

Giunzione p-n e conversione fotovoltaica

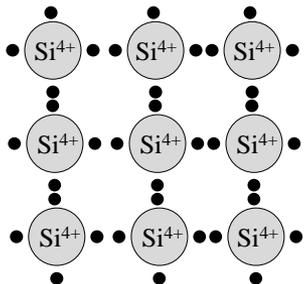
Proprietà dei semiconduttori (1)

	I	II											III	IV	V	VI	VII	VIII	
1	H																		He
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
6	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	

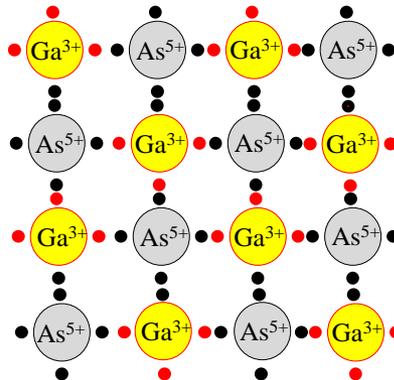
I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII : gruppo; numero di elettroni di valenza

1, 2, 3, 4, 5, 6 : livello energetico (periodo)

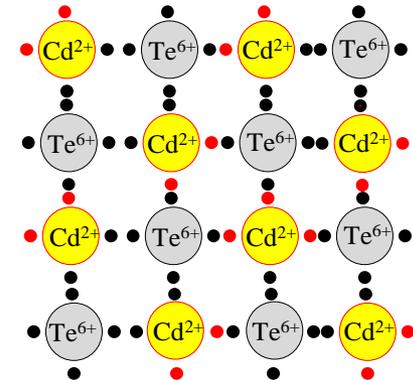
In un cristallo di un **semiconduttore** ogni elettrone del livello energetico più esterno forma un legame covalente e ciascun nucleo atomico è circondato da otto elettroni di valenza



Si: silicio



GaAs: arseniuro di gallio



TeCd: tellururo di cadmio

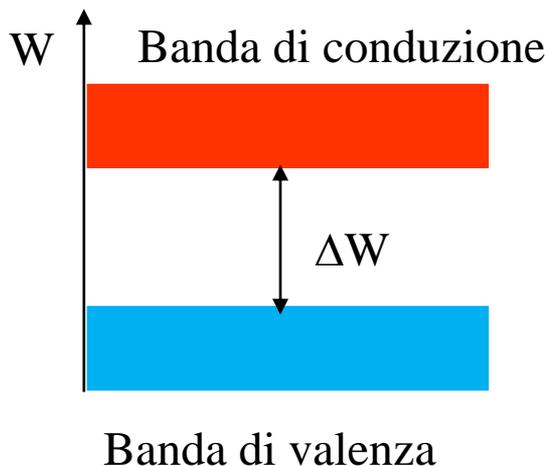
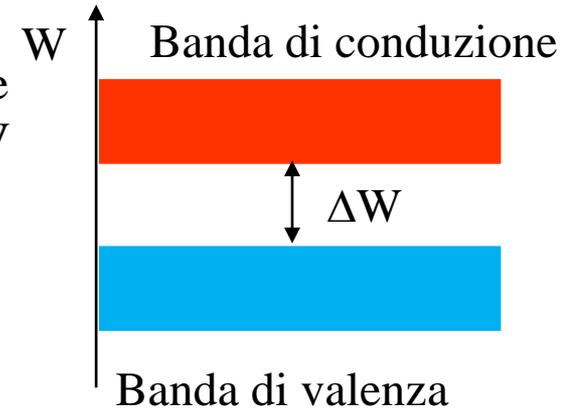
Proprietà dei semiconduttori (2)

In un materiale semiconduttore i livelli energetici disponibili per gli elettroni più esterni sono divisi in due bande: banda di valenza, banda di conduzione.

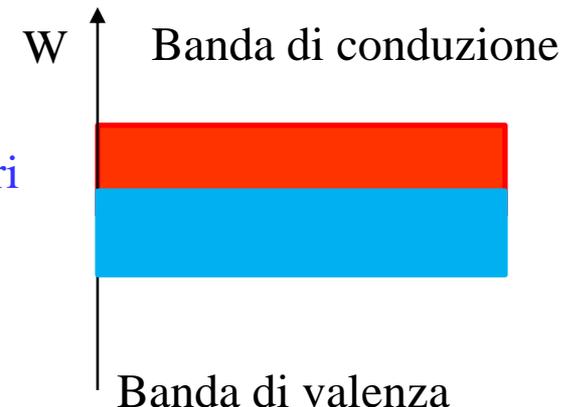
- Tra la banda di valenza e quella di conduzione è presente una banda proibita di ampiezza ΔW non superiore a 3 eV ($1 \text{ eV} = 1.6019 \times 10^{-19} \text{ J}$).

Si: $\Delta W = 1.12 \text{ eV}$; AsGa: $\Delta W = 1.42 \text{ eV}$, Ge: $\Delta W = 0.7 \text{ eV}$

- La stessa situazione si ritrova nei **materiali isolanti** ma l'ampiezza della banda proibita è molto grande ($> 3 \text{ eV}$), diamante: 7.3 eV

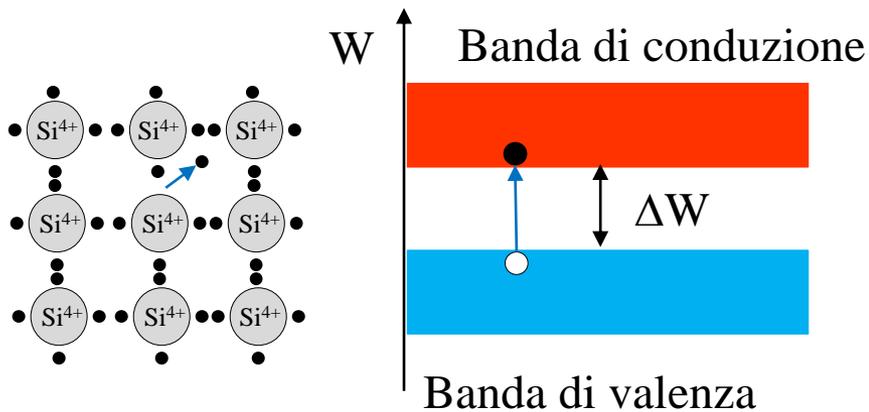


- Nei **materiali conduttori** non esiste la banda proibita

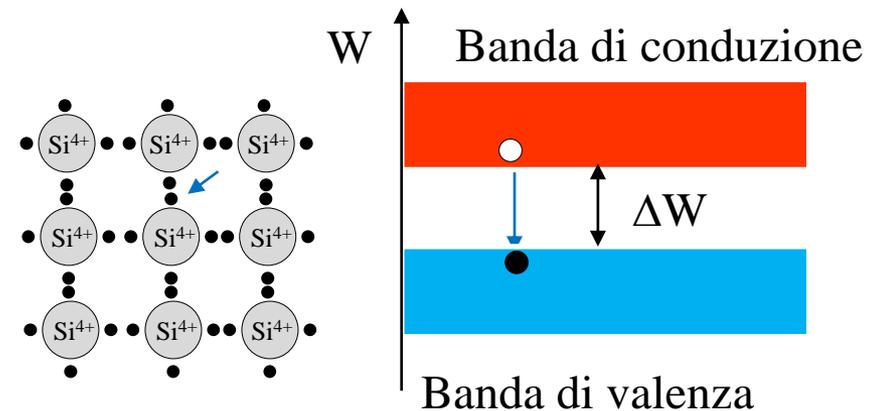


Proprietà dei semiconduttori (3)

- Alla temperatura di 0 K tutti gli elettroni nel livello energetico esterno sono impegnati in un legame covalente; la loro energia è compresa nella banda di valenza e tutti i possibili livelli energetici nella banda di valenza sono occupati.
- Al crescere della temperatura l'agitazione termica può fornire ad un elettrone impegnato in un legame covalente, con energia compresa nella banda di valenza, una quantità di energia superiore a ΔW ; l'elettrone assume una energia compresa nella banda di conduzione ed è libero di muoversi nel reticolo cristallino. Contemporaneamente si è liberato un livello energetico nella banda di valenza.
- L'elettrone nella banda di conduzione può cedere la sua energia in eccesso alla banda di valenza e tornare ad essere impegnato in un legame covalente



Formazione di una coppia elettrone-lacuna



Ricombinazione di una coppia elettrone-lacuna

Proprietà dei semiconduttori (4)

- Il prodotto della densità volumetrica degli elettroni liberi (nella banda di conduzione) (n_n) e delle lacune (n_p), all'equilibrio termico, dipende dalla temperatura (**legge dell'azione di massa**)

$$n_n n_p = N_0^2 T^3 e^{-\frac{\Delta W}{kT}}$$

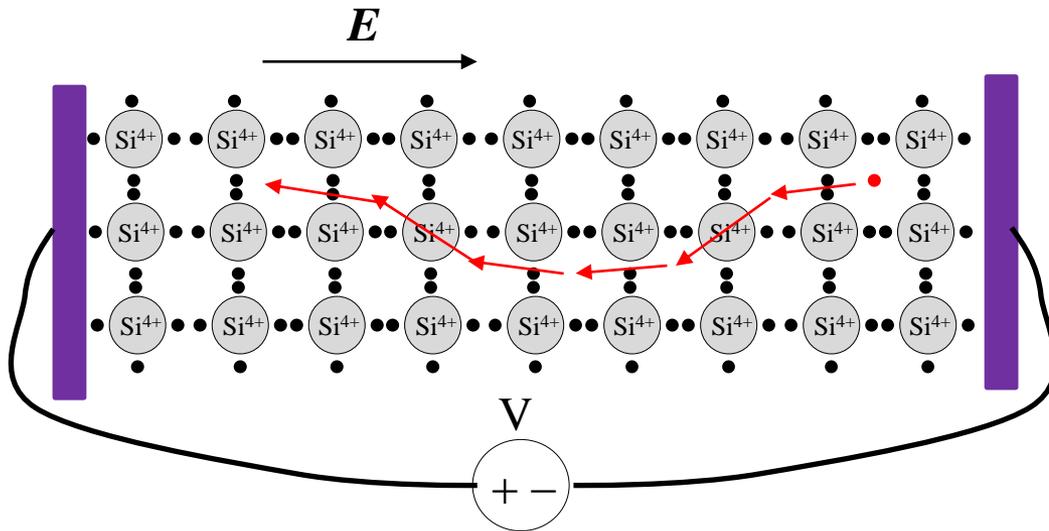
- Il valore dei parametri N_0 e ΔW dipende dal materiale.
- In un semiconduttore puro (semiconduttore intrinseco) la densità volumetrica degli elettroni liberi è uguale a quella delle lacune

$$n_n = n_p = N_0 \sqrt{T^3} e^{-\frac{\Delta W}{2kT}}$$

- Per il Si intrinseco $N_0 \cong 7.1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $\Delta W = 1.12 \text{ eV}$, a 300 K $n_n = n_p \cong 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$
- La legge dell'azione di massa vale anche quando nel semiconduttore sono presenti delle impurezze

Proprietà dei semiconduttori (5)

- Gli elettroni nella banda di conduzione, in presenza di un campo elettrico (E) imposto dall'esterno si muovono, nel verso opposto a quello del campo elettrico, con una velocità di drift (v_n) proporzionale al campo elettrico; si ha quindi una densità di corrente (J_n) che dipende dalla densità volumetrica (n_n) degli elettroni nella banda di conduzione

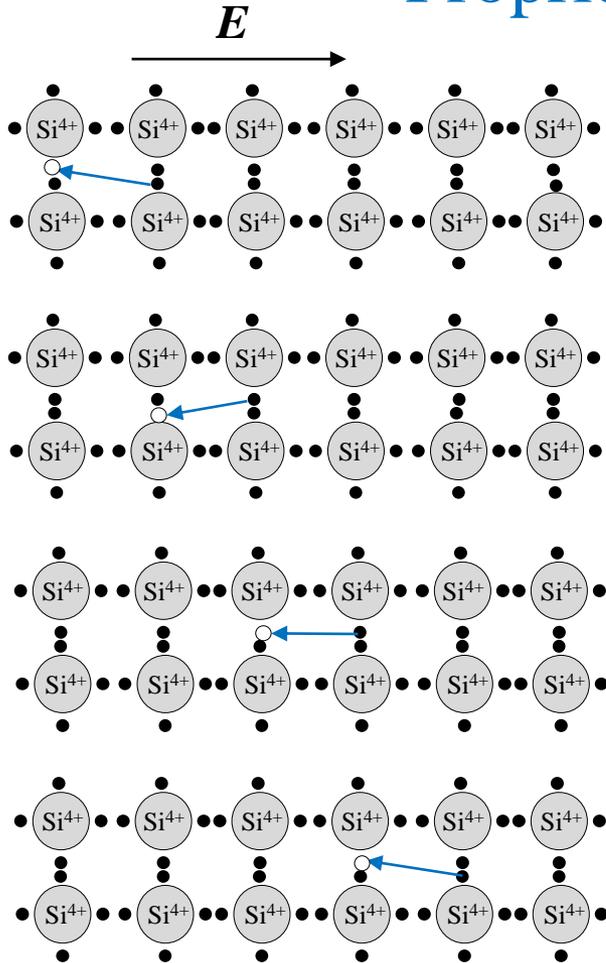


$$v_n = -\mu_n E$$

μ_n = mobilità degli elettroni

$$J_n = en_n \mu_n E$$

Proprietà dei semiconduttori (6)



- Gli elettroni nella banda di valenza, in presenza di un campo elettrico (E) imposto dall'esterno, si muovono, sempre in direzione opposta a quella del campo elettrico, occupando le lacune presenti nelle vicinanze
- Il moto degli elettroni di valenza è equivalente al moto delle lacune, supposte cariche positivamente, nel verso del campo elettrico, con una velocità di drift (v_p) proporzionale al campo elettrico; si ha quindi una densità di corrente (J_p) che dipende dalla densità volumetrica (n_p) delle lacune
- La mobilità delle lacune è minore di quella degli elettroni liberi (nel Si $\mu_p \cong 450 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $\mu_n \cong 1400 \text{ cm}^2/\text{Vs}$)

$$v_p = \mu_p E$$

μ_p = mobilità delle lacune

$$J_p = e n_p \mu_p E$$

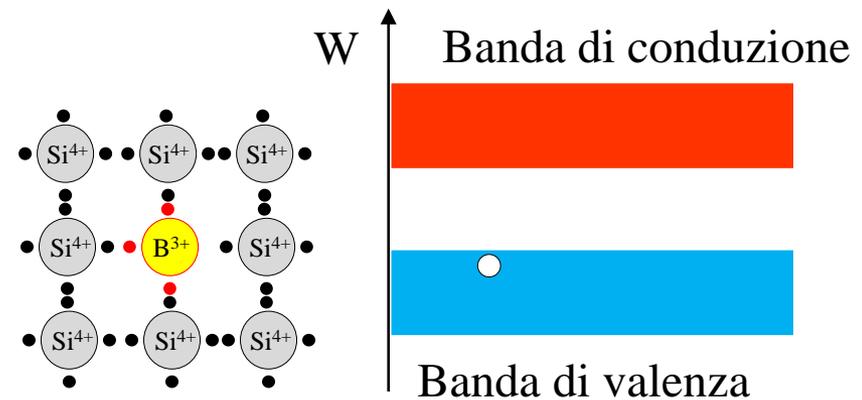
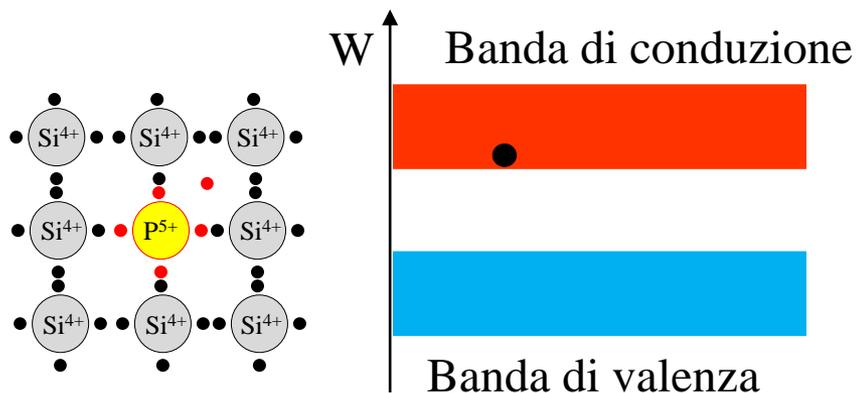
- I semiconduttori intrinseci (puri) sono dei cattivi conduttori alle basse temperature e la loro conducibilità elettrica aumenta all'aumentare della temperatura.

Proprietà dei semiconduttori (7)

Per aumentare la conducibilità elettrica dei semiconduttori si ricorre al loro drogaggio, cioè alla sostituzione di alcuni atomi del reticolo cristallino con atomi aventi un diverso numero di elettroni di valenza.

- Drogaggio di **tipo n**: vengono inseriti nel reticolo atomi (chiamati atomi donatori) aventi un numero maggiore di elettroni di valenza
- Drogaggio di **tipo p**: vengono inseriti nel reticolo atomi (chiamati atomi accettori) aventi un numero minore di elettroni di valenza.

Nel caso del silicio (IV gruppo) il drogaggio di tipo n si ottiene inserendo nel reticolo atomi di elementi appartenenti al V gruppo (P, As, Sb), mentre il drogaggio di tipo-p si ottiene inserendo nel reticolo atomi di elementi appartenenti al III gruppo (B, Al, Ga, In)



- Il drogaggio di **tipo n** rende disponibili elettroni nella banda di conduzione, cui non corrispondono delle lacune, mantenendo la neutralità del semiconduttore

- Il drogaggio di **tipo p** rende disponibili lacune nella banda di valenza, cui non corrispondono degli elettroni liberi, mantenendo la neutralità del semiconduttore

Proprietà dei semiconduttori (8)

Il drogaggio non modifica il valore del prodotto delle densità degli elettroni liberi e delle lacune che rimane quello del materiale intrinseco e quindi funzione solo della temperatura (legge dell'azione di massa); segue che:

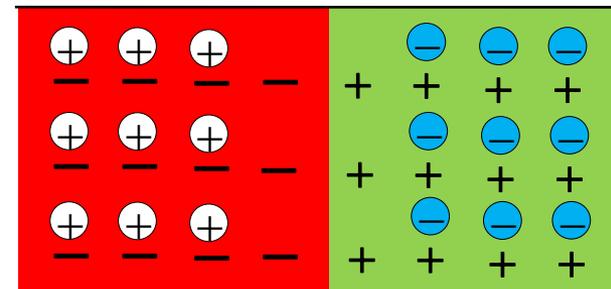
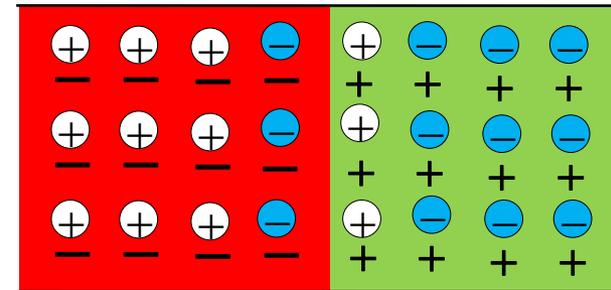
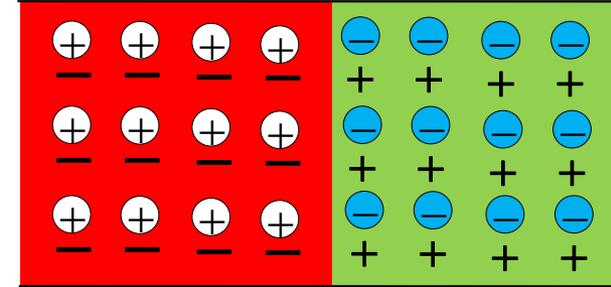
- Nel silicio drogato con drogaggio di **tipo n**, (densità degli atomi donatori $> 10^{13} \text{ cm}^{-3}$), la densità volumetrica degli elettroni liberi è maggiore di quella delle lacune; in presenza di un campo elettrico esterno si origina una densità di corrente elettrica, dovuta principalmente al moto degli elettroni liberi (portatori di carica maggioritari nel silicio di tipo n)
- Nel silicio drogato con drogaggio di **tipo p** (densità degli atomi accettori $> 10^{13} \text{ cm}^{-3}$), la densità volumetrica delle lacune è maggiore di quella degli elettroni liberi; in presenza di un campo elettrico esterno si origina una densità di corrente elettrica, dovuta principalmente al moto delle lacune (portatori di carica maggioritari nel silicio di tipo p)

Giunzione p-n (1)

Una giunzione p-n è ottenuta drogando in maniera differente due regioni contigue di semiconduttore



- Nella regione con drogaggio di tipo p la concentrazione delle lacune è maggiore di quella presente nella regione con drogaggio di tipo n
- Nella regione con drogaggio di tipo n la concentrazione degli elettroni liberi (nella banda di conduzione) è maggiore di quella presente nella regione con drogaggio di tipo p
- Sia gli elettroni liberi che le lacune, a causa della concentrazione non uniforme, tendono a muoversi nel verso opposto a quello del gradiente di concentrazione: le lacune tendono a migrare dalla regione p a quella n, gli elettroni liberi da quella n a quella p
- Nella regione della giunzione, si formano due zone, una con densità di carica negativa nella regione di tipo p ed una con densità di carica positiva in quella di tipo n, con conseguente formazione di un campo elettrico E_{int} diretto dalla regione di tipo n a quella di tipo p. In tali zone, a causa della ricombinazione, la concentrazione degli elettroni liberi e delle lacune risulta ridotta (regione di svuotamento)



Giunzione p-n (2)

- Il campo elettrico interno ostacola il moto delle cariche maggioritarie dovuto al gradiente di concentrazione (le lacune dalla regione di tipo p a quella di tipo n, gli elettroni liberi dalla regione di tipo n a quella di tipo p).
- Il campo elettrico interno favorisce il moto delle cariche minoritarie che si formano nella regione di tipo p e nella regione di tipo n per l'agitazione termica (gli elettroni liberi dalla regione di tipo p a quella di tipo n, le lacune dalla regione di tipo n a quella di tipo p)
- All'equilibrio, è presente una tensione ΔV_{int} ai capi della regione di svuotamento e la densità di corrente è nulla.

$$J_{D,n} = e D_n \nabla n_n \quad J_{E,n} = e n_n \mu_n E \quad J_{D,n} + J_{E,n} = 0$$

$$J_{D,p} = -e D_p \nabla n_p \quad J_{E,p} = e n_p \mu_p E \quad J_{D,p} + J_{E,p} = 0$$

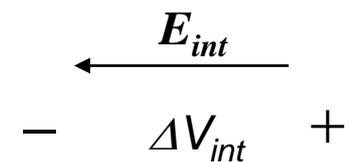
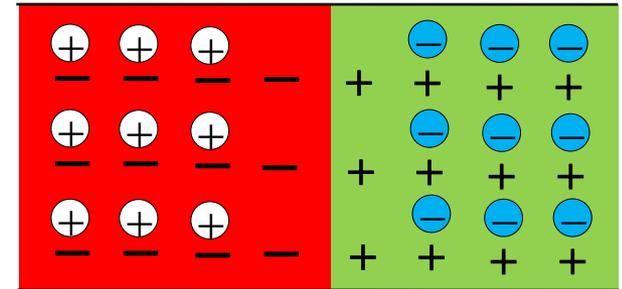
$J_{D,n}$ = densità di corrente (di diffusione) dovuta al moto degli elettroni liberi causato dal gradiente di concentrazione,

D_n = coefficienti di diffusione

$J_{D,p}$ = densità di corrente (di diffusione) dovuta al moto delle lacune causato dal gradiente di concentrazione, D_p = coefficienti di diffusione

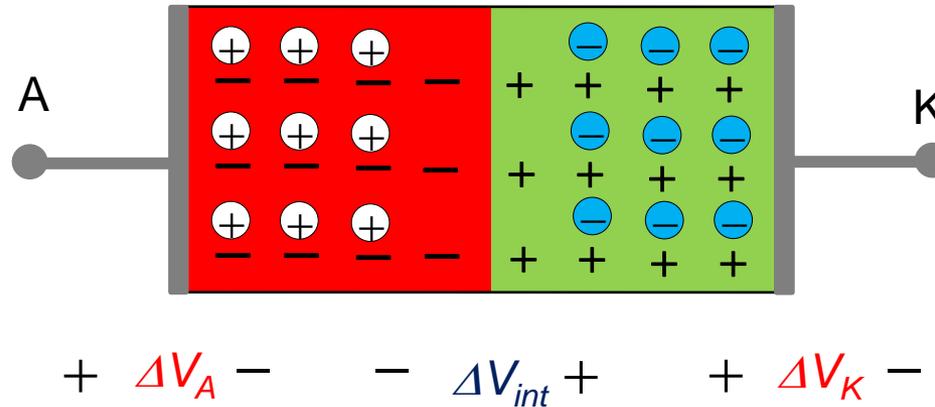
$J_{E,n}$ = densità di corrente (di deriva) dovuta al moto degli elettroni liberi causato dal campo elettrico

$J_{E,p}$ = densità di corrente (di deriva) dovuta al moto delle lacune causato dal campo elettrico



Giunzione p-n (3)

Se si collega un terminale metallico (A), detto anodo, alla regione di tipo p ed un terminale metallico (K), detto catodo, alla regione di tipo n, si ottiene un dispositivo a due terminali che può essere collegato ad un circuito esterno ed essere attraversato da una corrente.



- Al contatto tra elettrodo e semiconduttore nasce una tensione; le tensioni di contatto fanno sì che, in assenza di cause esterne (collegamento ad un generatore di tensione, interazione con la radiazione luminosa), non sia presente tensione fra anodo e catodo.

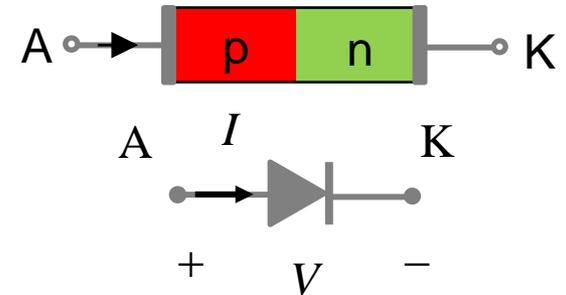
$$V_{AK} = \Delta V_A - \Delta V_{int} + \Delta V_K = 0$$

- Se la concentrazione del drogaggio nella regione degli elettrodi è sufficientemente elevata le tensioni di contatto rimangono costanti anche quando nel dispositivo passa una corrente.

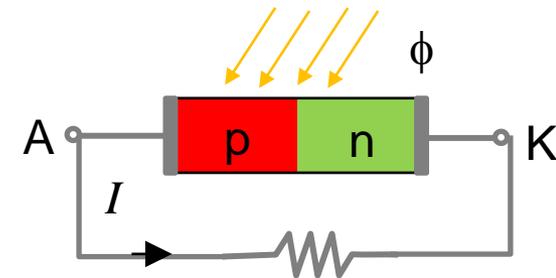
Giunzione p-n (4)

Il bipolo ottenuto da una giunzione p-n, con opportune caratteristiche costruttive (geometriche e fisiche), è in grado di realizzare tre diverse funzioni che trovano larga applicazione nei dispositivi elettrici.

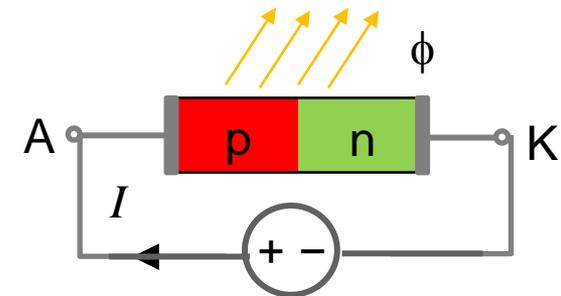
➤ Un **diodo** è un componente che impone una caratteristica fortemente non lineare fra la tensione applicata dall'esterno e la corrente che lo attraversa e viene largamente usato nei convertitori elettronici di potenza. Nel diodo non avviene nessuno scambio di energia con la radiazione elettromagnetica.



➤ Una **cella fotovoltaica** realizza la conversione diretta di parte della energia della radiazione elettromagnetica assorbita, proveniente dall'ambiente, in energia elettrica in corrente continua che viene ceduta ad un carico esterno.



➤ Un diodo ad emissione di luce (**LED: Light Emitting Diode**) realizza la conversione diretta di gran parte della energia elettrica fornita da un generatore esterno in energia luminosa, ceduta all'ambiente sotto forma di radiazione elettromagnetica visibile.

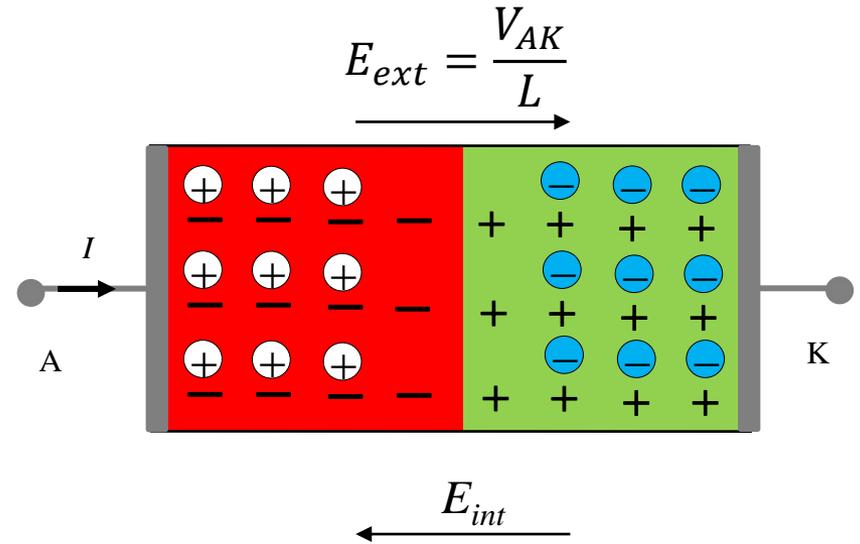


Diodo (1)

In **assenza di interazione con la radiazione elettromagnetica** il dispositivo si comporta in maniera differente a seconda del verso della tensione applicata.

$$V_{AK} > 0$$

- La tensione imposta dall'esterno agisce concordemente all'azione del gradiente di concentrazione delle cariche maggioritarie.
- Il campo elettrico esterno ha verso opposto al campo elettrico interno: la regione di svuotamento si riduce ed il campo elettrico interno non è più in grado di opporsi al moto delle cariche maggioritarie

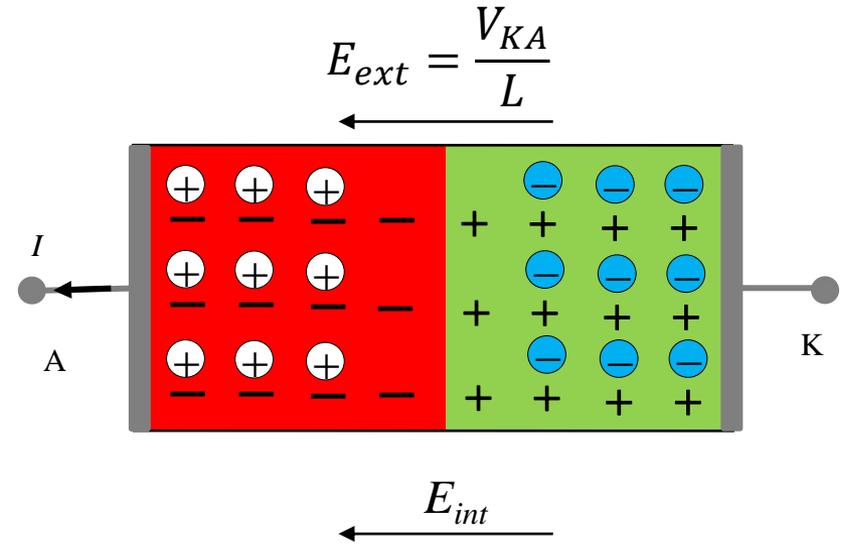


- Il dispositivo è attraversato da una corrente I (diretta) dovuta al moto delle cariche maggioritarie: le lacune si muovono da anodo a catodo, gli elettroni liberi da catodo ad anodo e a piccoli incrementi di V_{AK} seguono grandi incrementi della corrente I (da anodo a catodo).

Diodo (2)

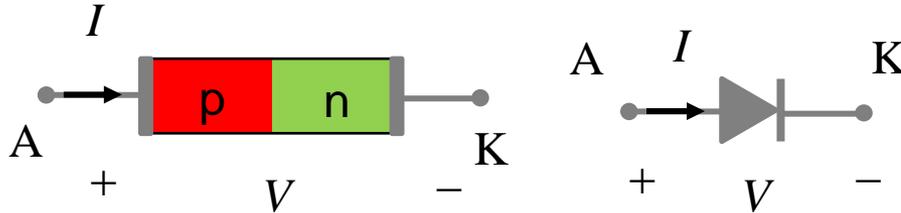
$$V_{AK} < 0$$

- La tensione imposta dall'esterno agisce in opposizione all'azione del gradiente di concentrazione delle cariche maggioritarie.
- Il campo elettrico esterno ha verso concorde con il campo elettrico interno: la regione di svuotamento si allarga ed il moto delle cariche elettriche maggioritarie è impedito.
- Il dispositivo è attraversato da una corrente I dovuta al moto delle cariche minoritarie (elettroni liberi nella regione di tipo p e lacune nella regione di tipo n): gli elettroni liberi che si generano per agitazione termica si muovono sotto l'azione del campo elettrico da anodo a catodo, le lacune che si generano per agitazione termica si muovono sotto l'azione del campo elettrico da catodo ad anodo.
- Essendo la concentrazione delle cariche minoritarie molto minore di quella delle cariche maggioritarie la corrente (inversa) che attraversa il dispositivo da catodo ad anodo è molto minore di quella (diretta) che lo attraversa da anodo a catodo quando $V_{AK} > 0$ e a grandi incrementi di V_{KA} seguono piccole variazioni della corrente I .



Diodo (3)

Il dispositivo costituisce un **diodo**. Trascurando la resistenza dovuta al moto delle cariche nei terminali e nel dispositivo, al di fuori della regione di giunzione, risulta

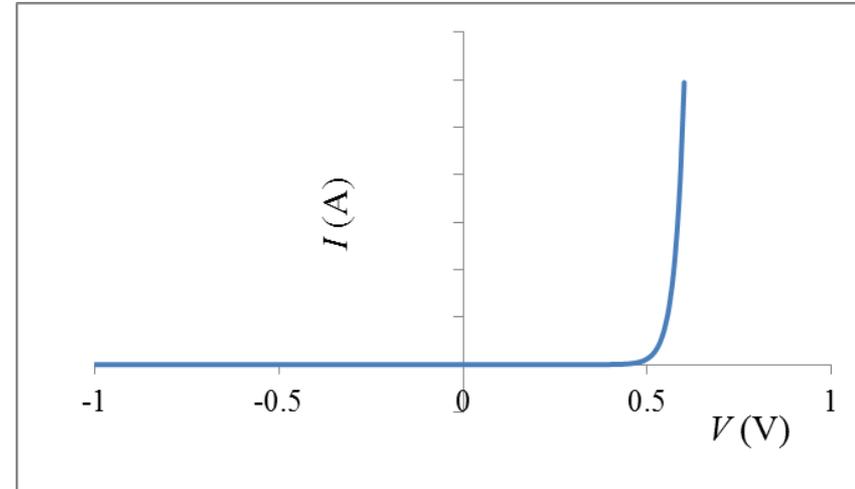


$$I = I_S \left[e^{\frac{V}{mV_T}} - 1 \right] \quad \text{se } V > -V_{RB}$$

I_S = Corrente di saturazione inversa: dipende dal drogaggio, dal tipo di semiconduttore e dalle dimensioni.

V_{RB} = Tensione di rottura (breakdown) inversa

m è un coefficiente con valore compreso tra 1 e 2 che dipende dal semiconduttore



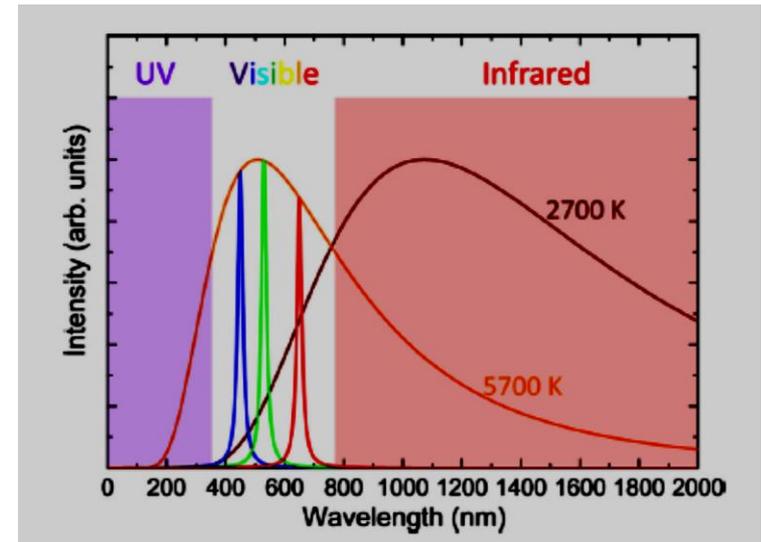
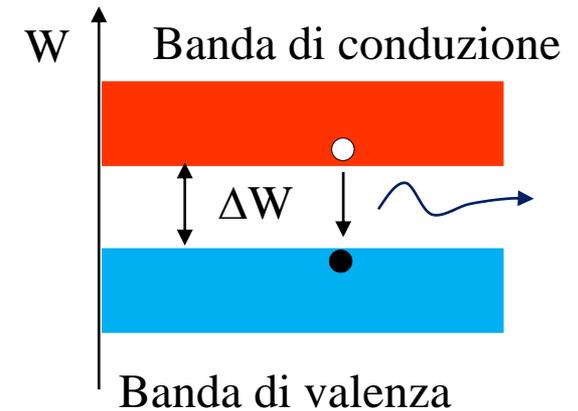
$$V_T = \frac{kT}{e} \quad \text{Tensione termica, a } T = 300 \text{ K} \quad V_T = \frac{1.38 \times 10^{-23} \times 300}{1.602 \times 10^{-19}} = 2.58 \times 10^{-2} \text{ (V)}$$

- Quando la tensione è negativa il diodo è interdetto (spento/aperto) e viene attraversato solo da una debole corrente inversa (da catodo ad anodo); il valore limite di I per V tendente a $-\infty$ risulta pari ad $-I_S$
- Quando la tensione è positiva la corrente cresce esponenzialmente producendo ai capi del diodo una caduta di tensione V che rimane praticamente costante pur variando molto la corrente (per il silicio il valore tipico della tensione in conduzione è circa 0.6 V)

Light Emitting Diode (LED)

I LED sono diodi (giunzione p-n) in cui, al passaggio della corrente elettrica, avvengono ricombinazioni elettrone-lacuna che producono emissione di fotoni aventi lunghezza d'onda nella banda della radiazione visibile dall'occhio umano.

- In un LED gran parte della potenza elettrica assorbita viene convertita in potenza trasportata dalla radiazione visibile
- Al contrario, in una lampada ad incandescenza, lo spettro della radiazione elettromagnetica emessa è quello di un corpo nero a una temperatura tale che la maggior parte della potenza trasmessa si trova nella regione dell'infrarosso e quindi non contribuisce alla illuminazione dell'ambiente ma solo al suo riscaldamento.



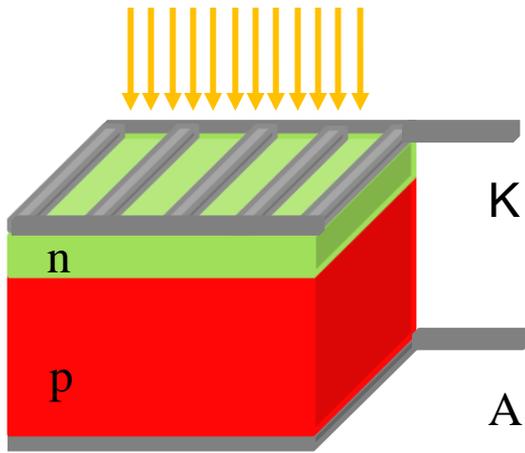
Dispositivi che utilizzano i LED

- Affinché il fotone emesso nella ricombinazione di un elettrone con una lacuna possa essere utilizzato per illuminare l'ambiente è necessario trattare opportunamente la superficie del dispositivo, altrimenti, a causa del valore elevato dell'indice di rifrazione del semiconduttore, rispetto a quello dell'aria, si avrebbe la riflessione verso il semiconduttore, fino al riassorbimento, di gran parte dei fotoni emessi.

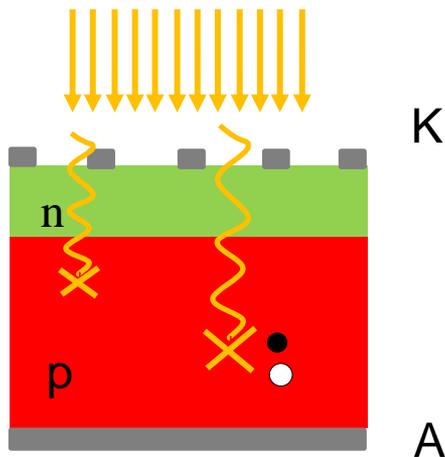
Per utilizzare, ai fini della illuminazione degli ambienti, la luce emessa da un dispositivo a LED è necessario che tale luce risulti bianca; ci sono due tipologie di dispositivi LED che emettono luce bianca:

- Nel dispositivo è presente un LED (InGaN) che emette luce blu che produce la fluorescenza di un materiale (fosforo) presente nel dispositivo, che a sua volta emette luce bianca (phosphor-converted).
- Nel dispositivo sono presenti più LED che emettono luce con diverse lunghezze d'onda; la luce risultante risulta bianca (color-mixed).
- I dispositivi a LED devono essere alimentati in corrente continua; vengono collegati alla rete in corrente alternata mediante un convertitore (raddrizzatore controllato) che è in grado di controllarne il funzionamento. La tecnologia si presta molto bene ad essere integrata in sistemi automatici.

Cella fotovoltaica (1)



Schema di principio di una cella fotovoltaica

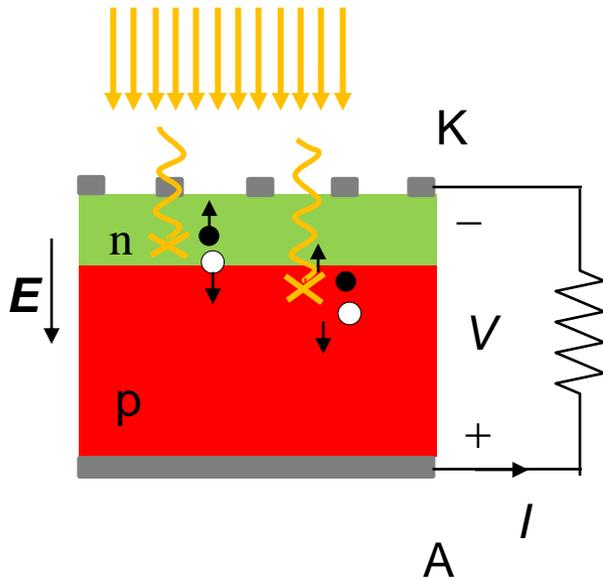


- Nella cella fotovoltaica si sfrutta l'energia che la radiazione incidente cede alla giunzione p-n. La cella fotovoltaica è quindi costruita in modo da massimizzare l'assorbimento della radiazione da parte della giunzione p-n.
- La parte esposta alla radiazione è la parte drogata con drogaggio di tipo n ed i collettori di corrente del catodo sono realizzati in modo da schermare la giunzione p-n dalla radiazione il meno possibile.
- La superficie collegata all'anodo, viceversa, è realizzata in modo da non lasciare sfuggire dalla giunzione p-n la radiazione raccolta al catodo.

Un fotone che viene assorbito dalla giunzione p-n cede alla giunzione la sua energia $E = h \nu$:

- Se $E < \Delta W$ (gap energetico fra la banda di conduzione e la banda di valenza) l'energia ceduta va ad aumentare l'agitazione termica degli atomi
- Se $E > \Delta W$ l'energia ceduta, oltre che aumentare l'agitazione termica degli atomi genera una coppia elettrone-lacuna (si rompe un legame covalente e si libera un elettrone con energia compresa nella banda di conduzione e contemporaneamente una lacuna nella banda di valenza)

Cella fotovoltaica (2)



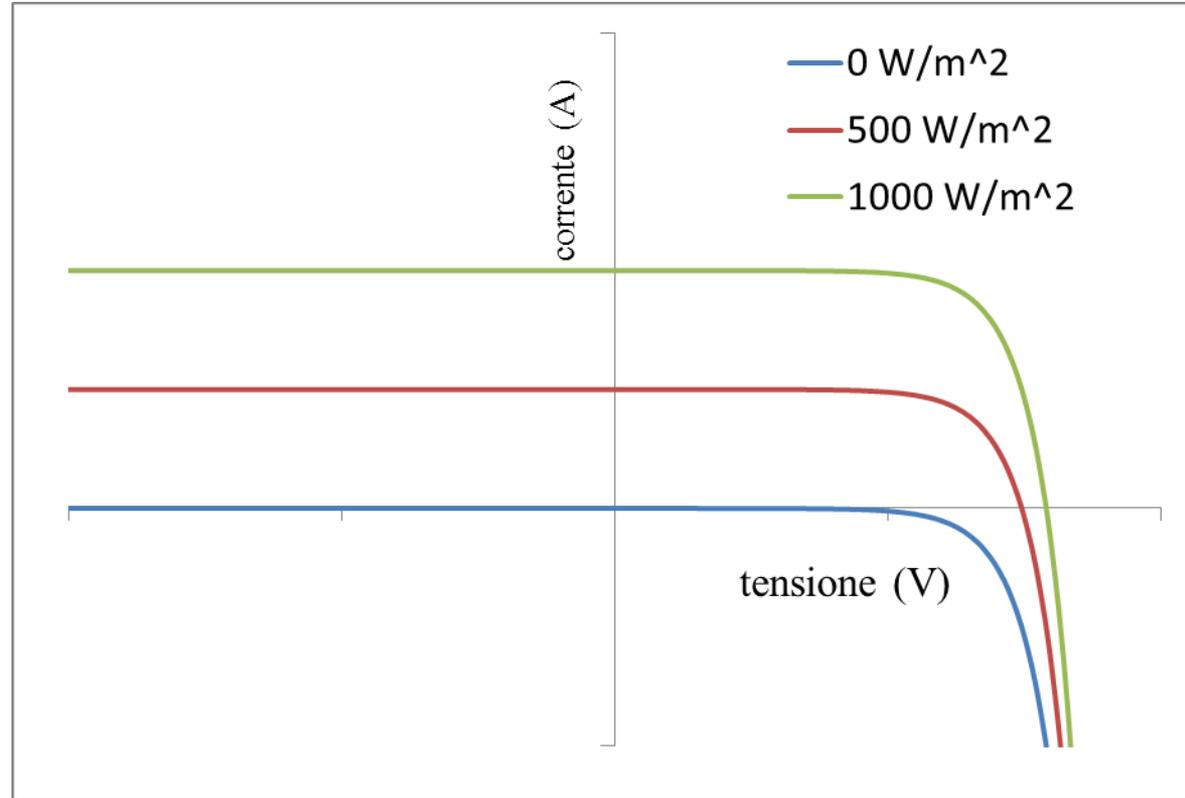
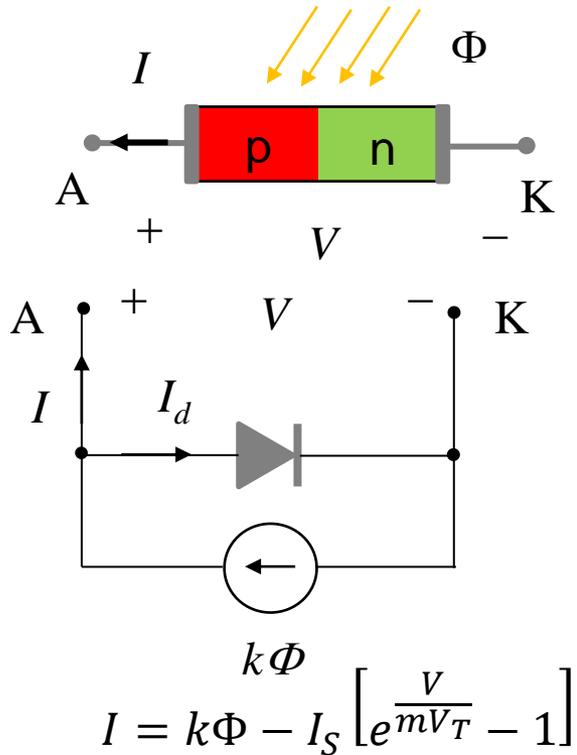
$$\eta = \frac{\int_{t_1}^{t_2} P(t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} P_{in}(t) dt}$$

P_{in} = potenza radiante
incidente sulla cella (W)

$P = V I$ = potenza elettrica
erogata al carico (W)

- Se la coppia elettrone-lacuna viene prodotta all'interno della regione di giunzione in cui è presente il campo elettrico (dovuto alla distribuzione di carica spaziale), l'elettrone e la lacuna si muovono, sotto l'azione del campo elettrico, rispettivamente verso il catodo (l'elettrone) e verso l'anodo (la lacuna).
- Se anodo e catodo sono collegati elettricamente ad un carico esterno, il moto degli elettroni e delle lacune prodotte costituisce una corrente (I) che attraversa la cella da catodo a anodo e si richiude sul carico cedendo al carico una potenza elettrica (P).
- La cella fotovoltaica realizza quindi la conversione diretta della energia radiante in energia elettrica. Il rendimento della cella (η) è il rapporto fra la energia elettrica ceduta al carico e l'energia radiante incidente sulla cella.
- Per ogni fotone che genera la coppia elettrone-lacuna, solo una frazione ΔW (gap energetico tra la banda di conduzione e la banda di valenza) può essere convertita in energia elettrica

Cella fotovoltaica (3)

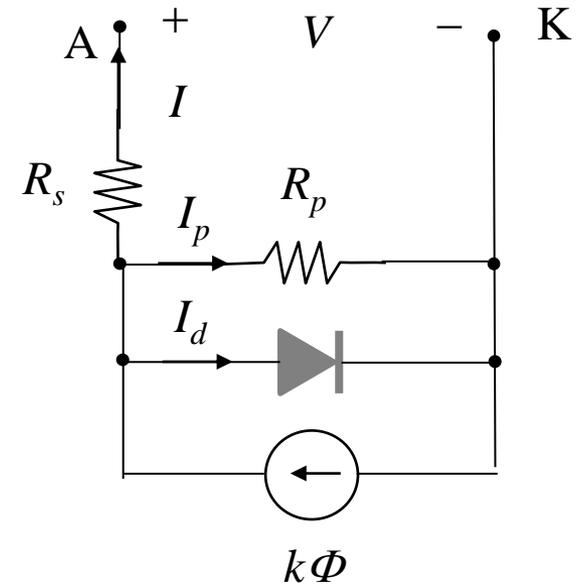


- La corrente elettrica dovuta alle coppie elettrone-lacuna è direttamente proporzionale alla densità di flusso della radiazione incidente sulla cella. La caratteristica della cella fotovoltaica si ottiene quindi da quella del diodo sottraendo la corrente generata dall'effetto fotovoltaico, ottenendo una curva per ogni valore di flusso.
- Dato che la cella deve funzionare da generatore si preferisce orientare la corrente positiva dal catodo verso l'anodo (invece che dall'anodo verso il catodo, come fatto nel caso del diodo)

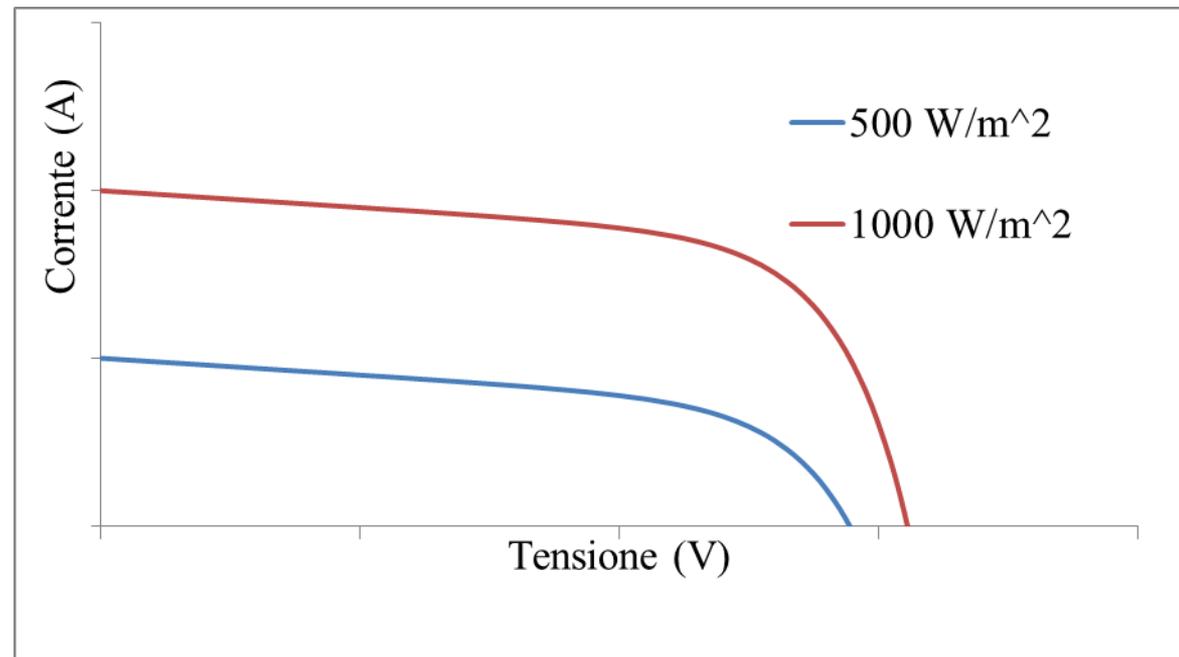
Cella fotovoltaica (4)

- Il modello standard della cella fotovoltaica prevede anche l'inserimento di una resistenza (R_s) che permette di modellare le perdite per effetto Joule dovute al passaggio della corrente dal semiconduttore ai terminali e di una resistenza (R_p) per modellare le perdite, sempre per effetto Joule, dovute alle correnti che attraversano la cella nelle regioni superficiali laterali.

$$I = k\Phi - I_S \left[e^{\frac{V+R_s I}{mV_T}} - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p}$$



Caratteristica elettrica di una cella fotovoltaica, a temperatura fissata, al variare dell'irraggiamento (mantenendo la temperatura costante e per dato AM)

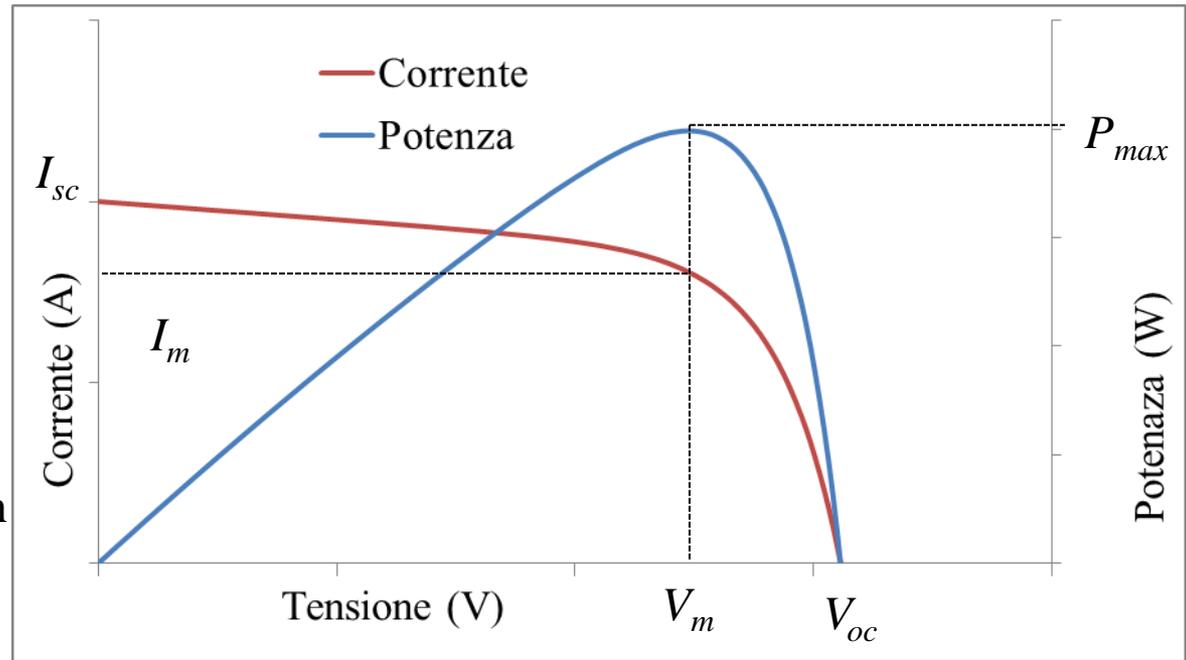


Cella fotovoltaica (5)

- Dalla caratteristica elettrica di una cella fotovoltaica può essere calcolata la curva della potenza elettrica erogata (P):

$$P = VI$$

- La cella fotovoltaica funziona da generatore per valori di tensione compresi tra 0 (condizioni di corto-circuito, in cui la corrente vale I_{sc}) ed un valore massimo (V_{oc}) detto tensione a vuoto

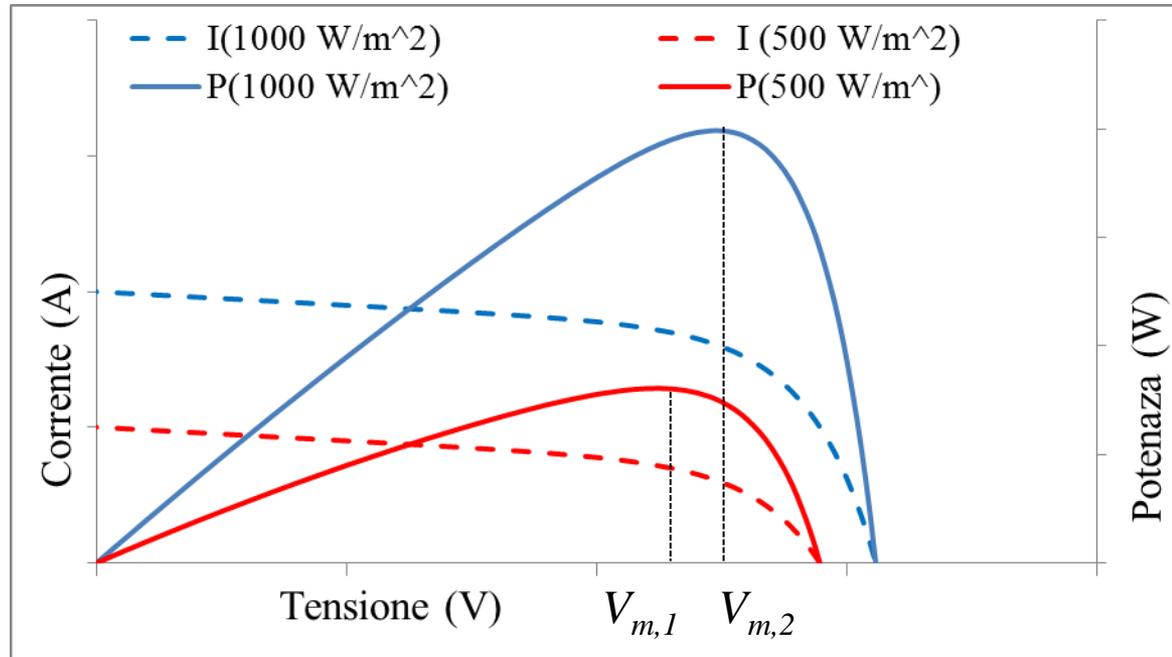


- La potenza elettrica erogata, risulta nulla sia in condizioni di funzionamento a vuoto che in cortocircuito e quindi raggiunge un massimo (P_{max}) in corrispondenza del valore V_m della tensione a cui corrisponde un valore I_m della corrente.
- È particolarmente importante fare funzionare la cella alla tensione V_m di massima potenza per massimizzare l'energia elettrica prodotta

$$FF = \text{fill factor} \quad FF = \frac{P_{max}}{V_{oc}I_{sc}} = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}}$$

Cella fotovoltaica (6)

- Le condizioni di massima potenza dipendono dall'irraggiamento: al crescere dell'irraggiamento aumenta la corrente di cortocircuito (effetto principale) ed aumenta (leggermente) la tensione a vuoto, corrispondentemente aumenta la tensione di massima potenza



Caratteristica elettrica e curva della potenza di una cella fotovoltaica al variare dell'irraggiamento a **temperatura costante**

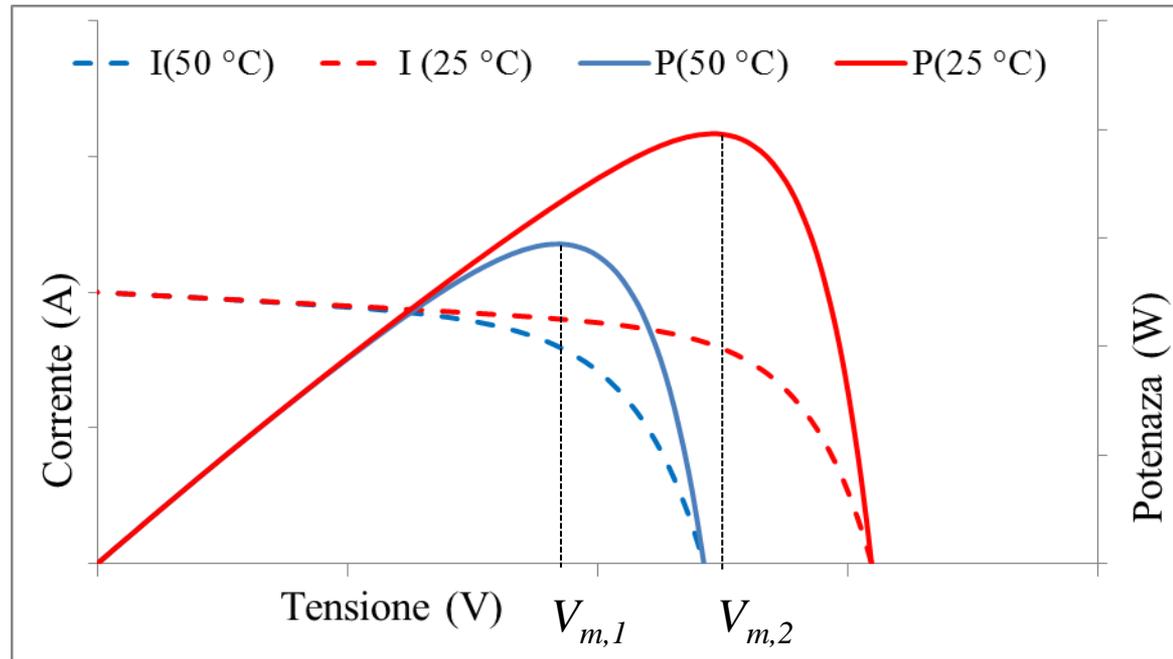
Cella fotovoltaica (7)

- Al variare della temperatura, mantenendo costante l'irraggiamento, varia la corrente di saturazione che cresce al crescere della temperatura.
- D_n, D_p = coefficienti di diffusione rispettivamente degli elettroni liberi e delle lacune
- N_A, N_D = densità rispettivamente degli accettori e dei donatori
- L_n, L_p = lunghezze di diffusione rispettivamente degli elettroni liberi e delle lacune (distanza percorsa prima di ricombinarsi)

$$I_S = A e N_0^2 e^{-\frac{\Delta W}{kT}} \left(\frac{D_n}{L_n N_A} + \frac{D_p}{L_p N_D} \right)$$

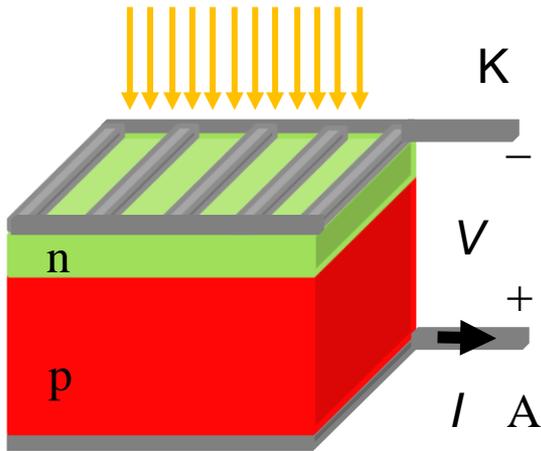
Al crescere della temperatura

- V_{oc} cala linearmente con la temperatura
- I_{sc} è quasi indipendente dalla temperatura
- La potenza massima cala al crescere della temperatura
- La tensione di massima potenza cala al crescere della temperatura.



Caratteristica elettrica e curva della potenza di una cella fotovoltaica al variare della temperatura a **irraggiamento costante**

Perdite in una cella al silicio monocristallino (1)



- Il rendimento di una cella fotovoltaica (η) è pari al rapporto tra la energia elettrica prodotta (ΔE_{el}) in un intervallo di tempo (Δt) e l'energia (ΔE_{ϕ}) che incide sulla cella trasportata dalla radiazione solare, nello stesso intervallo di tempo. Considerando il funzionamento in condizioni stazionarie il rendimento della cella è pari al rapporto tra la potenza elettrica generata (VI) ed il flusso della radiazione incidente (ΦA ; A = area della cella esposta alla radiazione solare avente una densità di flusso Φ).

$$\eta = \frac{\Delta E_{el}}{\Delta E_{\phi}} = \frac{VI}{\Phi A}$$

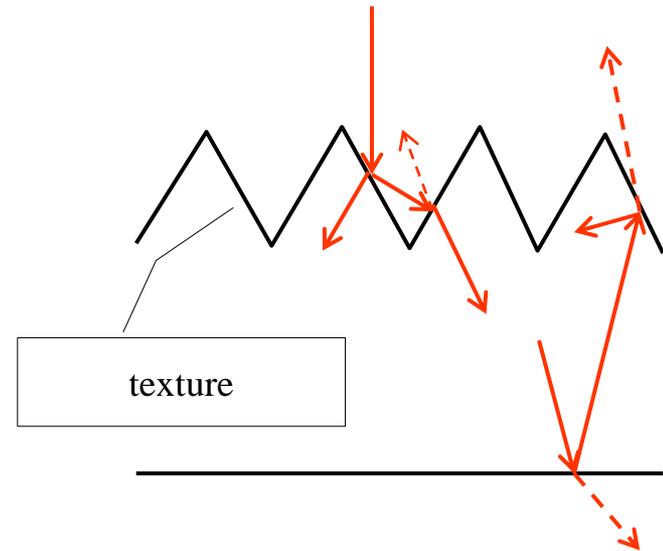
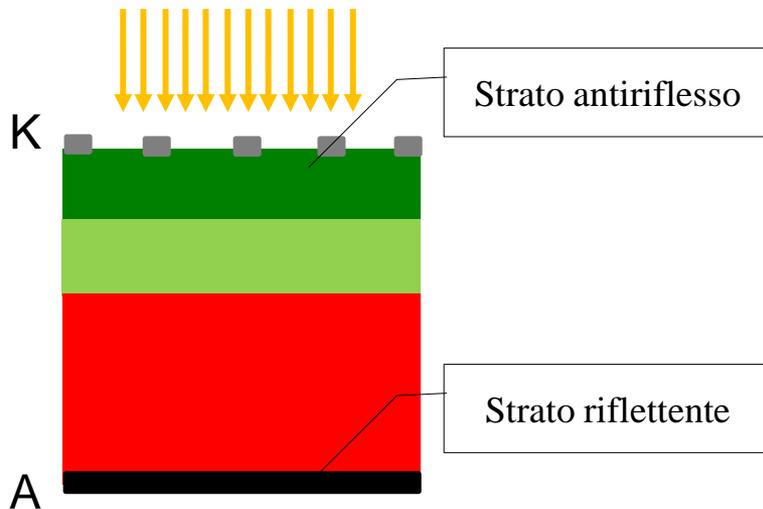
Una cella al silicio monocristallino (c-Si) commerciale ha un rendimento abbastanza basso (**migliore rendimento per celle in laboratorio 26.7 %**) a causa dei seguenti fenomeni:

- Non assorbimento dei fotoni incidenti.
- Energia dei fotoni incidenti inferiore all'energy gap ΔW e conseguente mancata formazione della coppia elettrone-lacuna (transmission losses).
- Energia dei fotoni incidenti superiore all'energy gap ΔW e conseguente trasformazione in calore della energia assorbita in eccesso a ΔW (thermalization losses).
- Ricombinazione delle coppie elettrone-lacuna prima di raggiungere gli elettrodi della cella.
- Dissipazione per effetto Joule dovuta al passaggio della corrente dalla cella agli elettrodi

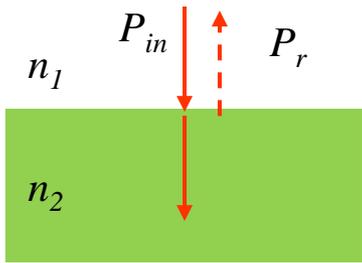
Perdite in una cella al silicio monocristallino (2)

Per ridurre le perdite per non assorbimento dei fotoni:

- La superficie esposta alla radiazione viene coperta con uno strato anti-riflesso
- La superficie esposta alla radiazione viene sottoposta a texturing
- La superficie posteriore (opposta a quella esposta alla radiazione solare) viene coperta da un materiale riflettente (l'alluminio funge sia da materiale riflettente che da materiale conduttore per il contatto elettrico).
- I contatti metallici al catodo sono «annegati» nel semiconduttore in modo da non ombreggiare la superficie esposta (è possibile realizzare celle in cui tutti i contatti elettrici si trovano sulla superficie non esposta alla radiazione solare)

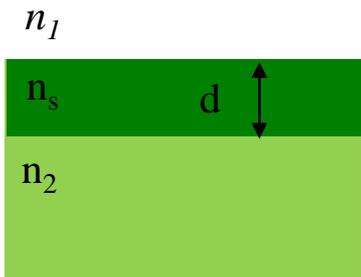


Perdite in una cella al silicio monocristallino (3)



$$n = \frac{c_{\text{mezzo}}}{c_{\text{vuoto}}}$$

$$R = \frac{P_r}{P_{in}} = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2$$



$$R = \frac{P_r}{P_{in}} = \left(\frac{n_s^2 - n_1 n_2}{n_s^2 + n_1 n_2} \right)^2$$

$$d = \frac{\lambda}{4n_s} (2m + 1) \quad m = 0, 1, \dots$$

- Quando la radiazione elettromagnetica incide perpendicolarmente su una superficie, passando da un mezzo con indice di rifrazione n_1 ad uno con indice di rifrazione n_2 , in parte viene riflessa. Il fattore di riflessione R , rapporto tra la potenza riflessa (P_r) e quella incidente (P_{in}), dipende dagli indici di rifrazione dei due materiali
- L'**indice di rifrazione** (rapporto tra la velocità della luce nel materiale e la velocità della luce nel vuoto) **del silicio è 3.9**.
- La radiazione riflessa dalla superficie del silicio proveniente dall'aria ($n = 1$) risulta quindi il **35%** di quella incidente.
- Interponendo tra l'aria ed il silicio uno spessore d di materiale con indice di rifrazione n_s , si può dimostrare che se fosse $n_s = \sqrt{n_1 n_2} = 1.97$ si potrebbe dimensionare d in modo da avere $R = 0$ in corrispondenza di una particolare lunghezza d'onda..
- Come materiale antiriflesso viene utilizzato Si_2N_4 avente $n = 2.0$ e lo spessore viene dimensionato per minimizzare il fattore di riflessione in corrispondenza di una lunghezza d'onda di 600 nm.
- Applicando entrambe le tecnologie (antiriflesso + texture) si riducono gli effetti dovuti al non assorbimento dei fotoni, a valori di qualche %

Perdite in una cella al silicio monocristallino (4)

Transmission losses

- Tutta la radiazione con lunghezza d'onda $\lambda > \lambda_G$ non è in grado di produrre coppie elettrone-lacuna ma solo calore. λ_G è la lunghezza d'onda caratteristica del energy-gap. In condizioni standard (AM=1.5) l'energia della radiazione che non può essere sfruttata perché avente $\lambda > \lambda_G$ è il **19.3 %** della radiazione incidente.

$$\lambda_G = \frac{hc}{\Delta W}$$

$$P_{in} = A \int_0^{\infty} P_{\lambda}(\lambda) d\lambda$$

$$P_{loss,tra} = A \int_{\lambda_G}^{\infty} P_{\lambda}(\lambda) d\lambda$$

- La lunghezza d'onda λ_G stabilisce un valore massimo per la densità di corrente:

$$\Delta N = \int_0^{\lambda_G} \frac{AP_{\lambda}(\lambda)\Delta t}{\frac{hc}{\lambda}} d\lambda$$

- Numero di elettroni liberi prodotti nell'intervallo di tempo Δt , nell'ipotesi che ogni fotone con $\lambda < \lambda_G$ crei una coppia elettrone-lacuna (A = area della cella illuminata, P_{λ} densità di potenza della radiazione per unità di lunghezza d'onda)

$$I = \frac{e\Delta N}{\Delta t} = \frac{eA}{hc} \int_0^{\lambda_G} \lambda P_{\lambda}(\lambda) d\lambda$$

- Corrente erogata dalla cella, nell'ipotesi che ogni elettrone libero prodotto contribuisca alla corrente erogata senza ricombinarsi

$$J_{max} = \frac{I}{A} = \frac{e}{hc} \int_0^{\lambda_G} \lambda P_{\lambda}(\lambda) d\lambda$$

- Valore massimo della densità di corrente. Considerando le condizioni standard ($\Phi = 1000 \text{ W/m}^2$, AM=1.5), per il silicio, avente $\lambda_G = 1.1 \text{ }\mu\text{m}$, risulta **$J_{max} = 44.1 \text{ mA/cm}^2$**

Perdite in una cella al silicio monocristallino (5)

Thermalization losses

- I fotoni incidenti con lunghezza d'onda $\lambda < \lambda_G$, quando vengono assorbiti per formare una coppia elettrone-lacuna, cedono agli elettroni liberi, e quindi al carico elettrico, l'energia ΔW corrispondente all'energy-gap e la rimanente parte della loro energia ($h\nu - \Delta W$) al reticolo cristallino sotto forma di calore.

$$P_{loss,ther} = \int_0^{\lambda_G} \frac{AP_\lambda(\lambda)}{\frac{hc}{\lambda}} \left(\frac{hc}{\lambda} - \Delta W \right) d\lambda$$

- In condizioni standard (AM=1.5), per il silicio ($\Delta W=1.12$ eV), l'energia della radiazione che viene trasformata in calore è il **31.7 %** della energia della radiazione incidente.
- L'efficienza spettrale (η_S) della cella al silicio monocristallino, che tiene conto solo delle perdite di trasmissione e termalizzazione, è quindi pari al **49 %**

$$\eta_S = \frac{P_{in} - P_{loss,tra} - P_{loss,ther}}{P_{in}}$$

- La quantità ΔW definisce il valore massimo della tensione ai capi della cella:

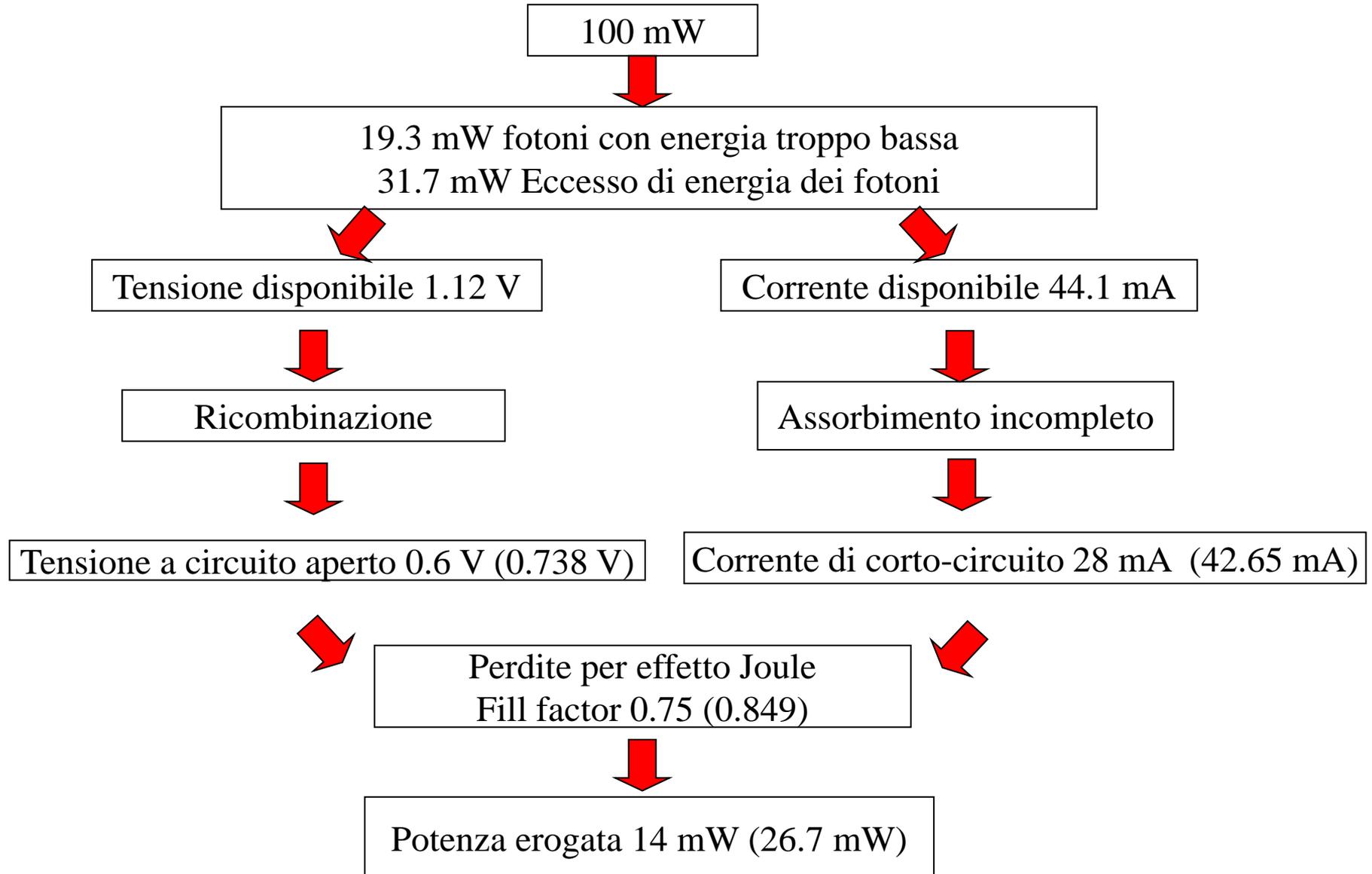
$$V_{max} = \frac{\Delta W}{e}$$

- Per il silicio risulta **Vmax = 1.12 V**

- risulta:
$$\eta_S = \frac{V_{max} I_{max}}{P_{in}} = \frac{V_{max} I_{max}}{\Phi_{in}}$$

Perdite in una cella al silicio monocristallino (6)

- In condizioni standard ($\Phi=1000 \text{ W/m}^2$, AM=1.5, $T = 25^\circ\text{C}$), per ogni cm^2 di superficie illuminata di una cella con silicio monocristallino risulta:

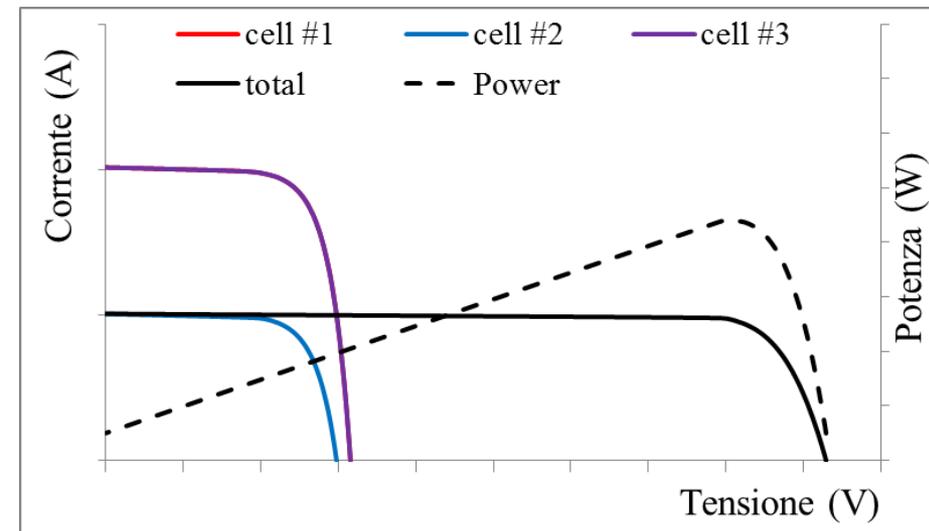
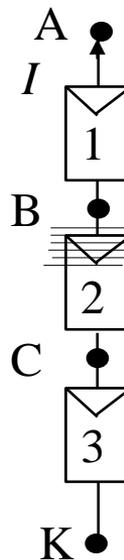
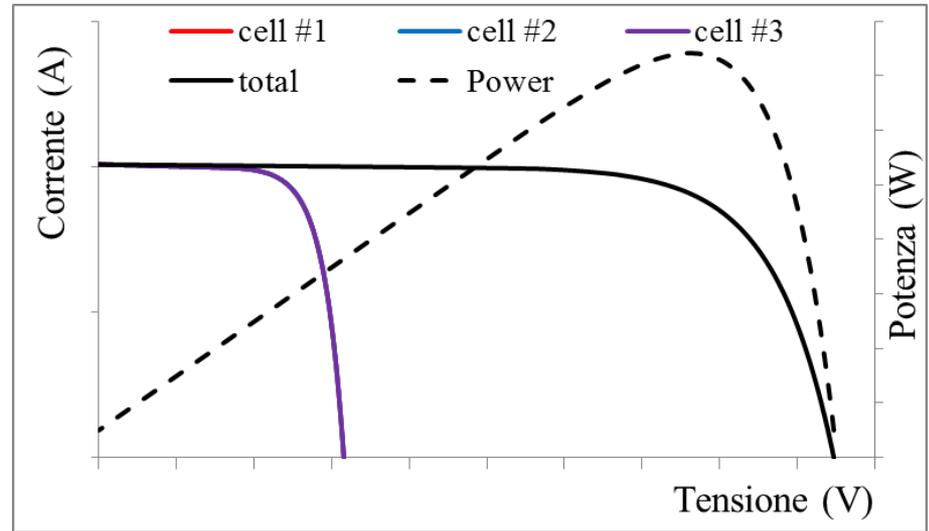
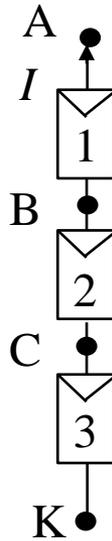


Collegamento in serie delle celle (1)

Un generatore fotovoltaico è realizzato collegando in serie e/o parallelo più celle fino a raggiungere la potenza di picco desiderata con la tensione desiderata.

Per raggiungere valori elevati di tensione a vuoto del generatore è necessario collegare le celle in serie, ma tale collegamento può causare sensibili riduzioni della potenza prodotta in corrispondenza ad un irraggiamento non uniforme su tutte le celle della serie.

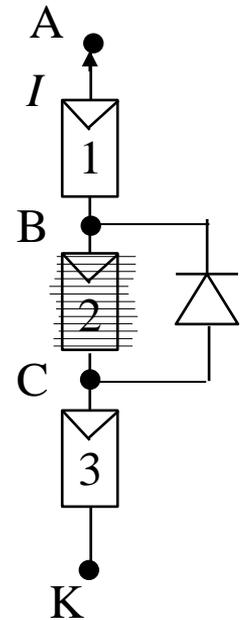
- Siano le tre celle 1, 2 e 3 identiche. Essendo collegate in serie sono attraversate dalla stessa corrente.
- Se l'irraggiamento è lo stesso per tutte e tre le celle, la tensione totale si ripartisce in parti uguali sulle singole celle
- Se la cella 2 è ombreggiata, tale cella impone il valore della corrente e si ha una riduzione della potenza erogata molto superiore alla riduzione dell'irraggiamento



Collegamento in serie delle celle (2)

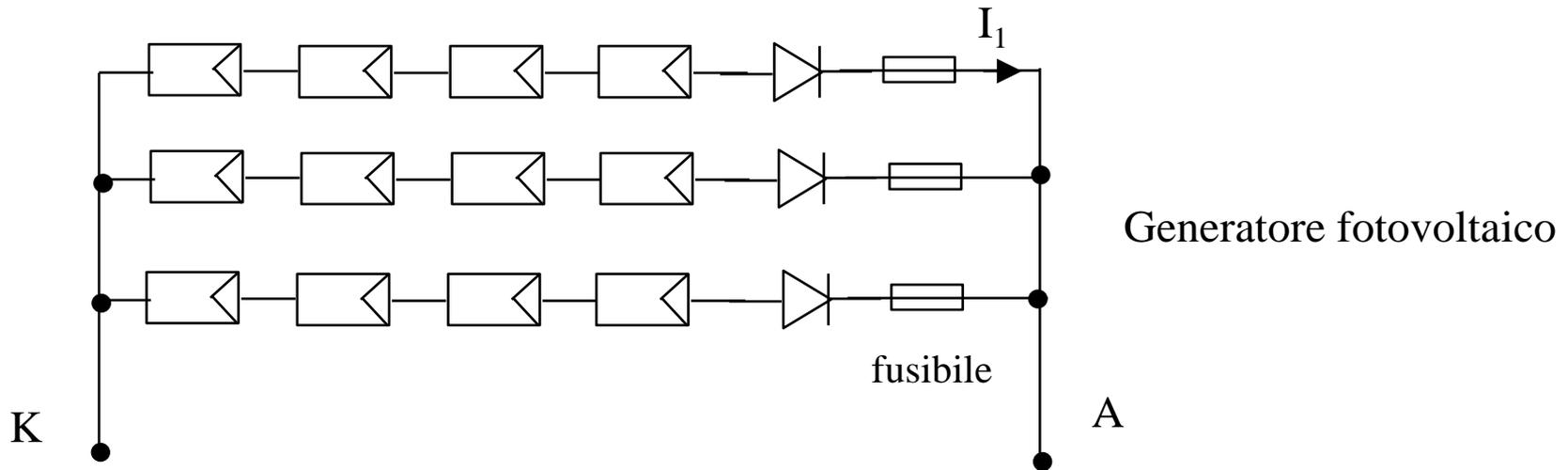
Se la cella 2 è al buio, la sua caratteristica coincide con quella di un diodo e quindi essendo attraversata da una corrente diretta dal catodo verso l'anodo la tensione (anodo-catodo) ai suoi capi è negativa. La cella, invece di erogare potenza la assorbe e può surriscaldarsi.

- Per superare i problemi dell'irraggiamento non uniforme nel collegamento in serie bisognerebbe collegare in parallelo alla cella ombreggiata un diodo: quando la cella funziona da generatore il diodo non interviene essendo polarizzato in inversa.
- Viceversa, se la cella viene oscurata, la tensione negativa che si sviluppa ai suoi capi, polarizza in diretta il diodo e la corrente del modulo può passare attraverso il diodo stesso, senza dissipare potenza all'interno della cella.
- Nei moduli fotovoltaici, costituiti da numerose celle collegate in serie, i diodi sono collegati mediante contatti esterni e non tutte le celle risultano protette, bensì solo gruppi di celle.



Generatore fotovoltaico(1)

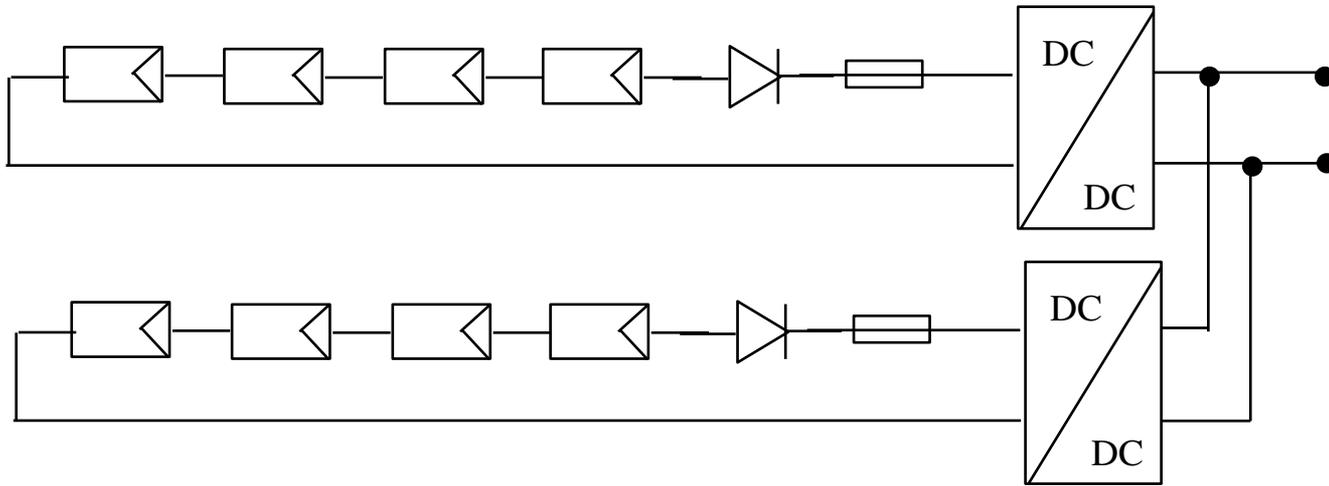
- Un generatore fotovoltaico è realizzato collegando in serie tra di loro i moduli per formare delle stringhe che possono essere a loro volta collegate in parallelo.



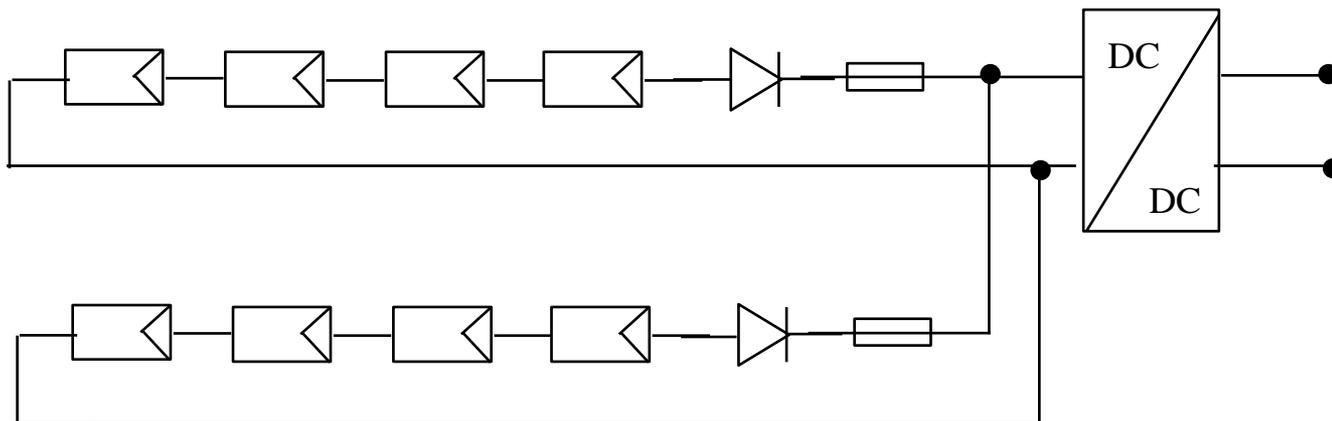
- In serie con ogni stringa viene posto un diodo che impedisce alla corrente di circolare da anodo a catodo nella stringa; questo potrebbe succedere nel caso che la stringa risultasse ombreggiata rispetto alle altre
- In serie con ogni stringa viene posto un fusibile per proteggere la stringa da sovracorrenti in caso di guasto.

Generatore fotovoltaico(2)

- Per ottimizzare il rendimento del generatore fotovoltaico è necessario introdurre un convertitore DC-DC per variare la tensione di lavoro al variare delle condizioni ambientali (irraggiamento, temperatura)



Schema con un MPPT per ogni stringa



Schema con un solo MPPT

Generatore fotovoltaico(3)

- Se il generatore fotovoltaico deve essere collegato alla rete in corrente alternata (oppure ad un carico che funziona in corrente alternata) è necessario introdurre un convertitore che realizzi la conversione da corrente continua a corrente alternata (inverter)

