

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

# Relazione per la prova finale

**« Pannelli fotovoltaici per applicazioni spaziali:  
Materiali strutturali e funzionali »**

Tutor universitario: *Prof.ssa Roberta Bertani*

Laureando: *Alessandro Blasetti*

Padova, 22/03/2024

1

## I Pannelli Fotovoltaici

- Forma e struttura
- Applicazioni
- Principio di funzionamento

2

## I Materiali Strutturali

- Requisiti strutturali
- Materiali principali

3

## I Materiali Funzionali

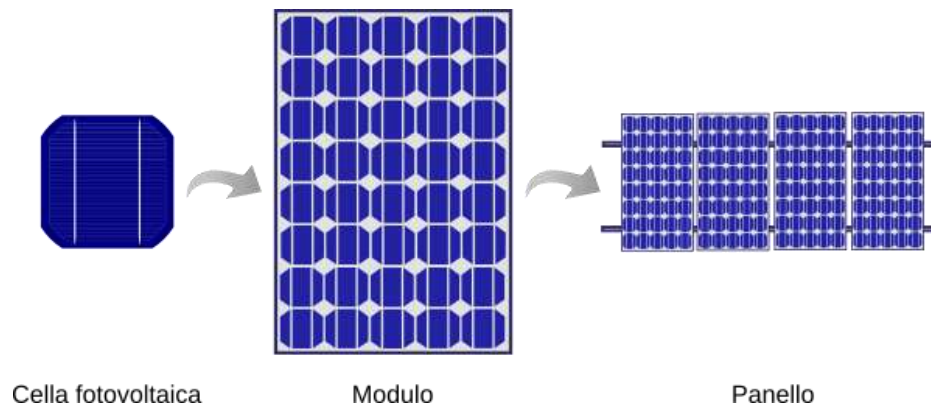
- Celle al silicio
- Celle multigiunzione
- Celle perovskitiche

## Forma e struttura

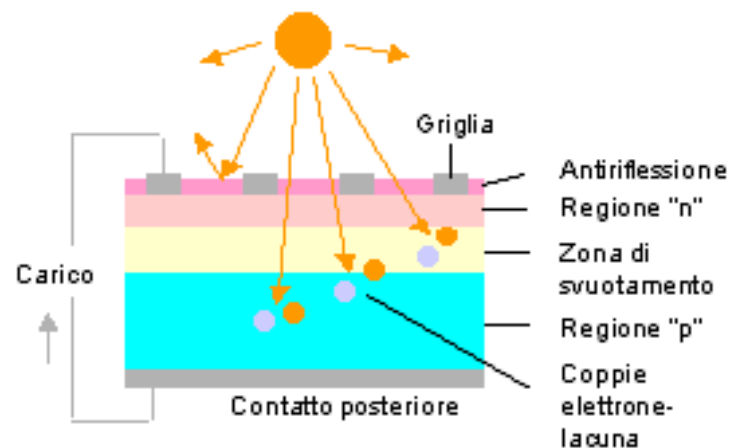
I pannelli fotovoltaici sono costruiti a partire da una unità più piccola detta **cella fotovoltaica**.

Le celle, posizionate prima in serie (**stringa**) e poi in parallelo formano un **modulo**.

L'insieme di più moduli dà vita al pannello complessivo.



1. Composizione di un pannello



2. Cella fotovoltaica irradiata

La singola cella è costituita da diversi “strati”:

- **Griglia** (o contatto) **superiore**
- **Superficie antiriflettente** e **filtro**
- **Accoppiamento P-N** e relativa **zona di giunzione**
- **Contatto inferiore**

## Applicazioni

I pannelli fotovoltaici vengono comunemente utilizzati **a terra** per fornire energia elettrica rinnovabile.

La loro natura di generatori viene sfruttata per alimentare dal più piccolo degli apparecchi elettrici sino ad intere abitazioni o industrie.



3. Impianto fotovoltaico a terra



4. La ISS e i suoi pannelli fotovoltaici

Questi hanno applicazione anche nell'**industria spaziale**, dove fungono da fonte energetica per le strutture spaziali in orbita o meno attorno alla Terra.

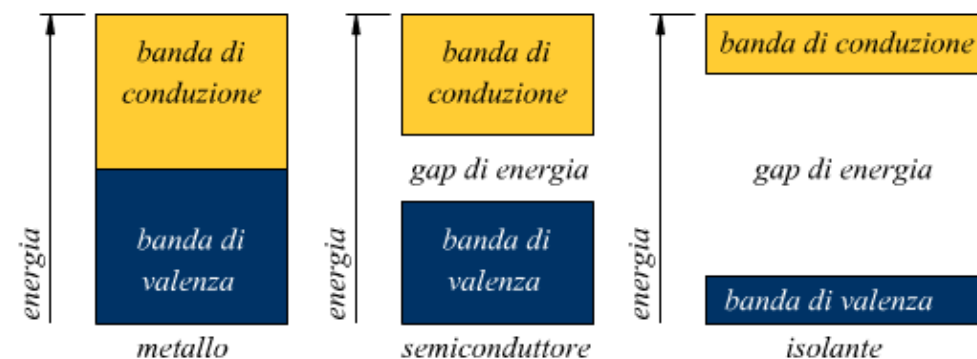
In questo caso il loro pregio più grande risiede nella loro **autosufficienza**, poiché fornire energia elettrica senza la necessità di caricare carburante renderà la struttura più leggera e agile.

## Principio di funzionamento

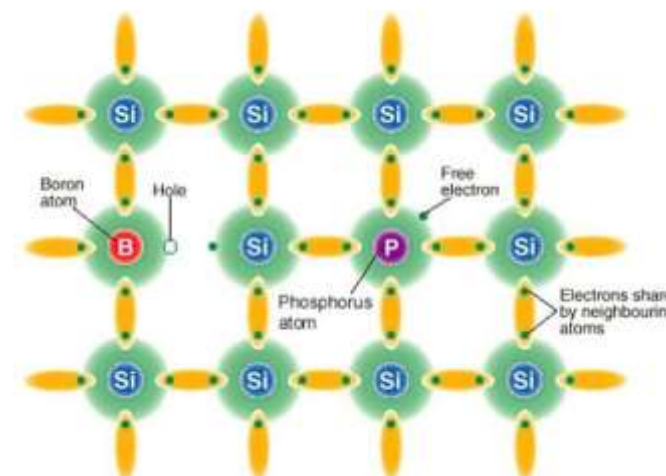
Il principio fisico alla base del funzionamento dei pannelli solari risiede nella definizione di **banda di valenza** e **banda di conduzione**.

I materiali più adatti per la costruzione delle celle fotovoltaiche sono i **semiconduttori**, in quanto presentano un **gap energetico** sufficientemente ampio che può essere facilmente colmato tramite l'irraggiamento solare.

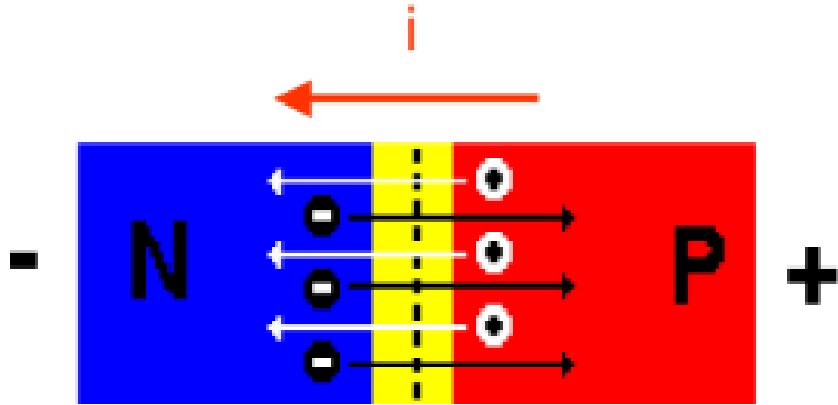
I semiconduttori vengono “**drogati**” per diminuire il gap energetico, sostituendo alcuni degli atomi iniziali per creare **lacune elettroniche** o **elettroni liberi**.



5. Gap energetici nei materiali



6. Drogaggio con boro e fosforo



7. Spostamento di elettroni

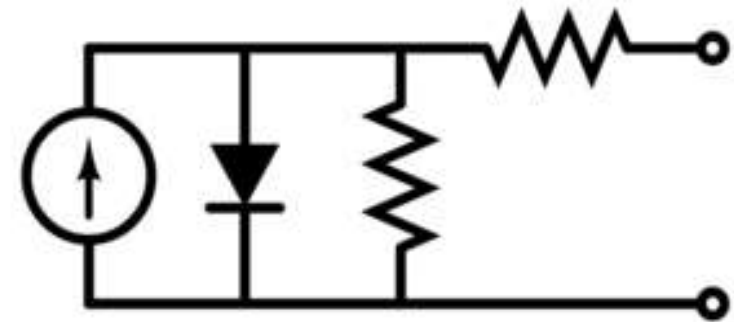
Accoppiando due semiconduttori “**drogati**” avverrà un passaggio di elettroni dal **semiconduttore N** (negativo) al **semiconduttore P** (positivo), creando una zona centrale detta **giunzione**.

La natura da **diodo** della cella permette il passaggio di corrente in un unico verso se collegata ad un generatore.

La stessa cella può comportarsi da **generatore** se collegata in parallelo ad una resistenza, consentendo il passaggio di corrente richiesto.

Tale fenomeno, però, avrà una durata breve poiché tutte le lacune saranno “riempite” dal numero limitato di elettroni.

Se la cella viene esposta al sole le radiazioni ricevute formeranno nuove coppie lacuna-elettrone rendendo il processo continuo.



8. Circuito equivalente di una cella



Per **materiali strutturali** si intendono i materiali che compongono la parte esterna del pannello, detto **telaio**.

Un generico satellite presenta dei pannelli fotovoltaici rivestiti con materiali adatti agli ambienti estremi dello spazio, che soddisfano requisiti molto rigorosi.

I materiali utilizzati devono inoltre essere sottoposti a rigorosi **test di qualificazione** per garantire resistenza alle condizioni estreme dello spazio e prestazioni affidabili a lungo termine.



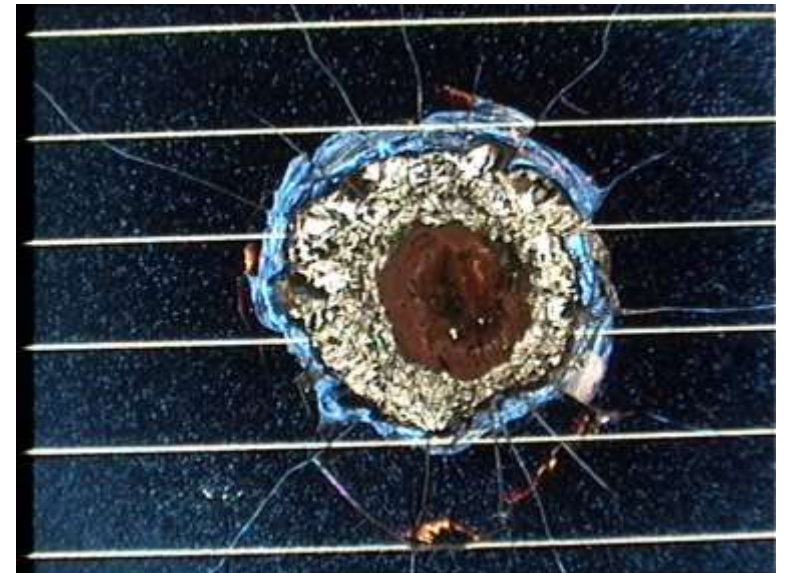
9. Test di qualifica dei pannelli solari

## Requisiti strutturali

I **telai** dei pannelli solari spaziali sono progettati con particolare attenzione per sopportare le estreme condizioni dell'ambiente spaziale.

I **requisiti strutturali** principali sono:

- **Leggerezza**, per ridurre il peso complessivo del satellite.
- **Rigidità strutturale**, per sopportare le forze di accelerazione durante il lancio e proteggere da impatti esterni.
- **Resistenza alla corrosione**, causata dalle radiazioni solari e dalle particelle cariche presenti nello spazio.
- **Conduttività elettrica**, per consentire il passaggio dell'elettricità generata dagli strati fotovoltaici ai circuiti di controllo
- **Resistenza termica**, per resistere a variazioni estreme di temperatura nello spazio.



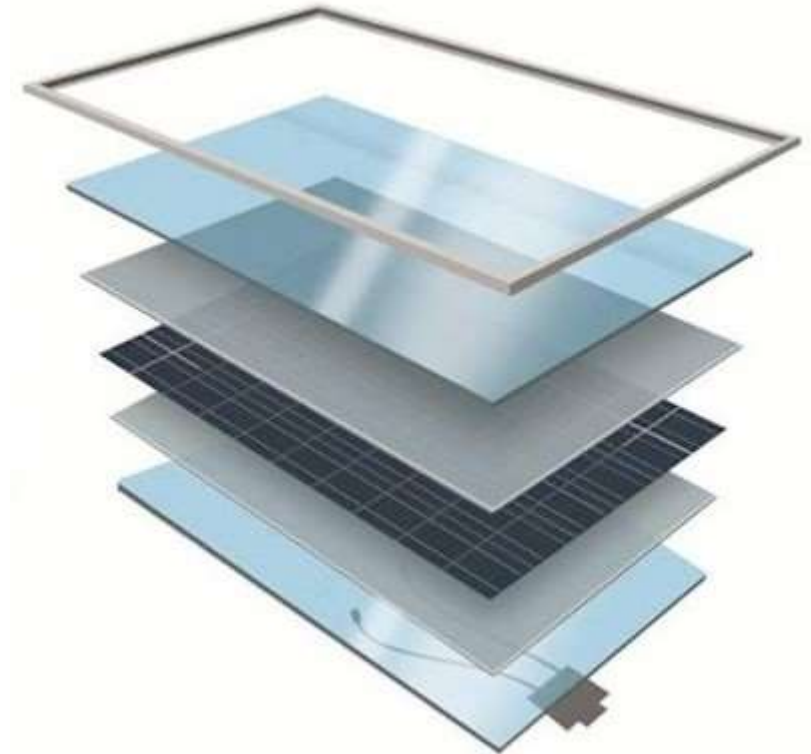
10. Pannello urtato da detriti spaziali



## Materiali principali

Alcuni dei materiali comunemente utilizzati includono:

- L'**alluminio leggero ad alta resistenza**, il quale offre una combinazione di leggerezza e resistenza meccanica notevole.
- Il **titanio**, noto per la sua leggerezza e resistenza alla corrosione.
- I **compositi avanzati**, come i materiali a base di carbonio o fibra di vetro rinforzati con resina, che offrono un'elevata resistenza meccanica e una bassa densità
- Materiali resistenti ad agenti esterni, come il **vetro temperato** o **materiali ceramici**, utilizzati come copertura superiore per proteggere gli strati sensibili dagli agenti atmosferici e dalle radiazioni spaziali
- Guarnizioni e sigillanti in **silicone** resistenti alle temperature estreme e alle condizioni dello spazio.



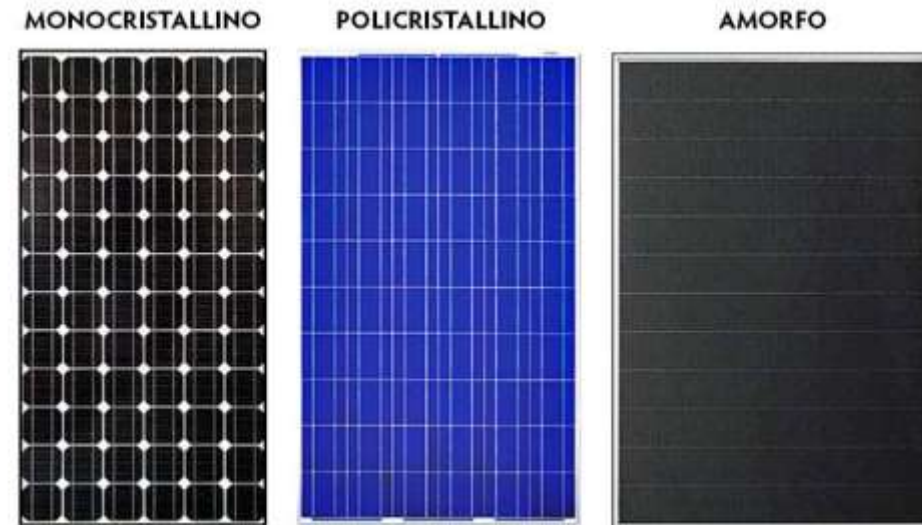
11. Stratificazione strutturale del pannello

Per **materiali funzionali** si intendono tutti i materiali attivi su cui si basa il funzionamento della cella stessa.

Rappresentano, dunque, un importante fattore per conoscere **efficienza, costo e durabilità** del pannello.

I tipi di celle che verranno trattati sono tra i più utilizzati nell'industria spaziale, e sono:

- **Celle al silicio**
  - *Silicio monocristallino*
  - *Silicio policristallino*
  - *Silicio amorfo (a film sottile)*
- **Celle multigiunzione**
- **Celle perovskitiche**

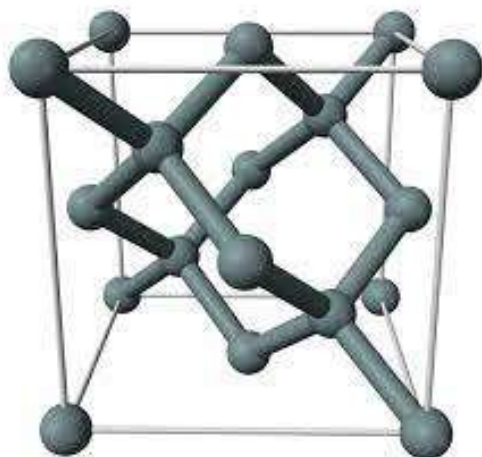


12. Pannelli al silicio

## Celle al Silicio

### (a) Silicio Monocristallino

Dall'aspetto levigato, il **silicio monocristallino** presenta un'unica struttura cristallina cubica a facce centrate che permette alla cella di ottenere alte efficienze a prezzi elevati, a causa dei costi di produzione.



14. Struttura del silicio monocristallino



13. Aspetto del silicio monocristallino

Fascia di **prezzo:**  
\$ 0.80 - \$ 1.20 per watt

Intervallo di **efficienza:**  
15% - 22%

Uno dei metodi per la produzione di silicio monocristallino è il **metodo Czochralski**, in cui un seme di cristallo di silicio puro viene immerso in un bagno di silicio fuso ad alta temperatura. Il seme viene lentamente estratto dalla soluzione, permettendo al silicio fuso di solidificarsi intorno ad esso, formando un cristallo monocristallino.

## Celle al silicio

### (b) Silicio policristallino

Il **silicio policristallino** (o multicristallino) presenta un aspetto irregolare, essendo realizzato con più strutture cristalline. Costituisce un'alternativa a basso costo al monocristallino ma con un'efficienza leggermente inferiore.



16. Pannello in silicio policristallino



15. Aspetto del silicio policristallino

Fascia di **prezzo**:  
\$ 0.60 - \$ 0.90 per watt

Intervallo di **efficienza**:  
13% - 18%

Per la sua produzione, a differenza del silicio monocristallino, non viene fatto crescere un singolo cristallo ma vengono fusi insieme più frammenti di silicio per poi farli solidificare.

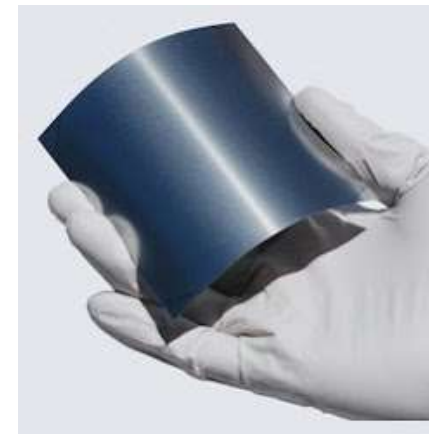
A causa delle condizioni di raffreddamento relativamente rapide, i cristalli che si formano sono di forma irregolare e hanno confini di grano distinti, dando al materiale la sua struttura policristallina.

## Celle al silicio

### (c) Silicio amorfo (a film sottile)

Il **silicio amorfo** viene denominato tale poiché presenta una struttura disordinata e non cristallina, che ne limita la conducibilità elettrica e dunque le prestazioni.

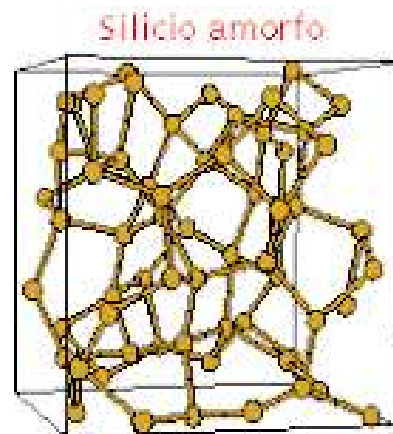
I pannelli in silicio amorfo funzionano meglio in condizioni di scarsa illuminazione e sono meno influenzati dalle alte temperature.



Fascia di **prezzo**:  
\$ 0.40 - \$ 0.70 per watt

Intervallo di **efficienza**:  
10% - 12%

17. Cella in silicio amorfo



18. Confronto di strutture

Il silicio amorfo può essere prodotto in vari modi, principalmente tramite **Deposizione Chimica da Vapore (CVD)** e **Deposizione Fisica da Vapore (PVD)**, nei quali si creano strati sottili di silicio amorfo su substrati come vetro, plastica o metallo.

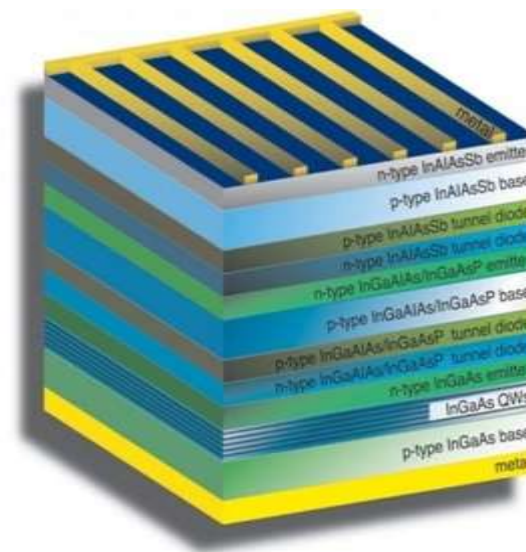
Tali processi rendono il materiale flessibile e leggero, in modo da poterlo applicare anche su superfici curve.



## Celle multigiunzione

Le **celle multigiunzione** sono dispositivi fotovoltaici avanzati che sfruttano più strati di materiali semiconduttori per catturare una percentuale maggiore dello **spettro solare** e massimizzare l'efficienza del pannello.

I pannelli a multigiunzione sono ampiamente utilizzati in applicazioni aerospaziali per l'alimentazione di satelliti e sonde spaziali grazie alla loro alta efficienza e alla capacità di generare energia anche in condizioni di luce solare ridotta.



19. Strati di una cella multigiunzione

Una possibile struttura è data da:

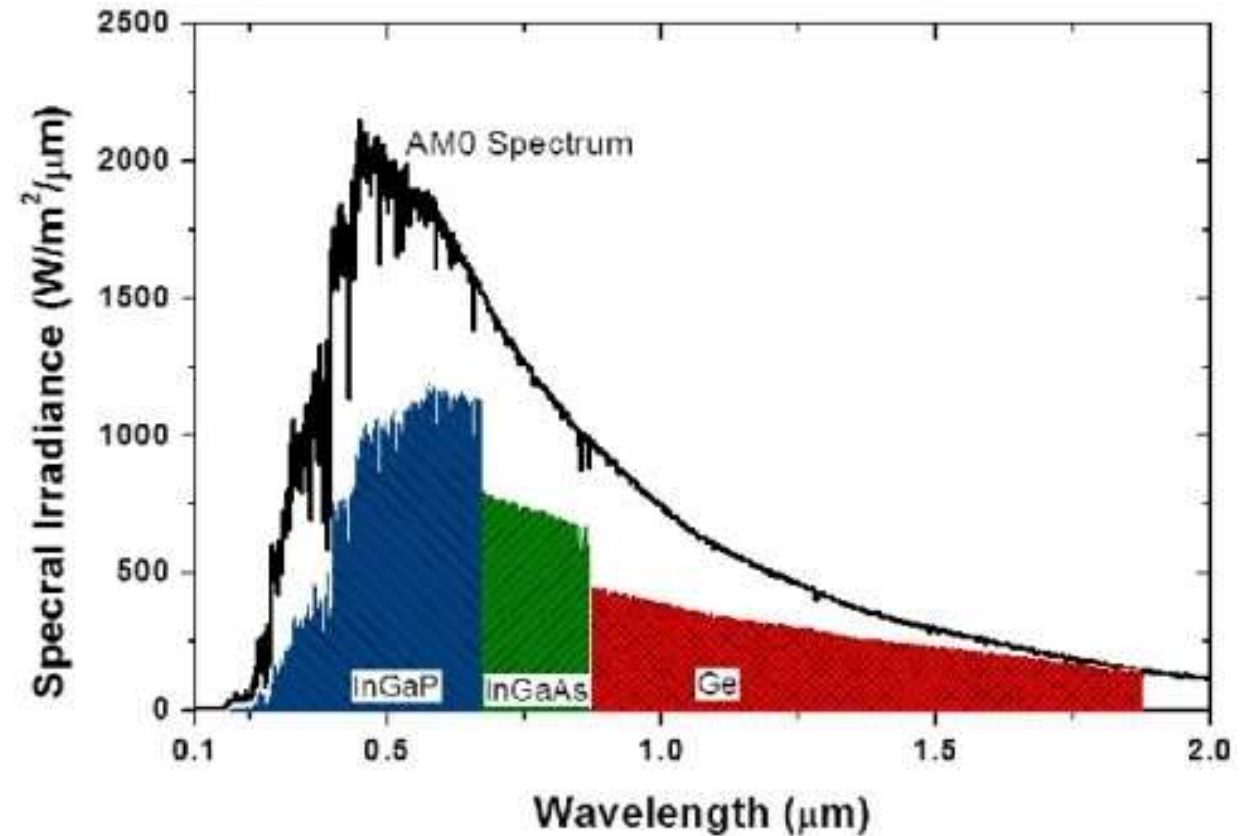
- **Arseniuro di gallio** (GaAs) per gli strati superiori.
- **Arseniuro di gallio-indio** (GaInAs) per gli stadi intermedi.
- **Germaniuro di Gallio** (GaGe) per gli stadi inferiori.

Fascia di **prezzo**:  
\$ 5 - \$ 20 circa per watt

Intervallo di **efficienza**:  
superiore al 30%

## Celle multigiunzione

Di seguito lo **spettro di assorbimento** di una cella multigiunzione InGaP - InGaAs - Ge, confrontato con lo **spettro solare** ad AM0, ossia al di fuori dell'atmosfera.



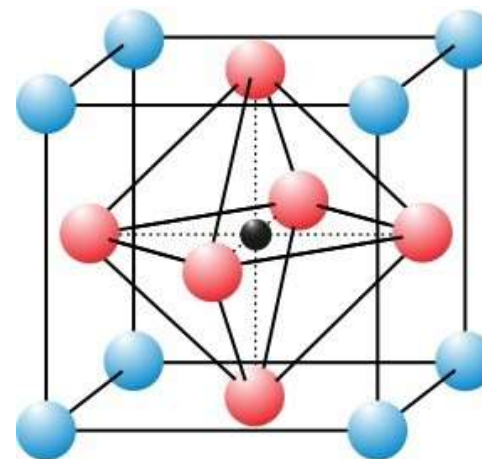
## Celle perovskitiche

Le **celle perovskitiche** sono celle fotovoltaiche di ultima generazione che sfruttano materiali appartenenti al **gruppo della perovskite**, composti da ossidi misto di due metalli con formula  $ABO_3$ .

La perovskite originale è un minerale composto da titanato di calcio ( $CaTiO_3$ ).



21. Pannello perovskitico



atomica dei perovskiti

20. Struttura

Intervallo di **efficienza**:  
superiore al 25%

La produzione di tali celle risulta al momento costosa. Tuttavia presentano grandi vantaggi strutturali, tra cui la possibilità di realizzarle con diverse forme e dimensioni, consentendo una maggiore flessibilità nel loro utilizzo.

Le celle solari a perovskite presentano però anche alcune sfide da affrontare, tra cui la stabilità a lungo termine e la resistenza agli ambienti esterni.

immagini:

- 1 <https://images.app.goo.gl/pH8NEfTHZR8qWNMW9>
- 2 <https://images.app.goo.gl/LzFHE11Xf8us7zew5>
- 3 <https://images.app.goo.gl/9HeTt1GsRT6w9ose7>
- 4 <https://images.app.goo.gl/2e4pnRuVfRziMbzMA>
- 5 <https://images.app.goo.gl/NPTiRnTniirGnpQZ8>
- 6 <https://images.app.goo.gl/djZFsCXygKMH7r7m6>
- 8 <https://images.app.goo.gl/U9hzKgXmx9CWubwy6>
- 9 <https://images.app.goo.gl/KnfuUnEfoevkJudp7>
- 10 <https://images.app.goo.gl/BKHE4AtUpNsCJRcA9>
- 11 <https://images.app.goo.gl/MaYzijSHbkuqr4HY7>

fonti:

Sergio Pizzini, *Advanced Silicon Materials for Photovoltaic Applications*

Antonio Luque, Steven Hegedus, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*

- 12 <https://images.app.goo.gl/jswEzCdnP25PS8g37>
- 13 <https://images.app.goo.gl/6VB9AgKxgWrzFXaC9>
- 14 <https://images.app.goo.gl/rJKu8b174LPWzqgt7>
- 15 <https://images.app.goo.gl/hwjRvRyHpnJBmHiG7>
- 16 <https://images.app.goo.gl/Mrp1kXtkCaUDPga68>
- 17 <https://images.app.goo.gl/73jXNSMiqyjB5Zuk7>
- 18 <https://images.app.goo.gl/ZtmmaoasptsfTaCY6>
- 19 <https://images.app.goo.gl/4vcGavG7iS3KvUZS9>
- 20 <https://images.app.goo.gl/cZqTDaXeHq16F5nT9>
- 21 <https://images.app.goo.gl/AawWb95gjfiMttvF6>

[Silicon in Solar Panels: Unveiling the Power Behind Sustainable Energy - LAMBDA GEEKS](#)

<http://www.nasa.gov/>