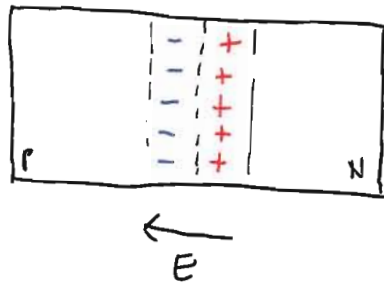


2020/11/9

GIUNZIONE PN: CARATTERISTICHE CORRENTE - TENSIONE (I-V)

Riassunto...



- ① ALL'EQUILIBRIO, IL CAMPO ELETTRICO ALLA GIUNZIONE CONTROBILANCIA LA TENDENZA DEI PORTATORI (LACUNE IN P ED ELETTRONI IN N) ALLA DIFFUSIONE

- ② LA CADUTA DI POTENZIALE SULLA REGIONE DI CARICA SPAZIALE, V_0 , È DATA DA

$$V_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2}$$

n_i = CONCENTRAZIONE DI PORTATORI INTRINSECI

k = COSTANTE DI BOLZMANN

T = TEMPERATURA ASSOLUTA

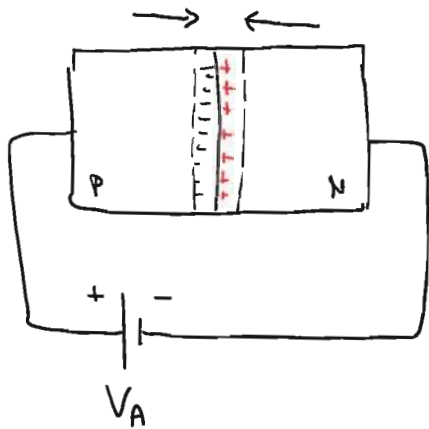
- ③ DATO CHE (MAXWELL BOLZMANN) $n = n_i \exp\left(\frac{q\phi}{kT}\right)$ LA CONCENTRAZIONE DI ELETTRONI TRA LE DUE REGIONI

DIPENDE DA $\exp \frac{qV_0}{kT}$:

$$\begin{aligned} e^- \text{ in N} &\rightarrow \frac{N_D}{n_{p0}} = \exp \frac{qV_0}{kT}; \\ e^- \text{ in P} &\rightarrow n_{p0} \end{aligned}$$

V_0 viene anche indicato come $\phi_c, \phi_{bi} \dots$

"POTENZIALE INTRINSECO DELLA GIUNZIONE"



④ SE APPLICO UNA TENSIONE V_A POSITIVA
"POLARIZZAZIONE DIRETTA"

→ la regione di carica spaziale SI STRINGE

→ il campo elettrico che contrasta la diffusione CALA

→ il potenziale alla giunzione passa da V_0 a $V_0 - V_A$

⑤ IL POTENZIALE È ORA INSUFFICIENTE A
BLOCCARE LA DIFFUSIONE

nel disegno trascuro la RCS, che non mi serve più

lacune
~~~~~>

$$p_n = p_{n0} \exp\left(\frac{qV_A}{kT}\right)$$

con  $V_A > 0$

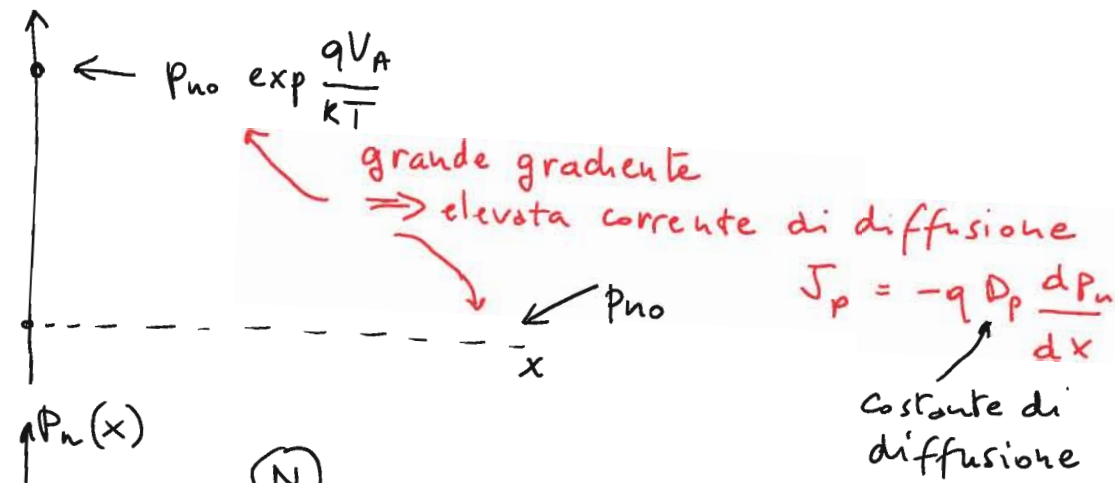
⑥ LA CONCENTRAZIONE DI PORTATORI "INIETTATI"  
CRESCIE ESPONENZIALMENTE CON  $V_A$

$$p_{n0} = \frac{n_i^2}{N_D} \quad (\text{legge di azione di massa})$$

concentrazione di equilibrio

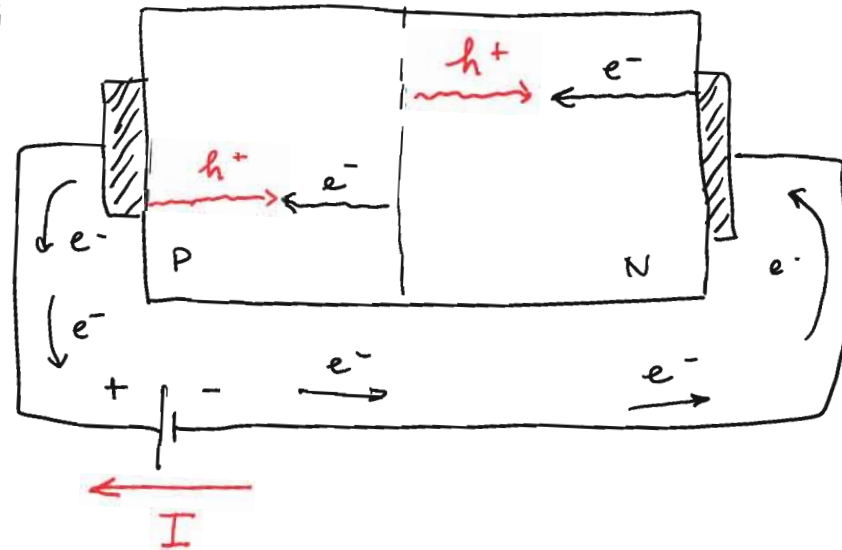
Ⓟ

Ⓝ



(N)  
LE LACUNE  
DIFFONDONO NELLA ZONA N  
E RICOMBINANO CON  
ELETTRONI

Gli elettroni iniettati (raccolti)  
dai contatti alimentano  
indefinitamente la corrente  
CORRENTE DIRETTA



## CORRENTE DIRETTA DEL DIODO

→ è dovuta alla DIFFUSIONE DI PORTATORI MAGGIORITARI  
ELETTRONI DA N A P  
LACUNE DA P A N

è determinata dalla DIFFUSIONE + RICOMBINAZIONE

$$J \cdot A = q n_i^2 A \left( \frac{D_n}{N_A L_n} + \frac{D_p}{N_D L_p} \right) \left( \exp \frac{qV_A}{kT} - 1 \right)$$

↑  
DENSITÀ  
DI CORRENTE

AREA  
DELLA SEZIONE  
DEL DIODO

$I_s$

$D_n$  costanti di elettroni  
 $D_p$  diffusione lacune

$L_p$  "lunghezza di diffusione" (lacune): LA DISTANZA PERCORSA IN MEDIA  
PRIMA DI RICOMBINARSI

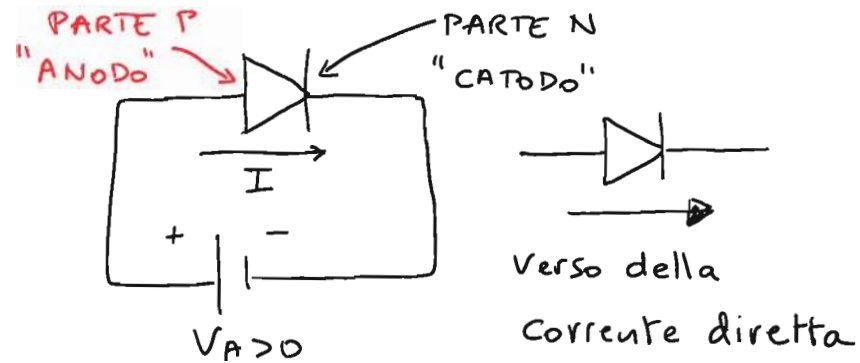
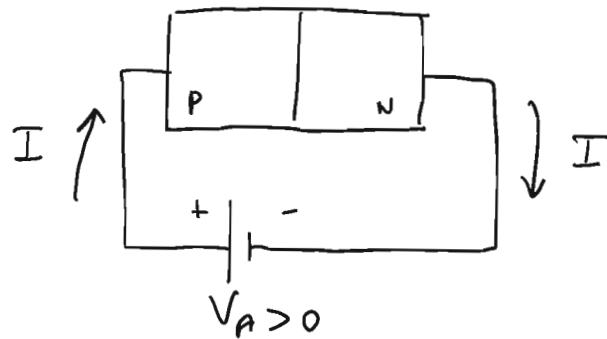
$$I = q n_i^2 A \left( \frac{D_p}{N_D L_p} + \frac{D_n}{N_A L_n} \right) \left[ \exp\left(\frac{q V_A}{k T}\right) - 1 \right]$$

"diffondono" (pointing to  $D_p$ )

"ricombinano" (pointing to  $N_D L_p$ )

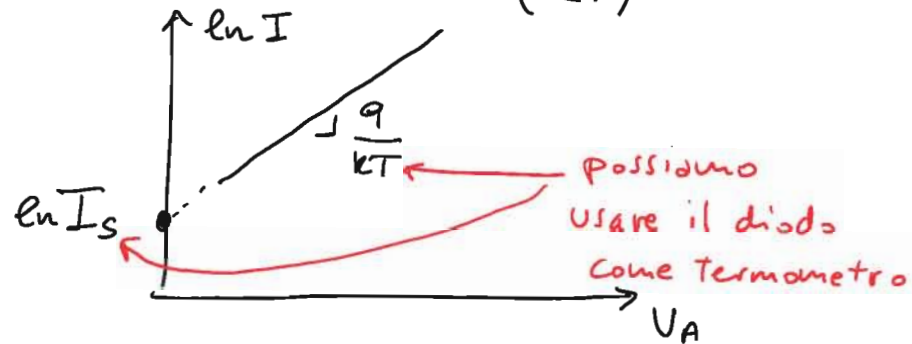
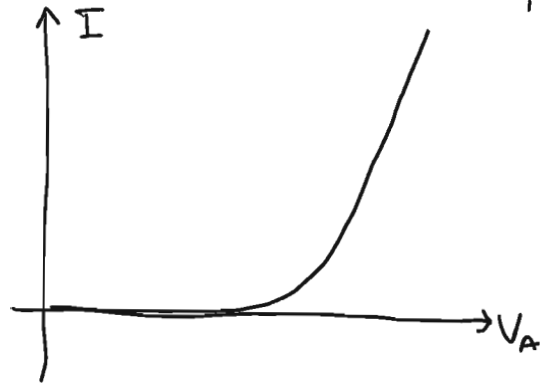
$$I = I_s \left[ \exp\left(\frac{q V_A}{k T}\right) - 1 \right]$$

$I_s$  = "corrente di saturazione" del diodo

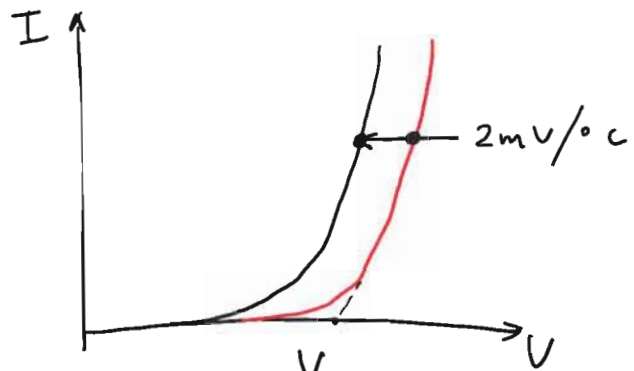


$$I = I_s \left[ \exp\left(\frac{qV_A}{kT}\right) - 1 \right] \quad \frac{kT}{q} \approx 26 \text{ mV}$$

quando  $V_A > 3 \div 4 \frac{kT}{q} \sim 100 \text{ mV}$   $I \approx I_s \exp\left(\frac{qV_A}{kT}\right)$

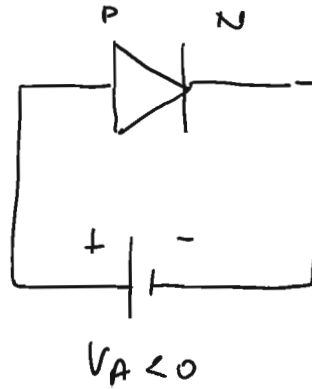
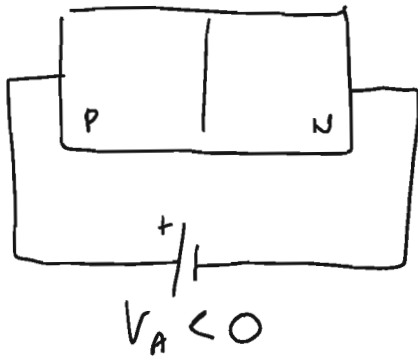


La caratteristica  $I$ - $V$  diretta del diodo è all'incirca  
ESPONENZIALE



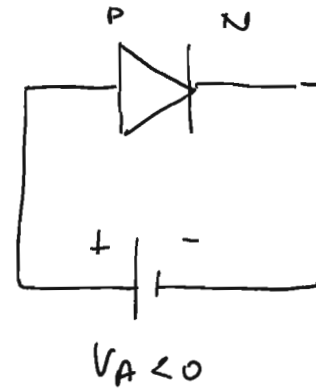
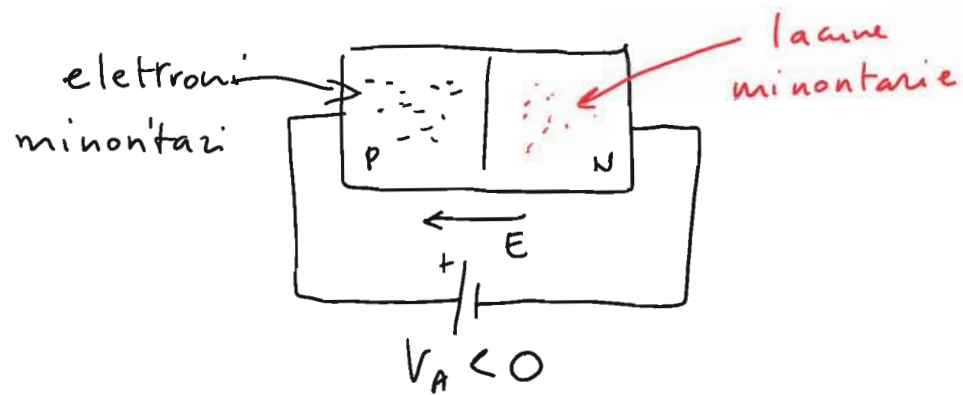
$V_d$  "TENSIONE DI GINOCCHIO"  
KNEE-VOLTAGE

e in INVERSA?



Parte P  
negativa rispetto  
alla parte N

e in INVERSA?

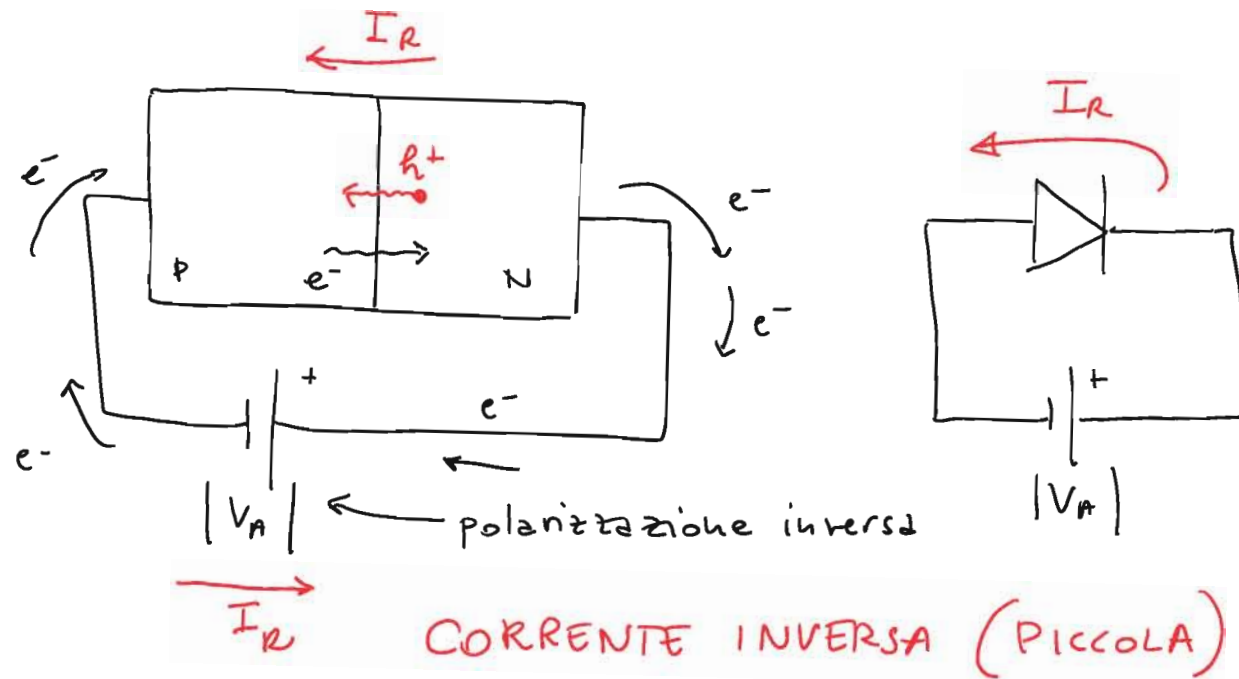


IL CAMPO ELETTRICO CRESCE, LA RCS SI ALLARGA, IL POTENZIALE ALLA GIUNZIONE AUMENTA:  $V_0 \rightarrow V_0 - V_A$  ( $V_A < 0$ )

LA DIFFUSIONE DI MAGGIORITARI E' ULTERIORMENTE BLOCCATA

I PORTATORI MINORITARI VENGONO RACCOLTI DAL CAMPO ELETTRICO E INIETTATI OLTRE LA GIUNZIONE; IL GENERATORE  $V_A$  PUO' ALIMENTARE QUESTO FLUSSO





IL DIODO È UN ELEMENTO RETTIFICANTE

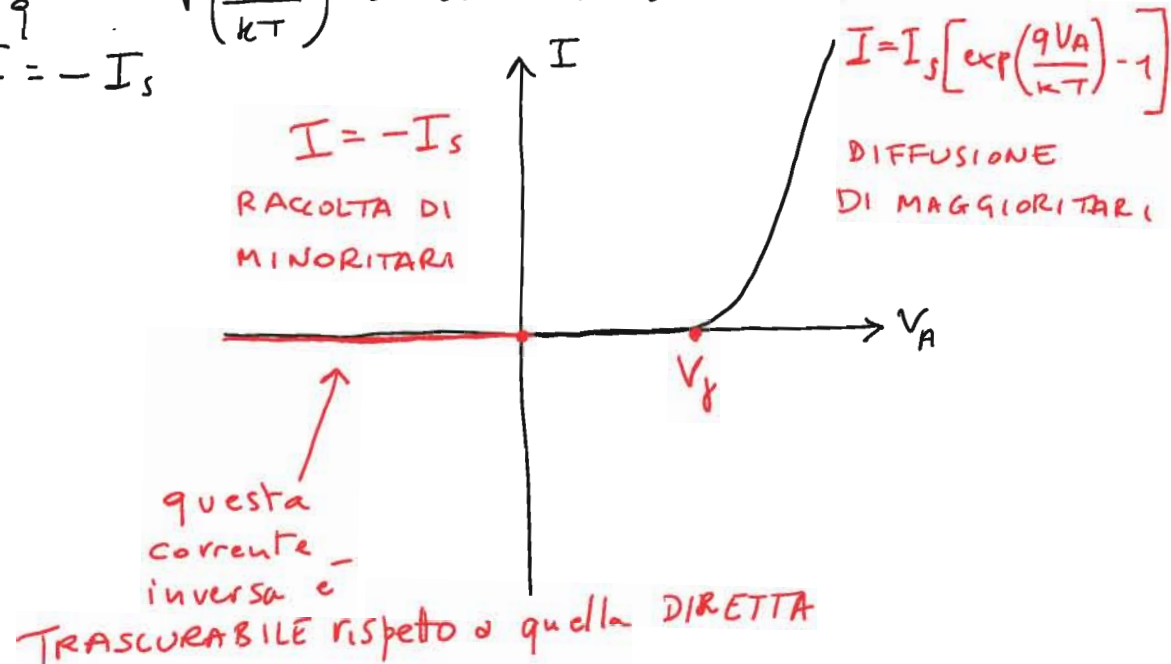
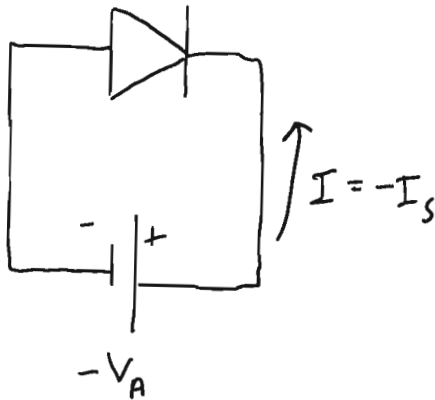
\* CORRENTE DIRETTA GRANDE

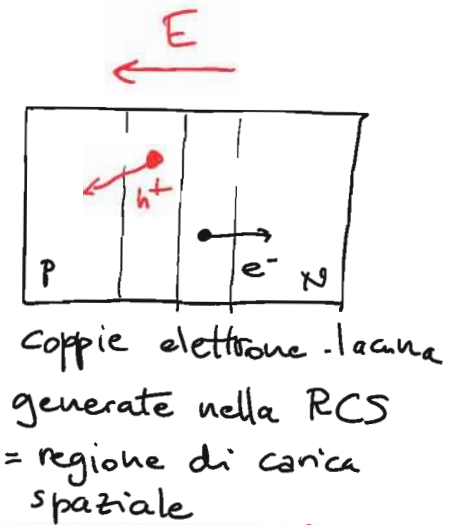
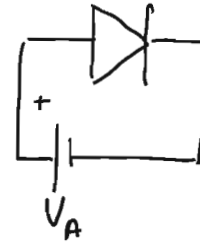
\* CORRENTE INVERSA TRASCURABILE  
(FINO AL BREAKDOWN)

PER LA CORRENTE INVERSA VALE LA STESSA LEGGE GIÀ VISTA !!!

$$I = I_s \left[ \exp\left(\frac{qV_A}{kT}\right) - 1 \right]$$

$V_A < 0$ ; se  $|V_A| > 3 \frac{kT}{q}$   $\exp\left(\frac{qV_A}{kT}\right)$  DIVENTA TRASCURABILE  
RISPETTO A 1 :  $I = -I_s$



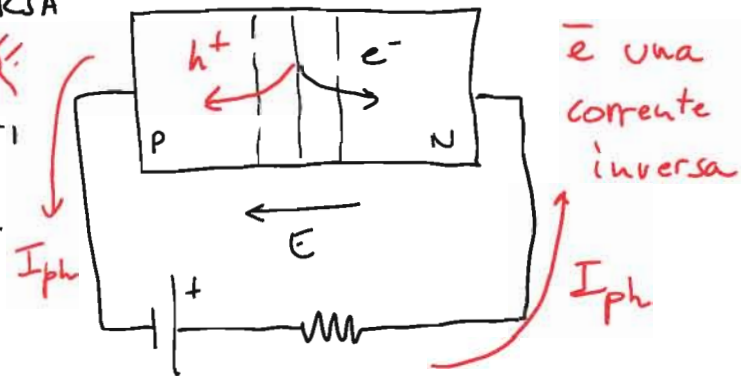
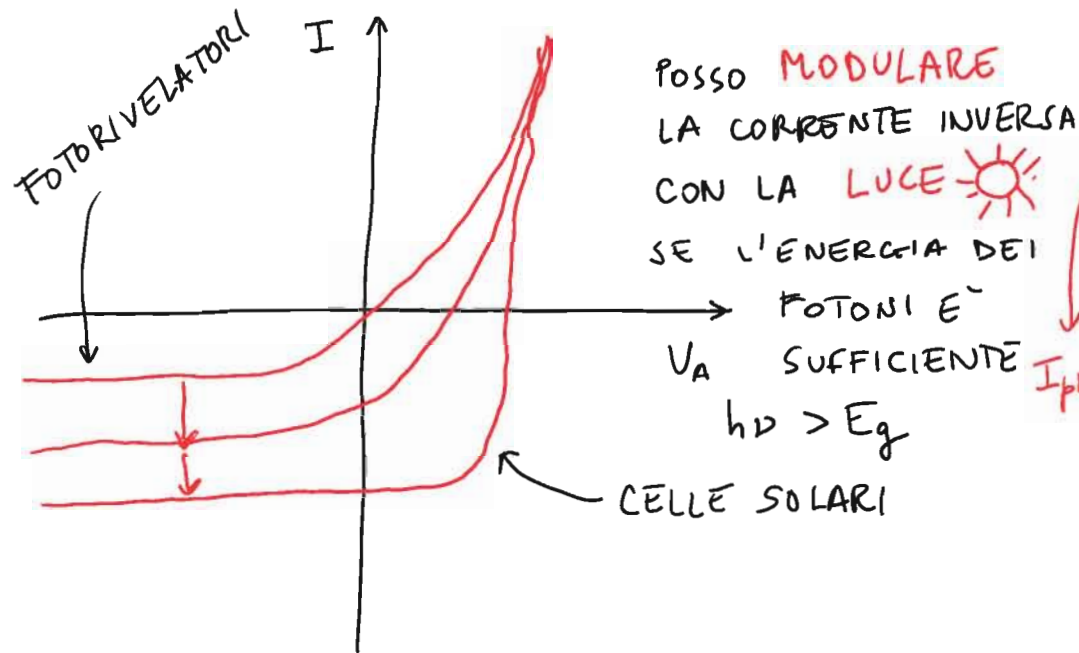
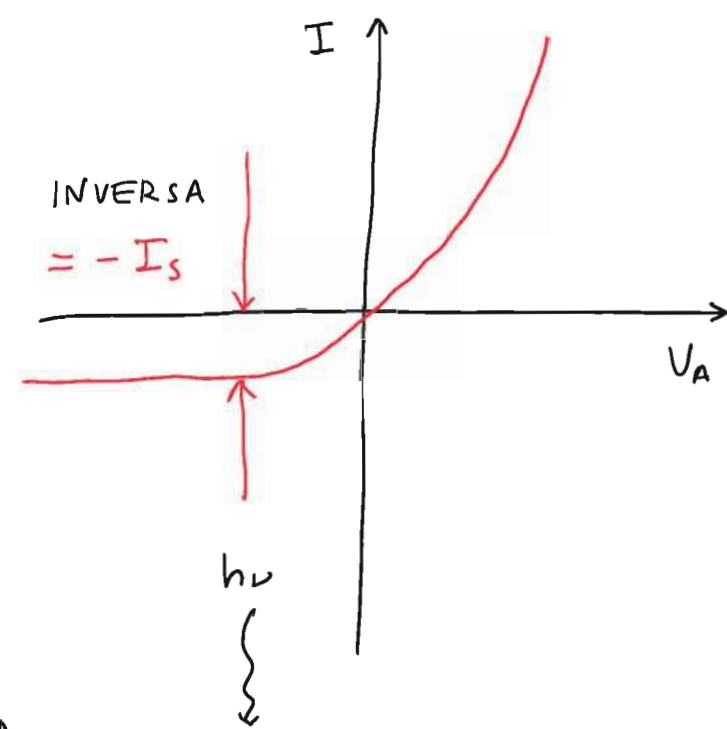
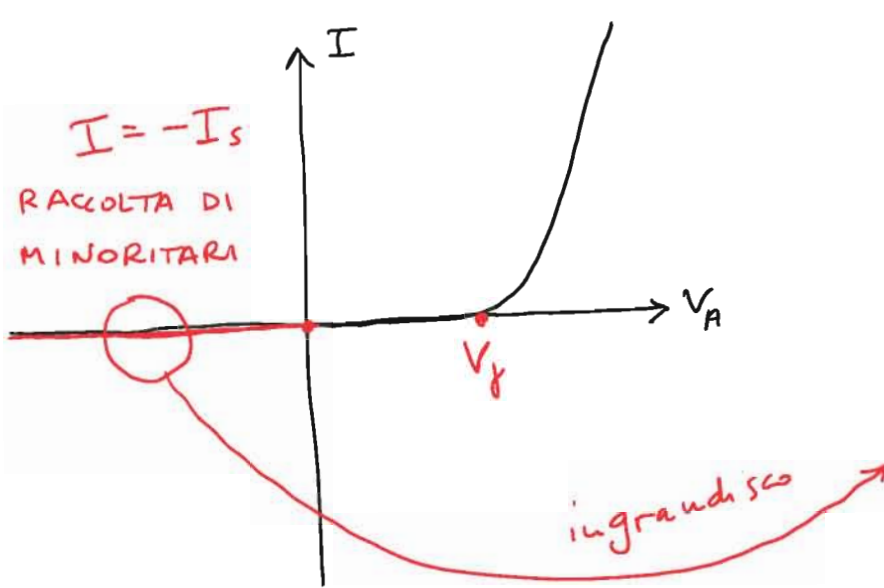


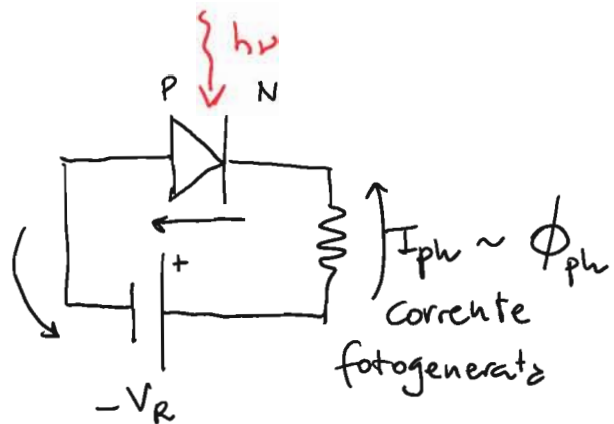
- LA CARATTERISTICA DI BREAKDOWN È PRATICAMENTE VERTICALE  
LA USEREMO PER FARE

### REGOLATORI DI TENSIONE

IL DIODO TORNA AD ESSERE CONDUTTIVO ANCHE IN INVERSA

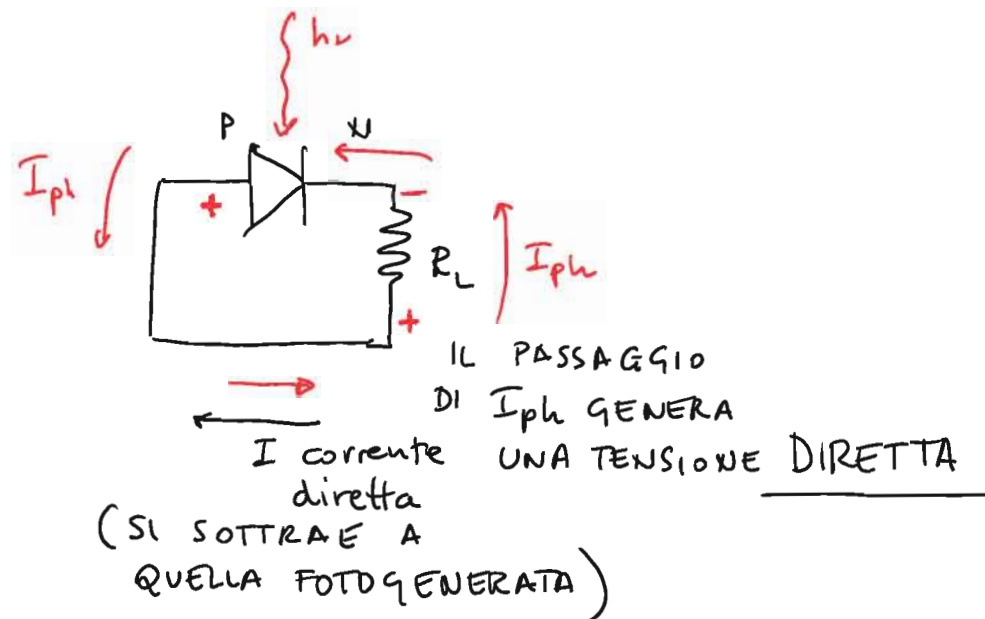
- EFFETTO ZENER : il campo elettrico ionizza direttamente il Si e crea coppie  $e^-h^+$  nella regione di carica spaziale
- IONIZZAZIONE DA IMPATTO o VALANGA : gli elettroni accelerati da  $\vec{E}$  urtano contro il reticolo e creano coppie  $e^-h^+$  che vengono accelerate → creano altre → REAZIONE A CATENA



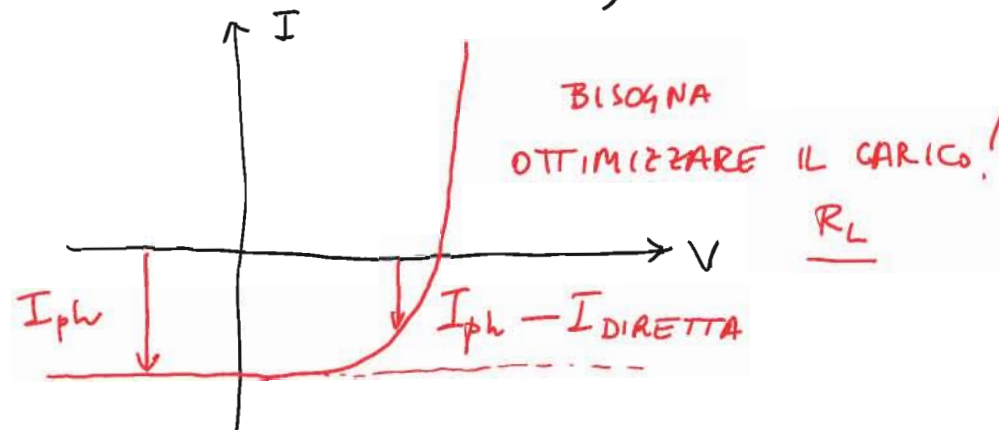


FOTORIVELATORE

$h\nu = \text{ENERGIA DEL FOTONE}$   
 $h = \text{COSTANTE DI PLANCK}$   
 $\nu = \text{FREQUENZA DELLA LUCE}$

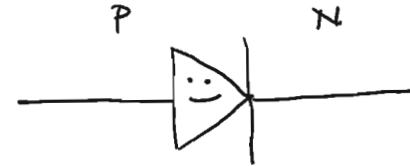


(SI SOTTRA E A QUELLA FOTOGENERATA)



## DIODO A GIUNZIONE PN

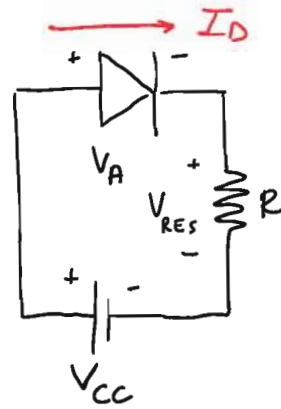
- ELEMENTO RETTIFICANTE (DIRETTA - INVERSA)
  - REGOLATORE DI TENSIONE (BREAKDOWN)
  - FOTORIVELATORE (INVERSA)
  - CELLA SOLARE (EFFETTO FOTOVOLTAICO SUL CARICO)
  - DIODO EMETTITORE DI LUCE (DIRETTA)
  - DIODO LASER (DIRETTA, CON CAVITÀ RISONANTE OTTICA)
  - ISOLAMENTO NEI CIRCUITI INTEGRATI (INVERSA)
- e ... prima di tutto questo
- ELEMENTO BASE DEI TRANSISTOR "BIPOLARI" (1948)



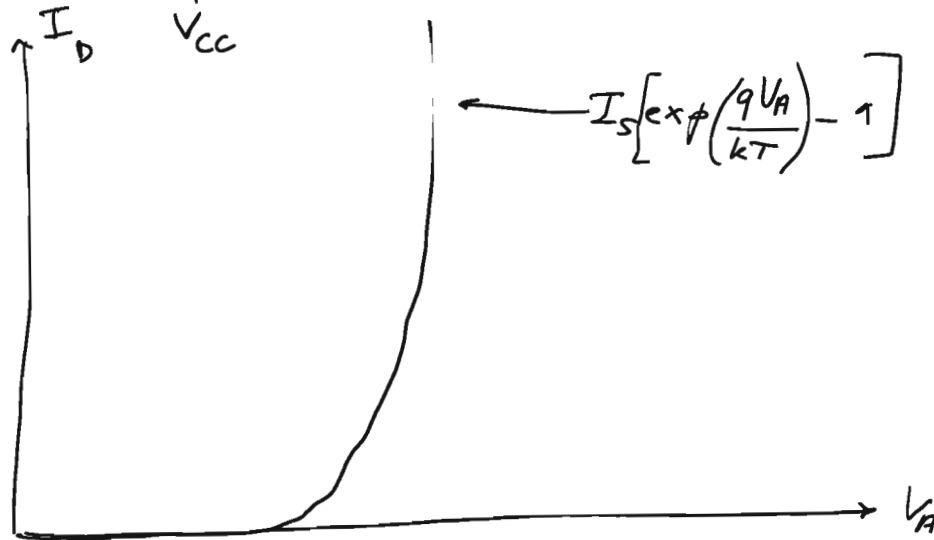
PROBLEMA : ora abbiamo un elemento NON LINEARE : come studio il suo comportamento ?

$$I = I_s \left[ \exp\left(\frac{qV_A}{kT}\right) - 1 \right]$$

PRIMO MODELLO (ESATTO) :  
FORMA GRAFICA  
"RETTELLA DI CARICO"



Come posso calcolare  
la CORRENTE data  
una certa tensione  
 $V_{CC}$  ?



Nel circuito

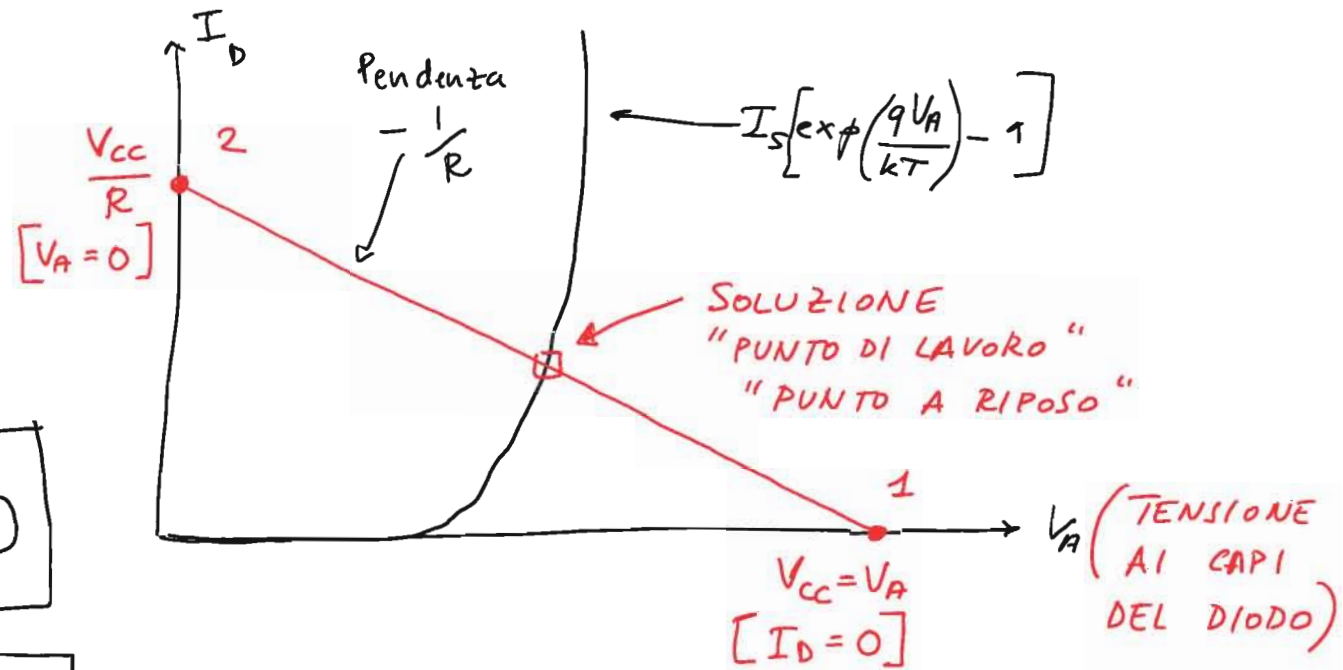
$$V_{CC} = V_A + V_{RES}$$
$$= V_A + I_D \cdot R$$

h.p.  $I_D = 0$  PUNTO (1)

$$V_{CC} = V_A$$

$$V_A = 0$$
$$V_{CC} = I_D \cdot R \Rightarrow I_D = \frac{V_{CC}}{R}$$

PUNTO (2)

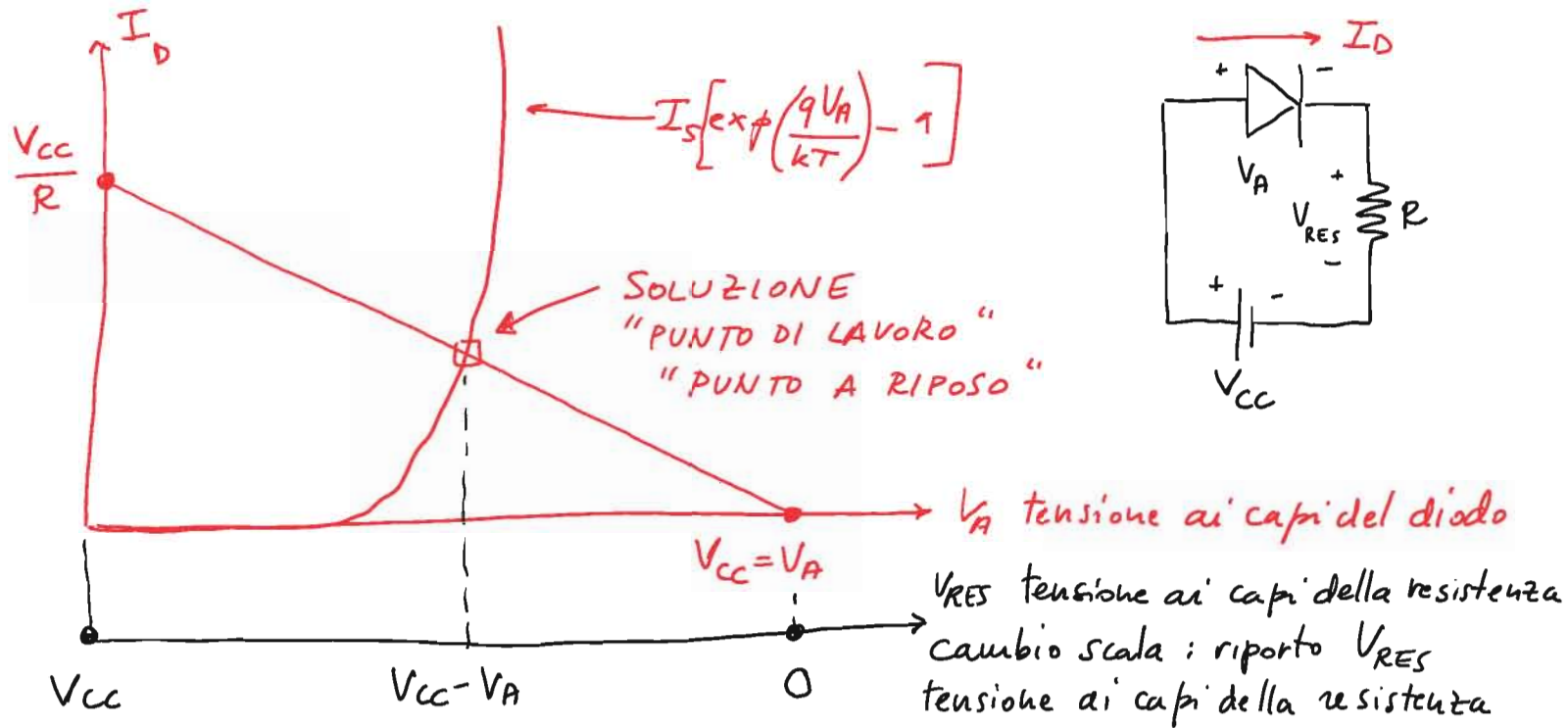


La retta di carico è definita da  $I_D = \frac{V_{CC} - V_A}{R}$

Il punto di intersezione è la soluzione del sistema

$$\begin{cases} I_D = I_S \left[ \exp\left(\frac{qV_A}{kT}\right) - 1 \right] \\ I_D = \frac{V_{CC} - V_A}{R} \end{cases}$$

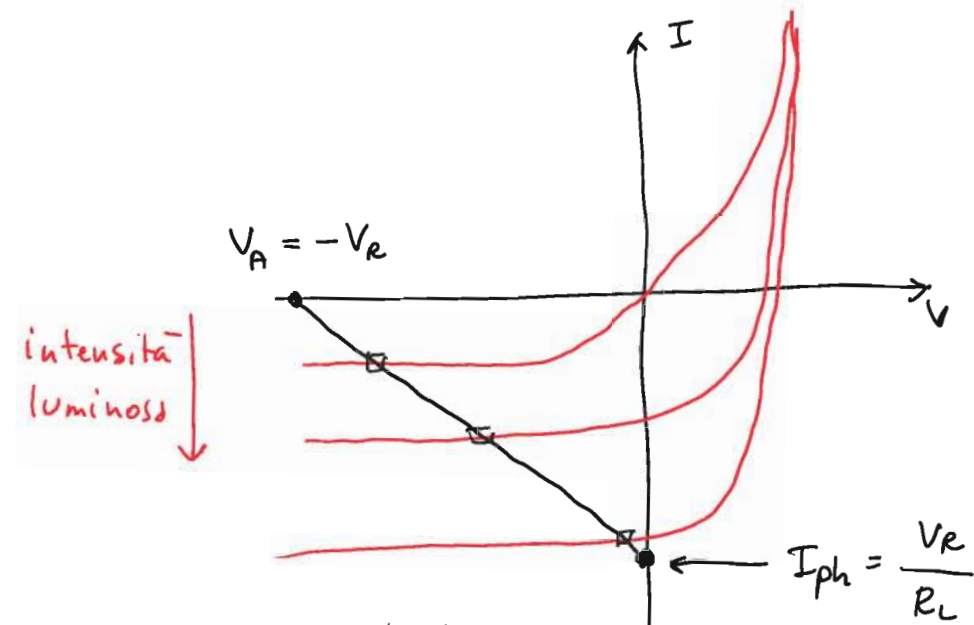
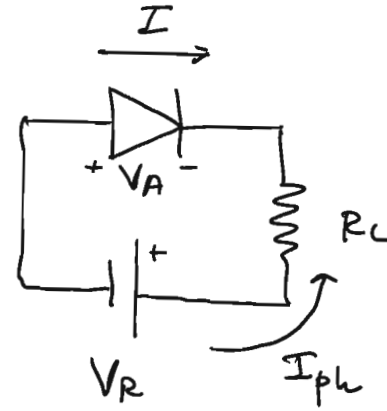




Per il valore soluzione, la corrente nel diodo e nella resistenza è la stessa.

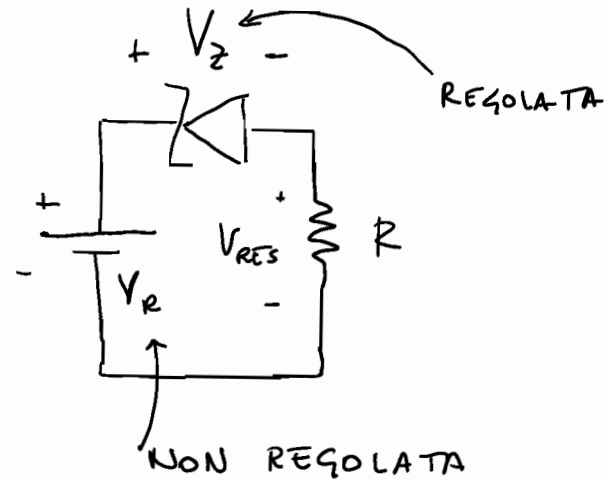
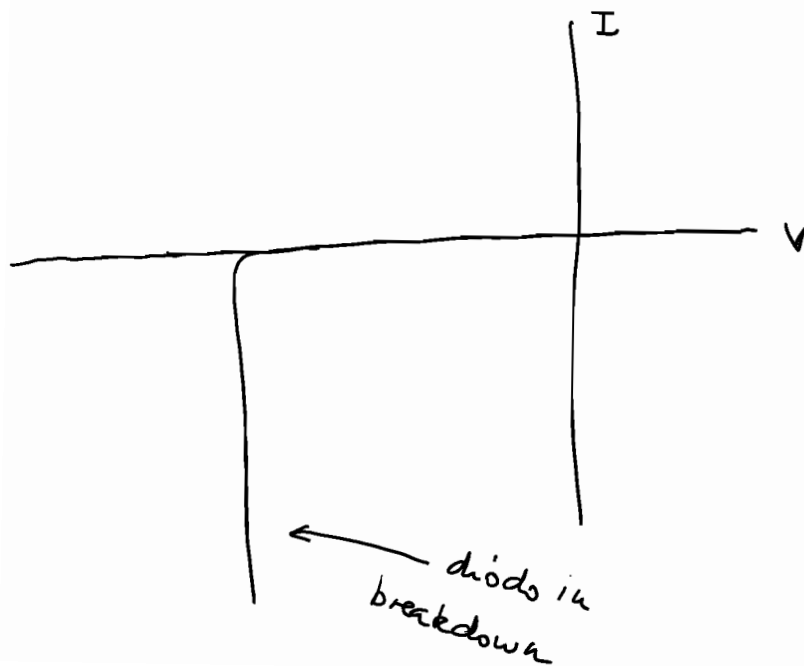
Il concetto di "RETTA DI CARICO" vale sempre quando ci sono due elementi in serie che si dividono una tensione:

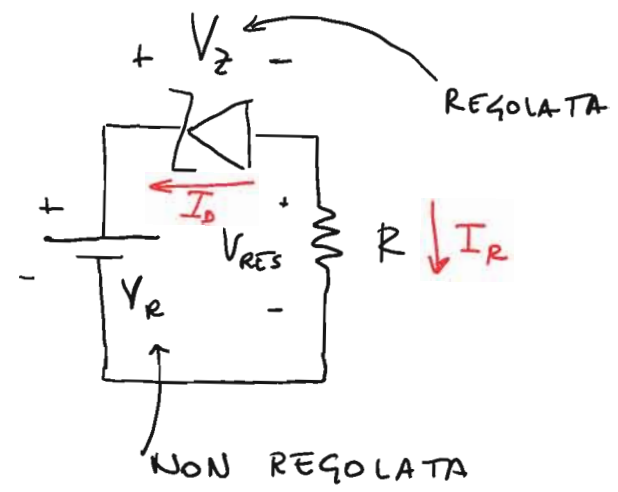
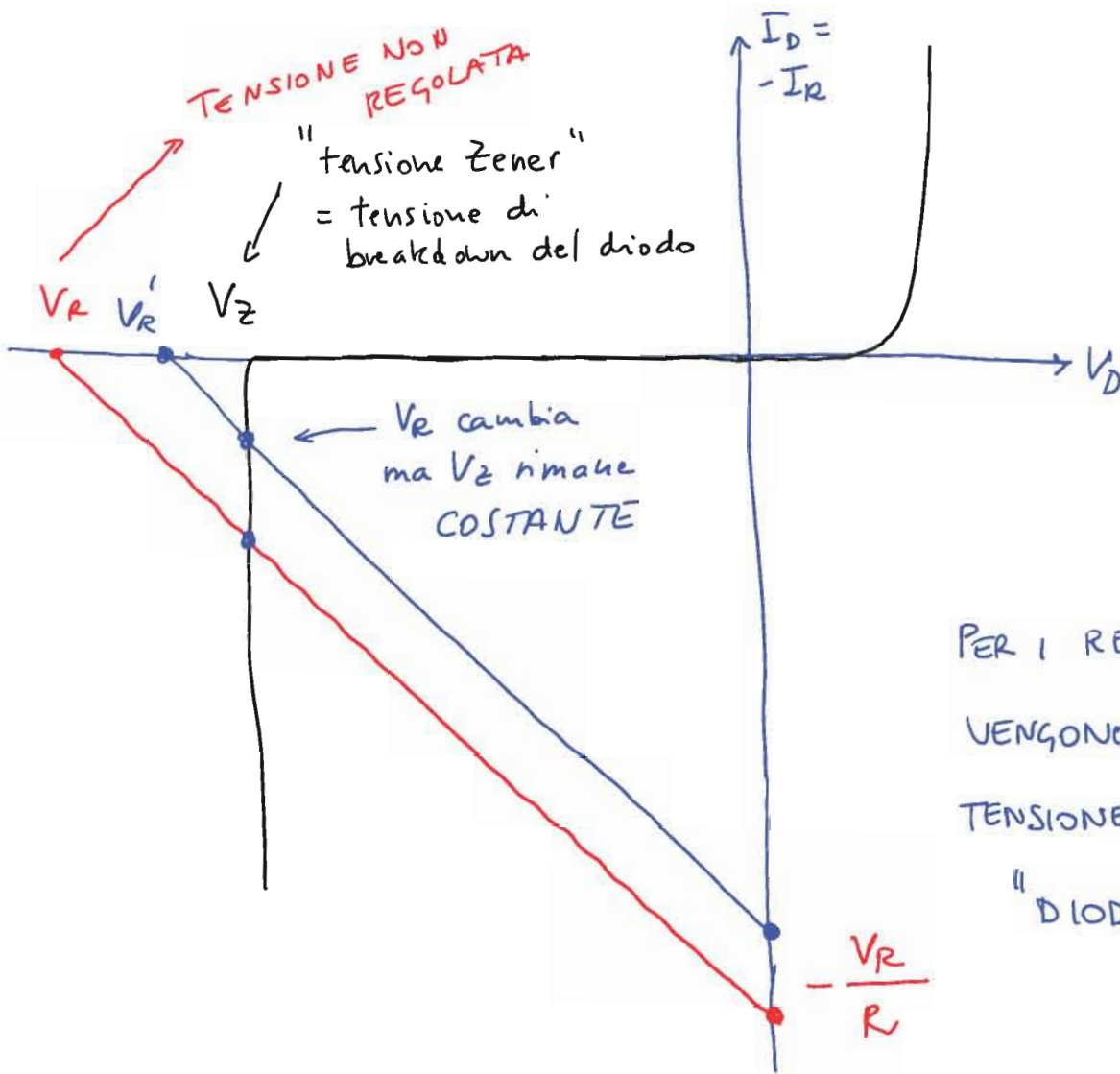
es. FOTORELLEVATORE




I vari punti di lavoro corrispondono a diversi livelli di illuminazione

RETTEA DI CARICO : sfrutto la caratteristica verticale del diodo  
in BREAKDOWN per realizzare un REGOLATORE DI TENSIONE  
= una sorgente di tensione costante indipendente dalla corrente  
e dalle variazioni della tensione in ingresso

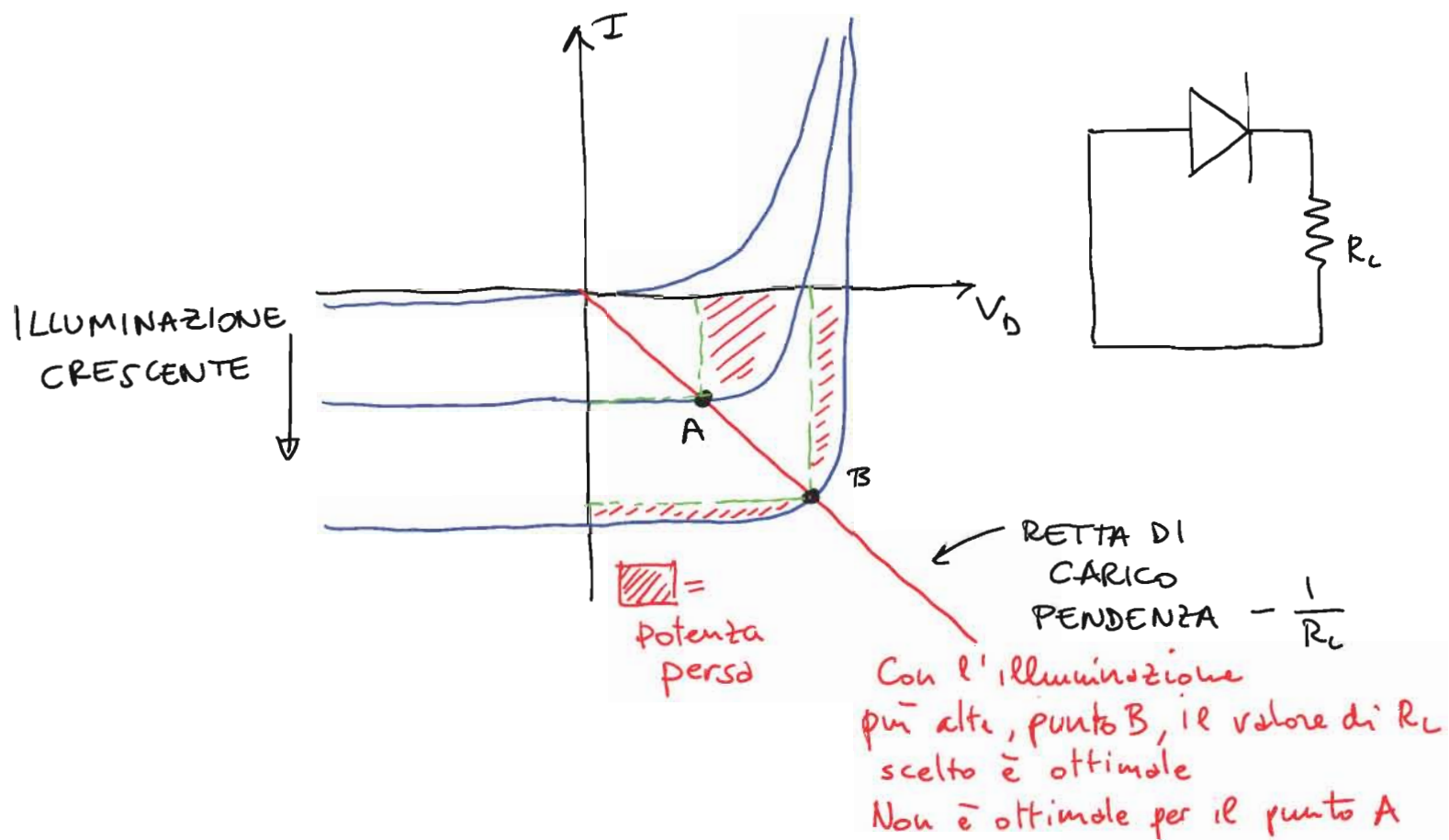




PER I REGOLATORI DI TENSIONE  
 VENGONO COSTRUITI DIODI CON  
 TENSIONE DI BREAKDOWN DEFINITA

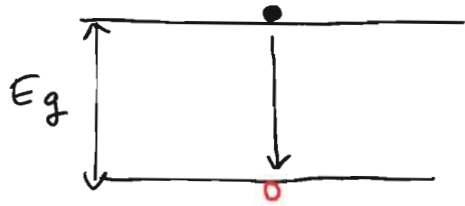
"DIODI ZENER"   
 Z!

# RETTE DI CARICO SU UNA CELLA SOLARE



NUOVO DISPOSITIVO:

## DIODO EMETTITORE DI LUCE LIGHT EMITTING DIODE (LED)



nel processo di ricombinazione  
elettrone e lacuna scompaiono come  
portatori liberi  
e viene resa disponibile energia  
di valore pari a  $E_g$

\* in silicio (Si) è più probabile che questa energia  
venga dissipata sotto forma di energia termica

\* nei semiconduttori composti  $\text{III-V}$  è altamente  
probabile che l'energia venga usata per generare un  
fotone con energia

$$h\nu = E_g$$

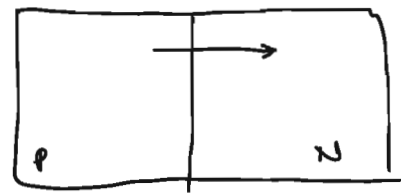
Cambiando materiale si può  
generare luce con diversa  
lunghezza d'onda  $\nu = \frac{c}{\lambda}$

"RICOMBINAZIONE  
RADIATIVA"

La probabilità di radiazione è proporzionale al prodotto  $u(x)p(x)$

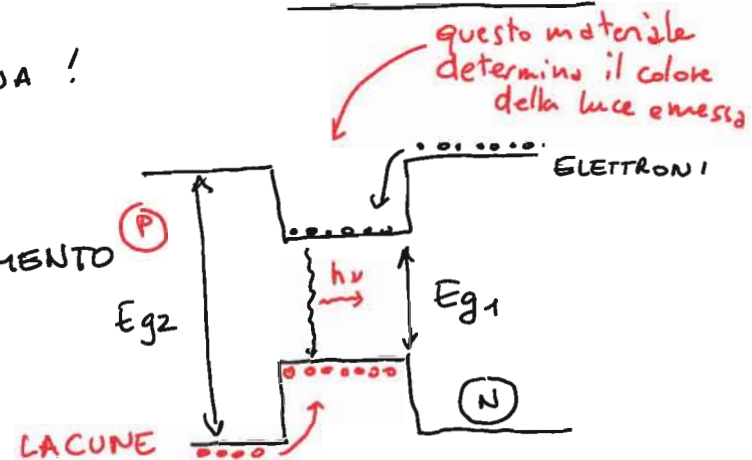
lacune ed elettroni devono essere simultaneamente presenti nella stessa regione

⇒ UN DIODO CONVENZIONALE NON FUNZIONA !



grande volume  
di ricombinazione  
⇒ probabilità BASSA

!  
CONFINAMENTO



Si usano materiali  
a ENERGY GAP DIVERSO !

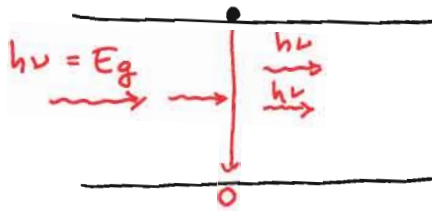
"ETEROGIUNZIONE"

CONFINA ELETTRONI E  
LACUNE IN UNA "BUCA  
QUANTICA"

# LASER

## LIGHT AMPLIFICATION BY STIMULATED EMISSION OF RADIATION

"AMPLIFICAZIONE OTTICA"



EMISSIONE STIMOLATA

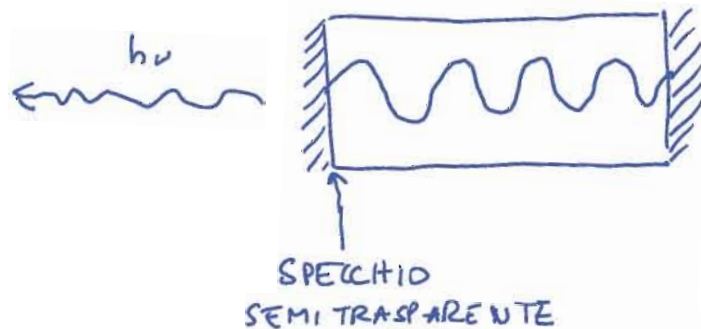
UN FOTONE CON  $E = h\nu = E_g$

PUÒ "FORZARE" UNA COPPIA

$e^- - h^+$  A RICOMBINARE

DA UN FOTONE NE OTTENIAMO 2,

CON LA STESSA LUNGHEZZA D'ONDA E FASE



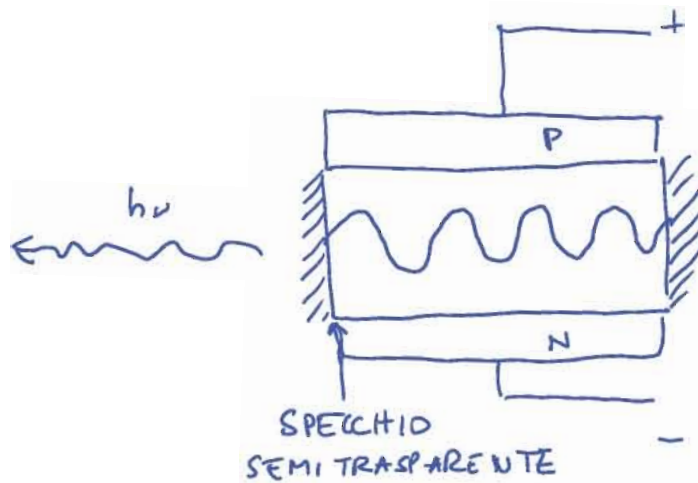
FABBRICO UNA CAVITÀ CON DUE SPECCHI

E CREO UN'INTERFERENZA COSTRUTTIVA

AD OGNI PASSAGGIO L'ONDA SI

"AMPLIFICA" (AUMENTA IL NUMERO DI FOTONI)





AD OGNI PASSAGGIO L'ONDA SI  
"AMPLIFICA" (AUMENTA IL NUMERO DI  
FOTONI)

RIMPIAZZO LE LACUNE E GLI  
ELETTRONI CON UNA GIUNZIONE PN  
POLARIZZATA IN DIRETTA,