27/02 ELETTRONICA ANALOGICA - P. MARCONCINI p.marconcini@iet.unipi.it

GEN. TENSIONE: ⊕ , se continuo: ⊣⊢ (+)

GEN. CORRENTE: Ⓘ

		$\bar{Z}_L = sL$ o $j\omega L$	$\bar{Z}_C = \frac{1}{sC}$ o $\frac{1}{j\omega C}$	
C.C	$R=0, V=0$	$\omega = 0 \Rightarrow \bar{Z}_L = 0$	$\omega = \infty \Rightarrow \bar{Z}_C = 0$	C.C
C.A	$R=\infty, I=0$ (o RAMO APERTO)	$\omega = \infty \Rightarrow \bar{Z}_L = \infty$	$\omega = 0 \Rightarrow \bar{Z}_C = \infty$	C.A

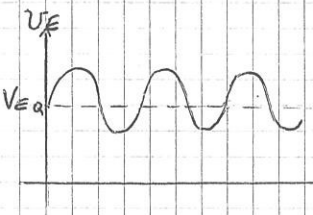
IMPEDENZA VISTA: CALCOLATA IN CARATTERIZZAZIONE IN BASE CORRENTE o TENSIONE CON I GENERATORI INDIPENDENTI INTERNI DISATTIVATI

master COPY COPISTERIA

NOMENCLATURA:

- V_A: TENSIONE DEL NODO A RISPETTO A MASSA
- V_{AB}: $V_A - V_B$ DIFFERENZA TRA TENSIONI
- VERSO + DELLE CORRENTI: SE ENTRANTI NEL DISPOSITIVO CONSIDERATO
- LETTERA: - MINUSCOLA: CORRENTE o TENSIONE VARIABILI NEL TEMPO
  - MAIUSCOLA: VALORI DI PICCO, VALORI EFFICACI, VALORI MEDI, FASORI, TRASFORMATE ...
- PEDICE: - MINUSCOLO: VARIAZIONI (COMPONENTI VARIABILI NEL TEMPO) INTORNO AL V. MEDIO
  - MAIUSCOLO: QUANTITÀ TOTALI o VALORI MEDI

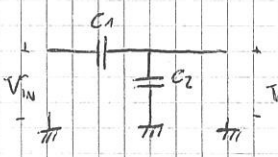
es.



$$v_E(t) = \underbrace{V_{EQ}}_{\text{PUNTO DI LAVORO o DI RIPOSO}} + \underbrace{V_{EM}}_{\text{AMPIEZZA}} \sin(\omega t) \quad \rightarrow v_e(t)$$

$$I_{EFF} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2(t)\,dt} \quad , \quad P_R = v \cdot i = R i^2 \Rightarrow E_R = \int_0^T P_R(t)\,dt = TR I_{EFF}^2$$

PARTITORE CAPACITIVO



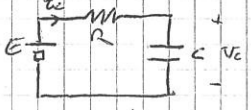
$$\Rightarrow V_u = \frac{\frac{1}{sC_2}}{\frac{1}{sC_1} + \frac{1}{sC_2}} V_{IN} = \boxed{\frac{C_1}{C_1 + C_2} V_{IN}}$$

master COPY COPISTERIA

INDUTTORE INERZIALE RISPETTO ALLA CORRENTE: LA CORRENTE È COSTANTE → $E_M = \frac{1}{2} L i_L^2$

CONDUTTORE INERZIALE RISPETTO ALLA TENSIONE: LA TENSIONE È COSTANTE → $E_e = \frac{1}{2} C v_C^2$

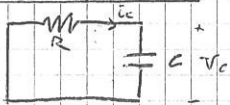
CARICA CONDENSATORE:



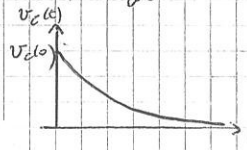
$$i_C = C \frac{dv_C}{dt} \Rightarrow v_C(t) = E + (v_C(0) - E)\, e^{-\frac{t}{RC}}$$



SCARICA CONDENSATORE



$$i_C = C \frac{dv_C}{dt} \Rightarrow v_C(t) = v_C(0)\, e^{-\frac{t}{RC}}$$



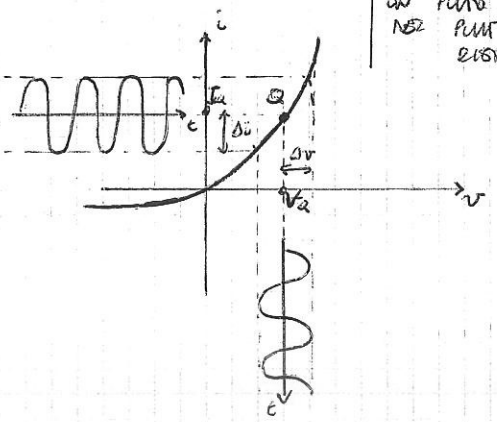
IN GENERALE $\Rightarrow$ $\boxed{v_C(t) = v_C(\infty) + \left(v_C(t_{INIZ}) - v_C(\infty)\right) e^{-\frac{t - t_{INIZ}}{R_{VC} C}}}$

$v_C(\infty)$: con C aperto

R_{VC}: R vista dai cond.

LINEARIZZAZIONE:

FACCIO LAVORARE IL CIRCUITO IN CORRENTE CONTINUA ATTORNO A UN PUNTO DI LAVORO, TALE AVRÒ PICCOLE VARIAZIONI ($\Delta i / \Delta v$) NEL PUNTO DI LAVORO Q IN TENSIONE E CORRENTE CORRISPONDENTE A I_Q e V_Q (VALORI MEDI)



NOI FAREMO DELLE APPROSSIMAZIONI SENZA USARE LA TECNICA GRAFICA

LINEARIZZAZIONE: SVILUPPO DI TAYLOR FINO AL 1° ORDINE

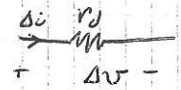
$$\Rightarrow i(v) = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{1}{n!} \left.\frac{d^n i(v)}{dv^n}\right|_{v=V_Q} \cdot (v - V_Q)^n$$

$$\simeq i(V_Q) + \left.\frac{di}{dv}\right|_{v=V_Q} \cdot (v - V_Q) = I_Q + g_d \cdot \Delta v$$

g_d → CONDUTTANZA DIFFERENZIALE POICHÉ RAPPORTO TRA VARIAZIONI

$$\Rightarrow i(v) - I_Q = g_d \, \Delta v$$

$$\Rightarrow \Delta i = \frac{1}{r_d} \Delta v \quad \Rightarrow$$



↓

CIRCUITO EQUIVALENTE PER LE VARIAZIONI (LINEARE)

↓

ANCHE SE IL CIRCUITO DI PARTENZA NON È LINEARE

I PRIMI DISPOSITIVI ELETTRONICI, I TUBI A VUOTO, C'ERA UN CATODO CHE VENIVA RISCALDATO PER EFFETTO TERMOIONICO E EMETTEVA ELETTRONI CHE USCIVANO DAL MATERIALE, POI C'ERA L'ANODO (TRA I 2 IL VUOTO)

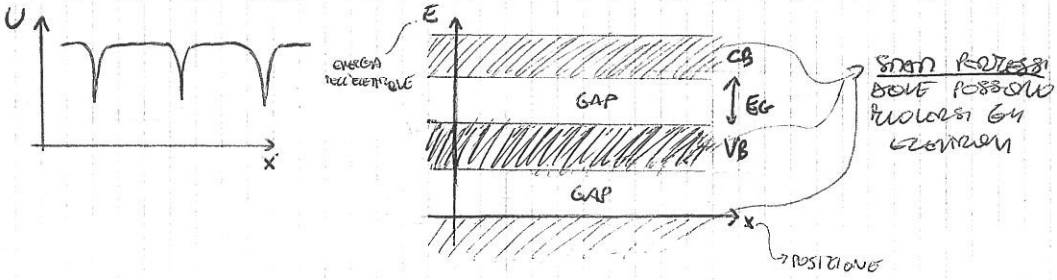
SE ELETTRIZZO V POSITIVA SULL'ANODO E V NEGATIVA SUL CATODO, GLI ELETTRONI VENIVANO ATTRATTI DALL'ANODO E QUINDI FLUIVANO DA CATODO A ANODO

SE METTIAMO LA V CONTRARIA GLI ELETTRONI VENIVANO RESPINTI E NON SI HA SCAMBIO DI CORRENTE.
CAMBIANDO IL MEZZO TRA ANODO E CATODO SI PUÒ MODULARE LA CORRENTE
⇒ DIODO

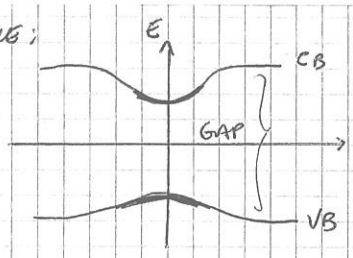
IN CONDUTTORI $\rho < 10^{-2}\ \Omega\,cm$
IN ISOLANTI $\rho > 10^{5}\ \Omega\,cm$
IN SEMICONDUTTORI $\rho \in (10^{-2}, 10^{5})\ \Omega\,cm$

↓ RESISTIVITÀ

GLI ELETTRONI IN MOTO SONO CARATTERIZZATI DALL'EQUAZIONE DI SCHRÖDINGER



BANDE:



CB e VB: BANDE IN CUI STA L'ELETTRONE

LIVELLO DI FERMI: SOTTO I LIVELLI SONO OCCUPATI, SOPRA GLI STATI SONO LIBERI

- SE SI TROVA NELLA BANDA OCCUPABILE:
  DANDO UNA CERTA ENERGIA PICCOLA L'ELETTRONE SALTA IN SOPRA VERSO STATI LIBERI OCCUPABILI (SEMPRE ALL'INTERNO DELLA BANDA)
  => SUCCEDE NEI CONDUTTORI
- SE SI TROVA NEL GAP, LA BANDA SOTTO È TUTTA OCCUPATA E QUELLA SOPRA È LIBERA, È DIFFICILE FAR PASSARE UN ELETTRONE TRA LE DUE BANDE OCCUPABILI POICHÉ DI MEZZO C'È IL GAP, CI SERVE PIÙ ENERGIA
  => SUCCEDE IN I ISOLANTI (GAP GRANDE) E SEMICONDUTTORI (GAP PICCOLO)

I CI INTERESSANO I VALORI ALTI DELLA BANDA DI SOTTO E QUELLI BASSI DI QUELLA DI SOPRA

LA BANDA IMMEDIATAMENTE SOPRA FERMI È LA BANDA DI CONDUCIBILITÀ, QUELLA IMMEDIATAMENTE SOTTO È LA BANDA DI VALENZA

→ A 0 KELVIN VB OCCUPATA, CB LIBERA

=> ACCENDENDO LA TEMPERATURA DA VB SI SALTA A CB, LASCIANDO UN ELETTRONE MANCANTE IN VB OCCUPATA POI DAGLI ELETTRONI VICINI

IN VB => IL "VUOTO" LASCIATO DALLO SPOSTAMENTO SI SPOSTA VERSO IL BASSO, OPPOSTO A QUELLO DEGLI ELETTRONI

=> I "VUOTI" SONO CHIAMATI HOLES (LACUNE), SONO MANCANZE DI ELETTRONI, E QUINDI SI CONSIDERANO COME CARICHE POSITIVE

=> { e^- SI SPOSTANO VERSO CB
HOLES SI SPOSTANO VERSO VB

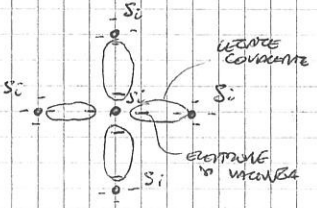
LEGGE DELL'AZIONE DI MASSA: (ALL'EQUILIBRIO)

$$n \cdot p = (n_i)^2 = A_0 T^3 e^{-\frac{E_G}{KT}}$$

(n_i = CONCENTRAZ. INTRINSECA DEL MATERIALE; n = CONCENTRAZ. ELETTRONI BANDA; p = CONCENTRAZIONE VACANZE LACUNE)

NEI SEMICONDUTTORI INTRINSECHI $n = p = n_i$

ES. SILICIO



DATO IL LEGAME COVALENTE, L'ELETTRONE COMPLETAMENTE SE NE VA E LASCIA UN VUOTO FORMANDO LE LACUNE NELLE BANDE

=> CONDUZIONE DOVUTA ALL'ELETTRONE E AI HOLES

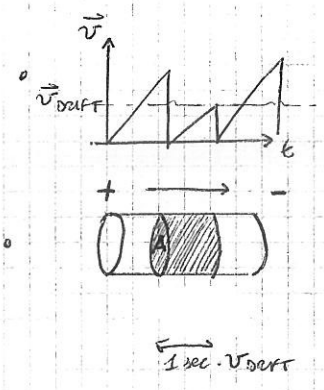
L'ENERGIA DEGLI ELETTRONI AUMENTA VERSO L'ALTO
L'ENERGIA DELLE LACUNE AUMENTA VERSO IL BASSO

NEI SEMICONDUTTORI ABBIAMO 2 CORRENTI

- CORRENTE DI DRIFT (O DI DERIVA)
- CORRENTE DI DIFFUSIONE

NEI METALLI ABBIAMO SOLO LA CORRENTE DI DRIFT

DRIFT: • $\vec{F} = Q\vec{E}$



$\Rightarrow \vec{v}_{DRIFT} = \bar{v}$ (VELOCITÀ MEDIA) $= \mu \cdot \vec{E}$ $\left[\frac{m^2}{Vs}\right]$

$\Rightarrow I_{DRIFT_p} = \frac{Q}{1\,sec} = \frac{v_{DRIFT_p} \cdot 1\,sec \cdot A \cdot p \cdot q}{1\,sec}$ (VOLUME, p DENSITÀ)

$= v_{DRIFT_p} A p q = \boxed{\mu E A p q}$

$\Rightarrow J_{DRIFT_p} = \frac{I_{DRIFT_p}}{A} = \boxed{pq\mu E = \rho_p v_{DRIFT_p}}$

(p LACUNE, n ELETTRONI)

n → CONCENTRAZIONE VOLUMETRICA

$J_{DRIFT_n} = \boxed{nq\mu_n E = \rho_n v_{DRIFT_n}}$

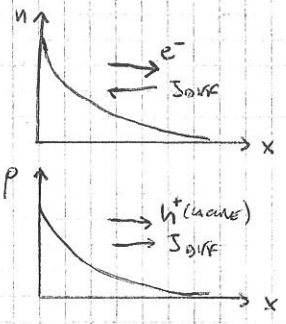
$\Rightarrow J_{DRIFT} = J_{DRIFT_p} + J_{DRIFT_n} = q(p\mu_p + n\mu_n)E$

$= \boxed{\sigma E = \frac{1}{\rho} E}$

02/03

DIFFUSIONE: IL FLUSSO DI PARTICELLE VA DA CONCENTRAZIONE ALTA A CONCENTRAZIONE BASSA

IMMAGINIAMO SOLO LA CORRENTE DI DIFFUSIONE



GLI ELETTRONI SI MUOVONO VERSO Δx A CUI CORRISPONDE $J_{DIFFUSIONE}$ IN VERSO OPPOSTO

$J_{DIFF_n} = q D_n \frac{dn}{dx}$ $\left(\frac{d}{dx}$ NEGATIVA, J NEGATIVA $\Rightarrow$ TOTALE $+\right)$

$J_{DIFF_p} = -q D_p \frac{dp}{dx}$ $\left(\frac{d}{dx}$ NEGATIVA, J POSITIVA $\Rightarrow$ TOTALE $-\right)$

J PIÙ GRANDE QUANTO È GRANDE IL GRADIENTE DELLA DIFFUSIONE

$D: \left[\frac{m^2}{s}\right]$, $q = 1.6 \cdot 10^{-19} C$

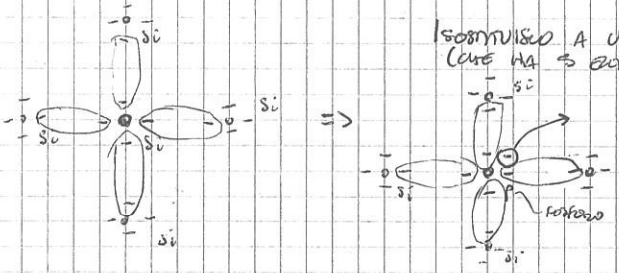
COEFFICIENTE DI DIFFUSIONE DI ELETTRONI/LACUNE > 0

$\Rightarrow$ LA CORRENTE HA QUESTI 2 CONTRIBUTI DOVUTI AL CAMPO E ALLA CONCENTRAZIONE DI DIFFUSIONE

DROGAGGIO DI TIPO n: ALL'EQUILIBRIO: $n \cdot p = n_i^2$ con n_i piccolo!

SI DROGA IL SEMICONDUTTORE, CIOÉ INSERIRE MOLECOLE/ATOMI DIVERSI NELLA STRUTTURA CRISTALLINA, NEL NOSTRO CASO È UN DROGAGGIO DI SOSTITUZIONE, GLI ATOMI CHE SI FANNO A SOSTITUIRE SONO DEL GRUPPO 3 o 5 CHE SOSTITUISCONO IL SILICIO (GRUPPO 4) SENZA MODIFICARE IL GAP E ALTRE CARATTERISTICHE DELL'ENERGIA

DROGAGGIO CON ATOMI DEL GRUPPO 5 È DETTO "DI TIPO n"

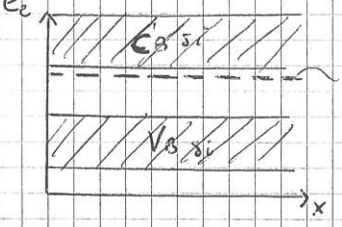


SOSTITUISCO A UN ATOMO DI SILICIO UN ATOMO DI FOSFORO (CHE HA 5 ELETTRONI DI VALENZA)

4 ELETTRONI SONO LEGATI 1 NON È ATTRATTO AD ALTRI ATOMI DI SILICIO, EL. CHE PUÒ GUADAGNARE ENERGIA PER LIBERARSI DELL'ATOMO DI FOSFORO CHE DIVENTA UN ELETTRONE CHE SI SPOSTA NEL RETICOLO E CONTRIBUISCE ALLA CONDUZIONE

=> L'ATOMO DI FOSFORO DIVENTA UNO IONE POSITIVO, ESSENDO UNICO NON FORMA UNA BANDA ENERGETICA

=> SI FORMA UNO IONE POSITIVO FISSO CHE NON DÀ LUOGO A UNA LACUNA



STATI ENERGETICI DEL 5° GRUPPO CHE RIMANGONO LOCALIZZATI (- = POSITIVE PERCHÉ MANCO DEL 5°)

=> VICINO A CB PERCHÉ CI VUOLE POCA ENERGIA PER TOGLIERE L'ELETTRONE DAL P AFFINCHÉ ANDARE NELLA CB DEL Si SENZA CREARE LACUNE

=> CIÒ SI FA A SCAPITO DEI BUCHI DEL SILICIO, CHE SONO DI GRANDEZZA MINORE

=> ANCHE $n > p$ (POICHÉ I BUCHI DEGLI ELETTRONI DEL FOSFORO NON CREANO LACUNE)

NELL'EQUILIBRIO $n \cdot p = n_i^2$

=> GLI ATOMI DROGANTI DEL GRUPPO 5 SONO DETTI DONATORI

(300 K) A TEMPERATURA AMBIENTE (E VICINI) L'ENERGIA TERMICA È SUFFICIENTE PER FAR LIBERARE IL 5° ELETTRONE FACENDO DIVENTARE IL DONATORE UNO IONE POSITIVO

- $n \simeq N_D$
  - n: CONCENTRAZIONE DI ELETTRONI LIBERI DI CONDURRE
  - N_D: CONCENTRAZIONE VOLUMETRICA DEGLI ATOMI DONATORI

  POICHÉ SONO TUTTI IONIZZATI I BUCHI DEL 4° GRUPPO
  => AVRÒ UNA CONCENTRAZIONE MAGGIORE DEGLI ORIGINALI
  $N_D <$ CONCENTRAZIONE SILICIO
  $N_D > n_i$ DEI SEMICONDUTTORI INTRINSECI

- $p \simeq \frac{n_i^2}{N_D}$ POICHÉ VALE LA LEGGE DI AZIONE DI MASSA, p PIÙ BASSO DI n_i