

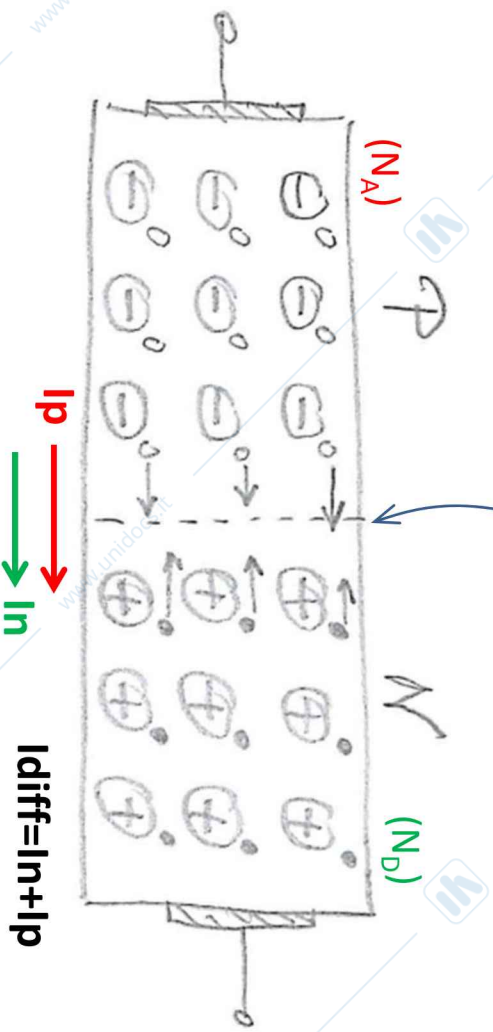
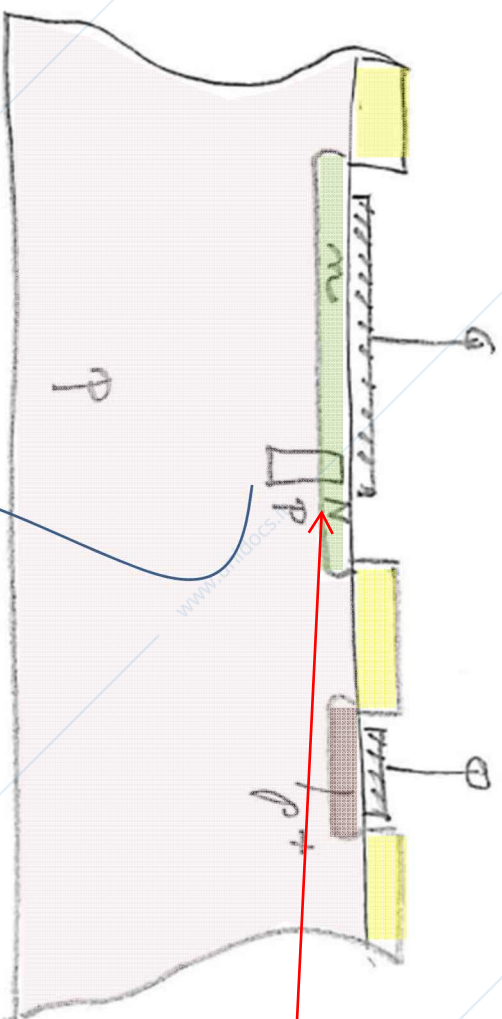
Giunzione PN

Fondamenti di Elettronica

AA 2019-20

Struttura fisica di una giunzione PN

- struttura base del diodo a giunzione
- mattone fondamentale del transistor bipolare (BJT) e per la comprensione del funzionamento del transistor MOSFET



Sezione di una giunzione PN

- all'interno di un monocristallo di silicio vengono create regioni selettivamente drogate n e p.

regione dominata da elettroni (N) VS regione dominata da lacune (P)

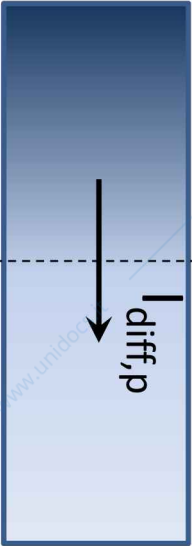
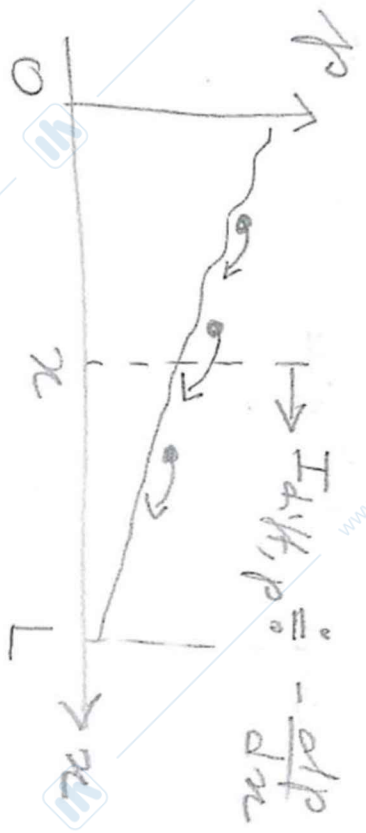
Struttura semplificata 1-D

- nelle regioni lontane dalla giunzione, il materiale è neutro, ovvero nella zona N sia ha $n \sim N_d^+$. Analogamente per le lacune, nella zona neutra P si ha $p \sim N_a^-$. Vengono messi in luce solo l'elettrone di valenza e l'atomo ionizzato del drogante a cui era coordinato.

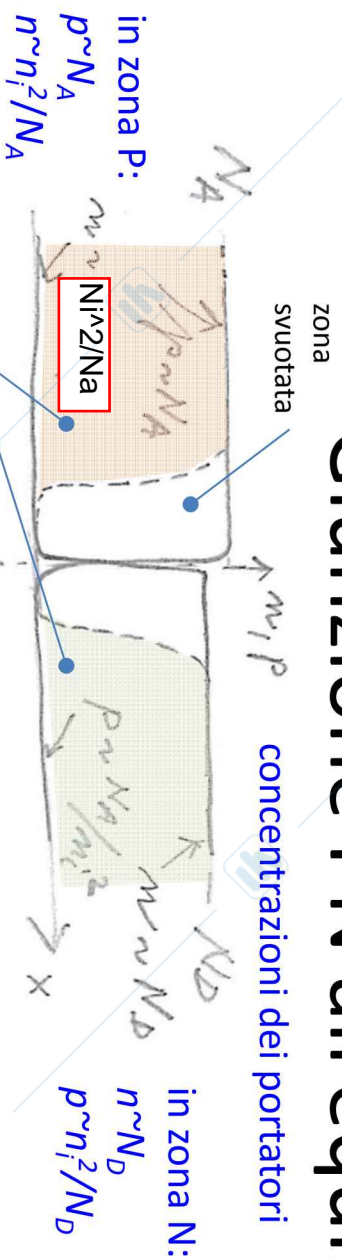
- in prossimità della giunzione, il forte gradiente spaziale di concentrazione dei portatori produce un flusso diffusivo di lacune verso la zona N e di elettroni verso la zona P.
- le correnti diffusive di lacune ed elettroni si sommano a dare una corrente complessiva di diffusione che tende a svuotare di portatori entrambi i lati della giunzione.

MOTI DI DIFFUSIONE

Dovuto alla presenza di un gradiente di concentrazione dei portatori (nodi, e^- , h^+) non è necessario il campo elettrico per avere un flusso di portatori/corrente I

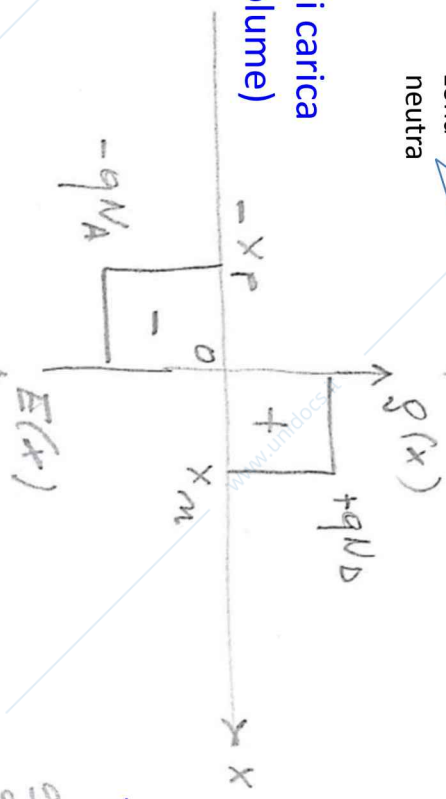


Giunzione PN all'equilibrio



al procedere della diffusione di cariche, cresce lo spessore dello strato svuotato, che dà luogo ad una differenza di potenziale a cavallo della giunzione, ovvero un campo elettrico, che si oppone al flusso diffusivo.

densità di carica (carica/volume)



modello semplificato a "scatola": svuotamento completo (\$n=p=0\$) in tutta la zona \$-x_p < x < x_n\$. L'area sottesa (carica totale) è uguale ed opposta (neutralità di carica).

Th. Gauss:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon} = \begin{cases} \frac{qN_D}{\epsilon} & (x > 0) \\ -\frac{qN_A}{\epsilon} & (x < 0) \end{cases}$$

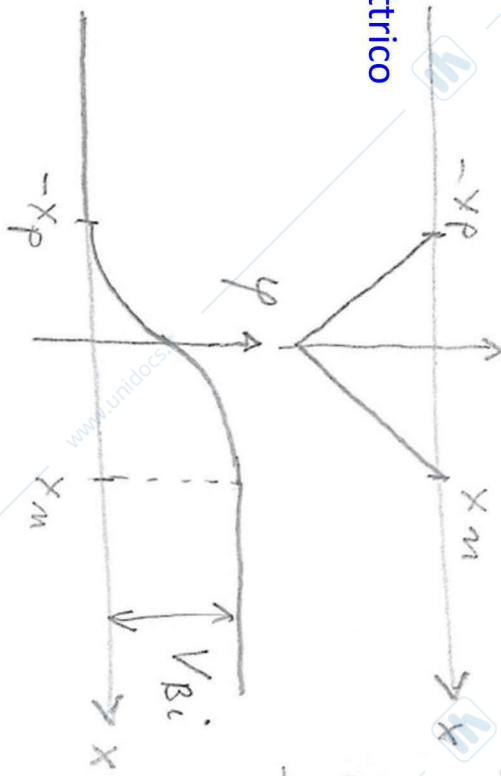
$$E = -\frac{d\varphi}{dx}$$

$$\rightarrow \frac{d\varphi}{dx} = -E$$

campo elettrico



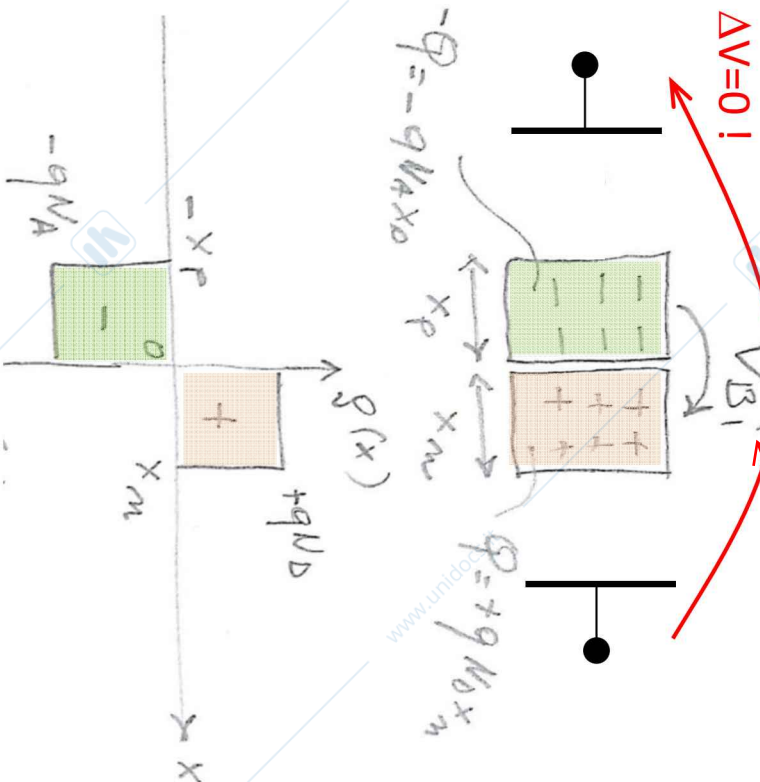
potenziale



V_{bi} tensione "built-in" all'equilibrio: barriera di potenziale che bilancia la componente diffusiva dovuta al gradiente di concentrazione dei portatori a cavallo della giunzione

Analogia con un condensatore

tensione presente solo a cavallo della zona svuotata



neutralità di carica:
 $qN_A x_p = qN_D x_n$
 (...quindi $x_p/x_n = N_D/N_A$)

- la relazione tra carica della regione svuotata e d.d.p. ai suoi capi non è lineare
- la tensione V_{bi} a cavallo della zona svuotata non è visibile ai morsetti del diodo. Se misuriamo la d.d.p. ai morsetti del diodo isolato (equilibrio) troviamo 0 V. Il diodo non è una batteria!

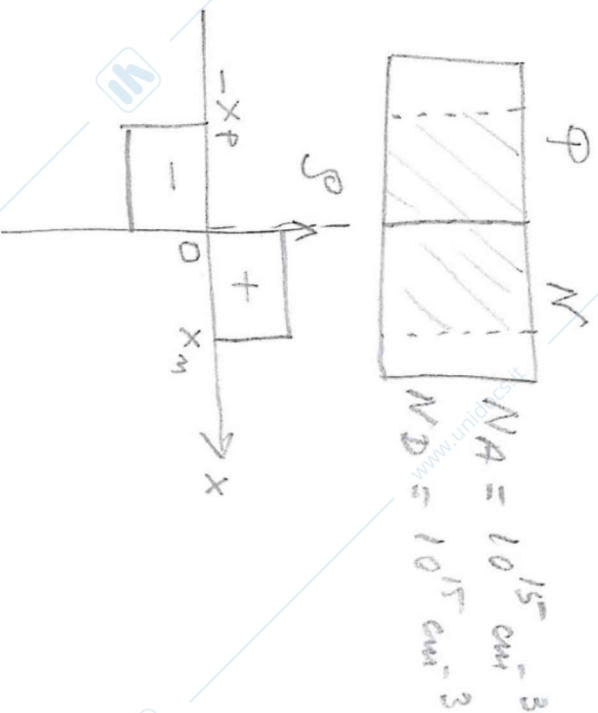
Esempi: giunzione PN simmetrica e asimmetrica

approfondimenti

spessore zona svuotata:

$$x_{dep} = x_n + x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) V_{Bi}}$$

- caso $NA \sim ND$



$$V_{Bi} = 0,56V$$

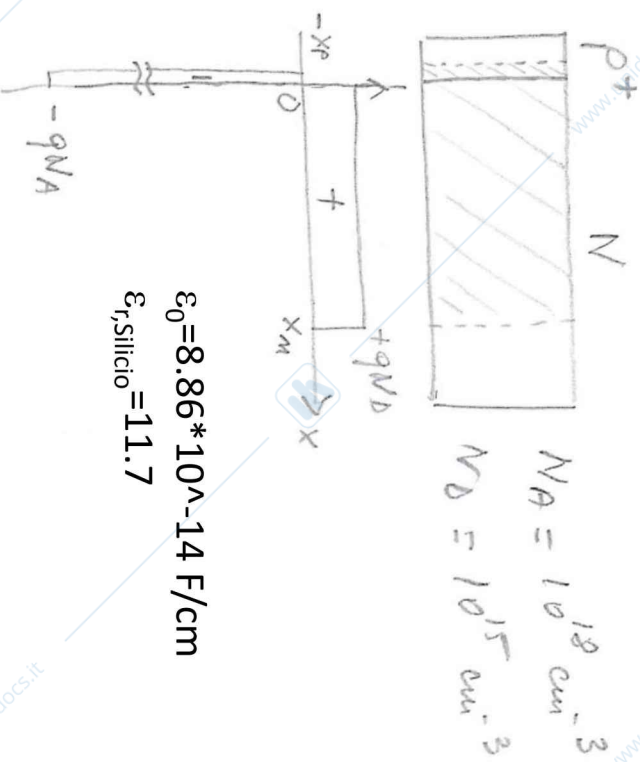
$$x_n = x_p = 0,6 \mu m$$

$$x_{dep} = x_n + x_p = 1,2 \mu m$$

tensione Built-in:

$$V_{Bi} = V_{Tn} \cdot \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$$

- caso $NA \gg ND$



tensione 'termica'

$$V_{Tn} = \frac{kT}{q}$$

25 mV @ 300K

$$\epsilon_0 = 8.86 \cdot 10^{-14} \text{ F/cm}$$

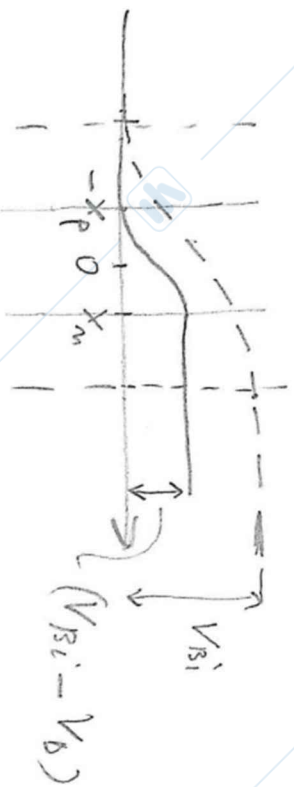
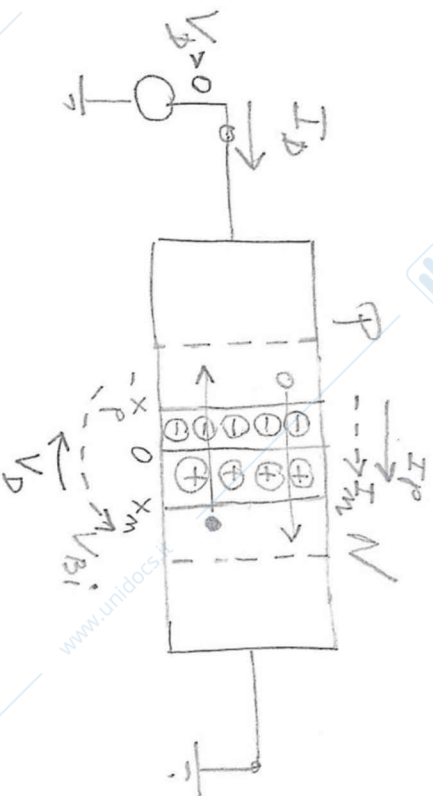
$$\epsilon_{r, \text{Silicio}} = 11.7$$

$$V_{Bi} = 0,73V$$

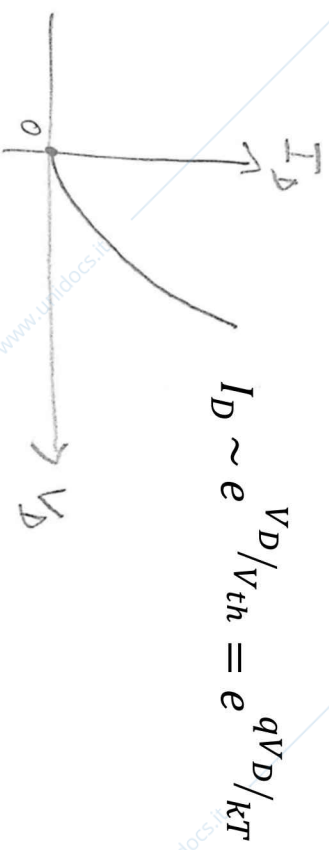
$$x_{dep} = 1 \mu m$$

$$x_n = 1000 x_p \rightarrow 0,001 \mu m$$

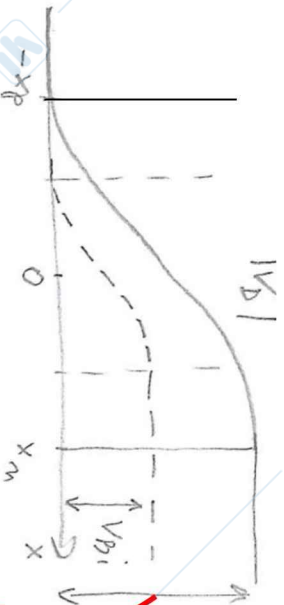
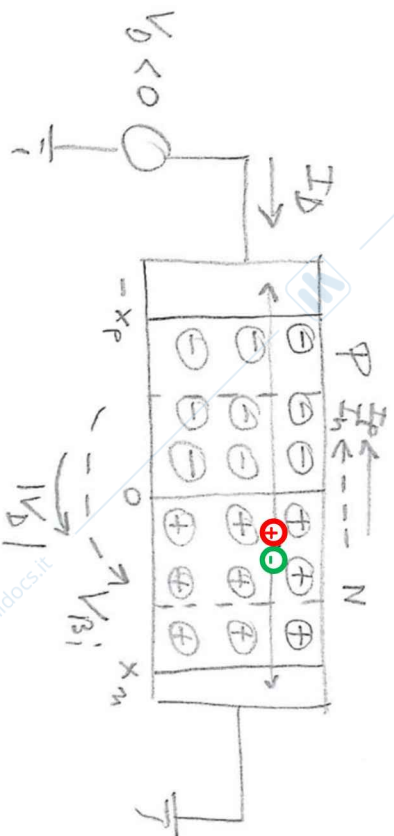
Giunzione fuori equilibrio: polarizzazione diretta



- se applico una tensione esterna (V_D), la tensione complessiva che cade a cavallo della zona svuotata viene modificata e diventa: $V_{Bi} \rightarrow (V_{Bi} - V_D)$
- Nel caso $V_D > 0$ (polarizzazione diretta), la barriera di potenziale che bilanciava il flusso diffusivo dei maggioritari si riduce, dando luogo ad una corrente con crescita esponenziale con V_D
- la minore tensione ($V_{Bi} - V_D$) corrisponde ad un minor spessore della regione svuotata

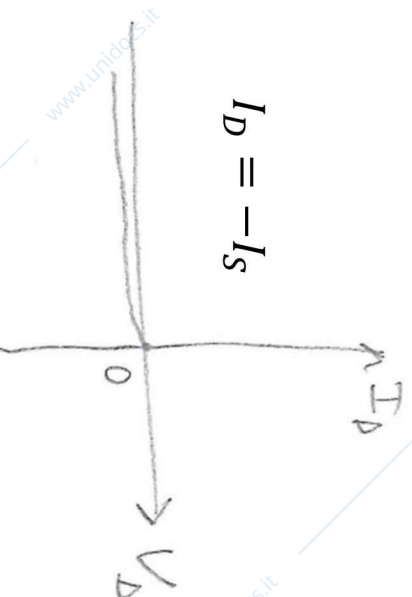


Giunzione fuori equilibrio: polarizzazione inversa



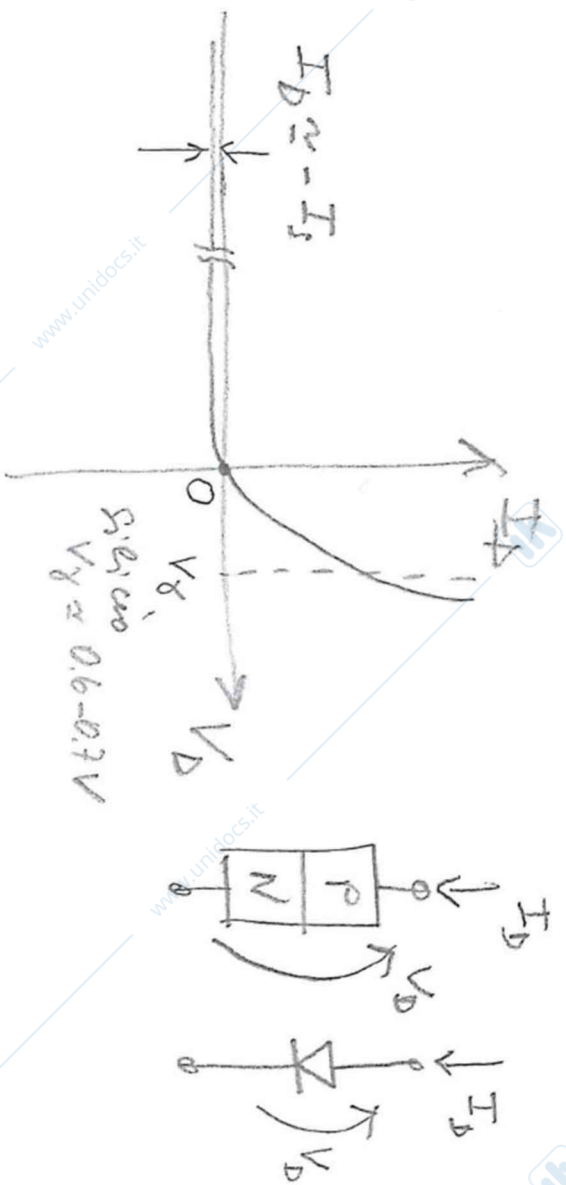
$$(V_{B_i} - V_D) = (V_{B_i} + |V_D|)$$

- Nel caso $V_D < 0$ (polarizzazione inversa), la tensione complessiva a cavallo della zona svuotata diventa: $V_{Bi} \rightarrow (V_{Bi} - V_D) = (V_{Bi} + |V_D|)$, ovvero aumenta.
- la maggiore tensione ($V_{Bi} + |V_D|$) corrisponde ad un maggiore spessore della regione svuotata
- al crescere della barriera di potenziale che bilanciava il flusso diffusivo dei maggioritari, il flusso diffusivo tende a zero. Per $|V_D| >$ qualche tensione termica (25 mV) la corrente satura ad un valore costante, dovuto alla (piccola) corrente di deriva dei portatori generati termicamente.



$$I_D = -I_s$$

Equazione I-V del diodo



$$I_D = I_S \left(e^{\frac{V_D}{V_A}} - 1 \right) = I_S \left(e^{\frac{qV_D}{kT}} - 1 \right)$$

$$V_A = \frac{kT}{q} \quad 25\text{mV @ } 300\text{K}$$

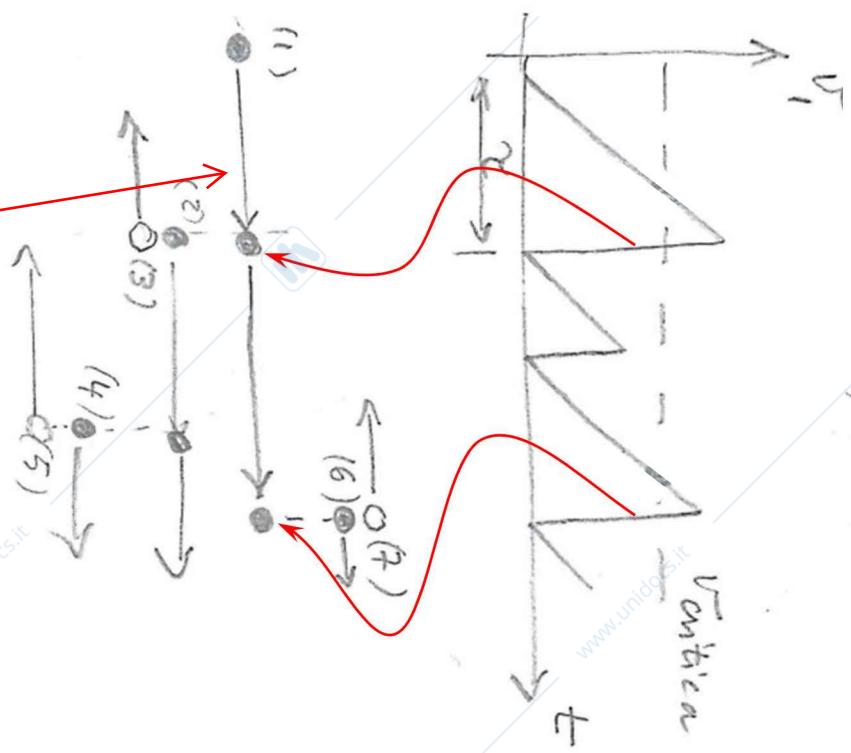
$$I_D = I_S \left(e^{\frac{V_D}{V_A}} - 1 \right) \approx I_S e^{\frac{V_D}{V_A}} \quad (V_D \gg V_A)$$

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{V_D}{V_A}} - 1 \right) \approx -I_S \quad (V_D \ll -V_A)$$

Breakdown: moltiplicazione a valanga

$$E_K = \frac{1}{2} m v_{crit.}^2 = E_{gap} \quad (\sim 1 eV)$$

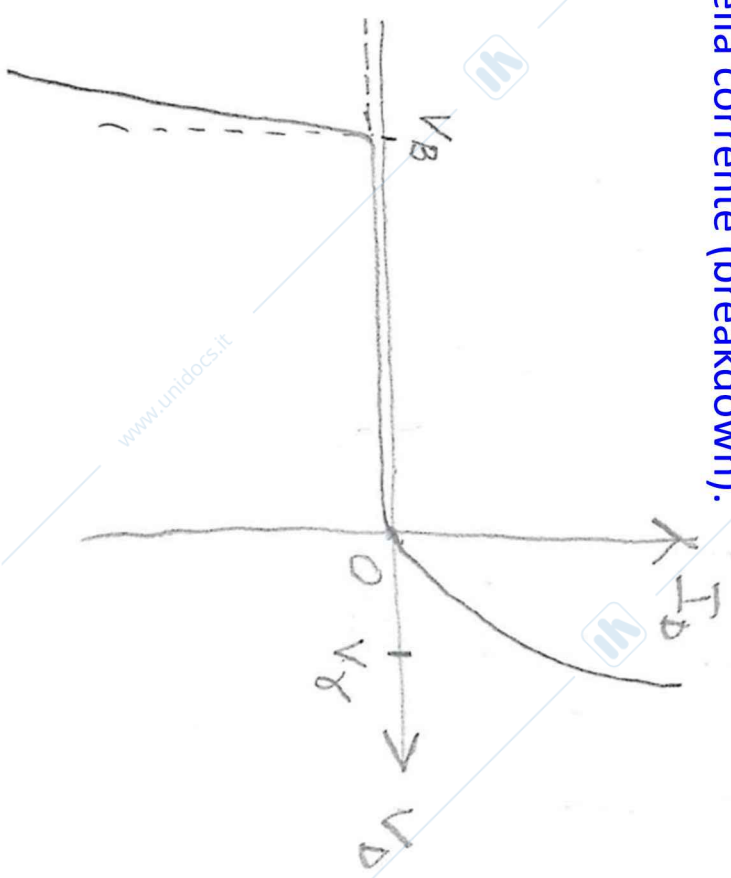
$$\mu E_{crit.}$$



1 cede la sua energia a un altro portatore attraverso un urto, se questa energia è maggiore della energia di gap si genera poi una lacuna

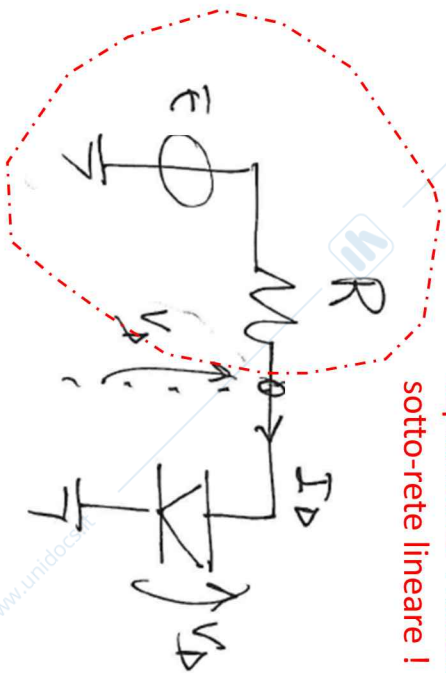
In **polarizzazione inversa**, la crescita dello spessore e della carica immagazzinata nella zona svuotata si accompagna ad un **aumento del campo elettrico**.

Durante i tratti di moto 'balistico' (uniformemente accelerato) **l'energia cinetica dei portatori può arrivare ad uguagliare l'energia di legame** (pari al gap 1.1 eV) e a creare una **moltiplicazione a valanga dei portatori** e quindi ad una divergenza della corrente (breakdown).



Analisi grafica circuito con diodo

equivalente Thevenin di una generica sotto-rete lineare !

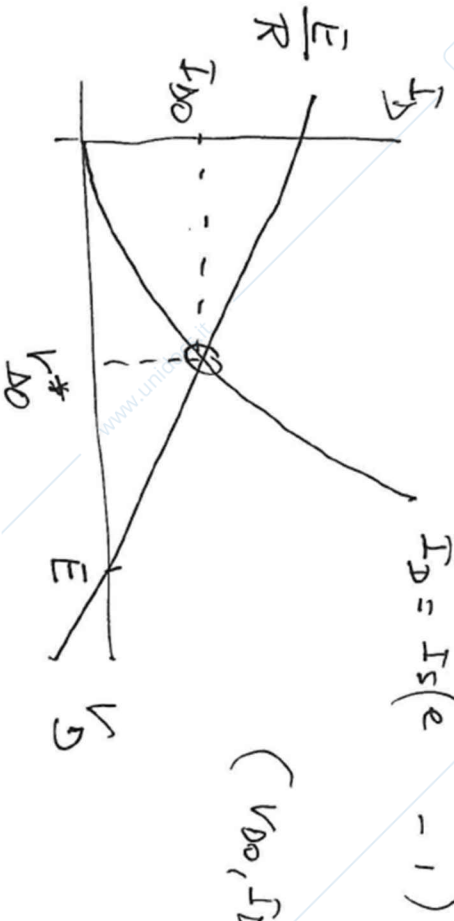


$$V_D = E - R I_D$$

$$I_D = I_S \left(e^{-\frac{V_D}{V_{Te}}} - 1 \right)$$

$$I_D = f(V_D) \leftrightarrow I_D = I_S \left(e^{-\frac{V_D}{V_{Te}}} - 1 \right)$$

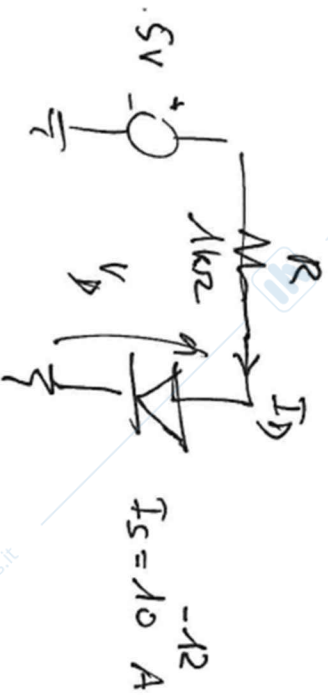
$$I_D = f(I_D)$$



(V_{D0}, I_{D0}) Soluzione del circuito

Risoluzione numerica: tecnica iterativa

approfondimenti



$$\frac{V_D}{V_{TE}} \approx -1 \approx e$$

$V_D \gg V_{TE}$

$$\rightarrow V_D/V_{TE} \approx R_n \frac{I_D}{I_S}$$

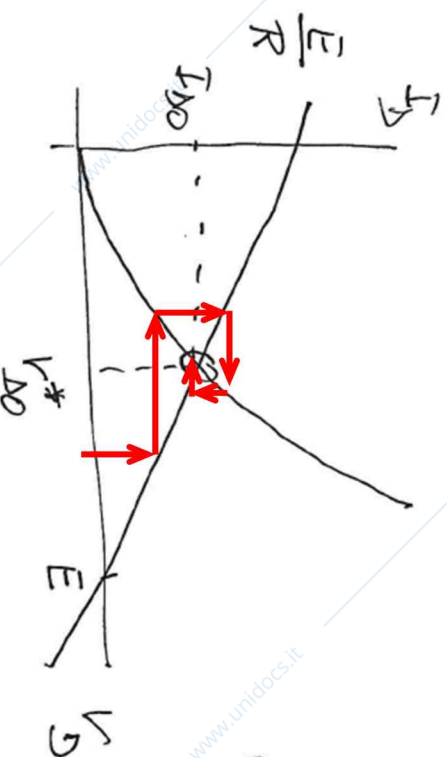
$R = 1k\Omega$

m	V_D	I_D	$V_D/V_{TE} = R_n \frac{I_D}{I_S}$
1	0.727	4.344 mA	22.182
2	0.5546	4.4455	22.215
3	0.5554	4.4446	22.215

OK

$R_S = 1\Omega \rightarrow$

1	0.7271	4.2729 A	29.0833
---	--------	----------	---------

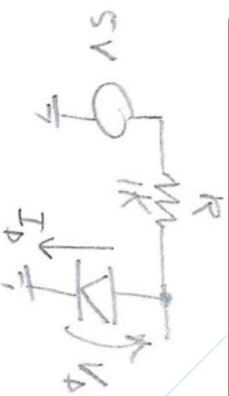


Esercizio: tecnica analisi circuiti con diodi (modello lineare a tratti)

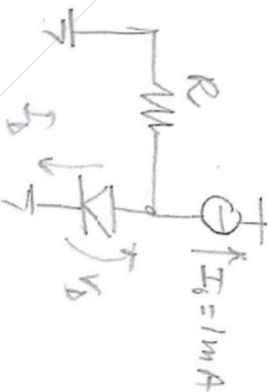
Il Sovrapposizione Effetti? ?

NO!

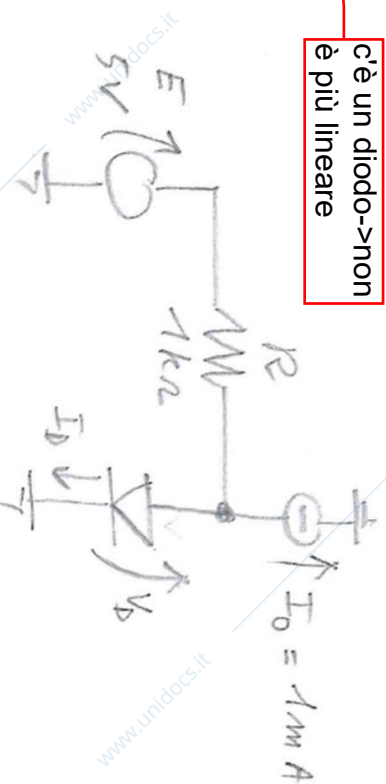
c'è un diodo -> non è più lineare



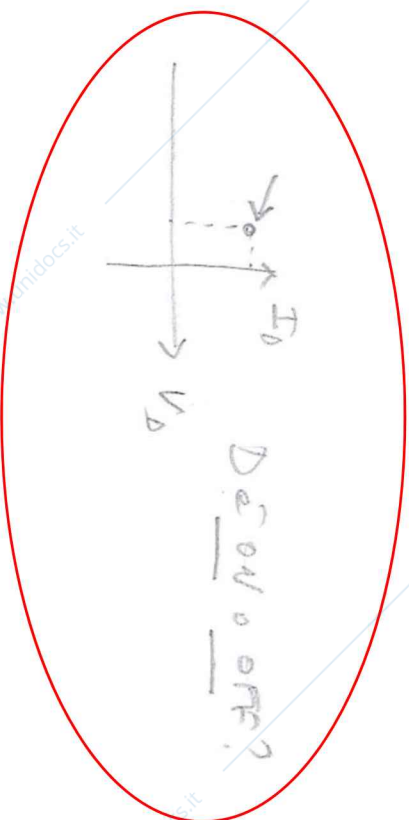
Hyp. D on 1
 $V_D = V_\gamma = 0,7V$
 $I_D = \frac{5 - 0,7V}{1k} = 4,3mA > 0$ (OK)



Hyp. D off:
 $V_D = -R I_S = -1V < V_\gamma = 0,7V$
 $I_D = 0$ (OK)



$\rightarrow V_D = 0,7 - 1 = -0,3V$
 $I_D = 4,3mA - \phi = 4,3mA$



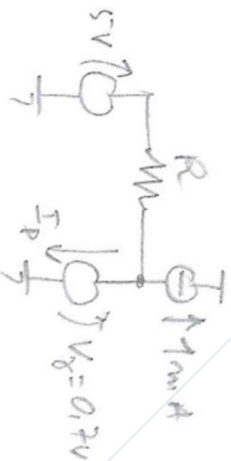
controesempio per dimostrare che non bisogna risolverlo con la sovrapp. degli effetti

□ TECNICA DI SOLUZIONE CON MODELLO LINEARE A TRATTI: IPOTESI/VERIFICA

1) Ip. D ON

$\frac{1}{2} \rightarrow \phi \rightarrow V_D = V_g$

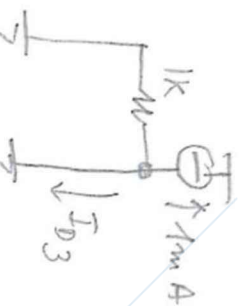
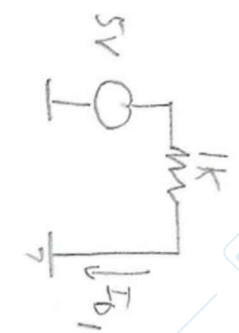
→ Rete lineare!



Per verificare e (Ip. D ON), calcola I_D:

$I_D = I_{D1} + I_{D2} + I_{D3}$ (sovrapp. elettr.)

$\rightarrow I_D = \frac{5V}{1k\Omega} + \left(-\frac{0.7V}{1k\Omega}\right) + (-1mA) = +3.3mA$

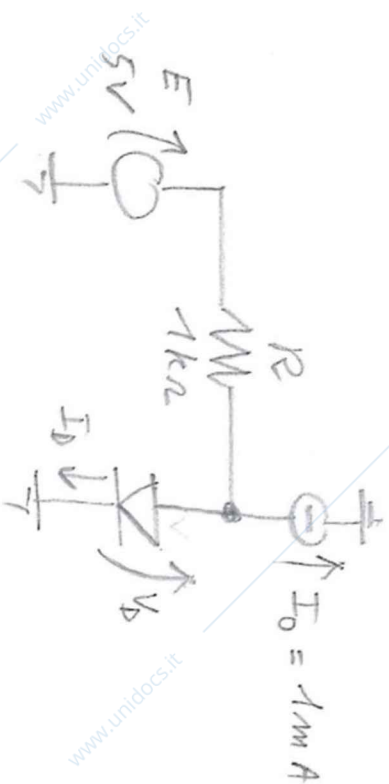


Quindi:

$I_D = 3.3mA > 0$

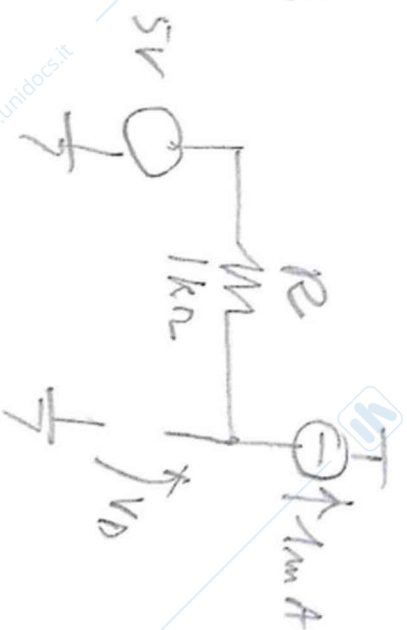
→ $I_D > 0$ e $V_D = V_g$ ipotesi ON

→ $V_D = V_g = 0.7V$



ipotesi corretta,
poiché verificato

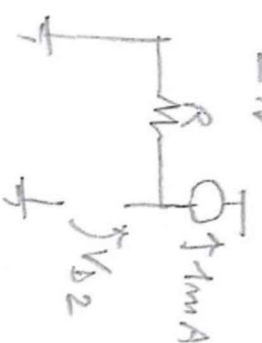
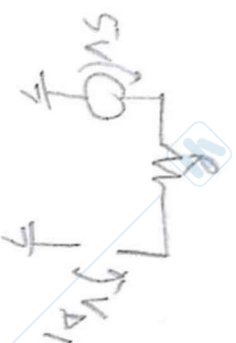
oppure, se avessi ipotizzato D off:



Per la verifica calcolo V_D (avrebbe $V_D < V_g$)

$$V_D = V_{D1} + V_{D2} =$$

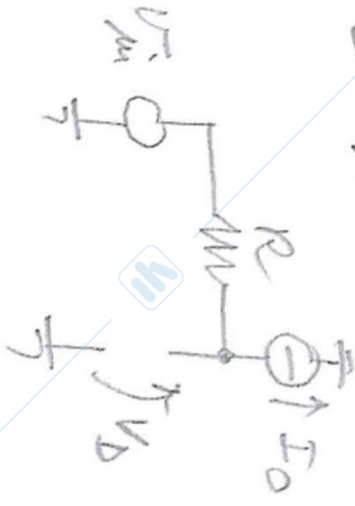
$$= 5V + (-1mA \times 1k\Omega) = +4V > V_g$$



D non è OFF
NO!
D è ON

la verifica mi dice (appunto) che è sbagliata, nel caso avessimo preso questa come prima ipotesi, dovevamo procedere con l'ipotesi 1

V_{in} variabile



Hp. D_{off} (più semplice)
 al fine di trovare i
 limiti di funzionamento
 nel circuito.

calcolo V_D (corto circuito D_{off}):

$$V_D = V_{in} + (-R I_0) = V_{in} - 1V$$

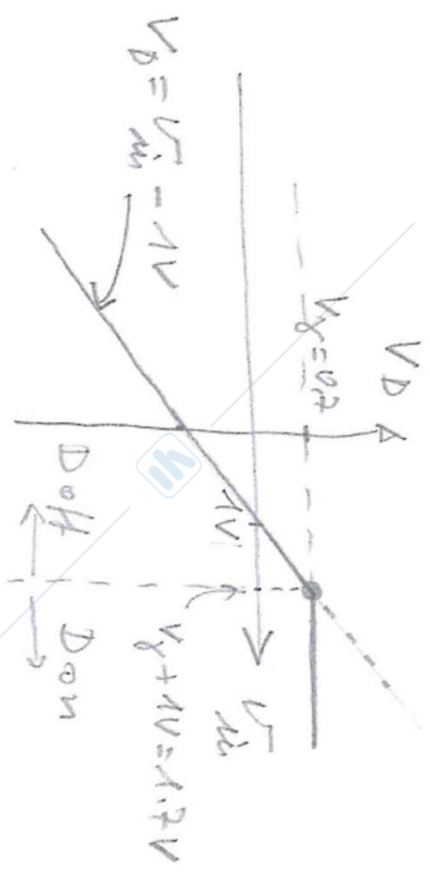


Imponendo la condizione D_{off} ($V_D < V_g$):

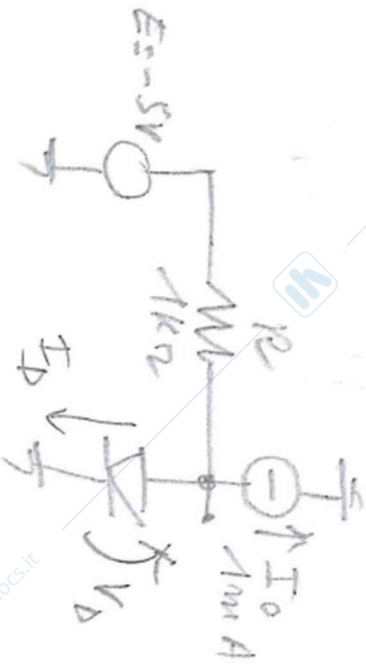
$$V_D = V_{in} - 1V < V_g \Rightarrow V_{in} < V_g + 1V$$

condizione D_{off}

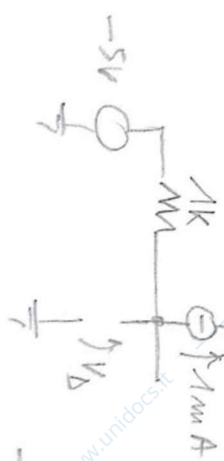
E' chiaro che per $V_{in} > V_g + 1V \rightarrow$ D_{on}!



□ Proviamo con $E = -5V$ e $V_B = -5V$



• Hp. D è off.

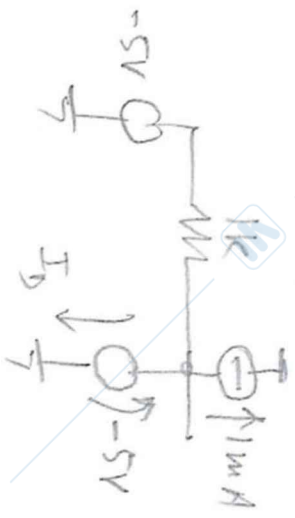


$$V_D = -5V + (-1V) = -6V < V_B$$

D è in Break Down !

non mi da off, ma
breakdown, allora
faccio l'ipotesi che D
è in breakdown

• Hp D è in BD



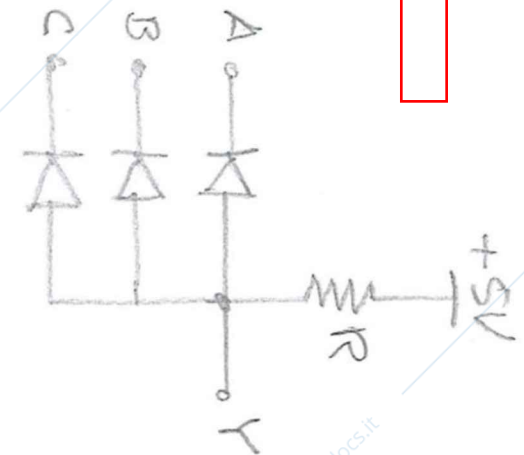
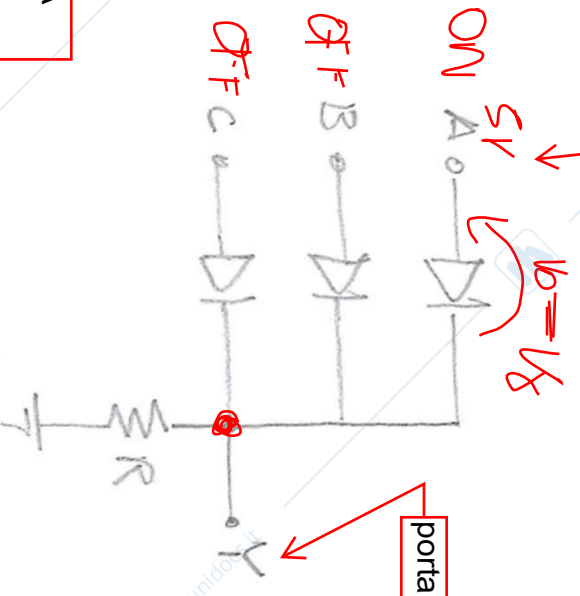
Verifico l'Hp. !

$$I_D = -\frac{5V}{1k} + \left(-\frac{-5V}{1k}\right) + \left(-\frac{1V}{1k}\right) =$$

$$= -1mA < 0 \text{ OK! D è BD!}$$

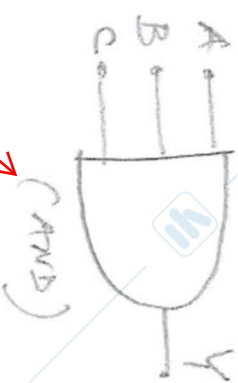
$$\Rightarrow V_D = V_B = -5V$$

Applicazioni: logica AND/OR



supponiamo A
on si dice
ingresso alto) e B
e C off, poi
verifichiamo:
tenendo conto
che
Vgamma=0,7, al
nodo in rosso ci
dovrebbe essere
4,3=5-0,7 e
y(uscita alta) a
5V

or=basta un solo
ingresso per dare
quell'uscita y



and= ci vogliono
tutti e tre gli
ingressi per avere
y

un diodo offre un
comportamento
duale, circuito
aperto o un
generatore di
tensione, questo
permette di
creare circuiti con
effetti differenti

un'uscita è alta
(tranne quando i
diodi sono tutti 0)

1=alta, 0=bassa

PORTA AND (2 INGRESSI)

INPUT		OUTPUT
A	B	A AND B
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

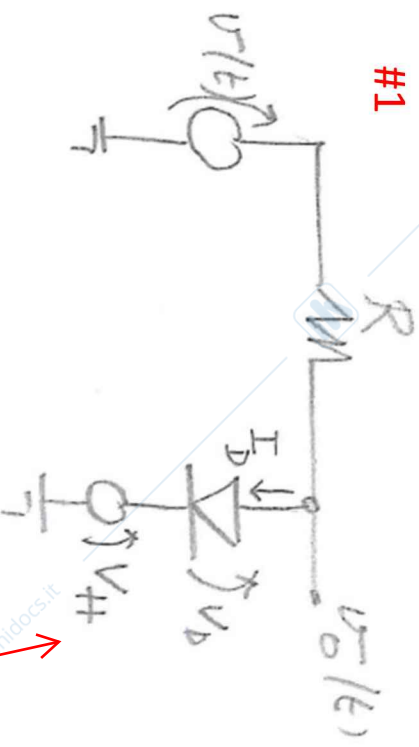
PORTA OR (2 INGRESSI)

INPUT		OUTPUT
A	B	A + B
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

l'uscita è sempre
bassa, tranne
quando i diodi
sono tutti alti

Circuiti di «taglio»

#1



se D off: $v_o(t) = v(t)$

vale per

$$V_D \leq V_H$$

$$V - V_H \leq V_H$$

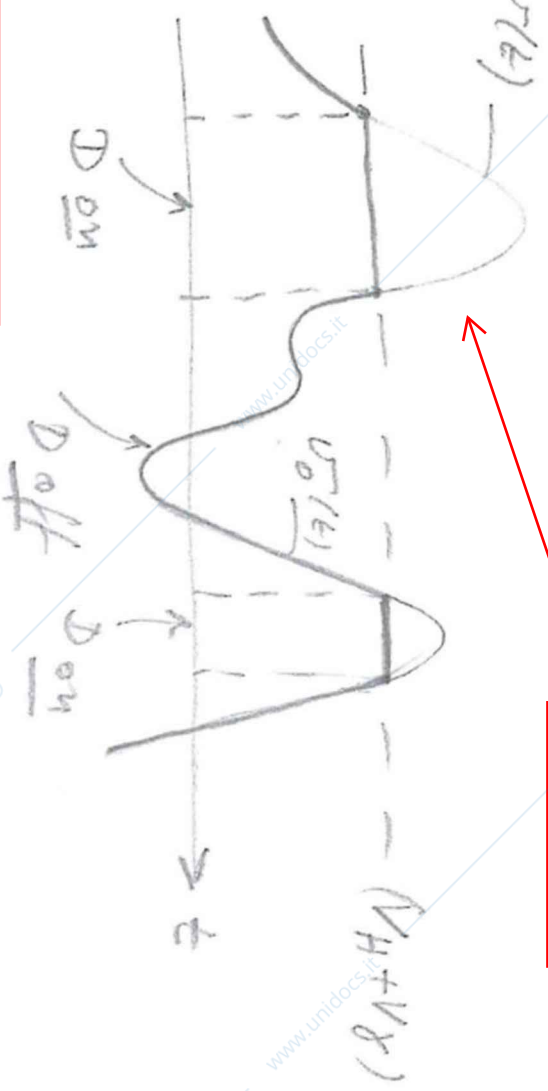
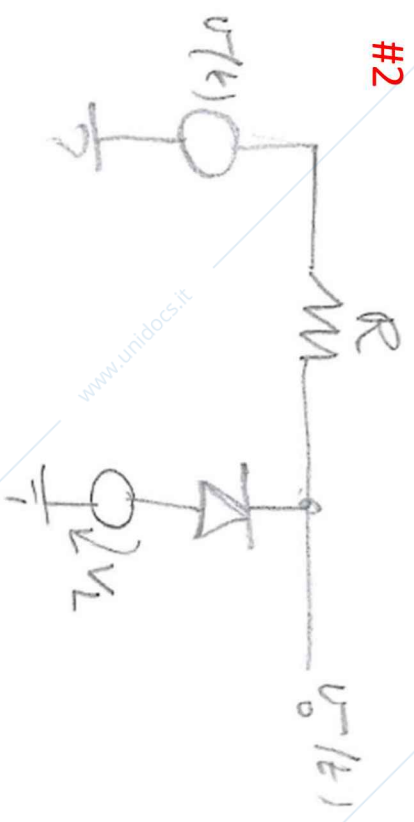
$$V \leq V_H + V_H$$

se il diodo è off non passa corrente, dunque se ne va R

verifica di ciò

con questo generatore "taglio" tutto ciò che sta sopra il livello V_H e V_{gamma}

#2

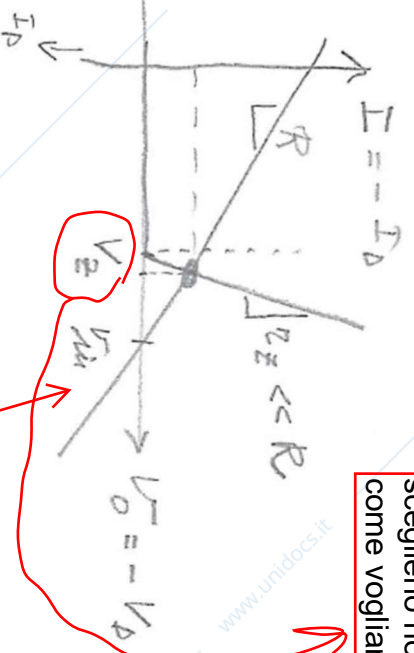
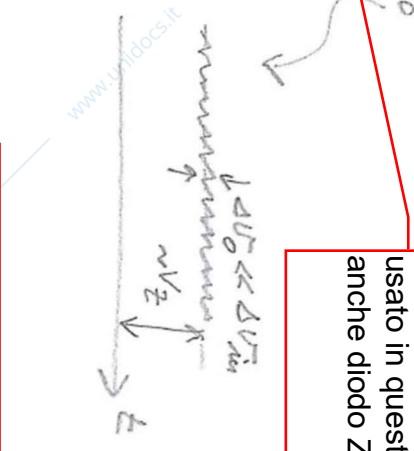
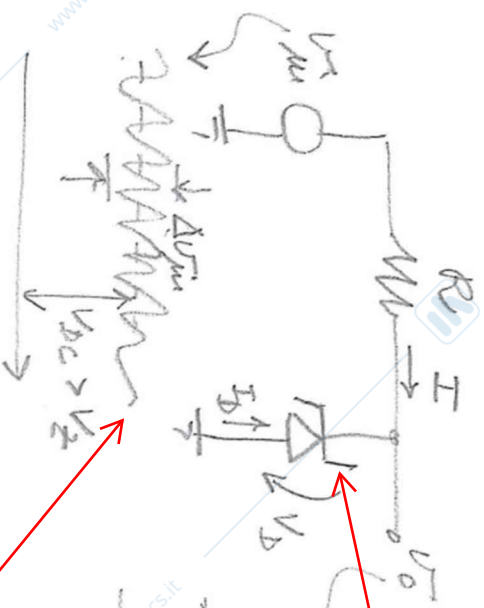


taglio a questo livello

Applicazioni:

«stabilizzazione» con diodo Zener

queste allette indicano il fatto che vogliamo usare il diodo in zona di breakdown (se usato in questo modo detto anche diodo Zeber)



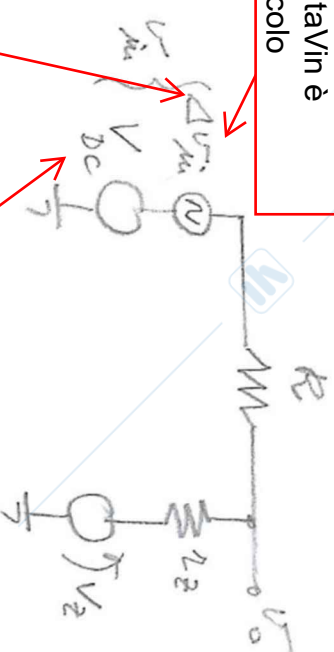
il valore di breakdown, a differenza di Vgamma quando è on, possiamo sceglierlo noi come vogliamo

sovrapp. eff. (prima con Vdc, poi con Vz)

3° quadrante: dove c'è la zona di breakdown

tensione in ingresso abbastanza costante, ma ha un rumore sovrapposto che ne degrada la costanza

se rZ è piccolo rispetto a R Delta Vin è piccolo



$$V_o / V_{DC, V_z} = V_{DC} \cdot \frac{r_z}{r_z + R} + V_z \cdot \frac{R}{r_z + R} \approx V_z$$

$$V_o / \Delta V_{in} = \Delta V_{in} \cdot \frac{r_z}{r_z + R} \approx \Delta V_{in} \frac{r_z}{R} \ll \Delta V_{in}$$

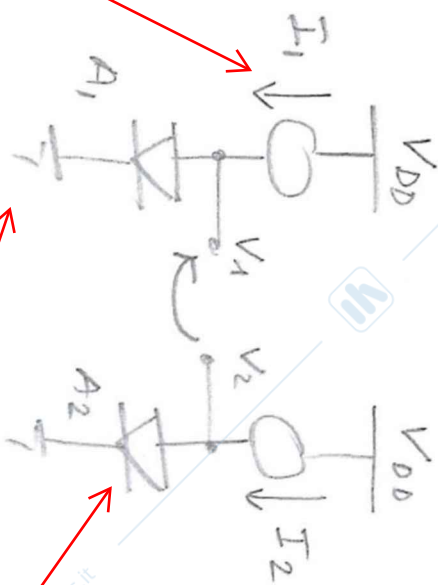
trascur.

valore Vz per cui Vo è stabile e le oscillazioni di Vin sono trascurabili

parte costante

parte oscillante

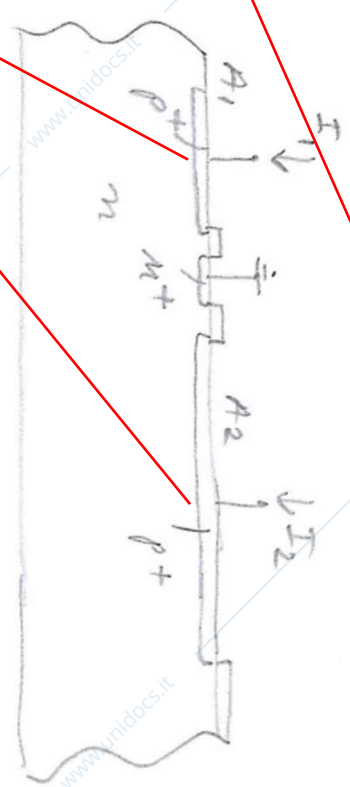
Applicazioni: termometro elettronico



$$I_{S1} = \frac{V_{D1}}{A_1 J_s (e^{V_{D1}/V_{th}} - 1)}$$

$$I_{D1} = A_1 J_s (e^{V_{D1}/V_{th}} - 1)$$

$$I_{D2} = A_2 J_s (e^{V_{D2}/V_{th}} - 1)$$



butto via l'1 poichè sono in piena polarizzazione diretta

non so le correnti, ma so che sono prop. alle aree, quindi considero il rapporto (numero) tra le due aree (note)

prendo 2 diodi aventi aree diverse

polarizzo diodi con 2 correnti I1 e I2

coefficiente

$$V_1 = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_1}{I_{S1}}$$

$$V_2 = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_2}{I_{S2}}$$

tensione termica Vth

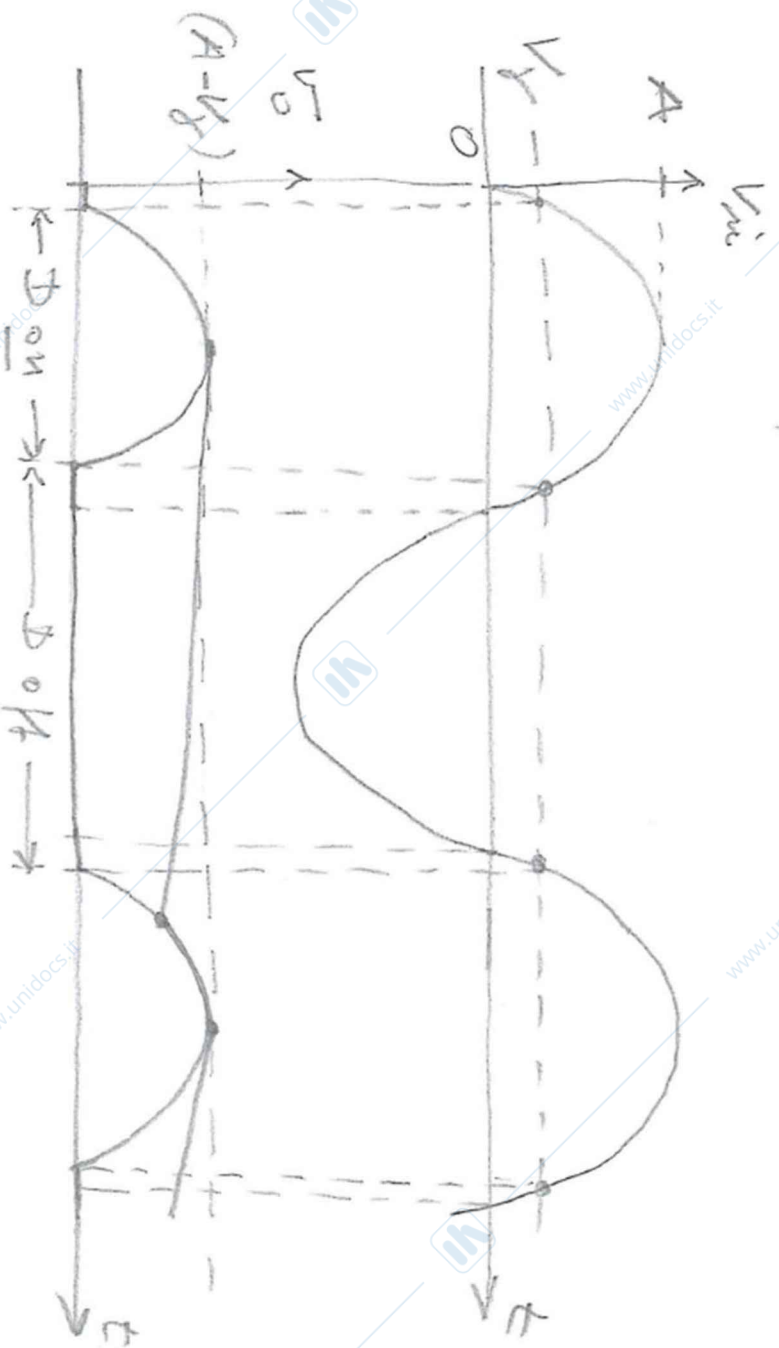
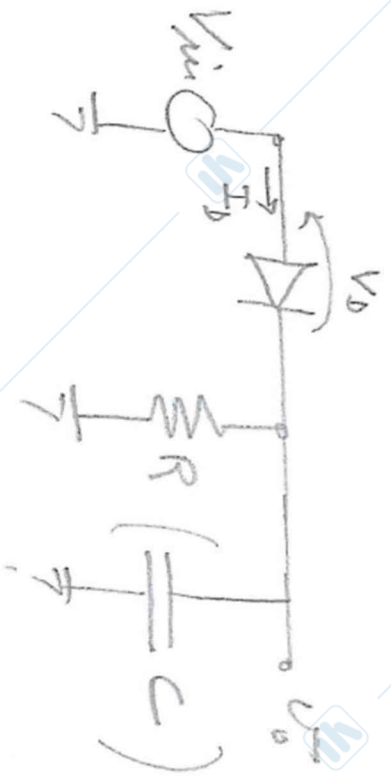
prendo la diff. di pot. tra i 2 diodi

$$\Rightarrow (V_1 - V_2) = \frac{kT}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_1}{I_2} \cdot \frac{I_{S2}}{I_{S1}} \right) \propto T$$

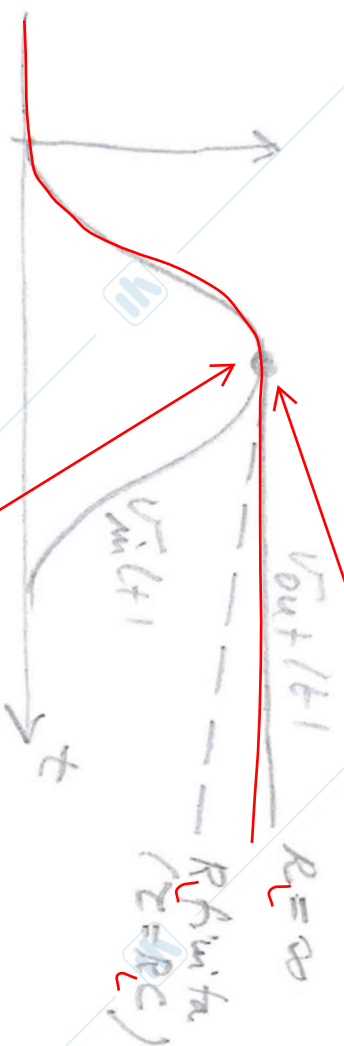
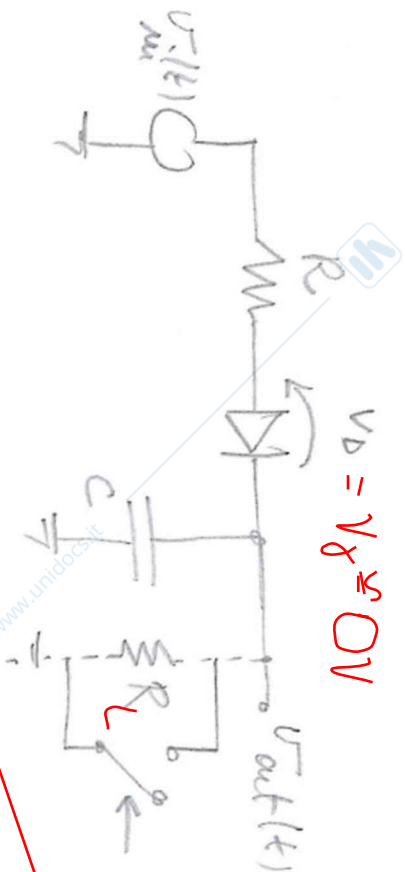
otteniamo la temperatura precisa

non posso scegliere due diodi identici (stessa area) e con la stessa corrente di polarizzazione (altrimenti d.d.p. viene 0)

Raddrizzatore (singola semionda)



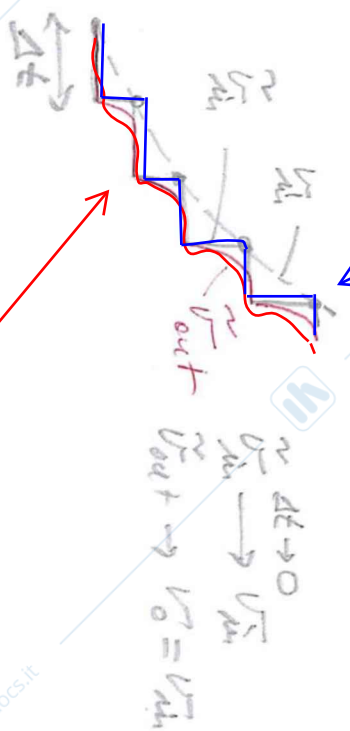
Applicazioni: Allungatore di picco (peak stretcher)



l'uscita segue l'ingresso fino al massimo relativo e poi rimane fisso

Vin

la tensione in ingresso Vin inizia a scendere, il diodo si apre da C.C. a C.A. e Vout mantiene l'ultimo valore prima che il circuito si aprisse (come se il suo valore fosse memorizzato sul condensatore)



Vout

Applicazione peak stretcher con R:

Decodifica segnale AM



il segnale segue i picchi, la tensione di uscita modula quella in ingresso

in questo caso in ingresso abbiamo una tensione V_{in} e un'antenna (resistenza), il diodo svolge la funzione di modulatore, rivelatore che riesce a rimodulare il segnale ad alta frequenza in ingresso nel segnale a bassa frequenza iniziale