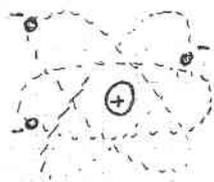


SEMICONDUCTORI

Per studiare le caratteristiche corrente-tensione dei circuiti basati su strutture a semiconduttore bisogna studiare il flusso di cariche degli elettroni che si muovono nei 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 "posizione" deriva dal bilanciamento di due forze: una dovuta all'accelerazione centripeta, 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 della loro distanza.

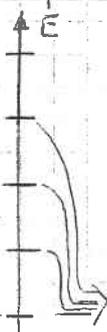
Più "veloce" l'elettrone gira attorno al nucleo più larga è la sua orbita e quindi minore è l'energia di legame con i protoni in quanto è inversamente proporzionale al quadrato della distanza.

L'elettrone, oltre alle sue proprietà di materia corpuscolare (cioè ha una massa discreta che risponde alle leggi della meccanica classica), ha proprietà ondulatorie idioaltre: 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 energia.

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

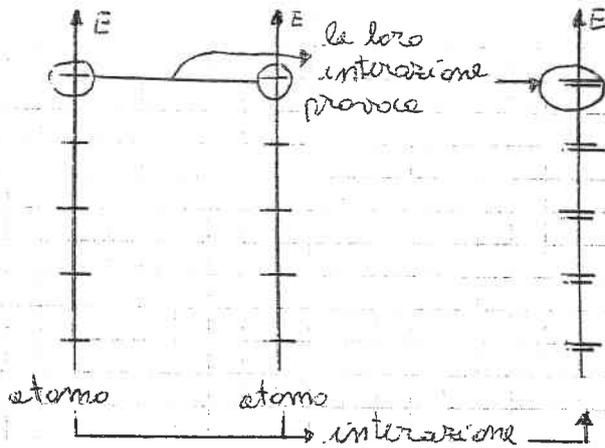
- diversi per ogni tipo di atomo
- distribuiti non continuamente
- occupati al più da due elettroni (con spin opposto) ⇒ il numero di elettroni per ogni livello è finito



↳ 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 occupare la posizione con il livello di energia inferiore.

Un materiale è un insieme di atomi che interagiscono tra di loro cioè gli elettroni di un atomo sentono la presenza 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 dei 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 distinti. Le proprietà rimangono uguali in particolare, l'energia è discretizzata in livelli in cui può stare un solo elettrone (coppie di spin opposti).

• Modello a bande energetiche

L'interazione di più atomi provoca l'arricchimento di rispettivi livelli \rightarrow si formeranno "gruppi" di livelli, nel quale c'è sempre un'alternanza tra regioni ricche di livelli (permesse) e regioni proibite.



Modello a bande \Rightarrow le sono intervalli in cui c'è un elevato numero di livelli tutti discreti.

\hookrightarrow la distribuzione NON È CONTINUA

\hookrightarrow 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 portandosi da quelle con poca energia.

\hookrightarrow livello energetico di Fermi \Rightarrow livello limite al di sotto del quale, in assenza di perturbazione, tutti i livelli energetici sono occupati e al di sopra del quale tutti i livelli energetici sono vuoti.

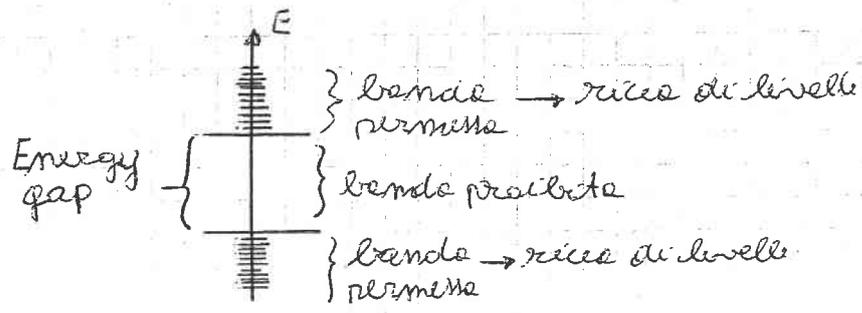
\hookrightarrow la caratteristica di un materiale dipende dalla posizione del livello energetico di Fermi.

• Tipologia di un materiale

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

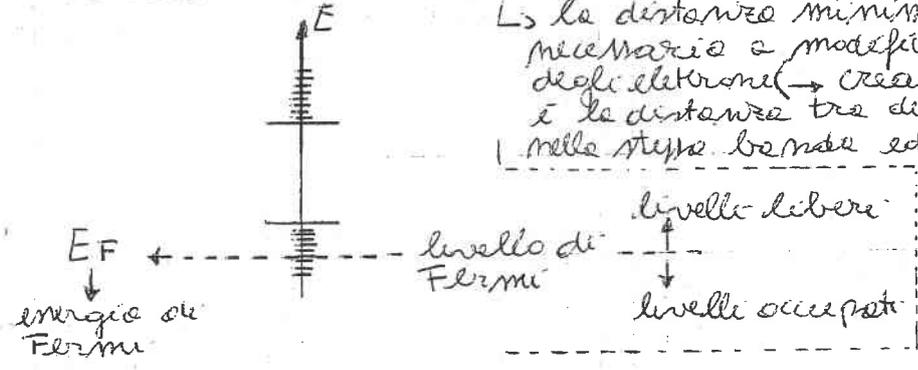
\hookrightarrow Per avere corrente, quindi, occorre che

- 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

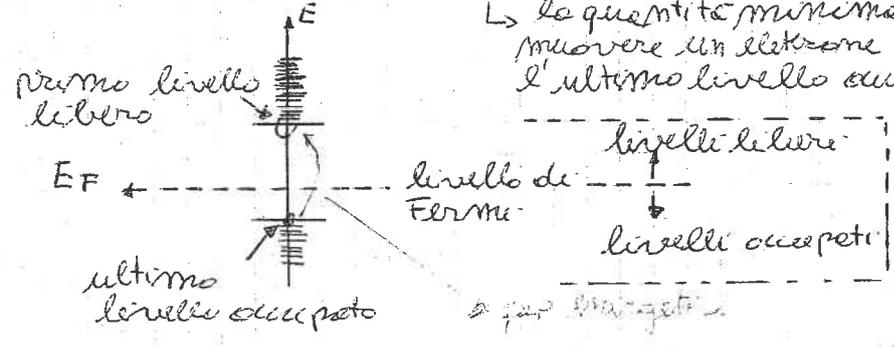
Il livello di Fermi cade in una banda permessa



↳ la distanza minima di energia necessaria a modificare lo stato energetico degli elettroni (→ creazione di corrente) è la distanza tra due livelli che stanno nelle stesse bande ed essendo le bande dense di livelli l'energia necessaria è piccola

↳ Materiali isolanti

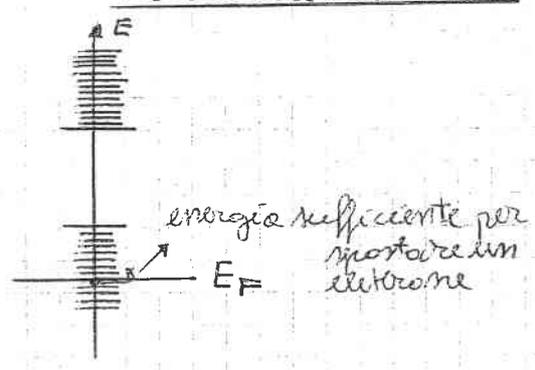
Il livello di Fermi cade in una banda proibita



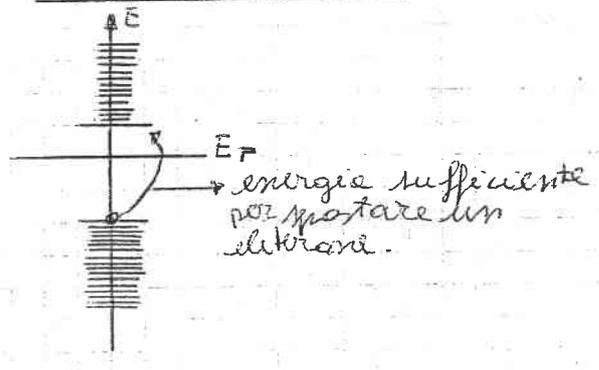
↳ la quantità minima necessaria a muovere un elettrone è la distanza tra l'ultimo livello occupato e il primo libero cioè almeno pari al gap energetico

L'energy gap è molto più grande della distanza minima tra due livelli energetici della stessa banda e per questo i materiali isolanti conducono molto più difficilmente elettroni rispetto ai materiali conduttori.

Materiali conduttori



Materiali isolanti



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

Si può notare che un elettrone per potersi muovere deve essere in una banda con alcuni livelli energetici liberi quindi una banda completamente vuota o completamente piena non dà nessun contributo alla corrente.

↳ Le bande completamente piene vengono trascurate 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 grazie 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)

• Bande di conduzione → sopra il livello di Fermi

• Bande di valenza → sotto il livello di Fermi

↳ Semiconduttore

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

Metodi di perturbazione

↳ termica: (siccome la temperatura è diversa dallo 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 trasportata da una radiazione)

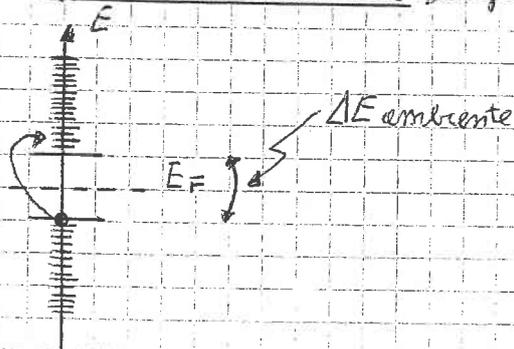
Il livello teorico di Fermi è in condizioni della non perturbazione cioè allo 0 assoluto, il buio...

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

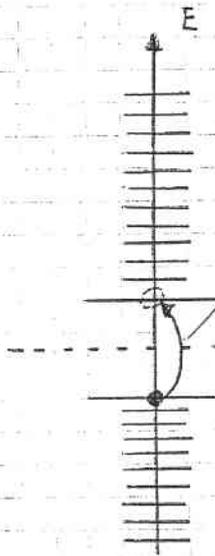
↳ in un semiconduttore il gap energetico è paragonabile

all'energia scambiata con l'ambiente per un semplice effetto termico.



↳ Caratteristiche del semiconduttore

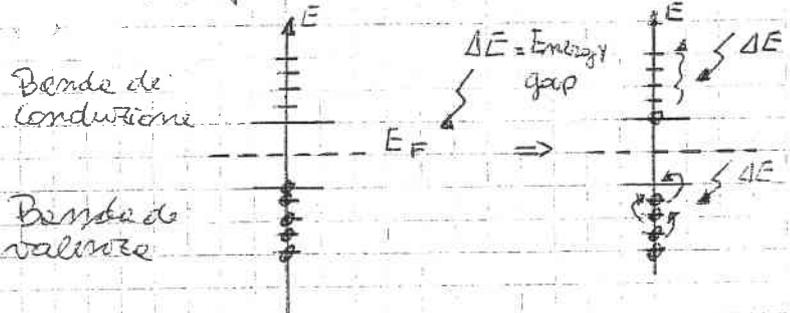
- ① il livello energetico di Fermi cade nella banda proibita
- ② l'energy gap è paragonabile all'energia media scambiata con l'ambiente interno.



la probabilità dell'elettrone che riceve un'energia pari ad kT è elevata in un conduttore a temperatura ambiente.

↳ in questo fenomeno corrente in quanto
 ③ l'elettrone (che si trova in un livello energetico più alto e ha quindi una maggiore energia cinetica → maggiore velocità) si trova in una banda con molti livelli energetici vicini, non è facile per farlo saltare in un altro livello energetico (per questo la banda si chiama di conduzione → 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

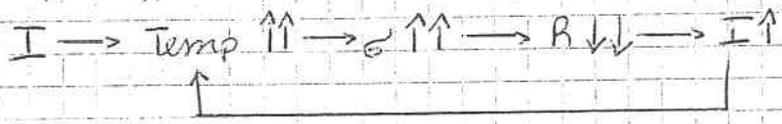
- In un conduttore esiste solo una banda parzialmente occupata che costituisce il trasporto di corrente
- In un semiconduttore necessariamente esistono due bande entrambe parzialmente occupate ⇒ questo provoca le caratteristiche non lineari.

Ommevazione

La quantità di elettroni presenti nelle bande di conduzione dipende dalla temperatura → la conducibilità elettrica aumenta all'aumentare della temperatura (in quanto aumenta il no di elettroni che possono "saltare" nelle bande di conduzione)

↳ questo effetto è utilizzato per i sensori di temperatura in quanto σ è funzione della temperatura.

↳ questo effetto può essere pericoloso perché la corrente provoca calore per effetto Joule → il componente si auto-riscalda



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

MECCANISMO DI CONDUZIONE NEI SEMICONDUCTORI

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

↳ Silicio, Germanio

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

↳ GaAs, arsenuro di gallio

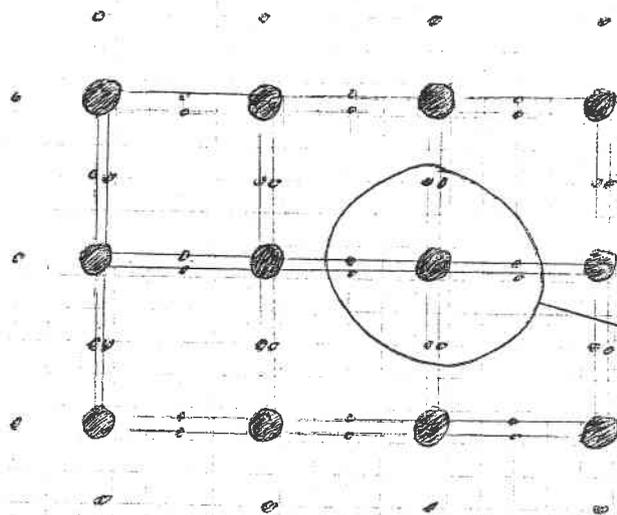
InP, solfuro di indio

Il silicio è il materiale più diffuso in natura. Per poterlo utilizzare bisogna lavorarlo in maniera complessa

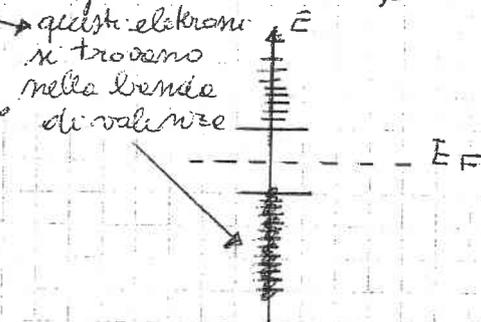
↳ Il numero atomico è 14

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

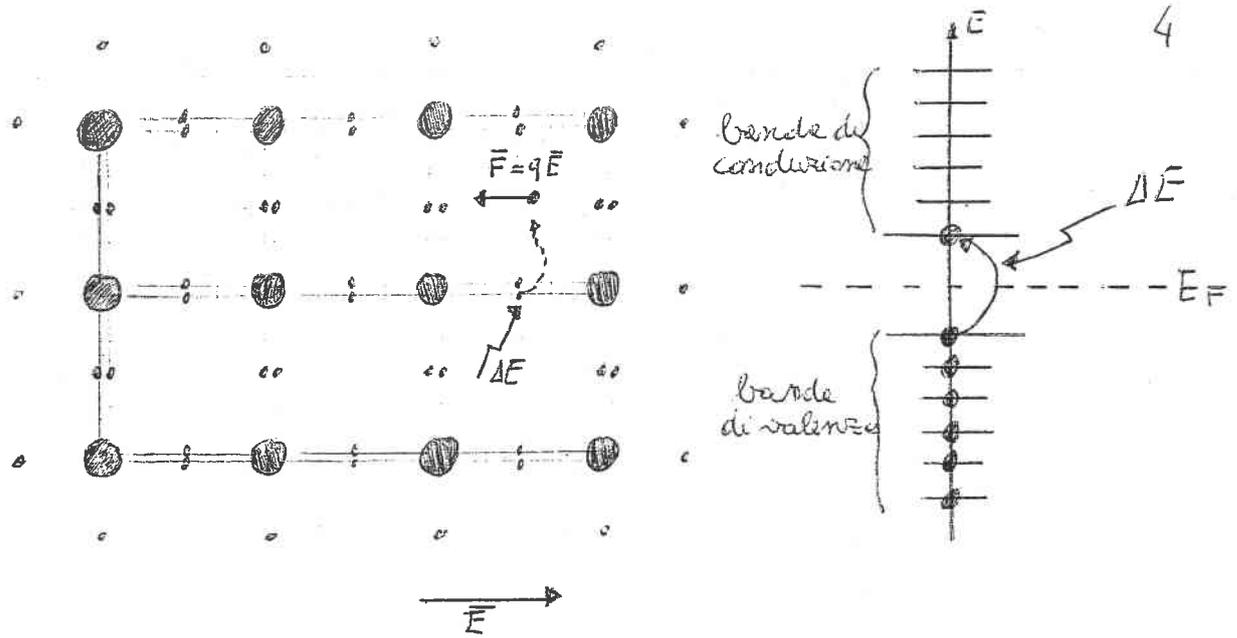
↳ Il silicio ha 4 elettroni di valenza disponibili a stabilire un legame formando una struttura cristallina (reticolo cubico). Ogni nucleo ha 4 legami covalenti.



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 bande di valenza (occupate dagli elettroni di valenza che formano i legami con gli altri atomi).

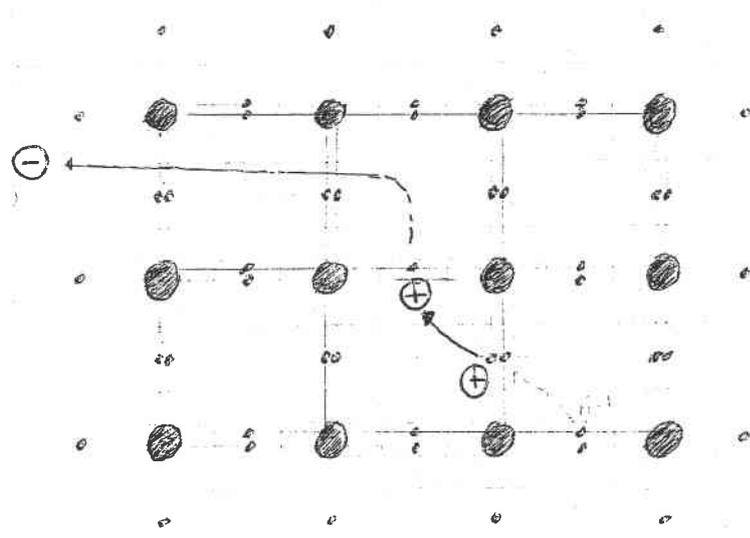


In condizione di perturbazione (termica o ottica) un elettrone può ricevere energia saltando nella banda di conduzione → entra in un livello energetico superiore e quindi ha un'orbita più grande e un minor legame con il nucleo → ha bisogno di un'ulteriore piccola energia per cambiare il suo nuovo stato orbitale. In presenza di un campo elettrico esterno ($\vec{F} = q\vec{E}$) l'elettrone tende ad allontanarsi dall'atomo. Il moto dell'elettrone è ostacolato dal reticolo cristallino.

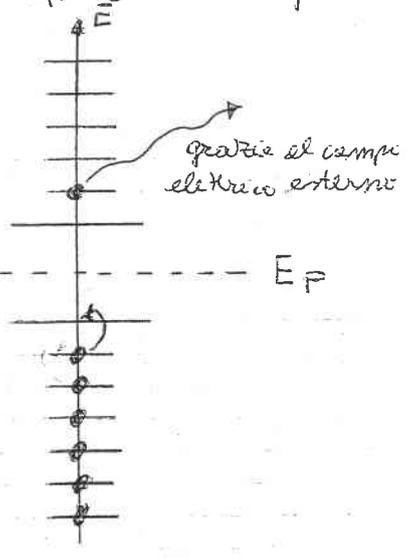


⇒ L'elettrone che dalla banda di valenza entra nella banda di conduzione è debolmente legato al suo nucleo e solo ad una forza esterna (campo elettrico) può facilmente cambiare il suo stato di moto ⇒ elettrone libero → può contribuire alla corrente.

↳ Per il principio di conservazione della carica quando l'elettrone si allontana globalmente la carica totale è equilibrata ma localmente no → l'assenza di un elettrone comporta uno sbilanciamento di carica positiva



↳ il legame regante è il livello legato libero dell'elettrone che è andato nella banda di conduzione.
 ↳ questo livello libero può muoversi facilmente nel reticolo e spin di una piccola energia



Macroscopicamente accade che

- ① un elettrone si muove in banda di conduzione
- ② tanti elettrone si muovono in piccoli spostamenti (nella banda di valenza) provocando un apparente spostamento di una carica positiva nella direzione opposta della carica negativa in banda di conduzione

⇒ i meccanismi di conduzione nei semiconduttori sono diverse dal meccanismo di conduzione nei conduttori

Nelle bande di conduzione il moto è dovuto dallo svincolamento di una carica negativa dal il 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

Lacune (= assenza di carica negativa) corrisponde ad un moto in assenza di diversi elettroni che rappresenta macroscopicamente un moto di un unica particella fittizia dotata di carica positiva

Elettrone viene considerato soltanto l'elettrone libero di movimento nelle bande di conduzione

⇒ In un conduttore esiste un'unica specie di portatore (trasporto di elettroni)

⇒ In un semiconduttore esistono due meccanismi di conduzione → carica negativa (elettroni) e carica positiva (lacune)
↳ esistono due specie di portatori di carica

La generazione di un elettrone provoca la nascita di una lacuna

$n = n^0$ di elettroni per cm^3

$p =$ quantità di lacune per cm^3

$$n = p$$

perché il materiale è uniforme (SILICIO PURO)

- L'evento di simultanea generazione di un elettrone libero e della corrispondente lacuna si chiama evento di generazione di una coppia elettrone-lacuna (coppia $e-h$ dove $h = \text{hole}$, buco)

↳ può essere provocato sia in maniera elettrica (campo elettrico) che per via ottica (grazie a dei fotoni come nelle macchine fotografiche digitali) che per via acustica/meccanica

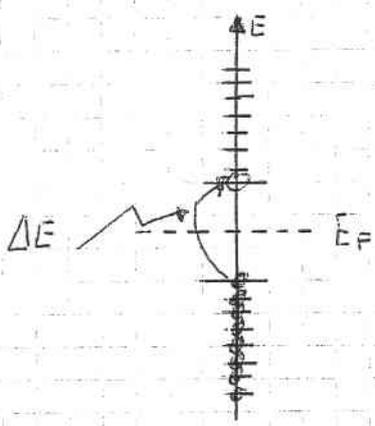
- si deve avere il fenomeno opposto alla generazione in quanto il sistema è costante nel tempo cioè l'elettrone può cadere d'energia in eccello che lo aveva liberato e ritornare nella banda di valenze. L'elettrone occupa una lacuna.
↳ effetto di ricombinazione
L'energia viene ceduta sottoforma di calore o radiazione luminosa (LED)

Sapendo che $q = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C per conoscere le densità di cariche 5

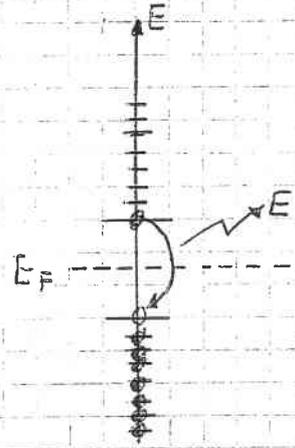
→ degli elettroni liberi $\Rightarrow -q \cdot n$

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

Evento di generazione di una coppia elettrone-lacuna



Effetto di ricombinazione

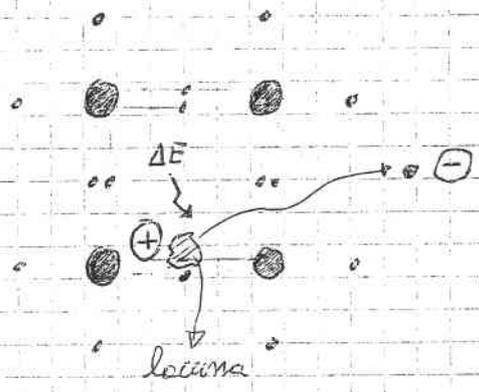


Si come il sistema è in una condizione stazionaria dire esiste l'evento opposto della generazione in modo da avere un'energia media nulla \Rightarrow

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

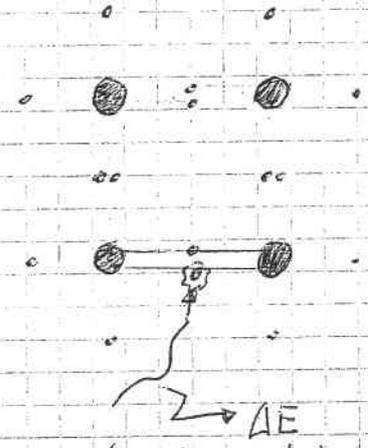
\Rightarrow l'elettrone, ricevendo energia, si allontana dal legame covalente creando una lacuna interpretata come una carica positiva in eccesso



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 dai meccanismi di ricombinazione

\Rightarrow un elettrone libero incontra una lacuna, cede energia e occupa lo stato libero di legame. L'energia può essere ceduta sotto forma di energia termica o radiazioni di luce



Si come il sistema è in una condizione stazionaria

$G = R$ poiché la velocità con cui vengono generate le coppie è uguale a quelle con cui vengono ricombinate
↳ Il tempo di "sopra-vvivenza" delle coppie si chiama tempo di vita medio della coppia

Si come in condizioni stazionarie $p = n$ possono avere lo stesso nome:

$n_i(T)$ = concentrazione intrinseca di portatori (lacune o elettroni)

↳ dipende in primo approssimazione dalla temperatura (in modo esponenziale)

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

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

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

Per poter sfruttare la presenza di lacune ed elettroni bisogna bilanciare l'equazione $p = n$ cioè non bisogna utilizzare il silicio puro.

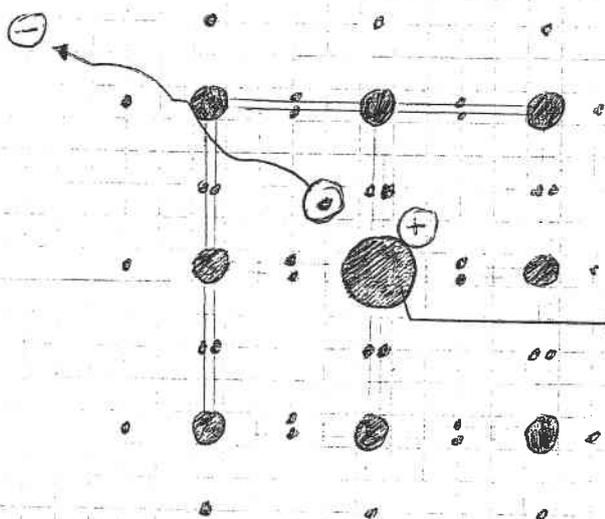
MATERIALI ESTRINSECI

• Atomi Donatori (5^a colonna p)

Si introduce nel reticolo 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

↳ la piccola quantità non influenza la struttura del reticolo



L'atomo di Fosforo è un atomo drogante e non forma una lega col silicio in quanto la proporzione è amorfe: il numero di atomi impiantati deve essere talmente piccolo da non portare perturbazione alla struttura reticolare.

atomo di Fosforo → questo elettrone di valenza forma un legame covalente col silicio.

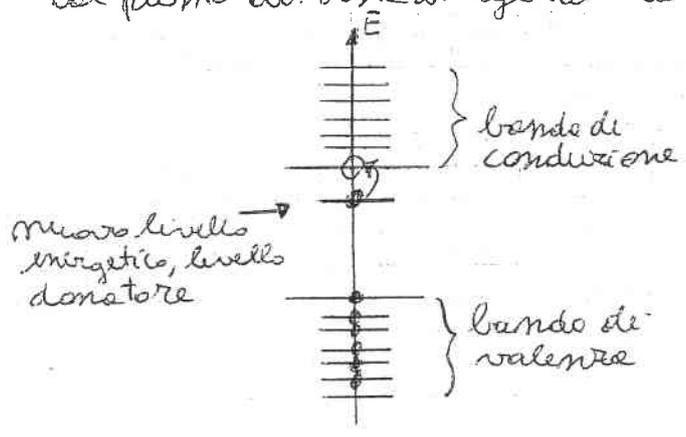
↳ il quinto elettrone non forma legami, è debolmente legato al nucleo e si allontana da esso non crea una lacuna (= porta vacante in un legame covalente). La carica positiva che si forma (che

bilancia la carica negativa che si è allontanata) è un protone del nucleo, è una carica fissa ⇒ il fosforo si comporta positivamente.

↳ la carica positiva non può spostarsi, come fanno le lacune, 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 proibite per il silicio cambiano grazie all'introduzione di qualche molecola di Fosforo che aggiungono qualche livello energetico in prossimità della banda di conduzione.
- ↳ l'elettrone che occupa il nuovo livello può facilmente "saltare" nella banda di conduzione senza creare una lacuna nella banda di valenza.

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

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

Se come la struttura del cristallo deve essere quella del silicio $N_D <$ densità degli atomi del reticolo cristallino di silicio e siccome il n° di elettroni è spontaneamente n_i allora

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

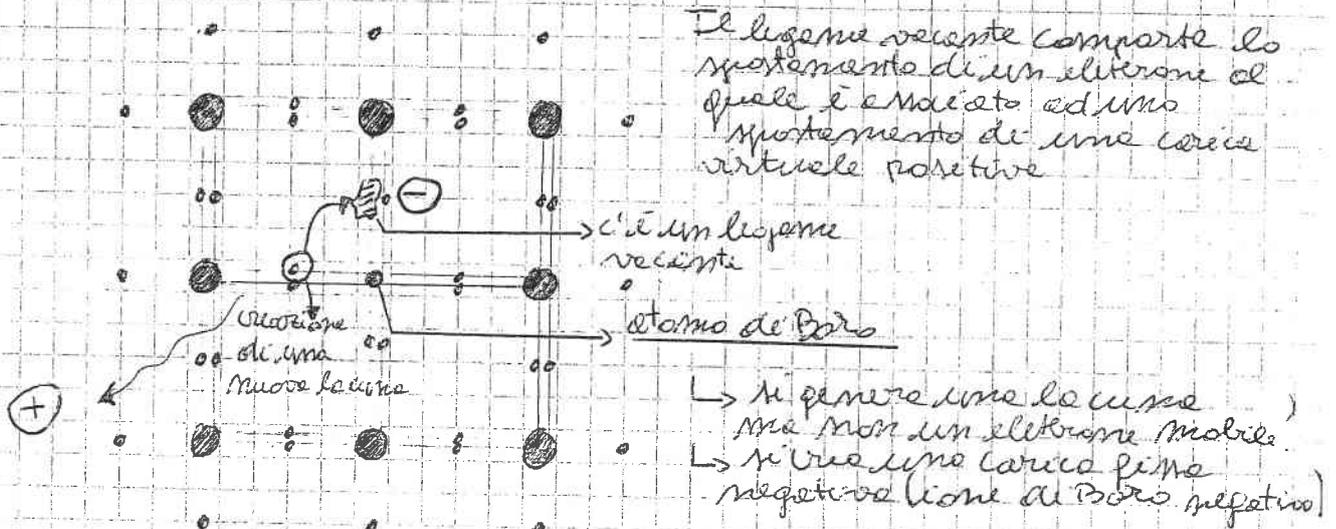
Se come l'energia utile per far saltare l'elettrone dal livello donatore alla banda di conduzione è molto piccola alla temperatura ambiente tutti gli elettroni di quel livello sono già nella banda di conduzione quindi $N_D \cong n$ (cioè ogni atomo donatore cede un elettrone, approssimazione quasi esatta)

$$N_D \cong n > p \quad \text{con atomi donatori (5^a colonna p)}$$

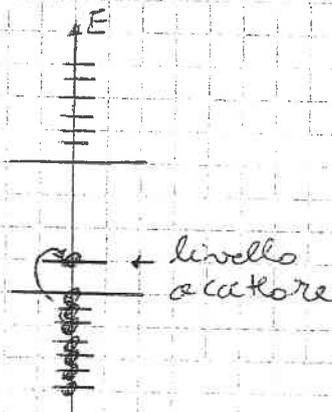
Atomi Accettori (3^a colonna p)

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

- ↳ Questi atomi hanno 3 elettroni di valenza
- ↳ le piccole quantità non influenzano la struttura del reticolo



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



- ↳ questo livello è uno stato legato ad una posizione cioè gli elettroni nel nuovo livello non si spostano
- ↳ questo nuovo livello "cattura" facilmente un elettrone e crea di una piccola energia
- ↳ la popolazione di lacune è maggiore

$$N_A = \text{concentrazione di atomi accettori} = \frac{n_0 \text{ atomi accettore}}{\text{cm}^3}$$

$$10^{10} < N_A < 10^{16}$$

$$N_A \approx p > n \quad \text{con atomi accettori (3^a colonna p)}$$

• Per un materiale intrinseco (solo silicio puro)

↳ ci sono solo le coppie elettrone-lacuna

$p = n = n_i$ e $p \cdot n = n_i^2$ $N_D = N_A = 0$

• Per un materiale estrinseco (drogato con atomi accettatori o donatori)

$p \neq n \neq n_i$ e $p \cdot n = n_i^2$

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

↳ una lacuna $p \cdot q$

↳ atomi donatori ionizzati positivamente $N_D \cdot q$ perché hanno ceduto un elettrone

↳ atomi accettatori ionizzati completamente a temperatura ambiente negativamente $N_A \cdot (-q)$

carica fissa

$$p = \underbrace{N_D \cdot q}_{\text{carica fissa}} - \underbrace{N_A \cdot q}_{\text{carica fissa}} - \underbrace{n \cdot q}_{\text{carica mobile}} + \underbrace{p \cdot q}_{\text{carica mobile}}$$

↳ solo la carica mobile può produrre corrente

↳ In condizioni di equilibrio sia per materiali intrinseci che estrinseci

$$p \cdot n = n_i^2$$

↳ concentrazione intrinseca di portatori

↳ n° di elettroni per cm^3

↳ n° di lacune per cm^3

• Prova di dimostrazione di $p \cdot n = n_i^2$

In condizioni di equilibrio, stazionario $G = R$

$G = R$

↳ in questo modo il n° di elettroni e di lacune non variano nel tempo

↳ tasso di ricombinazione

↳ tasso di generazione

G è funzione della temperatura $G = g(T)$

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

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

$G = g(T) = \beta(T) \cdot n \cdot p = R$ ← questa equazione è indipendente dal drogaggio del materiale

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

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

↳ Siccome $n \cdot p = n_i^2 = \text{cost}$ in condizioni stazionarie aumentando la concentrazione di elettroni $n \uparrow$; $p \downarrow$ la concentrazione di lacune cala in quanto $n = \frac{n_i^2}{p}$

• Calcolo di $n(N_D, N_A)$ all'equilibrio e 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 locale è nulla $\Rightarrow \rho = 0$

$$\rho = q(N_D - N_A - n + p) = 0$$

$$\left\{ \begin{array}{l} p = \frac{n_i^2}{n} \end{array} \right. \rightarrow \text{perché } n \text{ è all'equilibrio}$$

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

$$n^2 - n(N_D - N_A) - n_i^2 = 0 \quad n = \frac{N_D - N_A}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{N_D - N_A}{2}\right)^2 + n_i^2}$$

da trascurare perché $n > 0$ per definizione.

$$n = \frac{N_D - N_A}{2} + \sqrt{\left(\frac{N_D - N_A}{2}\right)^2 + n_i^2}$$

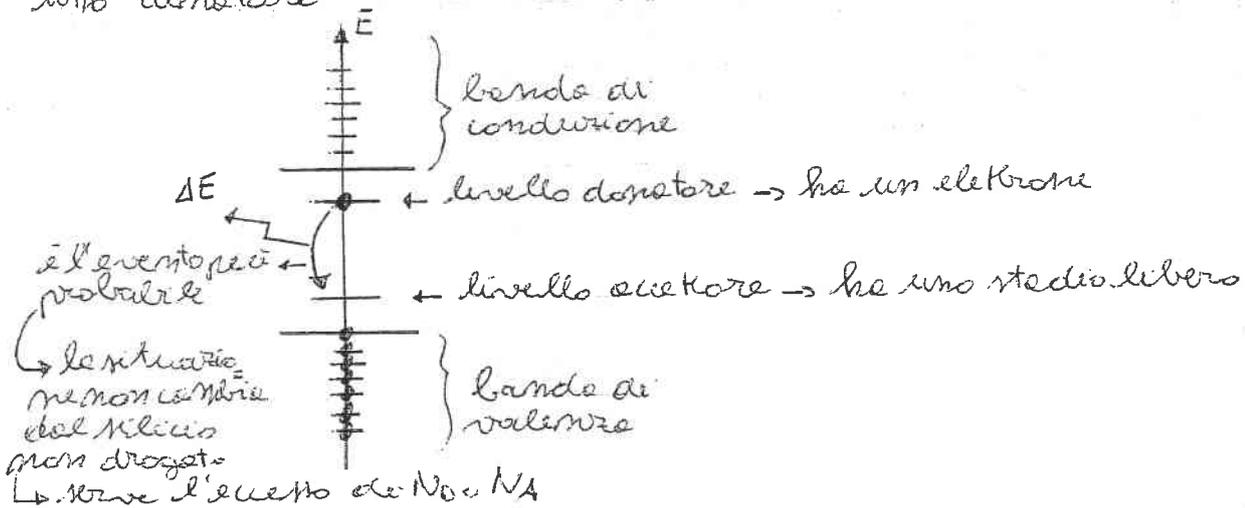
$$p = -\frac{N_D - N_A}{2} + \sqrt{\left(\frac{N_D - N_A}{2}\right)^2 + n_i^2}$$

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

↳ principio di compensazione

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

Dal punto di vista energetico N_D è un atomo accettore e N_A è un donatore



Questo è utile per realizzare zone diversamente drogate: 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 $n = p = n_i$
- con $N_D \gg N_A$ e $N_D \gg n_i$: $n = \frac{N_D - N_A}{2} + \sqrt{\left(\frac{N_D - N_A}{2}\right)^2 + n_i^2} \approx N_D$
- con $N_A \gg N_D$ e $N_A \gg n_i$: $p = -\frac{N_D - N_A}{2} + \sqrt{\left(\frac{N_D - N_A}{2}\right)^2 + n_i^2} \approx N_A$

Esempio numerico

$$\left. \begin{array}{l} N_D \approx 10^{15} \text{ cm}^{-3} \\ N_A = 0 \\ n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3} \end{array} \right\} \begin{array}{l} n = 10^{15} \text{ cm}^{-3} \\ p = \frac{n_i^2}{N_D} = 10^5 \text{ cm}^{-3} \end{array}$$

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

MATERIALE ESTRINSECO DI TIPO N

Il silicio è drogato con atomi donatori con concentrazione superiore a quella degli atomi accettori.
 Predominano gli elettroni rispetto alle lacune.
 (N_D da 10^{14} a 10^{20} cm^{-3})

$$\boxed{N_D \gg N_A, n_i}$$

$$n \approx N_D \text{ e } p = \frac{n_i^2}{N_D}$$

MATERIALE ESTRINSECO DI TIPO P

Il silicio è drogato con atomi accettori con concentrazione superiore a quella degli atomi donatori.
 Predominano le lacune rispetto agli elettroni.

$$\boxed{N_A \gg N_D, n_i}$$

$$p \approx N_A \text{ e } n = \frac{n_i^2}{N_A}$$

EFFETTO DI UN CAMPO ELETTRICO SU UN SEMICONDUITTORE



$-q$

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 (cade solo nel vuoto come nel tubo catodico della televisione).

L'elettrone all'interno di un materiale urta contro gli altri atomi (forza attrattiva 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 \vec{v}_m è costante ($v_m = \text{cost}$) e dipende dal campo elettrico

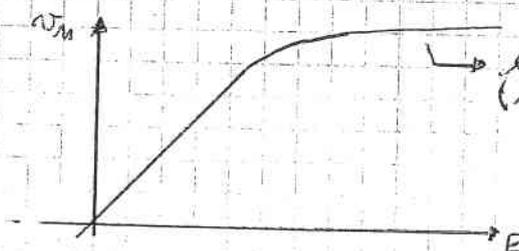
↳ la velocità media si raggiunge quando si instaura un equilibrio tra la forza coulombiana e le resistenze del materiale (come un paracadutista che lascia da un aereo scende a velocità costante quando la forza di gravità è bilanciata dalla resistenza dell'aria)

$$\vec{v}_m = -\mu_n \vec{E}$$

$\mu_n =$ mobilità degli elettroni

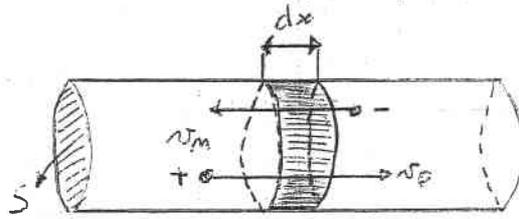
- ↳ costante caratteristica del materiale
- ↳ dipende dalle caratteristiche dei cristalli (più sono gli atomi disordinati e più è difficile lo spostamento e quindi μ_n è più piccolo) e della temperatura (meglio è la vibrazione per effetto termico delle particelle maggiore è la probabilità di urto e quindi minore è la mobilità)

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



↳ la curva tende a saturare (saturazione alla velocità)

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



Materiale uniforme

$\rightarrow E$ (campo elettrico uniforme)

\rightarrow caso monodimensionale (senza simboli di vettore)

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

se $n \gg p$

$$dQ = -q n dV$$

$$dx = v_m dt$$

$$dV = S dx$$

$$v_m = -\mu_n E$$

$$J_m = \frac{-q n S dx}{dt S} = -q n v_m$$

$$J_m = q n \mu_n E$$

se $n \ll p$

$$dQ = q p dV \quad (\text{questo è valido perché solo le cariche mobili può produrre una corrente})$$

$$dx = v_p dt$$

$$dV = S dx$$

$$v_p = \mu_p E$$

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

$$J_p = q p \mu_p E$$

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

\rightarrow la conducibilità dipende dal drogaggio

μ_p e μ_n sono diversi μ_p è 2 o 3 volte più piccolo di μ_n

perché le lacune sono elettroni che si muovono in bande di valenza al contrario dell'elettrone libero che si muove in bande di conduzione e quindi il moto delle lacune è più complesso \rightarrow serve più tempo \rightarrow mobilità μ_p più piccola

Si come la soluzione è lineare vale il principio di sovrapposizione degli effetti e quindi

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

Trasporto ohmico
ovvero effetto del campo elettrico

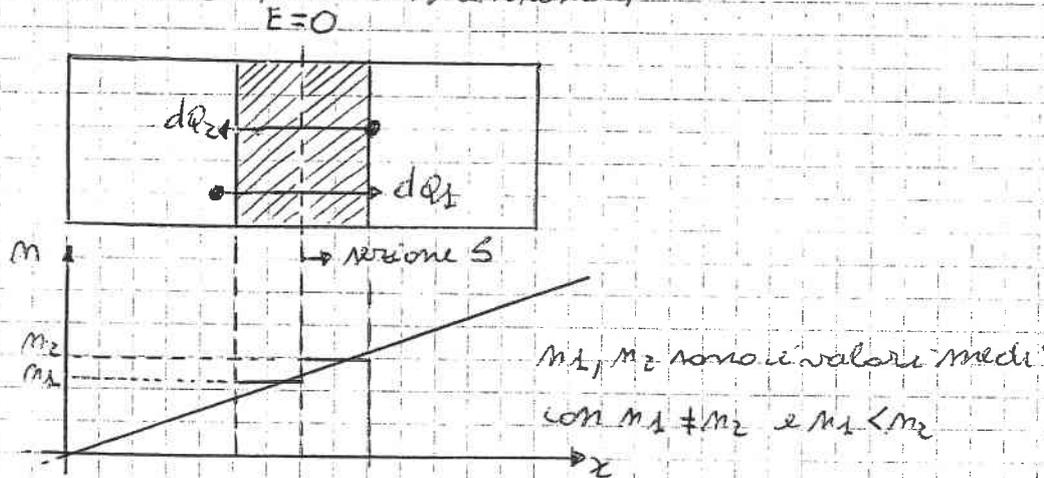
Per materiali uniformemente drogati (n e p sono indipendenti dalle posizioni) vale la legge di ohm con la possibilità di variare la conducibilità $\sigma \rightarrow$ si possono avere delle zone

conduttive e come isolanti nello stesso materiale.

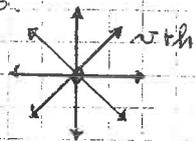
↳ è l'elemento di base per la creazione dei circuiti integrati (cioè nello stesso materiale si sono vari circuiti isolati tra di loro e interconnessi opportunamente).

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

Si considera un materiale semiconduttore in cui la concentrazione di elettroni dipende dalla coordinata x e non soggetto ad un campo elettrico (studio monodimensionale)



gli elettroni mediamente occupano una posizione fissa ma il livello energetico n muoversi per effetto della temperatura
 ↳ oscillano con una velocità v_{th} che dipende dalla temperatura
 ↳ essendo equiprobabile ciascuna direzione mediamente l'elettrone è fermo.



↳ nel caso monodimensionale



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

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

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

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

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

sono la metà delle cariche contenute nei volumi dV che stanno rispettivamente a sinistra e a destra della sezione S
 ↳ la metà perché il moto delle cariche è aleatorio e metà delle cariche vanno in una direzione e metà nell'altra

$$\left. \begin{aligned} dQ_1 &= \frac{1}{2} (-q) m_1 dV \\ dQ_2 &= \frac{1}{2} (-q) m_2 dV \end{aligned} \right\} \rightarrow \begin{cases} dQ_1 = -\frac{q}{2} m_1 S v_{th} dt \\ dQ_2 = -\frac{q}{2} m_2 S v_{th} dt \end{cases}$$

$$\left. \begin{aligned} dV &= S dx \\ dx &= v_{th} dt \end{aligned} \right\} dV = S \cdot v_{th} \cdot dt$$

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

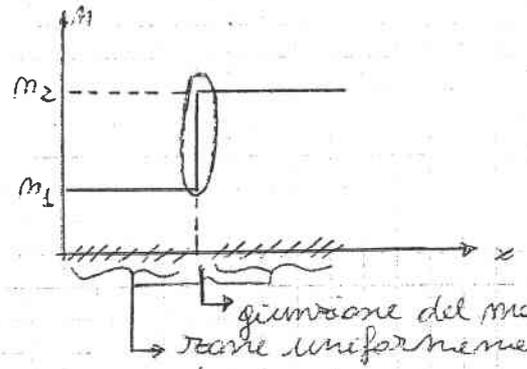
$$I_m = \frac{dQ_m}{dt} = \frac{q}{2} (m_2 - m_1) S v_{th}$$

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

Corrente di diffusione termica

- Come per ipotesi $m_2 \neq m_1$ allora $J_m \neq 0$
- ↳ mediamente gli elettroni cercano di spostarsi dalla regione dove sono tanti e dove sono pochi in questo caso con $m_2 > m_1$ $J_m > 0$ e quindi la corrente va verso destra e di conseguenza le cariche verso sinistra
 - ↳ la situazione è identica a quella di una goccia d'inchiostro immersa in un bicchiere d'acqua: la goccia si diffonde. All'inizio l'inchiostro è concentrato in un unico punto e successivamente inizia a diffondersi 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 della sabbia ammucchiata solo da un lato: quando si scuote la scatola (agitazione termica) la sabbia si distribuisce in maniera uniforme
 - ↳ la differenza con i due esempi è che il moto è dovuto a particelle cariche

• Studio di una diversa configurazione della densità di elettroni



• Nelle zone uniformemente drogate

$$p = 0 \text{ dove } p = q(N_D - N_A + p - n)$$

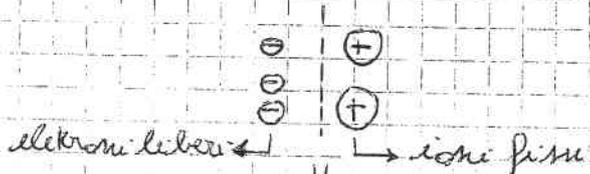
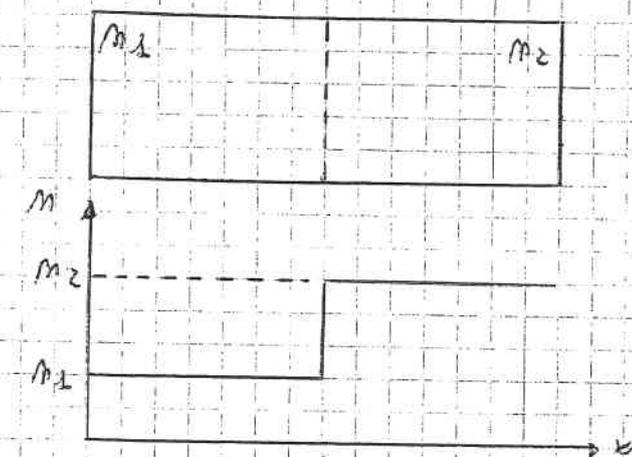
$$\rightarrow N_D \approx n \text{ e } N_A \approx p \approx 0$$

• Nelle giunzioni gli elettroni per effetto della diffusione tendono a spostarsi verso sinistra

$$p \neq 0$$

gli sono elettroni rimangono gli ioni fissi positivi e gli atomi dopanti non più bilanciati

Vicino alla giunzione gli elettroni tendono ad andare nella zona in cui ci sono meno atomi donatori per diffusione (eccesso di carica negativa) lasciando gli atomi donatori che erano bilanciati dagli elettroni che si sono spostati (eccesso di carica positiva).

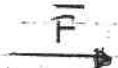


si instaura un campo elettrico $\Rightarrow E \neq 0$



↳ Il campo elettrico non è indotto dall'esterno ma è intrinseco legato alle diverse distribuzioni degli atomi donatori.

↳ Il campo elettrico interiore una parte Coulombiana sugli



elettroni (è come se l'elettrone sia legato all'atomo donatore da un elastico: 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.

Quindi le due differenze fondamentali tra semiconduttore e conduttore sono:

- 1) ① In un semiconduttore ci sono due specie di carica (elettroni e lacune) in quanto gli elettroni si possono muovere in due bande diverse (conduzione e valenza)
- 1) 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 alla diffusione

$$J_{n, diff} = q \cdot D_n \cdot \frac{dn}{dx}$$

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

D_n = coefficiente di diffusione per gli elettroni

D_p = coefficiente di diffusione per le lacune

↳ dipende dalla temperatura in quanto la diffusione è più intensa più aumenta la temperatura

(c'è il segno meno perché le lacune con carica positiva si muovono nella direzione opposta alla convenzione della corrente)

Prima relazione di Einstein

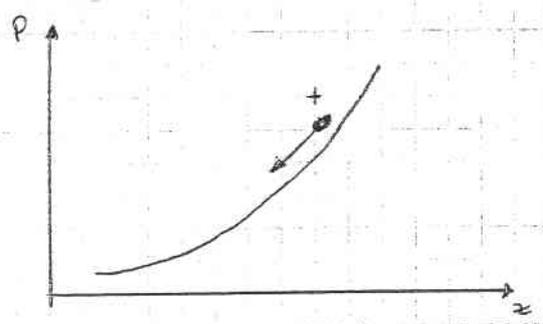
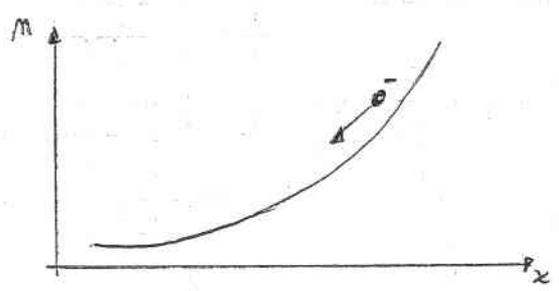
Seconda relazione di Einstein

$$D_n = \frac{kT}{q} \cdot \mu_n$$

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

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$ (costante di Boltzmann)
 e $T = 300 K$

$D_n = V_T \cdot \mu_n$ con $V_T = 26 mV$



gli elettroni tendono a spostarsi a sinistra
 ↳ contributo verso l'asse x di corrente

le lacune tendono a spostarsi a sinistra
 ↳ contributo di corrente in direzione opposta dell'asse x



MODELLO DRIFT - DIFFUSION

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

$$\vec{J} = \vec{J}_n + \vec{J}_p$$

$$\vec{J}_n = q \mu_n \cdot n \cdot \vec{E} + q D_n \frac{dn}{dx}$$

$$\vec{J}_p = q \mu_p \cdot p \cdot \vec{E} - q D_p \frac{dp}{dx}$$

⇒ trasporto di tipo ohmico-diffusivo

↓ effetto ohmico ↓ effetto diffusivo

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

↳ poiché ci sono due portatori con caratteristiche diverse e due tipi di trasporto di carica si possono costruire componenti non lineari.

Strumenti per l'analisi dei semiconduttori.

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

In 3 dimensioni

$$\vec{J}_n = q \mu_n \cdot n \cdot \vec{E} + q D_n \cdot \text{grad} n$$

$$\vec{J}_p = q \mu_p \cdot p \cdot \vec{E} - q D_p \cdot \text{grad} p$$

$$\vec{E} = - \text{grad} \phi$$

$$\text{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon}$$

In una dimensione (Riassunto equazioni)

$$\vec{J} = \vec{J}_n + \vec{J}_p \quad ; \quad \vec{J}_n = q \mu_n n E + q D_n \frac{dn}{dx} \quad ; \quad \vec{J}_p = q \mu_p p E - q D_p \frac{dp}{dx}$$

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

$$D_n = \frac{kT}{q} \mu_n = V_T \cdot \mu_n$$

↳ tensione termica

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

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

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

STUDIO DI UN SEMICONDUCTORE DROGATO ALL'EQUILIBRIO

(Equilibrio = assenza di fonti di energia)
 La concentrazione di n o di p dipende dallo spazio x

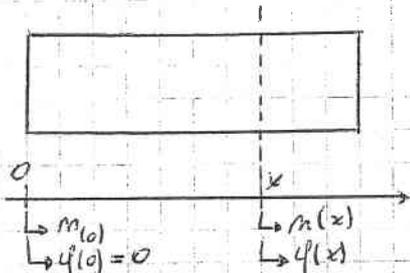
↳ Calcolo dell'andamento del potenziale

Se non ci sono fonti di energia, la corrente è nulla in quanto una corrente di n o di p 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. Quindi si avrà $J_n = J_p = 0$

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

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



Sost. D_n, E

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

$$\frac{n}{dx} \frac{d\phi}{dx} = \frac{kT}{q} \frac{dn}{dx} \left(-\frac{d\phi}{dx} + \frac{dn}{n} \right) = 0$$

dividendo tutto per $\frac{dn}{dx}$

$$\frac{q}{kT} \int_0^x \frac{d\phi}{dx} dx = \int_0^x \frac{1}{n} \frac{dn}{dx} dx$$

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

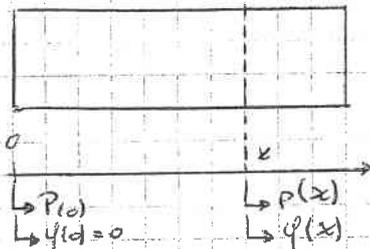
$$\frac{q}{kT} (\phi(x) - 0) = \log_e \left(\frac{n(x)}{n(0)} \right)$$

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

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

ovvero c'è una $\phi(x)$ con un'assenza di potenziale

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



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

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

sembra solo questo segno, quindi

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

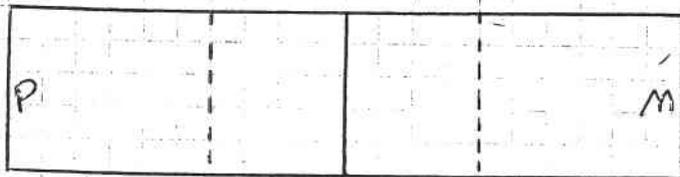
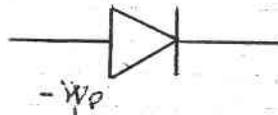
$$p(x) = p(0) \cdot e^{-\frac{q\phi(x)}{kT}}$$

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

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

all'equilibrio

STUDIO DELLA GIUNZIONE PN, DIODO, ALL'EQUILIBRIO



drogato da atomi
accettori: N_A

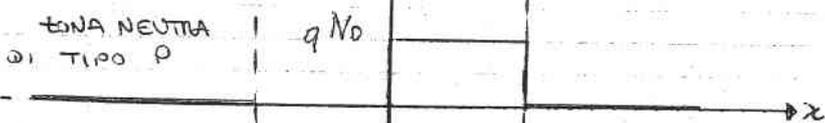
drogato da atomi
donatori: N_D

La giunzione è nello
stesso cristallo di
materiale semiconduttore
drogato in modo
relativo in modo da
avere una breve
variazione di droganti



Non è necessario che
 N_A sia uguale a N_D

1° grafico

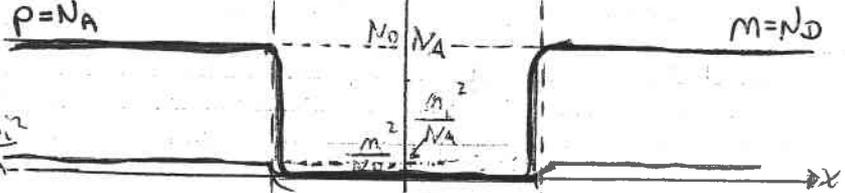


TONA NEUTRA
di TIPO P

qN_D

$-qN_A$

P, n



$P=N_A$

N_D

N_A

$n=N_D$

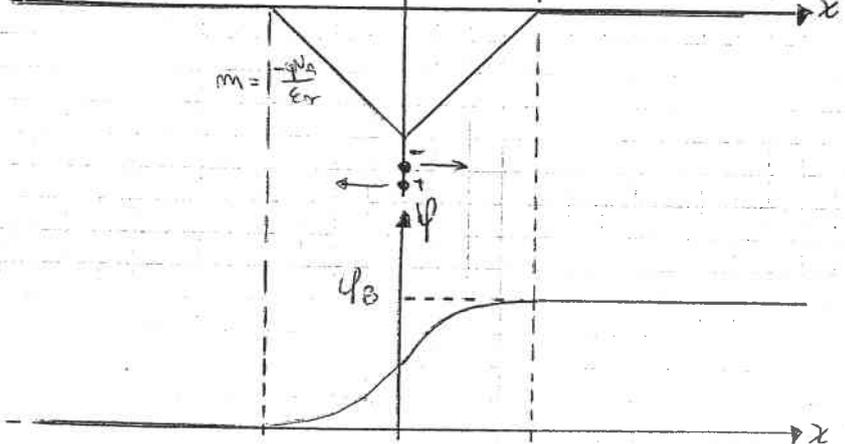
2° grafico

$m = \frac{m_1^2}{2\epsilon}$

$\frac{m_1^2}{2\epsilon}$

$m = \frac{N_A}{\epsilon \epsilon_r}$

3° grafico



ϕ_0

4° grafico

retta
parabola

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 a gradino

HP: le considerazioni nella regione uniforme sono valide a grande distanza dalla giunzione \rightarrow gli effetti perturbativi, prodotti dalle brusche variazioni di atomi droganti, sono trascurabili a grande distanza (in quanto l'effetto diffusivo è contenuto dalla creazione di un campo elettrico intrinseco)

\hookrightarrow esistono due coordinate che delimitano la zona nella quale sono trascurabili gli effetti di perturbazione della giunzione

x_m = margine della regione perturbata nella zona n

$-x_p$ = margine della regione perturbata nella zona p

\hookrightarrow ipotesi da verificare (la verifica consiste nel valutare le dimensioni di x_m e x_p sono molto più piccole delle strutture di un diodo) $w = w_{FH}$

• $x < -x_p$

La zona è, per ipotesi, uniformemente drogata

\hookrightarrow siccome c'è equilibrio e uniformità, la carica è bilanciata in ogni punto e quindi $p = 0$ (1° grafico)

\hookrightarrow siccome $N_A \gg N_D \Rightarrow$ $p \approx N_A$ e $n \approx \frac{n_i^2}{N_A}$ (2° grafico)

\hookrightarrow siccome il semiconduttore è uniformemente drogato

$$\psi_2 - \psi_1 = -\frac{kT}{q} \log \left[\frac{p(x_2)}{p(x_1)} \right] \quad \text{e } p(x_2) = p(x_1) \quad \text{quindi}$$

$$\psi_2 - \psi_1 = -\frac{kT}{q} \log(1) = 0 \rightarrow \text{il potenziale che dipende dalle variazioni delle concentrazioni è costante}$$

Si sceglie, in modo arbitrario, il potenziale della zona drogata p nullo. Quindi

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

$\hookrightarrow p_{(0)} = N_A$ e $n_{(0)} = \frac{n_i^2}{N_A}$ (valori delle concentrazioni quando il potenziale è nullo)

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

\hookrightarrow ZONA NEUTRA DI TIPO P

• $x > W_m$

↳ n comporta come un materiale uniformemente drogato e quindi il nostro $\rho = 0$ (1° grafico)

↳ Siccome $N_D \gg N_A$ $n = N_D$ e $p = \frac{n_i^2}{N_D}$ (2° grafico)

$$\phi(x) = \frac{kT}{q} \log \left[\frac{n(x)}{n_{i0}} \right] = \frac{kT}{q} \log \left(\frac{N_D}{n_i} \right) = \frac{kT}{q} \log \frac{N_D N_A}{n_i^2} = \text{cost}$$

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

ma come $\begin{cases} N_D > n_i \\ N_A > n_i \end{cases} \Rightarrow \frac{N_D N_A}{n_i^2} \gg 1 \rightarrow$ il logaritmo è positivo e un numero puro ma varrà poco se variano di N_D e N_A .

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

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

$\phi(x) = \phi_B$ barriera di potenziale

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

↳ ZONA NEUTRA DI TIPO P_N

→ $-W_p \leq x \leq x_m$ ZONA PERTURBATA

Il potenziale varia da 0 a ϕ_B

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

$$\frac{\phi(x)}{\frac{kT}{q}} \approx \frac{\phi(x)}{26 \text{ mV}} \rightarrow \text{diventa significativamente maggiore di uno quando } \phi(x) = \phi_B$$

↳ basta che $\phi(x)$ sia di poco superiore a 100 mV (pari a quasi 4 V_T) che l'esponente si diventa piccolissimo

↳ appena si entra nella zona perturbata il potenziale inizia a salire e $p(x)$ diminuisce rapidamente partendo da 0

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

14

$$n(x) = n_{(0)} e^{\frac{q\phi(x)}{kT}}$$

nella zona neutra ($n = N_D$)

$$N_D = n_{(0)} e^{\frac{q\phi_0}{kT}}$$

$$\frac{n(x)}{N_D} = \frac{e^{\frac{q\phi(x)}{kT}}}{n_{(0)} e^{\frac{q\phi_0}{kT}}} \rightarrow n(x) = N_D e^{\frac{q(\phi(x) - \phi_0)}{kT}}$$

Nella zona perturbata $\phi(x) < \phi_0$ e l'esponente è minore di 0
 $\hookrightarrow n(x) \ll N_D \rightarrow$ la concentrazione cade rapidamente fino a 0.

\Rightarrow nella regione neutra ogni portatore mobile compie una ionizzazione
 \Rightarrow nella regione perturbata nasce una regione SVUOTATA
 \hookrightarrow cioè non ci sono più portatori mobili.

\hookrightarrow rimangono solo gli ioni fissi.

• $-W_p \leq x < 0$ ZONA PERTURBATA DI TIPO P perché la regione è svuotata

$$\rho = q(N_D - N_A - n) \approx -qN_A \quad (1^{\circ} \text{ grafico})$$

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

\rightarrow calcolo del campo elettrico

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

$$\int_{-W_p}^x \frac{dE}{dx} dx = \int_{-W_p}^x -\frac{qN_A}{\epsilon_s} dx = \int_{E(-W_p)}^{E(x)} dE \Rightarrow E(x) - E(-W_p) = -\frac{qN_A}{\epsilon_s}(x + W_p)$$

Se come $E(-W_p) = 0$ allora

$$\underline{E(x) = -\frac{qN_A}{\epsilon_s}(x + W_p)}$$

(3° grafico) (usata l'ipotesi di variazione e crediamo di $\rho(x)$)
 eq. RETTA

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

\rightarrow m_{retta} dipende dal drogaggio

\rightarrow calcolo del potenziale

$$-\frac{d\phi}{dx} = E(x) = -\frac{qN_A}{\epsilon_s}(x + W_p)$$

quindi emerge un eq. differenziale

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

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

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

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

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

↳ perché la regione è svuotata
↳ perché nella zona $n \ N_D \gg N_A$

→ 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

$$\underline{\underline{E(x) = \frac{qN_D}{\epsilon_s} (x - w_m)}} \rightarrow E(0) = -\frac{qN_D}{\epsilon_s} w_m \quad (3^\circ \text{ grafico})$$

(la pendenza dipende dalla concentrazione N_D)

→ Calcolo del potenziale

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

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

$$\varphi(w_m) - \varphi(x) = \frac{qN_D}{\epsilon_s} \frac{(x - w_m)^2}{2}$$

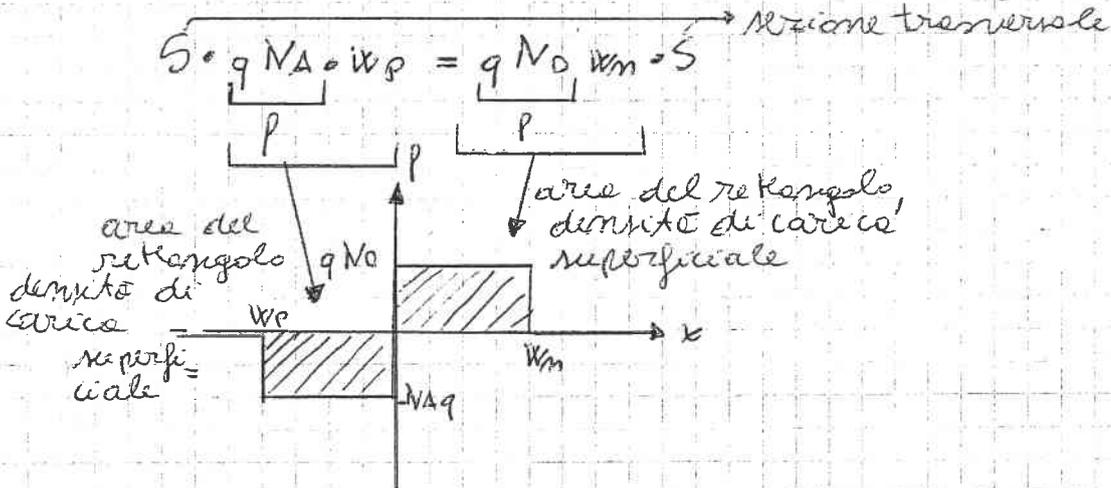
Sapendo che $\varphi(w_m) = \varphi_B$

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

Studio di w_p e w_m

Bisogna stimare i loro valori in quanto la loro determinazione è alle base dell'ipotesi di partenza e di cui si sono calcolate le caratteristiche del diodo e giunzione p-n.

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



$$S \cdot q N_A w_p = S \cdot q N_D w_m$$

\Downarrow Q_p = \Downarrow Q_m

\downarrow carica fissa della zona p \downarrow carica fissa della zona n

La carica fissa nella zona p è uguale ed opposta alla carica fissa nella zona n \rightarrow è come un condensatore a parte che la carica non è superficiale ma distribuita in un volume.

$$N_A w_p = N_D w_m$$

Da $E = - \frac{d\phi}{dx} \rightarrow \int_{-w_p}^{w_m} E(x) dx = \int_{-w_p}^{w_m} - \frac{d\phi}{dx} dx = - (\phi(w_m) - \phi(-w_p))$

\downarrow ϕ_B \downarrow 0

\downarrow area del campo elettrico

$$\frac{(w_m + w_p) \cdot E(0)}{2} = - \phi_B \quad \text{con } E(0) = - \frac{q N_A w_p}{\epsilon_s} \text{ da cui}$$

$$\begin{cases} \phi_B = q \frac{N_A w_p}{2 \epsilon_s} (w_m + w_p) & \text{e da } N_A w_p = N_D w_m \\ w_m = \frac{N_A}{N_D} w_p \end{cases}$$

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

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

con $N_D = N_A = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ $\psi_B = 0,476 \text{ V}$

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

$\epsilon_s = 11,2 \cdot \epsilon_0$ con $\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}}$

$w_p = 0,606 \mu\text{m}$, $w = w_m + w_p = 1,212 \mu\text{m}$

↳ ipotesi valida

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

$\psi_B = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right)$ → al variare di N_A e N_D il logaritmo varia di poco quindi $\psi_B \cong \text{cost}$

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

$N_A, N_D \downarrow \downarrow$ allora $w \uparrow$ → la regione svuotata si estende di più dove la regione è meno svuotata

$w_m = \frac{N_A}{N_D} w_p$

se $N_A > N_D \rightarrow w_m > w_p$

se $N_A < N_D \rightarrow w_p > w_m$

⇓

nonché la densità ($\rho = N_A q$ e $\rho = N_D q$) varia e può essere diversa → per avere la stessa carica ($Q_p = Q_m$) bisogna avere dei volumi diversi

↳ se aumenta la densità di carica il volume diminuisce

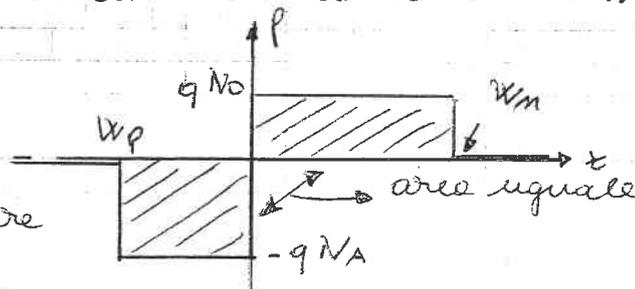
Esempio

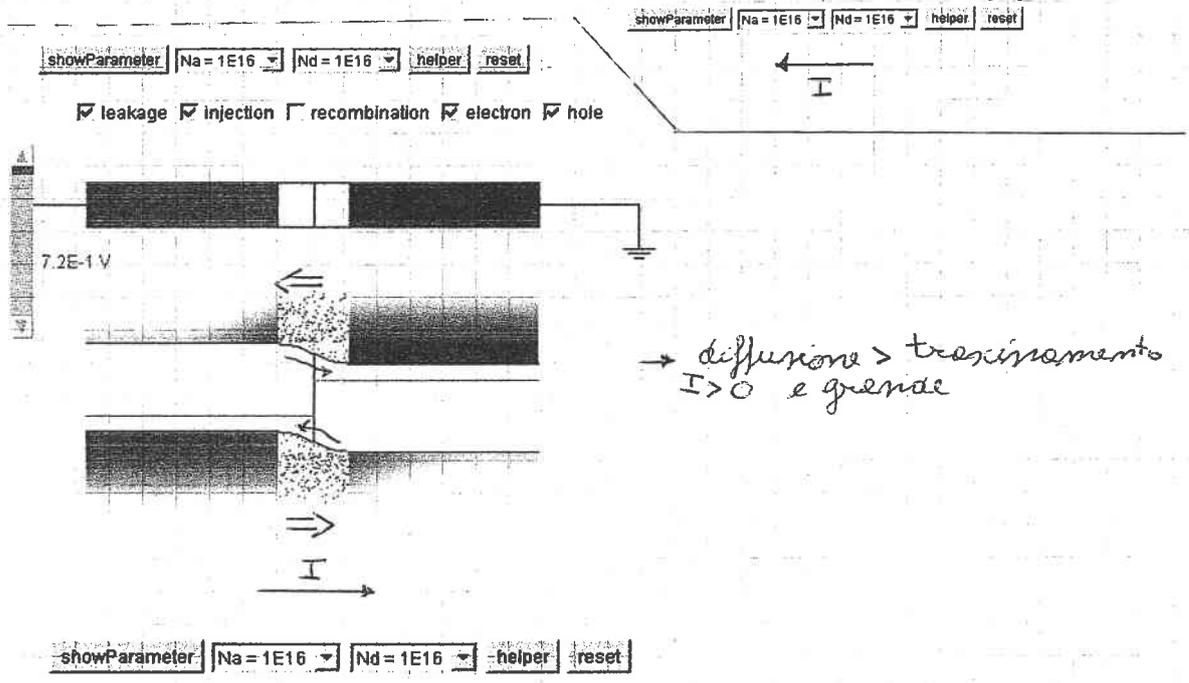
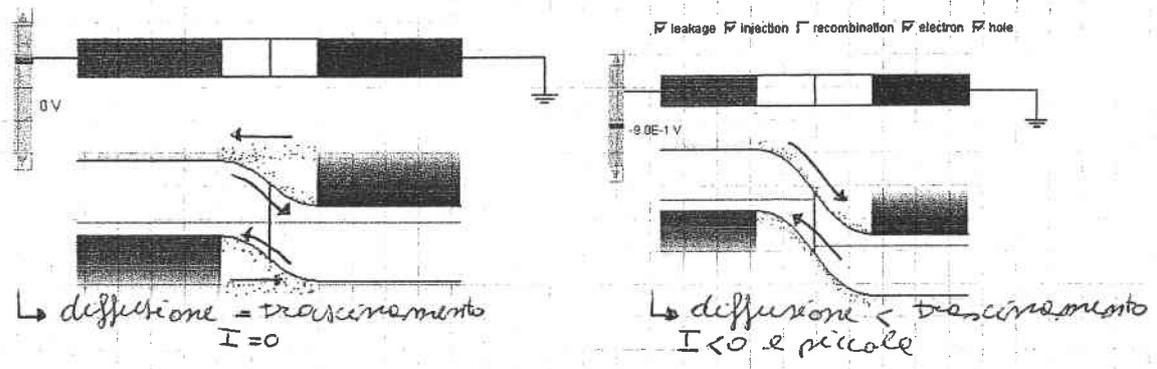
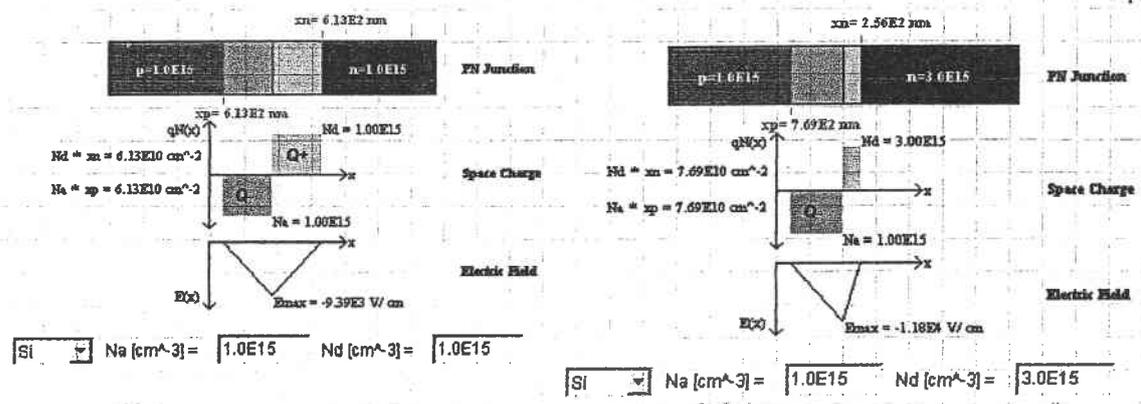
con $N_A > N_D$

⇓

$w_m > w_p$ per avere

$Q_p = Q_m$

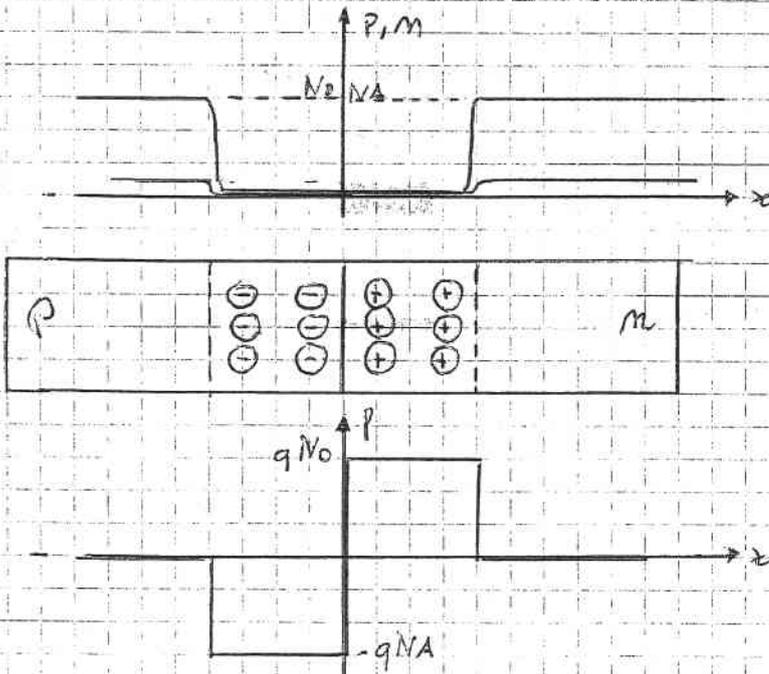




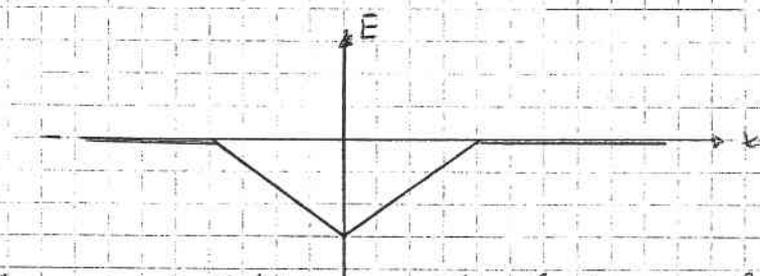
\rightarrow dal sito <http://jas.eng.buffalo.edu/education/pn/information2/information2.html>

STUDIO DELLA GIUNZIONE PN NON ALL'EQUILIBRIO

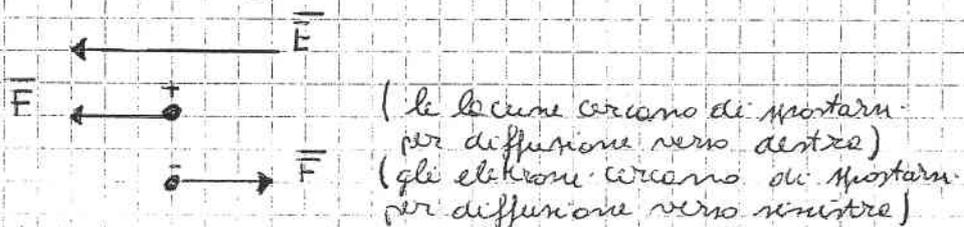
Quando c'è una discontinuità di atome dopanti, le cariche mobili tendono a spostarsi muovendosi dalla regione dove c'è maggiore concentrazione alla regione in cui c'è una minore concentrazione. (si vale lungo la curva di concentrazione)
 ↳ spostando le cariche con le ioni che li ha "fissati" si instaura un bipolo elettrico → si crea un campo elettrico.



↳ gli elettroni cercano di diffondersi (si spostano verso sinistra)
 ↳ mentre gli ioni carichi positivamente fissi che non sono più compensati → si instaura un bipolo di cariche



↳ il campo elettrico controlla sia la diffusione degli elettroni e lacune. Se come il campo è ripetitivo ha la seguente direzione:



↳ Il potenziale serve a sostenere il campo elettrico antagonista

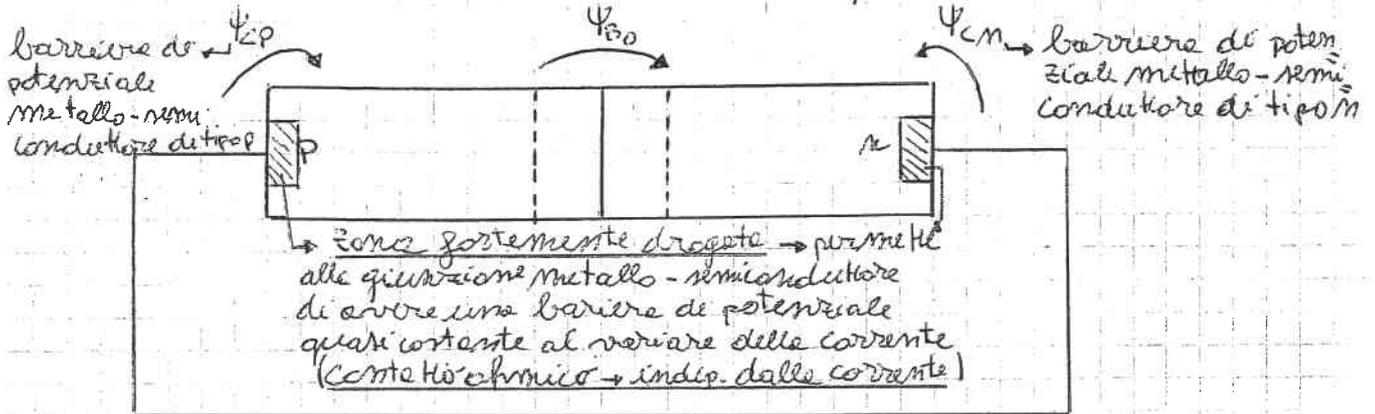
Si instaura un equilibrio in cui la componente diffusiva è bilanciata dalla componente ohmica generata dal campo elettrico intrinseco

↳ il potenziale di barriera ψ_B frena la diffusione della carica

↳ nasce spontaneamente

↳ anche se tra la zona 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

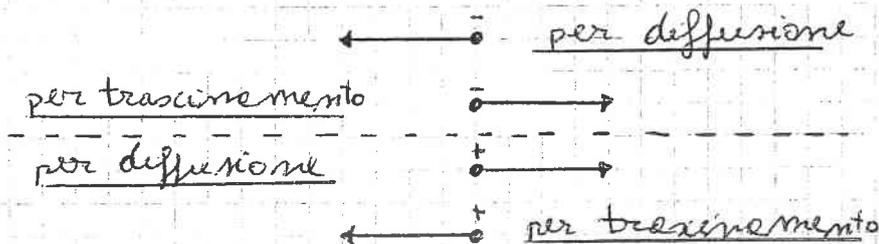


$I = 0$

viene bilanciato dai due potenziali di contatto metallo-semiconduttore. si può realizzare un potenziale di contatto approssimativamente costante → contatto ohmico (quando il potenziale non dipende dalle correnti) → nel contatto ohmico non vale la legge di ohm

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

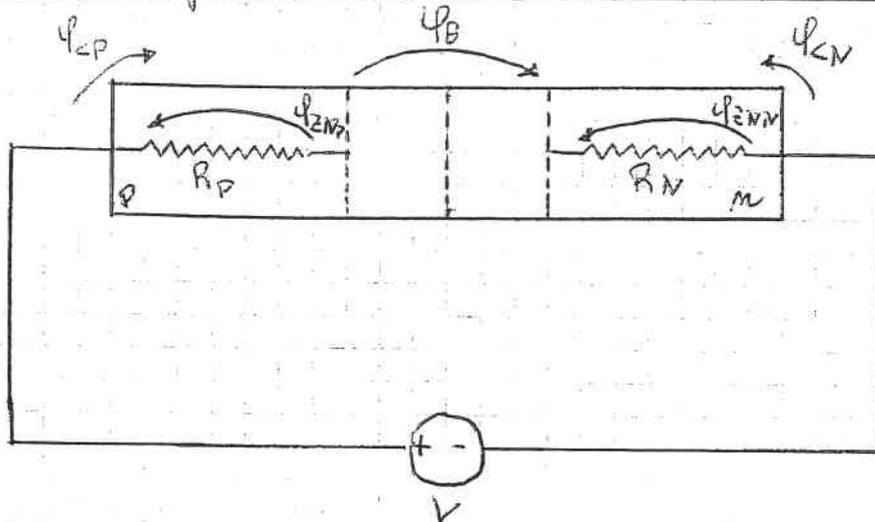
↳ potenziale necessario a frenare la diffusione.



All'equilibrio le due componenti (diffusione e trascinemmento) sono eguali ⇒ non c'è corrente

$I = 0$

Studio della giunzione p-n a cui è applicata una tensione V



Se come circolo una corrente, nella zona neutra (lontana dalle giunzioni) uniformemente drogata vale solo la legge di ohm

$$J_n = \frac{q \mu_n n E}{\sigma_n} \quad \text{e} \quad J_p = \frac{q \mu_p p E}{\sigma_p} \quad \text{e quindi c'è una caduta}$$

di tensione che dipende dalle lunghezze e larghezze delle due zone neutre:

$$\Phi_{znp} = I \cdot \frac{1}{\sigma_p} \cdot \frac{\text{lunghezza}}{\text{sezione}} \quad ; \quad \Phi_{znn} = I \cdot \frac{1}{\sigma_n} \cdot \frac{\text{lunghezza}}{\text{sezione}}$$

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

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

zona neutra p

zona neutra n

H_p: ① Φ_{cp} e Φ_{cn} sono contatti ohmici, indipendenti dalla corrente e quindi costanti

② piccoli spostamenti dall'equilibrio $\Rightarrow \Phi_{znn}, \Phi_{znp} \ll \Phi_B$

- barriera di potenziale della giunzione mit-nessa - senza corrente

$$\Phi_{cp} - \Phi_{znp} + \Phi_B - \Phi_{znn} - \Phi_{cn} + V = 0$$

- barriera di potenziale delle giunzioni mit-nessa, in cui $I = 0$
 → equazione ricavata considerando il diodo cortocircuitato da un filo

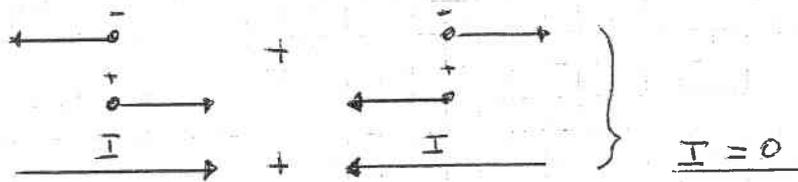
~~$$\Phi_{cp} - \Phi_{cp} + \Phi_{B0} - \Phi_B - \Phi_{cn} + \Phi_{cn} - V = 0$$~~

si possono cancellare per ipotesi di contatto ohmico (sono uguali anche se scorre corrente diversa)

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

All'equilibrio ($V=0$)

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



$V > 0$

$\Psi_B < \Psi_{B0} \rightarrow$ si riduce l'area del campo elettrico in quanto

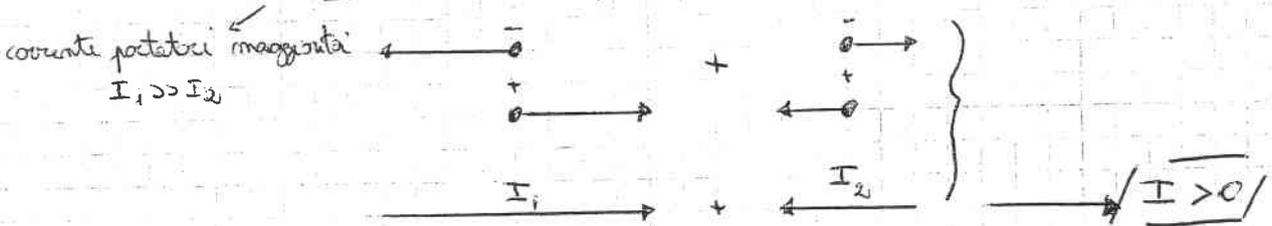
$$\int_{-\infty}^{+\infty} E(x) dx = -\Psi_B \quad \text{Seconde } E(x) = \begin{cases} -\frac{q N_A}{\epsilon_s} (x + w_p) & \text{per } -w_p \leq x \leq 0 \\ \frac{q N_D}{\epsilon_s} (x - w_n) & \text{per } 0 \leq x \leq w_n \end{cases}$$

le cui pendenze $\frac{dE(x)}{dx} = \begin{cases} -\frac{q N_A}{\epsilon_s} & \text{per } -w_p \leq x \leq 0 \\ \frac{q N_D}{\epsilon_s} & \text{per } 0 \leq x \leq w_n \end{cases}$ è costante,

riducendosi l'area di minorazione w_n e w_p .

\hookrightarrow Seconde il campo elettrico che contrasta la diffusione di minoranze

\hookrightarrow componente diffusiva > componente di trascinamento

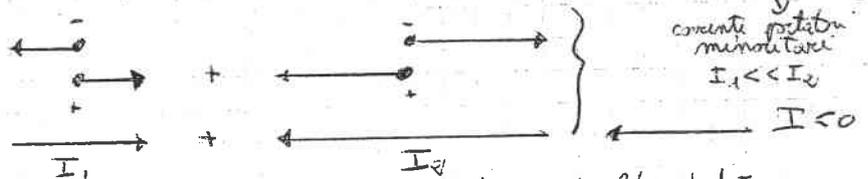


La diffusione sposta gli elettroni dalla zona n e le lacune dalle zone p verso la zona ricepitrice \rightarrow corrente positiva

$V < 0$

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

\hookrightarrow componente diffusiva < componente di trascinamento



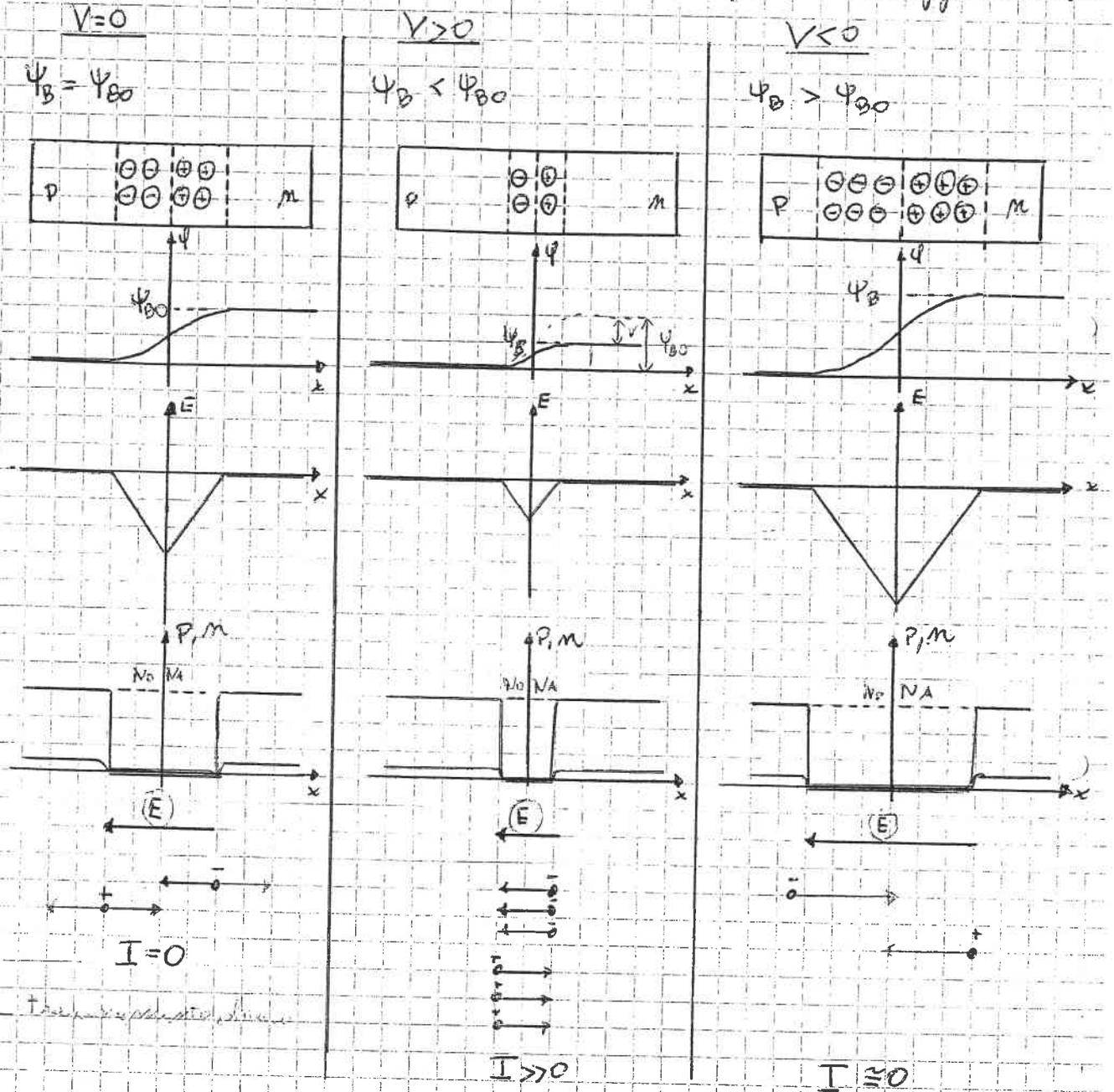
\hookrightarrow La differenza tra il diodo e un bipolo resistivo è l'entità della corrente.

$V > 0$ prevale la diffusione che sposta i portatori maggioritari.

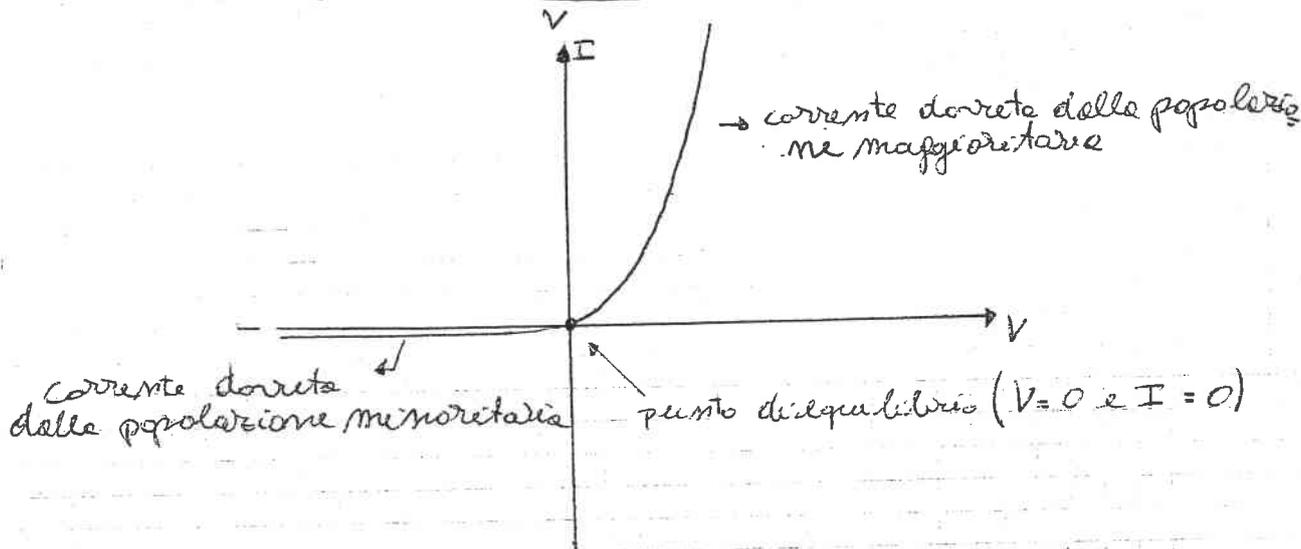
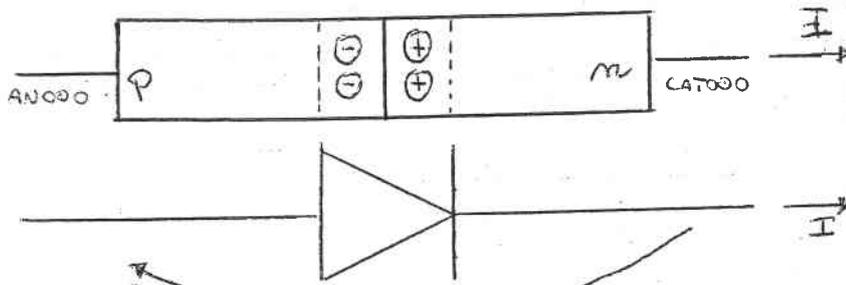
$V < 0$ prevale il trascinamento che sposta i portatori minoritari.

I portatori minoritari sono 10 ÷ 12 ordini di grandezza inferiori di quelli maggioritari (ad esempio con $N_D = N_A = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ e $n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ nelle zone 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 maggioritari (per diffusione)
 - ↳ in modulo $I \gg 0$
- $V < 0$ → si instaura un moto di portatori minoritari (per traslazione);
 - ↳ in modulo $I \approx 0$ (10-12 ordini di grandezza inferiore alle correnti dovute per il moto dei portatori maggioritari)



EQUAZIONE DEL DIODO A GIUNZIONE PN



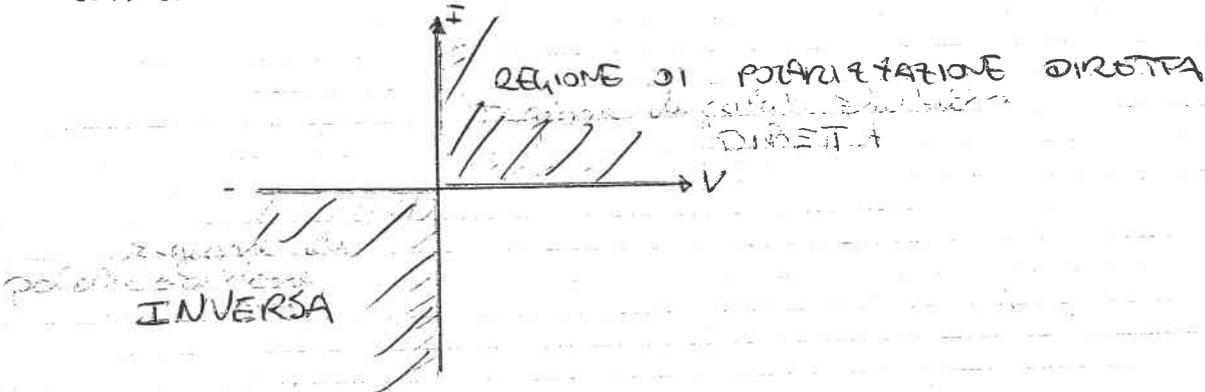
↳ IMPORTANTE: non è valido se valgono le due ipotesi di partenza in particolare se si sono dei piccoli spostamenti dall'equilibrio

↳ il diodo è come un resistore variabile in funzione delle tensione applicate:

- se $V > 0$ $R \rightarrow 0$ (cortocircuito)
- se $V < 0$ $R \rightarrow +\infty$ (circuito aperto)

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.

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



Si può dimostrare che:

(Modello accurato per c.c.)
 $-10 \leq V \leq 0,8$)

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

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

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

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

Il -1 serve ad avere per $V=0$, $I=0$ cioè la condizione di equilibrio, dove trascurare l'esponenziale pu farlo passare in 0 (0,0)

Per $V < 0$ e $\frac{V}{V_T} \ll -1 \Rightarrow I \approx -I_s \rightarrow$ è la corrente inversa di saturazione (di saturazione perché è il valore minimo che può raggiungere la corrente sempre nell'ipotesi di piccoli scostamenti dall'equilibrio).

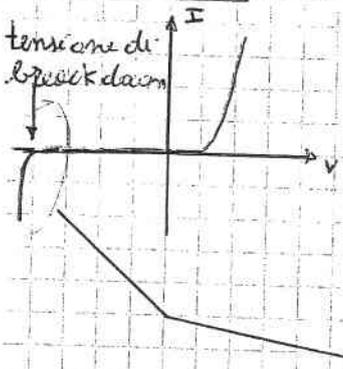
↳ polarizzazione inversa → predomina il trascinamento sulla diffusione che agisce sulle popolazioni di minoritari che dipendono da $n_i^2 \rightarrow n_i$ è la concentrazione intrinseca per effetto della generazione termica → n_i maggiore è la temperatura → n_i^2 → aumenta la popolazione dei minoritari → I_s dipende dalla temperatura (in modo esponenziale al quadrato in quanto $I_s \propto n_i^2 \propto (T)^2$)

↳ i dispositivi sono sensibili con la temperatura.

↳ il diodo si comporta come un circuito aperto

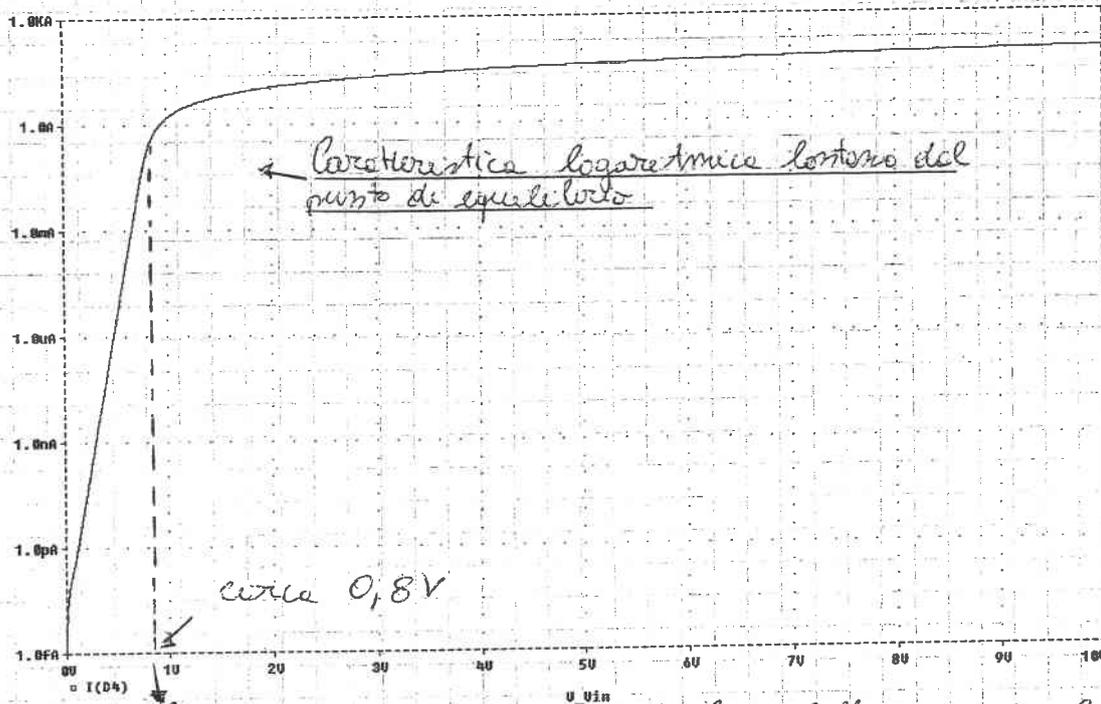
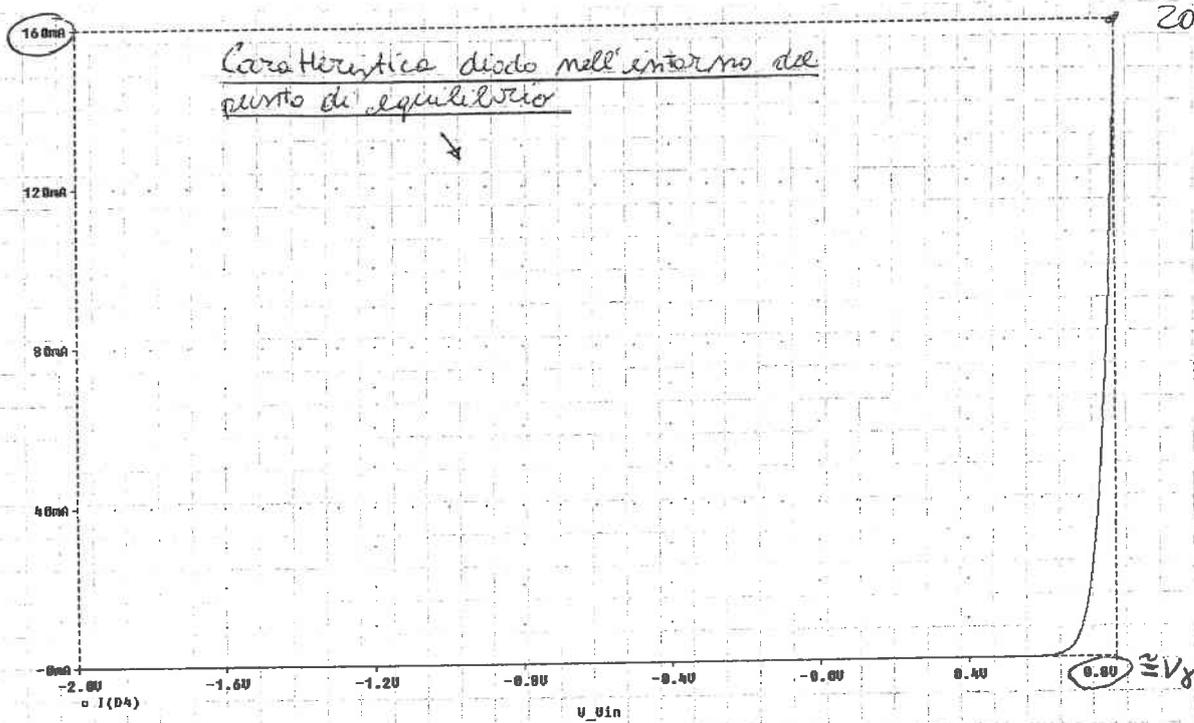
Lontano dal punto di equilibrio

Per $V \ll 0$ → la barriera di potenziale aumenta ($\psi_B = \psi_{B0} - V$)
 ↳ aumenta il campo elettrico e la regione svuotata
 ↳ un campo elettrico elevato può generare facilmente una coppia elettrone-lacuna
 ↳ non vale più il modello (dove la generazione di coppia elettrone-lacuna è solo dovuta dalla temperatura)
 ↳ possono vari meccanismi (come l'effetto zener e di ionizzazione per impatto)
 ↳ la corrente aumenta in modulo in modo esponenziale.



Fenomeno di rottura della giunzione
break down (la tensione di break down è $10 \div 20 \text{ V}$)

Per $V > 0$ → usando una scala logaritmica per le ordinate (invece di una retta) il grafico della corrente è una retta la cui pendenza cala all'aumentare della tensione.



limite massimo per cui vale il modello esponenziale

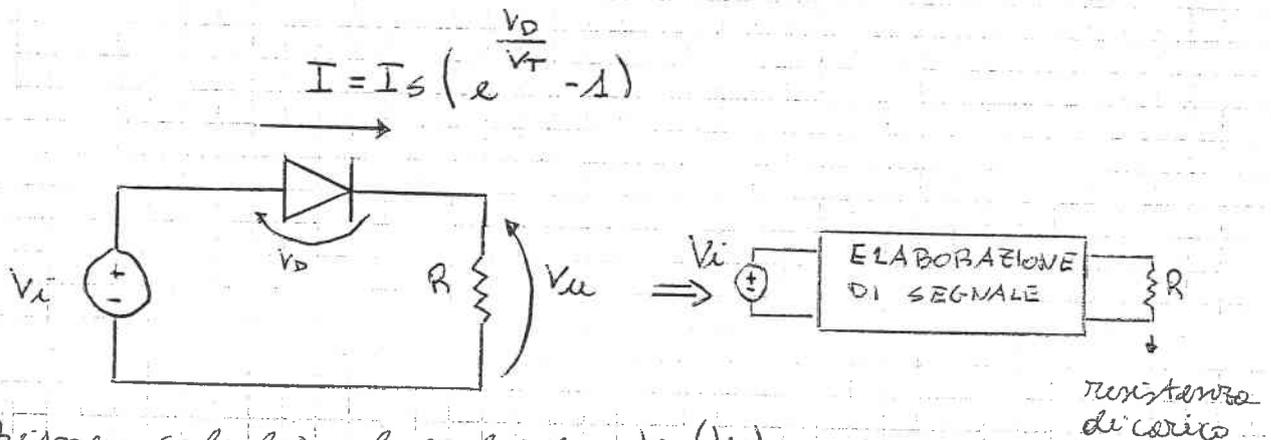
→ questo è dovuto dalle cadute non più trascurabili sulle zone neutre (ψ_{znp} e ψ_{znn}) in quanto per $V = 0,8V$ la corrente è già $160mA$.

↳ Per $V > 0,8V$ l'aumento della caduta di potenziale sulle giunzioni, responsabile dello squilibrio tra diffusione e trasferimento, è minore di quella applicata al diodo, perché una parte va alle cadute ψ_{znp} e ψ_{znn}
 ↳ corrente cresce meno velocemente

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

UTILIZZO DEL DIODO

• RADDRIZZATORE A SINGOLA SEMIONDA

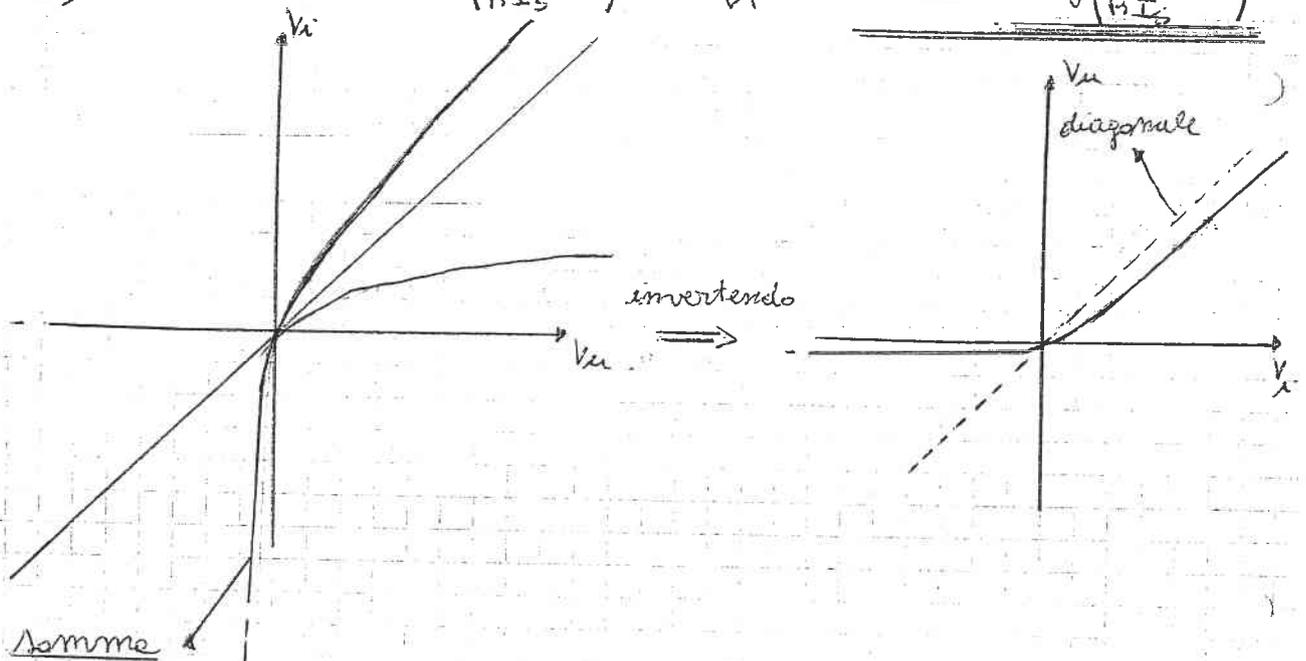


↳ Bisogna calcolare la relazione $V_u(V_i)$ cioè la caratteristica di trasferimento

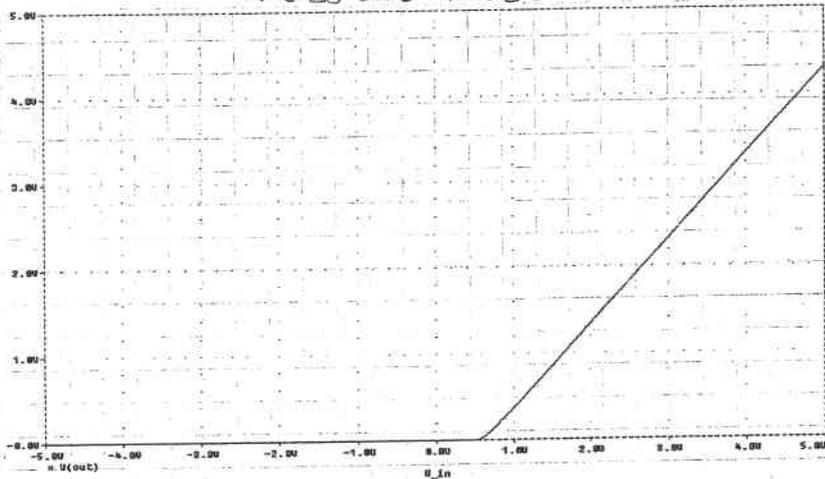
$$\begin{cases} V_i - V_D - V_u = 0 \rightarrow V_D = V_i - V_u \\ I = \frac{V_u}{R} \end{cases} \rightarrow \frac{V_u}{R} = I_s \left(e^{\frac{V_i - V_u}{V_T}} - 1 \right)$$

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

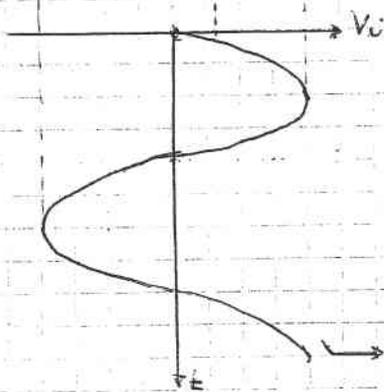
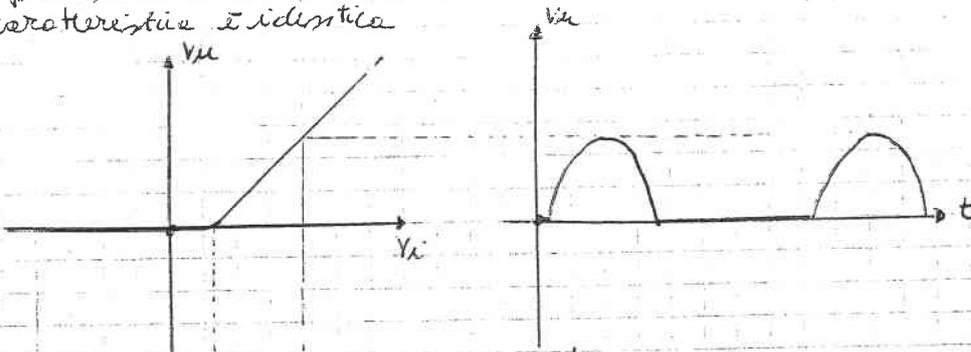
$$\frac{V_u}{R I_s} + 1 = e^{\frac{V_i - V_u}{V_T}} \rightarrow \log\left(\frac{V_u}{R I_s} + 1\right) = \frac{V_i - V_u}{V_T} \rightarrow V_i = \underline{V_u + V_T \log\left(\frac{V_u}{R I_s} + 1\right)}$$



Simulazione Spice →

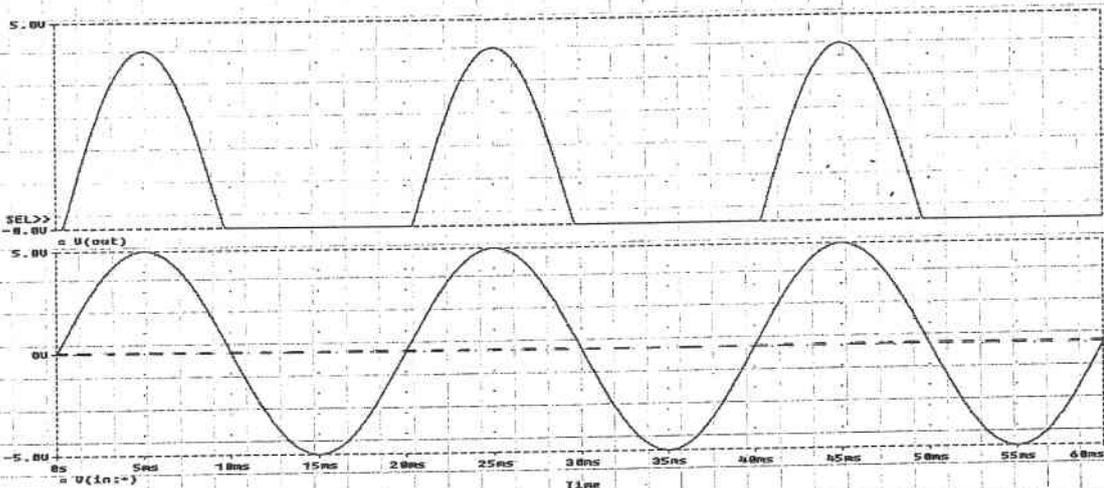


↳ Si può notare che con un modello accurato per $-10 \leq V_o \leq 0,8$ la caratteristica è identica



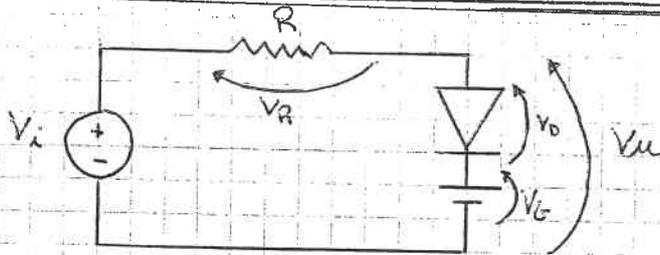
↳ il valore medio, cioè la componente continua, è diversa da 0
 ↳ con un filtro passa-basso che taglia tutte le varie armoniche mantenendo solo la continua si può "trasformare" il segnale alternato in un segnale continuo in uscita
 ↳ il circuito è poco efficiente perché elimina la metà negativa del segnale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

↳ componente continua nulla.



Se chiamo raddrizzata perché ad un segnale con parte positive e negative ne corrisponde una con solo le parte positive.

LIMITATORE DI TENSIONE SUPERIORE



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

membr \$R\$ e il diodo in serie, non
interferenti della stessa corrente \$I\$

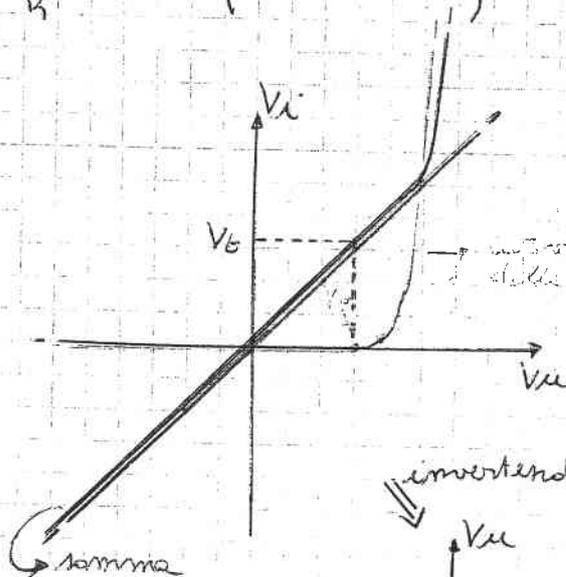
$$V_R = RI$$

$$V_i - V_R - V_u = 0 \rightarrow V_R = V_i - V_u$$

$$\left. \begin{aligned} & \\ & \end{aligned} \right\} V_i - V_u = RI \rightarrow I = \frac{V_i - V_u}{R}$$

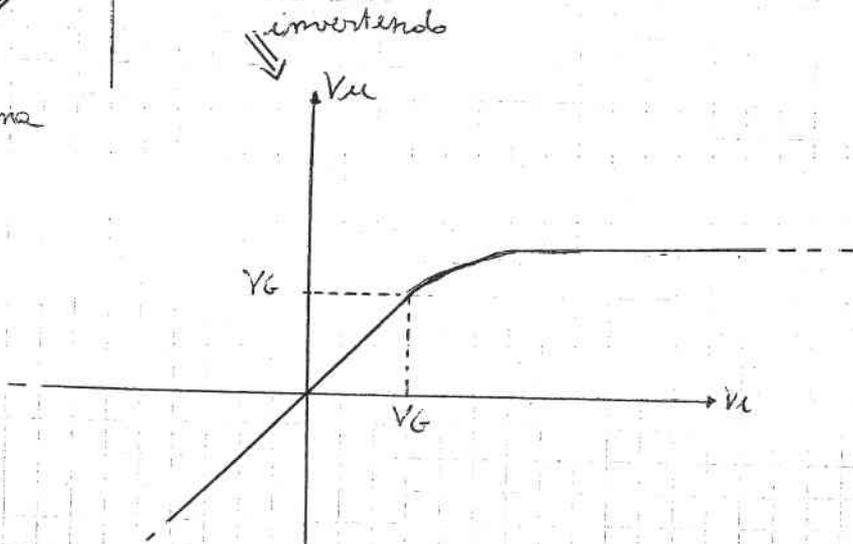
$$V_u = V_G + V_D \rightarrow V_D = V_u - V_G$$

$$\frac{V_i - V_u}{R} = I_S \left(e^{\frac{V_u - V_G}{V_T}} - 1 \right) \rightarrow \underline{\underline{V_i = V_u + RI_S \left(e^{\frac{V_u - V_G}{V_T}} - 1 \right)}}$$



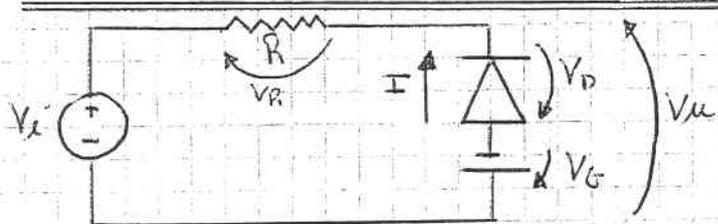
↳ da cui si inverte graficamente
per ottenere \$V_u = f(V_u)\$

↳ valore equivalente per l'analisi di base
della analisi per \$V_u = V_G\$

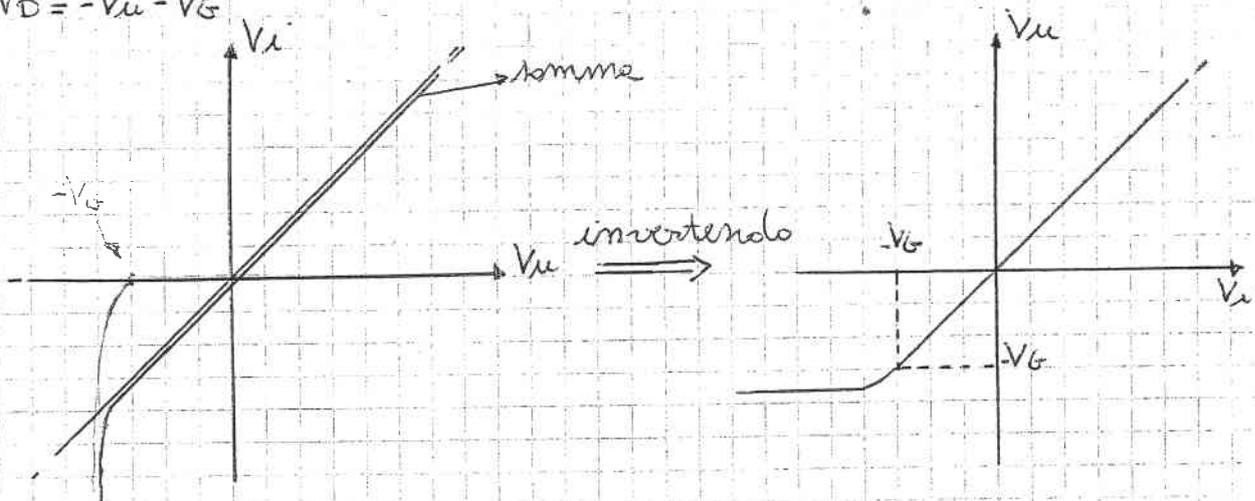


- ↳ il circuito limitatore viene utilizzato per proteggere un ingresso di un circuito da eventuali disturbi di tensione, che potrebbero danneggiare i componenti a valle.
- ↳ cambiando \$V_G\$ si può variare il limite superiore

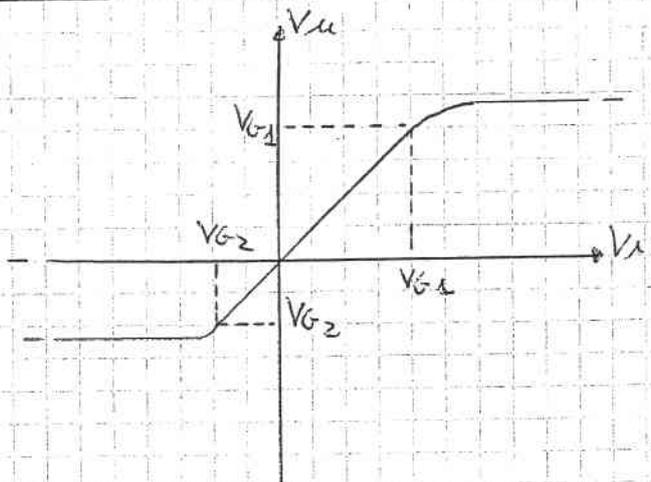
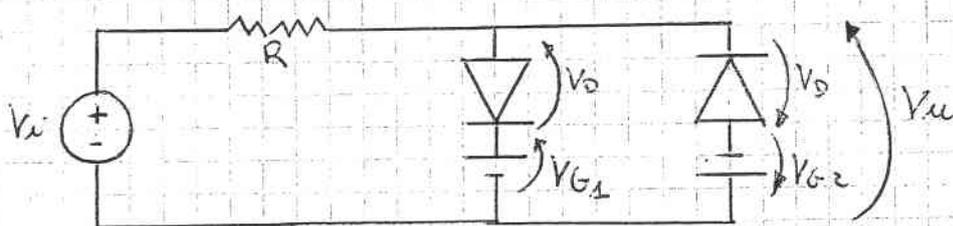
LIMITATORE DI TENSIONE INFERIORE



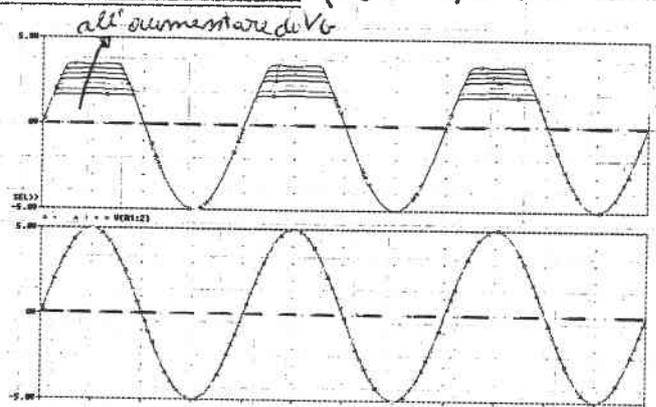
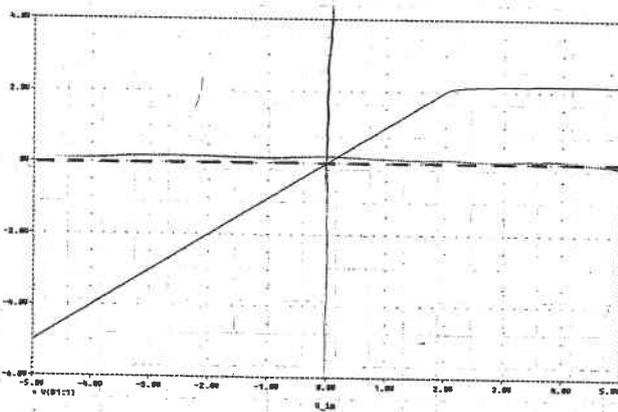
$$\begin{cases}
 I = I_S \left(e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right) \\
 V_R = -I \cdot R \\
 V_i - V_R - V_u = 0 \rightarrow -V_R = V_u - V_i \\
 V_D = -V_u - V_G
 \end{cases}
 \Rightarrow
 \begin{cases}
 \frac{V_u - V_i}{R} = I_S \left(e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right) \\
 V_i = \underline{V_u - R I_S \left(e^{\frac{-V_u - V_G}{V_T}} - 1 \right)}
 \end{cases}$$



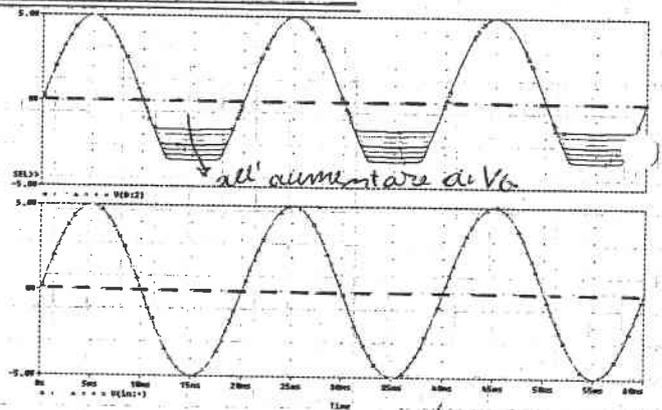
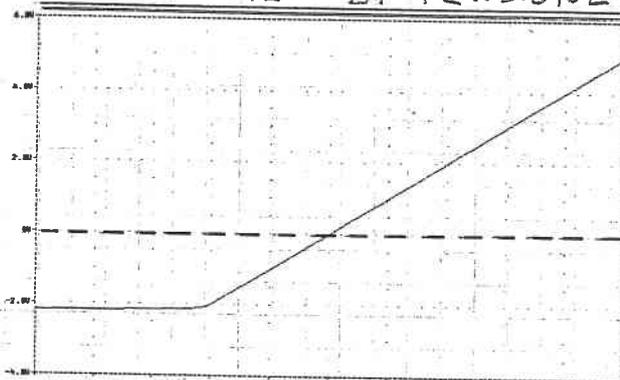
LIMITATORE DI TENSIONE INFERIORE E SUPERIORE



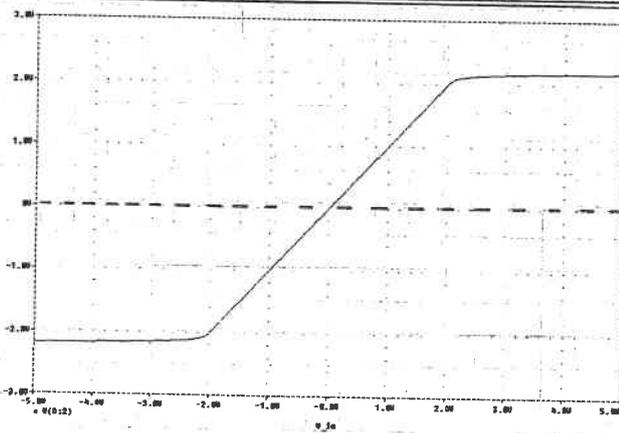
LIMITATORE DI TENSIONE SUPERIORE ($V_G = 1,6V$)



LIMITATORE DI TENSIONE INFERIORE ($V_G = -1,5V$)



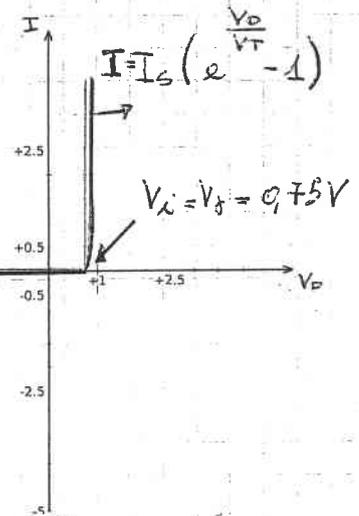
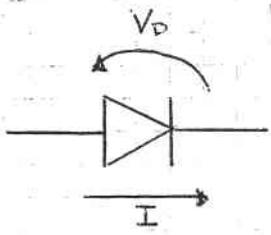
LIMITATORE DI TENSIONE INFERIORE E SUPERIORE ($V_{G1} = V_{G2} = 1,5V$)



↳ il modello introdotto del diodo è troppo complicato, perché contiene una funzione trascendente, per lo studio di circuiti con più di un diodo.

↳ serve un modello approssimato

MODELLO A SOGLIA DEL DIODO



per piccole variazioni dell'equilibrio ($-10 \leq V_D \leq 0,8$) vale

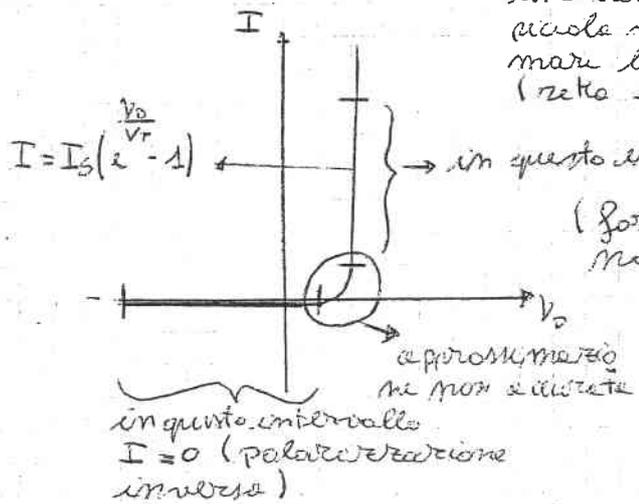
$$I = I_S \left(e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right)$$

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

- modello a soglia
- modello esponenziale (con $I_S = 10^{-14} A$ e $V_T = 0,026V$)

Le due condizioni limite sono

- ↳ polarizzazione inversa dove I tende a $-I_S \approx 0$ → 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 → si può approssimare la curva ad una retta $V = cost = V_f$ (retta verticale)



in questo intervallo $\frac{\Delta I}{\Delta V} \gg 1 \rightarrow \Delta I \gg \Delta V$
 (grande variazione di corrente corrisponde a piccole variazioni 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 sempre prima quando però lontani dalla condizione di break down)

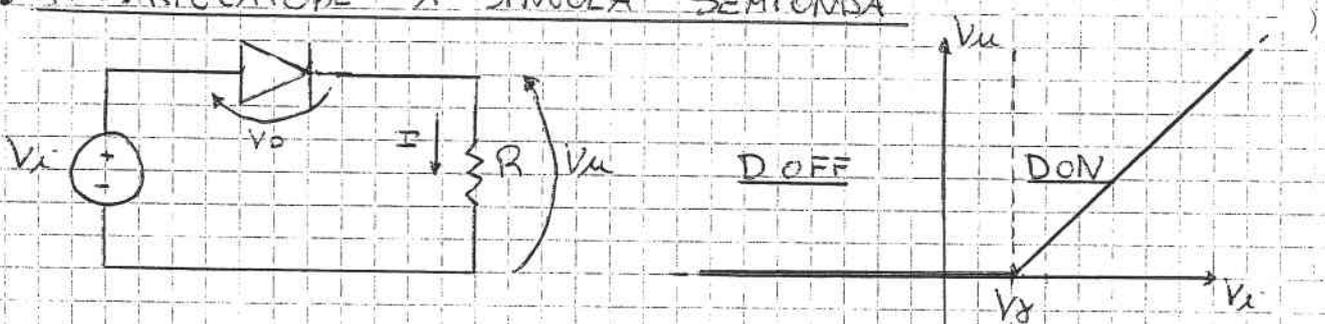
V_f → tensione di soglia (è la soglia del modello)

voce n°	una quota	$I = 0$, $V_D < V_f$ (Diodo OFF)	POLARIZZAZIONE INVERSA
voce n°	è una quota	$V = V_f$, $I > 0$ (Diodo ON)	POLARIZZAZIONE DIRETTA

↳ Modello a soglia: due equazioni lineari con le ripetute regioni di validità

STUDIO DEI CIRCUITI USANDO IL MODELLO A SOGLIA

• RADDRIZZATORE A SINGOLA SEMIONDA



① $V_i - V_0 - V_u = 0$

② $V_u = RI$

↳ caratteristica di trasferimento

↳ siccome il modello a soglia prevede due equazioni, bisogna risolvere il circuito due volte.

H₀ = D OFF

$I = 0$ da ② → $V_u = 0$

Studio della validità del risultato

$V_0 < V_x$

↳ $V_i - V_u < V_x$

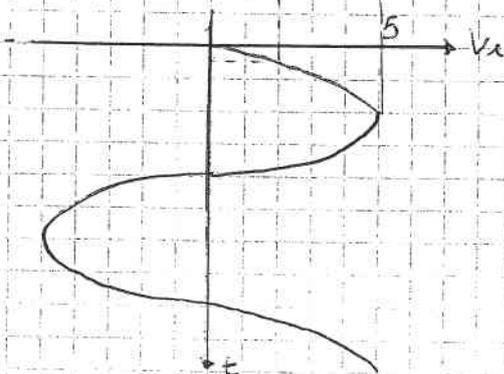
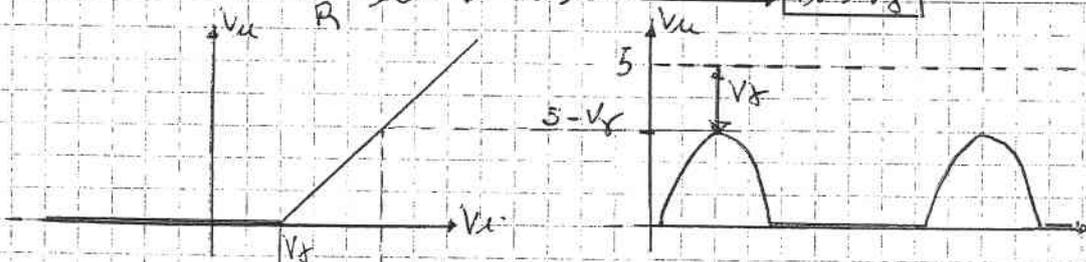
↳ $V_i < V_x$

da ① $V_0 = V_i - V_u$

H₁ = DON

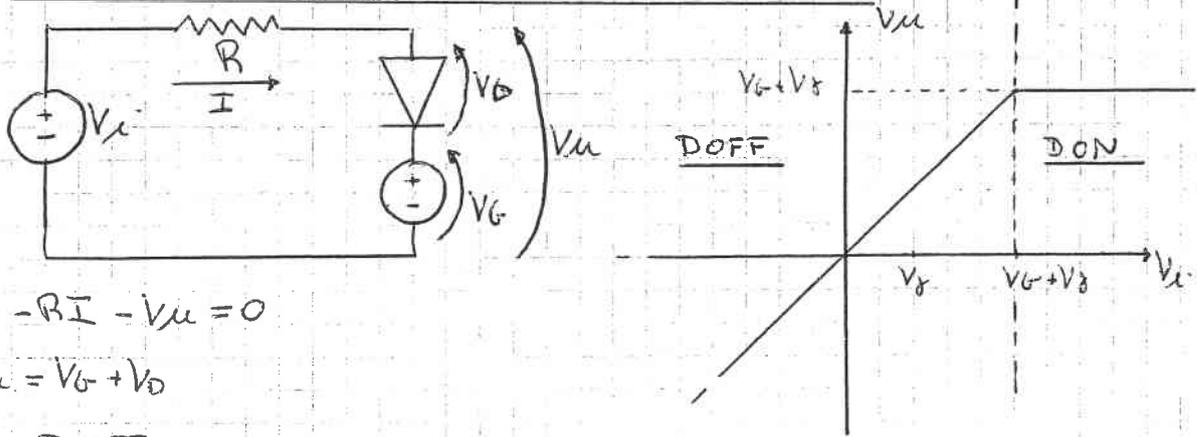
$V_0 = V_x$ da ① → $V_i - V_x - V_u = 0$ → $V_u = V_i - V_x$

$I > 0$ da ② → $\frac{V_u}{R} > 0$ → $V_u > 0$ → $V_i > V_x$



↳ Comportamento simile al moltiplicatore che usa un modello molto accurato.
↳ il modello è accurato

LIMITATORE DI TENSIONE SUPERIORE



① $V_i - RI - V_u = 0$

② $V_u = V_g + V_D$

Hip: D.O.F.F.

$I = 0$ da ① $V_i - V_u = 0 \rightarrow V_i = V_u$

$V_D < V_g \rightarrow V_u - V_g < V_g \rightarrow V_i < V_g + V_g$

da ② $V_D = V_u - V_g$

Hip: D.O.N.

$V_D = V_g$ da ② $V_u = V_g + V_g$

$I > 0$

da ① $I = \frac{V_i - V_u}{R} > 0 \rightarrow V_i > V_u \rightarrow V_i > V_g + V_g$

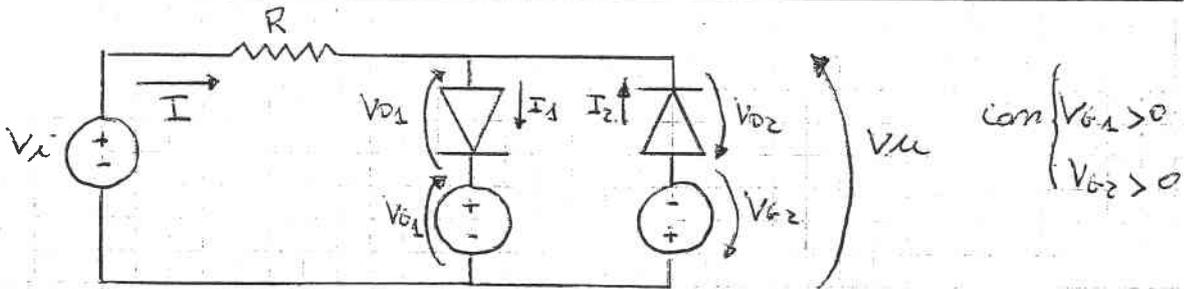
↳ la simulazione è approssimata in modo accurato del modello anche se la p-n-junzione (la simulazione) usa modelli esponenziali e la regione usa modelli lineari.

↳ analisi del comportamento del circuito:

→ quando la tensione di ingresso è inferiore al limite dell'intervento ($V_g + V_g$) il diodo è spento → la corrente sulla resistenza è nulla → non c'è caduta → l'uscita coincide con l'ingresso

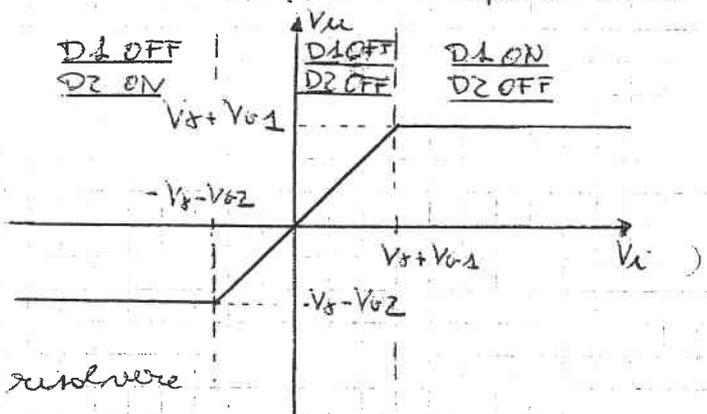
→ quando la tensione di ingresso è superiore alle soglie di intervento ($V_g + V_g$) si eccende il diodo la cui tensione (ai capi di un \approx costante) → "blocca" la tensione in uscita a $V_g + V_g$ → l'eventuale corrente dell'ingresso viene smaltita dalla resistenza.

LIMITATORE DI TENSIONE SUPERIORE ED INFERIORE



↳ circuito difficile da risolvere con il modello esponenziale

- ① $V_i - RI - V_u = 0$
- ② $I + I_2 = I_1$
- ③ $V_{D1} + V_{D1} + V_{D2} + V_{D2} = 0$
- ④ $V_{D1} + V_{D1} = V_u$
- ⑤ $-(V_{D2} + V_{D2}) = V_u$



↳ ci sono due diode → bisogna risolvere il circuito 4 volte

↳ questo è un problema perché con un modello a 2 equazioni un circuito a n diodi bisogna risolverlo 2ⁿ volte.

Hp: D1 OFF, D2 OFF

$I_1 = 0, I_2 = 0$ da ② $I = 0$ da ① $V_i - V_u = 0 \rightarrow V_i = V_u$

• $V_{D1} < V_s \rightarrow V_u - V_{D1} < V_s \rightarrow V_i - V_{D1} < V_s \rightarrow V_i < V_{D1} + V_s$

da ④ $V_{D1} = V_u - V_{D1}$

• $V_{D2} < V_s \rightarrow -(V_u + V_{D2}) < V_s \rightarrow (V_u + V_{D2}) > -V_s \rightarrow V_i > -V_{D2} - V_s$

da ⑤ $V_{D2} = -V_u - V_{D2}$

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

$V_{D1} = V_s \rightarrow V_u = V_{D1} + V_s$

• $I_1 > 0$

• $I_2 = 0$ da ② $I = I_1 \rightarrow I > 0 \rightarrow V_i > V_u \rightarrow V_i > V_{D1} + V_s$

da ① $\frac{V_i - V_u}{R} = I$

Bisogna ancora verificare $V_{D2} < V_s$ condizione verificata.

da ③ $V_{D2} = -(V_{D1} + V_{D2} + V_{D1}) \rightarrow V_{D2} < 0$
 tutte maggiori di 0

Si come $V_{D1} > 0$ e $V_{D2} > 0$ della maglia ③ necessita che a due diodi

non possono essere attive simultaneamente perché se così fosse

$V_{D1} = V_{D2} = V_s$ e $V_{D1} + V_{D2} + V_{D1} + V_{D2} \neq 0$ in quanto sono tutti termini positivi.

Quindi è impossibile che D1 ON e D2 ON

H₀: D1 OFF, D2 ON (è come il limitatore di tensione inferiore)

da ③ $V_{D2} = V_s \rightarrow V_u = -(V_{D2} + V_s)$

$I_2 > 0$

da ② $I_1 = 0 \rightarrow I = -I_2$

$I < 0$

$V_i < V_u \rightarrow V_i < -(V_{D2} + V_s)$

da ① $I = \frac{V_i - V_u}{R}$

Bisogna dimostrare che il diodo 1 è spento. → condizione verificata

da ③ $V_{D1} = -(V_{D1} + V_{D2} + V_{D2}) \rightarrow V_{D1} < 0 \rightarrow V_{D1} < V_s$
 tutti maggiore di 0.

↳ Se non si seppe che i due diodi potrebbero essere attivi allora

H_p: D1 ON, D2 ON

$V_{D1} = V_s$

$V_{D2} = V_s$

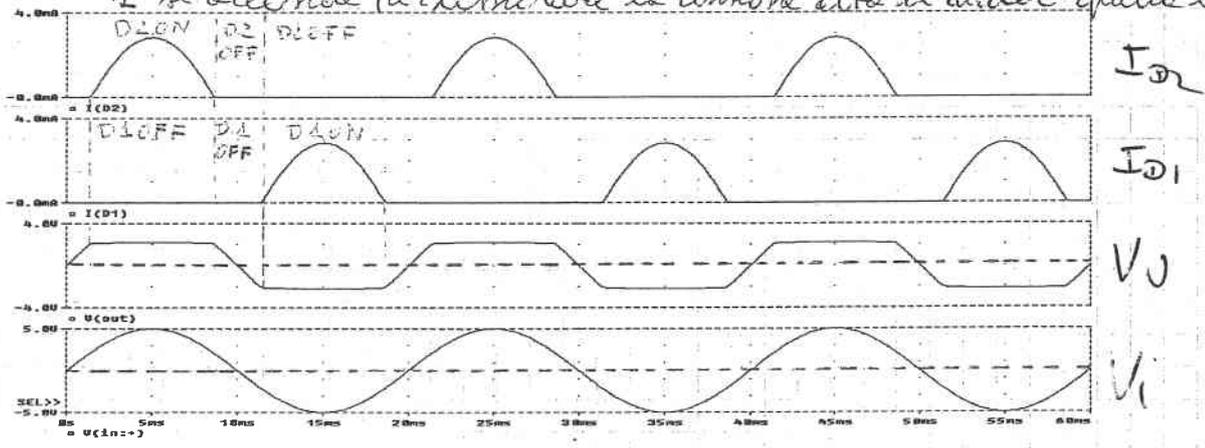
$V_{D1} + V_{D2} > 0$

Assurdo

da ③ $V_{D1} + V_{D2} = -(V_{D1} + V_{D2}) < 0$

↳ Con n diodi bisognerebbe risolvere 2ⁿ volte lo stesso circuito (dove 2ⁿ sono tutte le possibili configurazioni (ON o OFF) dei diodi) ma molte combinazioni porterebbero a degli assurdi (come nel caso precedente); quindi disordinando dall'inizio le condizioni non si possono ridurre al numero di risoluzioni dello stesso circuito.

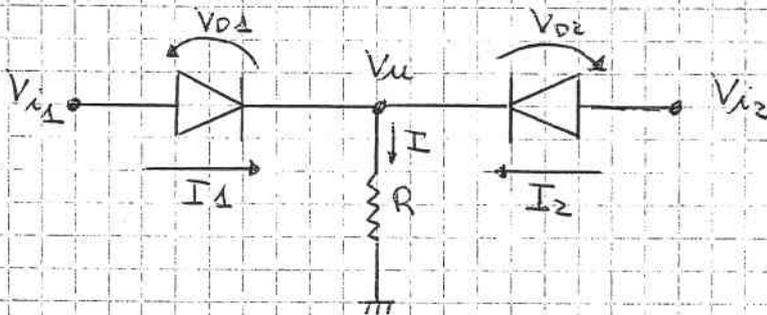
↳ i diodi si accendono quando interviene il limitatore. Il diodo 1 si accende per limitare la tensione alta il diodo 2 quella bassa.



ELABORAZIONE DI PIU' SEGNALI



CIRCUITO RILEVATORE DI MASSIMO, OR



↳ non si può determinare la caratteristica perché sarebbe un grafico di una funzione di due variabili (V_{i1} e V_{i2}) (il grafico è tridimensionale, inutile allo comprensione della funzione del circuito).

① $V_u = R I$, ② $I_1 + I_2 = I$, ③ $V_{i1} - V_{o1} = V_u$, ④ $V_{i2} - V_{o2} = V_u$

Hp: D1 OFF, D2 OFF

$I_1 = 0, I_2 = 0 \xrightarrow{\text{da ②}} I = 0 \xrightarrow{\text{da ①}} V_u = 0$

• Verifica di $V_{o1} < V_s$

da ③ $V_{o1} = V_{i1} - V_u < V_s \rightarrow V_{i1} < V_s + V_u \rightarrow V_{i1} < V_s$

• Verifica di $V_{o2} < V_s$

da ④ $V_{o2} = V_{i2} - V_u \rightarrow V_{i2} - V_u < V_s \rightarrow V_{i2} < V_s$

Hp: D1 ON, D2 OFF

• $V_{o1} = V_s \xrightarrow{\text{da ③}} V_u = V_{i1} - V_s$

• $I_1 > 0$ } $I > 0 \xrightarrow{\text{da ①}} V_u > 0 \rightarrow V_{i1} > V_s$

• $I_2 = 0 \rightarrow I_1 = I$

• Verifica $V_{o2} < V_s$

da ④ $V_{o2} = V_{i2} - V_u \rightarrow V_{i2} - V_u < V_s \rightarrow V_{i2} - (V_{i1} - V_s) < V_s$

$V_{i2} < V_{i1}$

infatti per $V_{i1} > V_s \rightarrow D1 \text{ è ON e } V_u \text{ è inferiore di } V_{i1} \text{ di } V_s. \text{ Per poter escludere } D2 \text{ serve una tensione } V_{i2} \text{ tale da applicare al diodo una } V_s \rightarrow V_{i2} > V_{i1}$

Hp: D2 ON, D1 OFF

↳ il circuito è simmetrico e quindi

$$V_u = V_{i2} - V_f, \quad V_{i2} > V_f, \quad V_{i1} < V_{i2}$$

Hp: D1 ON, D2 ON

$$V_{D1} = V_f \xrightarrow{\text{de } \textcircled{3}} V_u = V_{i1} - V_f$$

$$V_{D2} = V_f \xrightarrow{\text{de } \textcircled{4}} V_u = V_{i2} - V_f$$

$$V_{i1} = V_{i2}$$

$$\left. \begin{matrix} I_1 > 0 \\ I_2 > 0 \end{matrix} \right\}$$

$$\xrightarrow{\text{de } \textcircled{2}} I > 0 \xrightarrow{\text{de } \textcircled{1}} V_u > 0 \rightarrow \begin{cases} V_{i1} - V_f > 0 \\ V_{i2} - V_f > 0 \end{cases}$$

$$V_{i1} = V_{i2} > V_f$$

Analisi del comportamento del circuito

$$\text{per } \begin{cases} V_{i1} < V_f \\ V_{i2} < V_f \end{cases} \Rightarrow V_u = 0; \quad \text{per } \begin{cases} V_{i1} > V_f \\ V_{i2} < V_{i1} \end{cases} \Rightarrow V_u = V_{i1} - V_f$$

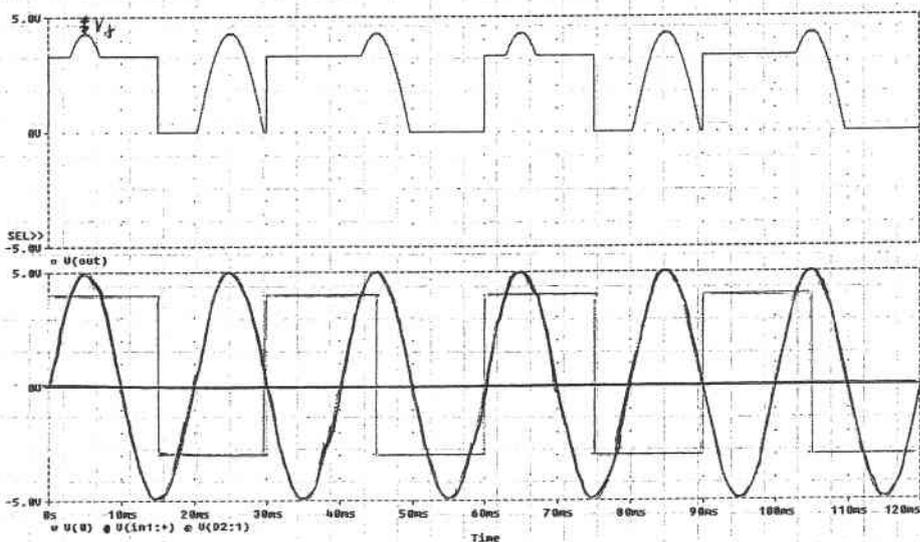
$$\text{per } \begin{cases} V_{i2} > V_f \\ V_{i1} < V_{i2} \end{cases} \Rightarrow V_u = V_{i2} - V_f$$

Caso particolare
per $V_{i1} = V_{i2} > V_f \Rightarrow V_u = V_{i1} - V_f$

↳ l'uscita "segue" il valore di tensione più alto in ingresso a meno di una V_f

$$V_u = \text{Max} \{ V_{i1} - V_f, V_{i2} - V_f, 0 \}$$

quando ne V_{i1} che V_{i2} sono $< V_f$
(dove $V_{i1} - V_f < 0$ e $V_{i2} - V_f < 0$)



↳ l'uscita è il massimo tra la sinusoide e l'onda quadra. Quando i due segnali sono minore di 0 l'uscita è uguale a 0.
↳ l'uscita è più bassa di una V_f

In elettronica digitale gli ingressi hanno solo due distinti valori:

$V_L \rightarrow$ low voltage } codifica binaria
 $V_H \rightarrow$ high voltage

con $V_L < V_T$ e $V_H >> V_T$ (Per esempio $V_L = 0$ e $V_H = 5V$)

La configurazione degli ingressi è al massimo 4:

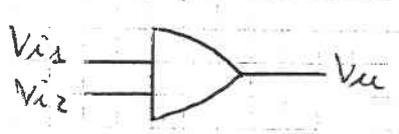
V_{i1}	V_{i2}	V_u
V_L	V_L	V_L
V_L	V_H	V_H
V_H	V_L	V_H
V_H	V_H	V_H

$V_{i1} < V_T$ e $V_{i2} < V_T \Rightarrow V_u = 0 < V_T$ e quindi $V_u = V_L$

$V_{i2} >> V_T$ e $V_{i1} < V_T \Rightarrow V_u = V_{i2} - V_T$ e siccome $V_{i2} >> V_T \Rightarrow V_u >> V_T$ e quindi $V_u = V_H$

$V_{i1} >> V_T$ e $V_{i2} < V_T \Rightarrow V_u = V_{i1} - V_T$ e siccome $V_{i1} >> V_T \Rightarrow V_u >> V_T$ e quindi $V_u = V_H$

$V_{i1} = V_{i2} = V_H >> V_T \Rightarrow V_u = V_{i1} - V_T = V_{i2} - V_T$
 $V_u >> V_T \Rightarrow V_u = V_H$

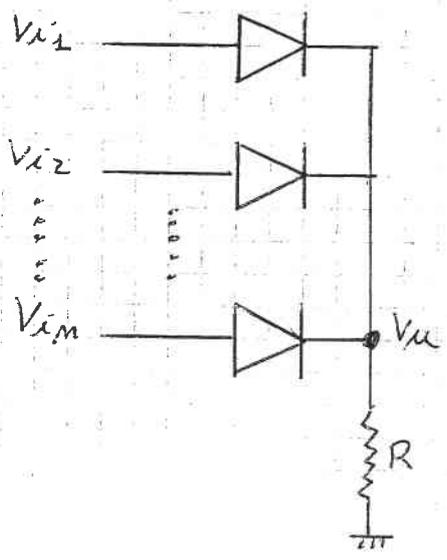


In digitale il circuito è un OR.

- ↳ il circuito è semplice
- ↳ non è immune ai disturbi

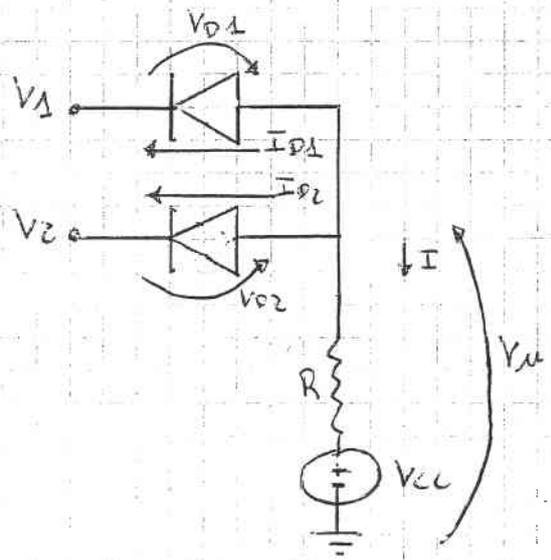
OR A N - INGRESSI

L'or a due ingressi è un circuito redattore e semplice realizzabile con un pila un diodo in parallelo con l'uscita \rightarrow in questo circuito si accende il diodo con l'ingresso più alto



- \rightarrow questa architettura semplice è utilizzata per creare or con un fan-in (= no di ingressi in una porta) elevato.
- \hookrightarrow è alla base delle memorie ROM o EPROM

CIRCUITO RILEVATORE DI MINIMO, AND



HP : D1, D2 OFF

- $I_1 = 0, I_2 = 0$
- $I = -(I_1 + I_2) = 0$
- $V_m = V_{cc} + RI = V_{cc} = V_m$
- $V_{d1} < V_f$
- $V_{d1} = V_m - V_1$
- $V_m - V_1 < V_f \rightarrow V_1 > V_{cc} - V_f$
- $V_{d2} < V_f$
- $V_{d2} = V_m - V_2$
- $V_m - V_2 < V_f \rightarrow V_2 > V_{cc} - V_f$

HP : D1 ON, D2 OFF

- $V_{d1} = V_f$
- $V_m = V_1 + V_{d1}$
- $V_m = V_1 + V_{d1} \rightarrow V_m = V_1 + V_f$
- $I_1 > 0, I_2 = 0$
- $I = -(I_1 + I_2) = -I_1 < 0$
- $I = \frac{V_m - V_{cc}}{R} < 0 \rightarrow V_m < V_{cc}$
- $V_1 + V_f < V_{cc} \rightarrow V_1 < V_{cc} - V_f$
- $V_{d2} < V_f$
- $V_{d2} = V_m - V_2$
- $V_m - V_2 < V_f \rightarrow V_1 + V_f < V_2 + V_f \rightarrow V_1 < V_2$

HP : D1 OFF, D2 ON

↳ il circuito è simmetrico e quindi

$V_m = V_2 + V_f$; $V_2 < V_{cc} - V_f$; $V_2 < V_1$

HP : D1 ON, D2 ON

- $V_{d1} = V_f$
- $V_{d1} = V_m - V_1$
- $V_m - V_1 = V_f \rightarrow V_m = V_1 + V_f$
- $V_{d2} = V_f$
- $V_{d2} = V_m - V_2$
- $V_m - V_2 = V_f \rightarrow V_m = V_2 + V_f$
- $I_1 > 0, I_2 > 0$
- $I = -(I_1 + I_2) = \frac{V_m - V_{cc}}{R} < 0 \rightarrow V_m < V_{cc}$
- $V_1 < V_{cc} - V_f$
- $V_2 < V_{cc} - V_f$
- $V_1 = V_2$

Analisi del comportamento del circuito

per $\begin{cases} V_1 > V_{cc} - V_T \\ V_2 > V_{cc} - V_T \end{cases} \Rightarrow V_u = V_{cc}$; per $\begin{cases} V_1 < V_{cc} - V_T \\ \textcircled{V_1} < V_2 \end{cases} \Rightarrow V_u = \textcircled{V_1} + V_T$

per $\begin{cases} V_2 < V_{cc} - V_T \\ \textcircled{V_2} < V_1 \end{cases} \Rightarrow V_u = \textcircled{V_2} + V_T$

Caso particolare
per $V_1 = V_2 < V_{cc} - V_T$; $V_u = V_1 + V_T$

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

↳ se almeno uno degli ingressi è inferiore a $V_{cc} - V_T$ l'uscita "accanto" all'ingresso più basso aumenterà, cioè di V_T

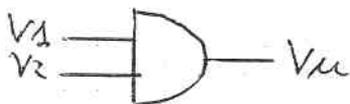
$$V_u = \text{Min} \{ V_1 - V_T, V_2 - V_T, V_{cc} \}$$

Per segnali digitali:

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

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

V_1	V_2	V_u
V_L	V_L	$V_L \rightarrow V_1 = V_2 < V_{cc} - V_T \rightarrow V_u = V_1 + V_T \approx V_L$
V_L	V_H	$V_L \rightarrow V_1 < V_{cc} - V_T$ e $V_1 < V_2 \rightarrow V_u = V_1 + V_T \approx V_L$
V_H	V_L	$V_L \rightarrow V_2 < V_{cc} - V_T$ e $V_2 < V_1 \rightarrow V_u = V_2 + V_T \approx V_L$
V_H	V_H	$V_H \rightarrow V_1 = V_2 > V_{cc} - V_T \rightarrow V_u = V_{cc} = V_H$

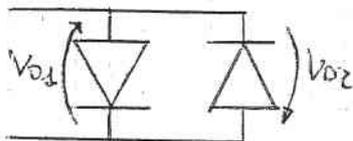


↳ non ha le caratteristiche di resistenza al rumore
↳ è un'architettura facile e quindi si applica realizzare un AND a n -ingressi (aggiungendo n -diodi in parallelo) → usato per realizzare degli AND con un alto fan-in (utile nelle matrici delle memorie).

Problema del Modello a soglia

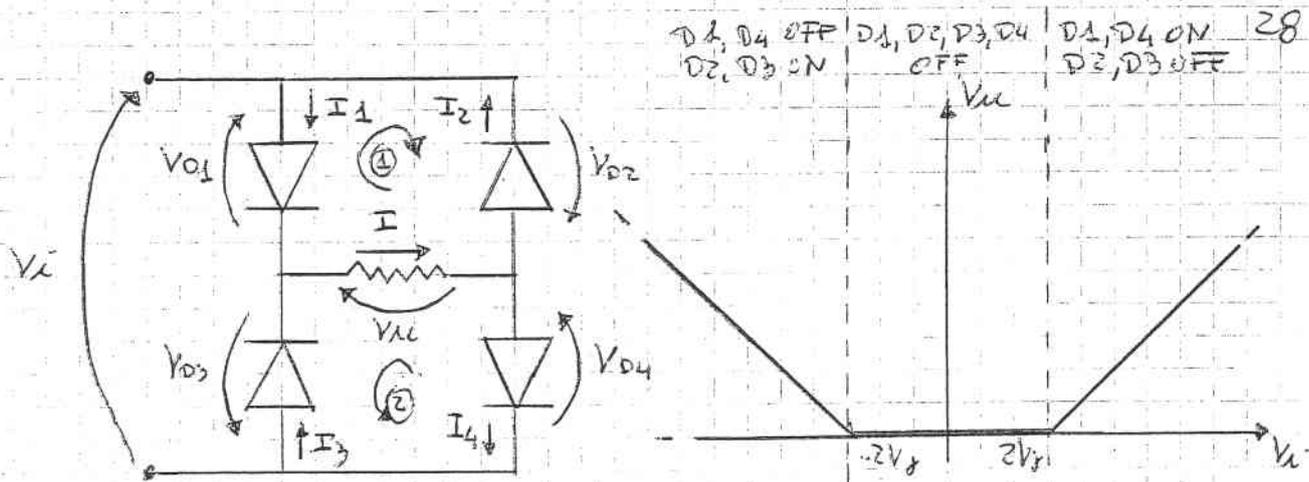
Con n diodi bisogna studiare 2^n combinazioni.

↳ bisogna trovare un criterio ragionevole per ridurre il numero di combinazioni possibili. Ad esempio nella configurazione di enti paralleli a due diodi non possono essere entrambi alti infatti se con



fonte $\left. \begin{aligned} V_{01} = V_T, V_{02} = V_T \text{ e} \\ V_{01} + V_{02} = 0 \end{aligned} \right\} \text{ASSURDO}$

RADDRIZZATORE A DOPPIA SEMIONDA (PONTE DI DIODI)



↳ Bisognerebbe studiare $2^4 = 16$ combinazioni diverse
 ↳ Studio delle possibili configurazioni dei diodi

Hp: $D1$ ON

$V_{D1} = V_d$

$I_1 > 0$

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

$I_3 \geq 0$ (> 0 se il diodo 3 è acceso, $= 0$ se il diodo 3 è spento)

delle maglie ①

$V_{D1} + V_{D2} + V_u = 0 \rightarrow V_{D2} = -V_u - V_d$
 (maggiore di 0)

↳ $V_{D2} < 0 \rightarrow D2$ OFF ②

⇒ caso ② quando $D1$ è ON $\Leftrightarrow D2$ è OFF

$I > 0$
 $I = I_2 + I_4$ $\xrightarrow{D2 \text{ è OFF}}$ $I = I_4 > 0 \rightarrow D4$ ON ③

⇒ caso ③ quando $D1$ è ON $\Leftrightarrow D2$ è OFF $\Leftrightarrow D4$ è ON
 (deve essere così perché la corrente $I = I_1 > 0$ deve passare per forza dal diodo 4)

Se come $D4$ è ON $\rightarrow V_{D4} = V_d > 0$

delle maglie ③ $V_{D4} + V_u + V_{D3} = 0 \rightarrow V_{D3} = -V_u - V_d < 0$
 (maggiore di 0)

⇒ caso ④ quando $D1$ è ON $\Rightarrow D2$ è OFF $\Rightarrow D4$ è ON $\Rightarrow D3$ è OFF

$D_1 D_2$	D_3 OFF	D_3 ON	D_4 OFF	D_4 ON
OFF OFF		ⓐ	ⓑ	ⓓ
OFF ON	ⓑ	ⓑ		ⓓ
ON OFF	ⓑ		ⓑ	ⓓ
ON ON	ⓑ	ⓑ	ⓑ	ⓓ

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

Hip D4 ON

$$V_{D4} = V_f \quad V_{D3} = -V_u - V_f < 0 \rightarrow \boxed{D3 \text{ OFF}}$$

\Rightarrow caso (d) $\boxed{D4 \text{ ON}} \Leftrightarrow \boxed{D3 \text{ OFF}}$

Hip D2 ON

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

$$I_2 > 0$$

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

$$I_3 > 0$$

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

\Rightarrow caso (e) quando $D2 \text{ ON} \Rightarrow D1 \text{ OFF}$

Siccome $D1 \text{ OFF} \Rightarrow I_1 = 0$

$$I = I_1 + I_3 = I_3 > 0 \Rightarrow \boxed{D3 \text{ ON}} \quad (\text{le correnti passano solo dai diodi 1-4 o 2-3})$$

\Rightarrow caso (f) quando $D2 \text{ ON} \Leftrightarrow D3 \text{ ON}$

Siccome $D3 \text{ ON} \Rightarrow V_{D3} = V_f$

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

Studio delle tre configurazioni rimanenti

• $D1, D2, D3, D4 \text{ OFF}$

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

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

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

$$V_i - V_{D1} - V_u - V_{D4} = 0$$

$$V_i - V_u^0 = V_{D1} + V_{D4} < 2V_f$$

$$\boxed{V_i < 2V_f}$$

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

$$\boxed{V_i > -2V_f}$$



• D1 ON, D2 OFF, D3 OFF, D4 ON

$$\left. \begin{aligned} V_{D1} = V_f, V_{D4} = V_f \\ V_i - V_u - V_{D1} - V_{D4} = 0 \end{aligned} \right\} \boxed{V_u = V_i - 2V_f}$$

$$\left. \begin{aligned} I_1 > 0 \\ I_3 = 0 \end{aligned} \right\} \rightarrow I = I_1 + I_3 > 0 \left. \begin{aligned} V_u > 0 \\ \rightarrow \boxed{V_i > 2V_f} \end{aligned} \right\}$$

$$V_u = RI$$

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

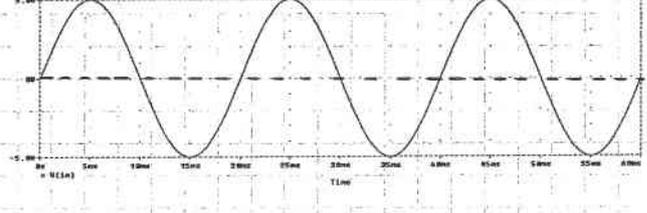
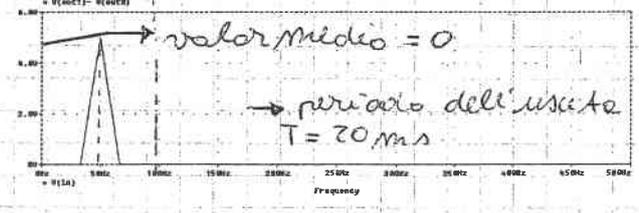
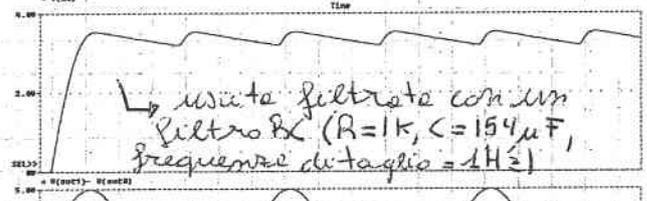
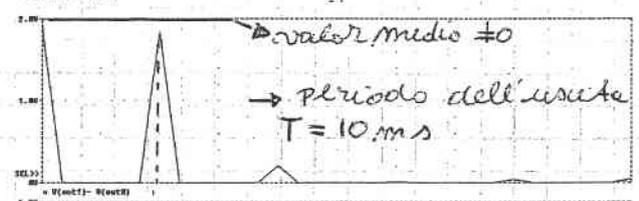
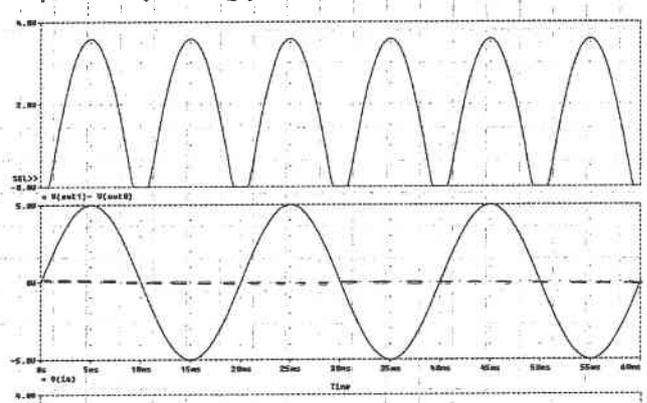
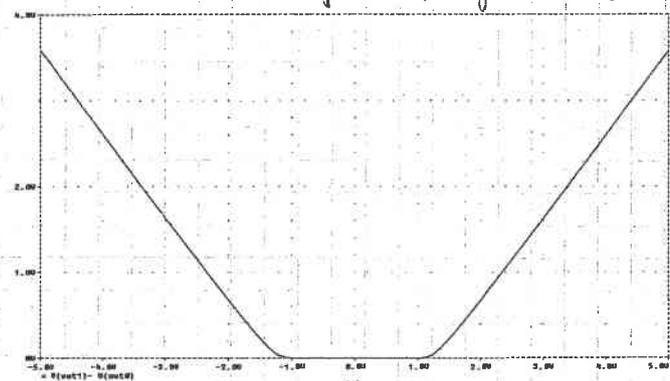
• D1 OFF, D2 ON, D3 ON, D4 OFF

$$\left. \begin{aligned} V_{D2} = V_f, V_{D3} = V_f \\ V_i + V_{D2} + V_u + V_{D3} = 0 \end{aligned} \right\} \boxed{V_u = -V_i + 2V_f}$$

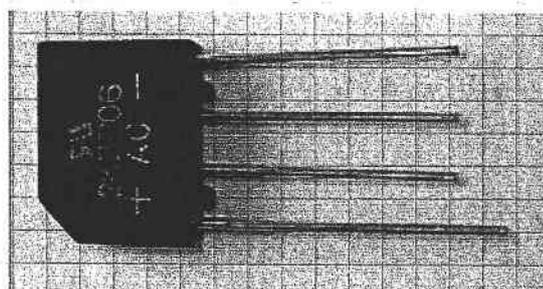
$$\left. \begin{aligned} I_2 > 0 \\ I_4 = 0 \end{aligned} \right\} \rightarrow I = I_2 + I_4 > 0 \left. \begin{aligned} V_u > 0 \\ \rightarrow \boxed{V_i < -2V_f} \end{aligned} \right\}$$

$$V_u = RI$$

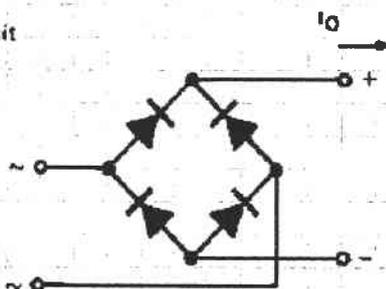
↳ Dalla simulazione si può vedere che il circuito "raddrizzare" la sinusoide in ingresso → il segnale di uscita ha il valor medio ≠ 0 (come si può vedere dallo spettro di Fourier dove in ingresso la sinusoide è a 50Hz) → il circuito è più efficiente del raddrizzatore a singola semionda (non elimina la parte negativa delle sinusoide)



PONTE RADDOPPIATORE



Circuit

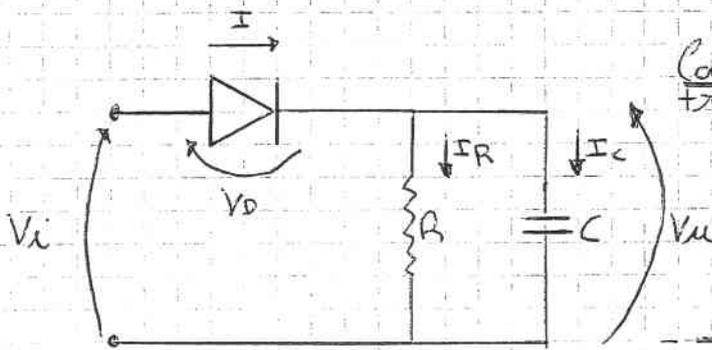


- ↳ utilizzato per la conversione AC / DC (con un filtro passa-basso si isola la componente continua)
- ↳ per ricavare la componente continua basta mettere in parallelo alle resistenze un condensatore che alle alte frequenze è un cortocircuito ($V_u = 0$) alle basse frequenze un circuito aperto ($V_u = RI$).

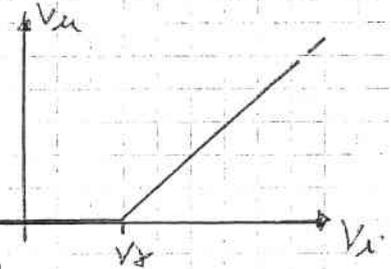
DIODO A GIUNZIONE PN



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



Caratteristica statica di trasferimento del circuito



$V_i(t) = V_M \sin(\omega t) \rightarrow$ calcolo di $V_u(t)$

$H_p: D \text{ ON}$

$V_o = V_x$

$V_u = V_i - V_o \rightarrow V_u = V_i - V_x = V_M \sin(\omega t) - V_x \approx V_M \sin(\omega t)$

H_p : considerando $V_M \gg V_x$

$\rightarrow 220V$ (tensione rete) $\gg 0,75V$

D: acceso quando:

$-I > 0$

$I = I_R + I_C$

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

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

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

Nel 1° quadrante

$I_R > 0$ e $I_C > 0$ perché $\frac{dV_u}{dt} > 0$

\rightarrow il diodo è acceso

Nel 3° quadrante

$I_R < 0$ e $I_C < 0 \rightarrow$ il diodo è spento

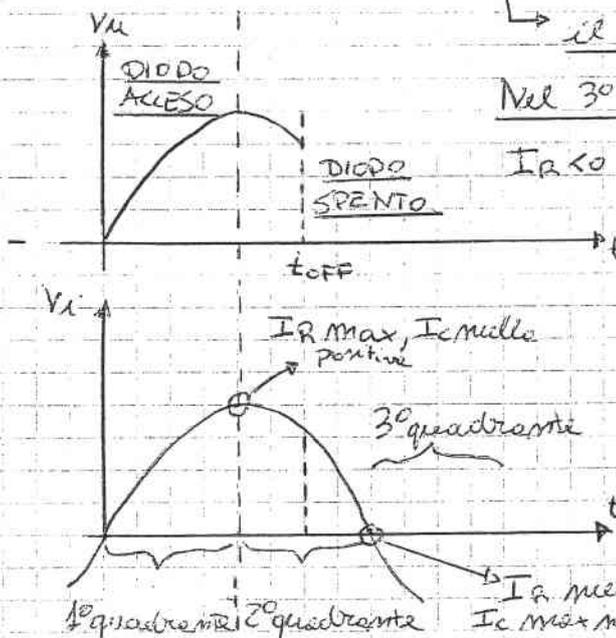
Nel 2° quadrante

$I_R > 0$ che cade

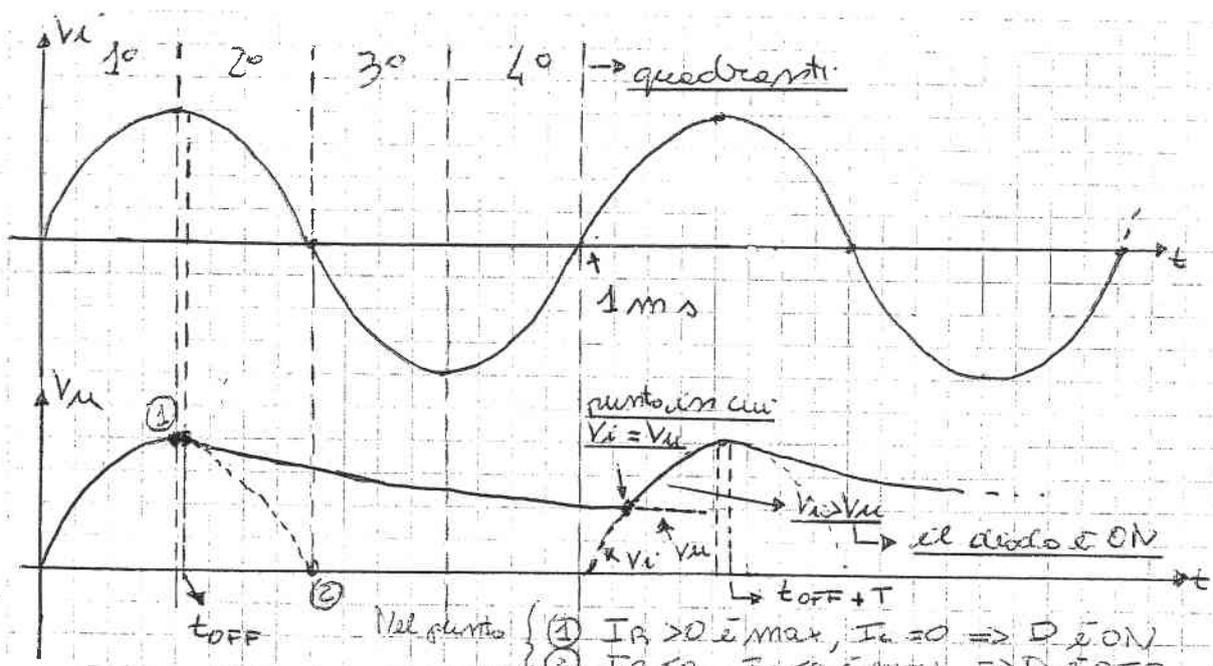
$I_C < 0$ (perché $\frac{dV_u}{dt} < 0$) ed aumenta

\rightarrow Esiste un punto in cui la corrente cambia di segno

\rightarrow a t_{off} il diodo si spegne



1° quadrante, 2° quadrante, 3° quadrante



Nel punto (1) $I_R > I_C \text{ è max, } I_C = 0 \Rightarrow D \text{ è ON}$
 (2) $I_R < 0, I_C < I_C \text{ max} \Rightarrow D \text{ è OFF}$

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

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

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

Per $R = 1 \text{ k}\Omega; f = 1 \text{ kHz}; C = 1 \mu\text{F}$
 $T = 1 \text{ ms} = \frac{1}{f}$

$$t_{OFF} = \frac{\arctan(-2\pi f R C)}{2\pi f} + \frac{T}{2}$$

$\frac{T}{2}$ 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 tutta la semionda positiva.

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

DOFF

$$I = I_R + I_C \rightarrow I_R = -I_C \rightarrow \text{serie di un circuito RC}$$

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

$$I_R = \frac{V_u}{R} \quad I_C = C \frac{dV_u}{dt} \rightarrow \frac{V_u}{R} = -C \frac{dV_u}{dt} \rightarrow \int_{V_u(t_{OFF})}^{V_u(t)} \frac{1}{V_u} dV_u = -\frac{1}{RC} \int_{t_{OFF}}^t dt$$

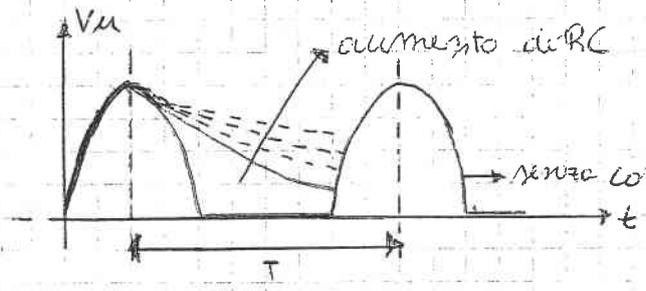
$$-\frac{t-t_{OFF}}{RC} = \log \left[\frac{V_u(t)}{V_u(t_{OFF})} \right] \rightarrow V_u(t) = V_u(t_{OFF}) e^{-\frac{(t-t_{OFF})}{RC}}$$

limiti di validità

$$\left. \begin{matrix} V_D < V_S \\ V_D = V_i - V_u \end{matrix} \right\} \rightarrow V_i - V_u < V_S \rightarrow \boxed{V_i < V_S}$$

per ipotesi ($V_M \gg V_S$)

- ↳ RC è la costante di tempo dell'esponenziale
- ↳ più è alto e meno decade l'esponenziale
- ↳ aumenta il valor medio infetti

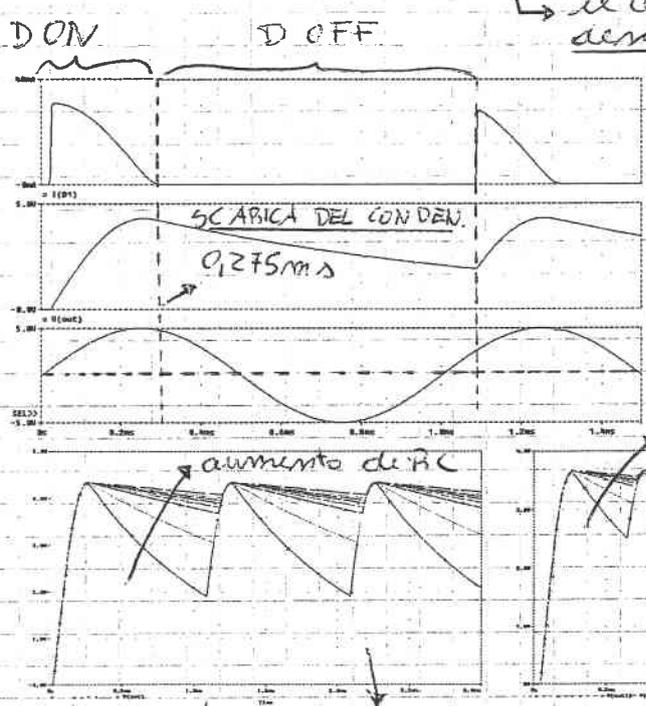


$$\langle v_u(t) \rangle = \frac{1}{T} \int v_u(t) dt$$

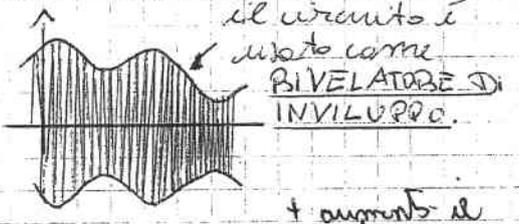
l'area aumenta (in un periodo T) all'aumentare della costante di tempo

- ↳ con un'alta capacità aumenta il valor medio → si può convertire, con alte efficienze, corrente alternate in corrente continua (Negli alimentatori degli elettrodomestici che lavorano in continua si usa un ponte a diodi e una grande capacità per massimizzare il valor medio).

- ↳ dalla simulazione si può vedere che all'aumentare di RC il valor medio aumenta e V_u tende ad una costante.
- ↳ per non utilizzare resistenze e capacità elevate si utilizza un ponte di diodi che raddrizza le semionde, diminuendo il "valto" di un'onda e quella successiva e aumentando il valor medio dell'uscita



- ↳ il circuito si può utilizzare come demodulatore di una modulazione analogica in quanto il condensatore tende ad appiattire e variezioni brusche.



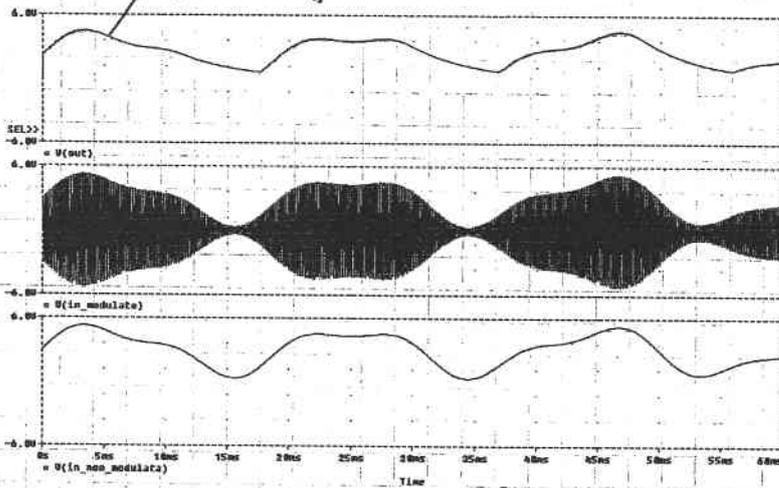
+ aumento il valore RC si sposta il grado di conduzione, sempre più verso $\frac{\pi}{2}$

raddrizzatore a singolo modulante

fonte di diodi

↳ Studio del demodulatore

segue il segnale di partenza e meno di una V_s .



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

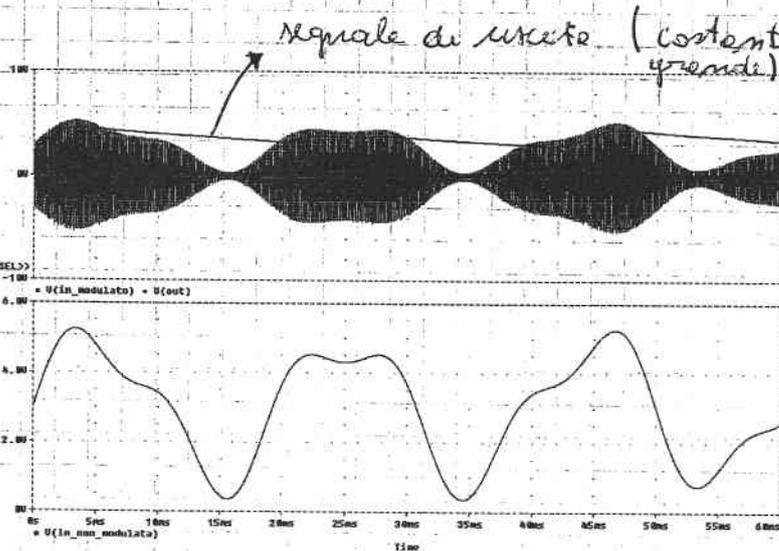
$R = 5 \text{ k}\Omega$

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

$B \ll \frac{1}{RC} \ll f_M$
 $100 \ll 200 \ll 10000$

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

⇒ Bisogna scegliere opportunamente la costante di tempo.



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

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

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

$100 \ll 20 \ll 10000$

no → il filtro elimina il segnale.

↳ la condizione di progetto (da Comunicazioni Elettriche)

$$B \leq (RC)^{-1} \leq f_M$$

perché per eliminare la

portante serve che $\frac{1}{RC} \ll f_M \rightarrow$ (filtro passa basso che elimina la modulante e frequenza f_M)

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

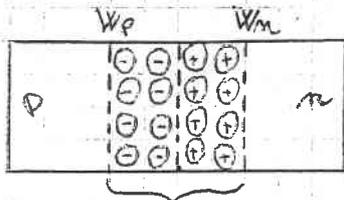
⇒ In questi circuiti si è utilizzata la caratteristica statica per studiare circuiti dinamici.

↳ Bisogna studiare il comportamento del disco in regime dinamico (al variare della frequenza)

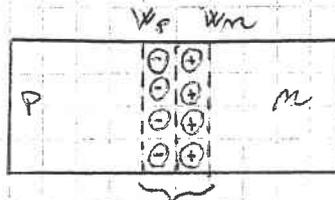
STUDIO DEL DIODO IN REGIME DINAMICO

↳ Analisi della giunzione in regime dinamico

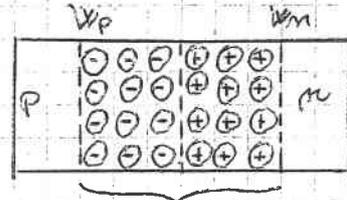
All'equilibrio ($V=0$)



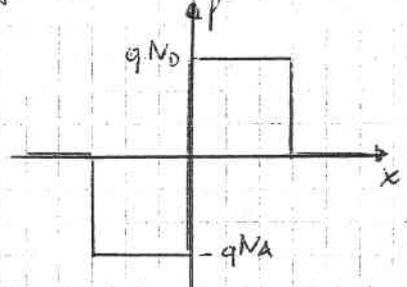
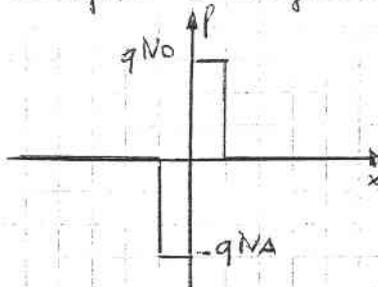
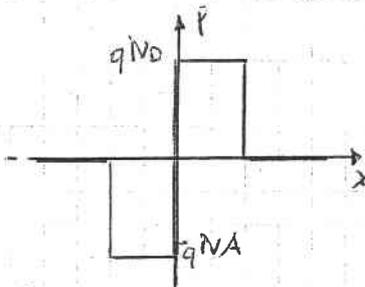
($V > 0$)



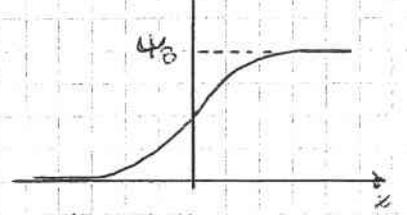
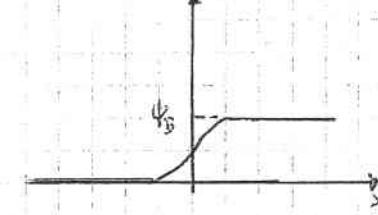
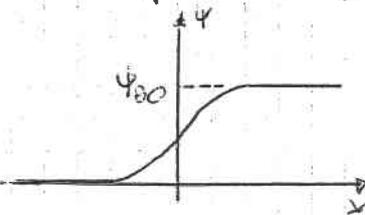
($V < 0$)



regione completamente vuotata dei portatori di carica mobile e quindi la densità di carica ρ è dovuta solo delle presenza di ioni fissi droganti che, per ipotesi, sono completamente ionizzati. Con N_D e N_A rispettivamente, la concentrazione di atomi donatori droganti la regione n e la concentrazione di atomi accettori droganti la regione p



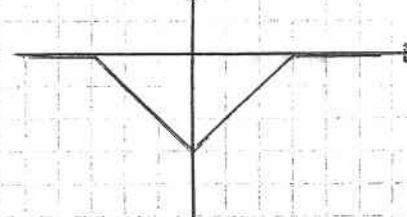
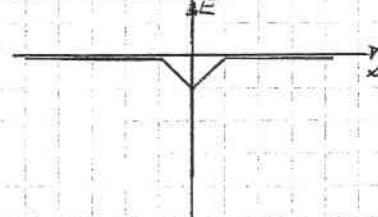
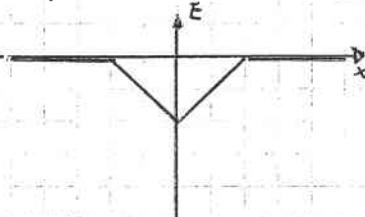
Si crea una regione vuotata perché n innerva un campo elettrico e quindi una differenza di potenziale che bilancia le forze diffusive.



Da cui $\psi_{00} = \frac{kT}{q} \log \frac{N_D N_A}{n_i^2}$

e $\psi_0 = \psi_{00} - V$ (vale se i contatti ψ_{P0} e ψ_{N0} sono ohmici e se lo pannello è piccolo)

Il campo elettrico è negativo perché n deve opporsi al movimento di cariche per diffusione. Da $\frac{dE}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon}$ con ρ costante il tempo è rettilineo con pendenza cost.



- ↳ Se non lo pannello è costante al variare di ψ_0 , che è l'area del campo elettrico, deve variare la base
- ↳ la distribuzione di carica cambia e secondo della polarizzazione (diretta per $V > 0$ o inversa per $V < 0$) in quanto cambia W_n e $W_p \Rightarrow$ è un procedimento NON INSTANTANEO \rightarrow bisogna spostare i portatori.

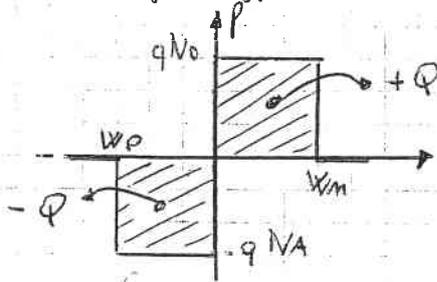
→ lo spostamento richiede un tempo non nullo $F = m \cdot a$

↳ il principio è identico a quello di un condensatore $a = \frac{F}{m}$
 ↳ 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 (dovuta agli ioni fissi) → per avere più carica, muove la densità p nel diodo è costante, serve più volume

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

↳ Se il tempo di trasmissione 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)



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

$Q = p \cdot \underbrace{S \cdot w_p}_{\text{volume della regione neutra}} = -q S \sqrt{\frac{2 \epsilon_s (\psi_{B0} - V)}{q \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)}}$

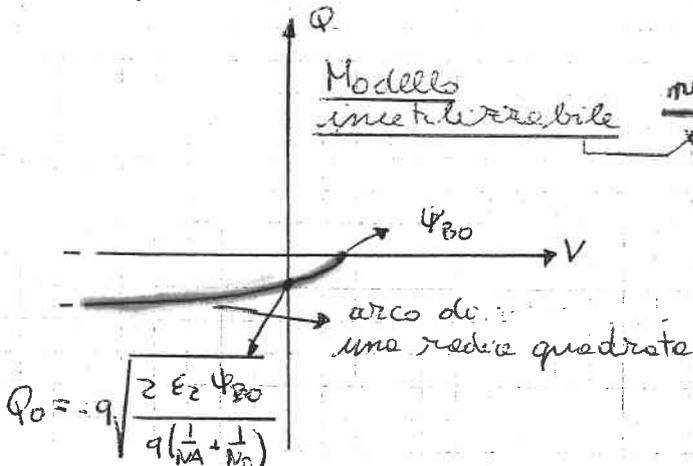
↳ Se pone $S=1$ in quanto si considera per semplicità la carica Q come carica su unità di superficie

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

$Q = C \cdot V$

↳ caratteristica non lineare per il diodo

↳ caratteristica lineare per la capacità



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

↳ non si può utilizzare il modello in quanto si basa sull'ampiezza della regione neutra

↳ quando $V > \psi_{B0}$ l'ampiezza è sarebbe negativa.

↳ modello inutilizzabile

↳ cioè l'ipotesi di smuotamento completo in quanto la barriera di potenziale è diminuita e quindi nella giunzione c'è carica mobile.

- In polarizzazione diretta la giunzione non è protetta in quanto, predominando la diffusione rispetto al trasinamento, ci sono molti portatori.
- In polarizzazione inversa, invece, il modello è invertito in quanto ψ_0 è più alto di $\psi_{B0} \Rightarrow$ diminuisce la diffusione e ad aumentare il trasinamento \Rightarrow le uniche cariche che attraversano la giunzione sono le cariche dei minoritari e non più quelle maggioritarie trasportate per diffusione \Rightarrow la concentrazione di portatori è trascurabile rispetto a quello degli ioni fissi.
 - ↳ l'ipotesi di completo preteamento aumenta di valore, rispetto a quello fatto all'equilibrio, in quanto l'effetto diffusivo è nullo ed è sempre quello di trasinamento.
 - ↳ la carica Q è dovuta solo agli ioni fissi.

• Studio della carica in polarizzazione diretta

↳ la carica è dovuta non più degli ioni fissi, ma dei portatori maggioritari.

$I = \frac{dQ}{dt}$ → corrente dovuta da effetti reattivi (variazione di carica) → corrente dinamica

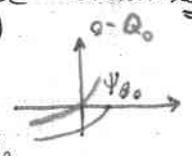
$I = \frac{d(Q - Q_0)}{dt}$ → variazione relativa di carica rispetto alla situazione di equilibrio (Q_0)

non uguale in questo Q_0 è una costante

$Q - Q_0 = \delta Q$

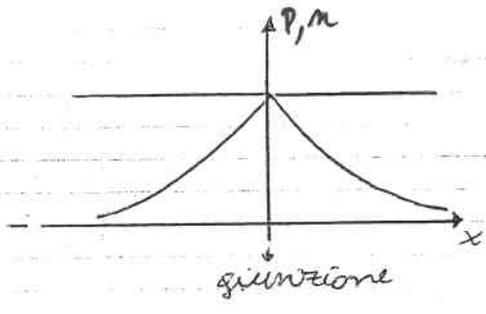
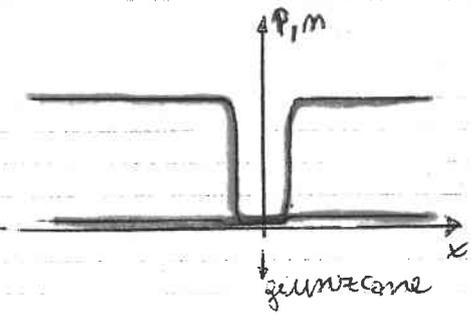
$I = \frac{d}{dt} \delta Q$ → (in questo modo c'è un' analogia con il condensatore lineare in cui $V=0 \Rightarrow Q=0$)

- ↳ 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 fermata dagli ioni fissi)

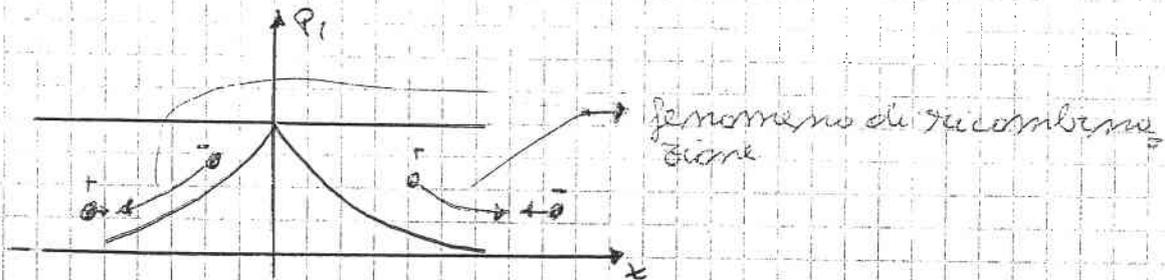


\Rightarrow In polarizzazione diretta il potenziale V si diminuisce il potenziale di barriera \rightarrow corrente prevalentemente diffusiva

$J_n = q \mu_n n E + q D_n \frac{dn}{dx}$

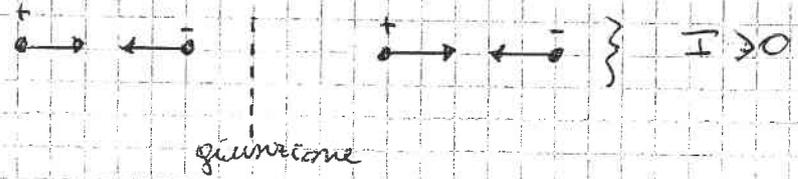


- ↳ distribuzione dei portatori con V solo se $p < 0$.
- ↳ distribuzione dei portatori per $V > \psi_{B0}$

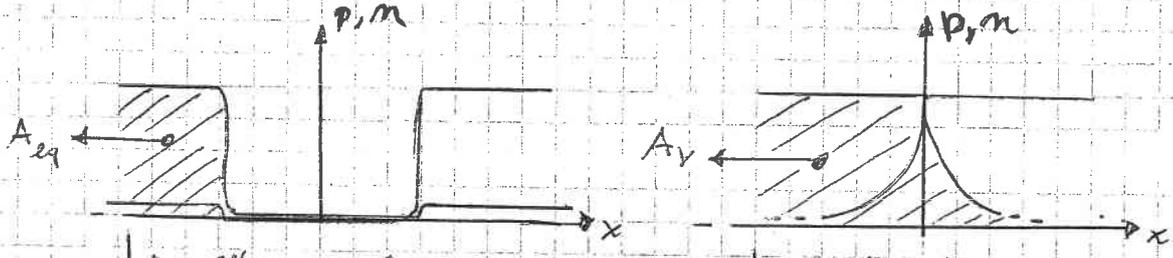


- ↳ gli elettroni e le lacune "si muovono" da dove sono di più a dove sono di meno in quanto la diffusione è ottenuta quando c'è un gradiente di concentrazione ($\frac{dn}{dx}$ e $\frac{dp}{dx}$)
- ↳ quando le lacune (o elettroni) entrano nella zona p (o n) si ricombinano → la probabilità di ricombinazione è elevata in quanto le lacune (o elettroni) sono "circondati" da elettroni (o lacune).

Fenomeno di ricombinazione ⇒ $I > 0$



- ↳ la carica viene portata prima dal moto delle lacune (o elettroni) e poi, ricombinandosi, dagli elettroni (o lacune) che si sovrappongono a loro.



↳ all'equilibrio

↳ per $V > \psi_{Bo}$

- ↳ l'area sotto le 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

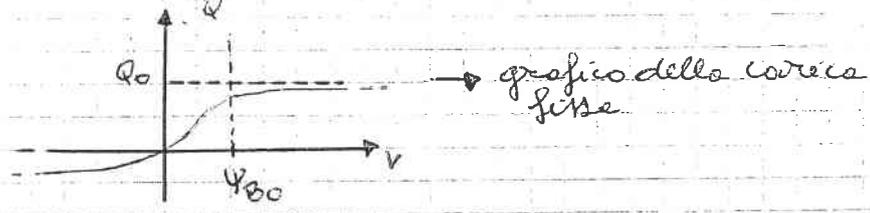
- ↳ sono lacune (o elettroni) che necessitano di un tempo finito, non nullo, per spostarsi.

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

① carica fissa associata agli ioni droganti che non sono bilanciati nella regione di p-n di giunzione dei portatori.
 ↳ prevale in regione di polarizzazione inversa

② carica mobile: i portatori non sono "arregolati" per effetto di campo e tendono ad invadere la regione opposta.
 ↳ prevale in regione di polarizzazione diretta

↳ 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 la distribuzione delle concentrazioni è:

P è una funzione che cala perché la probabilità di ricombinarsi è alta.

↳ $\mu_n \cdot nE = 0$ perché per ipotesi non c'è campo elettrico

↳ $J_n \approx q D_n \frac{dn}{dx}$

considerando la sezione trasversale $S=1$

$I = q D_n \frac{dn}{dx}$

$\frac{V}{V_T}$

↳ (è una zona neutra n)

↳ la differenza di carica è dovuta a questa nuova area.

↳ carica in zona neutra che sostiene la diffusione.

Zona neutra praticamente nulla, ma > 0 .

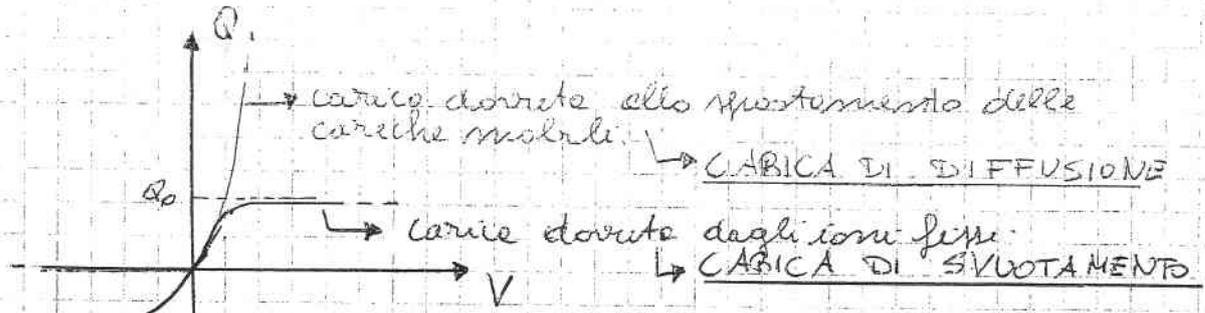
trascurando di effetti resistivi $I = I_S (e^{\frac{V}{V_T}} - 1)$

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

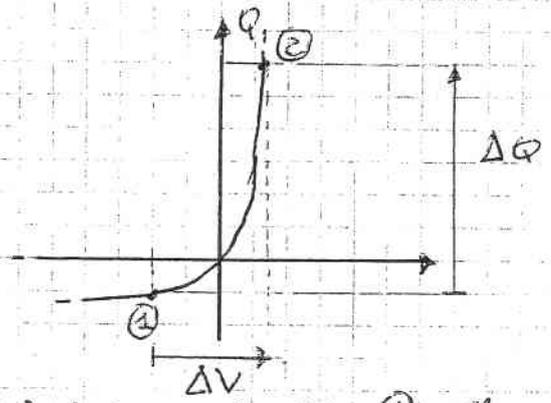
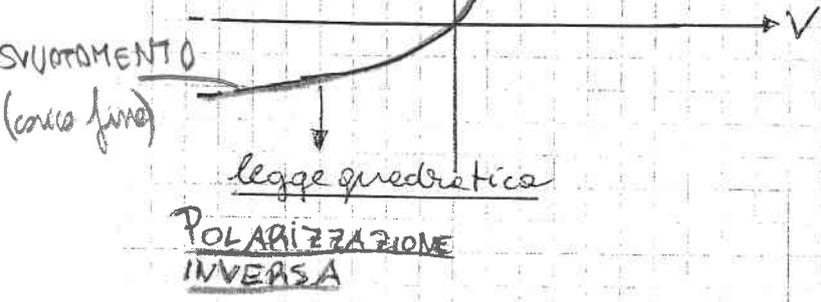
↳ anche $\delta Q = Q_S (e^{\frac{V}{V_T}} - 1)$ → variazione relativa di carica

↳ 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



Somma dei contributi
 in inverse prevale la carica di svuotamento
 in diretta prevale la carica di diffusione



Per passare dalla regione di polarizzazione inversa ① alla regione di polarizzazione diretta bisogna "portare" una quantità ΔQ di carica → tempo del tempo

• Studio del modello dinamico del diodo

In polarizzazione diretta

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

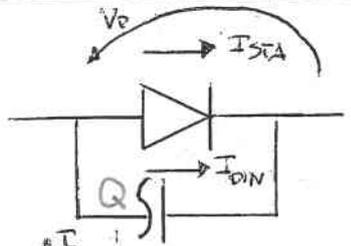
Corrente del diodo ideale, senza lo studio di effetti reattivi

$$Q = \tau I$$

tempo di vita medio dei portatori (distanza temporale tra la creazione e la ricombinazione della coppia elettrone - lacuna).

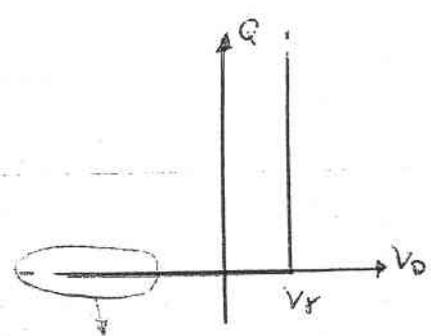
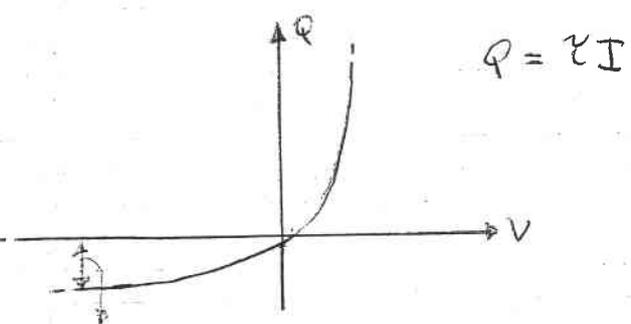
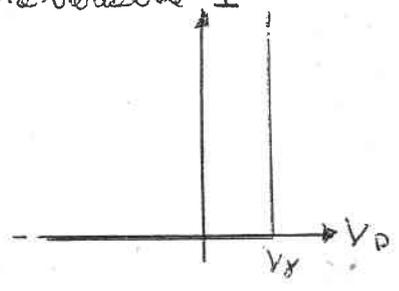
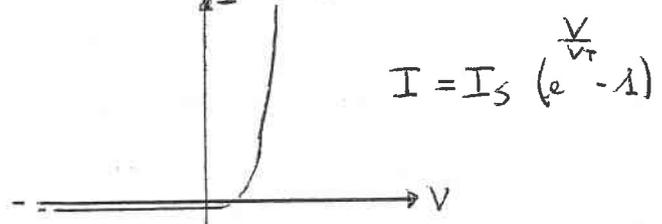
→ Maggiore è γ e, a parità di corrente, Q è maggiore
 ↳ in regione di polarizzazione la carica è dovuta alle lacune (o elettroni) che si trovano nella zona n (o p) → più alto è γ più ci sono portatori e c'è più carica.

MODELLO A SOGLIA "DINAMICO" DEL DIODO



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

parallelo del diodo ideale come capacità variabile C



La differenza di carica non è piccola → corrente nulla e la capacità è variabile in funzione della tensione

Regione in cui il diodo è polarizzato in modo che si comporti come un condensatore variabile in funzione della tensione applicata.

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

POLARIZZAZIONE DIRETTA
$Q > 0, V = V_\gamma, Q = \gamma I$
POLARIZZAZIONE INVERSA
$V < V_\gamma, Q = 0, I = 0$

↳ diodi varicap

↳ MODELLO A CONTROLLO DI CARICA

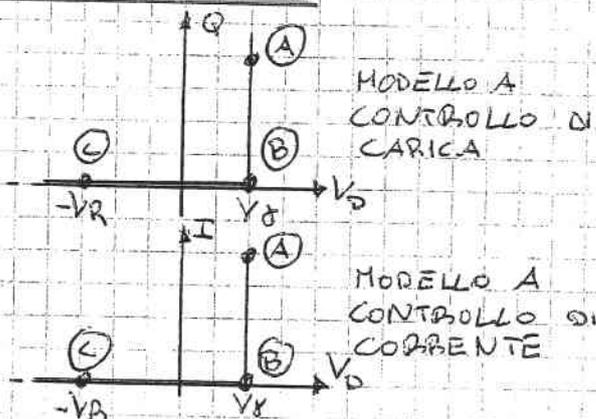
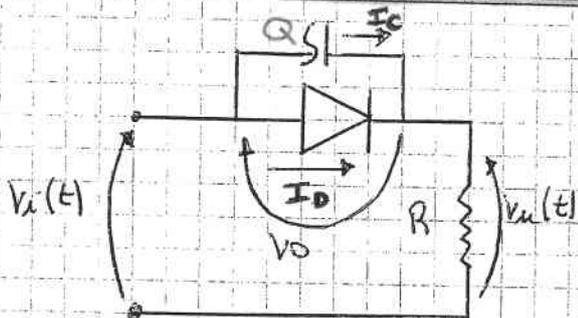
↳ sostituisce la capacità variabile in modo meccanico (variazione della superficie)

↳ Condensatore non lineare approssimato con il modello a soglia

RADDRIZZATORE A UNA SEMICONDA

RISPOSTA AL GRADINO IN DISCESA DEL CIRCUITO

RADDRIZZATORE A SINGOLA SEMICONDA



1° grafico con $V_g > V_R$

$V_g \rightarrow$ forward (diretta)

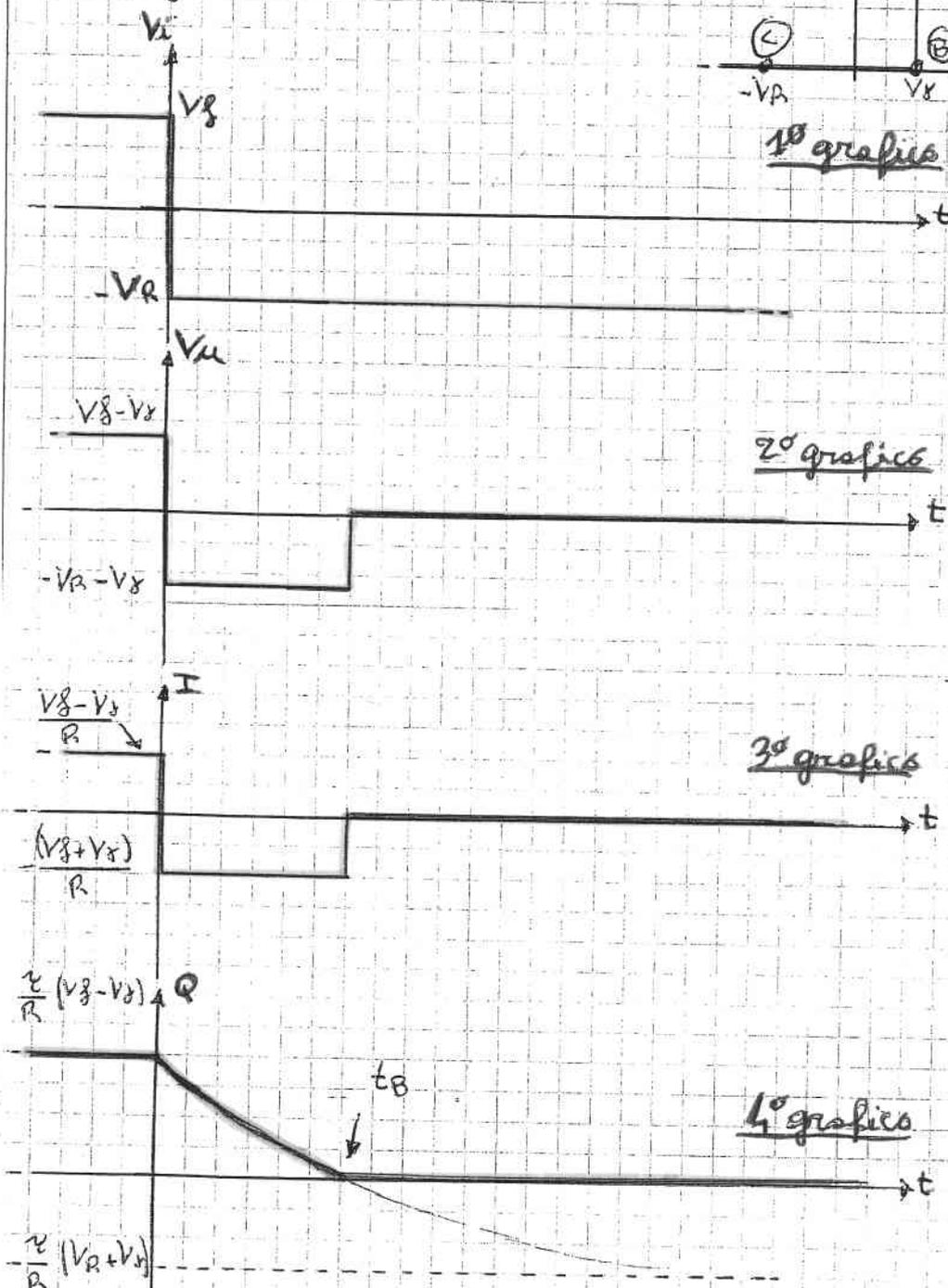
$V_R \rightarrow$ reverse (inversa)

2° grafico

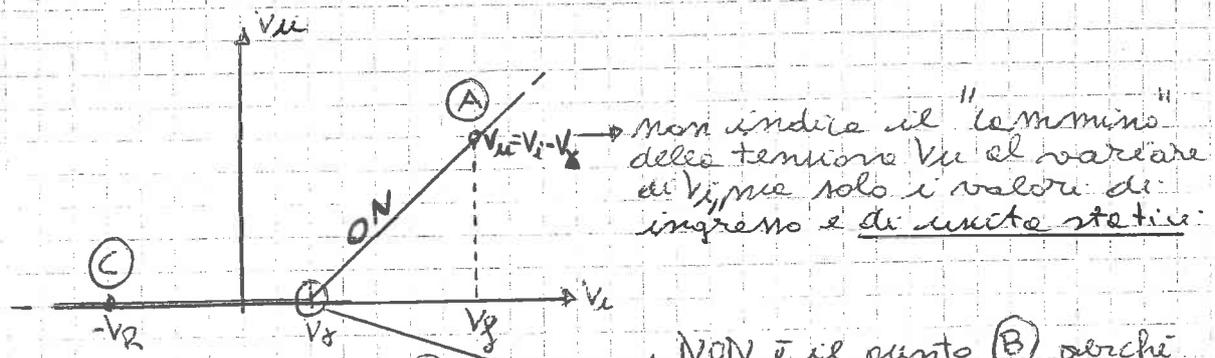
I è la corrente che scorre realmente sul diodo. I_c e I_o sono solo correnti "inventate" per modellare il diodo.

3° grafico

4° grafico



Caratteristica Statica Caratteristico di trasferimento 36



• per $t < 0$ punto A NON è il punto B perché in B V_i e V_u stanno variando

$V_i = V_g = \text{costante} \rightarrow$ condizione statica

Se come $V_g > V_g \Rightarrow V_u = V_g - V_g$ grafico ②

$$I = I_0 + I_c$$

$$I = \frac{V_u}{R} = \frac{V_g - V_g}{R} \quad \text{grafico ③}$$

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

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

condizione statica

$$I = \frac{Q}{\tau} \Rightarrow Q = \frac{\tau}{R} (V_g - V_g) \quad \text{grafico ④}$$

• per $t > 0, t \rightarrow +\infty \rightarrow$ fine del transitorio \rightarrow condizione statica

\hookrightarrow punto C

$$V_i = -V_R < 0 < V_g \rightarrow V_u = 0 \quad \text{grafico ②}$$

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

$$I = \frac{V_u}{R} = 0 \rightarrow I = 0 \quad \text{grafico ③}$$

$$I = I_0 + I_c$$

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

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

$$I = I_0 = 0 \Rightarrow Q = 0 \quad \text{grafico ④}$$

\hookrightarrow la tensione non varia in modo esponenziale, 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:

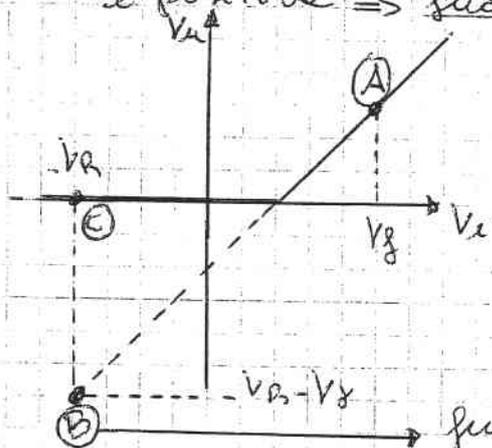
$$\left. \begin{aligned} D \rightarrow ON \rightarrow v_0 = v_f \\ v_i = -v_R \\ v_u = v_i - v_0 \end{aligned} \right\} \boxed{v_u = -v_R - v_f}$$

grafico 2

$$I = \frac{v_u}{R} = \frac{-(v_R + v_f)}{R} = -I$$

grafico 3

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



fuori dalla caratteristica statica perché a $t = 0^+$ $v_u(t)$ sta variando.

Dal principio di conservazione della carica

$$q(0^+) = q(0^-) = \frac{\tau}{R} (v_f - v_R)$$

e' subsonito della carica nel tempo si ottiene che queste eq. differenziale.

$$\left. \begin{aligned} I = I_0 + I_C \\ I_0 = \frac{q}{\tau} \\ I_C = \frac{dq}{dt} \end{aligned} \right\} \frac{dq}{dt} + \frac{q}{\tau} = -\frac{(v_R + v_f)}{R} \Rightarrow \frac{dq}{dt} = -\frac{q}{\tau} - \frac{v_R + v_f}{R}$$

$$\int_{q(0)}^{q(t)} \frac{dq}{q + \frac{\tau}{R}(v_R + v_f)} = -\frac{1}{\tau} \int_0^t d\tau$$

$$-\frac{t}{\tau} = \log \left[\frac{q(t) + \frac{\tau}{R}(v_R + v_f)}{\frac{\tau}{R}(v_f - v_R) + \frac{\tau}{R}(v_R + v_f)} \right]$$

$\hookrightarrow Q(0)$

grafico 4

$$e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{q(t) + \frac{\tau}{R}(v_R + v_f)}{\frac{\tau}{R}(v_f + v_R)} \Rightarrow \boxed{q(t) = \frac{\tau}{R}(v_f + v_R) e^{-\frac{t}{\tau}} - \frac{\tau}{R}(v_R + v_f)}$$

\hookrightarrow vale fino a che $q = 0$ (tende asintoticamente a $-\frac{\tau}{R}(v_R + v_f)$)

\hookrightarrow v_u e I sono costanti.

→ il condensatore non lineare mantiene, dopo $t=0^+$, per un breve periodo, la tensione costante (cio' non decade con il condensatore lineare. infatti per $t=0^+$ $V_C(0^+)$ sarebbe pari a $-\frac{V_F+V_R}{R}$ e poi calerebbe subito esponenzialmente).

↳ questo accade perché la carica 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 la carica Q annulla)

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

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

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

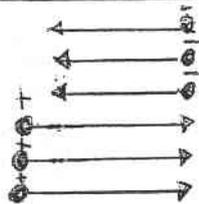
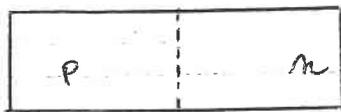
$$t_B = \tau \log \left(\frac{V_F + V_R}{V_A + V_B} \right)$$

→ dimensioni di un tempo

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

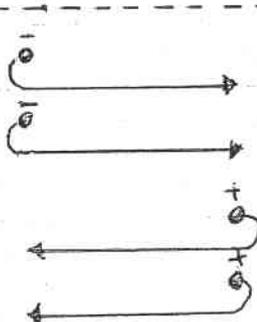
t_B è maggiore di 0 perché $\frac{V_F + V_R}{V_A + V_B} > 1$

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



Corrente Positiva

per $t < 0$ la carica è dovuta 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)



Corrente Negativa

per $t > 0$ → il diodo cerca di andare in regione di polarizzazione inversa: l'eccesso di elettroni nella zona p e quello di lacune nella zona n deve diminuire
 ↳ gli elettroni e le lacune tornano indietro

Quando l'intervallo $[0, t_B]$ serve a "smaltire" la quantità di carica accumulata per diffusione in campo rispetto a quella di equilibrio (cioè $\delta\varphi$)

↳ bisogna aspettarsi che la variazione relativa di carica rispetto all'equilibrio ($\delta\varphi = \varphi - \varphi_0$) si inverte.

↳ durante lo "svuotamento" il potenziale ai capi della giunzione varia poco (nel modello a soglia è costante, nelle pratiche 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 spegnere 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 ideale (Ad esempio al circuito raddrizzatore a singola semionda non si comporta come studiato precedentemente)

• da (B) → (C) $t > t_B$

$$I = I_0 + I_C \quad \left. \begin{array}{l} I_0 = \frac{Q}{\tau} = 0 \\ I_C = \frac{dQ}{dt} = 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} I = 0 \rightarrow V_u = RI = 0 \end{array} \quad \text{grafico (2), (3)}$$

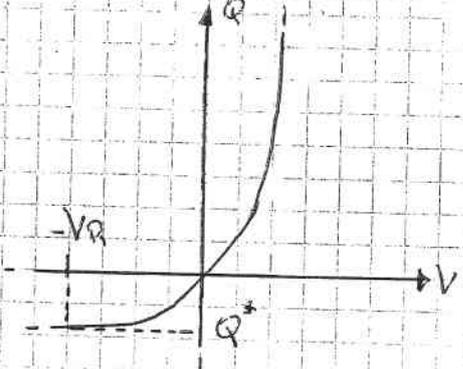
del modello \downarrow
 $Q = 0$ grafico (4)

$$V_0 = V_i - V_u = -V_R$$

↳ la carica già a t_B è nulla e quindi per andare dal punto (B) al punto (C) il tempo necessario è nullo

↳ è impreciso affermare che V_u ed I diventano istantaneamente nulli in un tempo inesistente

• Studio dell'impressione del modello

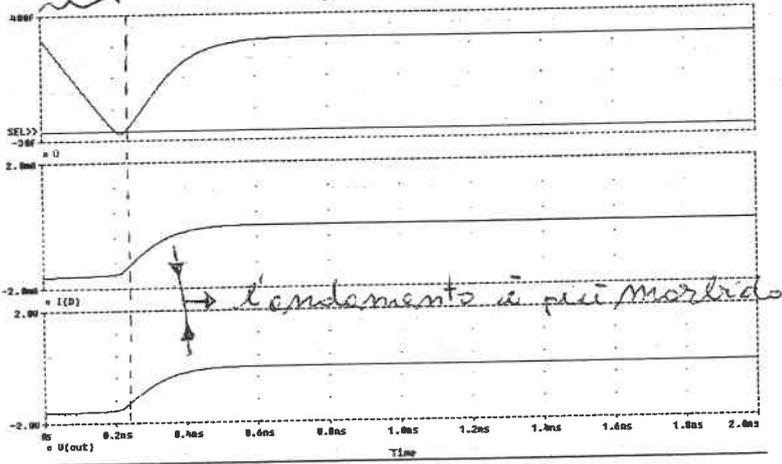


Quando si parte da $V_0 = -V_R$ la carica è diversa da zero, è debolmente negativa

↳ la curva è una radice quadrata

Nella simulazione l'ingresso commutato da $+1\text{e}-4\text{V}$ a -1V 36
(non riportato nell'immagine).

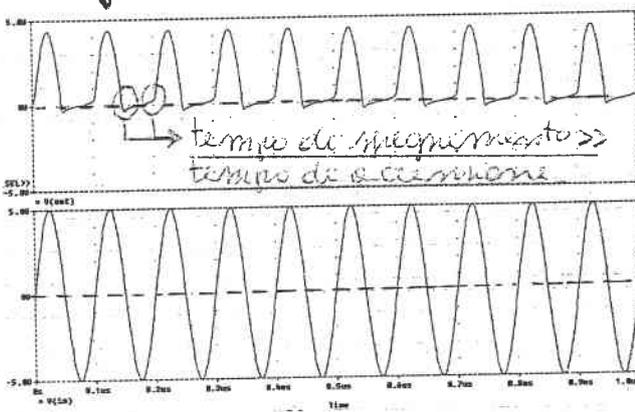
tempo di storedge $\approx 0,2\text{ms}$



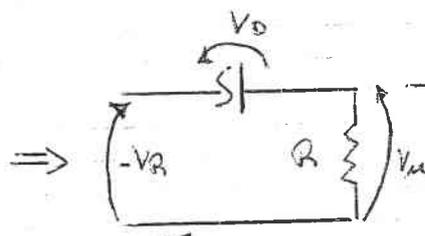
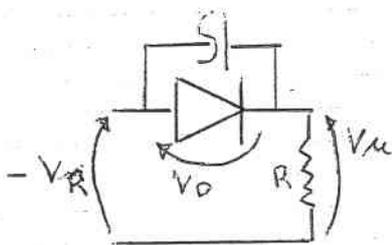
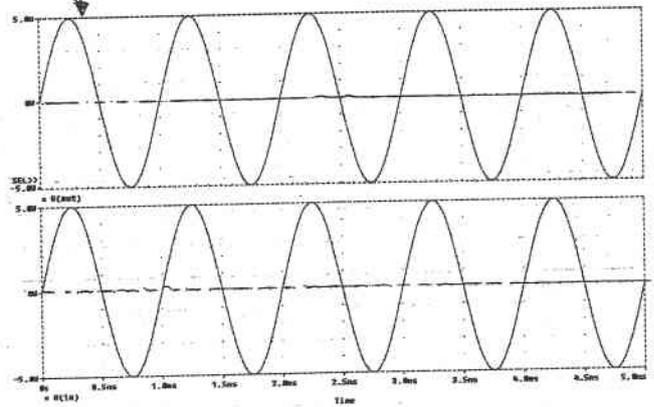
→ a frequenze elevate (da 10MHz in poi) l'effetto del tempo di commutamento si fa sentire

il condensatore in parallelo diventa un corto circuito

V_i sinusoidale a 10MHz



V_i sinusoidale a 1GHz



↳ Se come $V_o < V_s$ il diodo si può eliminare con una precisione accurata (perché la corrente è una uguale a I_s)

transitorio di scarica

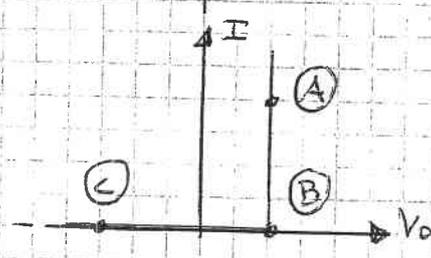
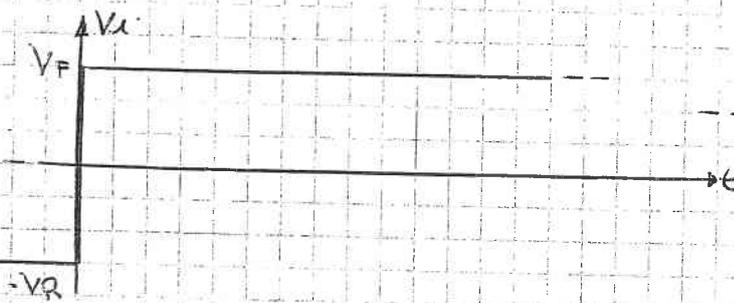
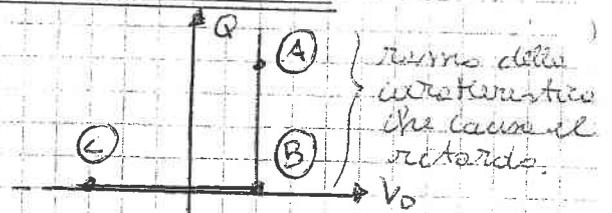
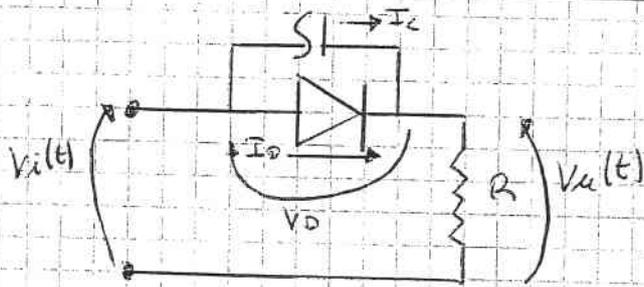
↳ nel condensatore la carica passa da 0 a Q^* in un tempo non nullo

↳ V_o parte da V_f e $-V_R$ in un tempo non nullo come $V_u = -V_R - V_o \rightarrow 0$.

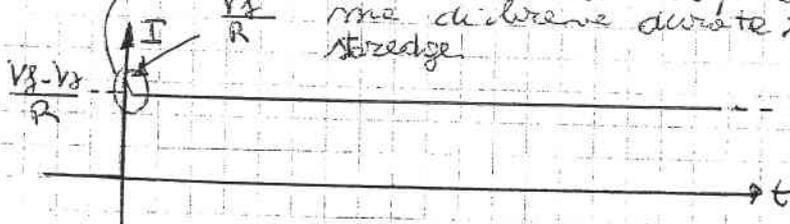
In conclusione

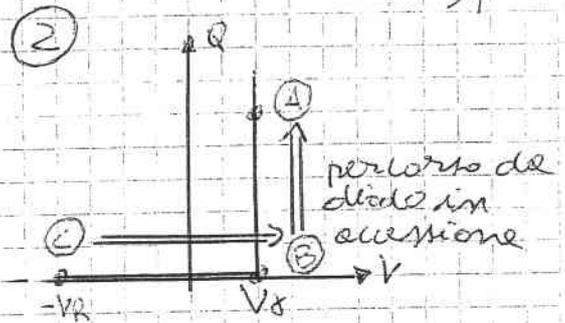
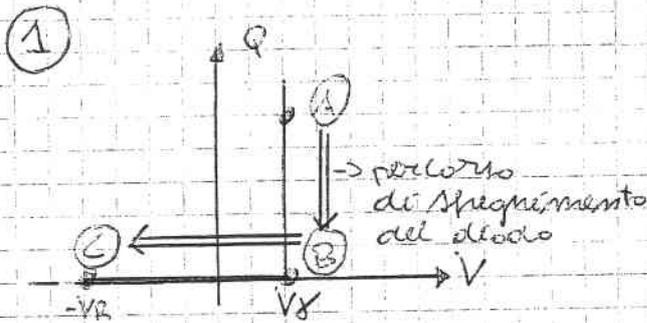
- Il tempo di storedge è indipendente dalla resistenza (in quanto è dovuta ad uno spostamento di portatore nella giunzione)
- Il secondo transitorio (idealmente nullo) dipende dalla resistenza perché è un transitorio RC in cui la capacità non è lineare. → più è alta la resistenza e più è lungo il secondo transitorio

RISPOSTA AL GRADINO IN SALTA DEL CIRCUITO RADDRIZZATORE A SINGOLA SEMIONDA



idealmente (secondo il modello) il
 transistor è molto velocemente di classe di R.
 ma ci vuole un po' di tempo al tempo di
 storage.





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

↳ il diodo, secondo il modello, impiega un tempo nullo a passare da $-V_r$ e V_g ⇒ fine del transitorio di V_u
 ↳ poi aumento la carica Q .

per $t < 0$ punto C → condizione statica

$V_i = -V_r, V_u = 0, I = 0, Q = 0$

da C → B $t = 0$

$V_i = V_g$ → la tensione sulle capacità non può istantaneamente cambiare

$V_u(0) = V_g$ (come in un condensatore normale)

↳ in un tempo nullo (in realtà in un tempo breve in cui il transitorio dipende della resistenza ⇒ carica Q)

$V_u = V_g - V_r$ in quanto $V_0 \rightarrow V_g$

$I = \frac{V_g - V_r}{R}$ $Q = 0$

da B → A

↳ solo la carica si modifica con un transitorio partenziale

$Q = \frac{\tau}{R} (V_g - V_r)$ → il transitorio non modifica né V_u né I che sono già a regime.

Conclusioni

Per spegnere il diodo ① bisogna prima percorrere il tratto verticale (ritardo) e poi si spegne il diodo

Per accendere il diodo ② bisogna prima percorrere il tratto orizzontale (tempo nullo) e poi si accende.

Non c'è il tempo di storage

TEMPO DI SPEGNIMENTO >>
 TEMPO DI ACCENSIONE

RIASSUNTO SUL DIODO

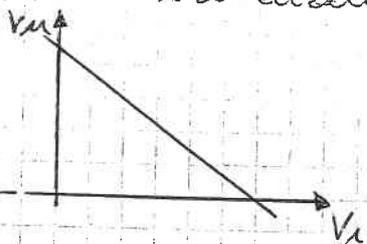
Caratteristiche del diodo

- ↳ la corrente di polarizzazione diretta \gg corrente di polarizzazione inversa
- ↳ il diodo è "lento" e spengersi (perché la polarizzazione diretta accumula carica mobile, per effetto di diffusione, che deve essere "smaltita" prima di poter spegnere il diodo ed andare in polarizzazione inversa)
- ↳ il diodo è "veloce" ed accendersi (perché la polarizzazione inversa non accumula carica mobile)
- ↳ il transitorio di spegnimento è dell'ordine di qualche nano secondo \rightarrow massima frequenza utilizzabile per non sentire i fenomeni reattivi è qualche centinaio di kilohertz.
- ↳ circuiti analizzati:
 - raddrizzatore \rightarrow per estrarre le componenti continue da un segnale alternato
 - limitatore (a soglia variabile)
 - funzioni logiche \rightarrow porte AND
 - ↳ "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.

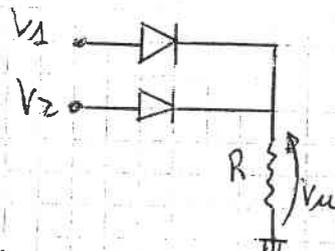
Problemi

- Le porte logiche non sopprimono il rumore (o l'uscita è bloccata ad una costante DUFF o l'uscita segue l'ingresso DON).
- Non si può realizzare l'invertitore, parte fondamentale delle reti logiche.
 - ↳ con i diodi: $V_u = V_i \pm V_f \rightarrow$ caratteristica a pendenza positive

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



Esempio di caratteristiche di un invertitore



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