

Giunzione p-n :

riassunto delle proprietà fisiche
e applicazioni

ARGOMENTI DELLA LEZIONE

1. riassunto della fisica della giunzione p-n
questa sezione ha come obiettivo elencare i risultati essenziali relativi al funzionamento della giunzione p-n, in vista della prossima prova parziale
2. dispositivi optoelettronici basati sulla giunzione p-n e loro applicazioni
 - Fotorivelatori: comunicazioni su fibra ottica, sensori)
 - Celle solari
 - Light Emitting Diodes (LED): display, illuminazione, sensori, telecomandi, sistemi UV di purificazione dell'acqua
 - Laser a semiconduttore (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation): comunicazioni su fibra ottica, scrittura/lettura CD, DVD, BluRay, radar ottico per guida autonoma

ARGOMENTI DELLA LEZIONE

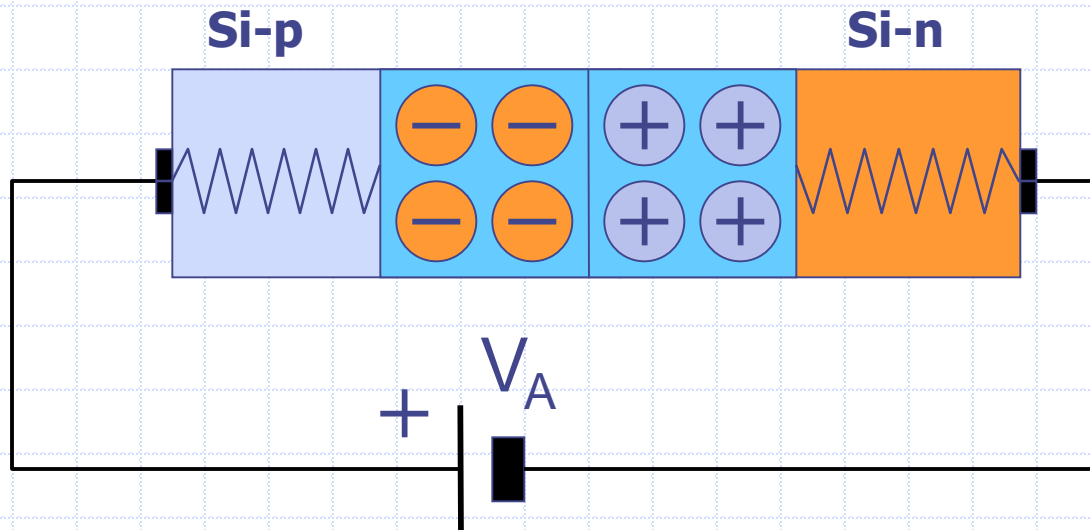
3. applicazioni convenzionali della giunzione p-n: rettificazione (alimentatori); rivelazione (demodulazione di segnali modulati in ampiezza); limitazione della tensione (protezione di circuiti elettronici); stabilizzazione della tensione (diodi «Zener» polarizzati in breakdown)

Giunzione *pn* polarizzata

Ipotesi semplificate:

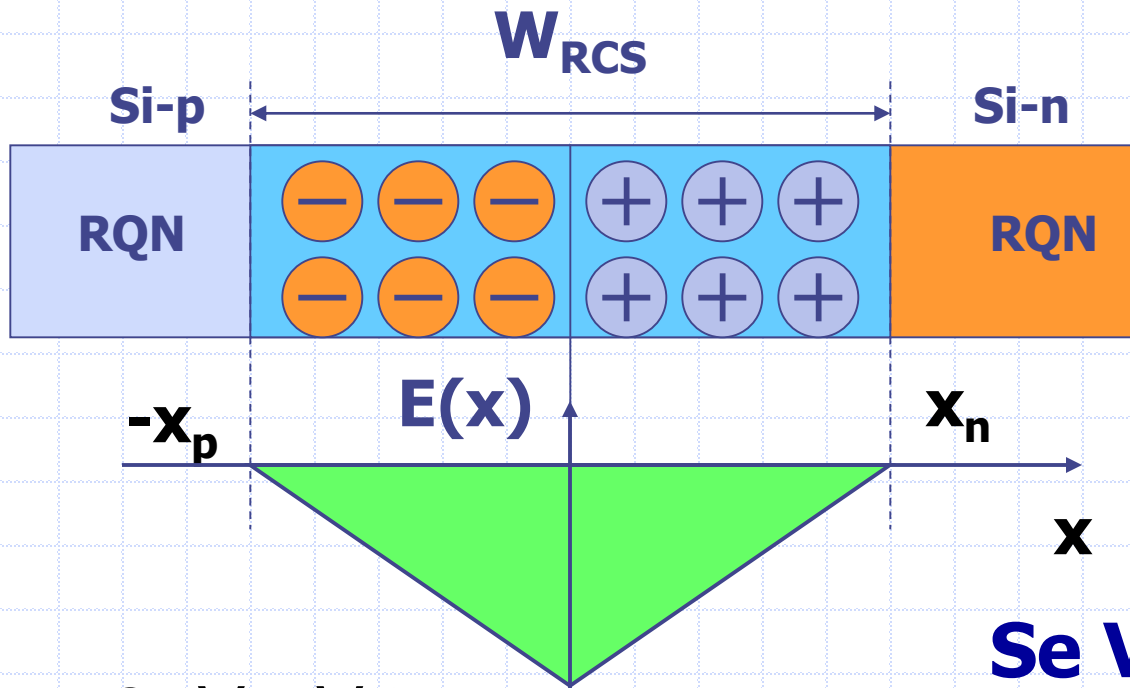
- Approssimazione di svuotamento
- Cadute di tensione trascurabili sui contatti e RQN
- Deboli correnti (bassa iniezione)

**La tensione applicata V_A cade tutta alla giunzione.
La tensione sulla giunzione diventa $V_0 - V_A$.**



$$V_0 \rightleftharpoons V_0 - V_A$$

**Nota: positivo a p
negativo a n**



$$|E(0)| = \frac{2(V_0 - V_A)}{W_{dep}}$$

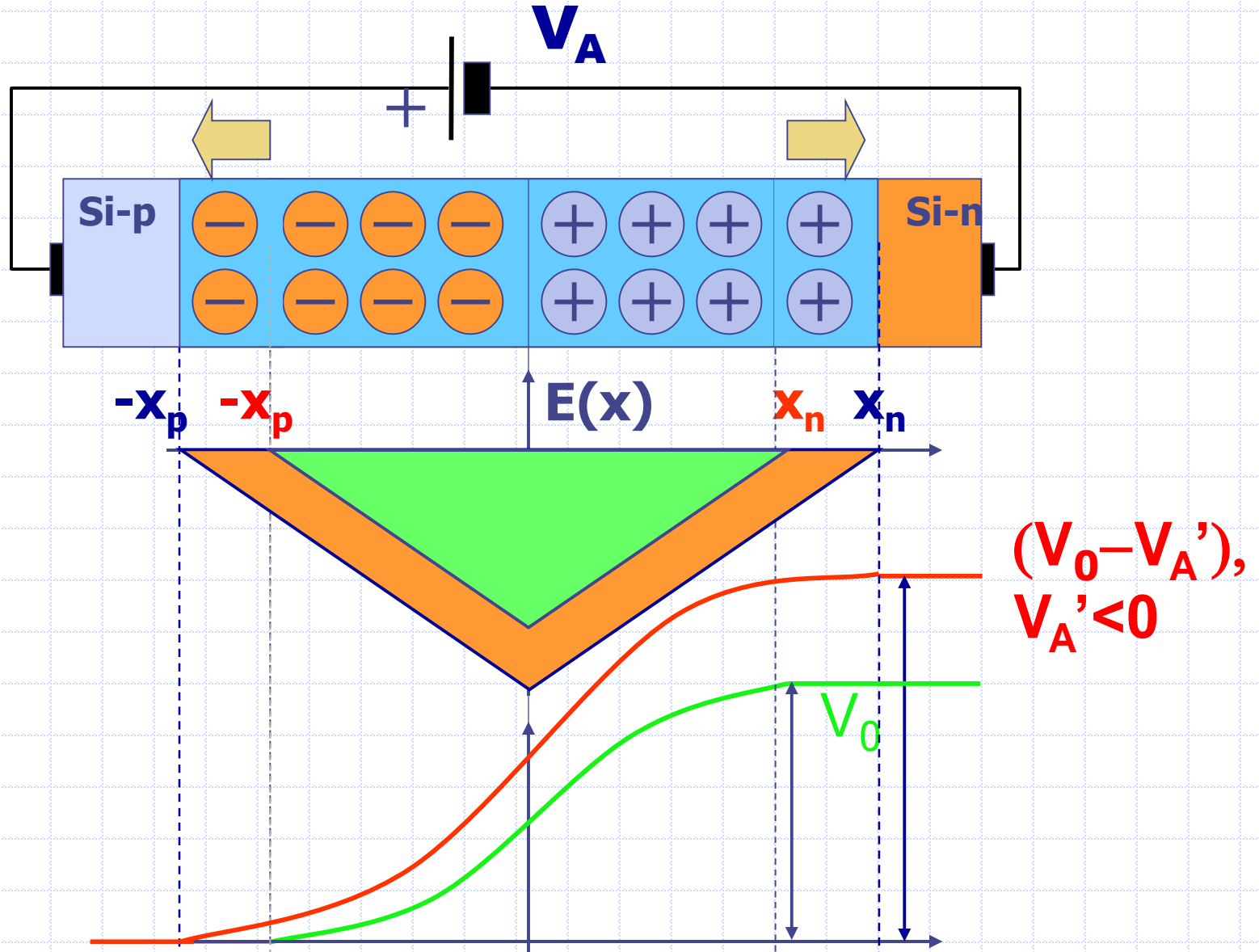
$$W_{dep} = x_p + x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (V_0 - V_A)}$$

Se V_A aumenta:

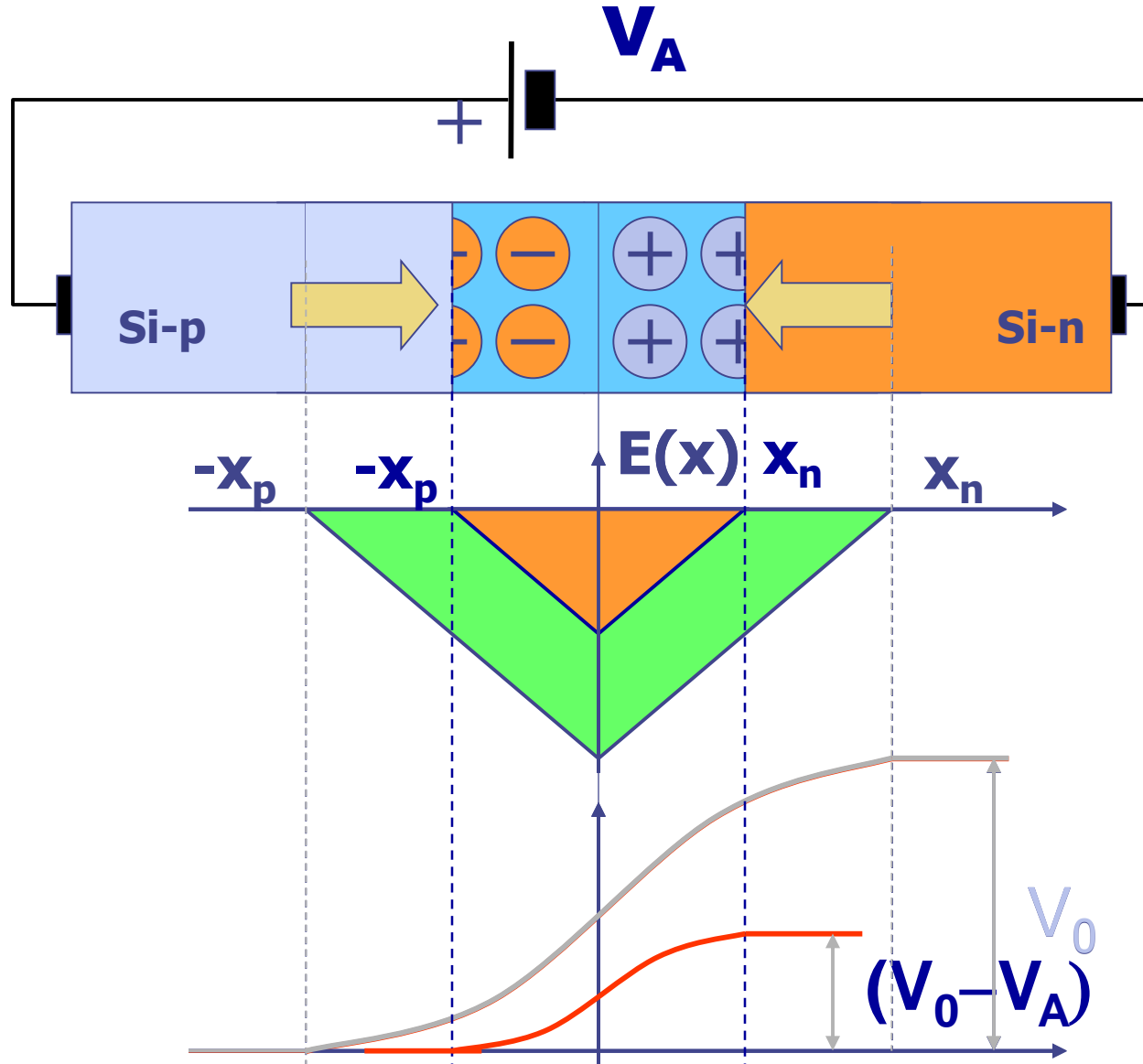
- W_{dep} cala
- $E(0)$ cala
- potenziale alla giunzione cala

e viceversa

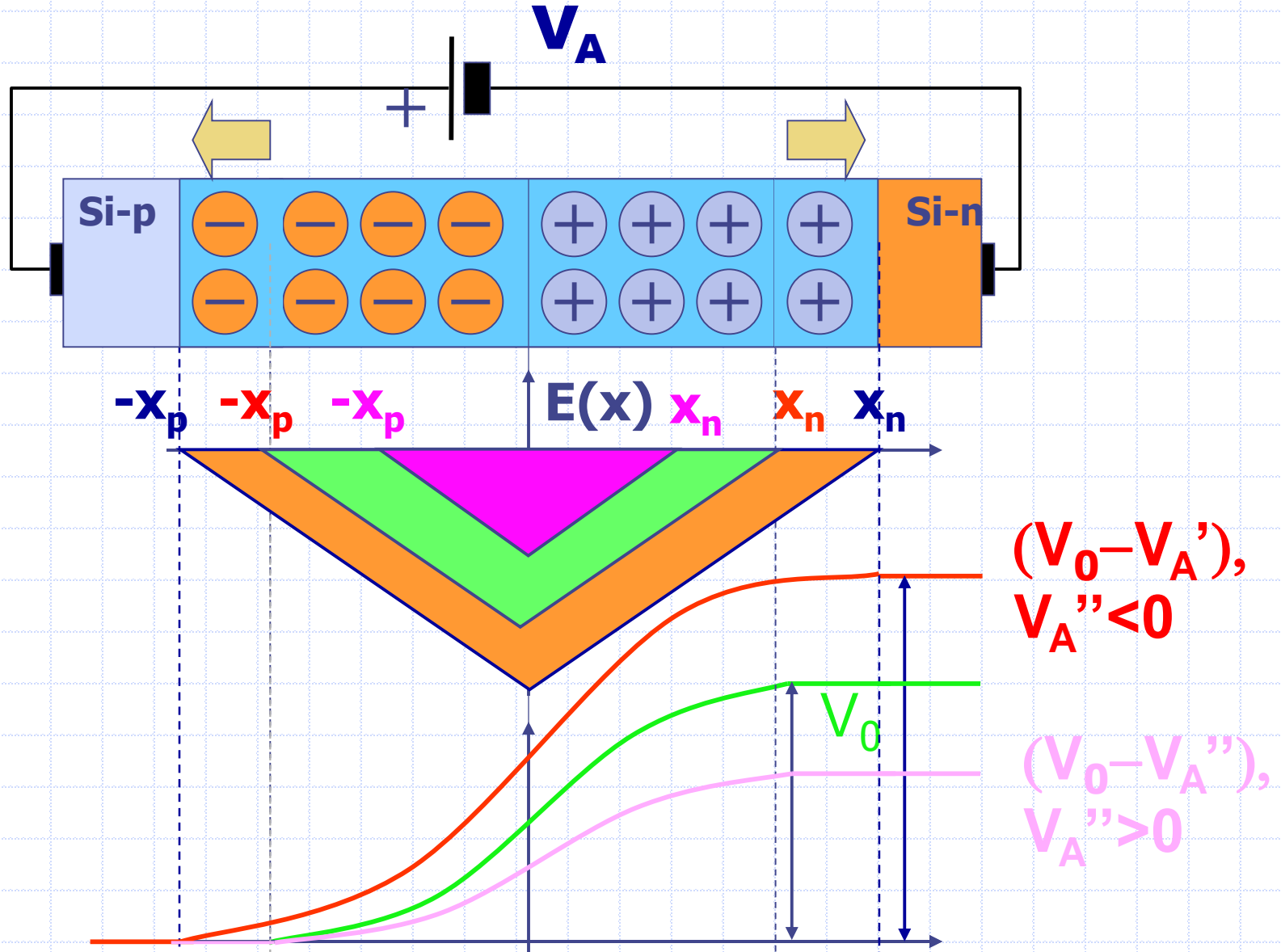
La giunz. *polarizzata in inversa* ($V_A' < 0$)



La giunzione *polarizzata diretta* ($V_A > 0$)



La giunz. *polarizzata in diretta* ($V_A'' > 0$)



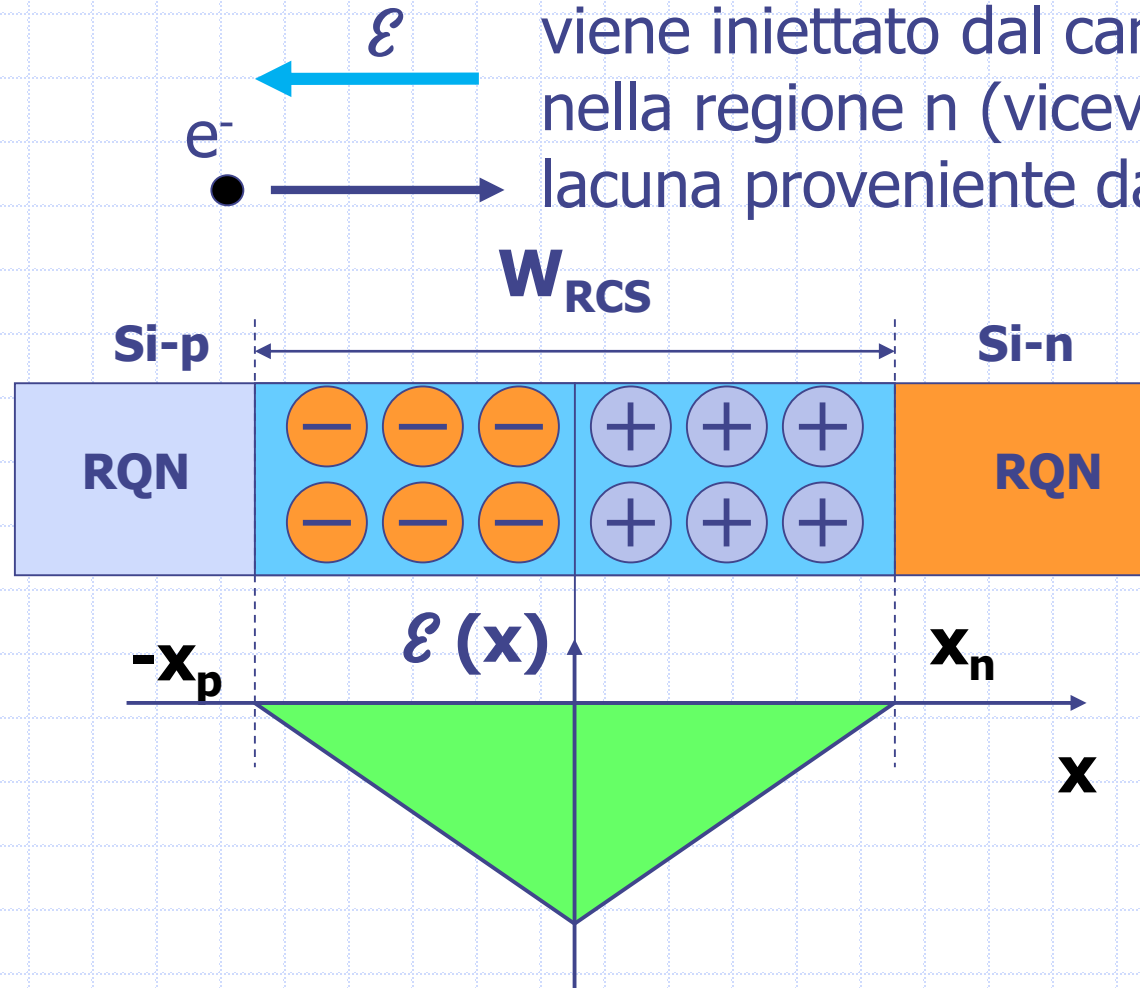
In polarizzazione inversa, il campo elettrico alla giunzione impedisce la diffusione dei portatori maggioritari attraverso la giunzione.

I portatori minoritari possono invece attraversare la giunzione (il verso del campo elettrico è favorevole alla «raccolta» di elettroni nella parte p e di lacune nella parte n) ma questi portatori sono pochissimi e la corrente è estremamente debole

L'effetto principale della polarizzazione inversa è quello di modulare l'estensione della regione di carica spaziale e quindi modulare la carica totale fissa presente in essa

Quello che avviene fuori dalla regione di carica spaziale non è rilevante

un elettrone minoritario in p
che si affaccia alla giunzione
viene iniettato dal campo elettrico
nella regione n (viceversa per una
lacuna proveniente da n)



In polarizzazione diretta, la barriera di potenziale che impedisce la diffusione dei portatori maggioritari diminuisce. La concentrazione di portatori che possono attraversare la giunzione cresce esponenzialmente con la tensione diretta applicata V_A .

Una volta attraversata la giunzione, i portatori diventano minoritari e, grazie al forte gradiente di concentrazione, si muovono verso i contatti per diffusione

Quello che avviene nella regione di carica spaziale non è più interessante: tutto avviene grazie alla diffusione di portatori minoritari nelle regioni «neutre» = prive di campo elettrico

$$V_2 - V_1 = V_T \ln \left(\frac{n_2}{n_1} \right)$$

Il rapporto delle concentrazioni di elettroni nel punto 2 rispetto al punto 1 cresce esponenzialmente con la differenza di tensione $V_2 - V_1$

invece di considerare due punti a due diversi potenziali consideriamo il punto $-x_p$ in due diverse condizioni:

con potenziale applicato V_A nullo: $n(-x_p) = n_{p0} = n_i^2 / N_A$

e con potenziale V_A applicato >0 alla parte p rispetto alla parte n: $n_p(V_A) = (n_i^2 / N_A) \exp(qV_A / kT) = n_{p0} \exp(qV_A / kT)$

quindi la concentrazione di portatori minoritari «in eccesso» in polarizzazione diretta è

$$n_p(V_A) - n_{p0} = n_{p0} [\exp(qV_A / kT) - 1]$$

mentre diffondono nelle regioni neutre, i portatori minoritari «ricombinano» con i portatori maggioritari

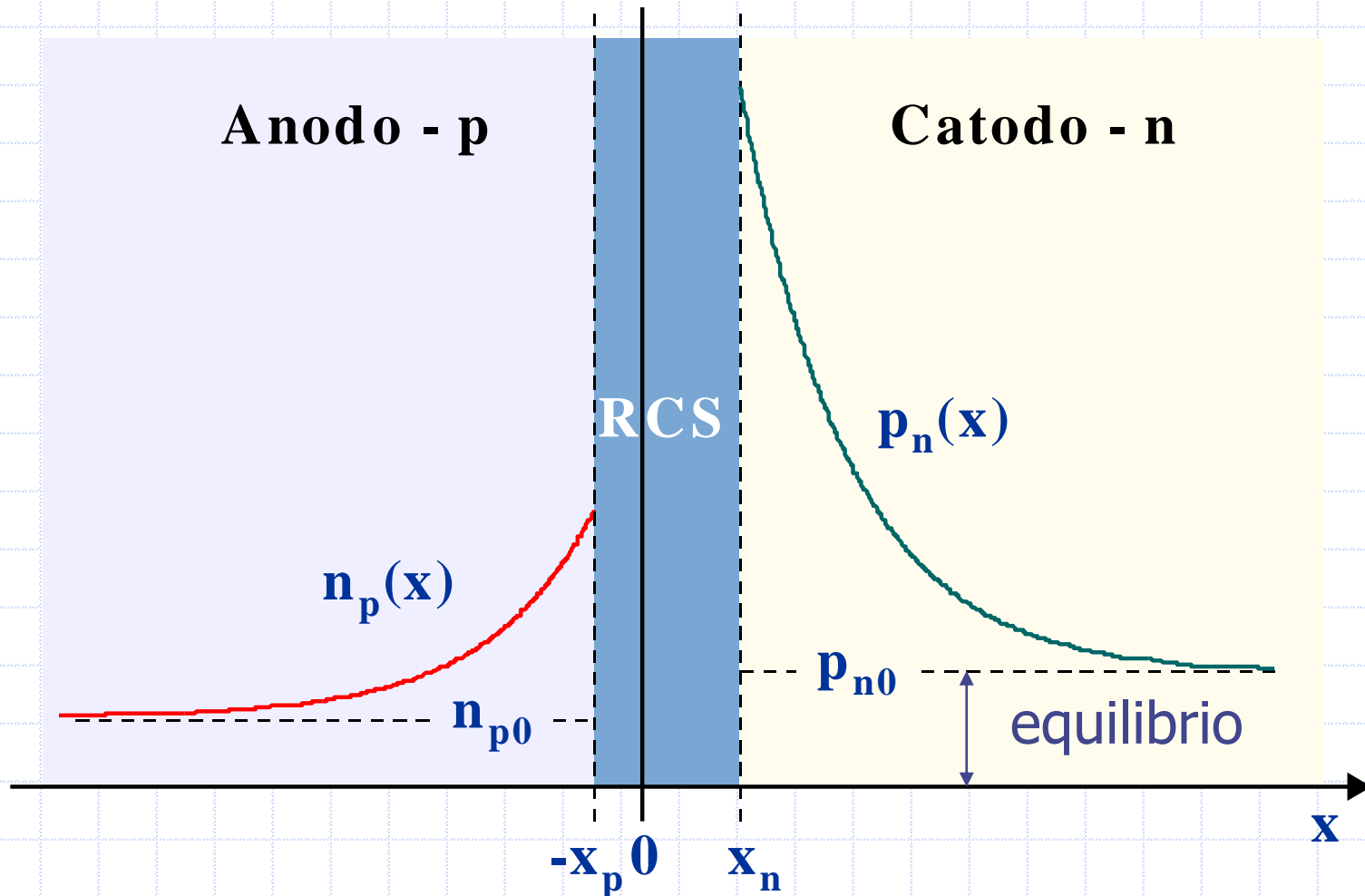
la regione di carica spaziale però rimane costante perchè i portatori maggioritari vengono continuamente rimpiazzati dal generatore che alimenta la giunzione pn in polarizzazione diretta

La giunzione *polarizzata*

portatori minoritari ($N_A > N_D$)

Polarizzazione diretta, $V_A > 0$

Diodo: $V_D > 0$



La giunzione *polarizzata*

Corrente nella giunzione pn

$$p'_n(x) = p'_n(x_n) e^{-\frac{x-x_n}{L_p}}$$

per $x > x_n$

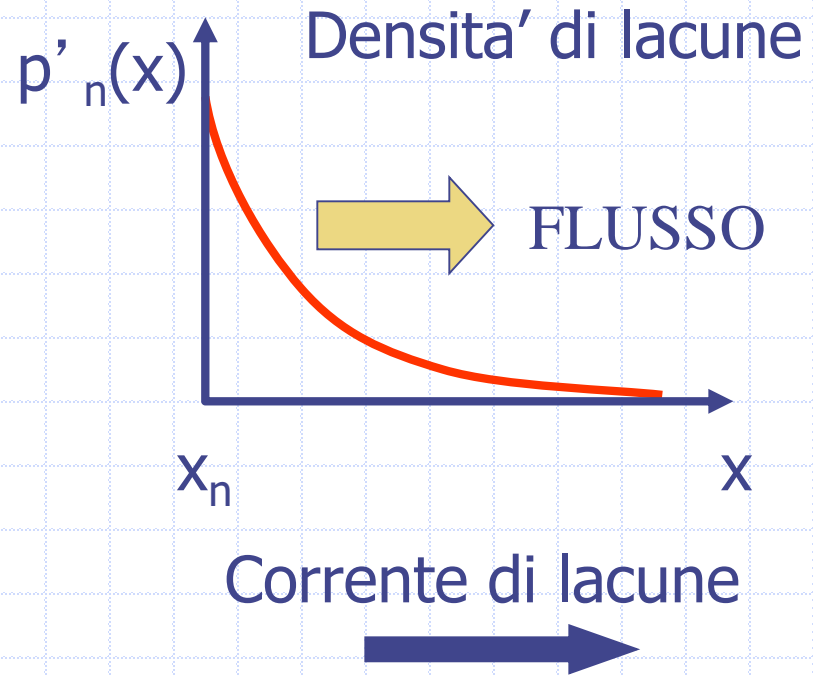
Corrente di diffusione:

$$J_p(x) = -qD_p \frac{\partial p'_n(x)}{\partial x}$$

Si può dimostrare che:

$$J_p(x) = q \frac{D_p}{L_p} p_{n0} \left(e^{\frac{V_A}{V_T}} - 1 \right) e^{-\frac{x-x_n}{L_p}}$$

per $x > x_n$

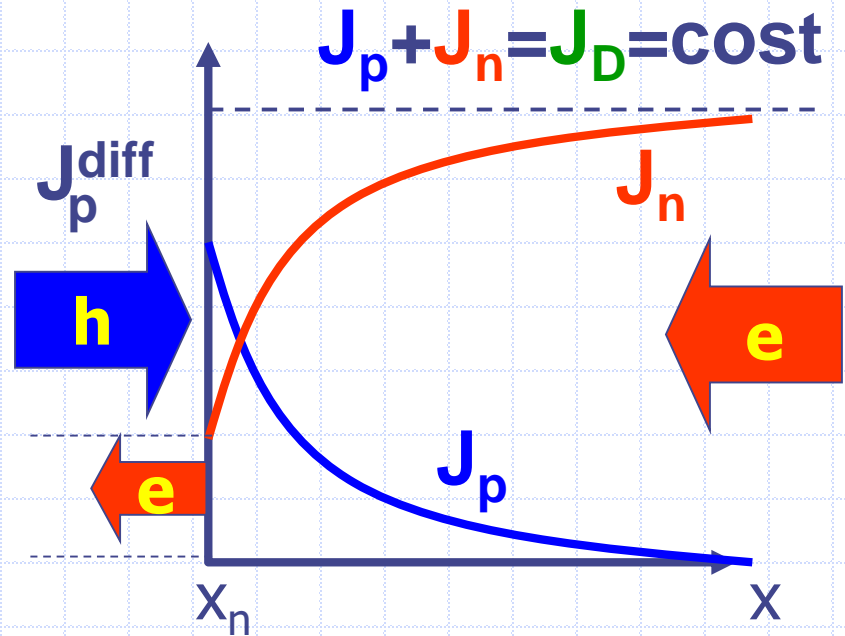


J_p e' massima in $x=x_n$ e poi decade in modo esponenziale con lunghezza di diffusione L_p .

La giunzione *polarizzata*

Corrente nella giunzione pn

- (1) Le lacune vengono continuamente iniettate nel Silicio tipo n;
- (2) In presenza del gran numero di elettroni si ricombinano (lontano dalla giunzione non ci sono lacune in eccesso, $p'_n(x) \rightarrow 0$;



- (3) Vengono richiamati elettroni che si ricombinano con le lacune iniettate (dando una corrente verso destra);
- (4) In regime stazionario, la corrente lungo il diodo è costante.

La giunzione *polarizzata*

CORRENTE TOTALE

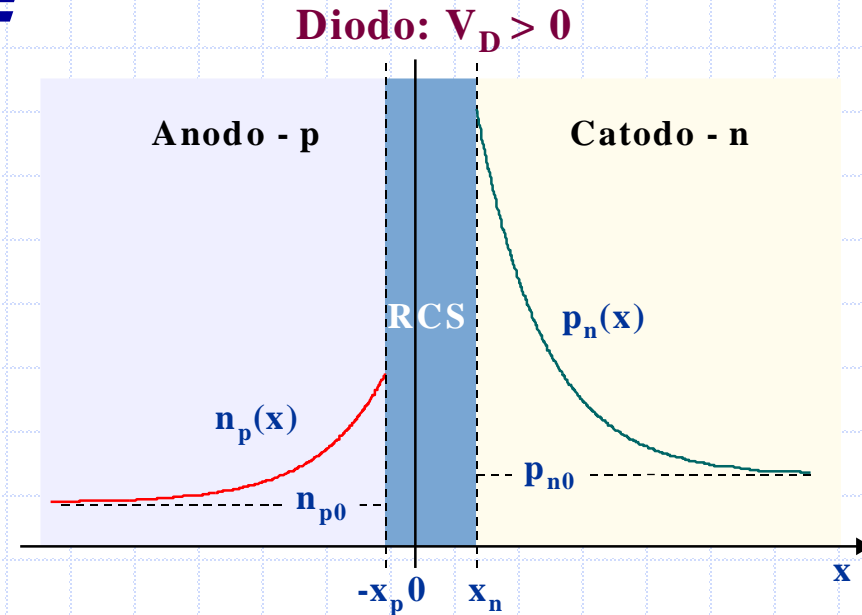
$$I = A [J_p(x_n) + J_n(-x_p)]$$

Si può dimostrare che:

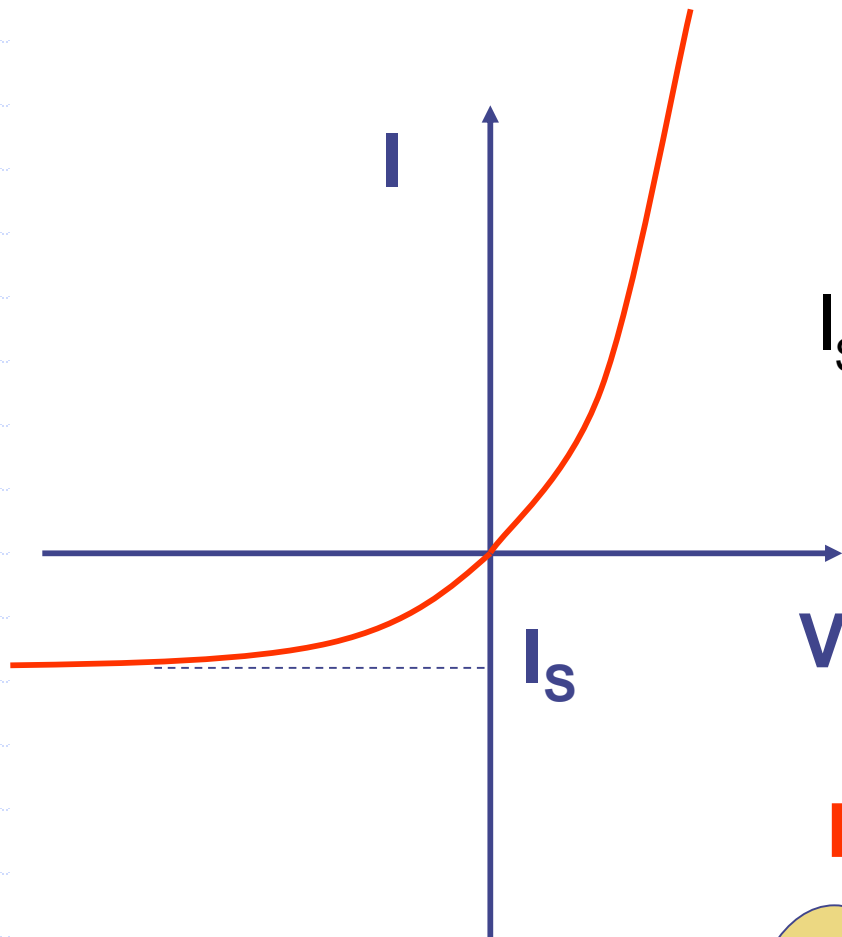
$$I = A \left(\frac{qD_p p_{n0}}{L_p} + \frac{qD_n n_{p0}}{L_n} \right) \left(e^{\frac{V_A}{V_T}} - 1 \right)$$

E ricordando che $p_{n0} = \frac{n_i^2}{N_D}$ $n_{p0} = \frac{n_i^2}{N_A}$

$$I = A q n_i^2 \left(\frac{D_p}{N_D L_p} + \frac{D_n}{N_A L_n} \right) \left(e^{\frac{V_A}{V_T}} - 1 \right) = I_S \left(e^{\frac{V_A}{V_T}} - 1 \right)$$

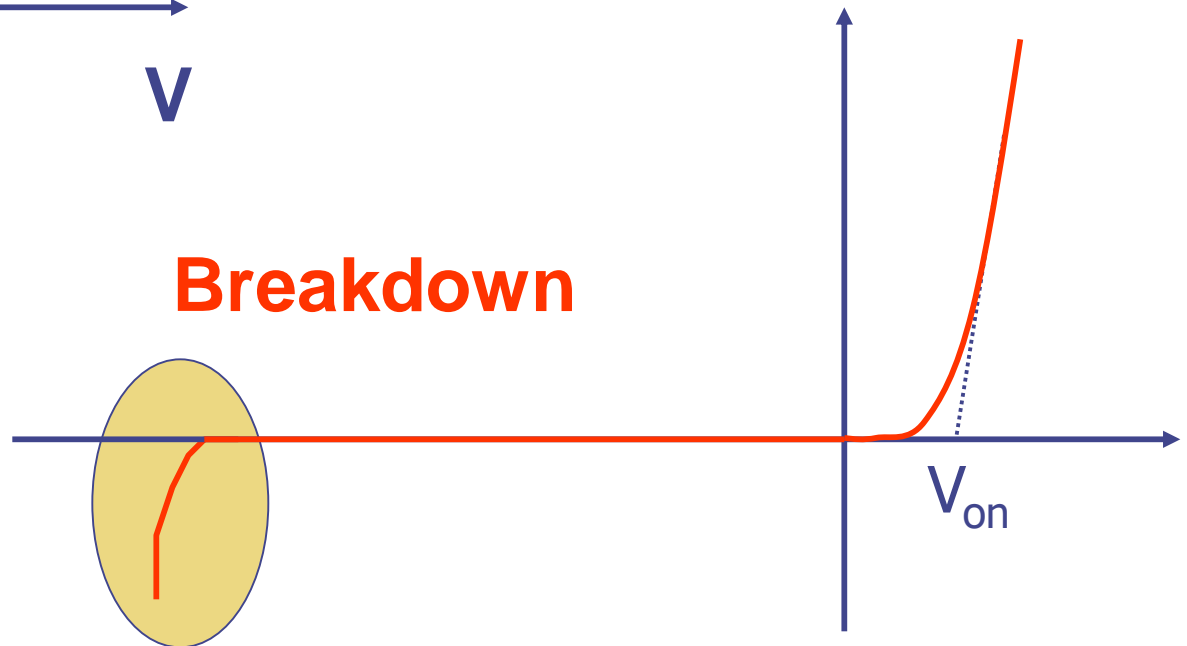


Caratteristica I-V della giunzione PN



$$I = I_s \left(e^{V/V_T} - 1 \right)$$

$$I_s = Aq n_i^2 \left(\frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A} \right)$$



Caratteristica I-V della giunzione PN

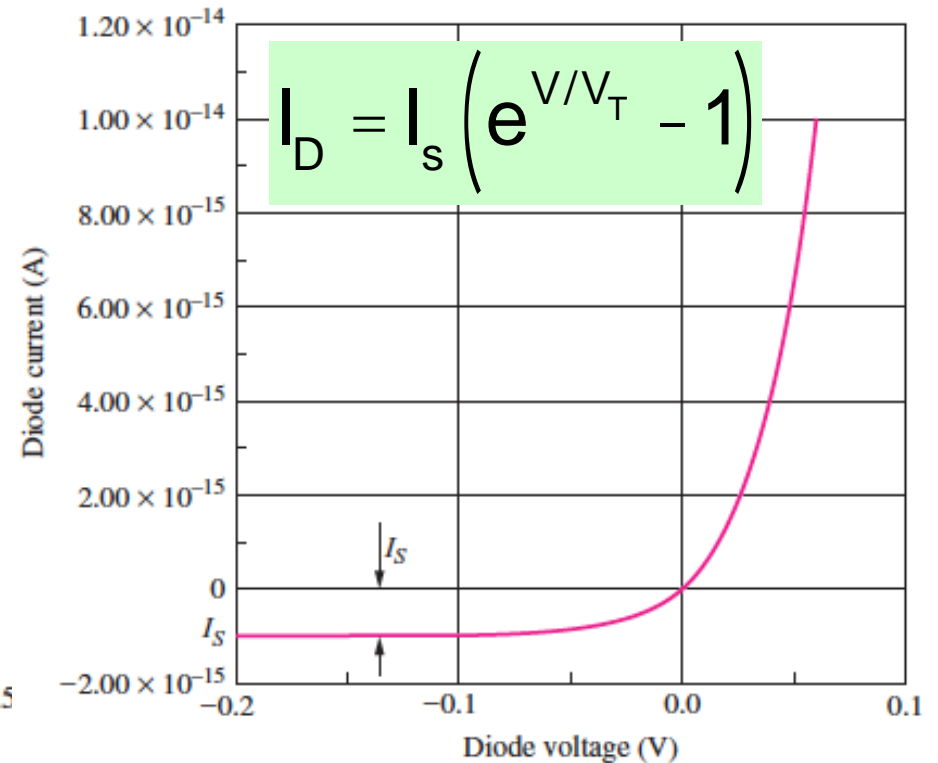
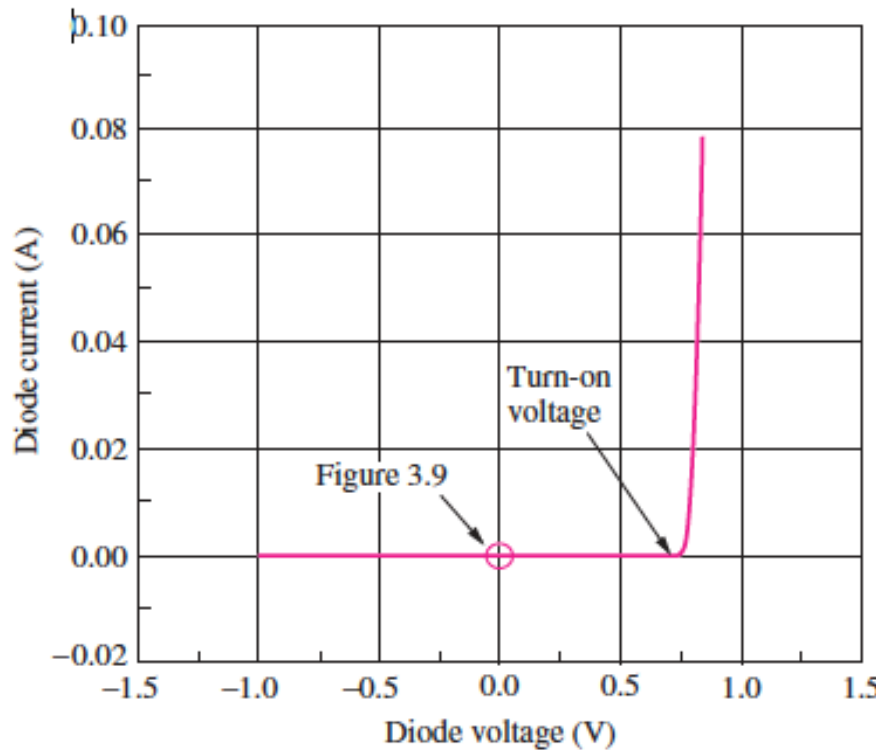
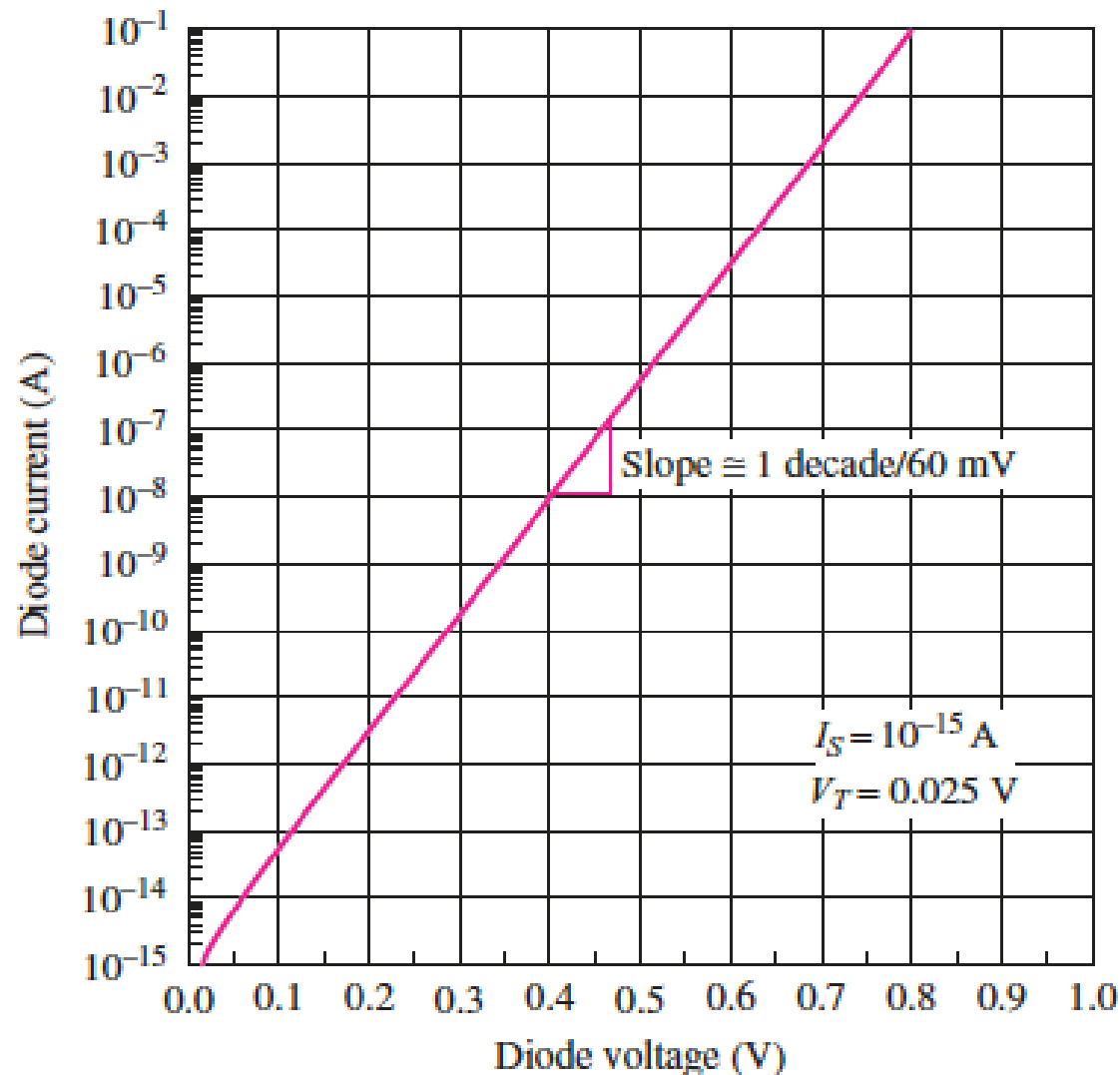


Figure 3.8 Graph of the $i-v$ characteristics of a pn junction diode. **Figure 3.9** Diode behavior near the origin with $I_S = 10^{-15}$ A and $n = 1$.

Dalla figura 3.8 sembra che la corrente nel diodo sia nulla fino a 0,7-0,8 V.
In realtà è un puro effetto scala. Provare con il foglio .xls che è disponibile su Moodle.

Caratteristica I-V della giunzione PN



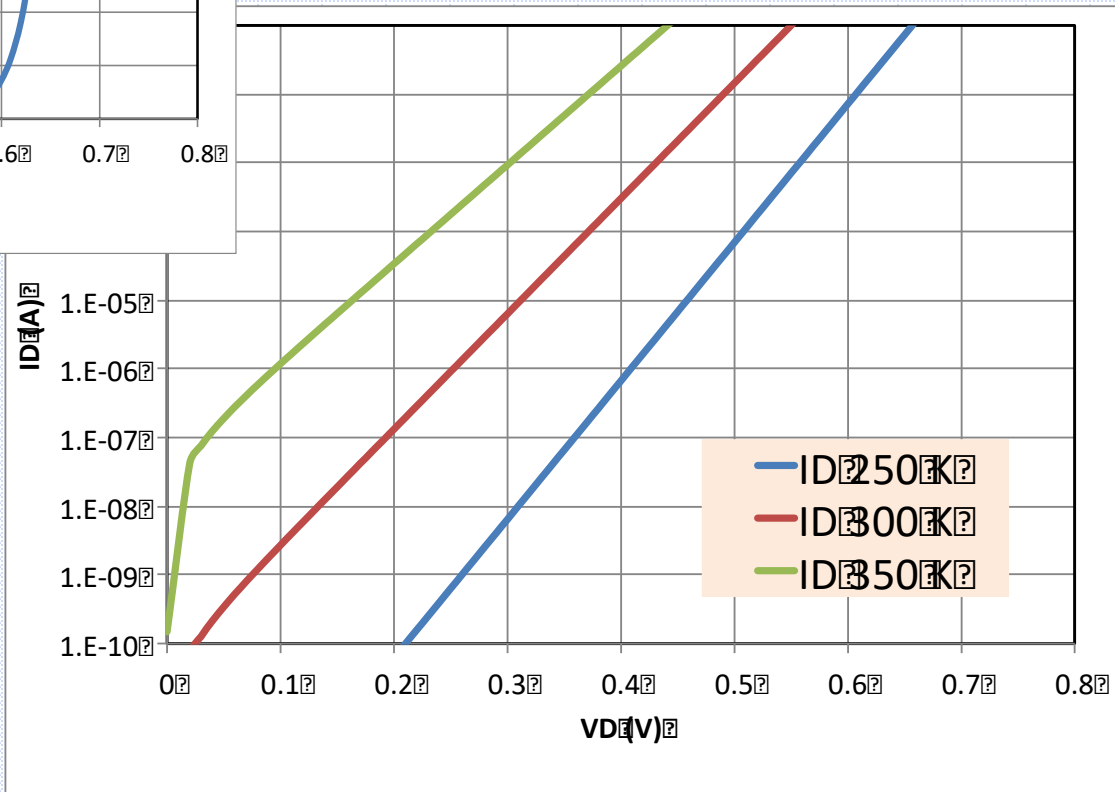
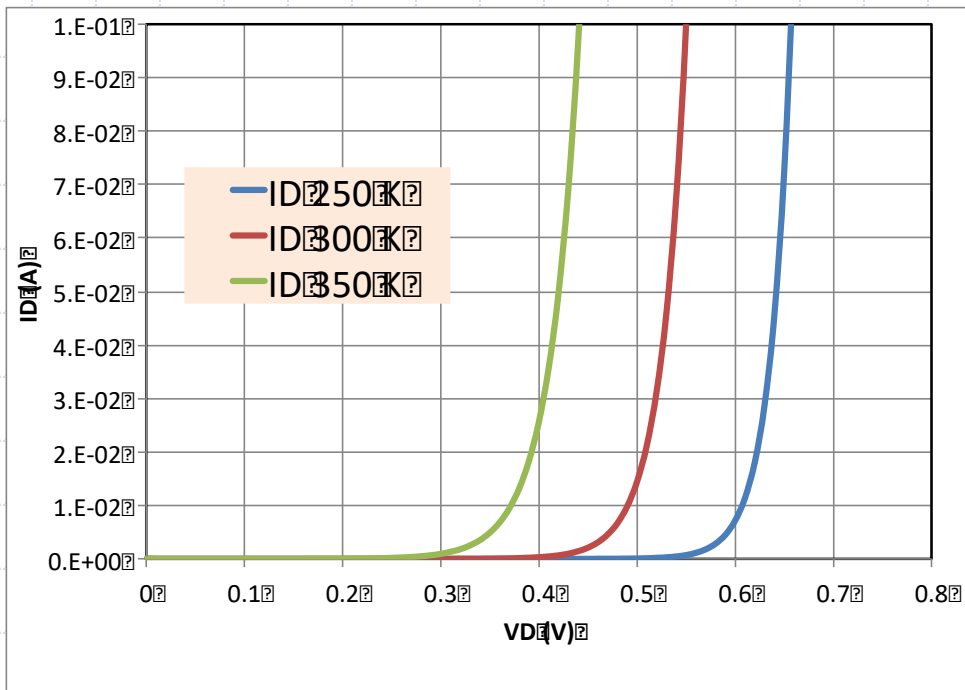
$$I_D = I_s \left(e^{V/V_T} - 1 \right)$$

Dalla figura 3.11 si vede chiaramente che la I-V del diodo, per piccoli valori di V_D , non è nulla, ma cambia in modo esponenziale (andamento lineare se graficate la I in una scala logaritmica)

Figure 3.11 Diode i - v characteristic on semilog scale.

Coefficiente in temperatura del Diodo.

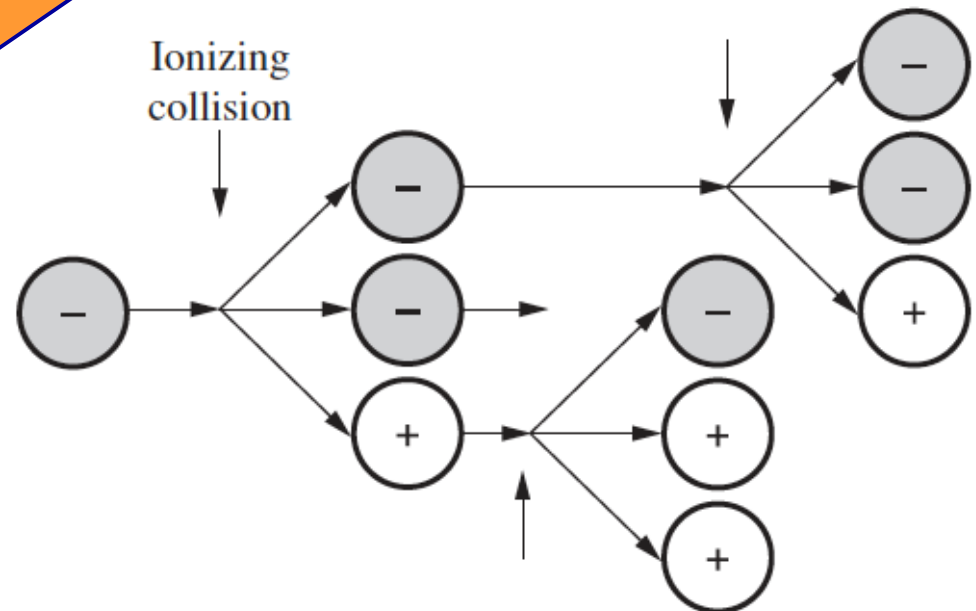
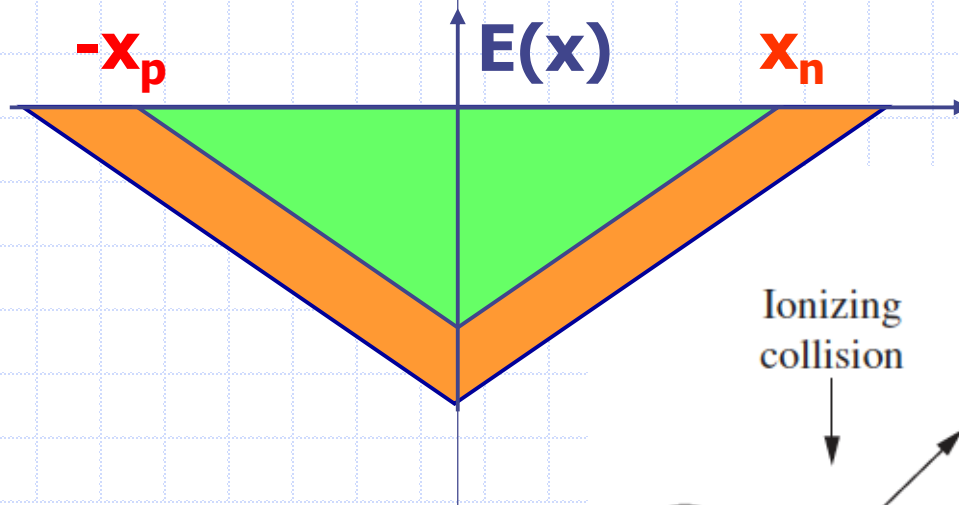
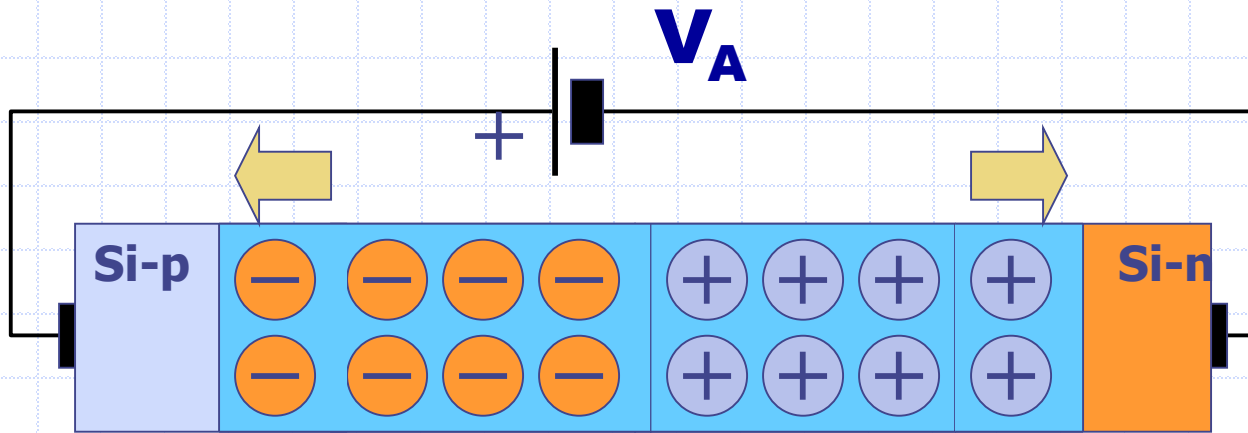
V_γ diminuisce di 2 mV per C
IR raddoppia ogni 10°



Breakdown a Valanga

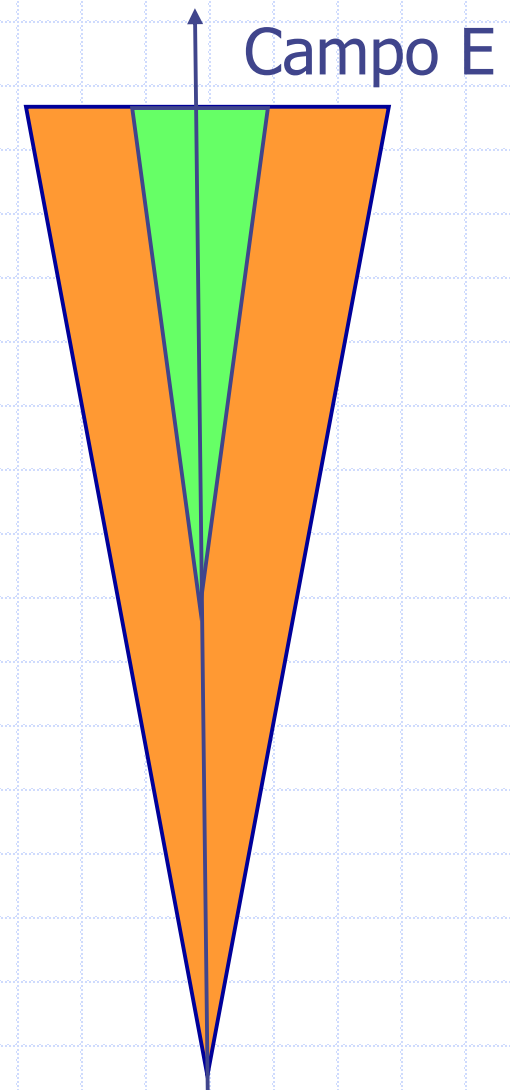
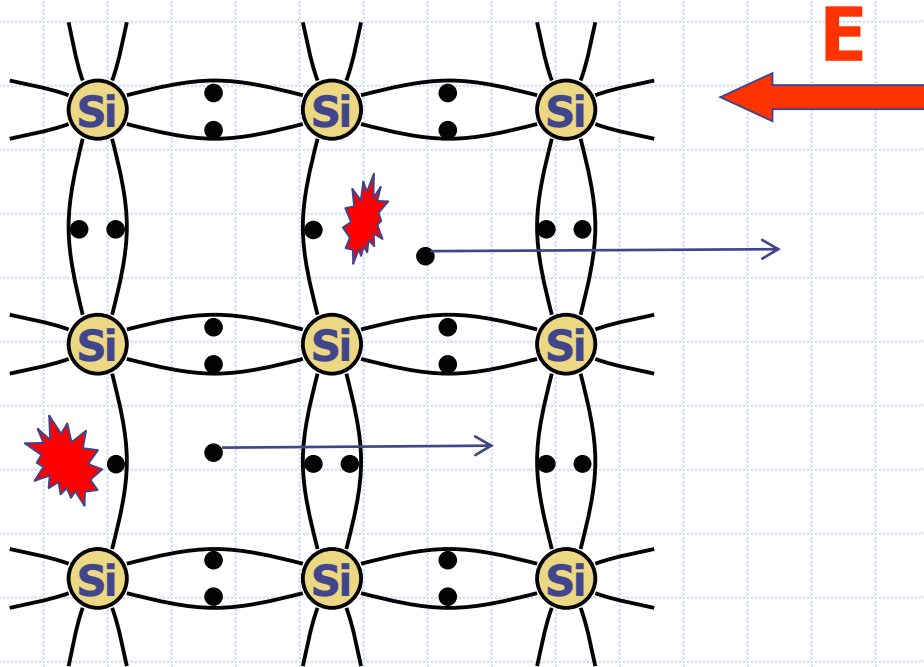
La velocità media di deriva dei portatori nella RCS è il risultato di continui urti con il reticolo cristallino (in cui viene ceduta energia) e movimento accelerato dal campo elettrico tra un urto e l'altro. Se l'energia cinetica acquisita durante la fase di accelerazione e ceduta al reticolo cristallino durante un urto è tale da rompere un legame covalente, si ha un effetto moltiplicativo ("a valanga") causato dai nuovi portatori così prodotti che, a loro volta vengono accelerati dal campo elettrico e possono provocare la rottura di altri legami covalenti

Breakdown a Valanga



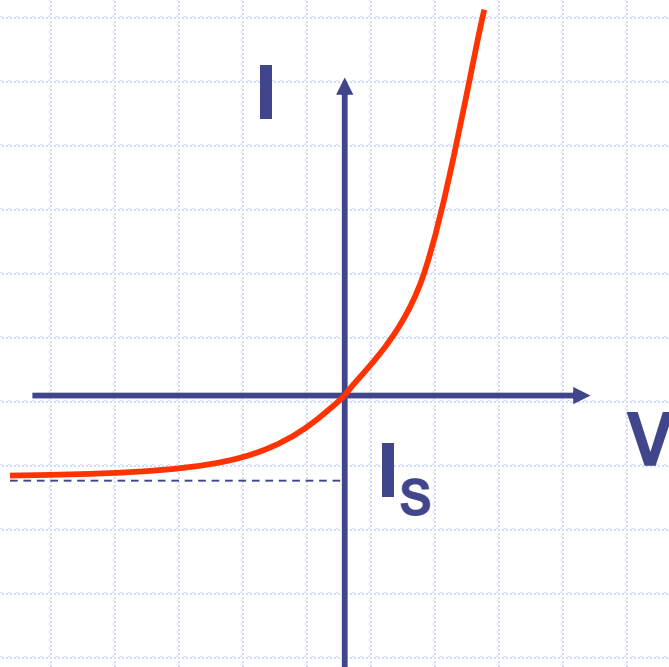
Breakdown ZENER

In giunzioni pesantemente drogate, la RCS risulta sottile ed il campo elettrico alla giunzione così elevato da riuscire a rompere legami covalenti e a creare coppie elettrone-lacuna con conseguente aumento della corrente inversa.



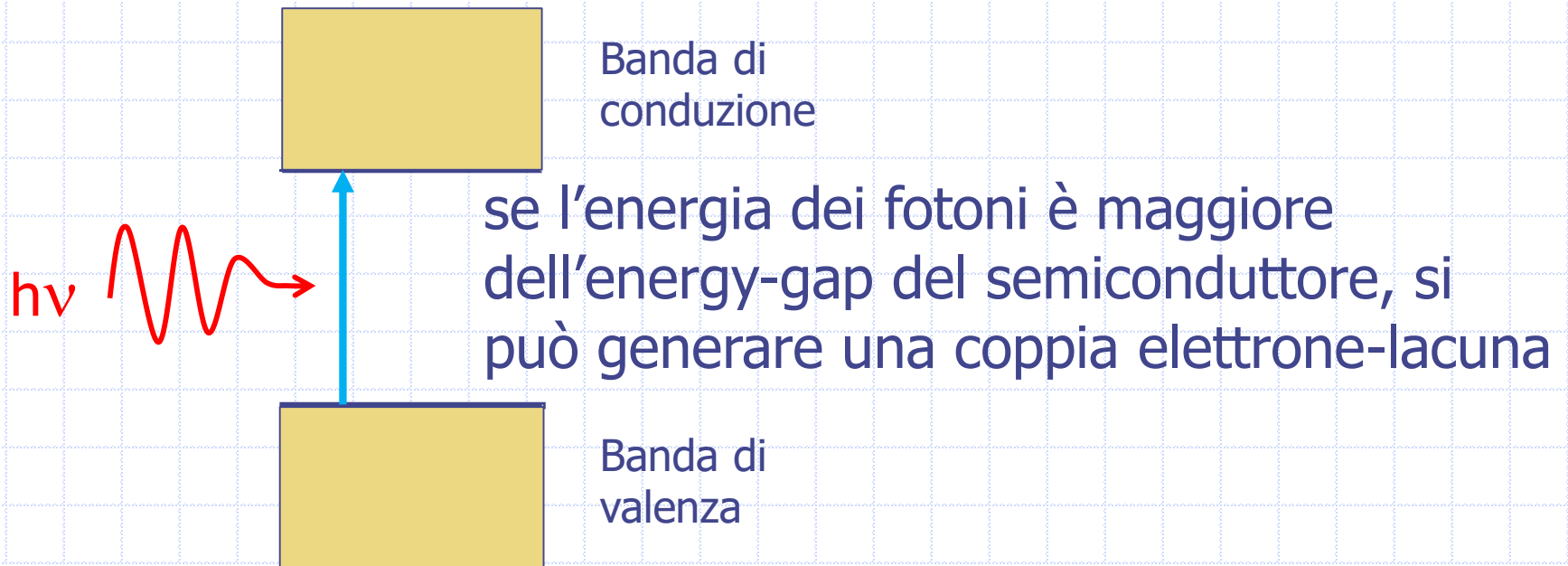
$$I = Aq n_i^2 \left(\frac{D_p}{N_D L_p} + \frac{D_n}{N_A L_n} \right) \left(e^{\frac{V_A}{V_T}} - 1 \right) = I_s \left(e^{\frac{V_A}{V_T}} - 1 \right)$$

I_s è la corrente di saturazione del diodo. Oltre ad essere il fattore moltiplicativo dell'esponenziale, è anche, idealmente, la corrente inversa del diodo

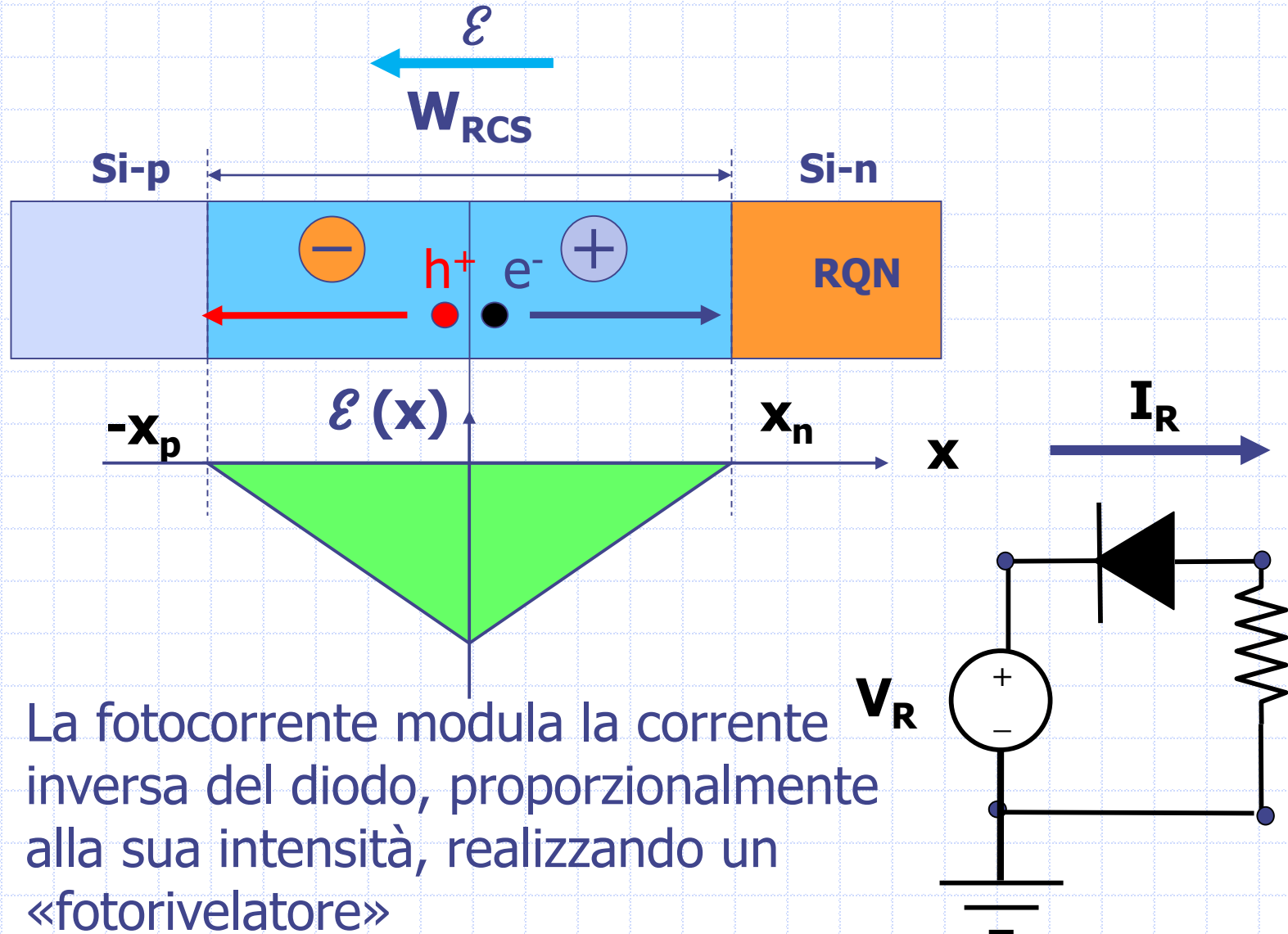


Abbiamo fatto l'ipotesi che nella regione di carica spaziale non succeda nulla. In realtà nella RCS, si può avere generazione e ricombinazione di coppie elettrone-lacuna.

La generazione di coppie-elettrone lacuna può essere dovuta a radiazione luminosa o «fotogenerazione»

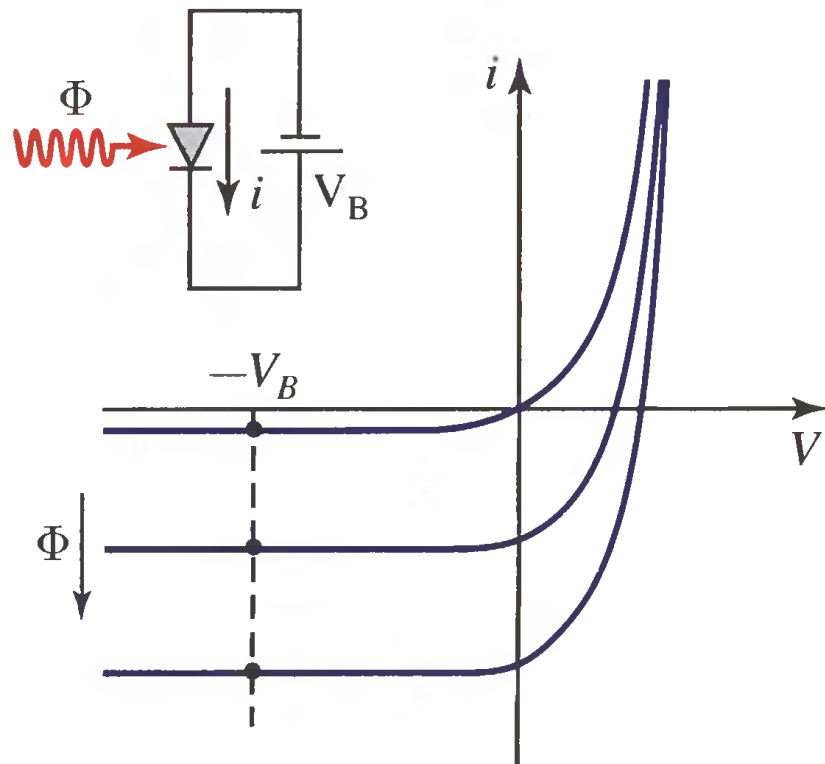


Le lacune vengono raccolte dalla regione p, mentre gli elettroni dalla regione n

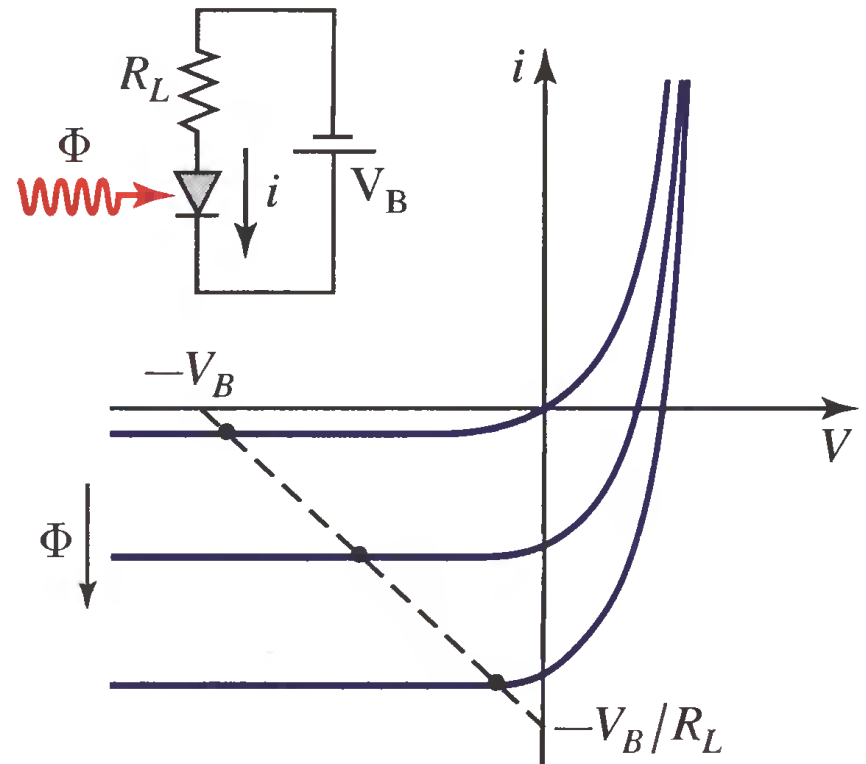


La fotocorrente modula la corrente inversa del diodo, proporzionalmente alla sua intensità, realizzando un «fotorivelatore»

Polarizzazione di un fotodiodo e curve I-V al variare dell'intensità

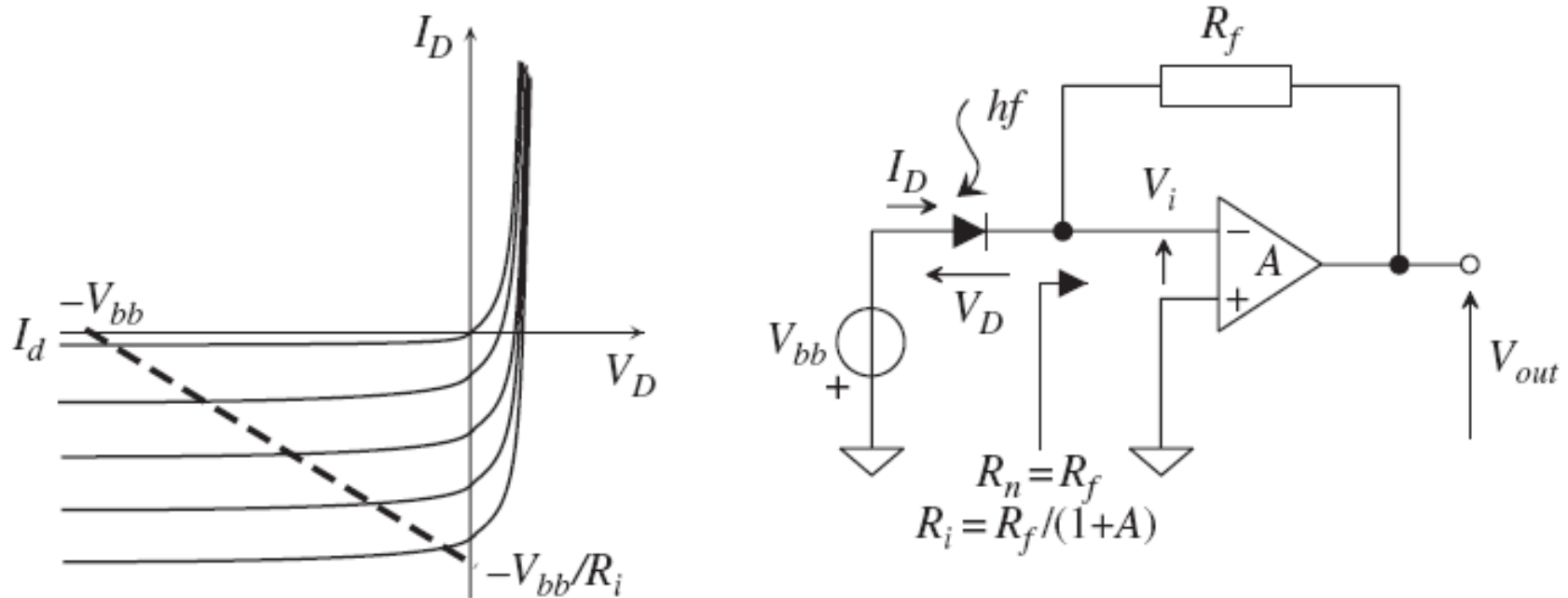


(a)



(b)

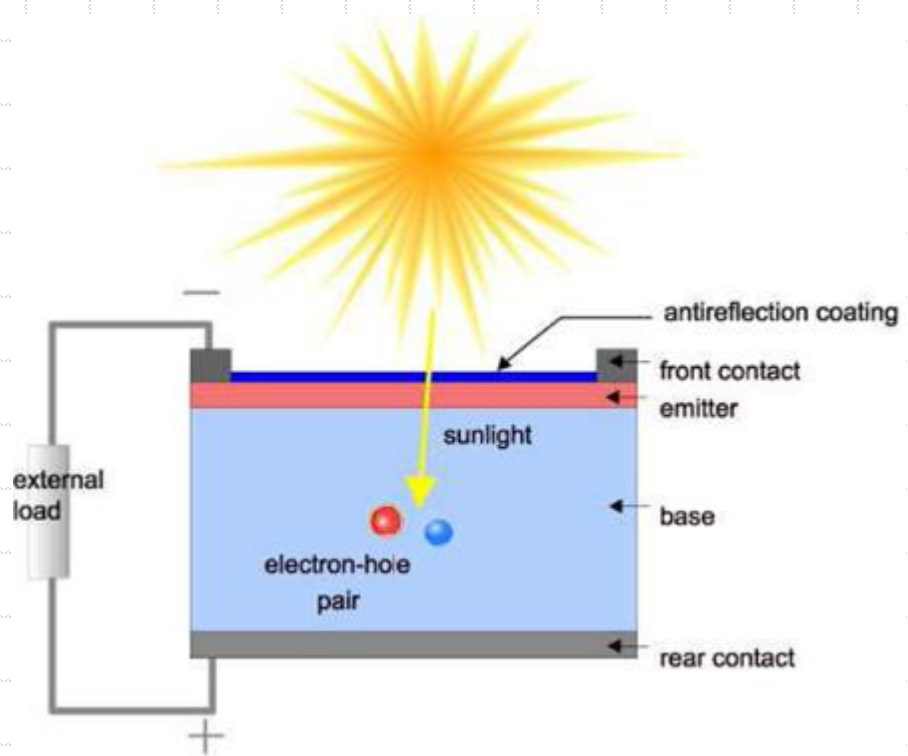
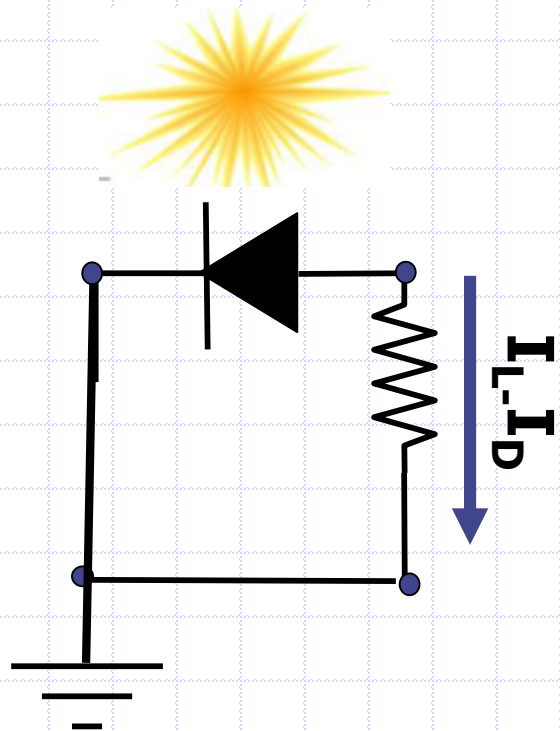
Amplificazione del segnale di un fotodiodo



6 Transimpedance front end: load line (left) and stage simplified structure (right).

Il fotodiode equivale ad un generatore di corrente, il cui valore è proporzionale all'intensità della radiazione luminosa che lo colpisce

Effetto fotovoltaico e celle solari



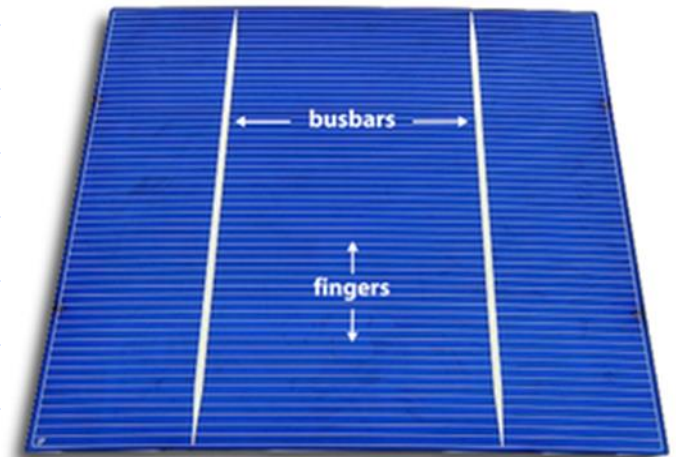
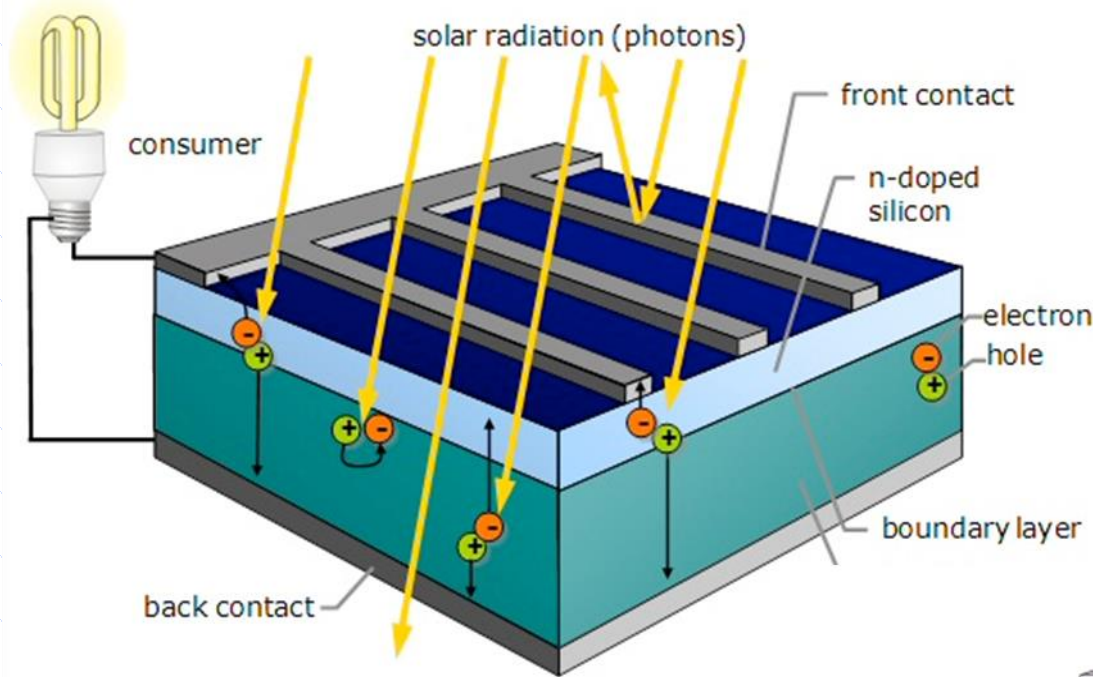
<http://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/solar-cell-structure>

... and much more

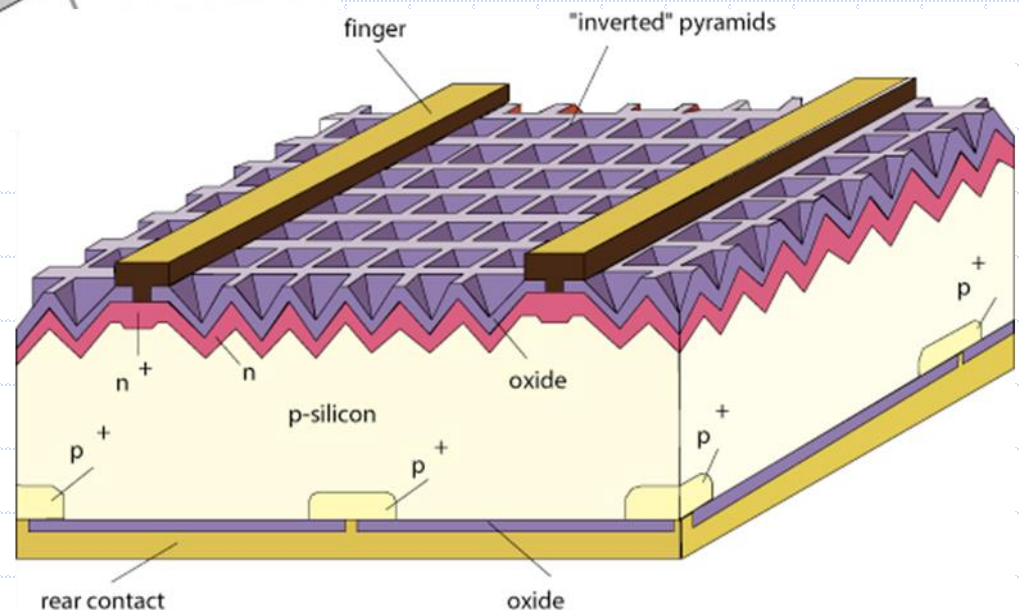
La corrente diretta del diodo si sottrae a quella fotogenerata

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \right]$$

A simple Solar Cell

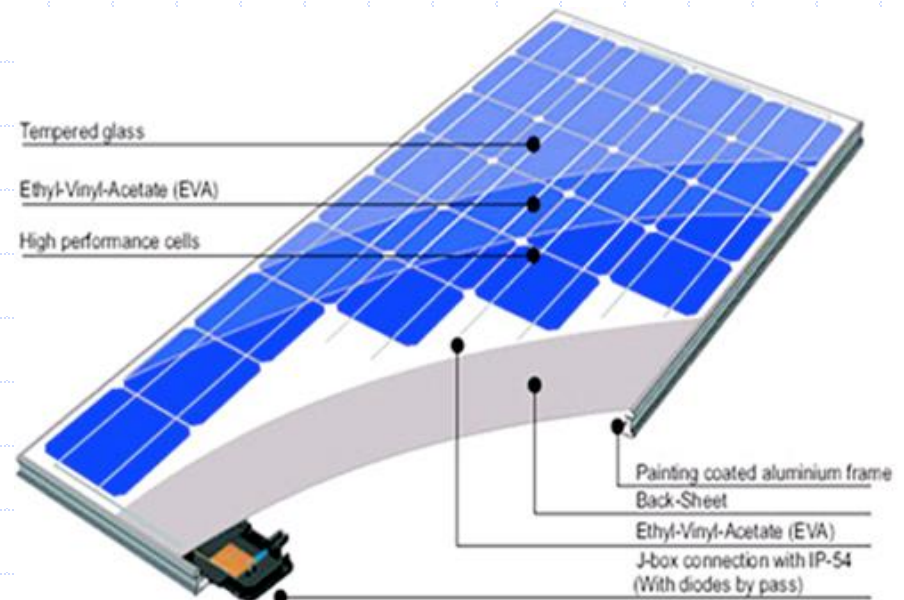
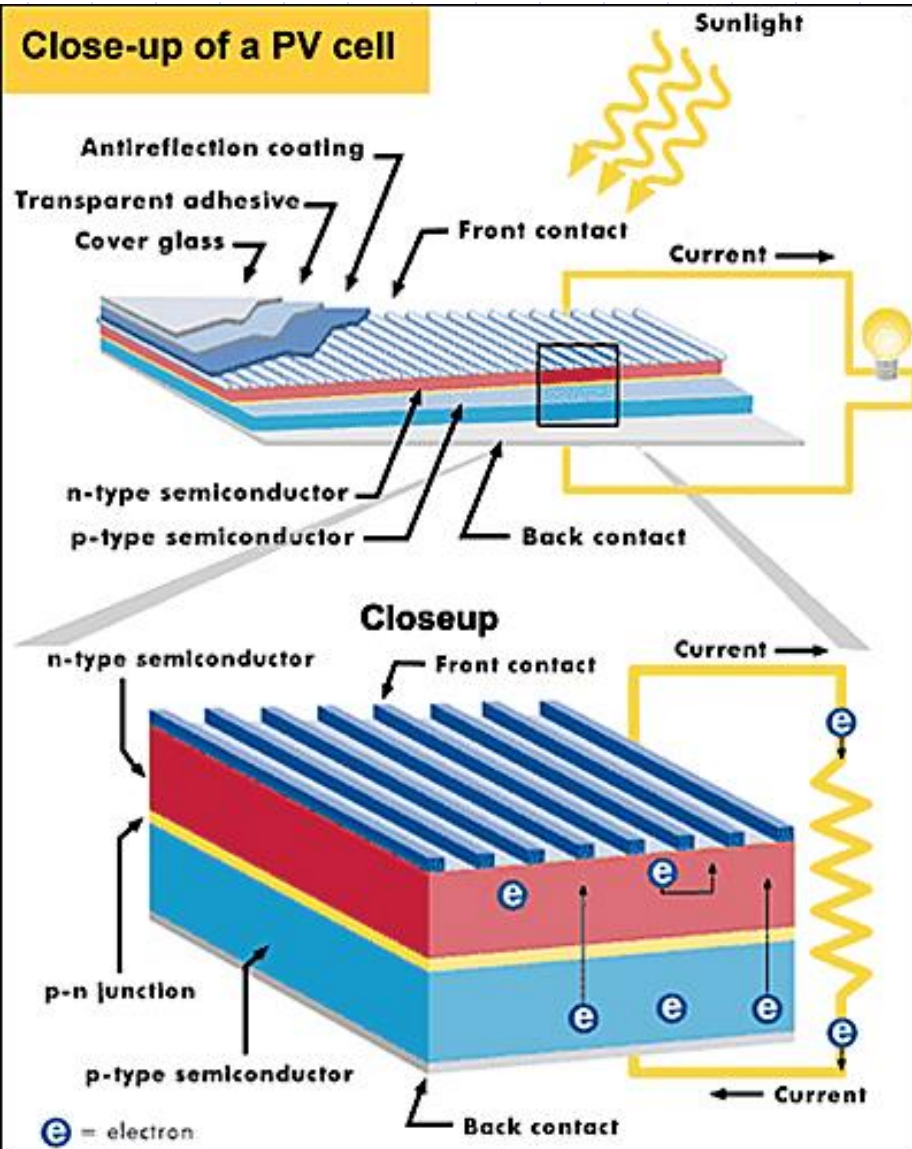


Issues:
Top contacts coverage
Top surface (texturing)
Backside contact and
reflection

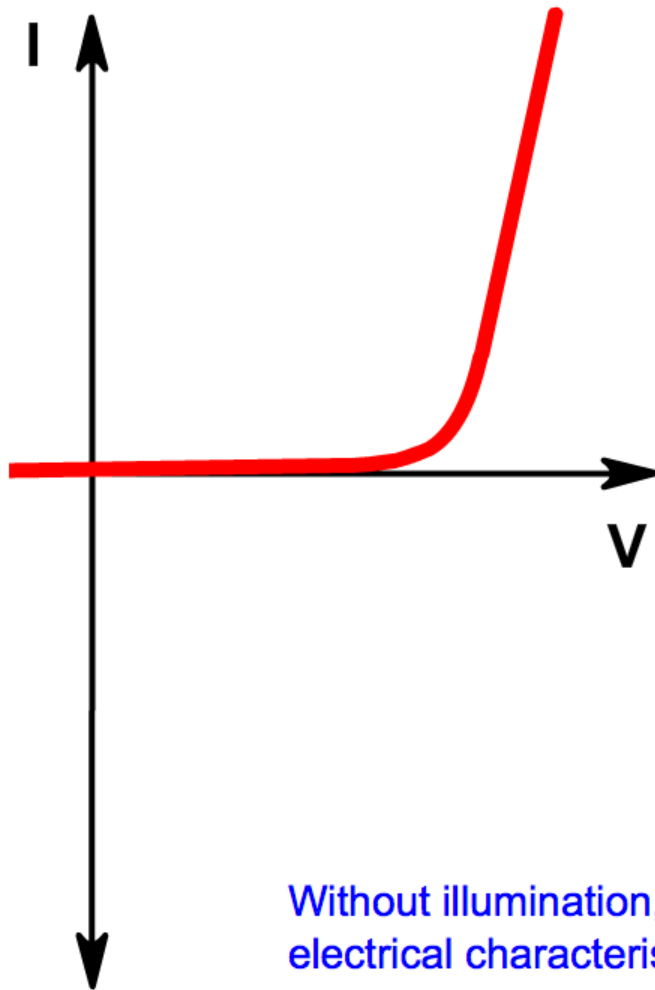


.....

Close-up of a PV cell

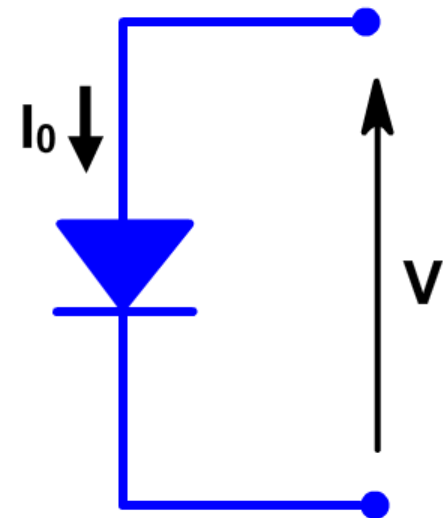


Caratteristica corrente-tensione al buio



Without illumination, a solar cell has the same electrical characteristics as a large diode.

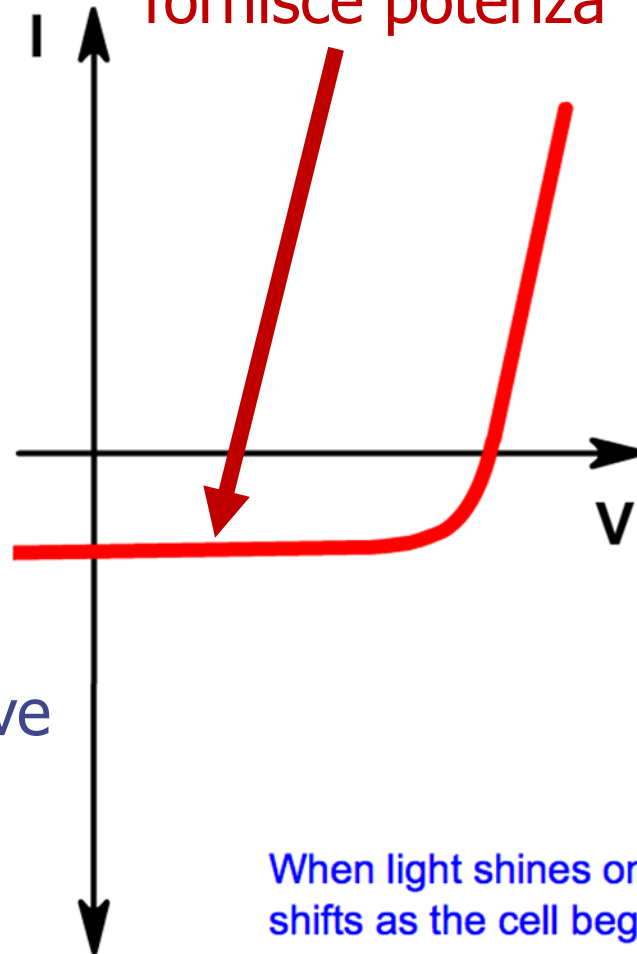
In questo quadrante sia la corrente che la tensione sono positive; quindi la potenza VI è positiva \rightarrow il diodo assorbe potenza dal generatore



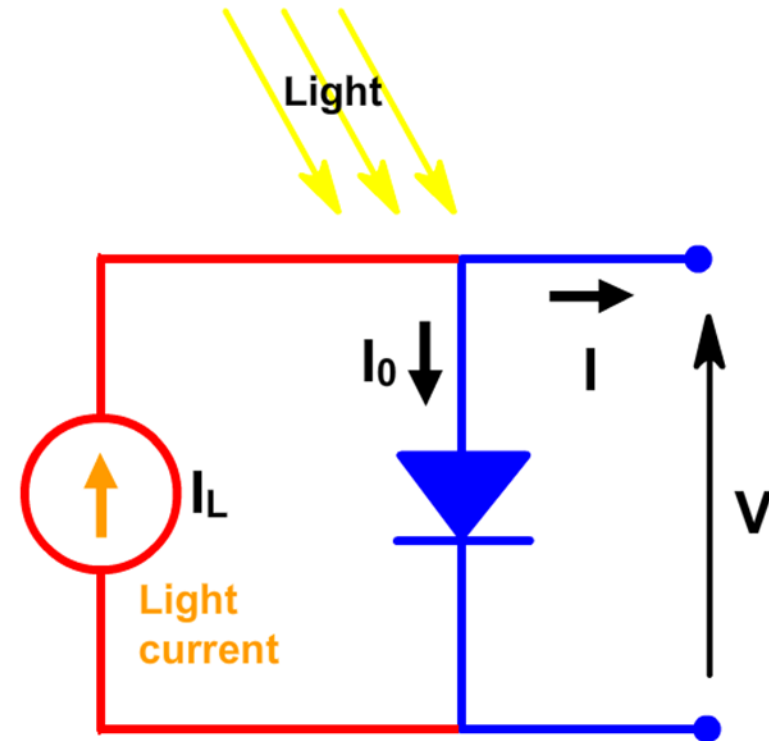
Click to Continue

Caratteristica corrente-tensione, debole illuminazione

In questo quadrante I è negativa e V positiva
la potenza P è negativa, la cella fotovoltaica
fornisce potenza



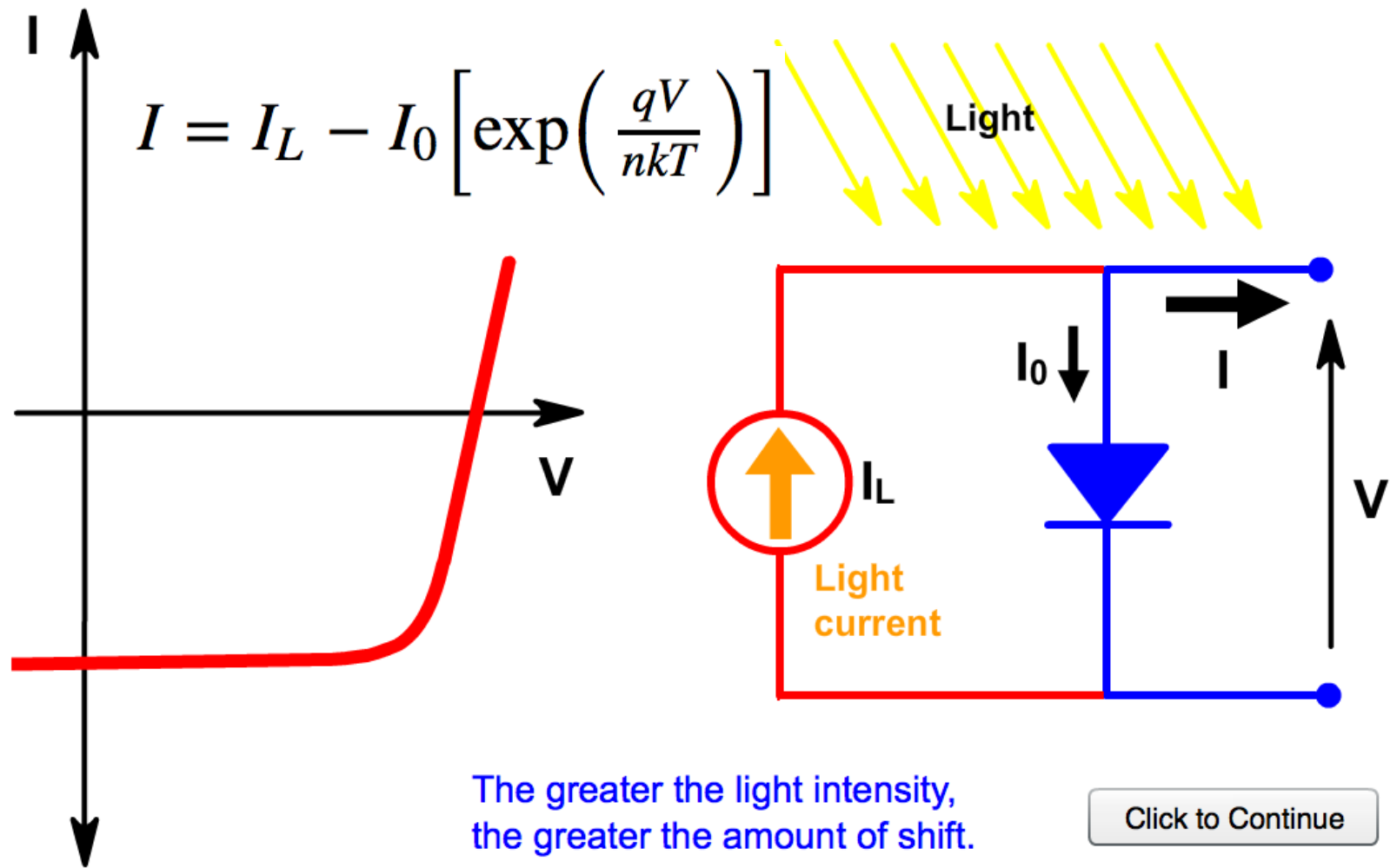
In questo
quadrante
sia I che V
sono negative
 P è ancora
positiva,
il fotodiodo
assorbe potenza



When light shines on the cell, the IV curve
shifts as the cell begins to generate power.

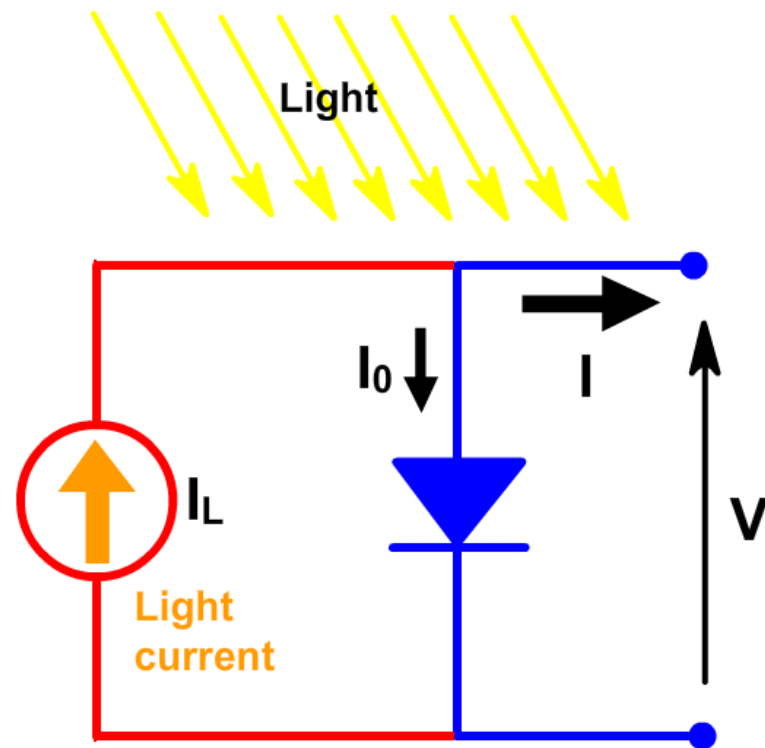
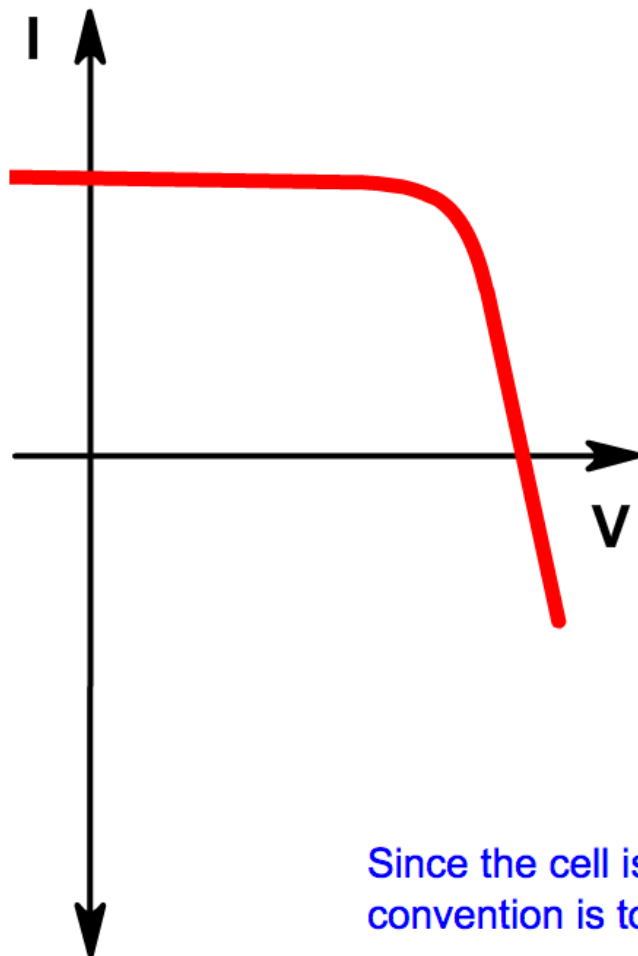
Click to Continue

Caratteristica corrente-tensione, forte illuminazione



Caratteristica corrente-tensione, forte illuminazione

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \right]$$

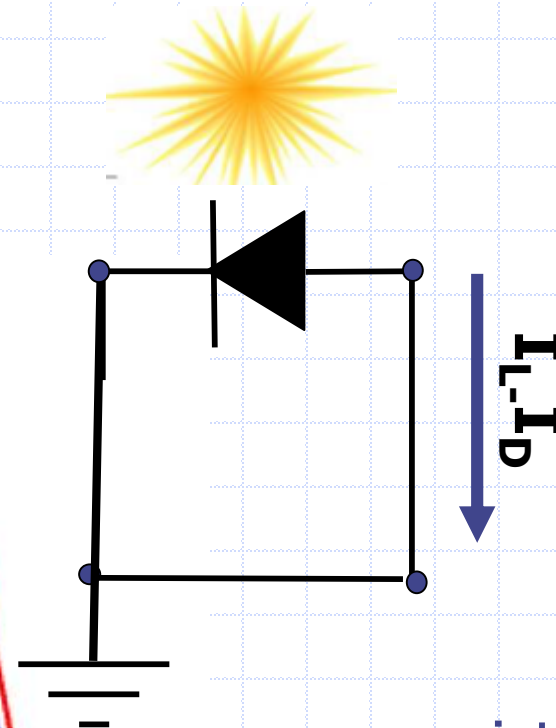
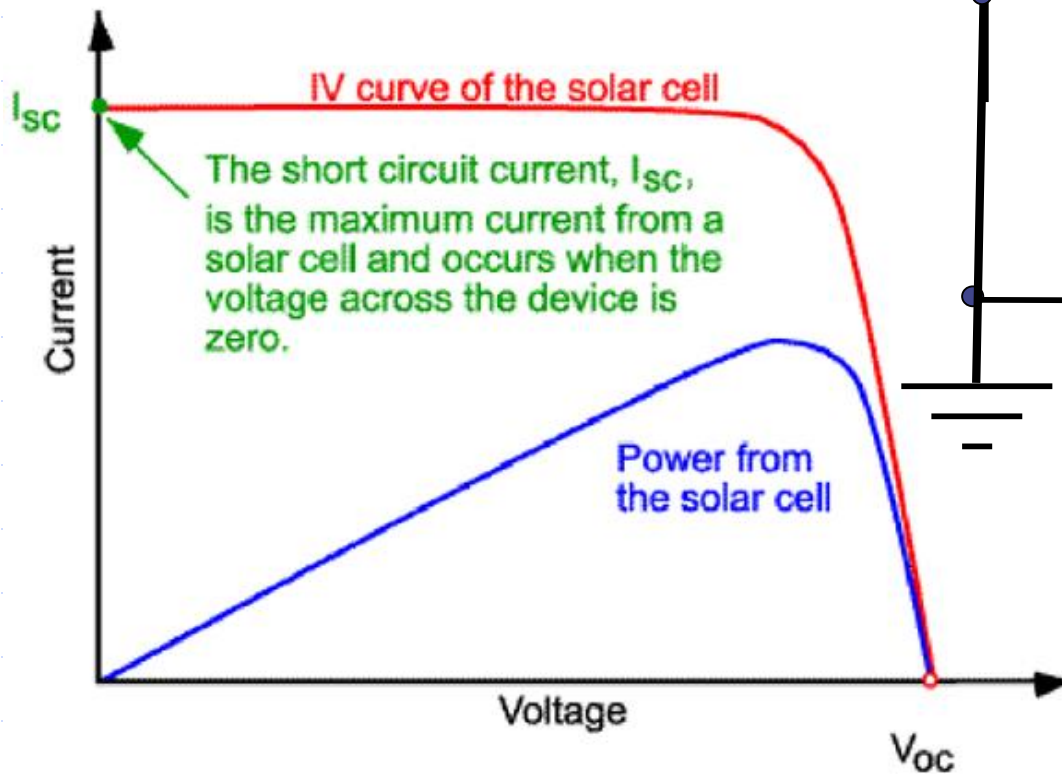


Since the cell is generating power the convention is to invert the current axis.

Click to Repeat

Corrente di cortocircuito

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \right]$$

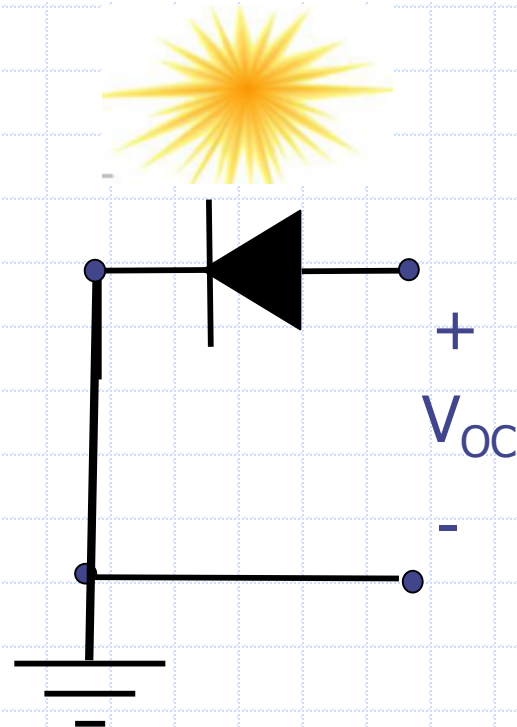


senza resistenza
il diodo non può
andare in diretta
la corrente
totale è massima

Tensione a circuito aperto

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \right]$$

a circuito aperto la corrente totale è nulla: la corrente del diodo compensa la fotocorrente, la tensione diretta è massima

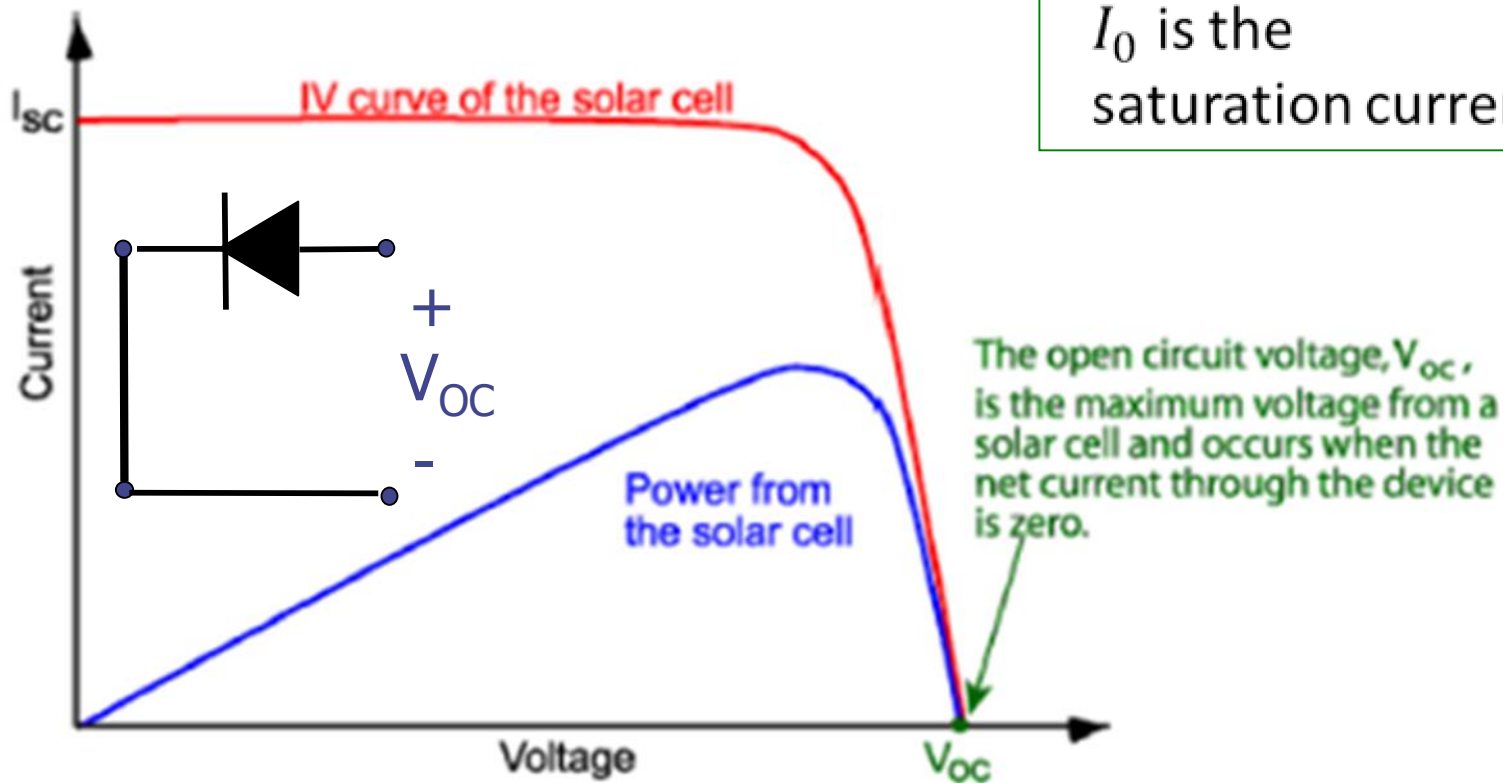


Tensione a circuito aperto

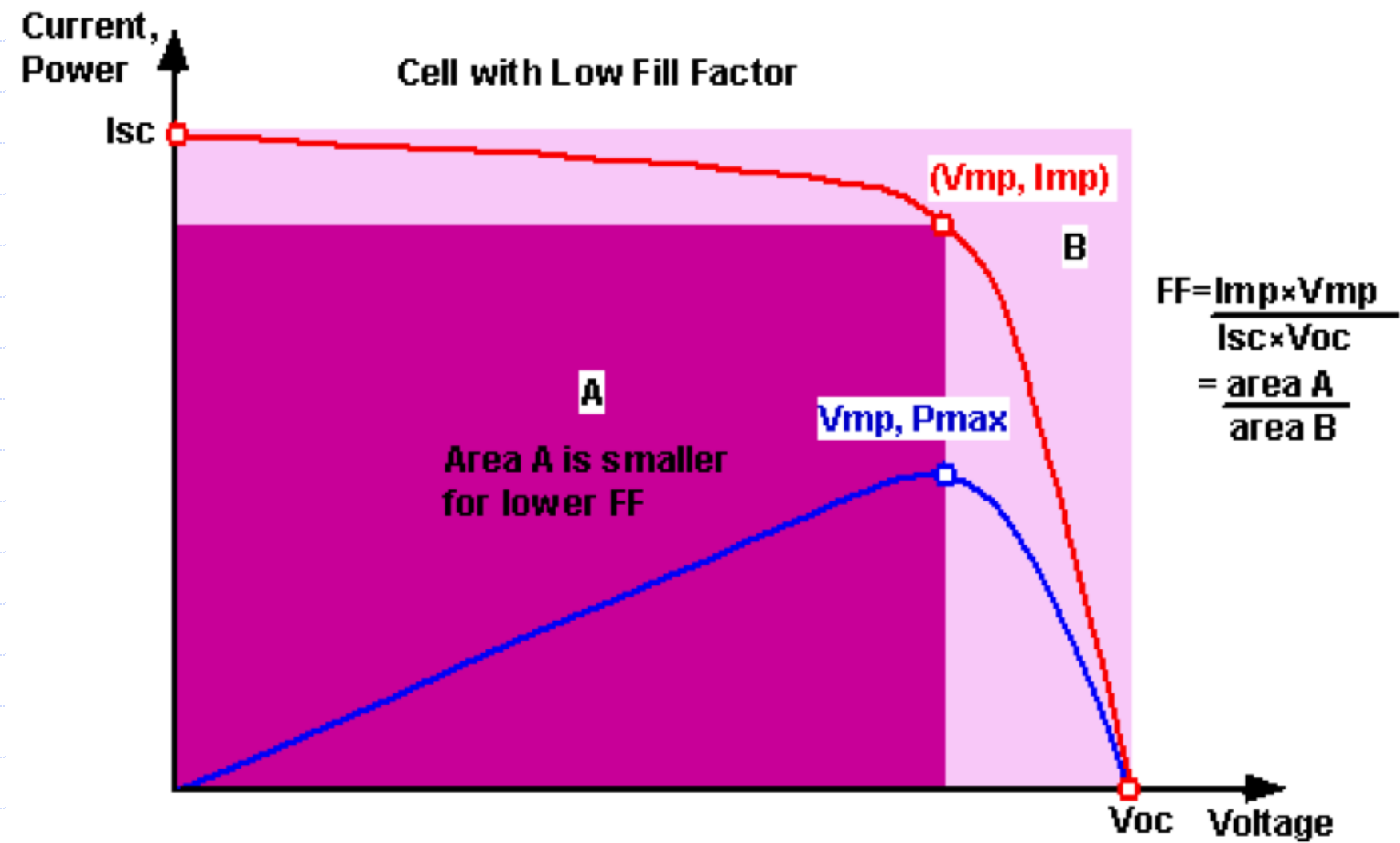
$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \right]$$

$$V_{OC} = \frac{nKT}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right)$$

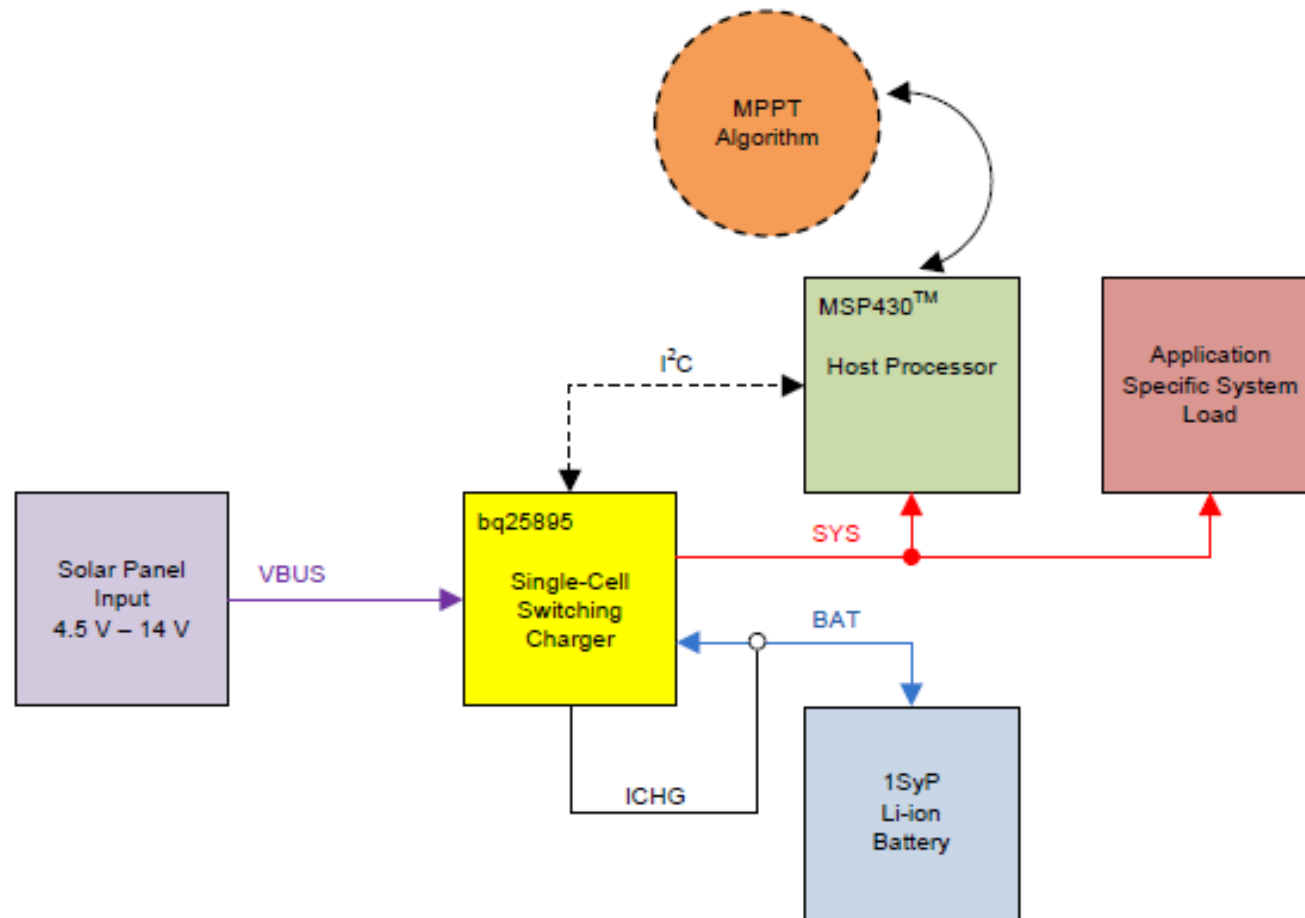
I_L is the
generated current
 I_0 is the
saturation current



Fill factor : massimizzazione della potenza generata



Ottimizzazione della scelta del carico



Flowchart del programma di ottimizzazione dell'efficienza

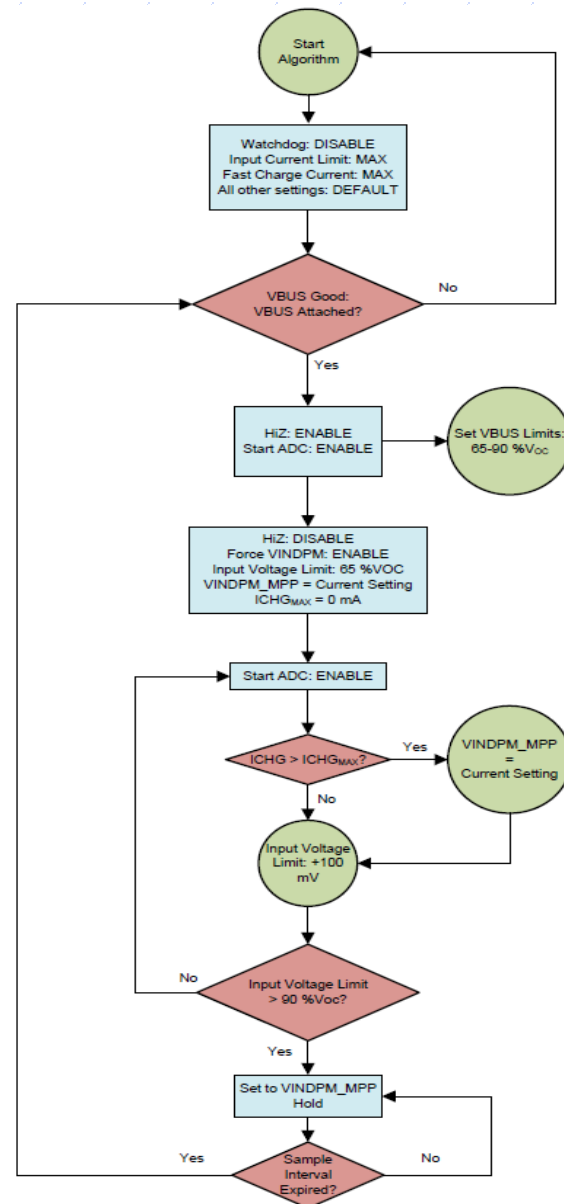
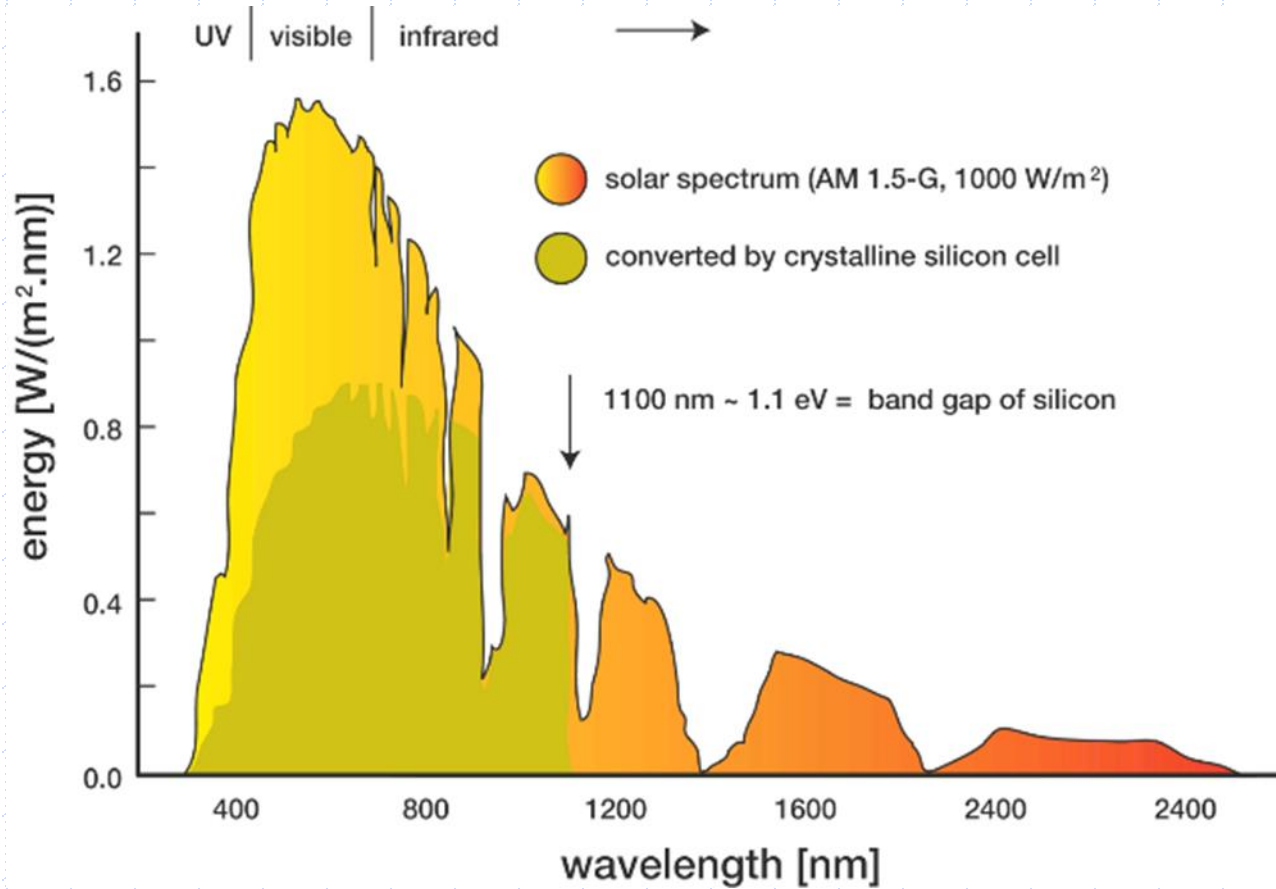


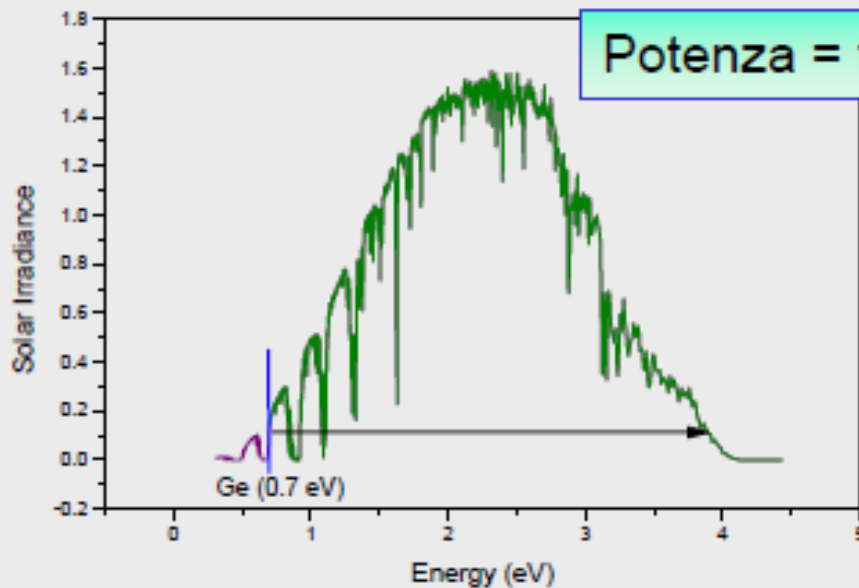
Figure 2. MPPT Algorithm Flow Diagram

Maximum
Power
Point
Tracking
(MPPT)
algorithm

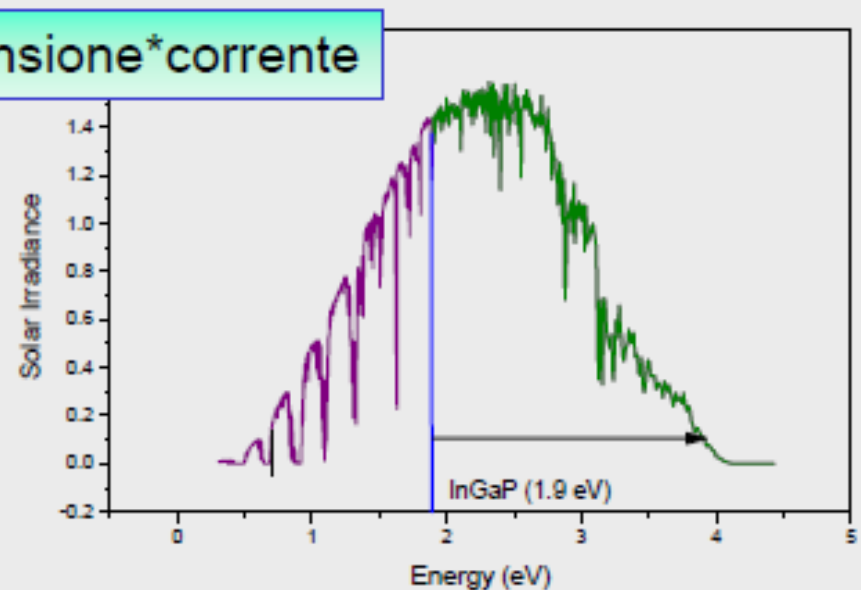
Spettro solare



Quale materiale semiconduttore ?



Alta corrente ma basso voltaggio



Alta tensione ma bassa corrente

materiale a basso energy gap:
alta corrente, ma bassa tensione
di uscita e dissipazione di
energia in calore

materiale ad alto energy gap:
alta tensione di uscita ma
prelievo di una ridotta
porzione dello spettro:
bassa corrente

Efficienza di una cella fotovoltaica

In termini molto generali, per una cella in Si monocristallino

- il 25% dell'energia incidente ha $\lambda > 1.1 \mu\text{m}$ e viene persa perchè non genera coppie e-h (IR)

($E < E_g(\text{Si}) = 1.1 \text{ eV}$)

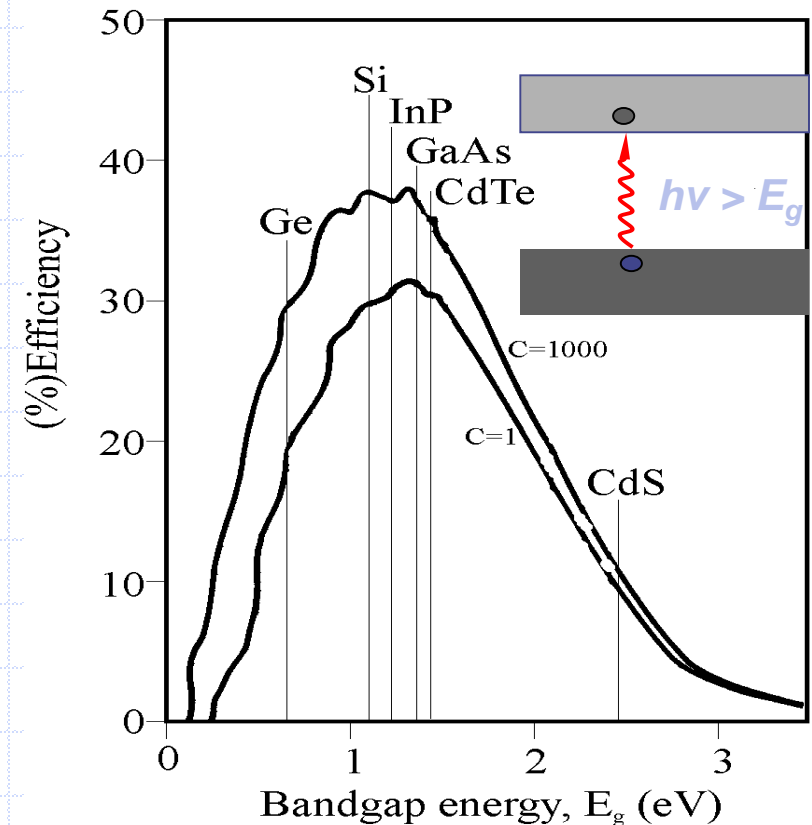
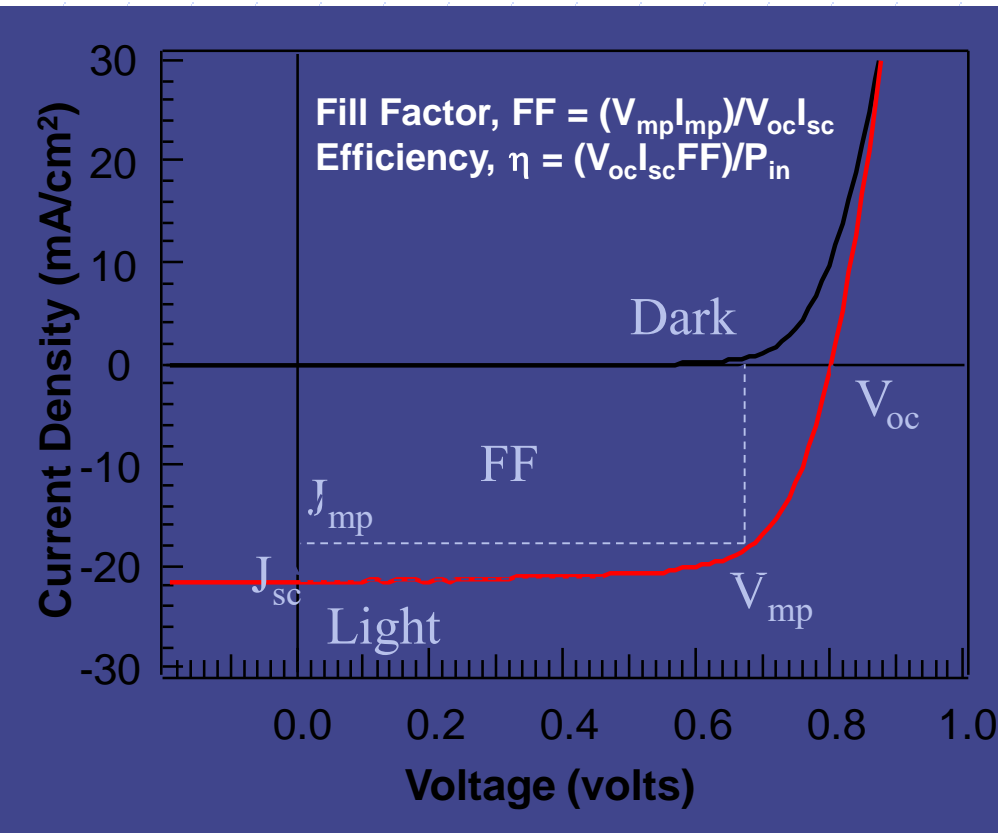
- il 40% delle coppie e-h generate viene perso per ricombinazione superficiale (UV)

- il 10-20% dei fotoni incidenti viene comunque perso per riflessione nonostante la presenza di uno *strato antiriflesso* superficiale

- il processo di generazione fotovoltaica ha una resa inferiore al 100%

A temperatura ambiente i valori medi di efficienza per celle solari in Si monocristallino sono dell'ordine del 25%

The Impact of Band Gap on Efficiency



- ◆ Efficiency, $\eta = (V_{oc} I_{sc} FF) / P_{in}$ $V_{oc} \propto E_g$, $I_{sc} \propto \#$ of absorbed photons
- ◆ Decrease E_g , absorb more of the spectrum
- ◆ But not without sacrificing output voltage

Best Research-Cell Efficiencies

