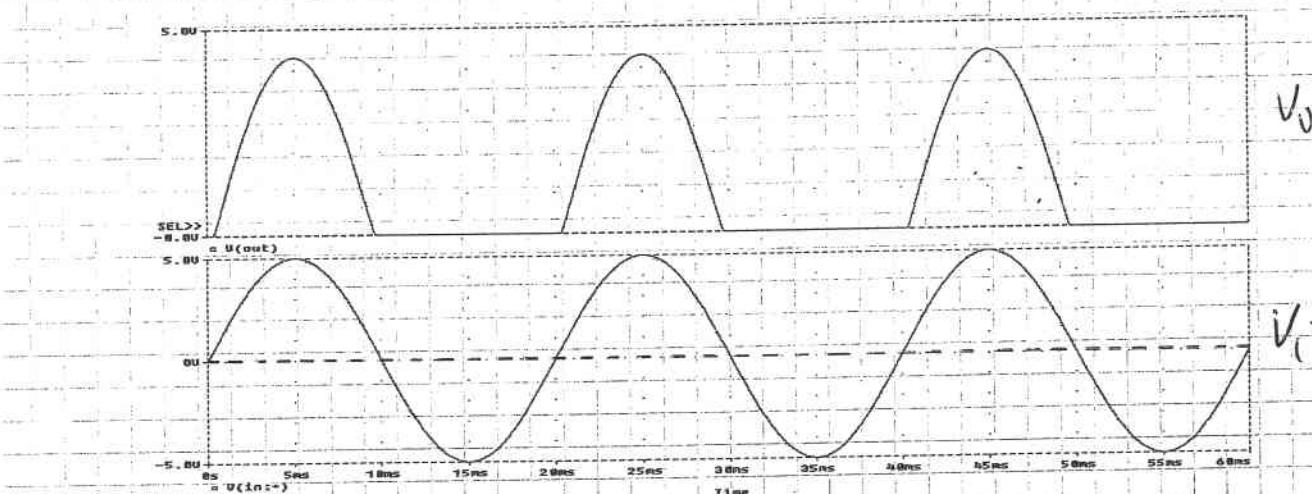


→ Si può notare che con un modello accurato per $-10 \leq V_s \leq 0.8$
la caratteristica è identica



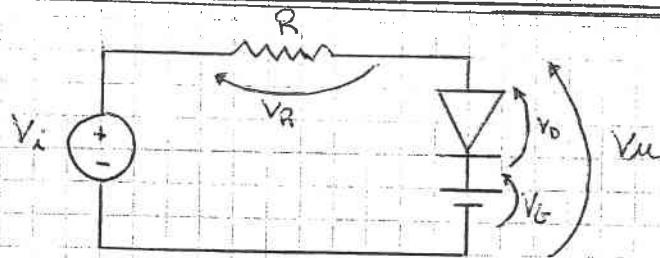
- il valore medio, cioè la componente continua, è diverso da 0
- con un filtro pass-basso che taglia tutte le varie armoniche mantenendo solo la continua si può "trasformare" il segnale alternato in ingresso in uno continuo in uscita.
- il circuito è poco efficiente perché elimina la metà negativa del segnale in ingresso.

→ componente continua nulla.



Se chiamo reduttore rettificatore perché ad un segnale con parte positiva e negativa ne corrisponde uno con solo la parte positiva

LIMITATORE DI TENSIONE SUPERIORE



$$I = I_s \left(e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right)$$

$$V_d = RI$$

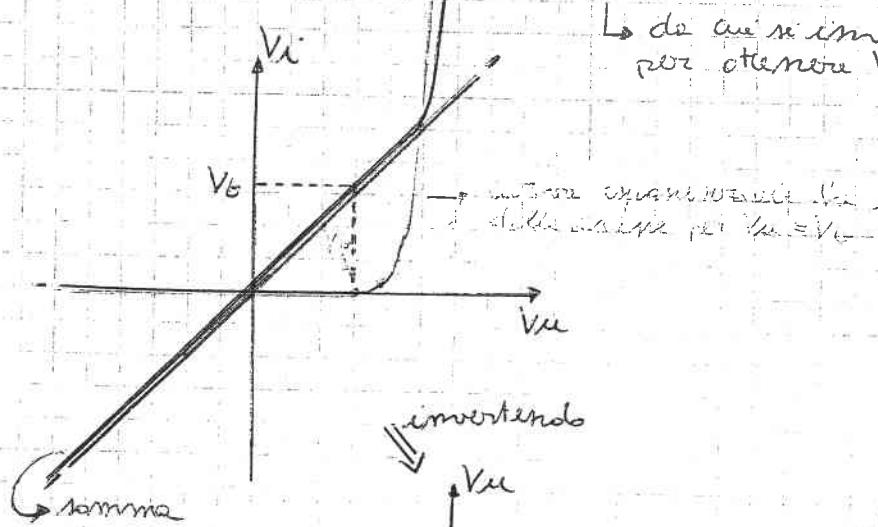
$$V_i - V_d - V_u = 0 \rightarrow V_d = V_i - V_u \quad \left\{ \begin{array}{l} V_i - V_u = RI \\ \Rightarrow I = \frac{V_i - V_u}{R} \end{array} \right.$$

$$V_u = V_g + V_o \rightarrow V_o = V_u - V_g$$

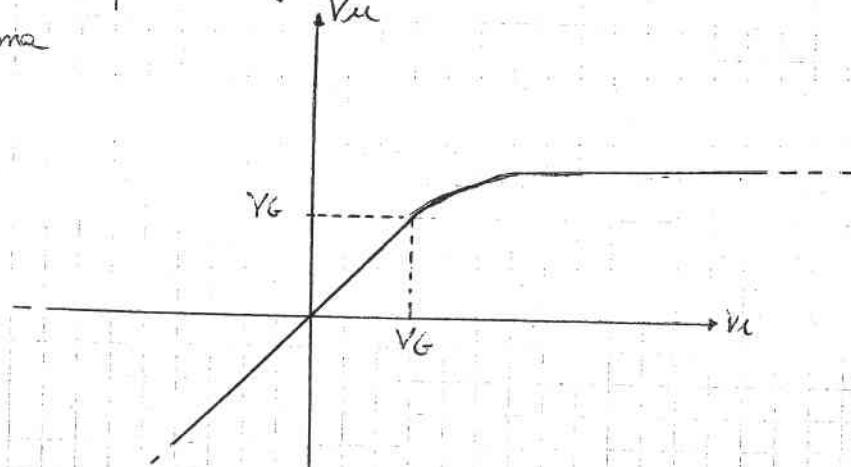
$$\frac{V_i - V_u}{R} = I_s \left(e^{\frac{V_u}{V_t}} - 1 \right) \rightarrow V_i = V_u + R I_s \left(e^{\frac{V_u}{V_t}} - 1 \right)$$

mentre R è il doppio in cui non interviene della stessa corrente I

Lo si risolve graficamente per ottenere $V_u = f(V_i)$



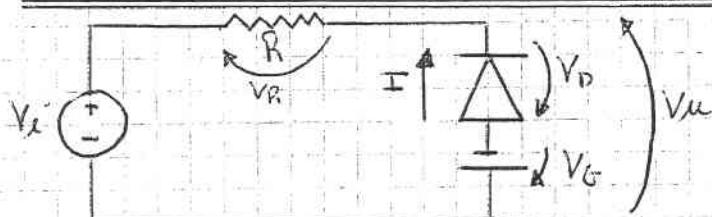
invertendo



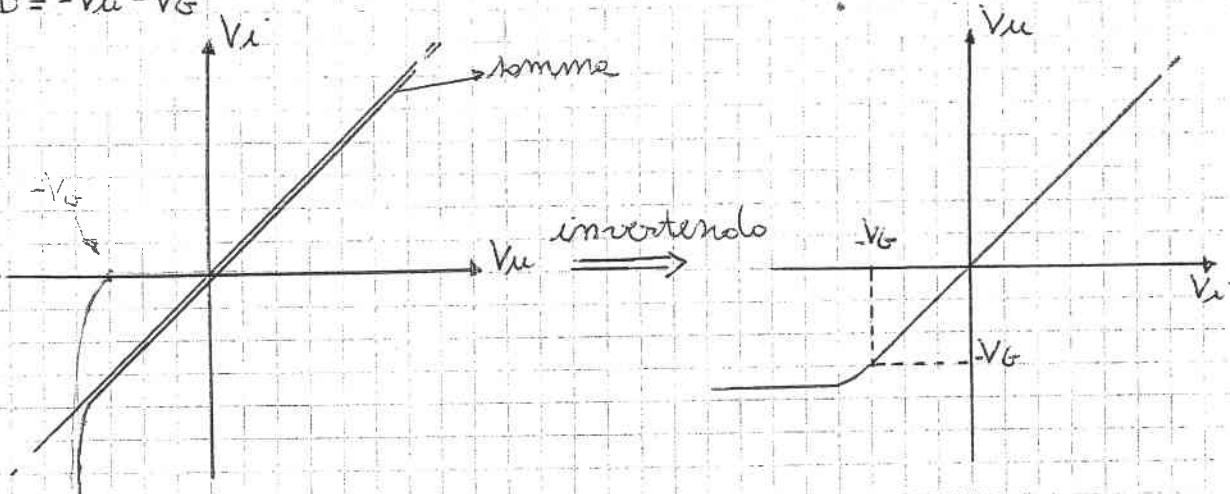
→ il circuito limitatore viene utilizzato per proteggere un ingresso di un circuito da eventuali disturbi di tensione, che potrebbero danneggiare i componenti a valle.
→ cambiando V_g si può varcare il limite superiore

LIMITATORE DI TENSIONE INFERIORE

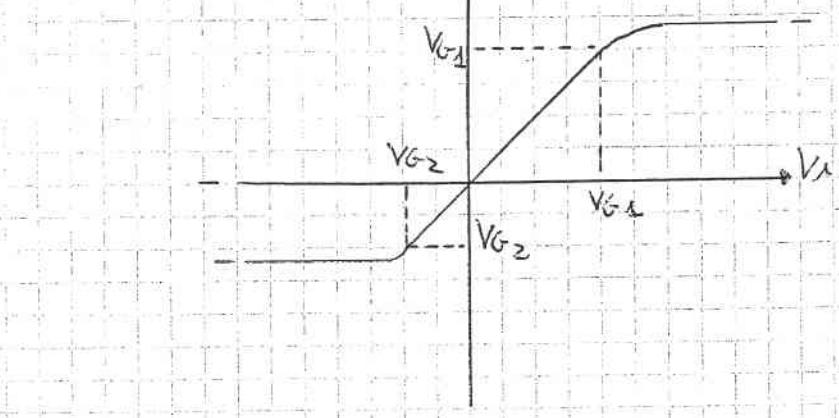
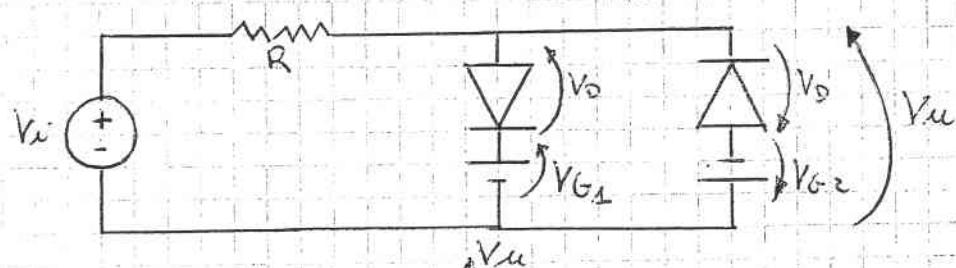
22



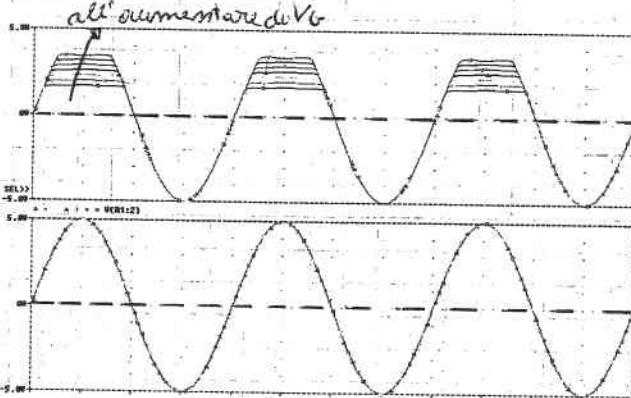
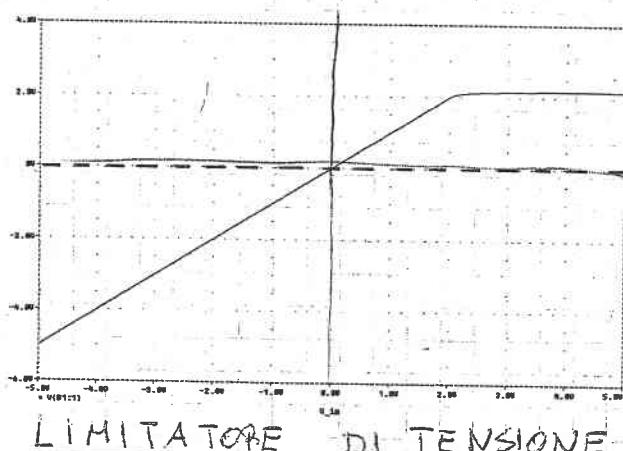
$$\left. \begin{aligned} I &= I_s (e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1) \\ V_R &= -I \cdot R \\ V_i - V_R - V_u &= 0 \rightarrow -V_R = V_u - V_i \\ V_D &= -V_u - V_G \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \frac{V_u - V_i}{R} &= I_s (e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1) \\ V_i &= V_u + R I_s (e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1) \end{aligned}$$



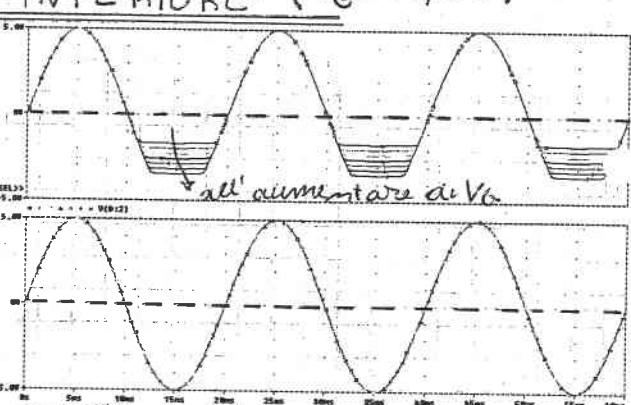
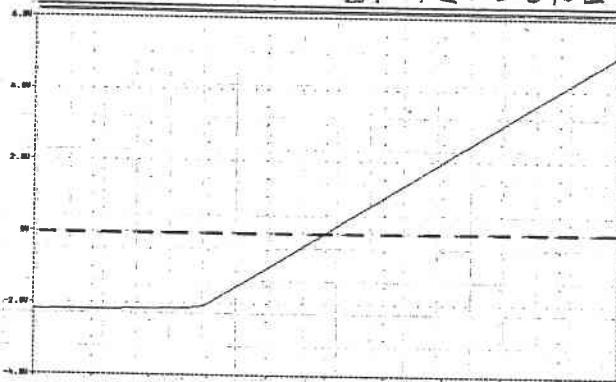
LIMITATORE DI TENSIONE INFERIORE E SUPERIORE



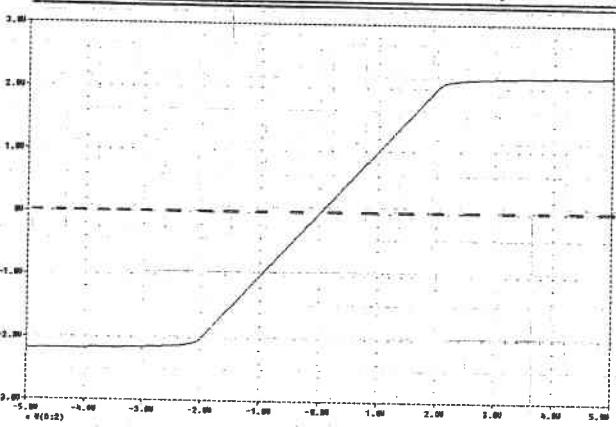
LIMITATORE DI TENSIONE SUPERIORE ($V_G = 2,5 \text{ V}$)



LIMITATORE DI TENSIONE INFERIORE ($V_G = 1,5 \text{ V}$)



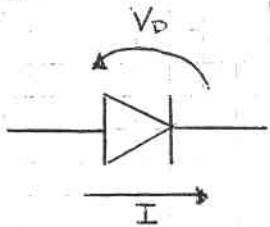
LIMITATORE DI TENSIONE INFERIORE E SUPERIORE ($V_{G1} = V_{G2} = 1,5 \text{ V}$)



→ Il modello introdotto del diodo è troppo complicato, perché contiene una funzione crescente, per lo studio di circuiti con più di un diodo.

→ serve un modello approssimato

MODELLO A SOGLIA DEL DIODO



Per piccoli sottementi dell'equilibrio ($-10 \leq V_D \leq 0,8$) vale

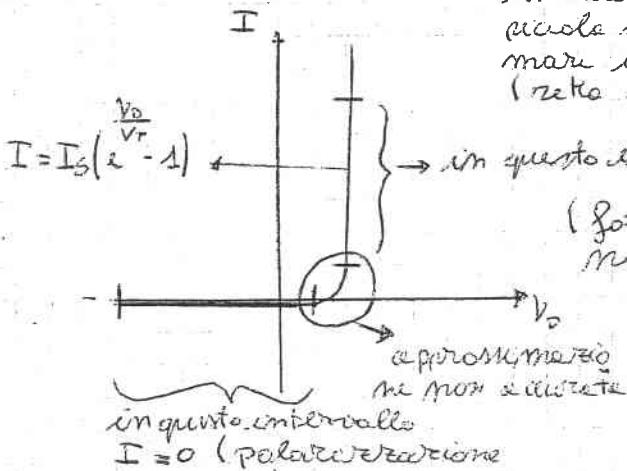
$$I = I_s \left(e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right)$$

Per l'elettronica digitale servono due condizioni limite nettemente differenti, per poter distinguere il rumore (descrivendo tutte le possibili configurazioni intermedie).

Le due condizioni limite sono:

↳ polarizzazione inversa dove I tende a $-I_s \approx 0 \rightarrow$ la curva si può approssimare ad una retta orizzontale $I=0$

↳ polarizzazione diretta → per un intervallo di corrente limitato una variazione di corrente corrisponde una piccola variazione di tensione \rightarrow si può approssimare la curva ad una retta $V = \text{cost} = V_f$ (retta verticale)



$V_f \rightarrow$ tensione di soglia (è la soglia del modello)

(piccola variazione di corrente corrisponde a piccola variazione di tensione)

↳ la tensione si può approssimare a una tensione costante $V_f \approx 0,75V$

↳ questa retta non è un asintoto.

L'approssimazione vale solo per un certo intervallo di corrente

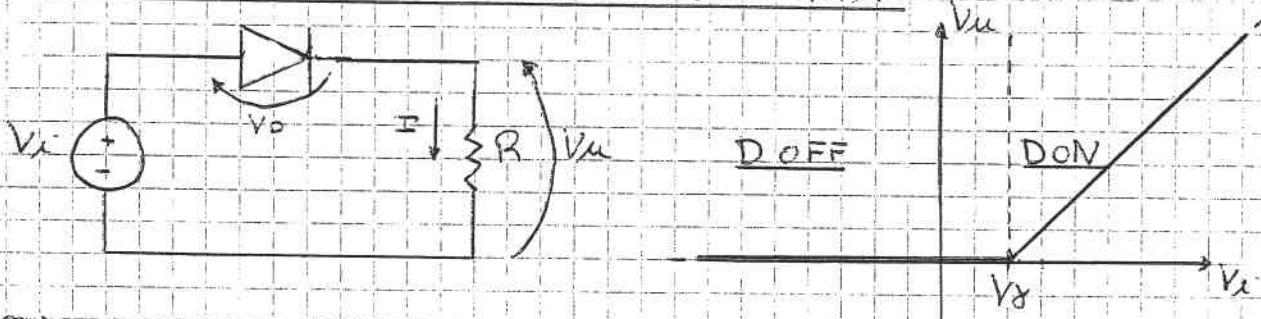
(la condizione di polarizzazione inversa vale per oltre 10 volte prima needed per l'entro della condizione di blocco di diodi)

Verde	vera quota	
$I = 0$, $V_D < V_f$	(Diodo OFF) POLARIZZAZIONE INVERSA
Vera re	è vera quota	
$V = V_f$, $I > 0$	(Diodo ON) POLARIZZAZIONE DIRETTA

→ Modello a soglia è due equazioni lineari con le rispettive regioni di validità

STUDIO DEI CIRCUITI USANDO IL MODELLO A SOGLIA

• R ADDRIZZATORE A SINGOLA SEMIONDA



$$\textcircled{1} \quad V_i - V_o - V_u = 0$$

$$\textcircled{2} \quad V_u = RI$$

↳ Caratteristica di trasferimento

↳ Siccome il modello è logico prende due equazioni, bisogna risolvere il circuito due volte.

H_p: D OFF

$$I = 0 \text{ da } \textcircled{2} \rightarrow V_u = 0$$

Studio della validità del risultato

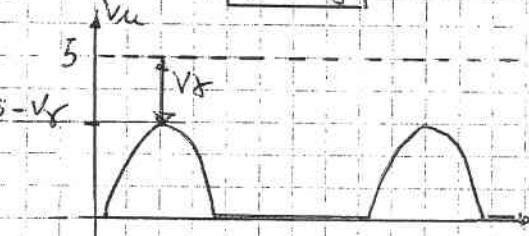
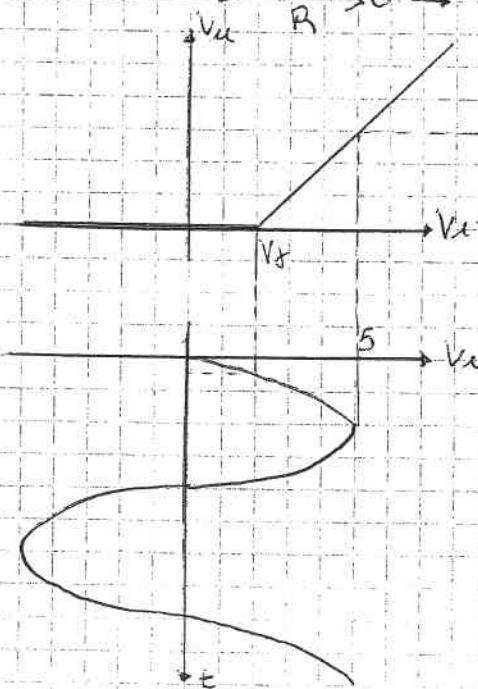
$$V_o < V_g \quad \left. \begin{array}{l} \{ \\ \end{array} \right\} \rightarrow V_i - V_u < V_g \rightarrow V_i < V_g$$

da \textcircled{1} \quad V_o = V_i - V_u

H_p: D ON

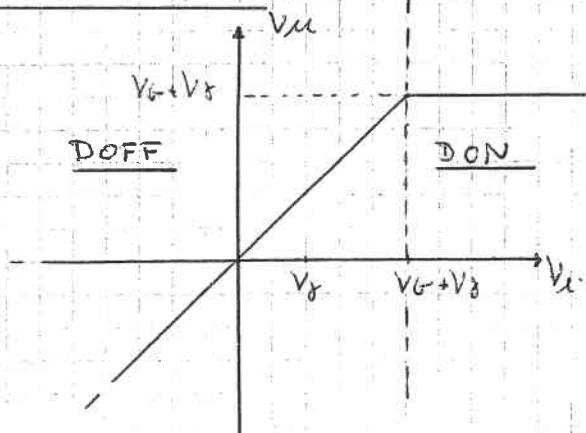
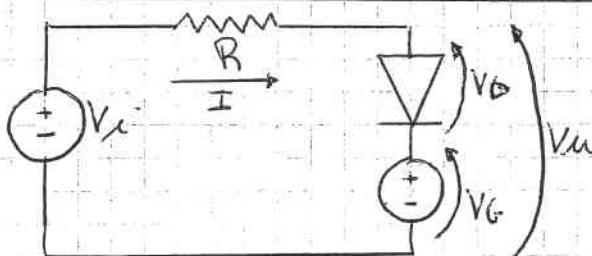
$$V_o = V_g \quad \text{da } \textcircled{1} \quad V_i - V_g - V_u = 0 \rightarrow V_u = V_i - V_g$$

$$I > 0 \quad \text{da } \textcircled{2} \quad \frac{V_u}{R} > 0 \rightarrow V_u > 0 \rightarrow V_i > V_g$$



↳ comportamento simile al modello che usa un modello molto esaurito.
↳ il modello è esaurito.

LIMITATORE DI TENSIONE SUPERIORE



$$\textcircled{1} \quad V_i - RI - V_u = 0$$

$$\textcircled{2} \quad V_u = V_D + V_0$$

Hip: D OFF

$$I = 0 \xrightarrow{\text{de } \textcircled{1}} V_i - V_u = 0 \rightarrow V_i = V_u$$

$$V_0 < V_f \xrightarrow{\text{de } \textcircled{2}} V_u - V_G < V_f \rightarrow V_i < V_G + V_f$$

$$\text{da } \textcircled{2} \quad V_0 = V_u - V_G$$

Hip: D ON

$$V_0 = V_f \xrightarrow{\text{de } \textcircled{2}} V_u = V_G + V_f$$

$$I > 0$$

$$\text{de } \textcircled{1} \quad I = \frac{V_i - V_u}{R} > 0 \rightarrow V_i > V_u \rightarrow V_i > V_G + V_f$$

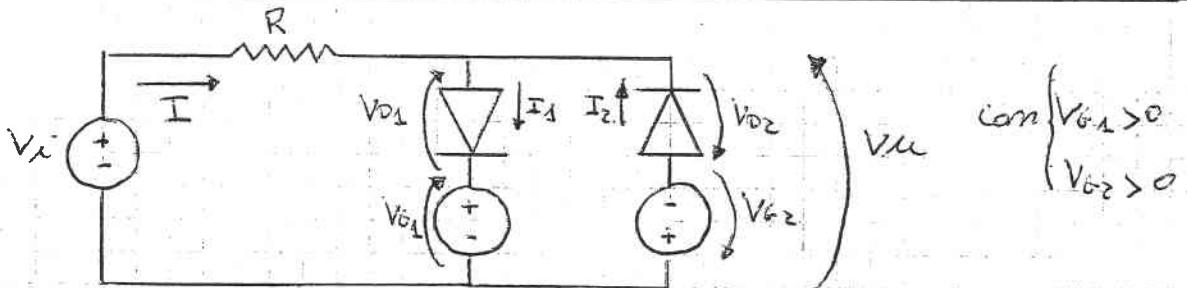
↳ la simulazione è approssimata in modo accurato del modello anche se lo preme (la simulazione) una modellazione esponenziale e la seconda una modellazione lineare.

↳ analisi del comportamento del circuito:

→ quando la tensione d'ingresso è inferiore al limite dell'intervento ($V_G + V_f$) il diodo è spento → la corrente nella resistenza è nulla → non c'è caduta → l'uscita cresce con l'ingresso.

→ quando la tensione di ingresso è superiore alla soglia di intervento ($V_G + V_f$) si accende il diodo la cui tensione (che capi di esso è costante → "blocca" la tensione in uscita a $V_G + V_f$ → l'eventuale corrente dell'ingresso viene assorbita dalla resistenza).

LIMITATORE DI TENSIONE SUPERIORE ED INFERIORE



La circuito difficile da risolvere con il modello esponenziale

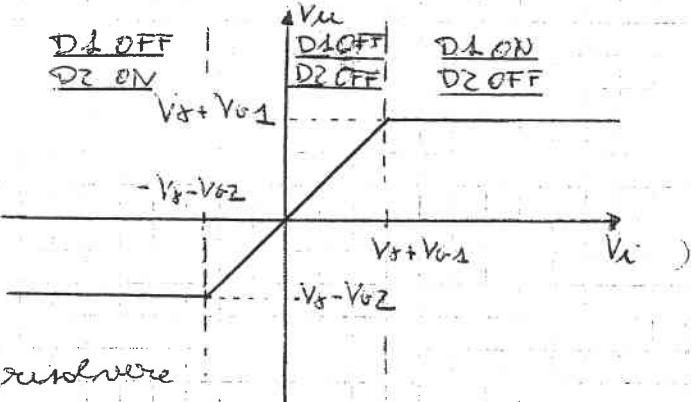
$$\textcircled{1} \quad V_i - RI - V_u = 0$$

$$\textcircled{2} \quad I + I_2 = I_A$$

$$③ V_{G1} + V_{D1} + V_{O2} + V_{G2} = 0$$

$$(4) \quad V_{G1} + V_{D1} = V_{ee}$$

$$(5) - (V_{C2} + V_{D2}) = V_{ee}$$



↳ ci sono due diode \rightarrow la tensione risalirebbe
nel circuito 4 volte

Lo questo è un problema perche con un modello e 2 equazioni non avendo a m-dadi bisogna risolverlo 2 volte.

Hp: D1 OFF, D2 OFF

$$I_1 = 0, I_2 = 0 \xrightarrow{\text{de } ②} I = 0 \xrightarrow{\text{de } ①} V_i - V_u = 0 \rightarrow V_i = V_u$$

$$V_{O1} < V_S \rightarrow V_{CE} - V_{O1} < V_S \rightarrow V_C - V_{O1} < V_S \quad V_C < V_{O1} + V_S$$

$$\text{do } ④ \quad V_{O_1} = V_u - V_{G_1}$$

$$V_{G2} < V_x \rightarrow -(V_G + V_{G2}) < V_x \rightarrow (V_G + V_{G2}) > -V_x \quad V_G > -V_{G2} - V_x$$

$$\text{dc}(5)V_{D2} = -V_0 - V_{G2}$$

HP : D1 ON, D2 OFF (è come il limitatore di tensione superiore)

$$V_{O1} = V_8 \xrightarrow{de (4)} V_{12} = V_{G4} + V_8$$

• $H_1 > 0$

$$\bullet I_2 = 0 \xrightarrow{dc (2)} I = I_1 \xrightarrow{} I > 0$$

$$\text{de } ① \quad \frac{V_i - V_k}{R} = I$$

Bisogna ancora verificare $V_{02} < V_f$ → condizione vere.

$$\text{da } ③ \quad V_{O_2} = -(V_{G1} + V_{G2} + V_{D1}) \longrightarrow V_{O_2} < 0$$

tutti meggiore di 0

Siccome $V_{01} > 0$ e $V_{02} > 0$ delle meglio (3) ricopre che a debole

25

non possono essere ecene simultaneamente perché se così faremo

$V_{D1} = V_{D2} = V_x$ e $V_{G1} + V_{G2} + V_{D1} + V_{D2} \neq 0$, in questo modo tutte le tensioni sono positive.

Quindi è impossibile che $D1$ ON e $D2$ ON

Hp: $D1$ OFF, $D2$ ON (è come il limitatore di tensione inferiore)

$$V_{D2} = V_x \xrightarrow{\text{de (6)}} V_u = -(V_{G2} + V_x)$$

$$\begin{aligned} & I_2 > 0 \\ & I_1 = 0 \xrightarrow{\text{de (2)}} I = -I_2 \quad \left. \begin{array}{l} I < 0 \\ V_i < V_u \end{array} \right\} \xrightarrow{V_i < V_u} V_i < -(V_{G2} + V_x) \\ \text{de (1)} \quad I &= \frac{V_i - V_u}{R} \end{aligned}$$

Bisogna dimostrare che il diodo 1 è spento. \rightarrow condizione verificata
 de (3) $V_{D1} = -(V_{G1} + V_{G2} + V_{D2}) \rightarrow V_{D1} < 0 \rightarrow V_{D1} < V_x$
 tutti maggiori di 0.

Se non si sapesse che i due diodi potrebbero essere entrambi off.

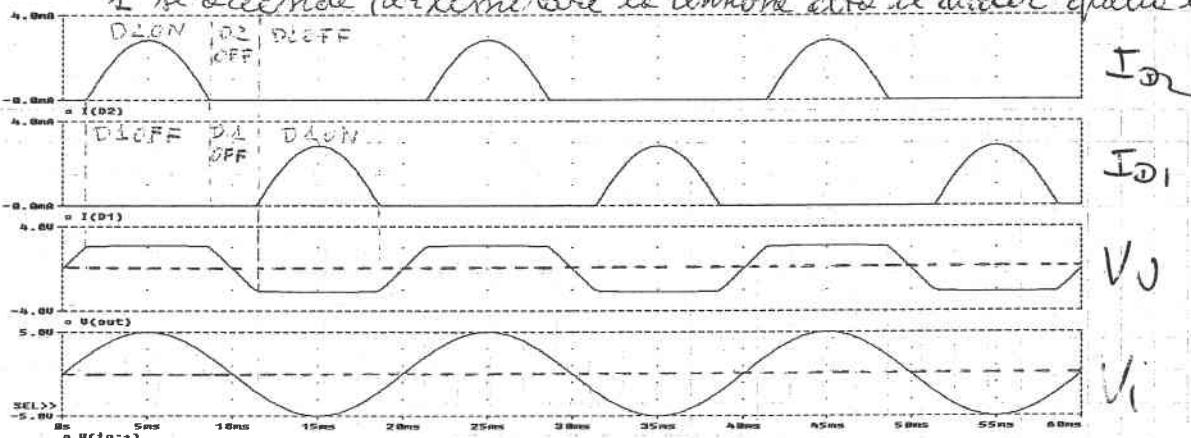
Hp: $D1$ ON, $D2$ ON

$$\begin{aligned} V_{D1} &= V_x \\ V_{D2} &= V_x \quad \left. \begin{array}{l} V_{D1} + V_{D2} > 0 \\ \text{ASSURDO} \end{array} \right\} \end{aligned}$$

$$\text{de (3)} \quad V_{D1} + V_{D2} = -(V_{G1} + V_{G2}) < 0$$

Con N diodi bisognerebbe risolvere 2^N volte lo stesso circuito (dove 2^N sono tutte le possibili configurazioni (ON o OFF) dei diodi) ma molte combinazioni porterebbero a degli assurdi (come nel caso precedente), quindi disegnando dell'andamento delle condizioni monofase si possono ridurre al numero di risoluzioni dello stesso circuito.

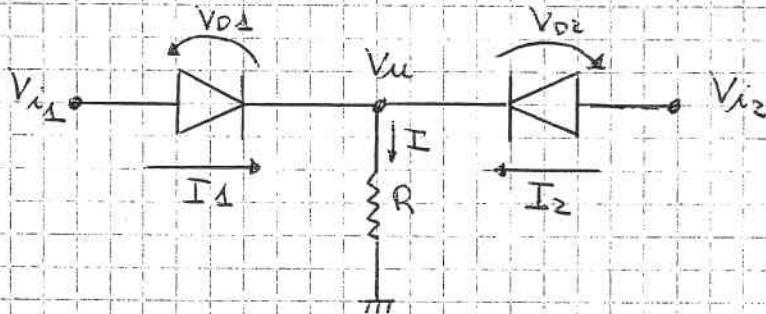
\rightarrow i diodi si accendono quando interviene il limitatore. Il diodo 1 si accende per limitare la tensione alta al diodo 2 quella bassa.



ELABORAZIONE DI PIÙ SEGNALI



- CIRCUITO RILEVATORE DI MASSIMO, OR



→ non si può designare la caratteristica perché sarebbe un prefisso di una funzione di due variabili (Vx_1 e Vx_2) (il prefisso è tradizionalmente riservato alla comprensione della funzione del circuito).

$$\textcircled{1} \quad V_{u1} = RI_1, \quad \textcircled{2} \quad I_1 + I_2 = I, \quad \textcircled{3} \quad V_{x1} - V_{d1} = V_u; \quad \textcircled{4} \quad V_{x2} - V_{d2} = V_u$$

Hp: D1 OFF, D2 OFF

$$I_1 = 0, \quad I_2 = 0 \quad \xrightarrow{\text{de } \textcircled{2}} \quad I = 0 \quad \xrightarrow{\text{de } \textcircled{4}} \quad V_u = 0$$

• Verifica di $V_{d1} < V_f$

$$\text{de } \textcircled{3} \quad V_{d1} = V_{x1} - V_u < V_f \rightarrow V_{x1} < V_f + V_u \rightarrow V_{x1} < V_f$$

• Verifica di $V_{d2} < V_f$

$$\text{de } \textcircled{4} \quad V_{d2} = V_{x2} - V_u \rightarrow V_{x2} - V_u < V_f \rightarrow V_{x2} < V_f$$

Hp: D1 ON, D2 OFF

$$\bullet \quad V_{d1} = V_f \quad \xrightarrow{\text{de } \textcircled{3}} \quad V_u = V_{x1} - V_f$$

$$\bullet \quad I_1 > 0 \quad \left\{ \begin{array}{l} I > 0 \\ \text{de } \textcircled{1} \end{array} \right. \quad \rightarrow \quad V_u > 0 \rightarrow V_x > V_f$$

$$\bullet \quad I_2 = 0 \rightarrow I_1 = I$$

• Verifica $V_{d2} < V_f$

$$\text{da } \textcircled{4} \quad V_{d2} = V_{x2} - V_u \rightarrow V_{x2} - V_u < V_f \rightarrow V_{x2} - (V_{x1} - V_f) < V_f$$

$$V_{x2} < V_{x1}$$

infatti per $V_{x1} > V_f \rightarrow D1 \text{ è ON e } V_u \text{ è inferiore di } V_{x1} \text{ di } V_f$. Per poter accendere D2 serve una tensione V_{x2} tali da applicare all'odiato un $V_f \rightarrow V_{x2} > V_{x1}$

H_P: D2 ON, D1 OFF

→ il circuito è simmetrico e quindi:

$$V_{u1} = V_{i_2} - V_S \quad , \quad V_{i_2} > V_S \quad , \quad V_{i_2} < V_{i_1}$$

H_P: D1 ON, D2 ON

$$\begin{aligned} V_{D2} = V_S &\xrightarrow{\text{de (3)}} V_{u1} = V_{i_1} - V_S \\ V_{D2} = V_S &\xrightarrow{\text{de (4)}} V_{u1} = V_{i_2} - V_S \end{aligned} \quad \left\{ \begin{array}{l} V_{i_1} = V_{i_2} \\ \downarrow \end{array} \right.$$

$$\left. \begin{array}{l} I_1 > 0 \\ I_2 > 0 \end{array} \right\} \xrightarrow{\text{de (2)}} I > 0 \xrightarrow{\text{de (4)}} V_{u1} > 0 \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} V_{i_1} - V_S > 0 \\ V_{i_2} - V_S > 0 \end{array} \right. \rightarrow V_{i_1} = V_{i_2} > V_S$$

Analisi del comportamento del circuito

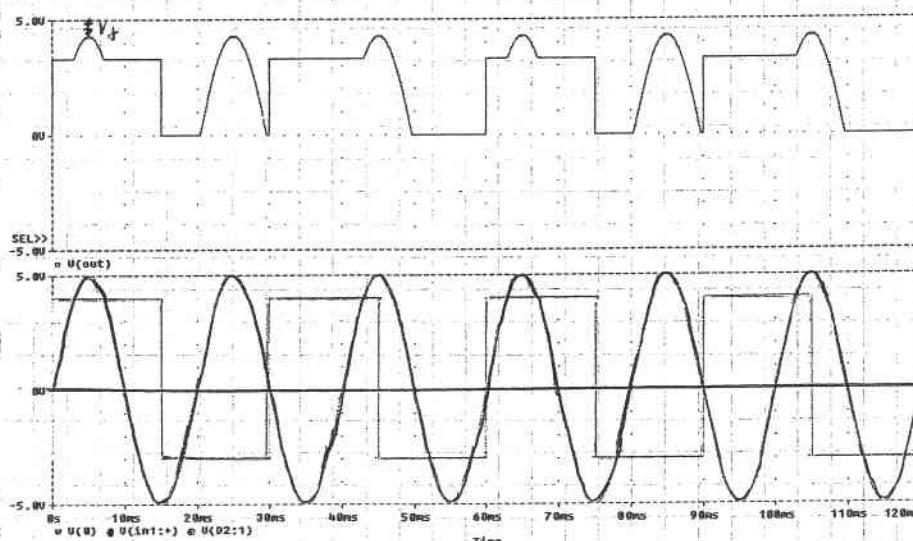
per $\begin{cases} V_{i_1} < V_S \\ V_{i_2} < V_S \end{cases} \Rightarrow V_{u1} = 0$; per $\begin{cases} V_{i_1} > V_S \\ V_{i_2} < V_S \end{cases} \Rightarrow V_{u1} = V_{i_1} - V_S$

per $\begin{cases} V_{i_2} > V_S \\ V_{i_1} < V_S \end{cases} \Rightarrow V_{u1} = V_{i_2} - V_S$ Caso rottacolare
per $V_{i_1} = V_{i_2} > V_S \Rightarrow V_{u1} = V_S - V_S = 0$

→ l'uscita "aggancia" il valore di tensione più alto tra ingresso e meno di una V_S

$$V_{u1} = \text{Max} \{ V_{i_1} - V_S, V_{i_2} - V_S, 0 \}$$

quando le V_{i_1} che V_{i_2} sono $< V_S$
(dove $V_{i_1} - V_S < 0$ e $V_{i_2} - V_S < 0$)



→ l'uscita è il massimo tra le sinusoide e l'onda quadra. Quando i due segnali sono minori di 0 l'uscita è uguale a 0.

La l'uscita è più bassa di una V_S .

In elettronica digitale gli ingressi hanno solo due distinti valori:

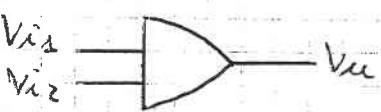
$V_L \rightarrow \text{low voltage}$ } codifica binaria

$V_H \rightarrow \text{high voltage}$

con $V_L < V_f$ e $V_H \gg V_f$ (Per esempio $V_L = 0$ e $V_H = 5V$)

La configurazione degli ingressi è al massimo 4:

V_{i_1}	V_{i_2}	V_u
V_L	V_L	$V_L \rightarrow V_{i_1} < V_f \text{ e } V_{i_2} < V_f \Rightarrow V_u = 0 < V_f \text{ e quindi } V_u = L$
V_L	V_H	$V_H \rightarrow V_{i_2} \gg V_f \text{ e } V_{i_1} < V_f \Rightarrow V_u = V_{i_2} - V_f \text{ e noto } V_{i_2} \gg V_f \Rightarrow V_u \gg V_f \text{ e quindi } V_u = H$
V_H	V_L	$V_H \rightarrow V_{i_1} \gg V_f \text{ e } V_{i_2} < V_f \Rightarrow V_u = V_{i_1} - V_f \text{ e noto } V_{i_1} \gg V_f \Rightarrow V_u \gg V_f \text{ e quindi } V_u = H$
V_H	V_H	$V_H \rightarrow V_{i_1} = V_{i_2} = V_H \gg V_f \Rightarrow V_u = V_{i_1} - V_f = V_{i_2} - V_f$ $V_u \gg V_f \Rightarrow V_u = H$

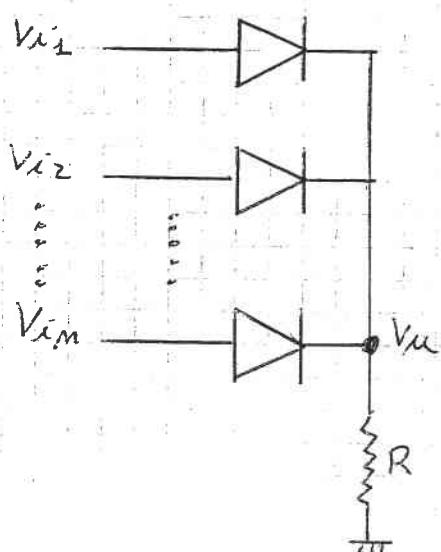


In digitale il circuito è un OR.

- ↳ il circuito è semplice
- ↳ non ottiene il disturbo

OR A N-INGRESSI

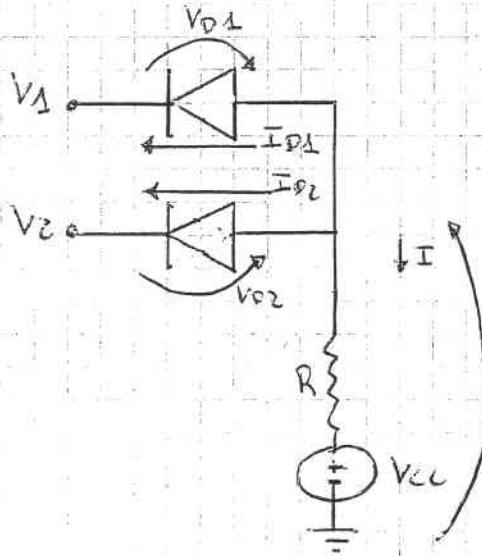
L'or a due ingressi è un circuito reduttore e risulta semplice con un più un diodo in parallelo con l'uscita → in questo circuito si accende il diodo con l'ingresso più alto



→ questa architettura semplice è utilizzata per creare or con un fan-in (= n° di ingressi in una porta) elevato.

→ è alla base delle memorie ROM o EEPROM

CIRCUITO RILEVATORE DI MINIMO, AND



HP : D1 OFF, D2 OFF

$$\begin{aligned} \bullet I_1 = 0, I_2 = 0 \\ I = - (I_1 + I_2) = 0 \end{aligned}$$

$$V_{uu} = V_{cc} + RI = V_{cc} = V_{uu}$$

$$\begin{aligned} \bullet V_{D1} < V_f \\ V_{D1} = V_{uu} - V_1 \end{aligned} \quad \left\{ \begin{array}{l} V_{uu} - V_1 < V_f \\ V_1 > V_{cc} - V_f \end{array} \right.$$

$$\begin{aligned} \bullet V_{D2} < V_f \\ V_{D2} = V_{uu} - V_2 \end{aligned} \quad \left\{ \begin{array}{l} V_{uu} - V_2 < V_f \\ V_2 > V_{cc} - V_f \end{array} \right.$$

HP : D1 ON, D2 OFF

$$\begin{aligned} \bullet V_{D1} = V_f \\ V_{uu} = V_1 + V_{D1} \end{aligned} \quad \boxed{V_{uu} = V_1 + V_f}$$

$$\begin{aligned} \bullet I_1 > 0, I_2 = 0 \\ I = - (I_1 + I_2) = -I_1 < 0 \\ I = \frac{V_{uu} - V_{cc}}{R_D} \rightarrow V_{uu} < V_{cc} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bullet V_{D2} < V_f \\ V_{D2} = V_{uu} - V_2 \end{aligned} \quad \left\{ \begin{array}{l} V_{uu} - V_2 < V_f \\ V_2 > V_{cc} - V_f \end{array} \right. \quad \boxed{V_1 < V_2}$$

HP : D1 OFF, D2 ON

Il circuito è simmetrico e quindi:

$$\boxed{V_{uu} = V_2 + V_f}, \quad \boxed{V_2 < V_{cc} - V_f}, \quad \boxed{V_2 < V_1}$$

HP : D1 ON, D2 ON

$$\begin{aligned} \bullet V_{D1} = V_f \\ V_{D1} = V_{uu} - V_1 \end{aligned} \quad \left\{ \begin{array}{l} V_{uu} - V_1 = V_f \\ V_{uu} = V_1 + V_f \end{array} \right. \quad \boxed{V_1 = V_2}$$

$$\begin{aligned} \bullet V_{D2} = V_f \\ V_{D2} = V_{uu} - V_2 \end{aligned} \quad \left\{ \begin{array}{l} V_{uu} - V_2 = V_f \\ V_{uu} = V_2 + V_f \end{array} \right.$$

$I_1 > 0, I_2 > 0$

$$I = - (I_1 + I_2) = \frac{V_{uu} - V_{cc}}{R} < 0 \rightarrow V_{uu} < V_{cc} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} V_1 < V_{cc} - V_f \\ V_2 < V_{cc} - V_f \end{array} \right.$$

Analisi del comportamento del circuito

per $\begin{cases} V_1 > V_{cc} - V_f \\ V_2 > V_{cc} - V_f \end{cases} \Rightarrow V_{uu} = V_{cc}$; per $\begin{cases} V_1 < V_{cc} - V_f \\ V_2 < V_{cc} - V_f \end{cases} \Rightarrow V_{uu} = (V_1 + V_f)$

per $\begin{cases} V_2 < V_{cc} - V_f \\ V_2 < V_1 \end{cases} \Rightarrow V_{uu} = (V_2 + V_f)$ caso particolare
per $V_1 = V_2 < V_{cc} - V_f \Rightarrow V_{uu} = V_1 + V_f$

↳ se gli ingressi sono alte l'uscita è alta;

↳ se almeno uno degli ingressi è basso e $V_{cc} - V_f$ è uscita "occulta" d'ingresso più basso aumenta notevolmente di V_f

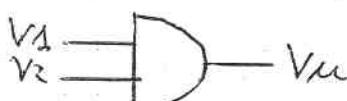
$$V_{uu} = \text{Min} \{ V_1 - V_f, V_2 - V_f, V_{cc} \}$$

Per segnali digitali:

$$V_L < V_f \quad e \quad V_H \approx V_{cc} \gg V_f$$

quando sia V_1 che V_2 sono $> V_{cc} - V_f$
(dove $V_1 - V_f > V_{cc}$ e $V_2 - V_f > V_{cc}$)

V_1	V_2	V_{uu}
V_L	V_L	$V_L \rightarrow V_1 = V_2 < V_{cc} - V_f \rightarrow V_{uu} = V_1 + V_f \approx V_L$
V_L	V_H	$V_L \rightarrow V_1 < V_{cc} - V_f \quad e \quad V_1 < V_2 \rightarrow V_{uu} = V_1 + V_f \approx V_L$
V_H	V_L	$V_L \rightarrow V_2 < V_{cc} - V_f \quad e \quad V_2 < V_1 \rightarrow V_{uu} = V_2 + V_f \approx V_L$
V_H	V_H	$V_H \rightarrow V_1 = V_2 > V_{cc} - V_f \rightarrow V_{uu} = V_{cc} = V_H$

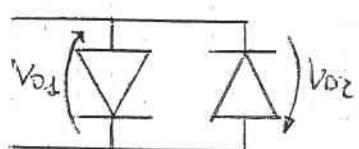


↳ non ha lo caratteristico di resistenza di memoria
↳ è un'architettura facile e quindi è semplice realizzare un AND con n -ingressi aggiungendo n -diode in parallelo → usato per realizzare degli AND con un alto fan-in (utile nelle matrici delle memorie).

Problema del Modello a saglie

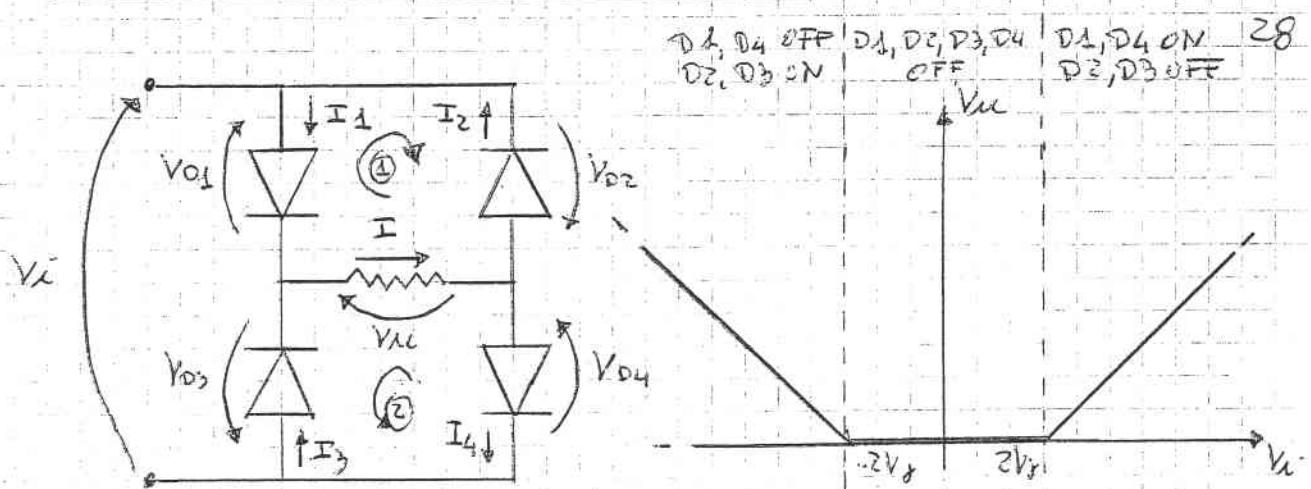
Con n diode si sapeva studiare 2^n combinazioni.

↳ bisogna trovare un criterio ragionevole per ridurre il numero di combinazioni possibili. Ad esempio, nella configurazione di enti parallelo i due diodi non possono essere entrambi su (infatti se con-



$$\left. \begin{array}{l} V_{D1} = V_f, \quad V_{D2} = V_f \quad e \\ V_{D1} + V_{D2} = 0 \end{array} \right\} \text{ASSURDO}$$

RADDIZZATORE A DOPPIA SEMIONDA (PONTE DI DIODI)



↳ Bisognerebbe studiare $2^4 = 16$ combinazioni diverse

↳ Studio delle possibili configurazioni dei diodi:

Hp e D1 ON

$$V_{D1} = V_x$$

$$I_1 > 0$$

$$I = I_1 + I_3 \rightarrow I > 0 \rightarrow V_u = RI > 0$$

$I_3 > 0$ (> 0 se il diodo 3 è chiuso
= 0 se il diodo 3 è aperto)

delle maglie ①

$$V_{D1} + V_{D2} + V_u = 0 \rightarrow V_{D2} = -V_u - V_x$$

maglieria di C

$$\Rightarrow V_{D2} < 0$$

D2 OFF ②

\Rightarrow caso ② quando D1 è ON \Leftrightarrow D2 è OFF

$$I > 0$$

$$I = I_2 + I_4$$

D2 è OFF

$$I = I_4 > 0 \rightarrow$$

D4 ON

④

\Rightarrow caso ④ quando D1 è ON \Leftrightarrow D2 è OFF \Leftrightarrow D4 è ON
(dove sono così perché la corrente $I = I_4 > 0$
deve passare per forza del diodo 4)

Siccome D4 è ON $\rightarrow V_{D4} = V_x > 0$

delle maglie ③ $V_{D4} + V_u + V_{D3} = 0 \rightarrow V_{D3} = -V_u - V_x < 0$
maglieria di C

\Rightarrow caso ③ quando D1 è ON \Rightarrow D2 è OFF \Rightarrow D4 è ON \Rightarrow D3 è OFF

Sappiamo che $I \geq 0$ e quindi $V_u \geq 0$

Hp D4 ON

$$V_{D4} = V_g$$

\Rightarrow caso d)

$$V_{D3} = -V_u - V_g < 0 \rightarrow D3 OFF$$

D4 ON \Leftrightarrow D3 OFF

Hp D2 ON

$$V_{D2} = V_g > 0$$

$$I_2 > 0$$

$$\left. \begin{array}{l} I = I_2 + I_4 \\ I_2 > 0 \end{array} \right\} \rightarrow I > 0 \rightarrow V_u > 0$$

$$V_{D1} = -(V_u + V_{D2}) < 0 \rightarrow D1 OFF$$

\Rightarrow caso e) quando D2 ON \Rightarrow D1 OFF

Siccome D1 è OFF $\Rightarrow I_1 = 0$

$$I = I_1 + I_3 = I_3 > 0 \Rightarrow D3 ON \quad (\text{la corrente può passare solo per il diodo } 1-4 \text{ o } 2-3)$$

\Rightarrow caso f) quando D2 è ON \Leftrightarrow D3 è ON

Siccome D3 è ON $\Rightarrow V_{D3} = V_g$

$$V_{D4} = -(V_u + V_{D3}) < 0 \Rightarrow D4 è OFF$$

Stadio delle tre configurazioni rimanenti

• D1, D2, D3, D4 OFF

$$I_1 = I_2 = I_3 = I_4 = 0$$

$$I = I_1 + I_3 = I_2 + I_4 = 0 \rightarrow V_u = RI = 0$$

$$V_{D1}, V_{D2}, V_{D3}, V_{D4} < 2V_g$$

$$V_i - V_{D1} - V_u - V_{D3} = 0$$

$$V_i - V_u = V_{D4} + V_{D2} < 2V_g$$

$$V_i < 2V_g$$

$$V_i + V_{D2} + V_u + V_{D3} = 0 \rightarrow V_i + V_u > -V_{D2} - V_{D3}$$

$$V_i > -2V_g$$



• D1 ON, D2 OFF, D3 OFF, D4 ON

$$\begin{aligned} V_{D1} &= V_F, \quad V_{D4} = V_F \\ V_i - V_u - V_{D1} - V_{D4} &= 0 \end{aligned} \quad \left\{ \begin{array}{l} V_u = V_i - 2V_F \\ \boxed{V_u = V_i - 2V_F} \end{array} \right.$$

$$\begin{aligned} I_{D1} &> 0 \quad \left\{ \begin{array}{l} I = I_1 + I_3 > 0 \\ I_3 = 0 \end{array} \right. \\ V_u &= RI \end{aligned} \quad \left\{ \begin{array}{l} V_u > 0 \rightarrow V_i > 2V_F \\ \boxed{V_i > 2V_F} \end{array} \right.$$

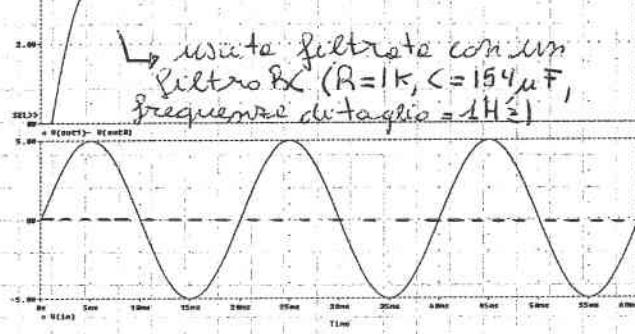
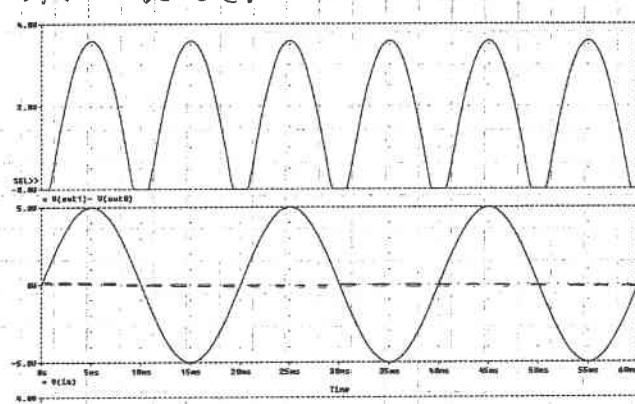
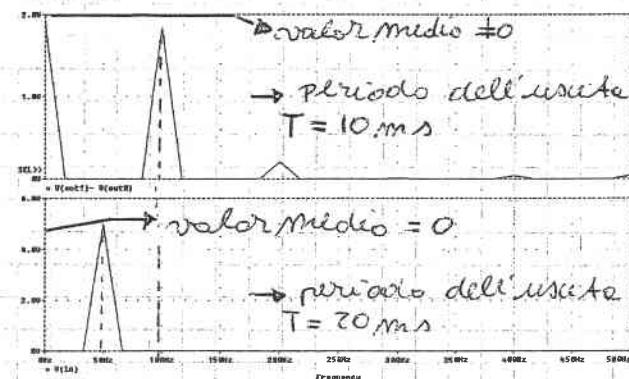
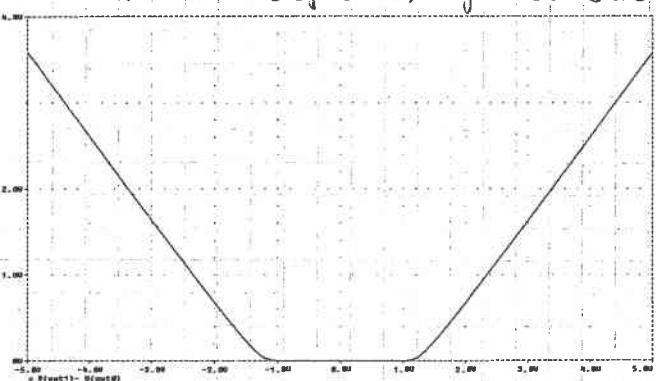
↳ non bisogna verificare le altre ipotesi perché già dimostrate nello studio delle configurazioni possibili

• D1 OFF, D2 ON, D3 ON, D4 OFF

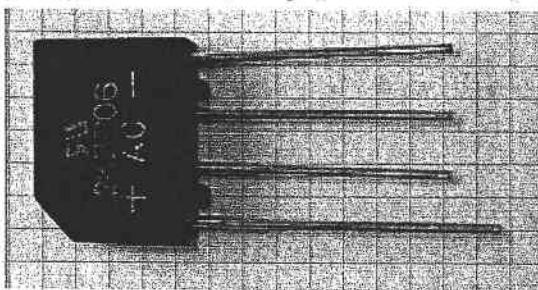
$$V_{D2} = V_F, \quad V_{D3} = V_F \quad \left\{ \begin{array}{l} V_u = -V_i + 2V_F \\ \boxed{V_u = -V_i + 2V_F} \end{array} \right.$$

$$\begin{aligned} V_i + V_{D2} + V_u + V_{D3} &= 0 \\ I_2 &> 0 \quad \left\{ \begin{array}{l} I = I_2 + I_4 > 0 \\ I_4 = 0 \end{array} \right. \\ V_u &= RI \end{aligned} \quad \left\{ \begin{array}{l} V_u > 0 \rightarrow V_i < 2V_F \\ \boxed{V_i < 2V_F} \end{array} \right.$$

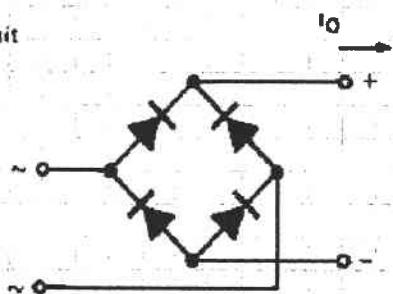
↳ Dalle simulazioni si può vedere che il circuito "reddirige" la sinusode in ingresso → il segnale di uscita ha il valore medio ≠ 0 (come si può vedere dello spettro di Fourier dove in ingresso la sinusode è a 50 Hz) → il circuito è più efficiente del reddirittore a singola tensione (non elimina le porte negative delle sinusode)



PONTE RAPPREZATORE



Circuit



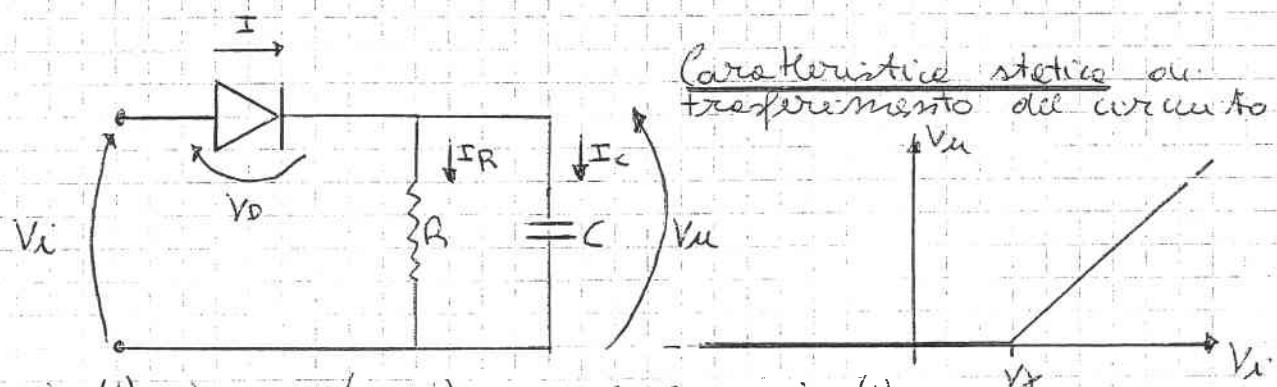
- ↳ utilizzato per la conversione AC/DC (con un filtro passo-basso si isola la componente continua)
- ↳ per ricevere la componente continua basta mettere in parallelo alle resistenze un condensatore che alle basse frequenze è un cortocircuito ($V_u=0$) alle basse frequenze un circuito aperto ($V_u=R \cdot I$).

DIODO A GIUNZIONE PN



STUDIO DEL RADDIZZATORE A SINGOLA SEMIONDA CON UN CONDENSATORE (FILTRANTE)

30



$$V_x(t) = V_m \sin(\omega t) \rightarrow \text{calcolo di } V_u(t)$$

Hp: D ON

$$V_0 = V_x$$

$$V_u = V_x - V_0 \rightarrow V_u = V_x - V_x = V_m \sin(\omega t) - V_x \approx V_m \sin(\omega t)$$

Hp: Considerando $V_m \gg V_x$

$\Rightarrow 220 \text{ V (tensione rete)} \gg 975 \text{ V}$

D'acquo quant.

$$I > 0$$

$$I = I_R + I_C$$

$$I_R = \frac{V_u}{R} = \frac{V_m \sin(\omega t)}{R}$$

$$I = C \frac{dV_u}{dt} = C \omega V_m \cos(\omega t)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{V_m \sin(\omega t) + \omega C V_m \cos(\omega t)}{R} &> 0 \\ I_R + I_C &> 0 \end{aligned} \right\}$$

Nel 1° quadrante

$I_R > 0$ e $I_C > 0$ perché $\frac{dV_u}{dt} > 0$
 ↳ il diodo è acceso

Nel 3° quadrante

$I_R < 0$ e $I_C < 0$ → il diodo è spento

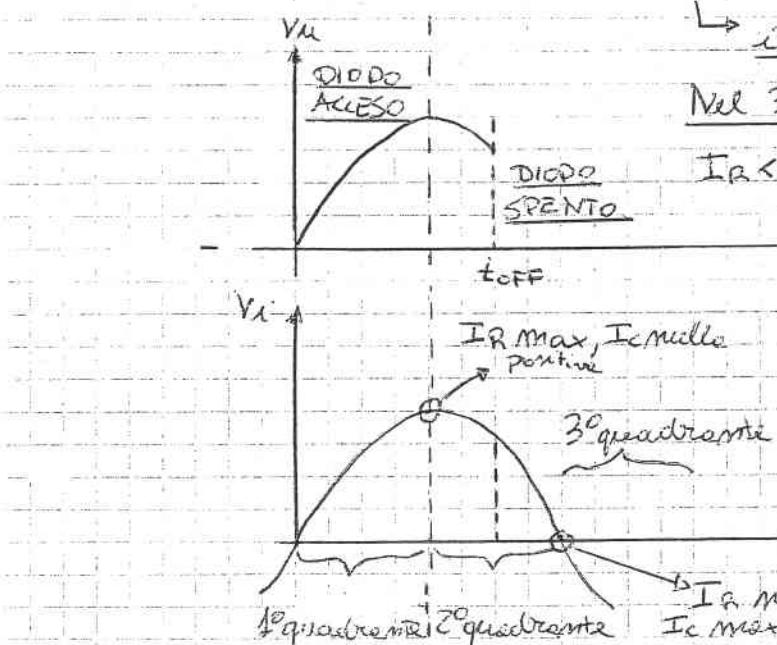
Nel 2° quadrante

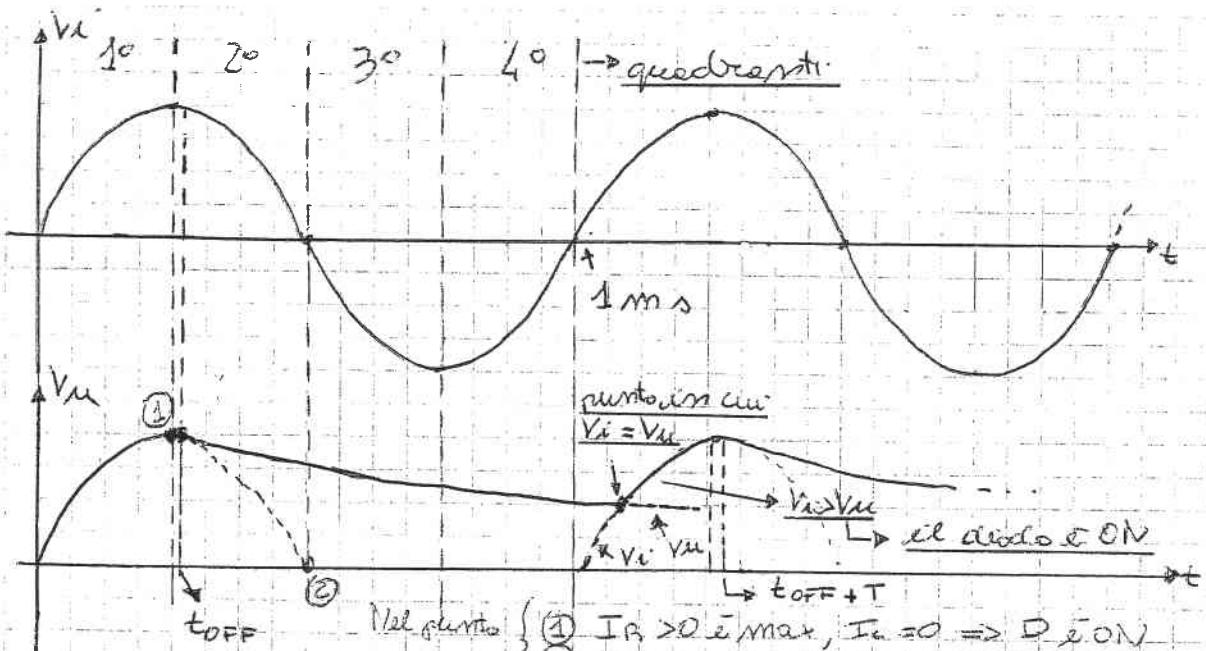
$I_R > 0$ che vale

$I_C < 0$ (perché $\frac{dV_u}{dt} < 0$) ed aumenta

↳ Esiste un punto in cui la corrente cambia di segno

→ a t_{OFF} il diodo si spegne





Il diodo rimane acceso fino a che $I > 0$. Calcolo di t_{OFF})

$$I_R = -I_C \rightarrow \frac{V_M}{R} \sin(\omega t_{OFF}) = -C \omega V_M \cos(\omega t_{OFF})$$

$$\tan(\omega t_{OFF}) = -\omega BC$$

$$\text{Per } R = 1 \text{ k}\Omega; \quad f = 1 \text{ kHz}; \quad C = 1 \mu\text{F} \quad t_{OFF} = \frac{\arctg(-2\pi f BC)}{2\pi f} + \frac{T}{2}$$

$$T = 1 \text{ ms} = \frac{1}{f}$$

$\frac{\pi}{2}$ perché la tangente è periodica di π .

$$t_{OFF} = 0,275 \text{ ms}$$

↳ Il condensatore spegne il diodo prima perché se non ci fosse, il diodo rimarrebbe acceso per tutte le semionde positive.

per $t > t_{OFF}$ il diodo si spegne

D_{OFF}

$$I = I_R + I_C \quad \left. \begin{array}{l} I_R = -I_C \\ I = 0 \end{array} \right\} \rightarrow I_R = -I_C \rightarrow \text{scarica di un circuito RC}$$

$$I = 0$$

$$\text{per } t = t_{OFF} \quad V_u = V_M \sin(\omega t_{OFF}) \Rightarrow Q = C V_u \sin(\omega t_{OFF})$$

$$I_R = \frac{V_u}{R} \quad \left. \begin{array}{l} I_R = -C \frac{dV_u}{dt} \\ I_C = C \frac{dV_u}{dt} \end{array} \right\} \rightarrow \frac{V_u}{R} = -C \frac{dV_u}{dt} \rightarrow \int \frac{1}{V_u} dV_u = -\frac{1}{RC} \int dt$$

$$V_u(t) \Big|_{V_u(t_{OFF})}^{t}$$

$$\frac{t - t_{OFF}}{RC} = \log \left[\frac{V_{u(t)}}{V_{u(t_{OFF})}} \right] \rightarrow V_{u(t)} = V_{u(t_{OFF})} e^{-\frac{(t - t_{OFF})}{RC}}$$

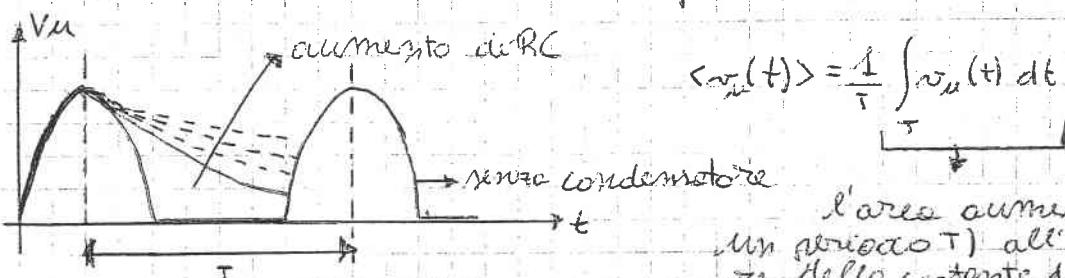
31

limiti di validità

$$\begin{aligned} V_D &< V_S \\ V_D = V_i - V_u &\Rightarrow V_i - V_u < V_S \xrightarrow{0} V_i < V_S \end{aligned}$$

per ipotesi ($V_M \gg V_S$)

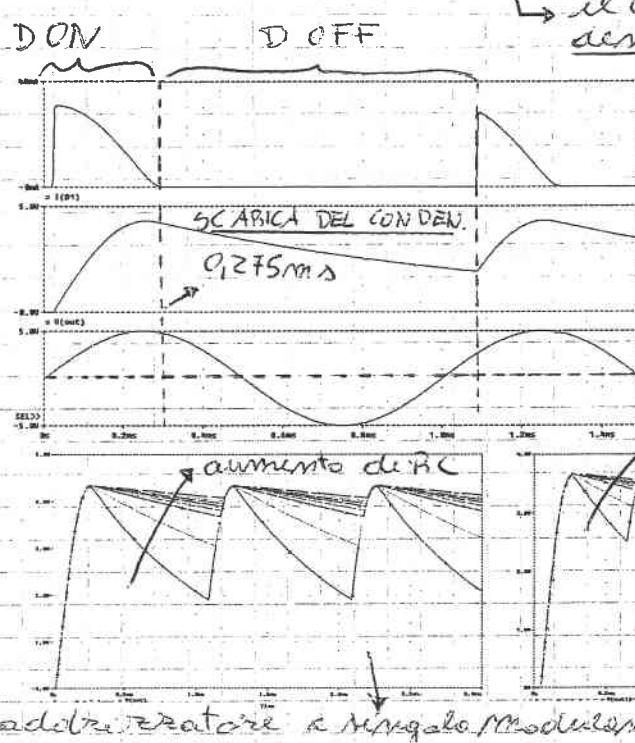
- ↳ RC è la costante di tempo dell'esponentiale
- ↳ più è alto e meno decede l'esponentiale
- ↳ aumenta il valor medio infatti



l'area aumenta (in un periodo T) all'aumento della costante di tempo

- ↳ con un'alta capacità aumenta il valor medio → si può convertire, con alta efficienza, corrente alternata in corrente continua (Nel alimentatori degli eletrodomestici che lavorano in continuo si usa un ponte e diodi e una grande capacità per minimizzare il valor medio).

- dalla simulazione si può vedere che all'aumentare di RC il valor-medio aumenta e V_u tende ad uno costante.
- ↳ per non utilizzare resistenze e capacita elevate si utilizzi un ponte di diodi che redistribuisce le tensioni, diminuendo al "alto" da un'onda e quelle successive e aumentando il valor medio dell'onda.



il circuito si può utilizzare come amplificatore di una modulazione analogico in quanto il condensatore tende ad opporsi a variazioni brusche.



+ aumento del prodotto RC si sposta il punto di caricamento sempre più verso il II

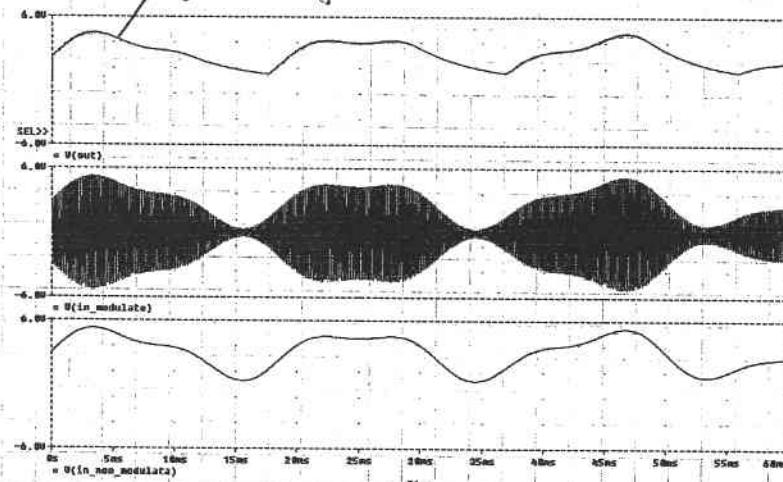
aumento di RC

radioraddrizzatore a singolo Modulante

ponte di diodi

→ Studio del demodulatore

segnale al segnale di partenza o messo di una V_g .



→ segnale con banda
 $B = 100 \text{ Hz}$, frequenza di modulazione
 $f_m = 10 \text{ kHz}$

$$R = 5 \text{ k}\Omega$$

$$C = 1 \mu\text{F}$$

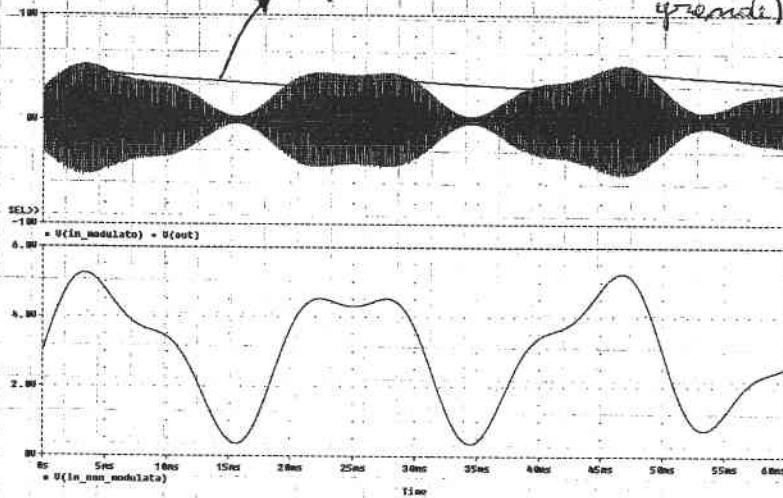
$$B \ll \frac{1}{RC} \ll f_m$$

$$100 \ll 20 \ll 10000$$

→ il filtro elimina la modulante e mantiene quasi inalterato il segnale

⇒ Bisogna reggere opportunamente la costante di tempo.

Segnale di uscita (costante di tempo troppo grande)



→ Segnale con banda
 $B = 100 \text{ Hz}$, frequenza di modulazione
 $f_m = 10 \text{ kHz}$

$$R = 50 \text{ k}\Omega$$

$$C = 1 \mu\text{F}$$

$$100 \ll 20 \ll 10000$$

↓
 Mo → il filtro elimina il segnale.

→ la condizione di progetto (di comunicazione Elettronica)

$$B \leq (RC)^{-1} \leq f_m \quad \text{perché per eliminare la}$$

portante serve che $\frac{1}{RC} \ll f_m \rightarrow$ (filtro passa basso che elime
mina la portante e frequenze fm)

ma non deve eliminare il segnale grande. $\frac{1}{RC} \gg B$

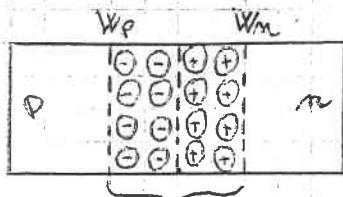
⇒ In questi circuiti si è utilizzata la caratteristica stetica per studiare circuiti dinamici.

→ Bisogna studiare il comportamento del diodo in regime dinamico (al variare della frequenza).

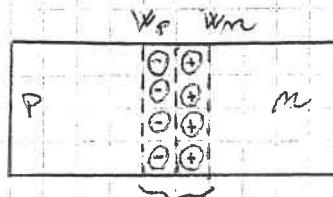
STUDIO DEL DIODO IN REGIME DINAMICO

La Analisi della giunzione in regime dinamico

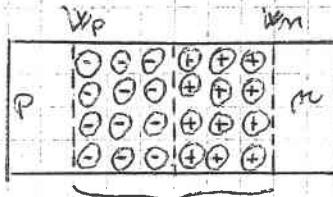
All'equilibrio ($V=0$)



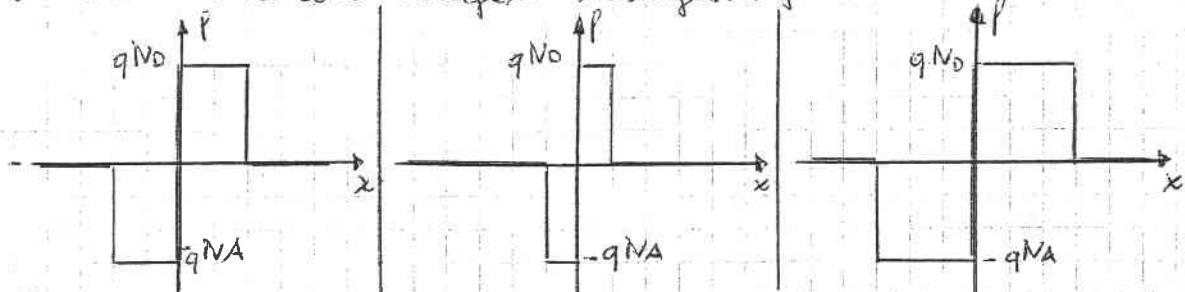
($V > 0$)



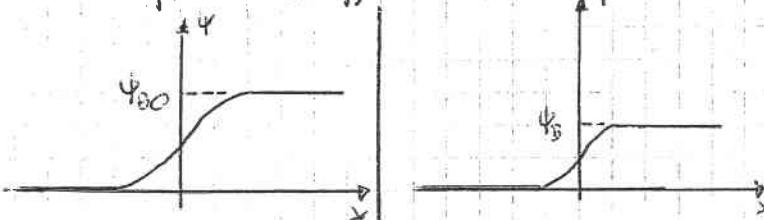
($V < 0$)



regione completamente vuota dei portatori di carica mobile e quindi la densità di carica P è dovuta solo dalla presenza di ioni fissi droganti che, per ipotesi, sono completamente ionizzati. Con N_D e N_A , rispettivamente, le concentrazioni di atomi donatore droganti la regione n e le concentrazioni di atomi accettore droganti la regione p



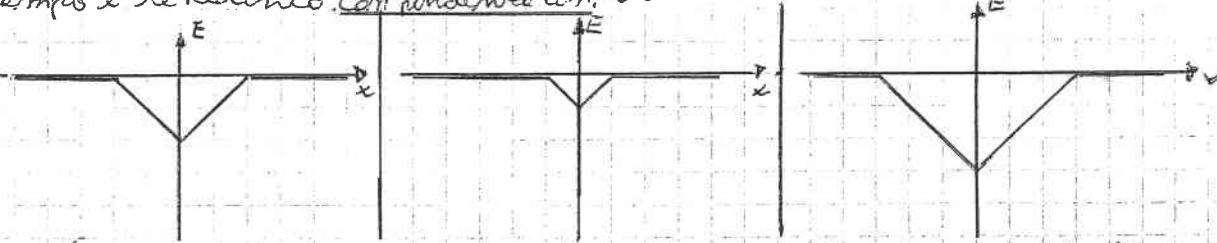
Se crea una regione vuota perché si innesta un campo elettrico e quindi una differenza di potenziale che bilanciano le farre diffuse.



$$\text{Dove } \Phi_{BO} = \frac{kT}{q} \log \frac{N_D N_A}{m_i^2} \quad \text{e } \Phi_B = \Phi_{BO} - V$$

(vale se i contatti Φ_{ENV} e V . Φ_{ENV} sono ohmici e se lo spostamento è piccolo)

Il campo elettrico è negativo perché si deve opporre al movimento di cariche per diffusione. Da $\frac{dE}{dx} = \frac{P}{\epsilon}$ con P costante il campo è rettilineo.



Secome la pendente è costante al variare di Φ_B , che è l'area del campo elettrico, deve variare la base della distribuzione di carica cambia a seconda delle polarizzazione (diretto per $V > 0$ o inverso per $V < 0$) in quanto cambie w_n e $w_p \Rightarrow$ è un procedimento NON ISTANTANEO → bisogna spostare i portatori.

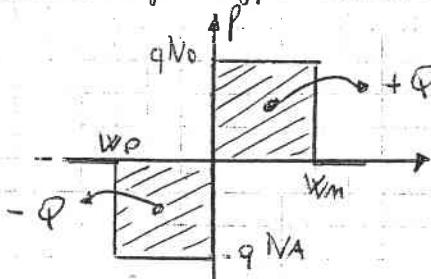
→ lo spostamento richiede un tempo non nullo $F = m \cdot a$

↳ il principio è identico a quello di un condensatore $\alpha = \frac{F}{V}$
 ↳ la differenza tra il condensatore ed il diodo è che nel primo la densità di carica è superficiale nel secondo la densità di carica è di volume (dovette limitate dalle ionizzanti) → per avere più carica, bisogna la densità p nel diodo essere costante, avere più volume

↳ la transizione tra polarizzazione diretta e quella inversa avviene in un tempo non nullo.

↳ Se il tempo di transizione è confrontabile con il periodo dei segnali in ingresso allora non si può utilizzare solo il modello statico

↳ il diodo ha dei tempi di reazione → ha degli effetti reattivi (capacitivi)



$$\text{Se prendo che } W_p = \frac{1}{N_A} \sqrt{\frac{2 \epsilon_s (\Phi_{B0} - V)}{q \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)}}$$

$$Q = P \cdot S \cdot W_p = -q S \sqrt{\frac{2 \epsilon_s (\Phi_{B0} - V)}{q \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)}}$$

volume della
regione invertita

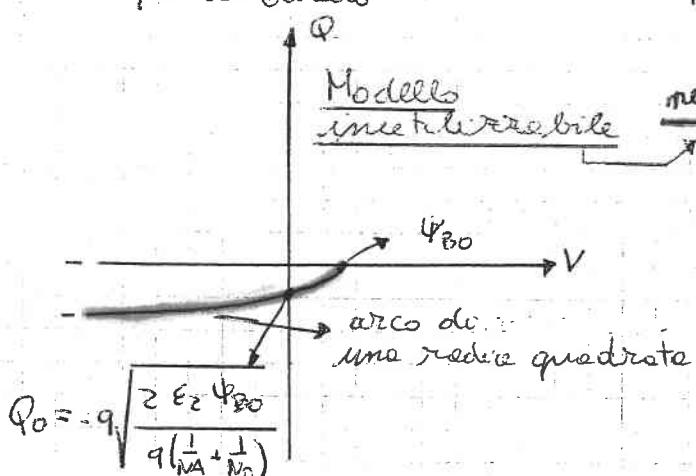
↳ Si pone $S=1$ in quanto si considera per semplicità la carica Q come carica per unità di superficie

$$Q = -q \sqrt{\frac{2 \epsilon_s (\Phi_{B0} - V)}{q \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)}}$$

↳ caratteristica non lineare per il diodo

$$Q = C \cdot V$$

↳ caratteristica lineare per la capacità



per $V > \Phi_{B0} \rightarrow Q$ è la rete di un numero negativo

Non si può utilizzare il modello in questo intervallo nell'ampiezza delle regioni invertite

↳ quando $V > \Phi_{B0}$ l'impedenza sarebbe negativa.

Modello inutilizzabile

↳ cioè l'ipotesi di spostamento completo in quanto le barriere di potenziale sono diminuite e quindi nella giungione c'è carica mobile.

- In polarizzazione diretta la giunzione non è protetta in quanto, predominando la diffusione rispetto al trasferimento, ci sono molti portatori.
- In polarizzazione inversa, invece, il modello è diverso in quanto ψ_B è più alto di ψ_{B0} \Rightarrow diminuisce la diffusione ed aumenta il trasferimento \Rightarrow le uniche careche che stereranno la giunzione sono le careche dei minoritari e non più quelle maggioritarie trasportate per diffusione \Rightarrow la concentrazione di portatori è trascurabile rispetto a quella degli ioni fissi.
 ↳ l'ipotesi di completo trasferimento è sempre di valore, rispetto a quello fatto all'equilibrio, in quanto l'effetto diffusivo è negato ed esiste quello di trasferimento.
 ↳ la variazione Q è dovuta solo agli ioni fissi.

- Studio della carica in polarizzazione diretta

↳ la carica è dovuta non più dagli ioni fissi, ma dai portatori maggioritari.

$$I = \frac{dQ}{dt} \rightarrow \text{corrente dovuta ad effetti resistivi (variazione di carica)} \rightarrow \text{corrente dinamica}$$

$$= \frac{d(Q - Q_0)}{dt} \rightarrow \text{variazione relativa di carica rispetto alla situazione di equilibrio } (Q_0)$$

sono uguali in questo Q_0
 è una costante

$$Q - Q_0 = SQ$$

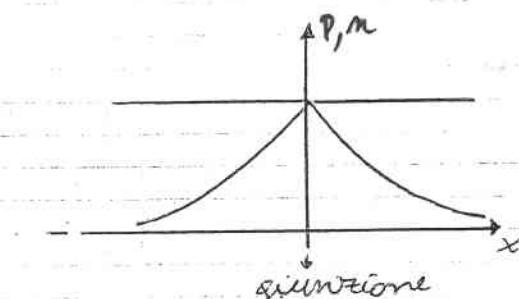
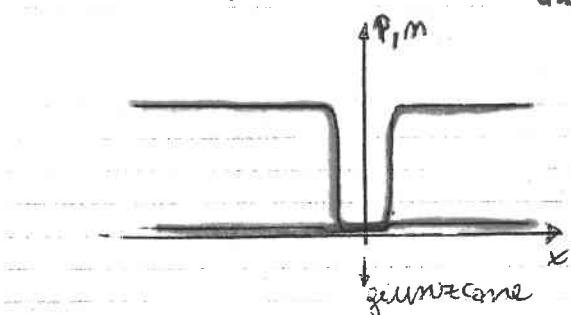
$$I = \frac{d}{dt} SQ \rightarrow (\text{in questo modo c'è un'analogia con il condensatore lineare in cui } V=0 \Rightarrow Q=0)$$

↳ il grafico di $Q(V)$ è traslato verso l'alto di Q_0

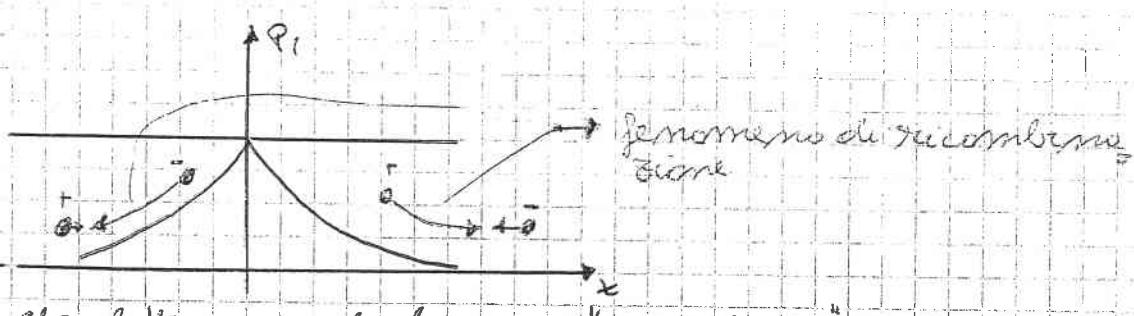
↳ la carica a $V=0$ non è 0 ma non è carica mobile (è solo formato degli ioni fissi)

\Rightarrow In polarizzazione diretta al potenziale V se diminuire il potenziale di barriera \rightarrow corrente prevalentemente diffusiva

$$J_m = q\mu_m m E + qD_m \frac{dm}{dx}$$



↳ distribuzione dei portatori: \rightarrow distribuzione dei portatori con V poco superiore a 0. \rightarrow per $V > \psi_{B0}$



→ gli elettroni e le lacune "scivolano" da dove sono di più a dove sono di meno in quanto la diffusione è ottenuta quando c'è un gradiente di concentrazione ($\frac{dN}{dx}$ ≠ 0).

→ quando le lacune (o elettroni) entrano nella zona P (o N) si riuniscono → la probabilità di riunione è elevata in quanto le lacune (o elettroni) sono "circondate" da elettroni (o lacune).

Fenomeno di riunione $\Rightarrow I > 0$



giunzione

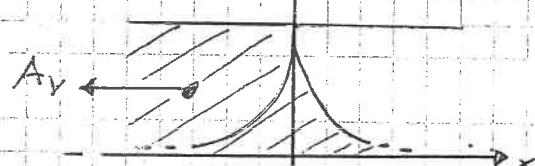
→ la carica viene portata prima del moto delle lacune (o elettroni) e poi, riunendosi degli elettroni (o lacune) che si avvicinano a loro.

\$P, N\$

\$P, N\$



→ all'equilibrio



per \$V > \varphi_{Bo}\$

→ l'area sotto delle curve \$P\$ e \$N\$ è la quantità di carica per unità di superficie

A_{eq} → è la quantità di carica all'equilibrio (per unità di superficie)

A_V → è la quantità di carica in regione di polarizzazione diretta

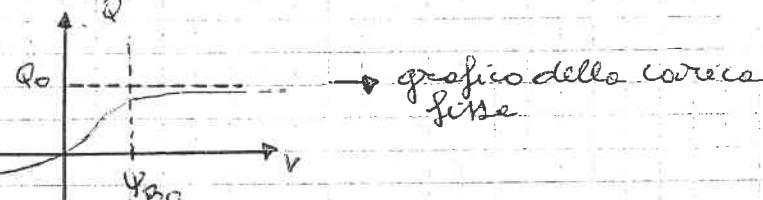
$A_V - A_{eq}$ = è la carica che viene spostata per passare dall'equilibrio alla polarizzazione diretta, per unità di superficie
→ sono le lacune (o elettroni) che necessitano di un tempo finito, non nullo, per spostarsi.

\Rightarrow la carica del condensatore che si crea nel diodo è data da due componenti

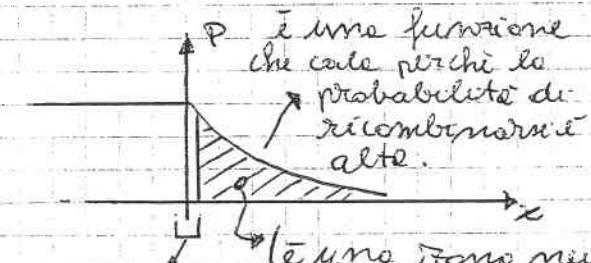
(1) carica fissa: attesa agli ioni "argomati" che non sono bilanciati nella regione di scorrimento dei portatori
 \hookrightarrow prevale in regione di polarizzazione inversa

(2) carica mobile: i portatori non sono "argomati" per effetto di campo e tendono ad invadere la regione opposta
 \hookrightarrow prevale in regione di polarizzazione diretta

\hookrightarrow in polarizzazione diretta la regione neutra non si annulla ma tende a 0 cioè $\delta Q = Q - Q_0 \rightarrow Q_0$



In forte polarizzazione diretta la distribuzione delle concentrazioni è:



P è una funzione che vale perché le probabilità di ricombinazione sono alte.

$\Rightarrow q \mu_m mE = 0$ perché per ipotesi non c'è campo elettrico

$$J_m \approx q D_m \frac{dm}{dx}$$

considerando la resistenza trascurabile $S=1$

$$I = q D_m \frac{dm}{dx} \quad (\text{è una zona neutra})$$

$$\text{le diverse di carica si avrà e, } I = q D_m \frac{dm}{dx}$$

queste nuove aree

\hookrightarrow carica in zone neutre che sostiene le diffusione

$$\frac{V}{V_T}$$

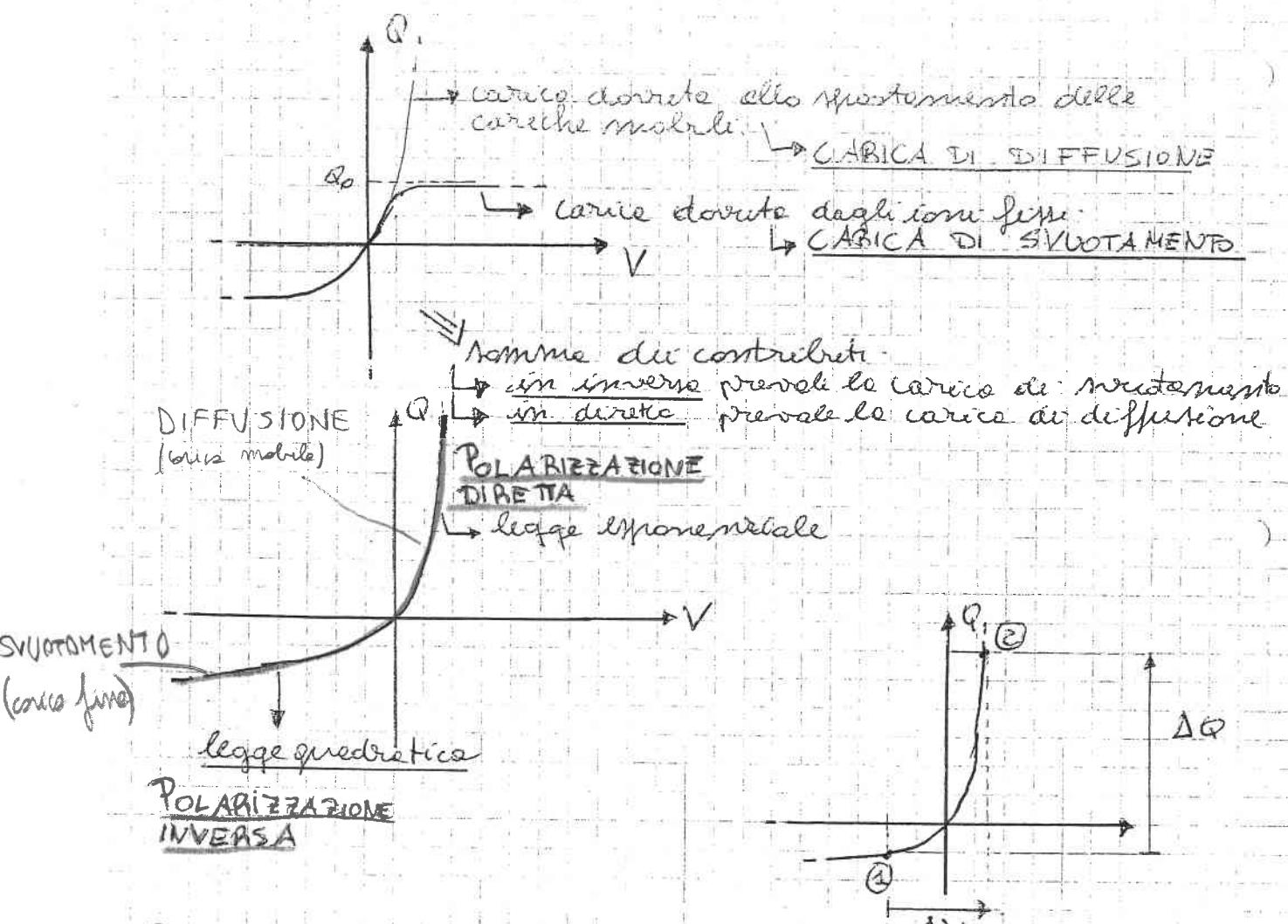
trascurando di effettuare reazioni: $I = I_S (e^{-\frac{V}{V_T}} - 1)$

Quindi $\frac{dm}{dx}$ dipende esponenzialmente dalla tensione

\hookrightarrow anche $\delta Q = Q_S (e^{\frac{V}{V_T}} - 1) \rightarrow$ variazione relativa di carica

\Rightarrow questa distribuzione di carica è quella necessaria a sostenere la corrente diffusiva la cui espressione dipende esponenzialmente dalla tensione

• Grafico dei due contributi di carica



Per passare dalla regione di polarizzazione inversa ① alla regione di polarizzazione diretta bisogna "spostare" una quantità ΔQ di carica \rightarrow scorrere del tempo

• Studio del modello dinamico del diodo

In polarizzazione diretta

$$\left. \begin{aligned} Q &= Q_s (e^{\frac{V}{V_T}} - 1) \\ I &= I_s (e^{\frac{V}{V_T}} - 1) \end{aligned} \right\} \frac{Q}{I} = \frac{Q_s}{I_s} \frac{e^{-1}}{e^{\frac{V}{V_T}} - 1} = \tau \rightarrow \text{ho le dimensioni di un tempo}$$

corrente del diodo ideale, senza lo studio di effetti reattivi

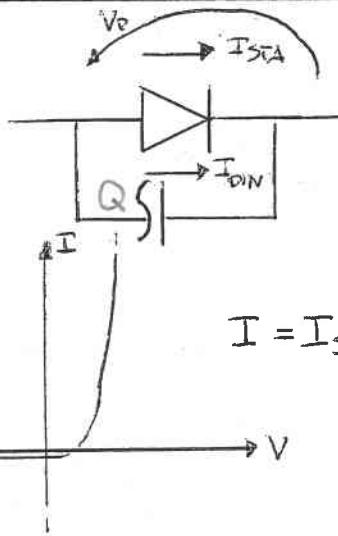
$$Q = \tau I$$

moltiplicando per τ
 tempo d'iride medie dei portatori (distanza temporale tra la creazione e la ricombinazione della coppia eltron - hole - decimo).

→ Maggiore è γ e, a parità di corrente, Q è meggiore

↳ in regione di polarizzazione la varice è dovuta alle负电荷 (elettroni) che si trovano nelle zone n (o p) → più alto è γ più il loro portatore e c'è più varice.

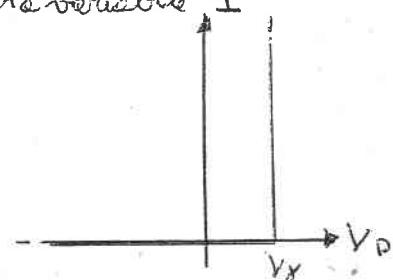
MODELLO A SOGLIA "DINAMICO" DEL DIODO



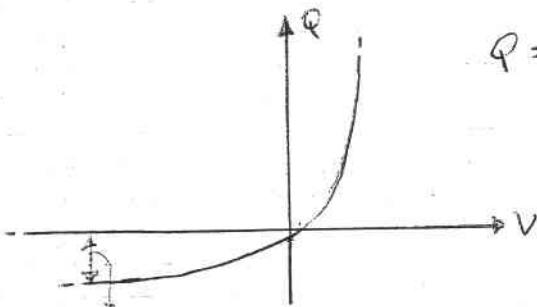
$$I_D = I_{STA} + I_{DIN}$$

parallelo del diodo diode comune capacità variabile I

$$I = I_S \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right)$$



$$Q = \gamma I$$

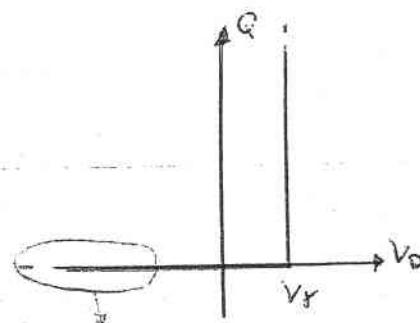


la differenza di **carica** nominale
rispetto → corrente nulla e la ca-
pacità è variabile in funzione
della tensione

↳ il diodo polarizzato in inverso
può essere utilizzato come uno
condensatore variabile in quanto
 $C = \frac{dQ}{dV}$ varia in funzione di V

↳ diodi varice

↳ sostanzialmente la capacità
variabile in modo meccanico
(variazione della superficie)



Regione di polarizzazione
regione non lineare
ma soltanto alla frequenza
di circuiti digitali

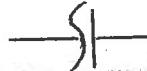
POLARIZZAZIONE DIRETTA

$$Q > 0, V = V_T, Q = \gamma I$$

POLARIZZAZIONE INVERSA

$$V < V_T, Q = 0, I = 0$$

MODELLO A CONTROLLO DI CARICA

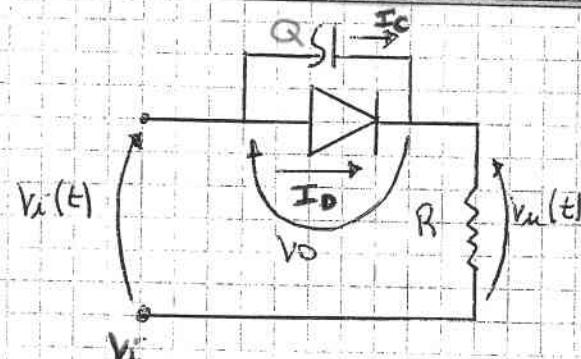


Condensatore
non lineare
approssimato con
il modello a
soglia

RADDIZZATORE A UNA SEMIONDA

RISPOSTA AL GRADINO IN DISCESA DEL CIRCUITO

RADDIZZATORE A SINGOLA SEMIONDA



$$V_D = V_B - V_R$$

$$V_B = V_S$$

$$V_R = -V_D$$

$$V_B = V_S$$

$$V_R = V_D - V_S$$

$$-V_D - V_S$$

$$V_B = V_S$$

$$V_R = -V_D$$

$$\frac{V_S - V_D}{R}$$

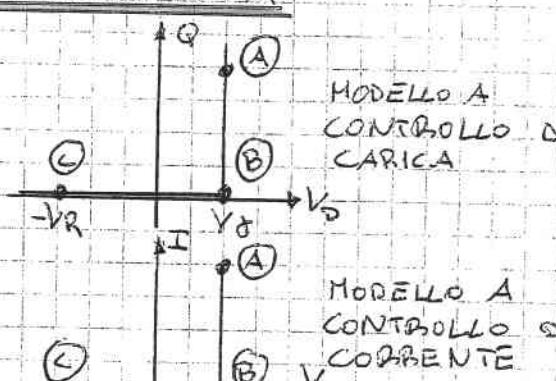
$$\frac{(V_S + V_R)}{R}$$

$$\frac{2(V_S - V_D)}{R}$$

$$Q$$

$$t_B$$

$$-\frac{2}{R}(V_D + V_S)$$



1° grafico con $V_S > V_D$

$V_S \rightarrow$ forward (direct)

$V_D \rightarrow$ reverse (inverse)

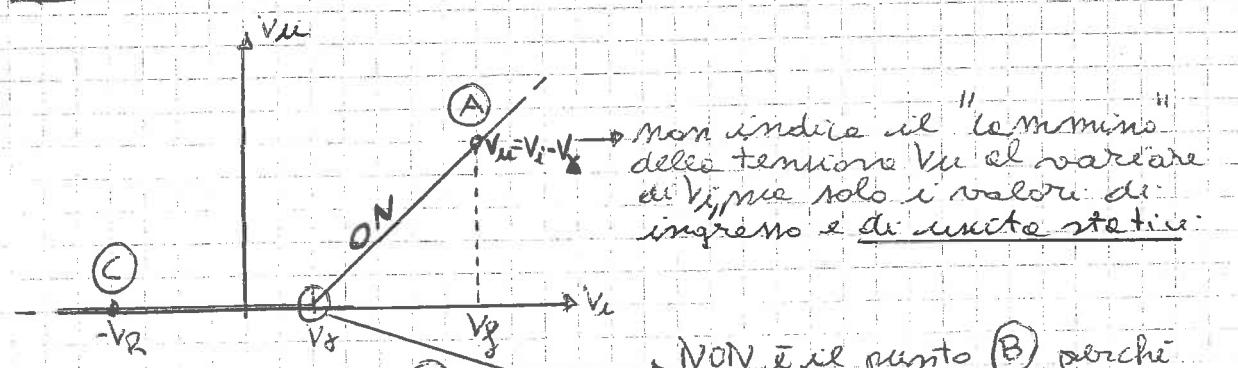
2° grafico

3° grafico

I è la corrente che scorre realmente sul diodo.
Ic e Id sono solo correnti "impostate" per modellare il diodo.

4° grafico

Caso Caratteristico Statico - Caratteristica di trasformamento 36



$$\text{Se come } V_g > V_i \Rightarrow V_u = V_g - V_i \quad \text{grafico (1)}$$

$$I = I_0 + I_c$$

$$I = \frac{V_u}{R} = \frac{V_g - V_i}{R} \quad \text{grafico (2)}$$

$$I_0 = \frac{Q}{\tau} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} I = \frac{Q}{\tau} \Rightarrow Q = \frac{\tau}{R} (V_g - V_i) \quad \text{grafico (3)}$$

$$I_c = \frac{dQ}{dt} = 0$$

condizione statica

- per $t > 0, t \rightarrow +\infty \rightarrow \text{fine del transitorio} \rightarrow \text{condizione statica}$

↳ punto C

$$V_i = -V_R < 0 < V_g \rightarrow V_u = 0 \quad \text{grafico (4)}$$

$$V_o = V_i - V_u = -V_R < 0$$

$$I = \frac{V_u}{R} = 0 \rightarrow I = 0 \quad \text{grafico (5)}$$

$$I = I_0 + I_c \quad \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} I = I_0 = 0 \Rightarrow Q = 0 \quad \text{grafico (6)}$$

$$I_0 = \frac{Q}{\tau}$$

$$I_c = \frac{dQ}{dt} = 0 \quad \text{condizione statica}$$

↳ le tensioni non varia in modo effettuale, come in un circuito RC, perché la capacità non è lineare.

- da $\textcircled{A} \rightarrow \textcircled{B}$, $t > 0$ e $t = 0^+$ subito dopo la commutazione.

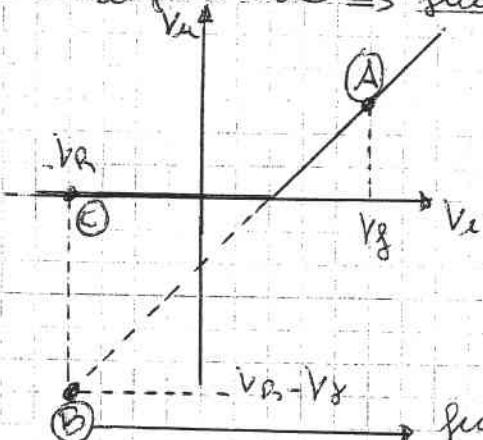
$$\begin{aligned} \text{DioN} \rightarrow V_0 = V_f \\ V_i = -V_R \\ V_u = V_i - V_0 \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} V_u = -V_R - V_f \\ \end{array} \right\}$$

$$I = \frac{V_u}{R} = \frac{(V_R + V_f)}{R} = I$$

grafico $\textcircled{2}$

grafico $\textcircled{3}$

\hookrightarrow a $t = 0^+$ la giunzione del diodo può condurre una corrente negativa anche se la sua tensione è positiva \Rightarrow fuori dalla caratteristica stetica.



fuori dalla caratteristica stetica perché a $t = 0^+$ $V_u(t)$ sta varcando.

Dal principio di conservazione delle cariche

$$Q(0^+) = Q(0^-) = \frac{\epsilon}{R} (V_f - V_R)$$

e' andamento della carica nel tempo è stato calcolato differenziando.

$$\begin{aligned} I = I_D + I_C &\quad \left. \begin{array}{l} \frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{\epsilon} = -\frac{(V_R + V_f)}{R} \\ I_D = \frac{Q}{\epsilon} \end{array} \right\} \Rightarrow -\frac{dQ}{dt} = \frac{Q}{\epsilon} + \frac{V_R + V_f}{R} \\ I_C = \frac{dQ}{dt} &\quad \int \frac{dQ}{Q + \frac{\epsilon}{R}(V_R + V_f)} = -\frac{1}{\epsilon} \int dt \end{aligned}$$

$$-\frac{t}{\epsilon} = \log \left[\frac{Q(t) + \frac{\epsilon}{R}(V_R + V_f)}{\frac{\epsilon}{R}(V_f - V_R) + \frac{\epsilon}{R}(V_R + V_f)} \right] \quad \hookrightarrow Q(0)$$

grafico $\textcircled{4}$

$$e^{-\frac{t}{\epsilon}} = \frac{Q(t) + \frac{\epsilon}{R}(V_R + V_f)}{\frac{\epsilon}{R}(V_f - V_R)} \Rightarrow$$

$$Q(t) = \frac{\epsilon}{R} (V_f - V_R) e^{-\frac{t}{\epsilon}} - \frac{\epsilon}{R} (V_R + V_f)$$

\hookrightarrow vale fino a che $Q = 0$ (tende asintoticamente a $-\frac{\epsilon}{R} (V_R + V_f)$)
 $\hookrightarrow V_u$ e I sono costanti.

→ il condensatore non lineare mantiene, dopo $t=0^+$, per un breve periodo, la tensione costante (cioè non coincide con il condensatore lineare, infatti per $t=0^+$ $V_C(0^+)$ sarebbe pari a $-\frac{V_A + V_F}{R}$ e poi calerebbe subito esponenzialmente).

↳ questo accade perché le cariche sul condensatore decresce in modo esponenziale mantenendo costante la tensione sul diodo (come dice il modello $\rightarrow V_D = V_F$ per $Q > 0$)

↳ questa situazione cambia quando $Q=0$ e quindi V_D non è più vincolato a V_F .

Calcolo di t_B (tempo in cui le cariche si annullano)

t_B è il tempo di spegnimento del diodo (tempo che intercorre per passare dalle regioni di polarizzazione diretta e quelle inverse)

$$Q(t_B) = 0 \rightarrow \frac{V}{R} (V_F + V_R) e^{-\frac{t_B}{\tau}} - \frac{V}{R} (V_A + V_F) = 0$$

$$e^{-\frac{t_B}{\tau}} = \frac{V_A + V_F}{V_R + V_F}$$

$$t_B = \tau \log \left(\frac{V_F + V_R}{V_F + V_A} \right)$$

→ dimensioni di un tempo

t_B dipende dal tempo τ (tempo di vita dei portatori)

t_B è maggiore di 0 perché $\frac{V_F + V_R}{V_F + V_A} > 1$

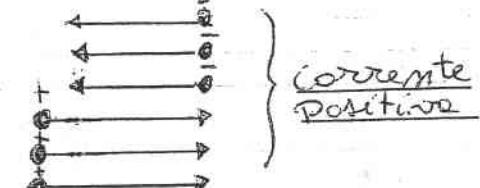
↳ non dipende dal valore della resistenza (come invece accade in un circuito RC)



per $t < 0$ lo scarico è dovuto ai portatori mobili per effetto di diffusione

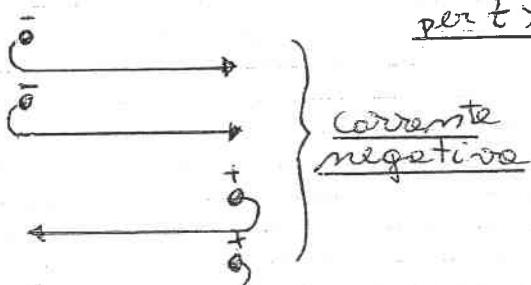
↳ la zona p è popolata da elettroni in eccesso (a causa della diffusione)

↳ la zona n è popolata da lacune in eccesso (a causa della diffusione)



per $t > 0$ → il diodo cerca di andare in regione di polarizzazione inversa: l'eccedenza di elettroni nella zona p è quella di lacune nelle zone n deve diminuire

↳ gli elettroni e le lacune tornano indietro



Quindi l'intervallo $[0, t_B]$ serve a "smaltire" la quantità di carica accumulata per diffusione in eccesso rispetto a quella di equilibrio (cioè δQ)
 ↳ bisogna aspettare che la variazione relativa di carica rispetto all'equilibrio ($\delta Q = Q - Q_0$) si riduca.

↳ durante lo "svuotamento" il potenziale cei cori della generazione varia poco (nel modello è negativo e costante, nelle practice varia lungo il ramo di un esponenziale (varia in modo logaritmico))

t_B = tempo di storage, di svuotamento

↳ tempo necessario a ripristinare l'equilibrio

⇒ Il diodo per negarsi ha bisogno di un tempo t_B

↳ se il tempo t_B è confrontabile con il periodo del segnale in ingresso allora il diodo non si comporta in modo ediale (Ad esempio il circuito zenerdiodeseratore è singolarmente non si comporta come studiato precedentemente)

• da B → C $t > t_B$

$$I = I_0 + I_C \quad \left\{ \begin{array}{l} I=0 \\ I_0 = \frac{Q}{Z} = 0 \end{array} \right. \rightarrow V_{th} = R I = 0 \quad \text{grafico } ②, ③$$

$$I_C = \frac{dQ}{dt} = 0$$

del modello

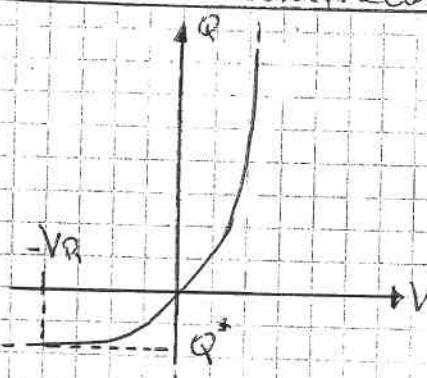
$$Q = 0 \quad \text{grafico } ④$$

$$V_0 = V_i - V_{th} = -V_R$$

↳ la carica qui a t_B è nulla e quindi per andare dal punto B al punto C al tempo necessario è nullo

↳ è impreciso affermare che V_{th} ed I diventino istantaneamente nulli in un tempo insensibile

• Studio dell'imprecisione del modello

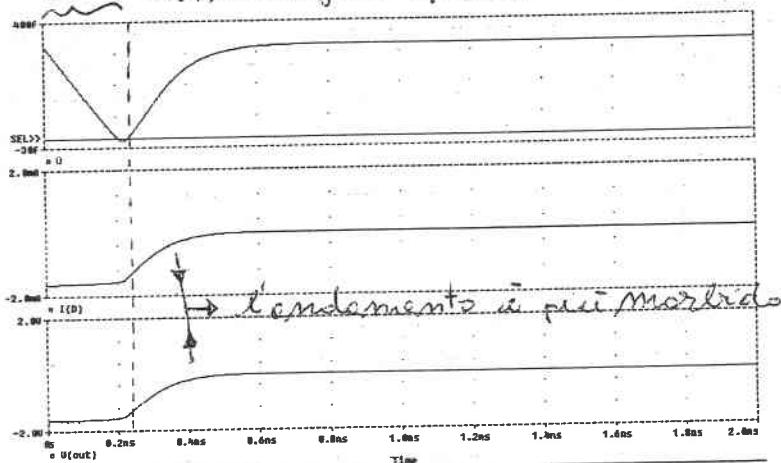


Quando si passa da V_0 a $-V_R$ la carica è diversa da zero, è debolmente negativa

↳ la curva è una radice quadrata.

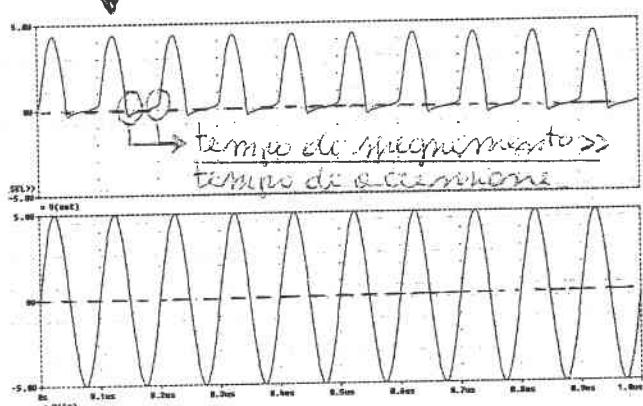
Nella simulazione l'ingresso commutato da $+V_c - V_{DD}$ 30
(non riportato nell'immagine).

tempo di storeedge $\approx 0,2 \text{ ms}$

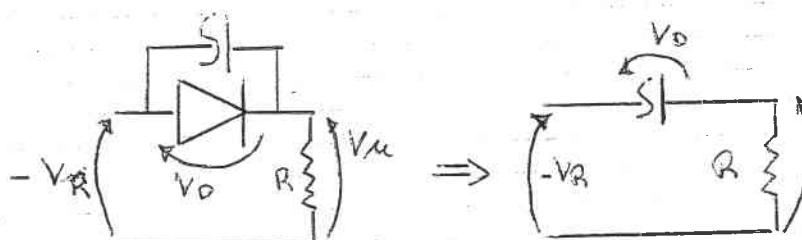
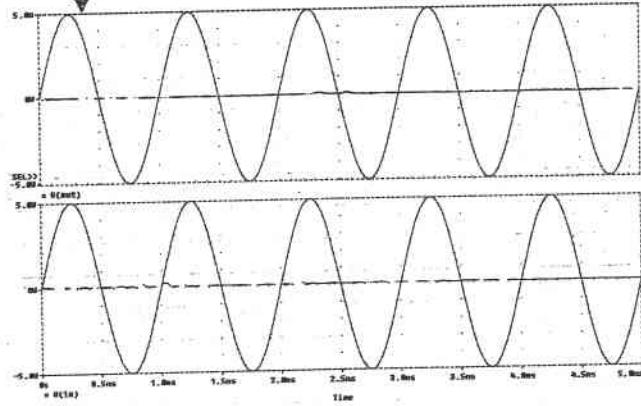


a frequenze elevate
(da 10 MHz in poi)
l'effetto del tempo di
ristoramento si fa sentire

V_i sinusoidale a 10 MHz



V_i sinusoidale a 1 GHz



\Rightarrow Se come $V_D < V_R$ il diodo si può
eliminare con una precisione
accorta (perché la corrente è
casi uguale a I_S)

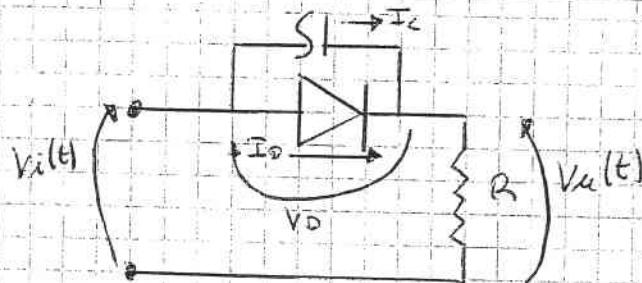
transistor di scarico
nel condensatore
la corrente passa da 0
a Q^* in un tempo
non nullo
 $\Rightarrow V_D$ parte da V_T e
 $-VR$ in un tempo
non nullo come
 $V_H = -VR - V_D \rightarrow 0$.

In conclusione

- Il tempo di storeedge è indipendente dalle resistenze
(in quanto è dovuto ad uno spostamento di portatore
nella funzione)
- Il secondo transistore (idealmente nullo) dipende delle
resistenze perché è un trasistor RC in cui la
capacità non è lineare. \Rightarrow più è alta la resistenza
e più è lungo il secondo transistore

RISPOSTA AL GRADINO IN SALITA DEL CIRCUITO

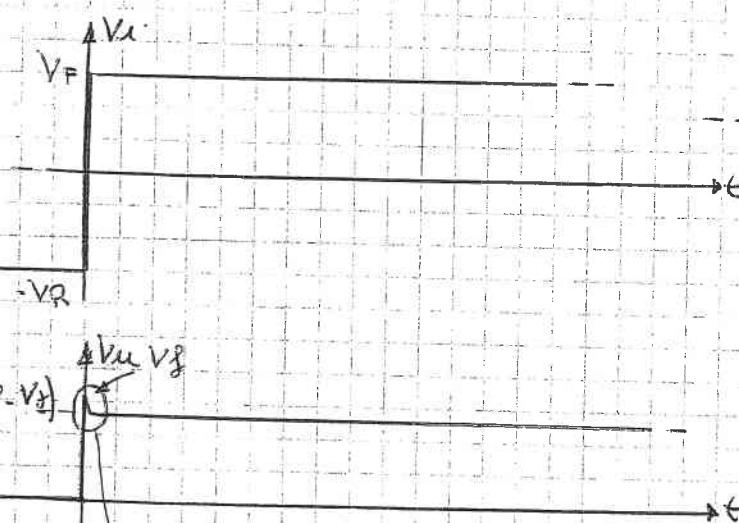
RADDIZZATORE A SINGOLA SEMIONDA



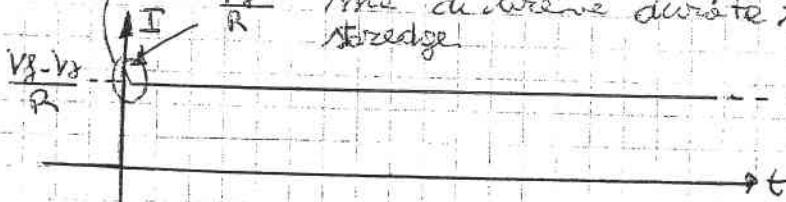
$\rightarrow Q$

(A) \rightarrow tempo delle caratteristiche che causano il ritardo.

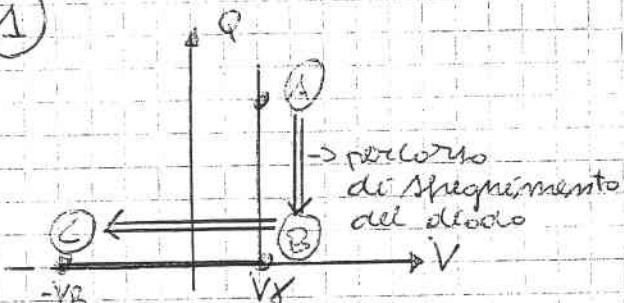
(B) \rightarrow V_o



idealmente (secondo il modello) il transitorio è nullo, realmente dipende da R.
che diventa diverso rispetto al tempo di storage.



(1)



→ il diodo rimane per un tempo finito a tensione costante → ritardo

per $t < 0$ punto (C) → condizione statica

$$V_{ci} = -V_R, V_{ui} = 0, I = 0, Q = 0$$

• de (C) → (B) $t = 0$

$V_{ci} = V_f \rightarrow$ la tensione nelle capacità non può saltuarmente cambiare

$$V_{ui}(0) = V_f \quad (\text{come in un condensatore normale})$$

→ in un tempo nullo (in realtà in un tempo breve in cui il transitorio dipende della resistenza \Rightarrow carica B_C)

$$V_{ui} = V_f - V_R \quad \text{imposto } V_0 \rightarrow V_f.$$

$$I = \frac{V_f - V_R}{R} \quad Q = 0$$

• de (B) → (A)

→ solo la carica si modifica con un transitorio portandone

$$Q = \frac{C}{R} (V_f - V_R) \rightarrow \text{il transitorio non modifica né } V_u \text{ né } I \text{ che sono già in regime.}$$

Conclusioni

Per spegnere il diodo

(1) bisogna prima percorrere il tratto verticale (ritardo) e poi ri-spegnere il diodo

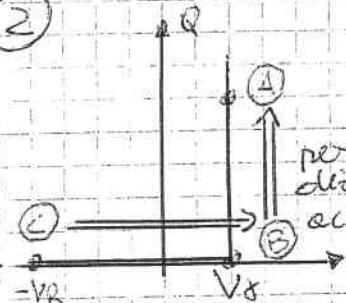
Per accendere il diodo

(2) bisogna prima percorrere il tratto orizzontale (tempo nullo) e poi ri-accenderlo

Non c'è il tempo di storage.

TEMPO DI SPENNIMENTO	»	TEMPO DI ACCENSIONE
----------------------	---	---------------------

(2)



→ il diodo, ricordando il modello, impiega un tempo nullo a partire da $-V_R$ e $V_f \Rightarrow$ fine del transitorio di V_{ci}
→ poi aumenta la carica Q .

Riassunto sul Diodo

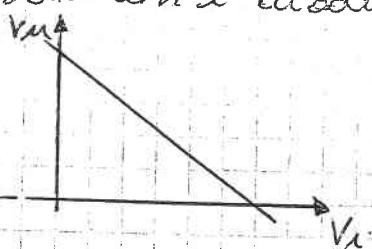
Caratteristiche del diodo

- ↳ la corrente di polarizzazione diretta \Rightarrow corrente di polarizzazione inversa
- ↳ il diodo è "lento" e spagnerei (perché la polarizzazione diretta acciunica carica mobile, per effetto di diffusione, che deve avere "moltite" prima di poter spagnire il diodo ed andare in polarizzazione inversa).
- ↳ il diodo è "veloce" ad accendersi (perché la polarizzazione inversa non acciunica carica mobile)
- ↳ il transitorio di spagnimento è dell'ordine di qualche nano secondo \rightarrow massima frequenza utilizzabile per non sentire i fenomeni reattivi è qualche centinaia di KHz.
- ↳ circuiti circolari:
 - redibitorio \rightarrow per estrarre la componente continua da un segnale alternato
 - limitatore (e toglie variabile)
 - funzione logiche \rightarrow porte AND
 - " \rightarrow porta OR
 - Non tolgono il rumore, aggiungono al segnale di ingresso una V_f \rightarrow aumentano il rumore
 - Sono facili \rightarrow possono realizzare porte logiche con fan-in alto.

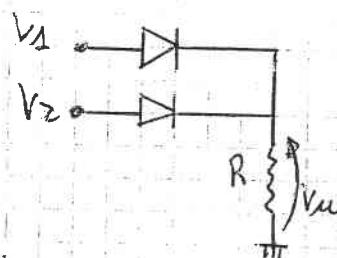
Problemi

- Le porte logiche non tolgono il rumore (o l'usata è bloccata ed una costante DOFF o l'usata segue l'ingresso DON).
- Non si può realizzare l'invertitore, parte fondamentale nelle reti logiche.
 - ↳ con i diodi $V_u = V_i \pm V_f \rightarrow$ caratteristica è rendere positiva

L'invertitore deve avere una caratteristica dove l'ingresso basso corrisponde un uscita alta e viceversa \Rightarrow serve una pendenza negativa, irrealizzabile con i diodi.



Esempio di caratteristica di un invertitore



- ↳ se uno dei diodi è occiso $V_u = V_i - V_f$ \rightarrow l'uscita segue l'ingresso non togliendo il rumore.