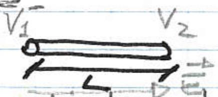
CENNI DI FISICA DELLO STATO SOLIDO

* CORRENTE ELETTRICA

I materiali utilizzati in elettronica possono essere divisi in tre categorie: ISOLANTI, CONDUTTORI e SEMICONDUTTORI. Il parametro in base al quale viene effettuata questa suddivisione è la RESISTIVITÀ, espressa in $\Omega \cdot cm$.

METALLI: in fase solida sono costituiti da atomi legati tra loro in strutture regolari cristalline. I nuclei nel reticolo sono circondati da una nuvola di elettroni; i più lontani dal nucleo sono ad esso debolmente legati e liberi di muoversi (ELETTRONI DI VALENZA). In un conduttore in equilibrio tali elettroni si muovono in modo caotico (MOTO BROWNIANO) a causa dell'agitazione termica: $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}kT \Rightarrow v = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = 1.2\,10^7 \, cm/s$



$V_1 > V_2$

Se ai capi di un filo metallico di lunghezza L si applica una ddp V abbiamo anche un moto ordinato di cariche dovuto all'azione della forza elettrica

$$\boxed{\vec{F} = q \cdot \vec{E}} \qquad \text{FORZA ELETTRICA}$$

dove $\vec{E}$ è il campo elettrico prodotto dalla ddp V.

$$E = \frac{V}{L} \quad \left[V/cm \right] \qquad q = -1.6\, 10^{-19}\, C$$

n.b. poichè l'elettrone è carico negativamente, $\vec{F}$ ed $\vec{E}$ avranno verso opposto.

Gli elettroni acquisiscono una componente di velocità nella direzione di E:

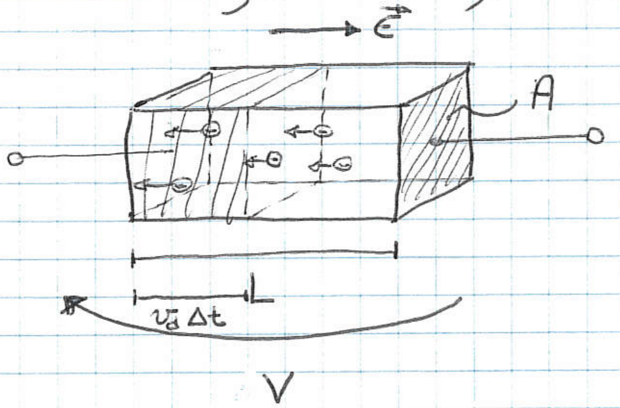
$$\boxed{\vec{v}_d = -\mu \cdot \vec{E}} \qquad \text{VELOCITÀ DI DERIVA}$$

μ = mobilità elettronica $[cm^2/Vs]$ Cu: $\mu = 5000\ cm^2/Vs$

Si definisce corrente elettrica la carica media che attraversa la sezione del conduttore nell'unità di tempo

$$I = q \cdot \Phi \qquad \text{CORRENTE ELETTRICA } [A = C/s]$$

dove Φ è il flusso di portatori (cioè il numero di portatori che attraversa la sezione nell'unità di tempo.)



Il numero di portatori che attraversano la superficie A nell'unità di tempo Δt è pari a

$$n \cdot v_d \cdot \Delta t \cdot A$$

cioè il numero di elettroni contenuti nel parallelepipedo di altezza $v_d \Delta t$ e base A, essendo n la concentrazione di elettroni per unità di volume

$$I = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{q\, n\, v_d\, A\, \Delta t}{\Delta t} = q\, n\, v_d\, A$$

e poiché $v_d = \mu E = \mu \frac{V}{L}$, si può scrivere che:

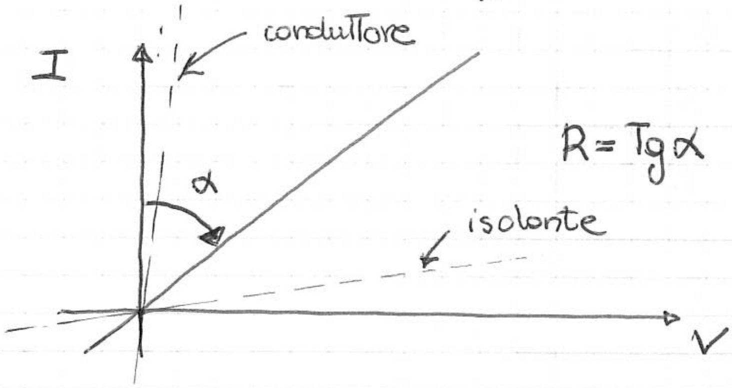
$$\boxed{I = q\, n\, \mu\, A\, \frac{V}{L}}$$

da cui si vede come esista una relazione di proporzionalità diretta tra la tensione applicata ai capi di un conduttore e la corrente che in esso fluisce

$$\boxed{I = \frac{V}{R}} \qquad \text{LEGGE DI OHM}$$

La costante di proporzionalità R è detta resistenza:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{1}{q \mu n} \frac{L}{A} \quad [ohm] \qquad \text{RESISTENZA}$$



Si definisce anche la CONDUTTANZA, come l'inverso della resistenza

$$G = \frac{1}{R} = q \mu n \frac{A}{L} \quad [S, mho] \qquad \text{CONDUTTANZA}$$

La conduttanza e la resistenza dipendono sia dalle proprietà fisiche del mezzo (μ, n) che dalle sue caratteristiche geometriche (A, L). Si possono definire delle quantità specifiche dipendenti esclusivamente dalle caratteristiche fisiche del mezzo:

$$\sigma = q \mu n \qquad \text{CONDUCIBILITÀ ELETTRICA}$$

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \frac{1}{q \mu n} \qquad \text{RESISTIVITÀ}$$

$\hookrightarrow R = \rho \frac{L}{A}$

CONDUTTORI: $\rho < 10^{-5}\ \Omega cm$

ISOLANTI $\rho > 10^{5}\ \Omega cm$

SEMICONDUTTORI $10^{-5}\ \rho < 10^{5}\ \Omega cm$

* SEMICONDUTTORI PURI

I semiconduttori elementari sono formati da atomi di un solo elemento appartenente alla IV colonna della Tavola periodica degli elementi

	III	IV	V	VI
	5 B	6 C	7 N	8 O
	13 Al	14 Si	15 P	16 S
30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se
48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te
80 Hg	81 Ti	82 Pb	83 Bi	84 Po

I semiconduttori composti sono formati da elementi che appartengono alla III e alla V colonna (semiconduttori composti III-V) oppure alla II e VI colonna della Tavola periodica (semiconduttori composti II-VI)

$Si \Rightarrow 1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^2 \Rightarrow \boxed{sp^3}$

Il semiconduttore più usato in elettronica è attualmente il silicio. Esso è caratterizzato da un nucleo con 14 protoni e da altrettanti elettroni che orbitano attorno ad esso. Essendo appartenente alla IV colonna della Tavola periodica l'atomo di Si ha 4 elettroni di valenza.

Per motivi energetici tutti gli atomi vorrebbero avere 8 elettroni nell'orbitale più esterno, cioè raggiungere l'OTTETTO. (I gas nobili, elementi dell'VIII colonna hanno 8 elettroni nell'orbitale esterno e tendono a non reagire e legarsi con altri atomi, da qui il nome di gas inerti).

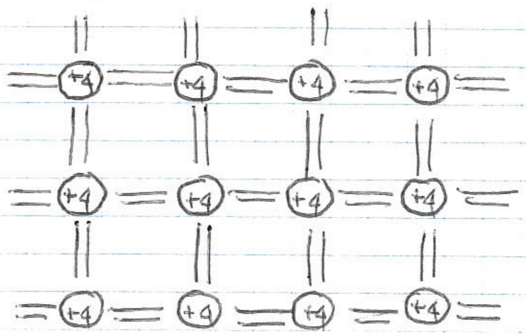
Gli atomi di Si per poter raggiungere l'ottetto, tendono a formare una struttura cristallina in cui ciascun atomo si lega con 4 atomi adiacenti condividendo con ciascuno di essi uno dei propri elettroni di valenza.

Condizione necessaria perchè un atomo possa legarsi con un altro mediante legame omopolare e covalente è che esso contenga almeno un singoletto.
Alcuni elementi si possono legare ad altri con un numero di legami covalenti superiori al numero di singoletti che in essi figura.
Nel caso del Si, esso, come il Carbonio ha due soli singoletti, ma si lega ad altri atomi con quattro legami covalenti. Si $\Rightarrow 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$
Uno dei due elettroni dell'orbitale 3s salta nell'orbitale 3p dando luogo (sp^3) a 4 orbitali con 4 singoletti. I quattro orbitali nei legami sarebbero uno di forma sferica e orientamento ~~spazialmente~~ indifferente e tre con orientamenti diversi secondo i 3 assi cartesiani. In realtà, i 4 ~~legami~~ sono 4 orbitali equivalenti da cui scaturiscono quattro legami equivalenti, cioè i 4 orbitali non sono orbitali puri ma risultano dalla combinazione dell'orbitale 3s con i 3 orbitali 3p, detti ibridi e indicati con sp^3. Essi hanno forma di ovuli assai oblunghi in posizione molto eccentrica rispetto al nucleo e con la loro parte più espansa rivolta nelle direzioni dei 4 vertici di un tetraedro con il nucleo al centro e formano tra loro angoli di 109.5° (vedi la figura sulle slides)

Analogamente, il Ga per poter originare una struttura cristallina deve raggiungere l'ottetto e quindi condivide i propri 3 elettroni di valenza con i 5 dell'arsenico dando luogo all'arseniuro di gallio (GaAs), attualmente impiegato nei circuiti elettronici per alte frequenze.
Altri esempi di semiconduttori composti sono il InP, GaSb, SiC, etc...

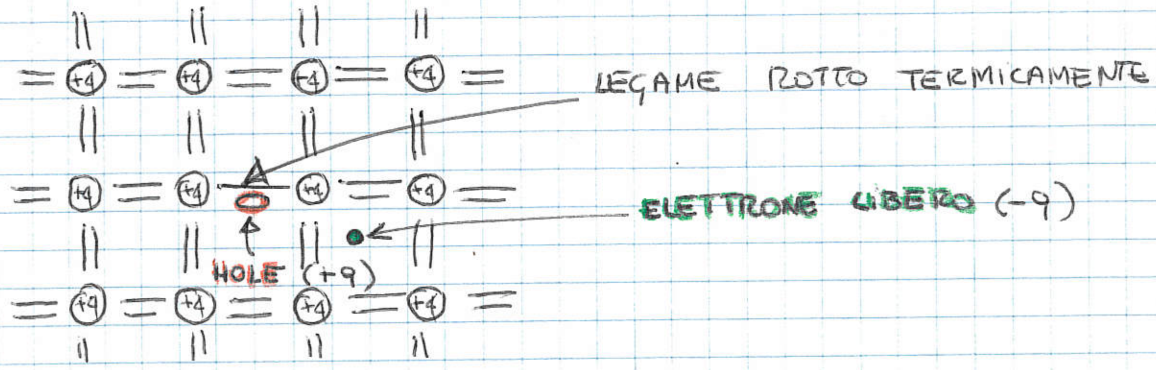
Il legame che si forma tra gli atomi di Si nella struttura cristallina è detto LEGAME COVALENTE.
Per il Si la densità di atomi è di $5 \times 10^{22}\ cm^{-3}$, quindi in $1\ mm^3$ di Si ci sono $5 \times 10^{22}\ cm^{-3} \times (0.1\ cm)^3 = 5\,10^{19}$ atomi
la distanza tra gli atomi è di $\sim 5\,Å = 0.5\,nm = 5 \times 10^{-8}\ cm$.

Del modello a legame covalente è possibile dare una rappresentazione 2D:



Per temperature prossime allo zero assoluto, tutti gli elettroni sono impegnati in legami covalenti con atomi adiacenti, quindi non vi sono elettroni disponibili per la conduzione ed il Si si comporta da isolante.

Al crescere della temperatura, l'agitazione termica fornisce sufficiente energia per poter rompere qualche legame covalente, quindi qualche elettrone può partecipare alla conduzione (ELETTRONI DI CONDUZIONE)



In un semiconduttore la rottura di un legame covalente determina la formazione di un altro portatore di carica che contribuisce al processo di conduzione. Quando l'elettrone di carica $-q$ si allontana dall'atomo di Si lascia nel cristallo una lacuna (hole) caratterizzata da carica $+q$. Un elettrone appartenente ad un legame covalente adiacente può occupare il posto lasciato libero dal primo elettrone, creando una lacuna in un punto diverso del semiconduttore. In questo modo la lacuna può spostarsi all'interno del cristallo dando luogo a quello che può essere visto come il moto di una carica positiva $+q$.

Nel semiconduttore puro si ha

$$n = p = n_i$$

dove n è la densità di elettroni nel reticolo, p la densità di lacune ed n_i prende il nome di CONCENTRAZIONE

Fare dopo con semicond drogati

INTRINSECA Calcoliamo ora quanto vale n_i ad una certa Temperatura:

$G(T)$: tasso di generazione, cioè n° di legami che si rompono nell'unità di tempo - Dipende solo da T

$R(T)$: Tasso di ricombinazione, cioè n° di legami che si riformano nell'unità di tempo - Dipende da T, ma anche dalla concentrazione di elettroni e lacune -

$\rightarrow R(T) = r(T)\, n\, p$

All'equilibrio:

$$G(T) = R(T)$$

$$\rightarrow \quad n \cdot p = \frac{G(T)}{r(T)} = \text{costante}(T)$$

In un semiconduttore intrinseco $n = p = n_i$:

$$\boxed{n \cdot p = n_i^2(T)}$$ LEGGE DI AZIONE DI MASSA

n.b. questa equazione perde validità quando il semiconduttore è sottoposto a sollecitazioni esterne

Per il Si a T ambiente $n_i = 1.45\ 10^{10}\ cm^{-3}$, quindi solo un legame covalente su $3.4\ 10^{12}$ è rotto a 300K.

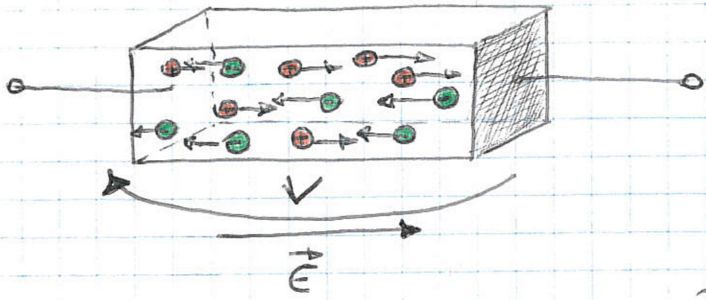
$E_G = \begin{matrix} 1.12\ eV & Si \\ 0.67\ eV & Ge \end{matrix}$

$$n_i^2 = BT^3 \exp\left(-\frac{E_G}{kT}\right)$$

$B = 1.08\ 10^{31}\ K^{-3}\ cm^{-6}$ Si
$\quad\ \ 2.31\ 10^{30}\ K^{-3}\ cm^{-6}$ Ge
$\quad\ \ 1.27\ 10^{28}\ K^{-3}\ cm^{-6}$ GaAs

n_i risulta fortemente dipen ente dalla Temperatura: torno alla Temperatura am iente una variazione di di 100 K causa una va azione di n_i di circa ordini di grandezza -

Se applichiamo un campo elettrico $\vec{E}$ ad una barretta di semiconduttore assisteremo ad uno spostamento ordinato dei portatori di entrambi i segni.



Si avrà un flusso di elettroni Φ_n verso il terminale a potenziale più positivo ed un flusso di lacune Φ_p verso il terminale a potenziale più negativo.
Le velocità di deriva dei portatori sono legate al campo applicato dalla relazione:

$$\vec{v}_n = -\mu_n \vec{E} \quad ; \quad \mu_n \simeq 1400 \ cm^2/Vs \quad \text{in Si intrinseco}$$

$$\vec{v}_p = \mu_p \vec{E} \quad ; \quad \mu_p \simeq 450 \ cm^2/Vs \quad \text{in Si intrinseco}$$

<u>n.b.</u> tale relazione di proporzionalità vale solo per valori del campo elettrico sufficientemente bassi.
Al crescere del campo elettrico la velocità di deriva tende ad un valore costante, detta VELOCITÀ DI SATURAZIONE. Per $E > 3 \ 10^4 \ V/cm$ in Si $v_n = v_{sat} = 10^7 \ cm/s$.

Determiniamo le DENSITÀ di CORRENTE di elettroni e holes:

$$J_n = -q \cdot \Phi_n = -q \left(n v_n \right) = -q \, n \left(-\mu_n E \right)$$

$$J_p = q \cdot \Phi_p = q \left(p v_p \right) = q \, p \, \mu_p E$$

Quindi la <u>CORRENTE DI DERIVA</u> complessiva nel caso di una barretta di lunghezza L, sezione A, a cui sia applicata una ddp V è:

$$I = \left(J_n + J_p \right) A = q \left(\mu_n n + \mu_p p \right) E A = \sigma E A$$

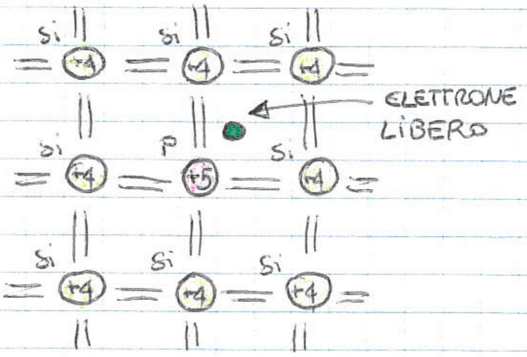
dove $\sigma = q(\mu_n n + \mu_p p)$ è la CONDUCIBILITÀ ELETTRICA, che per il Si intrinseco vale $\sigma = 4.4\ 10^{-6}\ \frac{1}{\Omega\, cm}$

La resistività ρ è $\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q(\mu_n n + \mu_p p)} = 2.3\ 10^{5}\ \Omega\, cm$

valore piuttosto elevato.

* SEMICONDUTTORI DROGATI

Una delle proprietà più vantaggiose dei semiconduttori è costituito dal fatto che la conducibilità del semiconduttore può essere modificata introducendo nel materiale degli atomi di impurità attraverso un processo chiamato DROGAGGIO.
Le impurità utilizzate per il drogaggio del Si appartengono alla terza e alla quinta colonna della tavola periodica.



Se sostituiamo un atomo di Si con un atomo di P (V colonna), quattro dei cinque elettroni di valenza formano legami covalenti, mentre è sufficiente un'energia termica modesta perchè il quinto elettrone sia disponibile per la conduzione. Gli elementi della V colonna sono, pertanto, IMPUREZZE DONORI per il Si.

Se $N_D \gg n_i \Rightarrow n \simeq N_D$ in quella regione.

Tipicamente nella microelettronica $10^{14}\ cm^{-3} < N_D < 10^{19}\ cm^{-3}$

Fai qui legge di azione di massa

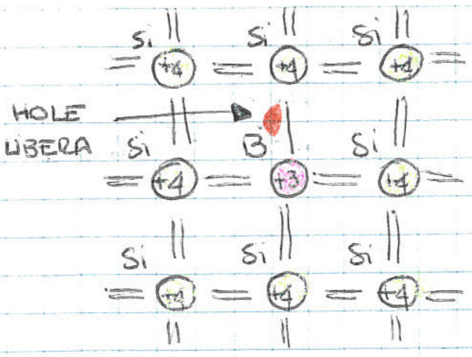
All'equilibrio termico vale ancora la legge di azione di massa

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

Se $N_D \gg n_i \Rightarrow n \simeq N_D$ e $p = \frac{n_i^2}{n} \simeq \frac{n_i^2}{N_D}$

In un semiconduttore drogato n (cioè con atomi donori) gli elettroni sono i portatori MAGGIORITARI, mentre le holes

19 sono i MINORITARI.



Se sostituiamo un atomo di Si con un atomo di B (III colonna), un elettrone che si trova nelle vicinanze può essere "accettato" per formare quattro legami covalenti con gli atomi di Si adiacenti.

In questo modo si crea una lacuna che può spostarsi all'interno del reticolo cristallino. In un semiconduttore drogato p, le lacune sono i portatori MAGGIORITARI e gli elettroni i MINORITARI.

All'equilibrio Termodinamico $n \cdot p = n_i^2$ e $p \simeq N_A$ e $n = \frac{n_i^2}{p} \simeq \frac{n_i^2}{N_A}$

Un semiconduttore è detto COMPENSATO se contiene sia atomi accettori che atomi donori. Se prevale la concentrazione di donori, il semiconduttore è drogato n, ma la concentrazione di elettroni liberi vale $n = (N_D - N_A)$.

Mediante il drogaggio è possibile, quindi, variare selettivamente la resistività e la natura dei portatori maggioritari in zone definite.

FIG. 2.13
Zoppa

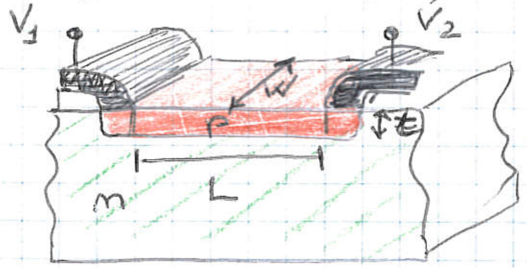
Ad altissimi valori di drogaggio la resistività si discosta dalla relazione vista poiché la mobilità dei portatori diminuisce a causa di fenomeni di scattering con le impurezze ionizzate present nel reticolo cristallino.

* RESISTORE INTEGRATO

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

$\Downarrow$

Se ~~impa~~ drogo opportunamente una certa regione posso creare dei resistori in un circuito integrato.



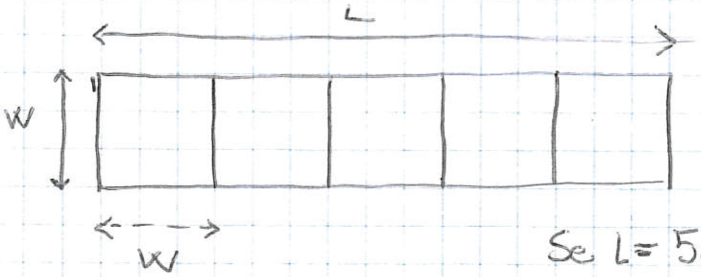
$$R = \rho \frac{L}{W \cdot t} = \frac{1}{q \mu_n N_A} \cdot \frac{L}{W \cdot t}$$

n° droganti per unità di volume

Consideriamo $N_A \cdot t = D$ (numero di droganti per unità di area, chiamata DOSE dell'impianto)

$\Downarrow$

$$R = \frac{1}{q \mu_n D} \frac{L}{W}$$



$\Rightarrow$ L/W quadrati, detti QUADRI

Se $L = 50\,\mu m$, $W = 5\,\mu m$ $\Rightarrow$ 10 quadri

$\Downarrow$

Posso considerare quale è la resistenza di ogni quadrato:

$$R_{\square} = \frac{R}{L/W} = \frac{1}{q \mu_n D}$$

Ad esempio: se ho un processo che mi consente di avere una densità di portatori per unità di area $2 \cdot 10^{13}\,cm^{-2}$ quanti quadri ho bisogno per fare $R = 1\,k\Omega$?

$$R_\square = \frac{1}{q\mu D} = \frac{1}{1.6\,10^{-19}\,C * 1200\,cm^2/Vs * 2\,10^{13}\,cm^{-2}} = 260\,\Omega/\square$$

$\Downarrow$

$$n° \text{ quadri} = \frac{R}{R_\square} = \frac{1\,k\Omega}{260\,\Omega/\square} = 3.85\,\square \simeq 4\,\square$$

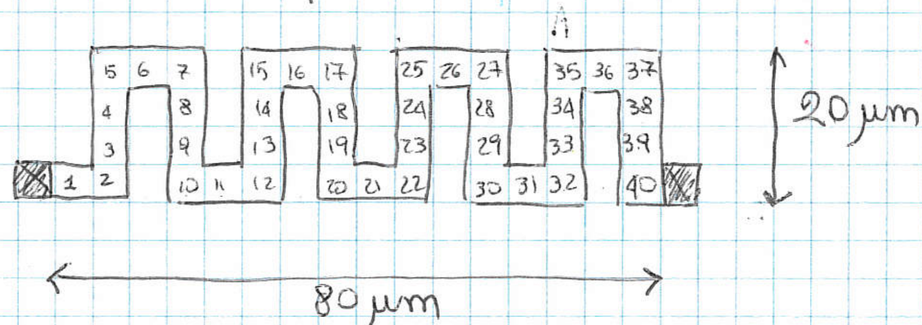
Se invece voglio $10\,k\Omega \Rightarrow 40\,\square$

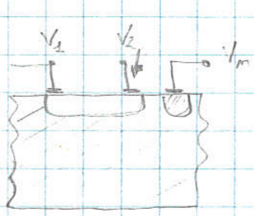
Se $W = 5\,\mu m \Rightarrow L_{1k} = 20\,\mu m$ ok

$L_{10k} = 200\,\mu m$

$\Downarrow$

posso fare una serpentina



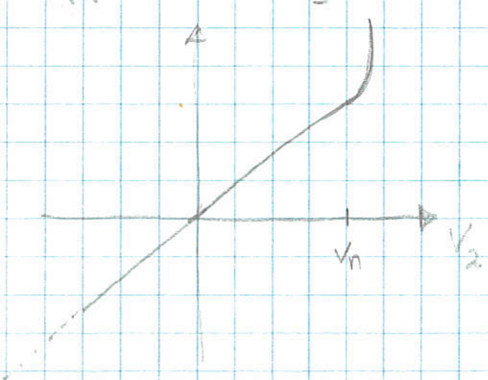


$V_2 > V_1$

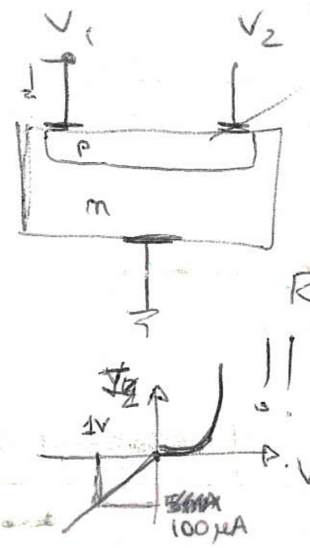
devo mantenere la giunzione pn in inversa

↳ $V_n > \max(V_2, V_1)$

Supponiamo $V_1 = 0$



merc. 1/10



$2\,\mu m = W$

$80\,\mu m = L$

$R_\square = 250\,\Omega/\square$

$R = R_\square * \frac{L}{W} =$

$= 250 \times 40 =$

$= 10\,k$

$\frac{1V}{10k} = 100\,\mu A$