

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Augusto Righi”
Corso di Laurea in Fisica

**La produzione energetica da pannelli
fotovoltaici: fisica ed aspetti
multidisciplinari**

Relatore:
Prof. Paolo Finelli

Presentata da:
Marco Guidi

Anno Accademico 2023/2024

Abstract

La crescente domanda energetica mondiale e l'urgente necessità di ridurre l'impatto ambientale della produzione di energia hanno stimolato l'interesse verso fonti rinnovabili e sostenibili. Tra le diverse alternative, l'energia solare rappresenta una risorsa straordinaria e ampiamente disponibile: la quantità di energia che giunge dal Sole sulla superficie terrestre ogni ora potrebbe, in teoria, soddisfare il fabbisogno globale di un anno. Tuttavia, la sua trasformazione efficiente in energia elettrica utilizzabile rappresenta una sfida di grande complessità.

I pannelli fotovoltaici, dispositivi capaci di convertire la radiazione solare in energia elettrica, si collocano in prima linea in questo ambito. Il loro impiego consente una produzione energetica che non emette gas serra o altre sostanze inquinanti, rendendoli una delle soluzioni più pulite e sostenibili per affrontare le crisi energetiche e climatiche in atto. In questa tesi, partendo dall'analisi dei principi fisici alla base delle celle fotovoltaiche, verranno analizzate sia le tecnologie attualmente più utilizzate sia quelle in fase di sviluppo che offrono risultati più promettenti in termini di efficienza, fornendo inoltre previsioni sul futuro sviluppo del settore.



Figura 1: Impianto di celle fotovoltaiche al silicio al Nellis Solar Power Plant, all'interno del Nellis Air Force Base in Nevada, USA. Si tratta di circa 6000 pannelli, capaci di ruotare per orientarsi nella direzione del Sole e di garantire una potenza di picco complessiva di circa 14 kW [1].

Indice

Introduzione	5
1 Principi fisici delle celle fotovoltaiche	7
1.1 Radiazione solare	8
1.1.1 Spettro di corpo nero	8
1.1.2 Interazioni atmosferiche	10
1.2 Materiali semiconduttori	12
1.2.1 Semiconduttori a gap diretto e indiretto	14
1.3 Giunzione <i>p-n</i>	15
1.4 Cella solare fotovoltaica	16
1.4.1 Equazione della cella fotovoltaica	18
1.4.2 Modello circuitale	21
1.4.3 Cella fotovoltaica e fotodiode	22
1.4.4 Parametri caratteristici	24
1.4.5 Cella fotovoltaica ideale e cella fotovoltaica reale	27
1.4.6 Impianto fotovoltaico	29
2 Tipologie e tecnologie dei pannelli fotovoltaici	31
2.1 Assorbimento e ricombinazione	31
2.2 Efficienza	33
2.2.1 Elementi strutturali	33
2.2.2 Fattori ambientali	37
2.2.3 Limite di Shockley-Queisser	38
2.3 Moderne tecnologie fotovoltaiche	41
2.4 Celle fotovoltaiche al silicio	42
2.5 Celle fotovoltaiche <i>thin-film</i>	46
2.6 Celle fotovoltaiche multigiunzione	49
2.6.1 Celle fotovoltaiche tandem Silicio-Perovskite	52

3	Dati e previsioni	56
3.1	L'energia solare nel panorama energetico	56
3.1.1	Centrali fotovoltaiche nel mondo	60
3.1.2	Rete elettrica e Smart Grids	61
3.2	Costi ed investimenti	65
3.3	Strategie e previsioni per il futuro	71
	Conclusioni	76

Introduzione

Il fotovoltaico rappresenta una soluzione che coniuga la produzione sostenibile di energia con un'efficienza in costante crescita, grazie all'evoluzione delle tecnologie disponibili. Questa combinazione permette di soddisfare le esigenze energetiche attuali senza compromettere le risorse per le generazioni future. Inoltre, i pannelli fotovoltaici possono essere integrati nelle cosiddette *Smart Grids* ed inseriti in sistemi combinati con altre forme di energia rinnovabile, rendendo il fotovoltaico una componente fondamentale nei moderni sistemi energetici interconnessi. La presente tesi si propone di approfondire l'analisi delle celle fotovoltaiche e dei pannelli solari da esse composti, focalizzandosi sui meccanismi fisici alla base del loro funzionamento, sulle diverse tecnologie disponibili ed emergenti, e sul ruolo dell'energia solare nel contesto energetico globale.

Nel primo capitolo, a partire dalla descrizione delle principali caratteristiche della radiazione solare e dei materiali semiconduttori, viene descritta dal punto di vista fisico la giunzione $p-n$, necessaria per introdurre poi la cella fotovoltaica, della quale, attraverso il relativo modello circuitale e l'equazione del diodo, si analizzano alcuni importanti parametri che ne definiscono le prestazioni. Successivamente, si discutono le differenze tra una cella fotovoltaica ideale ed una reale, offrendo infine una panoramica sull'impianto fotovoltaico complessivo.

Il secondo capitolo si concentra invece sui fattori che influenzano l'efficienza dei pannelli fotovoltaici. Partendo dalla spiegazione dei processi fondamentali di assorbimento della luce e ricombinazione delle cariche, si definisce il limite teorico di efficienza noto come limite di Shockley-Queisser. Alla luce di queste considerazioni, verranno analizzate le diverse tecnologie alla base dei pannelli fotovoltaici, dai tradizionali dispositivi al silicio fino alle più moderne celle tandem.

Nel terzo capitolo, l'energia solare verrà inserita nel contesto del panorama energetico globale. Si confronteranno le centrali fotovoltaiche più produttive con le maggiori centrali basate su altre forme di energia, mentre per evidenziarne la rapida crescita sarà riportata la sequenza temporale delle centrali fotovoltaiche più produttive dagli anni '80 ad oggi. Dopo un'introduzione al solare termico, verrà mostrata l'evoluzione temporale della capacità totale installata di energia solare termica e fotovoltaica, insieme alla distribuzione geografica della produzione di energia elettrica totale e da fonte solare. In merito all'energia elettrica, sarà brevemente spiegato il funzionamento sia della rete

elettrica tradizionale sia delle innovative *Smart Grids*, evidenziando come queste ultime possano ottimizzare l'integrazione delle fonti rinnovabili nel sistema energetico. Infine, verranno analizzati gli investimenti destinati all'energia solare negli ultimi anni, riportati i costi delle diverse tecnologie relative alle celle fotovoltaiche, e presentato uno studio del Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti. Quest'ultimo, attraverso tre diversi scenari, prevede il contributo futuro del fotovoltaico nel *mix energetico* del 2035 e del 2050, offrendo una prospettiva sulle potenzialità e le sfide che attendono questa tecnologia.

Capitolo 1

Principi fisici delle celle fotovoltaiche

I pannelli fotovoltaici rappresentano una delle tecnologie più promettenti per la conversione dell'energia solare in energia elettrica. La comprensione dei principi fisici alla base delle celle fotovoltaiche è essenziale per il miglioramento e l'ottimizzazione delle loro prestazioni.

Questo capitolo esamina le fondamenta teoriche e i fenomeni fisici che governano il funzionamento delle celle solari fotovoltaiche (di seguito denominate *celle fotovoltaiche*). Attraverso l'analisi dei materiali semiconduttori e dei processi di generazione e separazione delle cariche, verranno delineati i meccanismi fondamentali che permettono la trasformazione dell'energia luminosa in energia elettrica.

Le celle fotovoltaiche sono dispositivi che convertono l'energia della luce solare in energia elettrica attraverso l'**effetto fotovoltaico**. Quest'ultimo è il processo attraverso il quale un materiale semiconduttore genera una corrente elettrica quando esposto alla luce. Esso è dovuto all'interazione tra i fotoni della luce e gli elettroni del semiconduttore: quando un fotone con energia sufficiente colpisce un elettrone di valenza, questo può essere eccitato a un livello energetico superiore, permettendo la generazione di corrente elettrica.

1.1 Radiazione solare

1.1.1 Spettro di corpo nero

L'energia solare viene trasmessa alla superficie terrestre per *irraggiamento*¹.

In ottima approssimazione, il Sole può essere considerato un *corpo nero*² con una temperatura superficiale di circa 5780 K, come mostrato in figura 1.1.

La consistenza di questa assunzione può essere verificata confrontando l'*irradianza solare*³ alla sommità dell'atmosfera terrestre, detta *costante solare* f , calcolata utilizzando la *Legge di Stefan-Boltzmann*¹ e la temperatura superficiale del Sole $T_S = 5780 K$, con il valore medio annuale ottenuto da misure satellitari [2]:

$$f = I_t(T = T_S) = I_s(T = T_S) \frac{R_s^2}{R_{st}^2} = \sigma_B T_S^4 \frac{R_s^2}{R_{st}^2} \simeq 1361 W/m^2$$
$$f_{\text{meas}} \simeq 1366 W/m^2$$
(1.1)

dove R_s è il raggio solare e R_{st} è la distanza media Sole-Terra. Assimilando il Sole ad una sfera che irradia energia in maniera isotropa e costante nel tempo in tutto l'angolo solido, la sua potenza irradiata è distribuita sull'area di una sfera avente per raggio la distanza tra il Sole e la Terra. Applicando la conservazione dell'energia, si ha che il prodotto tra l'irraggiamento e la superficie è costante, da cui l'equazione 1.1. L'ottimo accordo tra il valore calcolato ed il valore misurato conferma l'attendibilità del modello utilizzato.

¹L'*irraggiamento* consiste nella trasmissione di calore mediante onde elettromagnetiche ed è definito come la densità di potenza che incide su una superficie. Nel contesto dell'energia solare, esso indica la quantità di energia che giunge su una superficie perpendicolare alla direzione dei raggi solari per unità di tempo. Esso è descritto dalla **Legge di Stefan-Boltzmann**:

$$I = \epsilon \sigma_B T^4$$

dove ϵ è un parametro compreso tra 0 e 1 detto *emittanza spettrale* che serve per modulare in quale misura la sorgente considerata approssima un corpo nero, I è la potenza emessa per unità di superficie, misurata in W/m^2 , σ_B è la costante di Stefan-Boltzmann, pari a $5.67 \cdot 10^{-8} W/m^2 K^4$, T è la temperatura assoluta del corpo nero (in kelvin, K).

²Un *corpo nero* è un oggetto ideale che assorbe tutta la radiazione elettromagnetica incidente senza rifletterla. Poiché assorbe tutta la radiazione incidente, per la conservazione dell'energia, irradia tutta l'energia assorbita. La densità di potenza irradiata in funzione della lunghezza d'onda, detta anche irradianza spettrale e misurata in $W/m^2 nm$, è detta *spettro di corpo nero*, il quale dipende solo dalla temperatura e non dalla materia che lo compone.

³Si definisce *irradianza solare* la potenza della radiazione solare ricevuta per unità di area su una superficie perpendicolare ai raggi del Sole. Si misura in W/m^2 .

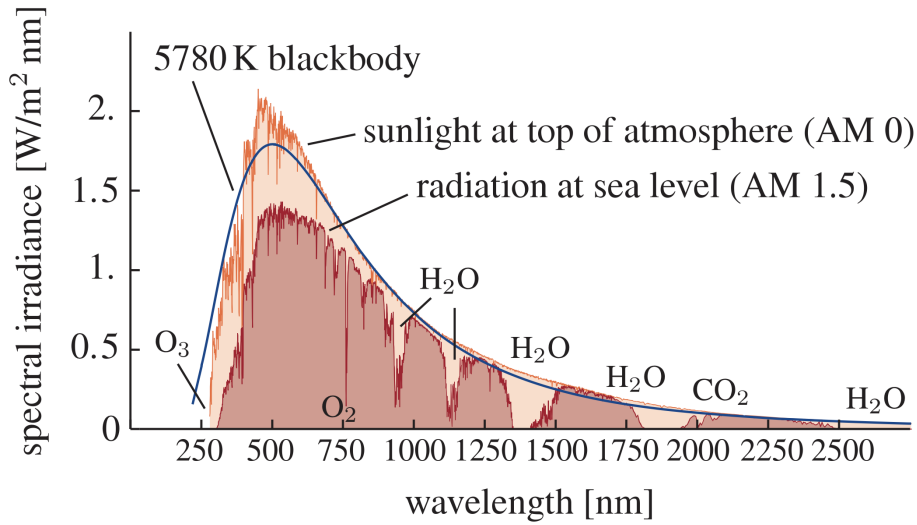


Figura 1.1: Confronto tra l'irradianza spettrale della radiazione solare al di fuori dell'atmosfera ($AM\ 0$) ed al livello del mare ($AM\ 1.5$) con lo spettro di corpo nero alla temperatura di $5780\ K$. Sono riportati gli elementi responsabili dell'assorbimento di specifiche lunghezze d'onda [3].

La distribuzione di intensità della radiazione di un corpo nero alla temperatura assoluta T è data dalla **Legge di Planck**, che può essere espressa rispettivamente in funzione della frequenza ν o della lunghezza d'onda λ :

$$I(\nu) d\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} d\nu \quad (1.2)$$

$$I(\lambda) d\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} d\lambda \quad (1.3)$$

dove h rappresenta la costante di Planck, c la velocità della luce e k la costante di Boltzmann.

Come si può osservare in figura 1.2, all'aumentare della temperatura, il massimo di emissione di questo spettro si sposta verso lunghezze d'onda minori (o, analogamente, frequenze maggiori), secondo la **Legge di Wien**, che afferma che la lunghezza d'onda λ_{max} alla quale l'intensità $I(\lambda)$ è massima è inversamente proporzionale alla temperatura assoluta T :

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} \quad (1.4)$$

dove b è la costante di Wien, pari a circa $2.897 \cdot 10^{-3}\ mK$. La Legge di Stefan-Boltzmann¹ e la Legge di Wien possono essere ottenute dalla Legge di Planck rispettivamente integrando su tutte le possibili lunghezze d'onda e ponendo uguale a 0 la derivata prima di tale distribuzione.

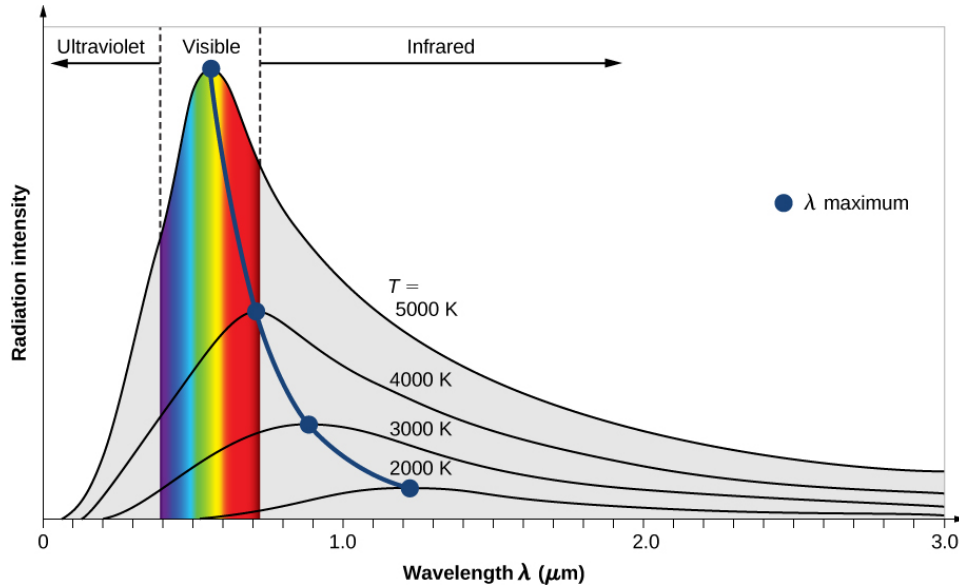


Figura 1.2: Spettri di corpo nero a diverse temperature. Si noti l'inversa proporzionalità tra λ_{max} e la temperatura prevista dalla *Legge di Wien*, e la diretta proporzionalità tra l'intensità della radiazione corrispondente al picco e la quarta potenza della temperatura, secondo la *Legge di Stefan-Boltzmann*¹. La dipendenza dalla quarta potenza non risulta in scala per ragioni grafiche [4].

1.1.2 Interazioni atmosferiche

Dopo aver analizzato lo spettro solare originario, approssimabile come radiazione di corpo nero, è necessario considerare i fenomeni che alterano la radiazione solare durante il passaggio attraverso l'atmosfera terrestre. Quest'ultima, infatti, introduce numerose interazioni tra i fotoni e le particelle che la compongono, modificando l'intensità e la distribuzione spettrale della radiazione che giunge sulla superficie terrestre, influenzando quindi anche le prestazioni delle celle fotovoltaiche. Uno dei parametri fondamentali per quantificare gli effetti atmosferici sulla radiazione solare è la massa d'aria, o **air mass** (**AM**), definita come lo spessore atmosferico che la radiazione solare deve attraversare per raggiungere una determinata località sulla superficie terrestre. Convenzionalmente, AM si calcola come:

$$AM = \frac{L}{L_0} \simeq \frac{1}{\cos(\theta_z)} \quad (1.5)$$

dove L è la lunghezza del percorso della radiazione attraverso l'atmosfera, L_0 è la lunghezza del percorso al livello del mare quando il Sole è allo zenit (cioè perpendicolare alla superficie terrestre), θ_z è l'angolo zenitale del Sole, ossia l'angolo tra la direzione dei raggi solari e la verticale locale. Come si osserva in figura 1.3, il valore di $AM = 1$ rappresenta la condizione in cui il Sole è allo zenit e la radiazione attraversa l'atmosfera

con il minimo percorso possibile, mentre a valori crescenti di AM corrispondono percorsi atmosferici più lunghi, che introducono una maggiore attenuazione. Il valore $AM = 1.5$ è utilizzato come standard di riferimento per le misurazioni delle prestazioni delle celle fotovoltaiche perché corrisponde ad un angolo zenitale di circa 48.2 gradi, che rappresenta una condizione tipica nelle regioni temperate ed è dunque il valore mediamente più rappresentativo delle condizioni solari globali.

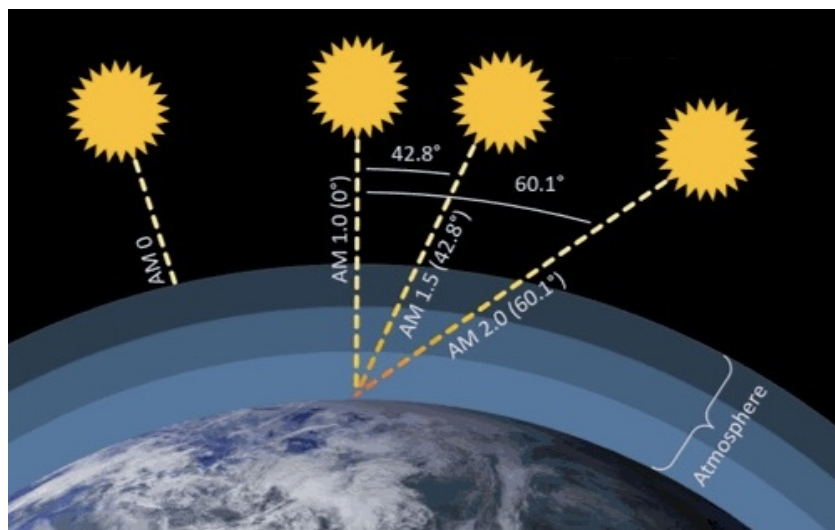


Figura 1.3: Valori di *Air Mass* più utilizzati e relativi angoli zenitali in gradi [5].

In base ad AM , dunque, lo spettro solare originario risulterà più o meno modificato, soprattutto da fenomeni di scattering ed assorbimento, di cui vengono citati di seguito i più significativi.

Lo **scattering di Rayleigh**, predominante per le lunghezze d'onda più corte (nello spettro del visibile, nella regione del blu), è causato dalle molecole di gas nell'atmosfera, e contribuisce al colore azzurro del cielo. Esso tende a deviare la radiazione lontano dalla sua direzione originaria, riducendo la componente diretta della radiazione che raggiunge il suolo.

Anche la diffusione dovuta a particelle di polvere e aerosol influenza lo spettro, specialmente in condizioni di maggiore inquinamento atmosferico o di attività vulcanica, aumentando ulteriormente la componente diffusa.

Inoltre, alcuni costituenti atmosferici come il vapore acqueo, il diossido di carbonio e l'ozono assorbono selettivamente parte della radiazione a specifiche lunghezze d'onda, generando bande di assorbimento e alterando lo spettro solare che arriva sulla superficie terrestre, come si può notare in figura 1.1. A causa di questi fenomeni, la radiazione solare incidente sui pannelli fotovoltaici presenta una minore intensità nelle bande assorbite e una maggiore componente diffusa, che dà un contributo più significativo in giornate

nuvolose o in presenza di particolato atmosferico. Si possono dunque distinguere due principali contributi della radiazione incidente su una cella fotovoltaica:

- **Radiazione diretta:** la componente della radiazione solare che arriva direttamente dalla direzione del Sole senza deviazioni. Questo contributo è essenziale per il funzionamento efficiente delle celle fotovoltaiche e risulta dominante in condizioni di cielo sereno e Sole allo zenit;
- **Radiazione diffusa:** dovuta allo scattering e alla riflessione multipla della radiazione solare causata dall'atmosfera e dal suolo. Questa componente può raggiungere la cella anche in condizioni di cielo coperto o di angoli di incidenza solare sfavorevoli.

Alla luce di ciò, nel tempo si sono sviluppate diverse tecniche per ottimizzare il punto di incidenza della luce sulle celle fotovoltaiche, tra cui i **concentratori di luce**, di cui sono stati riportati alcuni esempi in figura 1.4. Essi permettono di captare la radiazione su una superficie più ampia e di concentrarla sulla cella. Sono utilizzati soprattutto nelle celle multigiunzione, trattate nel dettaglio nella sezione 2.6.

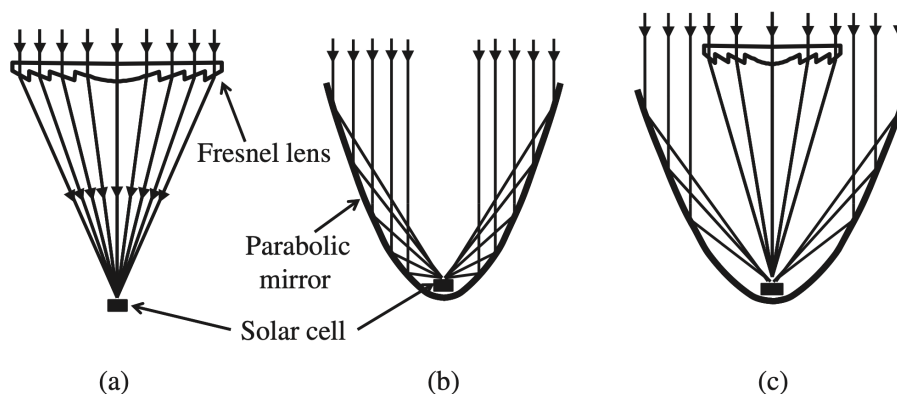


Figura 1.4: Diversi dispositivi per concentrare la radiazione solare in una cella solare: (a) una lente di Fresnel, (b) uno specchio parabolico, (c) una combinazione delle prime due tecniche [6].

1.2 Materiali semiconduttori

Il funzionamento delle celle fotovoltaiche si basa sulla struttura a bande dei semiconduttori. Si tratta di materiali in cui gli atomi costituenti si legano in un reticolo cristallino, il quale costituisce un'unica struttura elettronica nella quale gli orbitali dei singoli atomi si combinano tra loro e, quando essi sono almeno dell'ordine del numero di Avogadro $N_A \simeq 10^{23}$, danno origine a livelli energetici che formano uno spettro continuo detto

banda.

La banda a maggiore contenuto energetico occupata da elettroni prende il nome di **banda di valenza**, mentre quella a minor energia non occupata da elettroni è detta **banda di conduzione**. La separazione energetica tra tali bande costituisce uno dei criteri per distinguere conduttori, semiconduttori ed isolanti, come si può notare in figura 1.5. Nel caso dei semiconduttori si ha un'energia di gap $E_g \simeq 0.5 - 3 \text{ eV}$ che a temperatura ambiente risulta tale da consentire ad alcuni elettroni di transitare alla banda di conduzione per agitazione termica. Tali elettroni vengono detti *elettroni liberi* e sono i responsabili della *conduzione elettrica*.

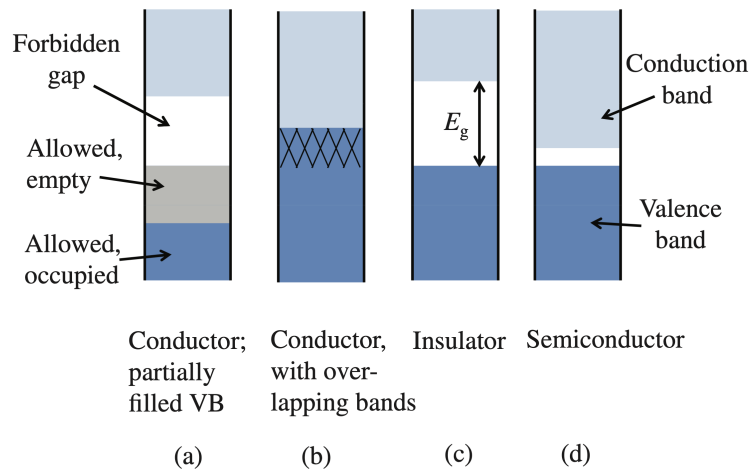


Figura 1.5: Struttura a bande per: (a) un conduttore dove la banda di valenza è parzialmente piena (come il sodio), (b) un conduttore in cui la banda di conduzione e di valenza si sovrappongono (come il magnesio), (c) un tipico isolante, con un'energia di gap superiore a $3 - 4 \text{ eV}$, (d) un semiconduttore, dove l'energia di gap è compresa tra 0.5 eV e 3 eV [7].

I semiconduttori sono elementi del quarto gruppo della tavola periodica, che presentano cioè quattro elettroni di valenza. Il semiconduttore che per primo fu studiato storicamente è il germanio (Ge), mentre quello più impiegato per applicazioni fotovoltaiche è il silicio (Si). Inoltre, le proprietà elettriche dei semiconduttori possono essere modificate introducendo nel reticolo altri elementi chimici, ovvero attraverso il *drogaggio* del semiconduttore, che può essere di due tipi, mostrati in figura 1.6:

- **drogaggio di tipo n**, se vengono aggiunti elementi pentavalenti, con un elettrone di valenza in più rispetto al semiconduttore puro. Un semiconduttore drogato n sarà quindi caratterizzato da una maggiore concentrazione di elettroni;

- **drogaggio di tipo p** , se vengono aggiunti elementi trivalenti, con un elettrone di valenza in meno rispetto al semiconduttore puro. Rispetto a quest'ultimo, questo tipo di drogaggio è caratterizzato da una minore concentrazione di elettroni.

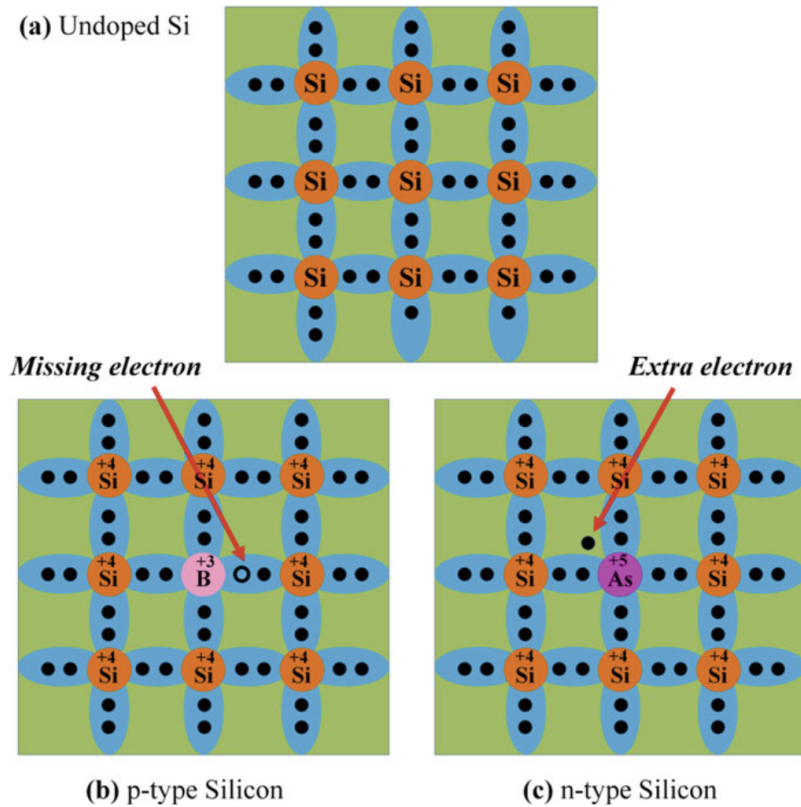


Figura 1.6: Strutture elettroniche del silicio puro, con drogaggio di tipo p e di tipo n [8].

1.2.1 Semiconduttori a gap diretto e indiretto

I semiconduttori si possono inoltre classificare in base alla struttura delle loro bande di valenza e di conduzione, ovvero in funzione del loro diagramma di dispersione energia-impulso, che esprime i valori di energia E che possono essere assunti all'interno di tali bande in funzione della quantità di moto p . In un semiconduttore a **gap diretto**, il valore minimo dell'energia della banda di conduzione corrisponde a quello massimo della banda di valenza. Ciò significa che un elettrone può effettuare una transizione diretta dalla banda di valenza alla banda di conduzione assorbendo un fotone con energia pari o superiore all'energia di gap, senza modificare la sua quantità di moto. Questo rende i semiconduttori a gap diretto, come l'arseniuro di gallio (GaAs), particolarmente efficienti per applicazioni optoelettroniche (ad esempio, per i LED) poiché facilitano l'assorbimen-

to della luce e riducono i fenomeni di dispersione.

Al contrario, in un semiconduttore a **gap indiretto**, come il silicio (Si), il massimo della banda di valenza e il minimo della banda di conduzione non si trovano in corrispondenza dello stesso valore della quantità di moto p . Per passare dalla banda di valenza alla banda di conduzione, un elettrone deve quindi variare sia la sua energia sia il suo momento, il che implica l'intervento di un *fonone*, ovvero un quanto di vibrazione reticolare, per conservare la quantità di moto durante la transizione. Questo fenomeno rende i semiconduttori a gap indiretto meno efficienti nell'assorbire la luce rispetto a quelli a gap diretto, richiedendo spessori di materiale maggiori per un assorbimento efficace della radiazione incidente. Tuttavia, i semiconduttori a gap indiretto possono risultare preferibili per applicazioni fotovoltaiche per la loro stabilità chimica e la loro abbondanza, nonostante richiedano spesso processi aggiuntivi per ridurre le perdite dovute alla ricombinazione non radiativa, analizzate nella sezione 2.1. I diagrammi energia-impulso nei due casi discussi sono riportati in figura 1.7a, 1.7b.

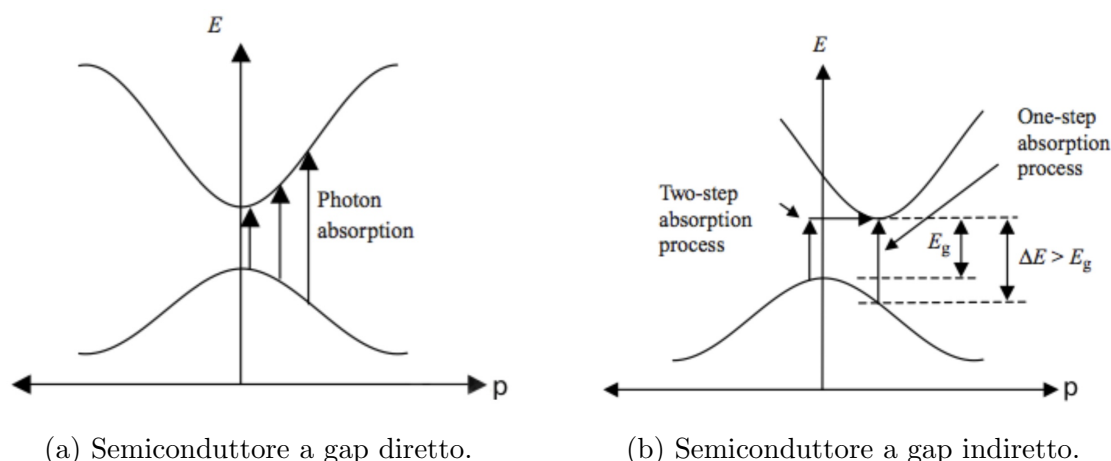


Figura 1.7: Valori di energia delle bande di conduzione e di valenza in funzione della quantità di moto. Sono mostrati anche i processi di assorbimento di un fotone: nel caso del gap diretto esso può sempre avvenire senza variazione della quantità di moto; nel caso del gap indiretto, può essere assorbito direttamente un fotone ad alta energia, superiore a E_g , ma qualora sia possibile l'interazione con un fonone, il processo energeticamente più conveniente è quello che prevede un salto di energia pari all'energia di gap, ed un trasferimento della quantità di moto necessaria da parte del fonone stesso [9].

1.3 Giunzione p - n

La **giunzione p - n** è uno degli elementi fondamentali nei dispositivi a semiconduttore, compresi i diodi, i transistor e, in particolare, le celle fotovoltaiche. Tale giunzione si

forma quando un materiale semiconduttore viene drogato in modo da creare una regione con un eccesso di portatori di carica positivi (dette *lacune*), chiamata *regione p* e una regione con un eccesso di portatori di carica negativi (elettroni) chiamata *regione n*.

Si definiscono *portatori maggioritari* le lacune nella regione *p* e gli elettroni nella regione *n*; viceversa saranno *minoritari* gli elettroni nella regione *p* e le lacune nella regione *n*.

Quando la regione *p* e la regione *n* vengono messe a contatto, gli elettroni della regione *n* tendono a diffondere nella regione *p*, ed analogamente le lacune della regione *p* sono soggette ad un moto di diffusione, dovuto al gradiente di concentrazione tra portatori di carica. Si crea in questo modo una regione di svuotamento (detta in inglese **depletion region**) intorno alla giunzione, priva di portatori liberi. Essa ha una larghezza che può variare tra $0.01 \mu m$ e $1 \mu m$, ed è caratterizzata da un campo elettrico interno di $10^4 - 10^5 V/cm$, che aumenta durante la ricombinazione di elettroni e lacune fino a raggiungere un valore massimo che ne impedisce la diffusione attraverso la giunzione, inibendone la ricombinazione, come si osserva in figura 1.8.

Dal punto di vista analitico, si può scrivere la densità di corrente relativa alle lacune ed agli elettroni come somma di un contributo di deriva ed uno di diffusione, dato dalle *leggi di Fick*:

- per le lacune:

$$J_P = \underbrace{qp\mu_P E}_{\text{deriva}} - \underbrace{qD_P \frac{dp}{dx}}_{\text{diffusione}} \quad (1.6)$$

- per gli elettroni:

$$J_N = \underbrace{qn\mu_N E}_{\text{deriva}} - \underbrace{qD_N \frac{dn}{dx}}_{\text{diffusione}} \quad (1.7)$$

dove q rappresenta la carica elettrica, p, n le concentrazioni di lacune ed elettroni, μ la mobilità relativa rispettivamente a lacune ed elettroni, E il campo elettrico, D_P, D_N le costanti di diffusione, $\frac{dp}{dx}, \frac{dn}{dx}$ i gradienti di concentrazione.

1.4 Cella solare fotovoltaica

Nelle celle fotovoltaiche, i fotoni della luce solare con energia sufficiente possono eccitare gli elettroni dalla banda di valenza alla banda di conduzione, creando coppie elettrone-lacuna in prossimità della giunzione. Il campo elettrico interno fa muovere gli elettroni verso la regione *n*, mentre le lacune verso la regione *p*. Se il circuito esterno è chiuso, si crea una corrente elettrica continua, data dagli elettroni che scorrono dalla regione *n* alla regione *p*, permettendo la raccolta e l'utilizzo dell'energia generata.

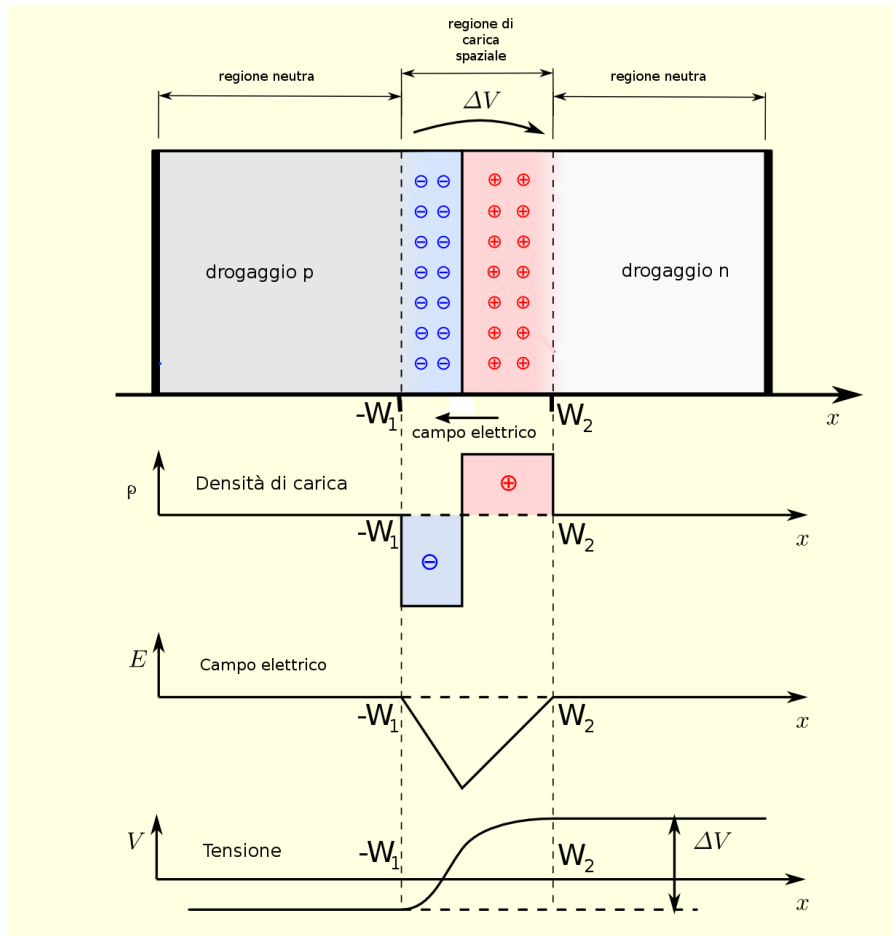


Figura 1.8: Schema di giunzione p - n con l'andamento spaziale della densità di carica ρ , del campo elettrico E e della tensione V . La *depletion region* ha larghezza $W_1 + W_2$ [10].

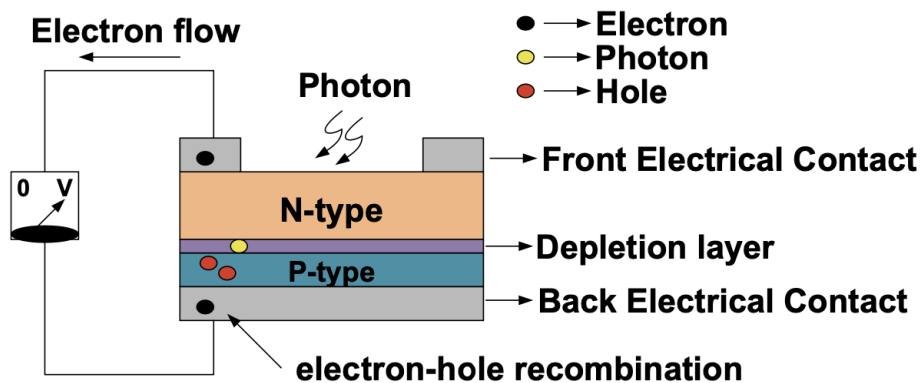


Figura 1.9: Diagramma schematico di una cella fotovoltaica [11].

1.4.1 Equazione della cella fotovoltaica

Per comprendere il funzionamento di una cella fotovoltaica, occorre analizzare il comportamento della giunzione $p-n$ in condizioni di polarizzazione diretta o inversa.

In **polarizzazione diretta**, una tensione positiva viene applicata alla regione p rispetto alla regione n , riducendo la barriera di potenziale e permettendo un flusso significativo di cariche attraverso la giunzione. In **polarizzazione inversa**, viene applicata una tensione negativa alla regione p rispetto alla regione n , aumentando la barriera di potenziale e limitando il flusso di cariche, ad eccezione di una *corrente inversa di saturazione* I_0 che è pressoché indipendente dalla tensione applicata e risulta dell'ordine dei μA per il germanio e dei nA per il silicio. L'equazione che descrive l'andamento della corrente in funzione della tensione applicata attraverso la giunzione è detta **equazione del diodo**, di cui si riporta la dimostrazione nel prosieguo del paragrafo:

$$I = I_0 \left(\exp \left(\frac{eV_D}{kT} \right) - 1 \right) \quad (1.8)$$

dove I rappresenta la corrente che attraversa la giunzione, I_0 è la corrente inversa di saturazione, e è la carica dell'elettrone, V è la tensione applicata attraverso la giunzione, k è la costante di Boltzmann e T è la temperatura assoluta.

Questa equazione descrive l'andamento della corrente in funzione della tensione sia in polarizzazione diretta che inversa, il quale è rappresentato graficamente in figura 1.10. Per quanto riguarda la polarizzazione inversa ($V < 0$), la corrente risulta pressoché costante al valore denotato con I_0 . In polarizzazione diretta, invece, la corrente cresce esponenzialmente a partire da un valore di tensione detto V_γ , che rappresenta il voltaggio necessario per mandare in conduzione la giunzione $p-n$, o equivalentemente il *diodo*, che è un componente elettronico a semiconduttore basato su una giunzione $p-n$ che permette il passaggio della corrente in una sola direzione, bloccandola nella direzione opposta.. Nel caso di diodi al germanio si ha $V_\gamma^{Ge} \simeq 100 - 200 \text{ mV}$, mentre per il silicio $V_\gamma^{Si} \simeq 600 - 800 \text{ mV}$. In polarizzazione inversa, quando la tensione è negativa, è possibile trascurare il termine esponenziale:

$$I \simeq I_0 . \quad (1.9)$$

In polarizzazione diretta, per valori di tensione superiori a V_γ , per i quali si può assumere $eV_D \gg kT$, vale l'approssimazione:

$$I \simeq I_0 \exp \left(\frac{eV_D}{kT} \right) . \quad (1.10)$$

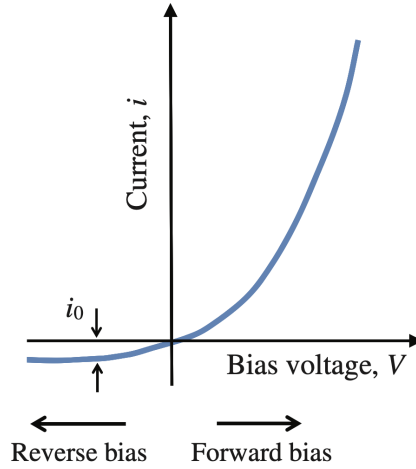


Figura 1.10: Curva caratteristica corrente-tensione di una giunzione $p-n$. Quando la tensione in polarizzazione diretta (*forward-bias*) aumenta al di sopra di un valore di soglia detto V_γ , la corrente aumenta rapidamente, per via dell'andamento esponenziale. Invece, in polarizzazione inversa (*reverse-bias*), la corrente inversa di saturazione I_0 rimane pressoché costante. Il valore di I_0 non risulta in scala: è esagerato per mostrare più chiaramente l'andamento costante ad un valore che è dell'ordine dei μA per il germanio e dei nA per il silicio [12].

L'andamento esponenziale deriva da un'importante assunzione, detta di *Low Level Injection (LLIC)*, la quale si verifica quando il numero di portatori di carica minoritari iniettati nella giunzione è molto inferiore al numero di portatori di carica maggioritari già presenti, ovvero l'incremento di portatori di carica dovuto all'illuminazione è piccolo rispetto alla concentrazione di equilibrio dei portatori maggioritari. Trascurando inoltre la caduta di tensione, dovuta alla corrente, sui contatti ohmici e sul corpo del cristallo, nonché la larghezza della *depletion region*, si può assumere che

$$J_P^{LLIC} = qp\mu E - qD_P \frac{dp}{dx} \simeq 0 \quad (1.11)$$

dove J_P rappresenta la densità di corrente relativa alle lacune e da cui è possibile ricavare la seguente espressione per il campo elettrico:

$$E = -\frac{dV}{dx} = \frac{D_P}{\mu_P} \frac{1}{p} \frac{dp}{dx}. \quad (1.12)$$

Integrando per separazione di variabili:

$$\int_{p_{p0}}^{p_n^{(0)}} \frac{dp}{p} = - \int_0^{V_0 - V_D} \frac{dV}{V_T} \quad (1.13)$$

dove V_0, V_D rappresentano rispettivamente la tensione relativa alla barriera di potenziale nella *depletion region* e la tensione di polarizzazione, mentre la differenza $V_0 - V_D$ è pari alla differenza di potenziale ai capi della giunzione. Dall'integrazione ed utilizzando $V_0 = V_T \ln \frac{p_{p0}}{p_{n0}}$, ovvero l'espressione del potenziale di contatto in funzione della tensione termica $V_T = \frac{kT}{e}$, si ottiene la **legge della giunzione**:

$$p_n(0) = p_{n0} \exp(\pm V_D/V_T) \quad (1.14)$$

dove il segno $+$ vale in polarizzazione diretta, mentre il segno $-$ in polarizzazione inversa. I due diversi andamenti sono riportati nelle figure 1.11 e 1.12.

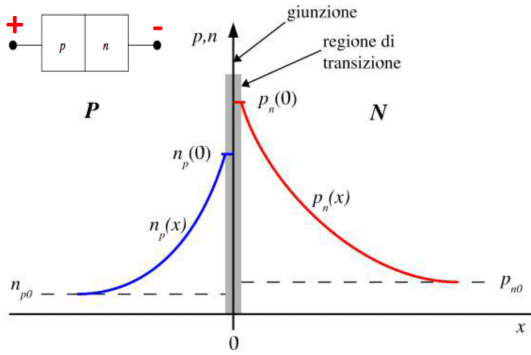


Figura 1.11: Andamento della concentrazione dei portatori minoritari in funzione della distanza dalla giunzione in polarizzazione diretta. In questo grafico si ha drogaggio asimmetrico, vale a dire che la regione p e la regione n hanno un diverso livello di drogaggio [13].

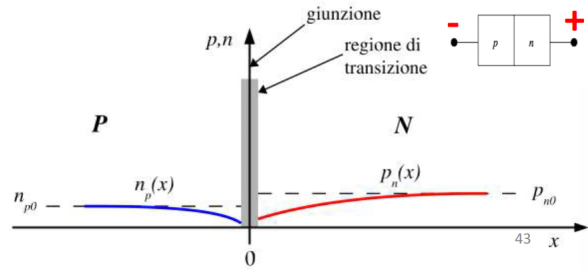


Figura 1.12: Andamento della concentrazione dei portatori minoritari in funzione della distanza dalla giunzione in polarizzazione inversa, con drogaggio simmetrico [13].

Ricordando che in condizioni di *Low-Level Injection* la corrente dei portatori minoritari è data solamente dalla corrente di diffusione (essendo trascurabile il contributo della loro corrente di deriva), è possibile esprimere la corrente dovuta alle lacune e la corrente dovuta agli elettroni in funzione dell'eccesso di lacune e di elettroni in $x = 0$, rispettivamente denotati con $p'_n(0)$ e $n'_p(0)$:

$$I_P^{diff}(0) = \frac{qAD_P}{L_P} p'_n(0) = \frac{qAD_P}{L_P} p_n(0) \left(\exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) - 1 \right) \quad (1.15)$$

$$I_N^{diff}(0) = \frac{qAD_N}{L_N} n'_p(0) = \frac{qAD_N}{L_N} n_p(0) \left(\exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) - 1 \right) . \quad (1.16)$$

Sommando i due contributi si ottiene:

$$I = \left[\frac{qAD_P}{L_P} p_{n0} + \frac{qAD_N}{L_N} n_{p0} \right] \left(\exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) - 1 \right) . \quad (1.17)$$

Chiamando I_0 il termine tra parentesi quadre ed introducendo il fattore di idealità η , necessario per parametrizzare quanto la curva caratteristica $I-V$ di un generico semiconduttore si discosta da quella del germanio, che è l'unico che soddisfa tutte le assunzioni che sono state fatte per ricavare tale equazione⁴, si ottiene l'equazione del diodo nella sua forma più generale:

$$I = I_0 \left(\exp \left(\frac{V_D}{\eta V_T} \right) - 1 \right) . \quad (1.18)$$

I valori del *fattore di idealità* η rispettivamente per germanio, silicio e arseniuro di gallio sono $\eta_{Ge} = 1$, $\eta_{Si} = 1.5 - 1.8$, $\eta_{GaAs} = 4$.

1.4.2 Modello circuitale

Quando la giunzione $p-n$ è esposta alla luce, i fotoni generano coppie elettrone-lacuna che vengono separate dal campo elettrico interno della giunzione. Come discusso precedentemente, gli elettroni vengono spinti verso la regione n e le lacune verso la regione p , creando una corrente di corto circuito I_{sc} , che è proporzionale all'intensità della luce incidente. Come si può osservare in figura 1.13, la corrente che può essere utilizzata per alimentare un carico esterno è data da:

$$I_{cell} = I_{photo} - I_0 \left(\exp \left(\frac{eV_D}{\eta kT} \right) - 1 \right) . \quad (1.19)$$

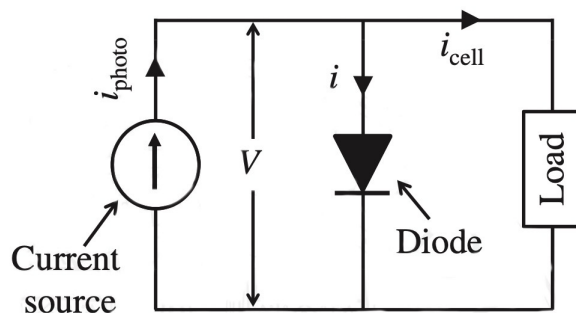


Figura 1.13: Modello circuitale di una cella fotovoltaica [14].

⁴Oltre all'assunzione discussa di *Low Level Injection*, in questa trattazione si trascura la caduta di tensione, dovuta alla corrente, sui contatti ohmici e sul corpo del cristallo, vale a dire che il potenziale esterno viene applicato solo alla *depletion region*, ed inoltre viene utilizzata l'ipotesi di *depletion region infinitesima*, ovvero ne viene trascurata la larghezza. Quest'ultima risulta fisicamente vera solamente per il germanio; per gli altri semiconduttori occorre introdurre delle correzioni, prima fra tutte il fattore di idealità η che compare nell'equazione del diodo.

Lo schema circuitale di una cella fotovoltaica è rappresentato da un generatore di corrente I_{photo} , il cui valore è fissato se si mantiene costante l'illuminazione. Tale generatore è connesso in parallelo con un diodo e con un carico esterno. La corrente I_{photo} per la prima legge di Kirchhoff è uguale alla somma di I , la corrente che attraversa la giunzione (rappresentata da un diodo nello schema) e di I_{cell} . Ad esempio, quando aumenta la corrente che attraversa il carico esterno I_{cell} , la corrente I che attraversa il diodo cala perché nella relazione $I_{cell} = I_{photo} - I$, fissata I_{photo} , I deve diminuire affinché I_{cell} cresca. L'equazione del diodo (1.8) suggerisce che anche il voltaggio V_D diminuirà. In figura 1.14, invece, viene riportata la variazione della curva caratteristica di una cella fotovoltaica quando varia l'illuminazione.

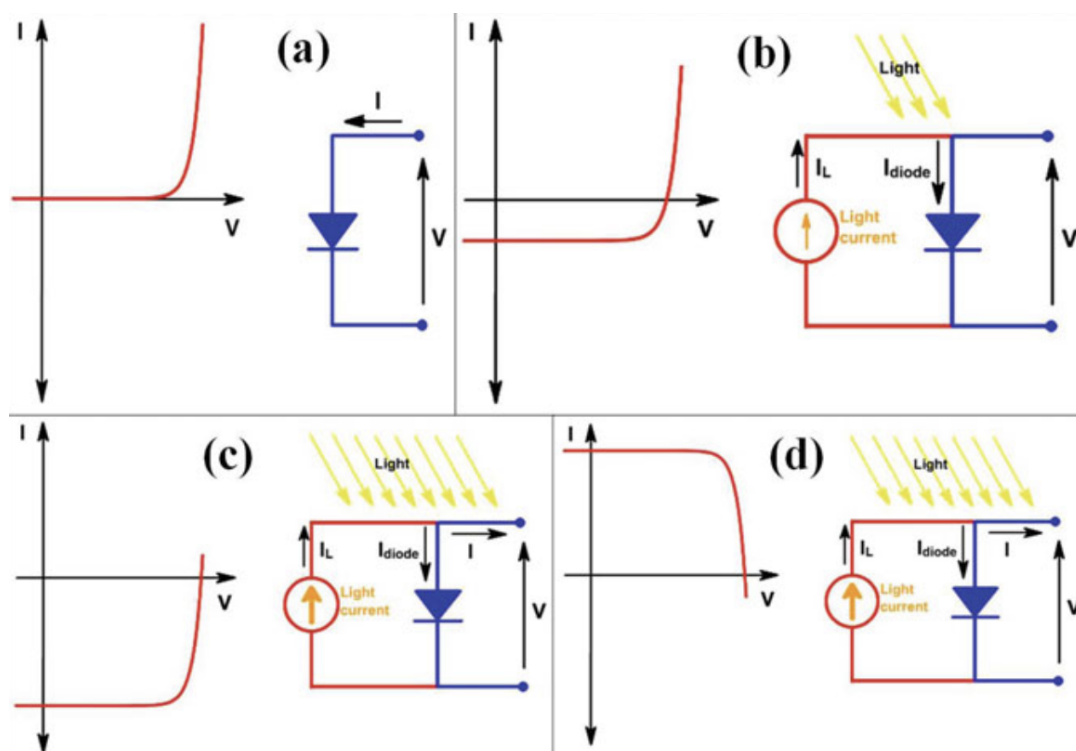


Figura 1.14: Curva corrente-tensione di una cella fotovoltaica: (a) non illuminata, (b) illuminata, (c) per illuminazione crescente. (d) per convenzione, la curva viene riportata nel primo e secondo quadrante operando una simmetria assiale con l'asse della tensione. I_{cell} è indicata con I , I_{photo} è denotata con I_L , e I_{diode} è data dall'equazione 1.18 [8].

1.4.3 Cella fotovoltaica e fotodiode

Nel paragrafo precedente è stato mostrato come sia possibile modellizzare una cella fotovoltaica con un circuito in cui è presente un generatore di corrente, un diodo ed un carico esterno. Più precisamente, l'elemento circuitale che meglio rappresenta una cella

fotovoltaica è il **fotoiodo**. Si tratta di un dispositivo a semiconduttore in grado di convertire la radiazione elettromagnetica in una corrente elettrica. Si basa sull'**effetto fotovoltaico**, e può operare in modalità fotovoltaica (senza polarizzazione esterna) o fotoconduttiva (in polarizzazione inversa).

- In **modalità fotovoltaica**, il fotodiiodo genera una tensione elettrica quando è esposto a una radiazione luminosa. Questa modalità sfrutta l'effetto fotovoltaico, in cui i fotoni incidenti sulla giunzione $p-n$ generano coppie elettrone-lacuna; le cariche create vengono separate dal campo elettrico interno della giunzione, generando una corrente proporzionale all'intensità della luce. Si tratta di un utilizzo tipico nelle celle fotovoltaiche, progettate per massimizzare l'efficienza nella conversione dell'energia solare in energia elettrica.
- In **modalità fotoconduttiva**, il fotodiiodo agisce come un sensore, in cui l'illuminazione provoca una variazione della conduttività del materiale semiconduttore. In questo caso, quando i fotoni colpiscono il fotodiiodo, essi non generano necessariamente una tensione, ma aumentano la densità di portatori di carica, riducendo la resistenza elettrica e permettendo un maggiore flusso di corrente in risposta all'illuminazione. Viene utilizzata una giunzione polarizzata inversamente perché altrimenti, in polarizzazione diretta, la corrente fotoprodotta non costituirebbe un contributo apprezzabile rispetto alla corrente di polarizzazione diretta, molto maggiore. Questa modalità è comunemente utilizzata in applicazioni di rilevamento, come nei sensori di luce e nelle fotocellule e, più nello specifico, rappresenta una delle tecnologie di base dei *Silicon Detector*, che hanno un ruolo importante nella fisica delle alte energie.

In entrambi i casi, occorre che il fotone incidente sulla giunzione abbia un'energia maggiore dell'energia di gap del semiconduttore per generare una coppia elettrone-lacuna. Gli elettroni così eccitati hanno una certa probabilità di essere liberati, associata all'interazione quantistica tra fotoni ed elettroni. Per generare corrente - detta *fotocorrente* - è necessaria la presenza della *depletion region*, dove il campo elettrico accelera gli elettroni fotogenerati verso la regione n e le lacune fotogenerate verso la regione p .

In questo modo, collegando i contatti elettrici del fotodiiodo ad un circuito elettrico esterno, gli elettroni fluiscono nel circuito come *fotocorrente*, la quale è in grado di compiere lavoro elettrico, potendo alimentare un carico esterno. In questo senso, è possibile assimilare una cella fotovoltaica ad una batteria: quando è illuminata può generare tensione, il *potenziale fotovoltaico*, il cui valore massimo V_{oc} rappresenta la tensione massima che una cella fotovoltaica può generare. La sua espressione può essere ottenuta imponendo l'annullamento della corrente I_{cell} nell'equazione 1.19, in quanto è il valore di tensione che si ha quando il circuito è aperto:

$$V_{oc} = \eta V_T \ln \left(1 + \frac{I_{photo}}{I_0} \right) . \quad (1.20)$$

Quando invece i terminali della cella sono connessi tramite un conduttore ideale, con resistenza nulla, la fotocorrente generata si chiama *corrente di corto circuito* I_{sc} e la differenza di potenziale tra i terminali è $V_{sc} = 0$. Questi due casi limite sono rappresentati in figura 1.15 .

Nei casi intermedi, quando il circuito di carico ha una resistenza $0 < R_L < +\infty$, la differenza di potenziale è compresa tra 0 e V_{oc} e la fotocorrente I è compresa tra 0 e I_{sc} . In particolare, quando la cella fotovoltaica è collegata ad un circuito esterno in cui circola *fotocorrente*, la differenza di potenziale diminuisce rispetto a V_{oc} per la presenza di resistenze interne di varia natura, come quelle dovute ai materiali della cella e ai contatti elettrici tra i terminali e il circuito di carico. In tali casi intermedi, vale la *Legge di Ohm*:

$$V = R_L \cdot I \quad (1.21)$$

che suggerisce come, una volta fissato il circuito di carico, ovvero quando è noto il valore della resistenza R_L , viene univocamente determinata la relazione $I = I(V)$ che graficamente rappresenta la *curva caratteristica* della cella fotovoltaica.

Nei due casi limite discussi, la potenza estraibile $P = V \cdot I_L$ risulta nulla perché o la differenza di potenziale o la corrente sono nulle. Per valori di tensione compresi tra 0 e V_{oc} , la cella fotovoltaica risulta in grado di generare una potenza elettrica $P > 0$ pari a

$$P(V) = V \cdot I_L(V) . \quad (1.22)$$

1.4.4 Parametri caratteristici

Per valutare le prestazioni di una cella fotovoltaica, e studiare come migliorare le tecnologie su cui essa si basa, è necessario analizzare alcuni parametri caratteristici, che forniscono una misura della capacità della cella di convertire l'energia solare in energia elettrica: il punto di massima potenza (*MPP*), l'efficienza (η), il *fill factor* (*FF*).

Avendo definito il regime operativo di una cella fotovoltaica come l'intervallo di tensioni $[0, V_{oc}]$ per le quali la cella è in grado di erogare potenza elettrica, esiste un valore di tensione, V_m , detto **punto di massima potenza**, in cui la potenza è massima:

$$\frac{dP(V)}{dV} = 0, \quad \frac{d^2P(V)}{dV^2} < 0 . \quad (1.23)$$

Tale punto può essere individuato anche nella curva caratteristica $I - V$ determinando il punto di lavoro energeticamente più conveniente per far operare la cella, come si può osservare in figura 1.16; in particolare, attraverso la Legge di Ohm, esso definisce una *resistenza di carico ideale* $R_{L,id}$ tale da far coincidere il punto di lavoro della cella con il punto di massima potenza:

$$R_{L,id} = \frac{V_m}{I_m} . \quad (1.24)$$

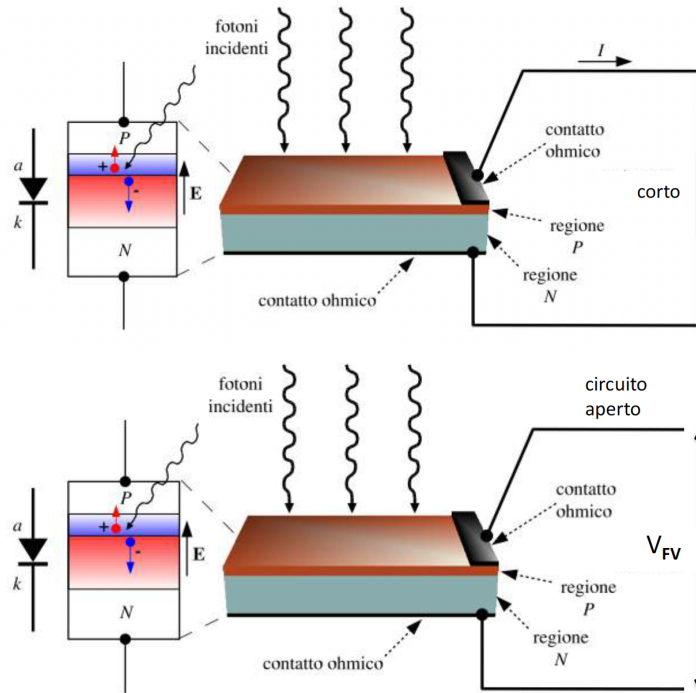


Figura 1.15: Confronto tra un fotodiode in condizioni di cortocircuito, a sinistra, ed un fotodiode in condizioni di circuito aperto, a destra [13].

In questo contesto, per misurare la qualità di una cella fotovoltaica, si utilizza il **fill factor** (**FF**), definito come:

$$FF = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{sc} \cdot V_{oc}} = \frac{P_{max}}{I_{sc} \cdot V_{oc}}. \quad (1.25)$$

Esso rappresenta il rapporto tra l'area del rettangolo massimo di dimensioni V_m, I_m che può essere inscritto sotto la curva caratteristica $I - V$ della cella fotovoltaica ed il rettangolo di dimensioni V_{oc}, I_{sc} . Può assumere valori compresi tra 0 e 1 e rappresenta un indicatore di quanto la curva caratteristica si avvicina alla potenza teorica massima ottenibile, dunque quanto più il *fill factor* è vicino ad 1, tanto più la cella fotovoltaica ha basse perdite resistive ed un miglior comportamento elettrico. Valori tipici del *fill factor* per celle al silicio sono compresi tra 0.7 e 0.85.

L'**efficienza** η di una cella è invece definita come il rapporto tra la potenza elettrica massima generata (P_{max}) e la potenza della radiazione solare incidente sulla superficie della cella P_{sun} :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{sun}} = \frac{I_m \cdot V_m}{P_{sun}} = \frac{I_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF}{P_{sun}}. \quad (1.26)$$

Un altro parametro che influisce significativamente sull'efficienza delle celle fotovoltaiche è la **temperatura di funzionamento**. Le celle fotovoltaiche al silicio, ad oggi

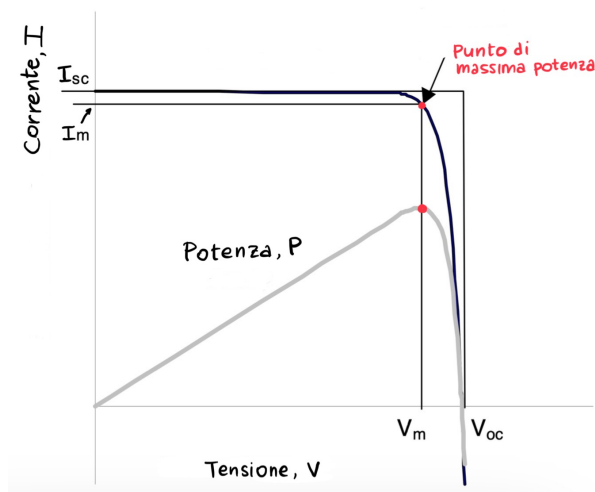


Figura 1.16: In grigio l'andamento della potenza in funzione della tensione, che individua il punto di massima potenza, ed in nero la curva caratteristica $I - V$ di una cella fotovoltaica ideale [14].

le più diffuse, tendono a perdere efficienza all'aumentare della temperatura. Questo comportamento è dovuto a diversi fenomeni fisici:

- **Riduzione della tensione a circuito aperto (V_{oc})** La V_{oc} diminuisce all'aumentare della temperatura, dal momento che l'energia di gap del semiconduttore si riduce per temperature crescenti, rendendo più facile per gli elettroni passare dalla banda di valenza alla banda di conduzione. Di conseguenza, la V_{oc} diminuisce, riducendo la potenza generata;
- **Aumento della corrente inversa di saturazione (I_0)**: poiché i portatori minoritari nei semiconduttori sono prodotti per effetto termico, all'aumentare della temperatura corrisponde un aumento di I_0 , secondo la legge generale:

$$I_0 = KT^m \exp\left(-\frac{V_{g0}}{\eta V_T}\right) \quad (1.27)$$

dove K è una costante indipendente dalla temperatura, m è un esponente caratteristico di ogni semiconduttore che vale 2 per il germanio e 1.5 per il silicio, e V_{g0} è la tensione espressa in eV che corrisponde numericamente all'energia di gap.

- **Effetti sulla corrente di cortocircuito**: Sebbene l'aumento della temperatura possa leggermente aumentare la I_{sc} a causa della maggiore generazione di portatori di carica, questo effetto è generalmente molto minore rispetto alla diminuzione della V_{oc} . Pertanto, l'effetto netto è una riduzione dell'efficienza.

L'effetto combinato di questi fenomeni porta a una diminuzione dell'efficienza della cella fotovoltaica all'aumentare della temperatura, che nel caso di celle al silicio si aggira attorno ai $-0.4\%/^{\circ}C$. A causa di ciò, al fine di confrontare le prestazioni delle celle fotovoltaiche, si rende necessario definire delle condizioni standard per la misurazione dei parametri, tra cui le più utilizzate sono:

- *Standard Test Condition (STC)*, caratterizzata da una densità di potenza incidente $P_{sup} = 1000 \text{ W/m}^2$, da una temperatura della cella $T_{cell} = 25^{\circ}C$ e da *Air Mass* $AM = 1.5$;
- *Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)*, caratterizzata da una densità di potenza incidente $P_{sup} = 800 \text{ W/m}^2$, da una temperatura dell'aria $T_{air} = 20^{\circ}C$, da una velocità del vento pari a $v_{wind} = 1 \text{ m/s}$ e da *Air Mass* $AM = 1.5$.

Se le condizioni *STC* si utilizzano maggiormente quando si vuole misurare la massima potenza teorica che un pannello può generare, le *NOCT* sono più utilizzate per valutare le prestazioni in condizioni reali. Inoltre, poiché ad una temperatura ambiente di $20^{\circ}C$ la temperatura di una cella fotovoltaica tende ad essere sensibilmente superiore ai $25^{\circ}C$, i risultati in condizioni *NOCT* avranno una minore potenza generata ed una minore efficienza rispetto ai risultati *STC*, fornendo così valori che possono riprodurre più fedelmente la reale produzione energetica.

1.4.5 Cella fotovoltaica ideale e cella fotovoltaica reale

Nel paragrafo 1.4.2 è stato discusso in generale il modello circuitale di una cella fotovoltaica. Volendo meglio dettagliare quanto già affermato, occorre notare come la descrizione teorica di tali celle si basa, in prima approssimazione, su assunzioni che semplificano il comportamento reale del dispositivo. In un modello ideale, si assume che non vi siano perdite ohmiche, ricombinazioni non radiative o altre inefficienze che possano ridurre la performance del dispositivo. La corrente di cortocircuito I_{sc} e la tensione a circuito aperto V_{oc} sono massimizzate e la curva caratteristica $I - V$ segue l'equazione del diodo modificata per includere l'effetto fotovoltaico (1.19), che ora è possibile scrivere nella forma:

$$I = I_{sc} - I_0 \left(\exp \left(\frac{V_D}{\eta V_T} \right) - 1 \right). \quad (1.28)$$

Una *cella fotovoltaica reale* presenta diversi tipi di perdite energetiche che ne riducono l'efficienza. Esse includono:

- **Resistenza in serie** R_s , dovuta alla resistenza elettrica dei materiali che compongono la cella ed i contatti elettrici;
- **Shunt resistance**, dovuta ai percorsi di corrente alternativa attraverso la cella che bypassano la giunzione $p-n$, ovvero le perdite di fotocorrente ai bordi della cella e tra i contatti elettrici di differente polarità;

- **Ricombinazioni non radiative**, ovvero i processi in cui le coppie elettrone-lacuna si ricombinano senza generare fotoni, riducendo la corrente disponibile;
- **Perdite ottiche**, dovute alla riflessione della luce sulla superficie della cella e all'assorbimento non efficiente dei fotoni.

L'effetto di queste perdite è visibile nella curva $I - V$ di una cella fotovoltaica reale, che mostra una riduzione della corrente di cortocircuito e della tensione a circuito aperto rispetto alla cella ideale. Inoltre, il punto di massima potenza è inferiore a quello predetto dal modello ideale.

Per adattare il modello circuitale ad una cella fotovoltaica reale, oltre al generatore di corrente ed al diodo presenti anche nella cella ideale, occorre aggiungere una resistenza R_{sh} ed una resistenza R_s in serie con il circuito di carico, come emerge dal confronto tra le figure 1.17 e 1.18.

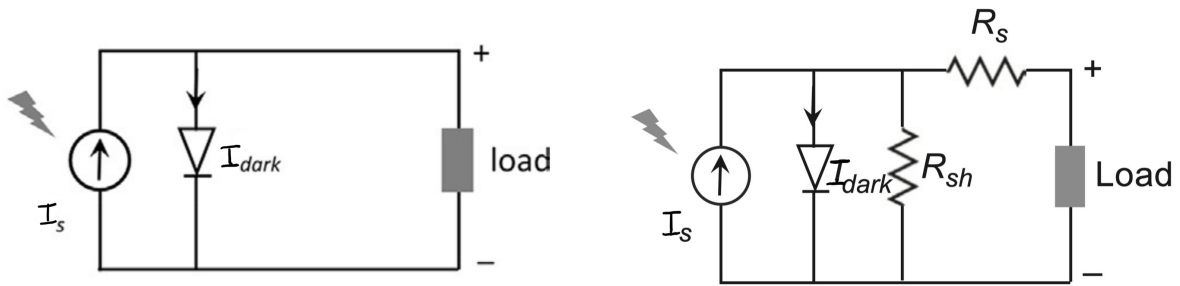


Figura 1.17: Cella fotovoltaica ideale [14].

Figura 1.18: Cella fotovoltaica reale [14].

L'equazione 1.28 per una cella reale diventa:

$$I = I_{sc} - I_0 \left(\exp \left(\frac{V_D + I_L R_s}{\eta V_T} \right) - 1 \right) - \frac{V + I_L R_s}{R_{sh}}. \quad (1.29)$$

Con riferimento ai parametri introdotti nel paragrafo 1.4.4, la presenza delle due resistenze R_s ed R_{sh} riduce sia l'efficienza η che il *fill factor* FF .

Un'analisi più approfondita, basata sul modello circuitale discusso, mostra come in una cella reale l'aumento di R_s e la diminuzione di R_{sh} riducano sia il *fill factor* FF che l'efficienza η della *cella fotovoltaica reale* rispetto alla corrispondente *cella fotovoltaica ideale*, come si può notare dal cambiamento della curva caratteristica $I - V$ mostrato in figura 1.19.

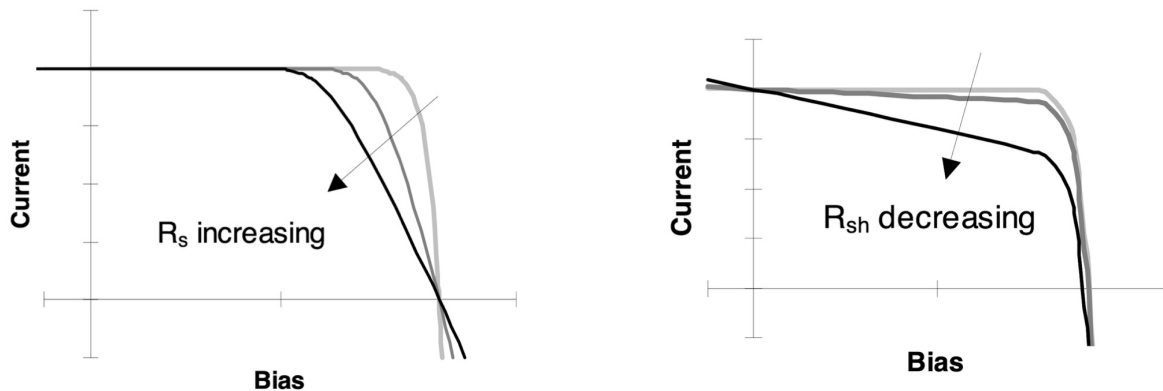


Figura 1.19: Effetto sulla curva caratteristica $I - V$ delle resistenze R_s e R_{sh} . Le curve in grigio chiaro sono rispettivamente relative ai valori $R_s = 0$ e $R_{sh} \rightarrow \infty$ [14].

1.4.6 Impianto fotovoltaico

Un impianto fotovoltaico è costituito da un insieme di celle collegate tra loro per produrre energia elettrica. L'integrazione di più celle in un impianto avviene attraverso una struttura gerarchica che prevede vari livelli di aggregazione, come illustrato in figura 1.20. Ogni cella fotovoltaica è un dispositivo singolo in grado di convertire la radiazione solare in energia elettrica. Per raggiungere livelli di potenza significativi, più celle vengono assemblate in **moduli**, i quali sono poi raggruppati in **pannelli** e successivamente in **stringhe**. Infine, l'insieme di più stringhe forma un **generatore fotovoltaico**, che rappresenta l'unità di base dell'impianto completo.

La struttura tipica di un impianto fotovoltaico si basa su collegamenti sia in serie sia in parallelo tra le celle e i moduli. Il collegamento in serie aumenta la tensione complessiva del sistema, mentre il collegamento in parallelo incrementa la corrente totale generata. Questo approccio consente di ottimizzare la configurazione dell'impianto per raggiungere i requisiti di potenza e tensione richiesti per l'alimentazione dei carichi collegati.

In figura 1.21, invece, si nota come i punti di massima potenza (MPP, *Maximum Power Points*) differiscano tra collegamenti in serie e in parallelo. In un collegamento in serie, la tensione complessiva è data dalla somma delle tensioni delle singole celle, mentre in un collegamento in parallelo è la corrente ad aumentare proporzionalmente.

In conclusione, la progettazione di un impianto fotovoltaico richiede una precisa ingegnerizzazione dei collegamenti elettrici e un'accurata configurazione dei moduli per ottimizzare l'assorbimento della radiazione solare e la generazione di corrente elettrica. Affinché l'impianto sia in grado di produrre la potenza desiderata si sfruttano un numero variabile di unità, utilizzando sia collegamenti in serie che in parallelo, affinché esso lavori il più vicino possibile al suo punto di massima potenza, massimizzando in questo modo l'efficienza di conversione.

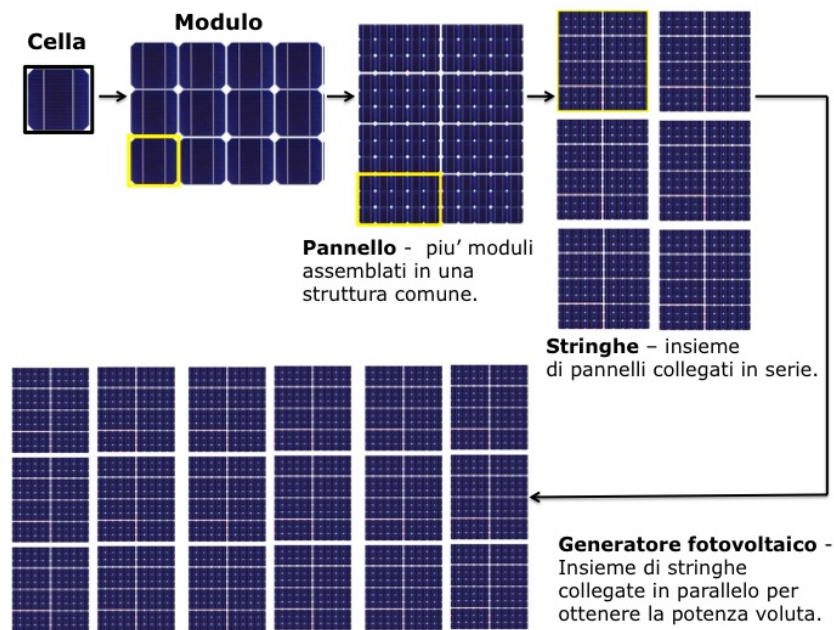


Figura 1.20: Componenti di un generatore fotovoltaico all'interno di un impianto [15].

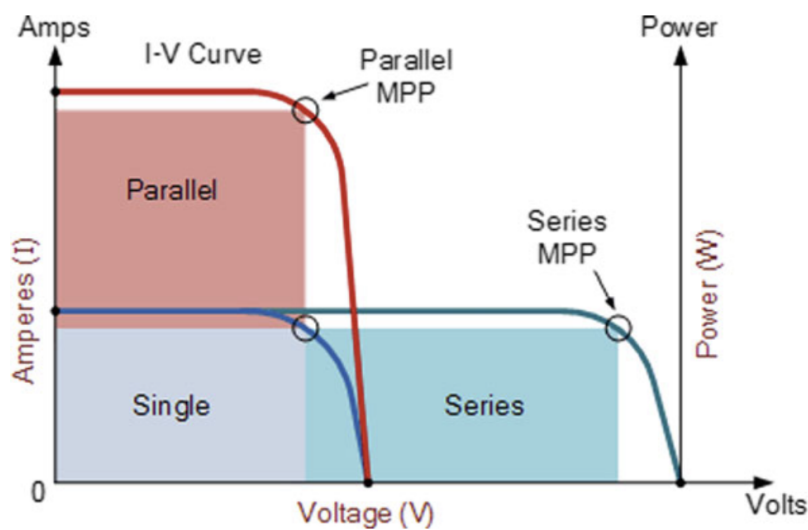


Figura 1.21: Caratteristica corrente-tensione di un collegamento in serie ed in parallelo di più celle fotovoltaiche. Nel collegamento in serie, le tensioni delle celle si sommano, aumentando la tensione complessiva e spostando il punto di massima potenza (*MPP*) verso valori di tensione più elevati, mentre la corrente rimane costante. Nel collegamento in parallelo, la corrente totale è la somma delle correnti delle celle e il *MPP* si sposta verso valori di corrente più alti, con la tensione che rimane costante [8].

Capitolo 2

Tipologie e tecnologie dei pannelli fotovoltaici

Dopo aver analizzato i principi base di funzionamento delle celle fotovoltaiche, in questo capitolo si vogliono approfondire i fattori che influenzano l'efficienza dei pannelli fotovoltaici. In secondo luogo, ne verranno analizzate diverse tipologie, con particolare risalto alle nuove tecnologie, che offrono interessanti risultati in termini di efficienza, ma che spesso mostrano limiti in termini di effettiva fruibilità su larga scala.

2.1 Assorbimento e ricombinazione

Come introdotto nella sezione 1.2, affinché un elettrone sia promosso dalla banda di valenza alla banda di conduzione, è necessario che il fotone assorbito abbia energia $E \geq E_g$, essendo così in grado di creare una coppia elettrone-lacuna. I fotoni con $E < E_g$, invece, attraversano la cella senza essere assorbiti, non contribuendo alla produzione di corrente. Per quanto riguarda i fotoni con $E > E_g$, l'energia in eccesso ($\Delta E = E - E_g$) viene dissipata sotto forma di energia termica, inducendo vibrazioni reticolari all'interno del semiconduttore, attraverso dei quanti detti *fononi*. Questo processo è noto come *termalizzazione* perché l'energia in gioco viene assorbita dal reticolo cristallino senza contribuire alla fotocorrente, riducendo dunque l'efficienza della cella. Tale effetto termico causa inoltre un aumento della temperatura del dispositivo, che di norma riduce ulteriormente l'efficienza della cella, come analizzato nel paragrafo 1.4.4.

Inoltre, anche quando una coppia elettrone-lacuna è stata prodotta grazie all'assorbimento di un fotone sufficientemente energetico, possono subentrare **processi di ricombinazione** che annullano la coppia prodotta, e che diventano via via più significativi all'aumentare della temperatura. Esistono diversi meccanismi di ricombinazione, di cui i seguenti sono schematizzati in figura 2.1:

- **Ricombinazione radiativa (band-to-band)**: si verifica quando gli elettroni nella banda di conduzione rilasciano fotoni ritornando alla banda di valenza. Avviene prevalentemente nei semiconduttori a gap diretto perché nel caso di gap indiretto, al fine di conservare la quantità di moto totale, è necessaria l'emissione di un fonone, rendendo il processo meno probabile;
- **Ricombinazione non radiativa (Shockley-Read-Hall)**¹: riguarda stati di impurezza e difetti nella struttura cristallina, che agiscono come *stati trappola* per gli elettroni e le lacune, facilitando la loro ricombinazione senza emissione di fotoni. Essa è particolarmente influente nei materiali con alta densità di difetti e riguarda soprattutto i semiconduttori a gap indiretto².
- **Ricombinazione Auger**³: in questo caso l'energia rilasciata durante la ricombinazione di un elettrone viene trasferita ad un altro elettrone o lacuna, che viene così eccitato. Questo processo aumenta con l'intensità luminosa e la concentrazione dei portatori, rappresentando dunque un limite all'efficienza per alti valori di intensità della luce incidente.

Dal momento che la ricombinazione non radiativa tende ad essere meno probabile di quella radiativa, nei semiconduttori a gap indiretto la vita media dei portatori di carica tende ad essere più lunga, dato che la ricombinazione avviene meno frequentemente e con tempi medi più elevati. Questo rende i semiconduttori a gap indiretto, come il **silicio**, particolarmente utili nelle celle fotovoltaiche, poiché una vita media più lunga dei portatori permette una raccolta di carica più efficiente prima della ricombinazione.

¹**William Shockley** (1910-1989), fisico e ingegnere americano, è noto per aver co-inventato il transistor insieme a John Bardeen e Walter Brattain e per aver vinto il Premio Nobel per la Fisica nel 1956. **William T. Read** (1915-1979) e **Robert N. Hall** (1919-2007), fisici americani, hanno dato un fondamentale contributo allo studio dei semiconduttori.

²In un semiconduttore reale, la struttura cristallina non è perfettamente ordinata, ma presenta impurezze e difetti che influenzano le proprietà del materiale. Le impurezze sono atomi estranei che vengono introdotti nel reticolo cristallino intenzionalmente (come nel caso del drogaggio) o accidentalmente. Aggiungendo elementi con un numero di elettroni di valenza diverso rispetto al semiconduttore, si creano portatori di carica aggiuntivi. Ad esempio, in un semiconduttore con drogaggio di tipo *n*, le impurezze pentavalenti (come il fosforo nel silicio) forniscono elettroni liberi; mentre in un drogaggio di tipo *p*, le impurezze trivalenti (come il boro) introducono lacune come portatori di carica. I difetti della struttura cristallina, invece, sono irregolarità che si formano nel reticolo a causa di deformazioni, crescita del cristallo imperfetta, o interazione con radiazioni. Essi includono dislocazioni, vacanze (posizioni nel reticolo vuote), e interstiziali (atomi in posizioni anomale), che possono introdurre livelli energetici intermedi in corrispondenza dell'energia di gap.

³**Pierre Victor Auger** (1899-1993) è stato un fisico francese noto per la scoperta dell'*effetto Auger*, un processo in cui un elettrone espulso da un atomo viene sostituito da un altro elettrone con conseguente emissione di energia sotto forma di un secondo elettrone invece che di un fotone. Tale effetto è particolarmente rilevante nella fisica dei semiconduttori e dei materiali, dove è sfruttato per l'analisi delle superfici tramite tecniche come la *spettroscopia Auger*. Auger ha avuto un impatto significativo anche in astrofisica e fisica delle particelle, contribuendo allo studio dei raggi cosmici.

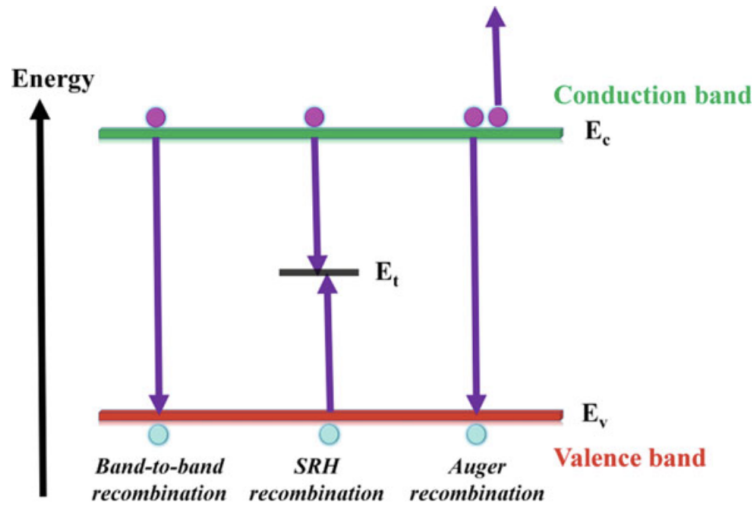


Figura 2.1: Meccanismi di ricombinazione in una cella fotovoltaica. E_v , E_t ed E_c indicano rispettivamente il valore più alto dell'energia nella banda di valenza, l'energia di uno stato trappola nel gap energetico, e il valore più basso dell'energia nella banda di conduzione [8].

2.2 Efficienza

Oltre ai fenomeni di assorbimento e ricombinazione già discussi, diversi altri fattori influenzano l'efficienza complessiva delle celle fotovoltaiche, sia per aspetti strutturali interni, sia per condizioni esterne in cui gli impianti operano. In questa sezione si vogliono introdurre alcuni parametri che quantificano l'impatto dei processi di assorbimento, riflessione e ricombinazione, come il *coefficiente di assorbimento*, il *coefficiente di riflessione* e l'*efficienza quantistica*. Questi parametri strutturali consentono di valutare e ottimizzare il comportamento ottico ed elettrico della cella e, uniti a considerazioni su fattori ambientali come la temperatura e l'irraggiamento, forniscono una descrizione precisa delle prestazioni della cella, orientando le scelte progettuali per massimizzare la conversione energetica. In figura 2.24 è riportato uno schema complessivo con l'efficienza raggiunta da diverse tecnologie fotovoltaiche dal 1976 ad oggi.

2.2.1 Elementi strutturali

Per massimizzare l'assorbimento della radiazione e minimizzare le perdite per riflessione e ricombinazione, è essenziale ingegnerizzare adeguatamente la cella fotovoltaica. Per misurare la capacità di un dato materiale di assorbire i fotoni, si utilizza il **coefficiente di assorbimento** (o coefficiente di attenuazione) α , che misura quanto rapidamente la luce viene assorbita, e dipende dalla lunghezza d'onda e dal materiale. Alcuni suoi va-

lori relativi a materiali utilizzati nelle celle fotovoltaiche sono riportati nella tabella 2.1, mentre la sua dipendenza dall'energia del fotone incidente è riportata in figura 2.2.

Matematicamente, il coefficiente di assorbimento parametrizza la rapidità con cui l'intensità della radiazione diminuisce all'interno di un materiale, secondo la seguente equazione:

$$I(x) = I_0 \exp(-\alpha x) \quad (2.1)$$

dove $I(x)$ è l'intensità della luce alla profondità x e I_0 è l'intensità della luce incidente.

Materiale	Coefficiente di Assorbimento α (cm^{-1})
Silicio Cristallino (c-Si)	100 - 1 000
Silicio Amorfo (a-Si)	10 000 - 50 000
Arseniuro di Gallio (GaAs)	10 000 - 100 000
Tellururo di Cadmio (CdTe)	10 000 - 100 000
Perovskite (MAPbI_3)	100 000 - 200 000
Diseleniuro di Rame Indio Gallio (CIGS)	10 000 - 60 000

Tabella 2.1: Coefficiente di assorbimento per materiali utilizzati nelle celle fotovoltaiche (per lunghezze d'onda visibili). I materiali semiconduttori su cui sono basate la maggior parte delle tecnologie fotovoltaiche tradizionali, come il silicio cristallino, hanno valori di α piuttosto bassi rispetto ad altri materiali. Per compensare un basso coefficiente di assorbimento è necessario un maggiore spessore della cella, che può però portare a una maggiore probabilità di ricombinazione [16].

Un altro intervento atto a massimizzare l'assorbimento della radiazione è l'utilizzo di uno **strato antiriflettente** sulla superficie della cella. Questo strato, spesso costituito da materiali con un indice di rifrazione intermedio rispetto all'aria e al semiconduttore sottostante (come SiO_2 o Si_3N_4), riduce la riflessione grazie a un effetto di *interferenza distruttiva* tra le onde rifratte e riflesse. Lo spessore d dello strato antiriflettente è scelto in modo da soddisfare la condizione di minima riflessione per una specifica lunghezza d'onda centrale λ_0 in modo tale che:

$$d = \frac{\lambda_0}{4n} \quad (2.2)$$

dove n è l'indice di rifrazione dello strato antiriflettente.

In questo modo, le onde rifratte e riflesse si annullano parzialmente, riducendo la perdita per riflessione e migliorando l'efficienza di assorbimento della cella. Oltre allo strato antiriflettente, la struttura della cella può includere un design a strati multipli o una struttura *texturizzata* per favorire il *trapping* della luce. La texturizzazione della superficie crea un percorso ottico più lungo per i fotoni, aumentando la probabilità di assorbimento nei materiali con gap indiretto. Le celle con superfici inclinate o piramidali, ad esempio, inducono riflessioni multiple all'interno del semiconduttore, incrementando l'efficienza di

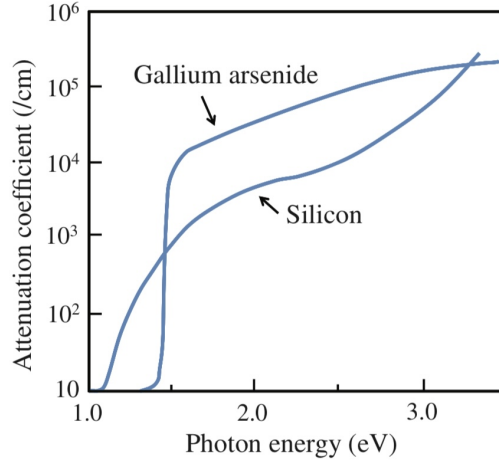


Figura 2.2: Coefficiente di assorbimento in funzione dell'energia del fotone per il silicio (Si) e l'arseniuro di gallio (GaAs). Entrambe le curve presentano una rapida crescita in corrispondenza delle rispettive energie di gap (1.11 eV per Si e 1.43 eV per GaAs). I fotoni con energia minore dell'energia di gap attraversano il materiale senza di fatto essere assorbiti. Si noti come per la maggior parte dello spettro visibile (all'incirca compreso tra 1.7 eV e 3.1 eV), l'arseniuro di gallio, semiconduttore a gap diretto, abbia un valore di α più alto di quello del silicio, semiconduttore a gap indiretto [17].

assorbimento senza necessità di aumentare lo spessore della cella.

Nello specifico, queste ultime caratteristiche analizzate - un adeguato coefficiente di assorbimento, lo strato antiriflettente e la struttura texturizzata - contribuiscono a migliorare l'**External Quantum Efficiency (EQE)**, che è definita come:

$$EQE(\lambda) = \frac{\text{Numero di elettroni raccolti}}{\text{Numero di fotoni incidenti ad una data lunghezza d'onda } \lambda} \cdot \quad (2.3)$$

Si tratta di una funzione spettrale, in quanto dipendente dalla lunghezza d'onda, che misura la frazione dei fotoni incidenti che contribuiscono alla generazione dei portatori di carica liberi raccolti come corrente, come si può osservare in figura 2.3. Essa considera dunque perdite per riflessione e trasmissione, e si distingue dalla **Internal Quantum Efficiency (IQE)**, che è definita come il rapporto tra il numero di elettroni raccolti e il numero di fotoni *assorbiti* dalla cella, essendo quindi influenzata, ad esempio, dai processi di ricombinazione e di trasporto dei portatori di carica. Tipicamente, l'*IQE* viene calcolato a partire dall'*EQE* come:

$$IQE(\lambda) = \frac{EQE(\lambda)}{1 - R(\lambda)} \quad (2.4)$$

dove $R(\lambda)$ rappresenta il **coefficiente di riflessione**, definito come il rapporto tra la potenza riflessa e la potenza incidente ad una data lunghezza d'onda. Esso è compreso

tra 0 e 1, valori assunti in caso di totale assorbimento e totale riflessione rispettivamente. Inoltre, può essere espresso come:

$$R(\lambda) = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (2.5)$$

dove n_1 e n_2 sono rispettivamente l'indice di rifrazione del mezzo da cui proviene la luce (nel caso della radiazione solare l'aria, che ha $n_1 \simeq 1$), e l'indice di rifrazione del materiale in cui la luce entra. Il silicio, ad esempio, ha un indice di rifrazione che può variare tra $n_2 \simeq 3.8$ nella regione verso l'ultravioletto e $n_2 \simeq 3.5$ per lunghezze d'onda tendenti all'infrarosso; per lunghezze d'onda maggiori l'indice di rifrazione n_2 del silicio diminuisce ulteriormente, in quanto il materiale diventa sempre più trasparente.

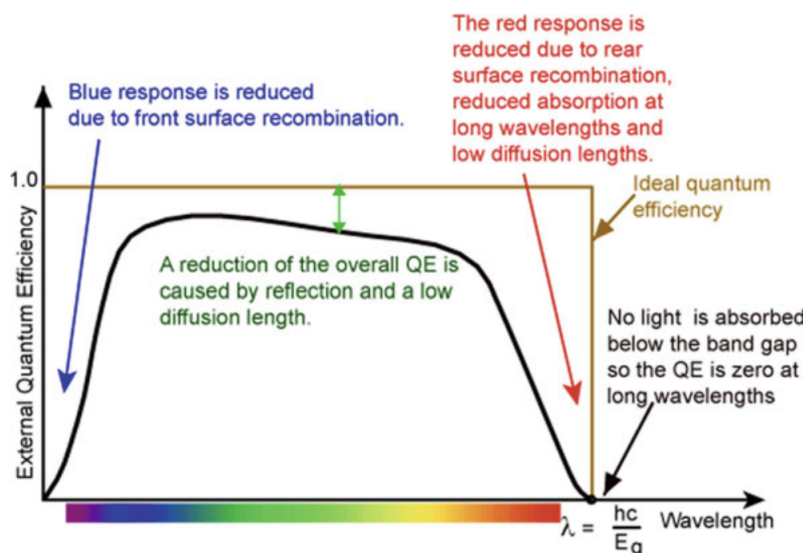


Figura 2.3: *External Quantum Efficiency* di una cella fotovoltaica al silicio in funzione della lunghezza d'onda dei fotoni assorbiti [8].

Tipo di Cella	EQE Tipico (%)
Silicio Monocristallino (c-Si)	Fino al 90 % (500 – 600 nm)
Silicio Amorfo (a-Si)	Circa 70 %, con picco nel visibile
Arseniuro di Gallio (GaAs)	Circa 90 % in ampio spettro (visibile e vicino IR)
Perovskiti	80 – 90 % nel visibile

Tabella 2.2: Valori tipici di *EQE* con relativi valori spettrali che la massimizzano, per diversi tipi di celle fotovoltaiche. Un elevato valore di *EQE* indica una struttura ottimizzata per l'assorbimento e la raccolta di carica, minimizzando le perdite per riflessione, trasmissione e ricombinazione [16].

2.2.2 Fattori ambientali

Come già discusso nel paragrafo 1.4.4, all'aumentare della temperatura diminuisce significativamente l'efficienza, dunque da questo punto di vista potrebbe risultare vantaggioso produrre energia da pannelli fotovoltaici alle alte latitudini, caratterizzate da una temperatura media più bassa. Tuttavia, bisogna considerare che in tal caso cambierebbe anche l'inclinazione del Sole rispetto alle zone più vicine all'equatore, diminuendo dunque l'illuminazione e di fatto compensando la dipendenza dalla temperatura. Nelle figure 2.4, 2.5, 2.6, 2.7 viene evidenziata la correlazione reciproca presente tra produzione energetica da fotovoltaico, irradianza solare e temperatura atmosferica nel corso di una giornata [18].

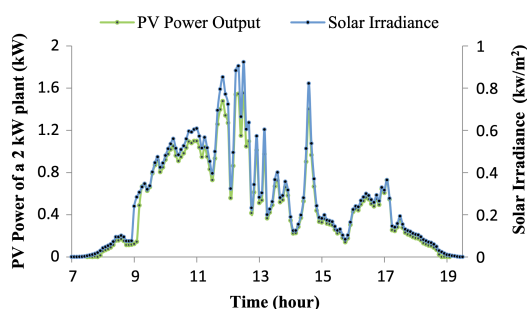


Figura 2.4: Produzione di energia di un impianto fotovoltaico confrontata con l'irradianza solare⁴ nel corso di una giornata.

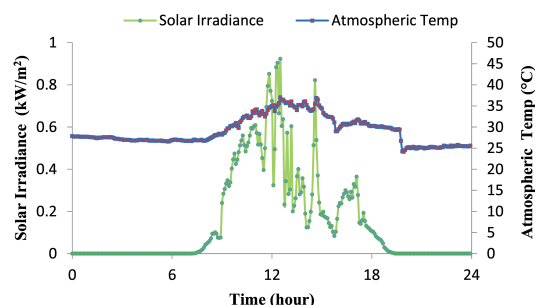


Figura 2.5: Irradianza solare e temperatura atmosferica nel corso di una giornata.

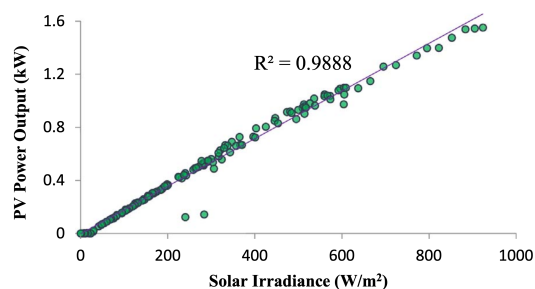


Figura 2.6: Coefficiente di correlazione lineare⁵ tra energia prodotta da un impianto fotovoltaico e irradianza solare.

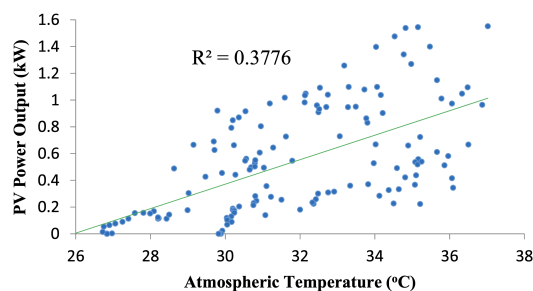


Figura 2.7: Coefficiente di correlazione lineare tra energia prodotta da un impianto fotovoltaico e temperatura atmosferica.

Oltre alla correlazione mostrata nei grafici, un'ulteriore variabilità può essere introdotta nel momento in cui si considera la stagionalità di tali rilevazioni, ovvero in particolare la nuvolosità, o anche altre cause naturali straordinarie, come le eclissi solari. Rispetto all'andamento pressoché gaussiano evidenziato nel corso di una giornata, tali eventi producono fluttuazioni che possono portare problemi di funzionamento della rete elettrica, considerando che è possibile che riguardino contemporaneamente numerosi impianti fotovoltaici. Questi aspetti risultano alla base della necessità di integrare diverse forme di energia rinnovabile, che possano essere sufficientemente decorrelate le une dalle altre in termini di condizioni ambientali richieste per il funzionamento, in modo da poter garantire stabilità alla rete elettrica.

2.2.3 Limite di Shockley-Queisser

Al fine di massimizzare l'efficienza di una data cella fotovoltaica, occorre conoscere il *limite di Shockley-Queisser*, che rappresenta l'efficienza massima teorica di conversione per una cella fotovoltaica **a giunzione singola**, pari a $\eta_1 = 33.7\%$. Esso si basa sulla distribuzione spettrale della luce del Sole, che viene considerato un corpo nero a $T \simeq 5800K$, e dipende dall'energia di gap del semiconduttore. Tale analisi, portata a termine nel 1961 da William Shockley e Hans Queisser, considera principalmente tre fenomeni fisici, già discussi in precedenza, che possono essere riassunti come segue:

- **Assorbimento selettivo dei fotoni:** solo i fotoni con energia $E \geq E_g$ vengono assorbiti e sono in grado di generare coppie elettrone-lacuna;
- **Termalizzazione:** i fotoni con energia superiore all'energia di gap trasferiscono l'energia in eccesso sotto forma di calore al reticolo cristallino;
- **Ricombinazione elettrone-lacuna:** Shockley e Queisser introdussero la ricombinazione radiativa, ovvero il processo in cui l'elettrone si ricombina con una lacuna emettendo un fotone di energia vicina al gap, tramite il *principio di bilancio dettagliato*, che assicura che, in condizioni di equilibrio, la generazione e la ricombinazione siano bilanciate. Il contributo alla riduzione dell'efficienza è dell'ordine del 10%.

⁴Si definisce *irradianza solare* la potenza della radiazione solare ricevuta per unità di area su una superficie perpendicolare ai raggi del Sole. Si misura in W/m^2 .

⁵Il *coefficiente di correlazione lineare* tra due grandezze X e Y è definito come

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}.$$

Costituisce un parametro statistico per misurare la correlazione tra due variabili e assume valori compresi tra -1 e 1, dove $R = -1$ indica una perfetta correlazione lineare negativa, $R = 0$ un'assenza di correlazione lineare, $R = 1$ una perfetta correlazione lineare positiva.

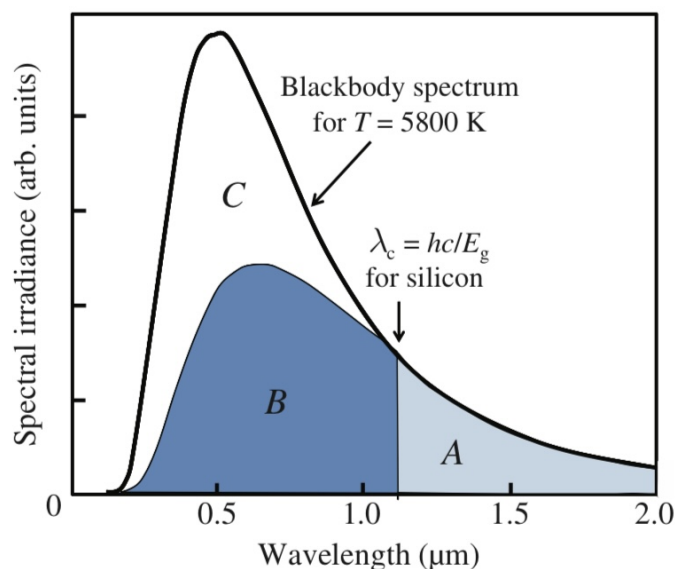


Figura 2.8: Spettro di corpo nero alla temperatura $T = 5800\text{ K}$. È inoltre indicata la lunghezza d'onda critica per il silicio ($1.11\ \mu\text{m}$)⁶. I fotoni che si trovano nella regione A non possiedono energia sufficiente per promuovere un elettrone attraverso l'energia di gap. Per fotoni con energia superiore all'energia di gap, una parte di tale energia viene dissipata sotto forma di calore nel reticolo cristallino; l'area della regione C rappresenta la potenza persa in questo modo. L'area della regione B rappresenta, in linea di principio, l'unica frazione della potenza solare che può essere ottenuta da una cella solare e, nel caso del silicio, rappresenta circa il 45% dell'area totale sotto la curva [19].

Con riferimento alla figura 2.8, l'area della regione B dipende dall'energia di gap del semiconduttore. In particolare, ne esiste un valore ottimale, poiché se viene scelto un semiconduttore con un'energia di gap troppo bassa, verranno assorbiti un maggior numero di fotoni all'estremità infrarossa, ma i fotoni ad energia più elevata rilasceranno una quantità significativa di energia in eccesso sotto forma di calore. Viceversa, un'energia di gap troppo alta sfrutta meglio i fotoni a più alta energia, riducendo la perdita per termalizzazione, ma limita l'assorbimento ai fotoni della regione del visibile, lasciando non assorbiti quelli infrarossi.

Le perdite di efficienza dovute all'energia dei fotoni, in difetto o in eccesso, insieme agli altri fenomeni discussi, sono riportati graficamente in figura 2.9.

⁶Conoscendo l'energia di gap del silicio $E_{gap,Si} = 1.12\text{ eV}$ ed utilizzando l'equazione di Einstein dell'effetto fotoelettrico $E_g = h\nu = h\frac{c}{\lambda}$ si può ricavare la lunghezza d'onda critica, ovvero la massima lunghezza d'onda del fotone incidente in grado di indurre una transizione da banda di valenza a banda di conduzione.

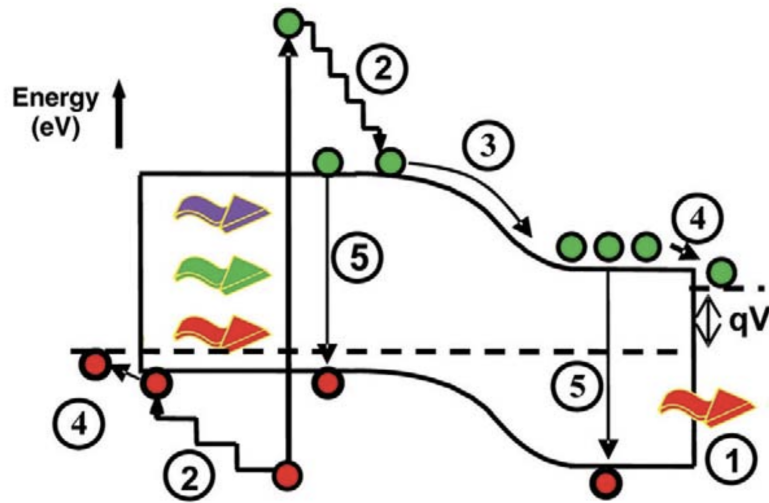


Figura 2.9: Rappresentazione grafica riassuntiva dei processi che determinano una diminuzione dell'efficienza in una cella solare: (1) mancato assorbimento dei fotoni con energia minore dell'energia di gap; (2) processi di termalizzazione: i fotoni con energia superiore al band gap cedono l'energia in eccesso al reticolo cristallino; (3) e (4) dissipazioni di energia alle interfacce di giunzione e nei contatti elettrici della cella; (5) processi di ricombinazione [20].

Materiali	Energia di Gap E_g (eV)	Efficienza Tipica (%)
Silicio Monocristallino (c-Si)	1.12	20-27
Silicio Policristallino (pc-Si)	1.12	15-20
Silicio Amorfo (a-Si)	1.7	6-12
Arseniuro di Gallio (GaAs)	1.43	25-30
Tellururo di Cadmio (CdTe)	1.45	18-22
Seleniuro di Indio e Rame (CIS)	1.04	12-14
Diseleniuro di Rame, Indio, Gallio (CIGS)	1.1 - 1.7	15-20
Perovskite (MAPbI ₃)	1.55	18-25
Fosforo di Indio (InP)	1.35	20-24
Antimoniuro di Gallio (GaSb)	0.73	8-12
Germanio (Ge)	0.66	5-8

Tabella 2.3: Energie di gap ed efficienze tipiche di alcuni dei materiali utilizzati nelle celle fotovoltaiche. Si noti come l'energia di gap del silicio sia vicina al valore ottimale, giustificandone il largo impiego nelle celle fotovoltaiche. I range di efficienza comprendono sia i valori delle celle commerciali che quelli ottenuti in laboratorio [16].

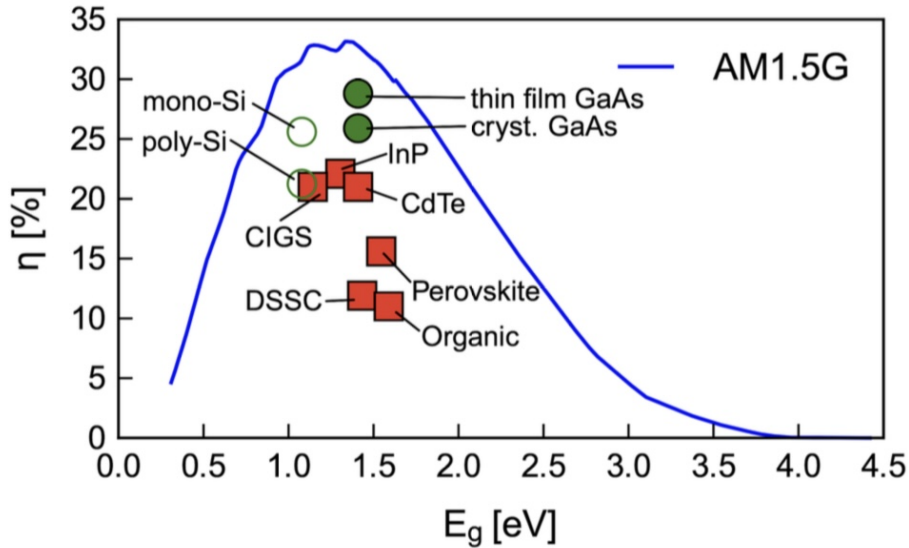


Figura 2.10: La curva blu rappresenta l'efficienza teorica massima ottenibile (limite di Shockley-Queisser) per celle fotovoltaiche a singola giunzione in funzione dell'energia di gap E_g e radiazione solare $AM = 1.5$ (la G sta per *Global* e indica che viene considerata sia la componente diretta che quella diffusa), confrontata con le efficienze reali di diversi materiali fotovoltaici: silicio monocristallino e policristallino (*mono-Si* e *poly-Si*), GaAs (arseniuro di gallio) in forma cristallina e a film sottile, InP (fosfuro di indio), CdTe (tellururo di cadmio), CIGS (diseleniuro di rame indio gallio), celle DSSC (celle a colorante), celle in perovskite e celle organiche. Fissata l'energia di gap, la distanza dalla curva blu rappresenta quanto l'efficienza reale sia lontana dall'efficienza teorica massima per quel valore di E_g . L'energia di gap che massimizza l'efficienza per questo tipo di radiazione è $E_g = 1.34 \text{ eV}$; il valore di tale efficienza massima è invece $\eta_1 = 33.7\%$ [21].

2.3 Moderne tecnologie fotovoltaiche

Le tecnologie fotovoltaiche moderne possono essere suddivise in *quattro generazioni*, che differiscono per sviluppo storico, diverse configurazioni di materiali, efficienza e costi di produzione, nonché per la fruibilità su larga scala. Le celle fotovoltaiche di *prima generazione* sono prevalentemente basate sul **silicio cristallino (c-Si)**, che rappresenta il semiconduttore più utilizzato per la sua abbondanza e per le proprietà di stabilità chimica e alta efficienza di conversione. Queste celle possono essere sia **monocristalline**, con efficienza che può arrivare fino al 27% in condizioni ideali, sia **policristalline**, con efficienze intorno al 15 – 20% ma con costi di produzione più bassi. La loro elevata stabilità e la maturità dei processi di fabbricazione hanno portato ad una rapida diffusione del silicio cristallino nel mercato, come si può osservare in figura 2.12. Tuttavia, un

limite importante è l'elevato costo di produzione legato ai processi di purificazione e al consumo energetico elevato per ottenere cristalli di alta qualità. In termini di efficienza, queste celle si avvicinano al limite di Shockley-Queisser per le celle a giunzione singola ($\eta_1 = 33.7\%$).

La **seconda generazione** di celle fotovoltaiche è dominata dalla tecnologia **thin film**, che utilizza soprattutto **tellururo di cadmio (CdTe)** e il **diseleniuro di rame indio gallio (CIGS)**, con cui possono essere realizzate celle di spessore fino a 100 volte minore rispetto a quelle al silicio (dell'ordine di $1\ \mu m$ invece di $100\ \mu m$), aumentando così le possibilità di integrazione, ad esempio, su superfici curve e flessibili. Attualmente l'efficienza per questo tipo di celle è tra il 12 e il 20% ma, come si può notare dalla figura 2.10, ci si trova ancora sensibilmente lontani dal valore massimo dell'efficienza massima prevista dal limite di Shockley-Queisser. Inoltre, alcuni di questi materiali, come il tellurio hanno il difetto di avere una disponibilità limitata, aumentandone dunque il costo, mentre altri sono caratterizzati da problemi ambientali legati alla tossicità dei componenti, come il cadmio. Questi due ultimi aspetti ne riducono la fruibilità su larga scala e la competitività di mercato rispetto alle celle al silicio.

La **terza generazione** apre le porte ad una nuova frontiera nell'ambito dell'innalzamento dell'efficienza, come analizzato nella sezione 2.6, grazie all'introduzione delle **celle multigiunzione**, delle **perovskiti** e dei **dispositivi tandem**.

Di recente, la **quarta generazione** si è concentrata su materiali avanzati e sistemi ibridi che combinano semiconduttori convenzionali con nuovi materiali nanostrutturati. Questa generazione mira a incrementare ulteriormente l'efficienza, la sostenibilità ambientale e la salute degli utenti, trovando valide alternative ai materiali tossici attraverso tecnologie come le celle tandem avanzate e i sistemi fotovoltaici a concentrazione ottica. Ad oggi, queste tecnologie hanno il problema di essere ancora troppo costose, motivo per cui le alte efficienze che sono riuscite a raggiungere sono state ottenute in dispositivi sperimentali non ancora commercializzati.

2.4 Celle fotovoltaiche al silicio

Come introdotto nella sezione 2.3 e come si può notare in figura 2.11, il silicio ha rappresentato negli ultimi decenni, e anche ad oggi costituisce di gran lunga il materiale più utilizzato nelle celle fotovoltaiche.

In forma pura, il silicio si presenta come un solido lucido di colore grigio argenteo, e le sue forme naturali non presentano problemi di tossicità. È il secondo elemento più abbondante nella crosta terrestre (circa il 27.5% in massa) dopo l'ossigeno. Il silicio elementare non si trova in natura, ma è presente sotto forma di diossido di silicio SiO_2 , il quale viene solitamente utilizzato come isolante nelle celle fotovoltaiche, formando un rivestimento protettivo fortemente aderente. Il processo di creazione di substrati di silicio, necessari per la fabbricazione di dispositivi a semiconduttore, prevede più fasi,

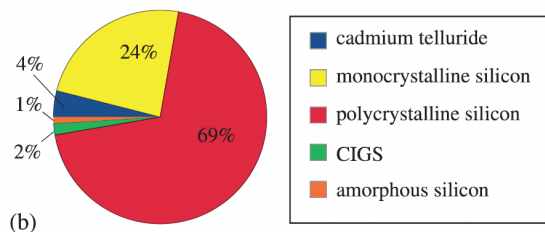


Figura 2.11: Suddivisione della produzione di pannelli fotovoltaici per tecnologia nel 2015. Ben il 94 % del totale è costituito da celle al silicio [3].

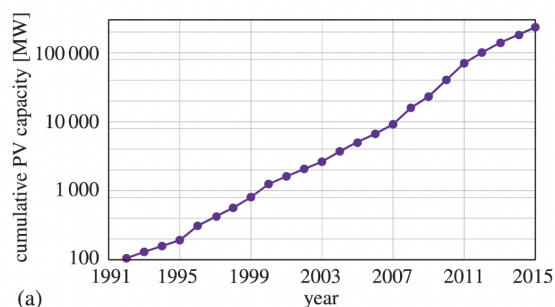


Figura 2.12: Capacità dei sistemi fotovoltaici dal 1991 al 2015. Si noti in particolare il valore totale della potenza prodotta sensibilmente superiore a 100 000 MW per avere una stima della potenza prodotta da ciascun tipo di cella fotovoltaica del grafico a sinistra. Un tasso di crescita annuale composto del 46 % ha portato nel 2015 ad una potenza cumulativa prodotta di circa 230 000 MW [3].

mostrate in figura 2.13: il diossido di silicio viene utilizzato per creare il silicio di grado metallurgico (MG-Si), che viene successivamente raffinato e purificato per ottenere un silicio ad alta purezza che possa essere utilizzato nelle celle fotovoltaiche. Attraverso precise tecniche di produzione, come il processo *Floating Zone*⁷ o il processo *Czochralski*⁸, avviene la solidificazione che porta alla produzione di **wafer di silicio**, di spessore variabile tra i 0.5 mm ed 1 mm, che risulta molto superiore a quello delle tecnologie *thin-film*, trattate nella sezione 2.5, a causa del minore *coefficiente di assorbimento* del silicio cristallino. Tali *wafer* costituiscono la base per la realizzazione delle celle, a loro volta assemblate in moduli che, una volta completati, sono incapsulati per proteggere i componenti elettrici interni e resistere alle condizioni atmosferiche. Attraverso opportuni collegamenti di tali unità si giunge all'impianto fotovoltaico, di cui sono stati spiegati i dettagli nel paragrafo 1.4.6.

⁷Il **processo Floating Zone** è una tecnica di purificazione del silicio che permette di ottenere cristalli monocristallini di elevata purezza, ideali per applicazioni elettroniche e fotovoltaiche. In questo metodo, una barra di silicio viene riscaldata localmente tramite induzione elettromagnetica, creando una zona fusa che si sposta lentamente lungo la barra. Durante il movimento della zona fusa, le impurità migrano verso un'estremità della barra, lasciando dietro di sé un silicio altamente puro e cristallizzato, senza contatto con contenitori che potrebbero introdurre contaminazioni.

⁸Il **processo Czochralski** è una tecnica di crescita cristallina utilizzata per produrre silicio monocristallino di elevata purezza. In questo metodo, un piccolo cristallo di silicio (detto seme) viene immerso in silicio fuso e lentamente estratto mentre ruota, consentendo la crescita di un cristallo unico e

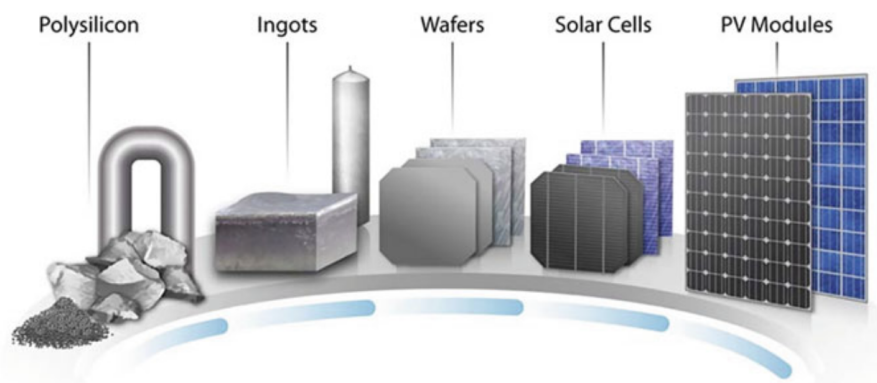


Figura 2.13: Fasi di produzione di un pannello fotovoltaico, dal silicio grezzo ai moduli che costituiscono l'impianto fotovoltaico [8].

Come già introdotto nella sezione 2.3, le celle al silicio possono essere classificate in:

- **Silicio Monocristallino (c-Si)**, costituito da un unico cristallo di silicio, di cui è riportato un esempio in figura 2.14;
- **Silicio Policristallino (pc-Si)**, composto da diversi piccoli cristalli (grani) di silicio fusi insieme, come si nota dal modello in figura 2.15;
- **Silicio Amorfo (a-Si)**, privo di struttura cristallina, usato principalmente in celle *thin-film* con l'aggiunta di idrogeno per migliorare la *qualità elettronica*⁹ e l'efficienza di conversione. Di seguito con "silicio amorfo" si indicherà il silicio amorfo idrogenato, essendo ad oggi l'unica tecnologia affermata basata su questo tipo di silicio.

Come si può notare in figura 2.16, per qualunque numero di giunzioni e per qualsiasi condizione di illuminazione, il silicio monocristallino ha l'efficienza massima, compresa tra il 25 % ed il 30 %, crescente con il numero di giunzioni, come verrà discusso nella sezione 2.6. Le celle al silicio policristallino presentano invece un maggior numero di difetti cristallini ed una maggiore resistenza elettrica, che si traduce in un'efficienza compresa tra il 15 % ed il 20 %. Infine, il silicio amorfo è caratterizzato da un'efficienza notevolmente inferiore, tipicamente tra il 6 % e il 10 %, perché, non avendo una disposizione ordinata degli atomi, i portatori di carica hanno una probabilità inferiore di contribuire

omogeneo lungo la direzione di estrazione. La rotazione e la velocità di estrazione vengono attentamente controllate per ottenere il diametro desiderato del cristallo, che sarà successivamente tagliato in sottili wafer.

⁹Per *qualità elettronica* si intende l'insieme delle proprietà che determinano la capacità del materiale di condurre elettroni e lacune in modo efficiente e con poche perdite energetiche. In particolare, un'alta qualità elettronica è caratterizzata da un'alta mobilità ed un'alta vita media dei portatori di carica, e da un livello di drogaggio controllato che permetta di minimizzare la densità di impurità indesiderate.



Figura 2.14: Cella fotovoltaica al silicio monocristallino [22].

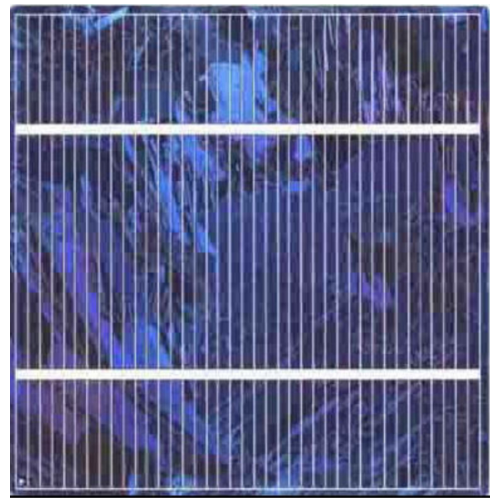


Figura 2.15: Cella fotovoltaica al silicio policristallino [23].

alla corrente elettrica, riducendo così l'efficienza. Inoltre, in quest'ultimo tipo di materiali, si creano degli stati localizzati nel gap energetico tra banda di conduzione e banda di valenza, che costituiscono una delle principali cause di ricombinazione non radiativa dei portatori di carica; il fenomeno è stato analizzato nella sezione 2.1. In aggiunta, l'efficienza delle celle al silicio amorfo non può essere aumentata né attraverso opportuni concentratori di luce, perché la luce intensa può creare ulteriori difetti di legame a causa dell'*effetto Staebler-Wronski*¹⁰, e nemmeno incrementando lo spessore della cella perché nei materiali amorfi la lunghezza di diffusione¹¹, ovvero la distanza media che un portatore può percorrere prima di ricombinarsi, risulta notevolmente ridotta.

Per quanto riguarda le celle al silicio policristallino, uno dei vantaggi per il loro impiego è certamente il minore costo, ma anche il fatto che esse tendono a performare meglio ad alte temperature rispetto a quelle monocristalline.

¹⁰L'**effetto Staebler-Wronski** è un fenomeno caratteristico del silicio amorfo idrogenato (a-Si a cui vengono aggiunti atomi di idrogeno), osservato per la prima volta da David L. Staebler e Christopher R. Wronski negli anni '70. Questo effetto consiste in una degradazione fotoindotta delle proprietà elettroniche del materiale quando viene esposto alla luce per un periodo prolungato. L'irraggiamento luminoso causa la formazione di nuovi difetti di legame nel reticolo amorfo, aumentando i centri di ricombinazione e riducendo così l'efficienza di conversione del materiale. Tale degradazione è parzialmente reversibile con trattamenti termici, che ripristinano le proprietà elettroniche iniziali, ma l'effetto rimane un limite significativo per la stabilità a lungo termine delle celle fotovoltaiche basate su silicio amorfo.

¹¹La *lunghezza di diffusione* è definita come $L = \sqrt{D\tau}$, dove D è il coefficiente di diffusione e τ è la vita media dei portatori di carica.

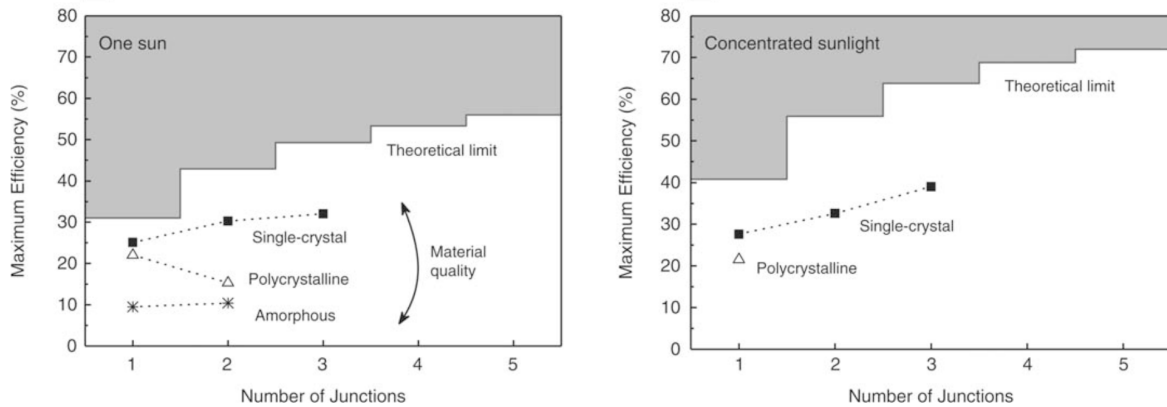


Figura 2.16: Efficienza massima della cella fotovoltaica in funzione del numero di giunzioni e della struttura del materiale rispettivamente per radiazione $AM\ 1.5$ e per radiazione concentrata [24].

2.5 Celle fotovoltaiche *thin-film*

Se dalla sezione precedente non emerge alcun vantaggio nell'utilizzare silicio amorfo per realizzare celle fotovoltaiche, occorre invece notare come esso sia alla base di alcune delle celle fotovoltaiche con tecnologia *thin-film*, a volte abbreviata in TFSC.

Si tratta di una delle innovazioni più significative nell'ambito delle tecnologie fotovoltaiche di *seconda generazione*, come già introdotto nella sezione 2.3. Questo tipo di celle sono caratterizzate da uno spessore ridotto, compreso tra pochi nanometri e qualche micrometro, rendendole significativamente più sottili delle loro controparti al silicio, che tipicamente presentano spessori nell'ordine di centinaia di micrometri. Tale caratteristica, ottenuta tramite deposizione di strati semiconduttori su substrati flessibili come plastica, vetro o metallo, rende le celle *thin-film* particolarmente adatte per applicazioni che richiedono leggerezza e flessibilità, come facciate di edifici, superfici curve e dispositivi portatili.

I principali vantaggi relativi all'impiego del **silicio amorfo** sono legati ai minori costi di produzione sia rispetto alle tecnologie basate sul silicio cristallino, sia rispetto ad altri materiali utilizzati nella tecnologia *thin-film*, e ad un migliore assorbimento della luce. Quest'ultima caratteristica deriva dal fatto che l'assenza di un reticolo ordinato introduce difetti e irregolarità che creano *stati locali* (detti anche *stati trappola* o *traps* in inglese) nel gap energetico, permettendo l'assorbimento di fotoni di un più ampio spettro di energie, poiché questi ultimi possono promuovere elettroni tra stati locali o dagli stati locali alla banda di conduzione. Inoltre, la struttura disordinata induce diffusione multipla della luce all'interno del materiale, un fenomeno che contribuisce ulteriormente ad aumentare il percorso ottico e quindi la probabilità di assorbimento per unità di spes-

sore, ovviando al basso *coefficiente di assorbimento* del silicio cristallino, come emerge dalla tabella 2.1. Gli *stati trappola*, tuttavia, sono anche responsabili della bassa efficienza di questo tipo di celle, poiché facilitano i processi di *ricombinazione non radiativa* e limitano la vita media dei portatori di carica, riducendone l'efficienza [16].

Dal momento che le celle al silicio sono storicamente state quelle su cui la ricerca e l'ingegneria si sono concentrate maggiormente ed essendosi queste ultime avvicinate al limite massimo di conversione previsto da Shockley e Queisser, come si può osservare in figura 2.10, negli ultimi decenni la ricerca si è rivolta soprattutto all'individuazione di materiali alternativi. Per quanto riguarda la tecnologia *thin-film* tra quelli più promettenti si trovano le celle al **tellururo di cadmio (CdTe)** ed al **diseleniuro di rame, indio e gallio (CIGS)**. Si tratta di semiconduttori *a gap diretto*, per cui non è necessaria l'interazione dell'elettrone con un *fonone* per transire dalla banda di valenza alla banda di conduzione. Ciò consente di realizzare celle di spessore tipicamente compreso tra $1\ \mu\text{m}$ e $3\ \mu\text{m}$, circa 100 volte inferiore rispetto a quello del silicio cristallino. Inoltre, come si può notare dalla tabella 2.1, i loro coefficienti di assorbimento sono in alcuni casi superiori a quelli del silicio amorfo, e di gran lunga maggiori di quelli del silicio cristallino. Dalla tabella 2.3 emerge invece che l'efficienza di conversione di questo tipo di celle risulta notevolmente superiore a quelle realizzate con silicio amorfo, ma ancora inferiore rispetto a quelle al silicio monocristallino, per via della presenza di alcuni processi di *ricombinazione non radiativa* che riducono la vita media dei portatori di carica. In aggiunta, ad oggi il silicio monocristallino presenta una migliore stabilità chimica ed una minore tendenza a degradarsi, oltre a non avere quei problemi di tossicità e di disponibilità limitata che invece costituiscono i due principali limiti delle celle al CdTe e al CIGS, dovuti soprattutto ai pericoli per la salute umana del cadmio e alla scarsa disponibilità naturale di tellurio (più raro dell'oro), ma anche di indio, gallio e selenio. Infine, efficienze maggiori sono state ottenute con tecnologia *thin-film* al CdTe e al CIGS con celle multigiunzione o tandem, trattate nella prossima sezione (2.6), pur trattandosi ancora di dispositivi in fase di studio e con costi ancora troppo alti per essere competitivi sul mercato su scala globale. Nelle figure 2.17, 2.18 sono riportati rispettivamente lo schema della struttura cristallina ed il modello di una cella CIGS.

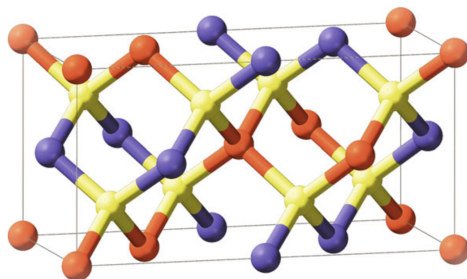


Figura 2.17: Schema della struttura cristallina tetragonale di una cella unitaria di CIGS. Il rosso indica il rame, il viola l'indio e il gallio, mentre il giallo il selenio [8].

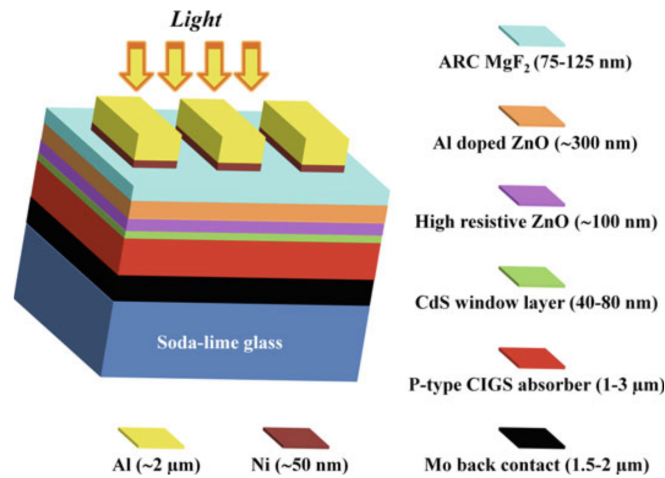


Figura 2.18: Modello reale di cella realizzata con strato assorbente di CIGS. Sono riportati i materiali ed i relativi spessori dei diversi strati [8].

Un'altra promettente tecnologia *thin-film* è rappresentata dalle **celle fotovoltaiche a perovskite** (PSC, *Perovskite Solar Cells*), le quali si distinguono per la loro alta efficienza di conversione, flessibilità e basso costo di produzione. La perovskite è un minerale composto da ossido di calcio e titanio ($CaTiO_3$). Per estensione, vengono chiamati *materiali perovskitici* o *perovskiti* quei composti che presentano la stessa struttura cristallografica dell'ossido di calcio e titanio, i quali hanno formula generale ABX_3 , dove A e B sono cationi di dimensioni diverse e X è un anione, solitamente uno ioduro, cloruro o bromuro, come schematizzato in figura 2.19. Le perovskiti più comuni nelle celle fotovoltaiche sono costituite da un metallo pesante, come il piombo (Pb), e da composti organici e inorganici, come il metilammonio (MA^+) o il formamidinio (FA^+). La struttura cristallina di questi materiali facilita una raccolta efficiente dei portatori di carica e una buona mobilità elettronica, rendendoli ideali per applicazioni fotovoltaiche a film sottile. In particolare, l'assorbimento di un fotone genera un *eccitone*, vale a dire un sistema legato elettrone-lacuna grazie all'interazione coulombiana. Nelle perovskiti la formazione di eccitoni è particolarmente rilevante perché, a differenza dei semiconduttori tradizionali, questi materiali possono formare eccitoni a temperatura ambiente con un'energia di legame relativamente bassa, che permette una facile dissociazione degli eccitoni in elettroni e lacune libere. Questo aspetto è vantaggioso per l'efficienza della cella solare, poiché consente una rapida generazione di cariche libere che contribuiscono alla corrente fotovoltaica, migliorando l'efficienza di conversione.

Un'altra delle caratteristiche principali delle celle a perovskite è il loro elevato *coefficiente di assorbimento* (riportato nella tabella 2.1) che permette di assorbire una quantità significativa di luce solare con spessori estremamente ridotti, tipicamente compresi tra 300 nm e $1\ \mu\text{m}$. Questo spessore è molto inferiore rispetto a quello richiesto per altre

tecnologie thin-film, come CdTe e CIGS, e consente di ridurre i costi di produzione e il peso delle celle. A livello strutturale, la disposizione ordinata dei cationi e anioni nel reticolo permette un assorbimento efficiente dei fotoni e una limitata ricombinazione non radiativa, garantendo efficienze che possono arrivare al 25 %, come riportato in tabella 2.3, un valore competitivo rispetto al silicio cristallino.

Nonostante queste potenzialità, le ragioni per cui ad oggi questo tipo di celle non si sono ancora affermate su larga scala sono da ricondurre ai problemi di degradazione ambientale e di stabilità, oltre che alla tossicità del piombo, che la ricerca sta cercando di sostituire con elementi alternativi, come lo stagno. Per quanto riguarda il miglioramento della stabilità, invece, i risultati più significativi sono stati raggiunti nell'associazione di questo tipo di celle con quelle al silicio, secondo l'architettura delle celle *multigiunzione* o *tandem* descritte nella prossima sezione (2.6).

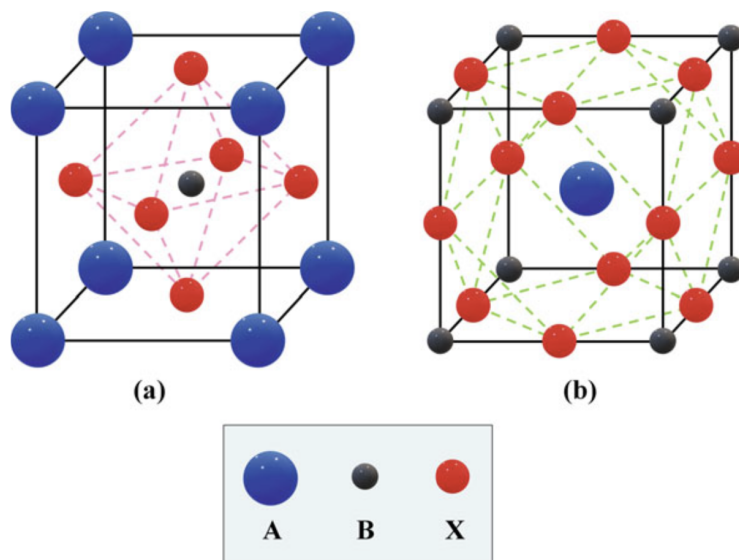


Figura 2.19: Struttura cristallina di una cella a perovskite, con la formula generale ABX_3 , dove A è un catione organico o inorganico, B è tipicamente Pb e X rappresenta un alogenuro [8].

2.6 Celle fotovoltaiche multigiunzione

In figura 2.21 (c) viene mostrato uno dei limiti più evidenti delle celle ad una sola giunzione, ovvero l'incapacità di sfruttare lo spettro della luce solare in modo efficiente, per via di due principali fenomeni fisici: il mancato assorbimento dei fotoni con energia $E < E_g$ e la termalizzazione degli elettroni fotogenerati da fotoni con energia $E > E_g$, che comportano una perdita di circa il 20 % e 35 % dell'energia dello spettro rispettivamente.

Una strategia per ridurre tali inefficienze è quella di suddividere lo spettro solare in sezioni corrispondenti ad un certo *range* di lunghezze d'onda, ciascuna delle quali viene convertita in energia elettrica da una specifica cella fotovoltaica. La cella risultante è detta **multigiunzione**, e la relativa efficienza teorica massima risulta $\eta_{\infty} = 86.8\%$, calcolato da Shockley e Queisser nel limite di infinite celle, ciascuna operante in un *range* di lunghezze d'onda infinitesimo. Si tratta di un'efficienza molto superiore al valore massimo ottenuto per celle a giunzione singola, pari a $\eta_1 = 33.7\%$, discussa nel paragrafo 2.2.3. La scelta dei materiali da utilizzare in ciascun *range* è determinata dall'energia di gap: ogni cella assorbe solo i fotoni con energia prossima a quella del proprio gap e si lascia attraversare dagli altri fotoni, che verranno assorbiti da altre celle con energia di gap più simile all'energia dei fotoni stessi, come si può osservare in figura 2.21, secondo la tecnologia delle **celle fotovoltaiche tandem**, di cui è riportato un esempio in figura 2.20. In questo modo, si riduce drasticamente, o idealmente si annulla, la dissipazione di energia per termalizzazione; inoltre, diminuisce anche la probabilità di ricombinazione radiativa. Le assunzioni del modello di Shockley-Queisser per celle multigiunzione prevedono di considerare il Sole un corpo nero alla temperatura $T \simeq 5800K$, come già fatto per una singola giunzione, oltre all'equilibrio termodinamico tra la cella e la radiazione incidente, massimizzando la raccolta di elettroni liberi ed idealmente annullando le perdite di energia.

Nei casi reali, i materiali utilizzati e i processi di fabbricazione introducono difetti e limiti pratici, come la riflessione della luce, le perdite resistive, e le difficoltà nell'allineamento spettrale esatto delle giunzioni. Tuttavia, il concetto di celle multigiunzione e la segmentazione dello spettro restano fondamentali per superare il limite di Shockley-Queisser per celle a giunzione singola ed avvicinarsi ad efficienze del 40 – 50 % nelle celle sperimentali.

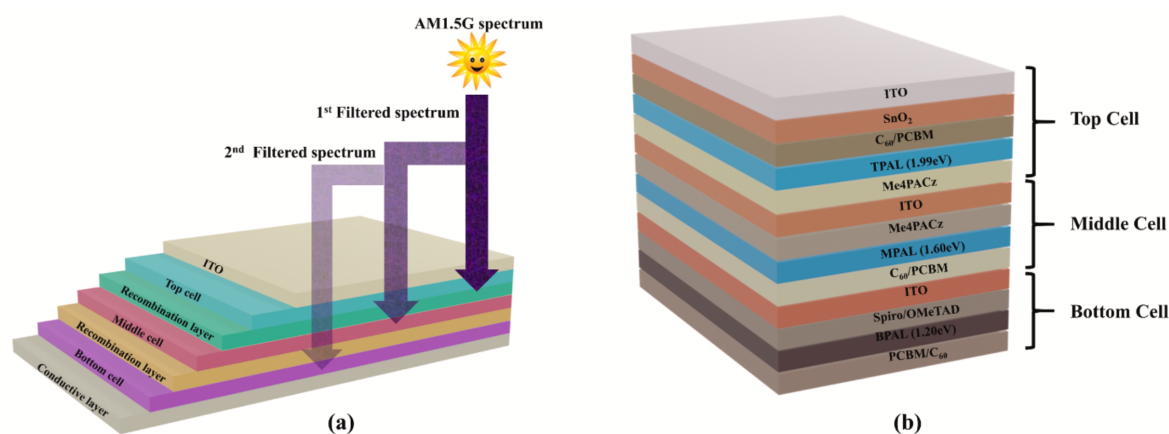


Figura 2.20: Schema di una cella fotovoltaica tandem in cui a sinistra sono riportati gli strati principali (in particolare la cella superiore, intermedia ed inferiore), mentre a destra vi sono i materiali che compongono le singole celle utilizzate [25].

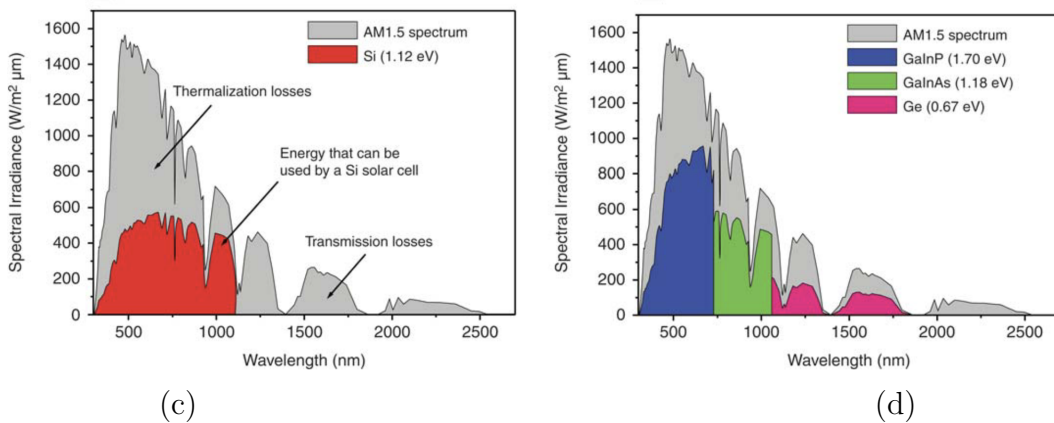
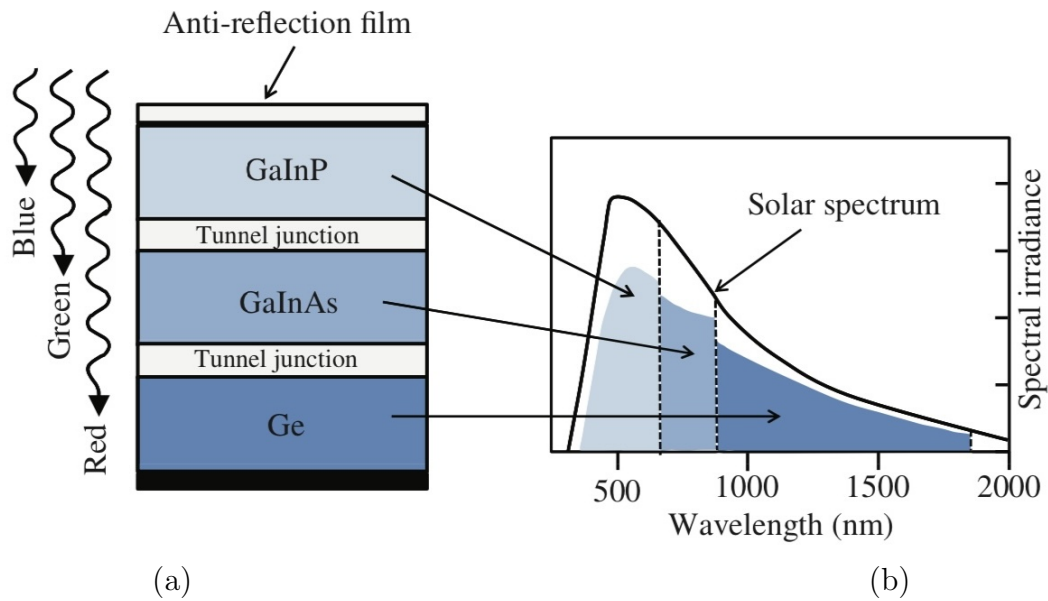


Figura 2.21: Cella multigiunzione suddivisa in tre sottocelle. Quella superiore è composta da fosforo di gallio e indio (GaInP), che ha l'energia di gap maggiore (1.70 eV) e assorbe fotoni nella regione del blu. I fotoni non assorbiti incontrano poi la sottocella intermedia, di arseniuro di gallio e indio (GaInAs), dall'energia di gap intermedia (1.18 eV), che assorbe i fotoni nella regione del verde. Infine, la sottocella al germanio (Ge), con una piccola energia di gap, (0.66 eV), assorbe i fotoni rimanenti, ovvero quelli a minore energia, corrispondenti alla regione del rosso [26]. Le figure (c) e (d) mostrano un confronto tra le parti dello spettro solare AM 1.5 che possono essere sfruttate da celle Si e celle GaInP/GaInAs/Ge [24].

2.6.1 Celle fotovoltaiche tandem Silicio-Perovskite

Tra le numerose tipologie di celle multigiunzione studiate negli ultimi anni, quelle che rappresentano al soluzione più promettente e avanzata per applicazioni terrestri su larga scala sono le celle tandem realizzate con silicio e perovskite. In particolare, offrono un compromesso ottimale tra efficienza (comunque sensibilmente più alta di quelle tipiche delle celle a singola giunzione), costi di produzione e potenziale di diffusione commerciale, a discapito di altre tecnologie avanzate che presentano ancora costi troppo elevati, come quelle che utilizzano l'arseniuro di gallio (GaAs) o altre tecnologie *thin-film* analizzate singolarmente nella sezione 2.5.

Le celle tandem perovskite-silicio possono essere realizzate in due configurazioni principali: *monolitica* e *meccanica*.

Nella configurazione **monolitica**, di cui un esempio è riportato in figura 2.23, la cella di perovskite viene realizzata direttamente sulla cella di silicio, fungendo quest'ultima da substrato. Questa struttura compatta è possibile grazie alla presenza di una giunzione tunnel che connette in serie i due strati, facilitando il passaggio degli elettroni tra le giunzioni. Le celle monolitiche sono più semplici da fabbricare, ma la loro efficienza dipende dalla stabilità di ciascuna giunzione poiché la corrente che le attraversa è la stessa. Questa rigidità limita l'efficienza in presenza di variazioni spettrali, rendendo la configurazione ideale per applicazioni con uno spettro solare costante, come quelle spaziali.

Nella configurazione **meccanica**, invece, le celle di perovskite e silicio vengono costruite separatamente e poi unite, trattando ciascuna cella come un dispositivo indipendente a due terminali. Questa configurazione consente di ottimizzare singolarmente le prestazioni elettriche di ciascuna giunzione prima dell'assemblaggio, conferendo una maggiore adattabilità alle variazioni dello spettro solare. Tale flessibilità è vantaggiosa per applicazioni terrestri, dove lo spettro varia a seconda dell'angolo d'incidenza della radiazione solare.

Nonostante la maggiore sensibilità alle variazioni dello spettro solare, la configurazione *monolitica* è quella che ad oggi ha ottenuto i risultati migliori, anche per applicazioni terrestri, grazie a tecniche di incapsulamento e protezione ambientale. Secondo un recente report dell'**ENEA** (2021), questa struttura ha permesso di raggiungere efficienze vicine al 29%, superando quelle delle celle tradizionali in silicio e aprendo nuove possibilità per la produzione di energia fotovoltaica [27]. Un esempio reale di tale tipologia di cella è riportato in figura 2.23

La struttura generale di una cella tandem Silicio-Perovskite è riportata in figura 2.22 (a), dove il primo strato rappresenta il rivestimento antiriflesso (ARC, *Anti-Reflective Coating*) e il contatto trasparente, che serve per minimizzare le perdite per riflessione. Sotto la cella superiore in perovskite, è presente uno strato intermedio che riflette i fotoni a bassa energia non assorbiti dalla cella superiore verso la cella inferiore in silicio (*Intermediate Reflector*), alla cui base è presente un *diffusore lambertiano*, che ha la funzione di ridistribuire la luce tra i due strati della cella tandem, aumentando il percorso ottico

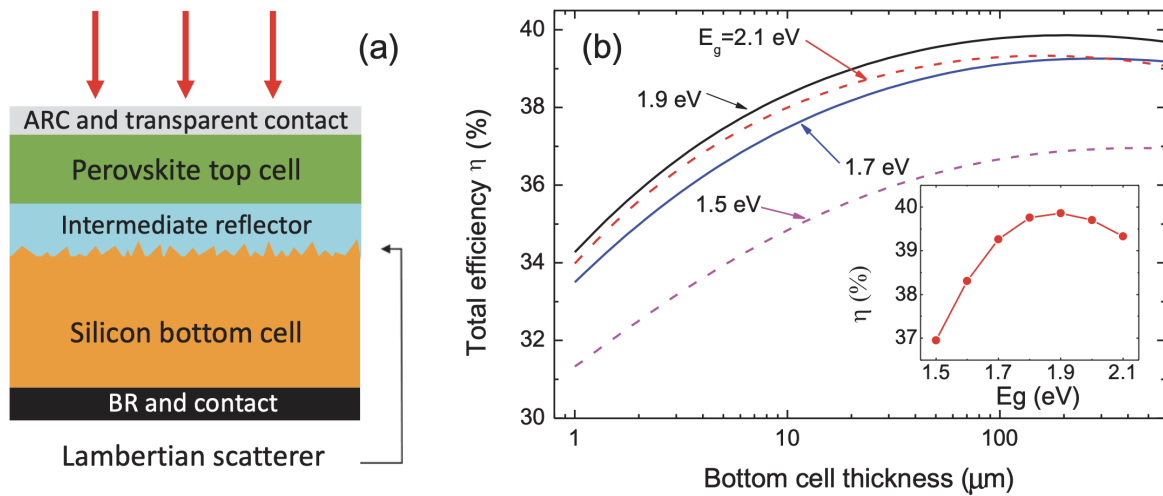


Figura 2.22: (a) Schema di una cella tandem Silicio-Perovskite; (b) Efficienza della cella tandem in funzione dello spessore della cella di silicio inferiore, calcolata per diversi valori dell'energia di gap delle perovskiti. All'interno del grafico (b) è riportata l'efficienza massima in funzione dell'energia di gap.

della luce e favorendone l'assorbimento (in sua assenza la luce passerebbe direttamente attraverso la cella senza contribuire alla generazione di corrente). Infine, lo strato *BR and contact* sotto la cella al silicio funge invece da riflettore posteriore, riflettendo nuovamente la luce inizialmente non assorbita all'interno della cella, aumentando la probabilità che ciò avvenga, ed include anche il contatto posteriore, che serve per raccogliere le cariche generate e chiudere il circuito elettrico.

In figura 2.22 (b), invece, viene mostrato come per questo tipo di celle esista un valore ottimale dell'energia di gap delle perovskiti, pari a $E_g^{up} = 1.9 \text{ eV}$. Si tratta di un valore coerente con il funzionamento della cella tandem, considerando che il silicio di cui è composta la cella inferiore ha un'energia di gap pari a $E_g^{down} = 1.1 \text{ eV}$. Infatti, come discusso nell'ultima sezione, si ottiene un assorbimento spettrale complementare che permette ai fotoni ad alta energia di essere convertiti dalla perovskite (in particolare quelli della regione del visibile e del vicino ultravioletto), mentre quelli ad energia più bassa vengono assorbiti dal silicio (come quelli del vicino infrarosso). Fisicamente, si tratta del valore ottimale perché valori più alti aumenterebbero la tensione generata dalla cella superiore ma ne ridurrebbero la corrente in quanto verrebbero assorbiti meno fotoni. Inoltre, sebbene valori maggiori della tensione riducano le perdite per termalizzazione, risulterebbe comunque una riduzione dell'efficienza complessiva a causa della minore quantità di fotoni assorbiti.

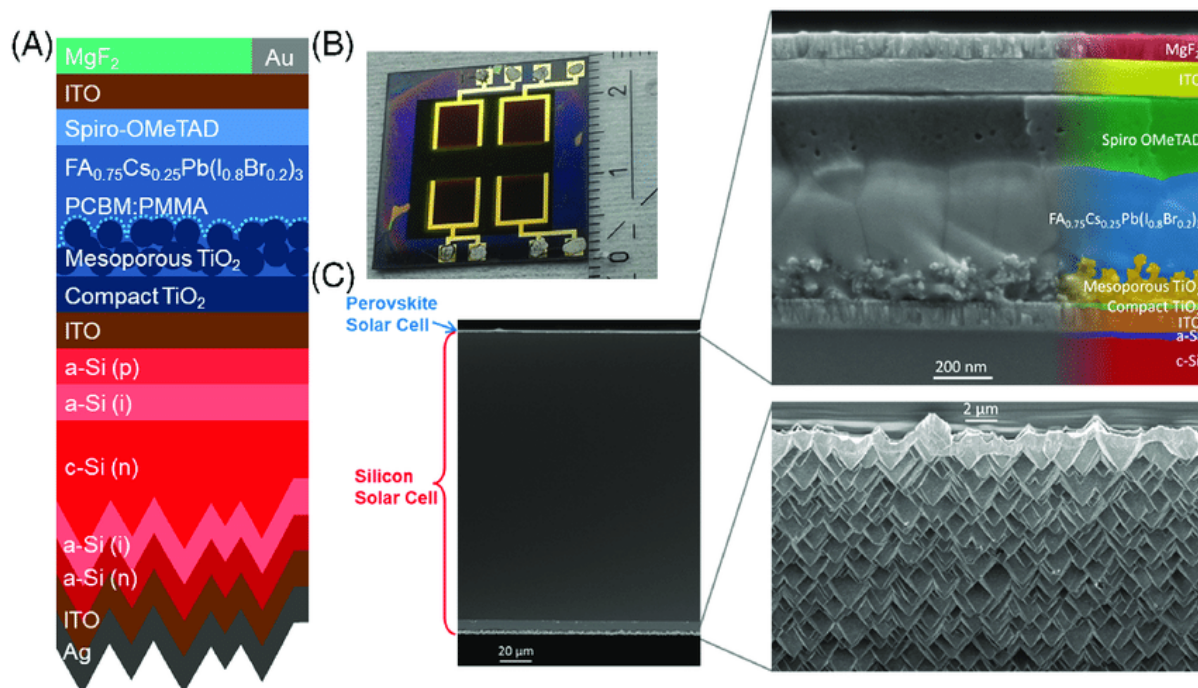


Figura 2.23: **Struttura di una cella tandem silicio-perovskite realizzata con processo monolitico.** (A) Schema degli strati della cella, che comprende una cella superiore in perovskite e una cella inferiore in silicio, con strati intermedi e di contatto per ottimizzare la raccolta delle cariche. Gli strati includono materiali come TiO_2 compatto e mesoporoso per il trasporto di elettroni, $FA_{0.75}Cs_{0.25}Pb(I_{0.8}Br_{0.2})_3$ come materiale di perovskite per la conversione fotovoltaica, e Spiro-OMeTAD, un materiale organico che funge da trasportatore di lacune. I pedici rappresentano la frazione molare di ciascun elemento o composto nella struttura della perovskite. (B) Immagine fotografica della cella tandem. (C) Immagine SEM (*Scanning Electron Microscope*, microscopio elettronico a scansione) che mostra la sezione trasversale della cella con la disposizione degli strati e la transizione continua tra la cella in perovskite e quella in silicio (c-Si), tipica delle celle tandem monolitiche [28].

Best Research-Cell Efficiencies

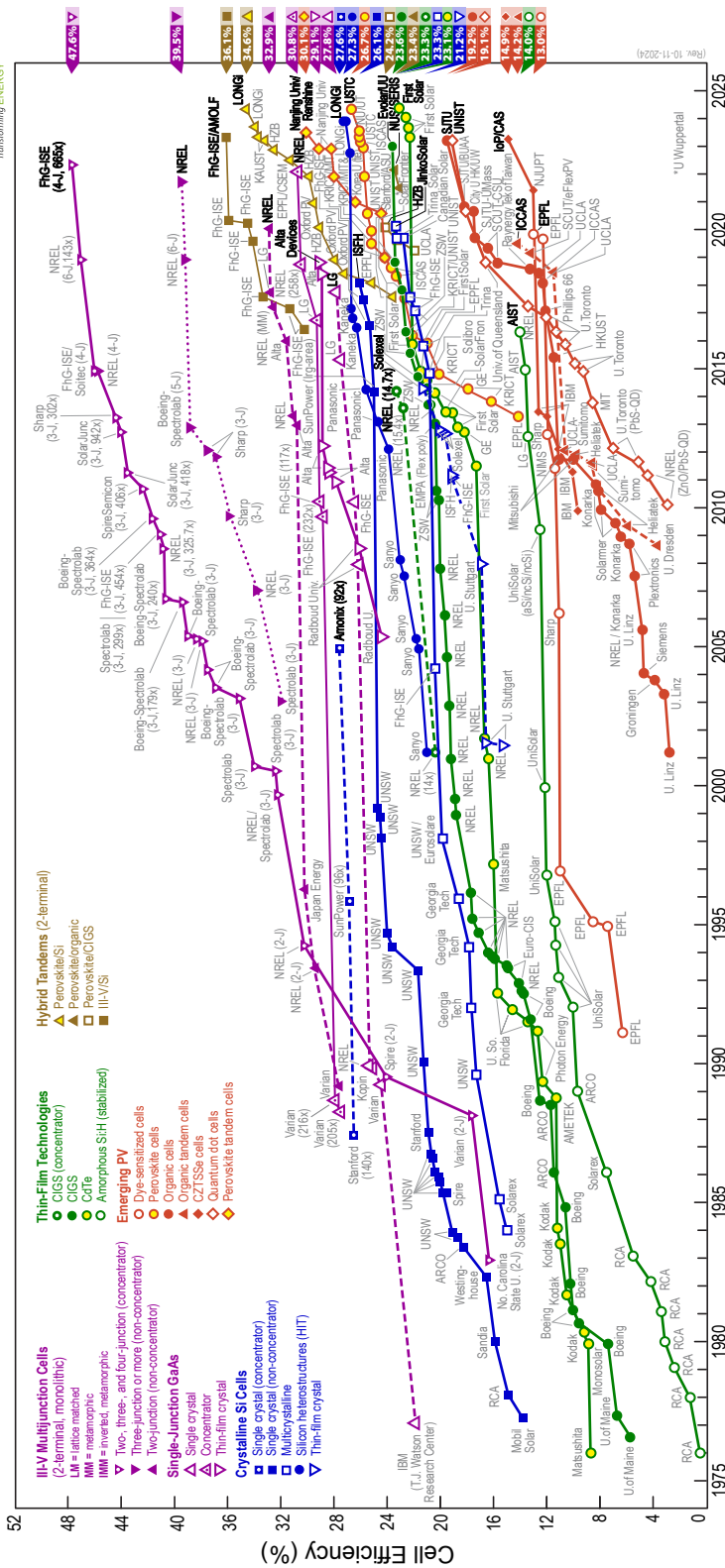


Figura 2.24: Efficienza delle celle fotovoltaiche raggiunta da varie tecnologie dal 1976 ad oggi, misurata nelle condizioni standard di test (STC), definite dalla norma IEC 60904-3, ossia con una radiazione solare incidente pari a 1000 W/m^2 , una temperatura della cella di 25°C e uno spettro solare *AM 1.5*. Nel grafico, aggiornato regolarmente dal National Renewable Energy Laboratory (NREL), ogni punto rappresenta il massimo valore documentato per l'efficienza di una data cella in corrispondenza dell'anno in cui è stata realizzata. L'andamento temporale indica una tendenza generale verso l'aumento dell'efficienza grazie ai miglioramenti dei materiali e delle strutture dei pannelli. Le celle multi-giunzione detengono le efficienze più elevate, superando il 40%, grazie alla loro capacità di sfruttare più lunghezze d'onda dello spettro solare [29].

Capitolo 3

Dati e previsioni

Ad oggi, alla luce di recenti eventi atmosferici catastrofici, la riduzione delle emissioni di gas serra e la mitigazione dei cambiamenti climatici rappresentano obiettivi primari. In questo contesto, il fotovoltaico offre una soluzione concreta e sostenibile, capace di integrarsi in modo flessibile sia nelle grandi reti elettriche nazionali (definite *on-grid*) sia in contesti decentrati e autonomi (chiamati anche *off-grid*). Questa forma di energia, esente da emissioni dirette di carbonio durante il funzionamento, è inoltre sostenuta da significativi progressi tecnologici e da politiche di incentivazione che ne hanno ridotto drasticamente i costi, almeno per gli impianti già diffusi su larga scala. In questo capitolo si vogliono fornire i più recenti dati e statistiche in merito all'energia solare ed alle tecnologie fotovoltaiche in particolare, analizzandone lo sviluppo storico e le previsioni di crescita, anche sulla base dei costi e degli investimenti necessari per raggiungere determinati obiettivi. Particolare attenzione sarà dedicata a come sono cambiati nel tempo i prezzi dei moduli fotovoltaici tradizionali, indice della crescente diffusione di questa forma di energia non solo nei confronti delle fonti non rinnovabili, ma anche rispetto ad altri metodi sostenibili per la produzione energetica. Infine, verranno presentate le proiezioni future per valutare le potenzialità e le sfide che questa tecnologia affronterà, in termini di efficienza e sostenibilità economica, con uno sguardo alle innovazioni e agli sviluppi necessari affinché il fotovoltaico possa consolidarsi come risorsa fondamentale per la transizione verso un sistema energetico decarbonizzato, stabile e resiliente.

3.1 L'energia solare nel panorama energetico

Se finora ci si è concentrati sul **solare fotovoltaico**, nelle grandi potenzialità dell'energia solare va necessariamente inclusa anche un'altra tecnologia, quella del **solare termico**. Quest'ultimo si basa sulla conversione diretta della radiazione solare in energia termica, utilizzando collettori che assorbono il calore del Sole e lo trasferiscono a un fluido termovettore, che può essere acqua, aria o un olio termico, a seconda dell'applicazione. Tali

sistemi vengono spesso utilizzati per il riscaldamento ambientale e dell'acqua negli impianti domestici, oppure per immettere energia nella rete o caricare sistemi di accumulo. Un impianto come quello riportato in figura 3.1, detto anche *ETC*, dall'acronimo inglese *Evacuated Tube Collector*, costituisce insieme ai collettori piani, detti *FPC* (*Flat Plate Collectors*) una delle tecnologie più diffuse per applicazioni domestiche e commerciali. Interessanti sono anche alcune integrazioni delle due tecnologie, i cosiddetti **sistemi ibridi fotovoltaico-termici (PVT)**, che combinano solare termico e fotovoltaico in un unico pannello che produce simultaneamente energia elettrica e termica, spesso utilizzando il calore generato dalle celle fotovoltaiche come energia per il solare termico, migliorando l'efficienza di entrambe le tecnologie, poiché l'efficienza delle celle fotovoltaiche tende a diminuire all'aumentare della temperatura, come è stato analizzato nel paragrafo 1.4.4. Essi sono particolarmente efficaci in contesti in cui vi è una domanda simultanea di energia elettrica e termica, quali edifici residenziali e commerciali, processi industriali e sistemi di climatizzazione solare.

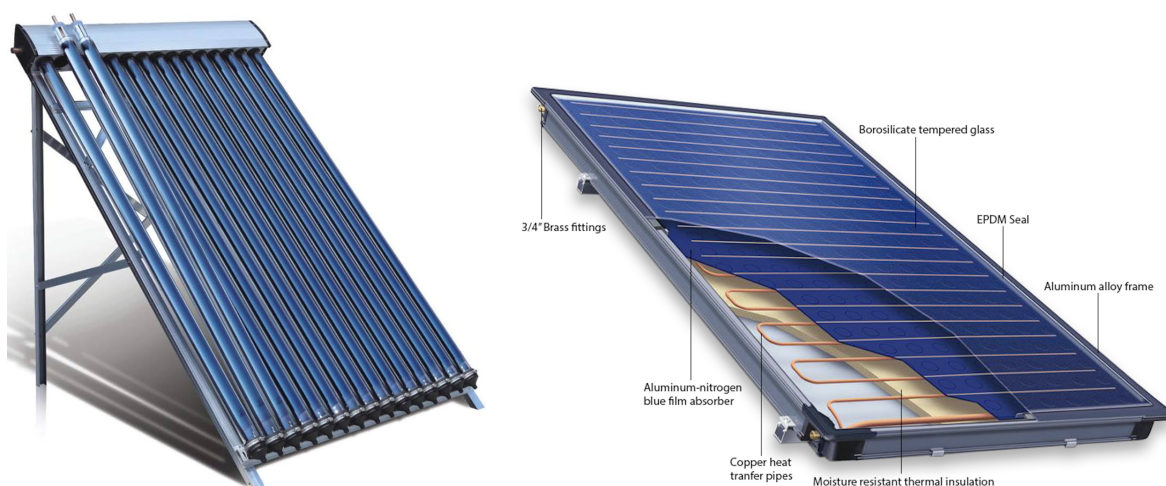


Figura 3.1: Esempio di tecnologie per il solare termico: collettori solari termici a tubi sottovuoto (*ETC*) a sinistra e collettori solari piani (*FPC*) a destra [30], [31].

Un altro aspetto fondamentale nell'ambito dell'energia solare è la distinzione tra sistemi fotovoltaici *on-grid* e *off-grid*. I **sistemi on-grid** sono impianti collegati alla rete elettrica pubblica, e permettono uno scambio bidirezionale dell'energia. Tali sistemi, tramite moduli fotovoltaici, convertono l'energia solare in corrente continua, la quale viene poi trasformata in corrente alternata compatibile con la rete grazie ad un *inverter*, ovvero un dispositivo elettronico che converte la corrente continua (*DC*), prodotta dai moduli fotovoltaici, in corrente alternata (*AC*) con caratteristiche di frequenza e tensione compatibili con la rete elettrica. Quando la produzione di energia supera il consumo locale, l'energia in eccesso viene immessa nella rete elettrica, consentendo al produttore di accumulare crediti energetici o di vendere l'energia prodotta. Viceversa, in condizioni di

produzione scarsa o assente (ad esempio di notte), il sistema consente di prelevare energia dalla rete per soddisfare le esigenze di consumo. Questi sistemi non richiedono generalmente l'impiego di batterie di accumulo, poiché la rete funge da riserva energetica. Al contrario, i **sistemi off-grid** operano indipendentemente dalla rete elettrica e sono ideali per aree remote o non servite dalla rete pubblica. Questi impianti richiedono sistemi di accumulo dell'energia, come batterie, per garantire la disponibilità di elettricità anche in assenza di irradiazione solare.

La scelta tra *on-grid* e *off-grid* dipende da vari fattori, tra cui la disponibilità della rete, le esigenze energetiche e le condizioni economiche locali. In figura 3.2 è riportata la capacità totale installata di energia solare nel mondo; per quanto riguarda il fotovoltaico vengono considerati sia i sistemi *on-grid* che *off-grid*, sebbene i primi diano un contributo preponderante rispetto ai secondi.

Secondo i dati dell'International Energy Agency (**IEA**) [32], l'energia solare nel suo complesso ha registrato una crescita esponenziale negli ultimi anni. Nel 2023, la capacità installata globale combinata di solare fotovoltaico e solare termico ha superato i 1400 *GW*, rappresentando una quota significativa della nuova capacità rinnovabile aggiunta a livello mondiale. Il solare fotovoltaico ha contribuito con circa 1000 *GW* di capacità installata, mentre il solare termico ha raggiunto circa 400 *GW_t* (gigawatt termici¹) di capacità cumulativa, evidenziando l'importanza di entrambe le tecnologie nel *mix energetico* globale. Molte stime concordano sul fatto che tale produzione energetica abbia evitato nel 2023 l'emissione di oltre 1 gigatonnellata di *CO₂*, supportando alcuni importanti obiettivi climatici, come quelli sanciti dall'**Accordo di Parigi** alla fine del 2015:

- Limitare l'aumento della temperatura globale mantenendolo al di sotto dei 2°C rispetto ai livelli preindustriali², e preferibilmente cercare di limitarlo a 1.5°C;
- Ridurre le emissioni di gas serra attraverso la regolare presentazione dei cosiddetti *National Determined Contributions* (NDC) e rivedendo ogni cinque anni gli impegni nazionali dei paesi firmatari;
- Promuovere politiche di finanziamento per le misure atte a ridurre gli effetti del cambiamento climatico per i paesi in via di sviluppo;

Un parametro significativo per valutare l'efficienza e l'affidabilità delle diverse fonti energetiche è il **fattore di capacità** (*capacity factor*). Esso è definito come il rapporto tra

¹Il *gigawatt termico* è un'unità di misura della potenza termica, utilizzata per quantificare l'energia prodotta sotto forma di calore in un sistema, a differenza del gigawatt elettrico che misura la potenza prodotta sotto forma di energia elettrica. Quest'ultimo si può indicare con *GW_e* o semplicemente *GW*.

²Con *livelli preindustriali* si fa riferimento alle condizioni climatiche, in particolare alla concentrazione di gas serra come l'anidride carbonica, che erano presenti nell'atmosfera prima dell'industrializzazione, intorno alla metà del XVIII secolo. Questo periodo è usato come base per misurare i cambiamenti climatici perché da allora le attività umane, come l'uso di combustibili fossili e la deforestazione, hanno iniziato a causare un significativo aumento delle emissioni, contribuendo al riscaldamento globale.

l'energia effettivamente prodotta da un impianto in un determinato intervallo di tempo e l'energia che l'impianto potrebbe teoricamente generare se operasse continuamente alla sua capacità massima nominale durante lo stesso periodo. Per le diverse fonti di energia rinnovabile, i fattori di capacità variano significativamente:

Tecnologia	Fattore di capacità (%)
Solare Fotovoltaico	10–25
Eolico Onshore	20–35
Eolico Offshore	30–45
Idroelettrico	30–60
Geotermico	70–90
Biomassa	60–80

Tabella 3.1: Confronto dei fattori di capacità tra diverse tecnologie rinnovabili [33].

Come si evince dalla tabella 3.1, il fattore di capacità del solare fotovoltaico è inferiore rispetto ad altre fonti rinnovabili, principalmente a causa della variabilità dell'irradiazione solare. Tuttavia, l'ampia disponibilità e il calo dei costi, approfonditi nella sezione 3.2, rendono il fotovoltaico una componente essenziale nel *mix energetico* mondiale.

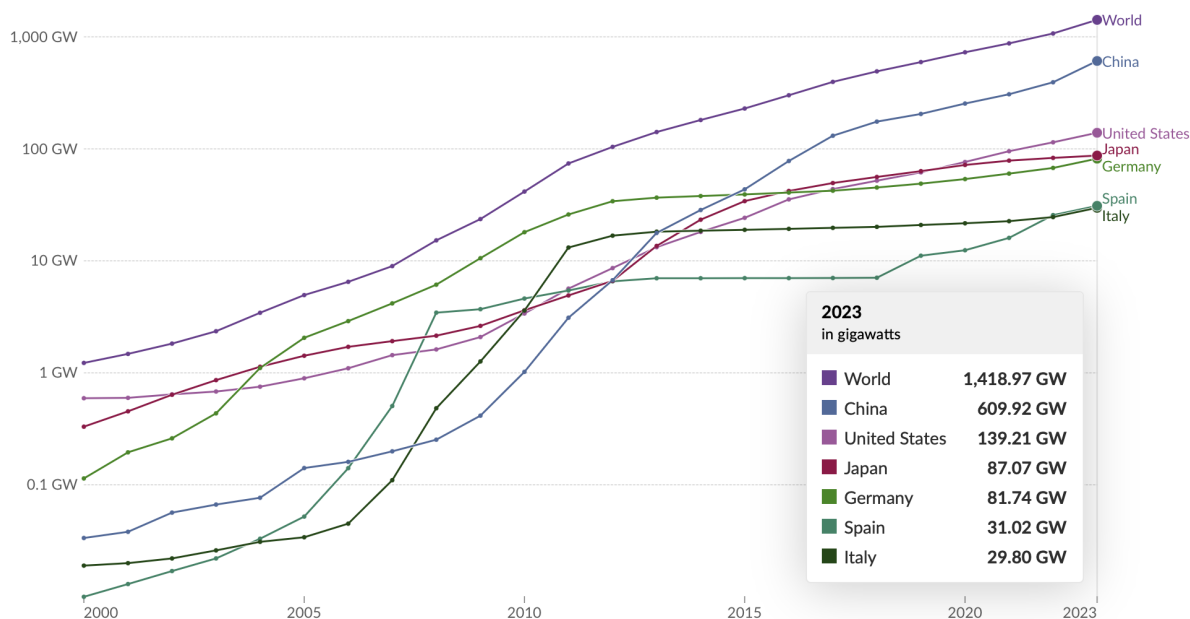


Figura 3.2: **Capacità totale installata di energia solare termica e fotovoltaica** (sia *on-grid* che *off-grid*) in gigawatt (*GW*) in scala logaritmica a livello globale e in alcuni stati. La crescita esponenziale negli ultimi decenni riflette l'aumento dell'adozione delle tecnologie solari a livello mondiale ed in particolare in Cina [34].

3.1.1 Centrali fotovoltaiche nel mondo

Negli ultimi anni, si è assistito ad una significativa diffusione delle centrali fotovoltaiche su larga scala, sia in termini di numeri che di capacità massima. Nella tabella 3.2 sono riportate le centrali fotovoltaiche più produttive dal 1982 al 2024, mentre in quella successiva, 3.3, sono riportate le centrali dalla maggiore produzione ad oggi esistenti.

Anno ^(a)	Nome della Centrale	Stato	Capacità (MW)
1982	Lugo	Stati Uniti	1
1985	Carrisa Plain	Stati Uniti	5.6
2005	Bavaria Solarpark	Germania	6.3
2006	Erlasee Solar Park	Germania	11.4
2008	Olmedilla Photovoltaic Park	Spagna	60
2010	Sarnia PV Power Plant	Canada	97
2011	Huanghe Golmud Solar Park	Cina	200
2012	Agua Caliente Solar Project	Stati Uniti	290
2014	Topaz Solar Farm ^(b)	Stati Uniti	550
2015	Longyangxia Dam Solar Park	Cina	850
2016	Tengger Desert Solar Park	Cina	1547
2019	Pavagada Solar Park	India	2050
2020	Bhadla Solar Park	India	2245
2024	Midong Solar Park	Cina	5000

Tabella 3.2: Sequenza temporale delle centrali fotovoltaiche dalla maggiore produzione dal 1982 al 2024 [35]. ^(a) Anno finale di realizzazione ^(b) Capacità espressa in MW_{AC} (corrente continua). Negli altri casi è espressa in MW_{DC} (corrente alternata).

Nome della Centrale	Stato	Capacità (MW)	Entrata in servizio	Estensione (km ²)
Midong Solar Park	Cina	5000	2024	810
Bhadla Solar Park	India	2245	2020	56
Huanghe Hainan Solar Park	Cina	2200	2020	56
Pavagada Solar Park	India	2050	2019	53
Benban Solar Park	Egitto	1650	2019	37
Tengger Desert Solar Park	Cina	1547	2017	43

Tabella 3.3: Le più grandi centrali fotovoltaiche al mondo [36].

Inoltre, per avere una visione d’insieme delle capacità di produzione energetica, è utile confrontare le più grandi centrali in base alla fonte energetica utilizzata:

Nome della Centrale	Tipo di Energia	Capacità (MW)	Stato
Diga delle Tre Gole	Idroelettrico	22500	Cina
Kashiwazaki-Kariwa	Nucleare	8212	Giappone
Gansu Wind Farm	Eolico	8000	Cina
Taichung Power Plant	Carbone	5500	Taiwan
Midong Solar Park	Solare Fotovoltaico	5000	Cina

Tabella 3.4: Confronto tra le più grandi centrali di produzione di energia elettrica per tipologia [37].

La tabella 3.4 mette in evidenza la distinzione tra le centrali relative a fonti di energia rinnovabile, come l’idroelettrico, l’eolico e il fotovoltaico, e quelle legate a fonti non rinnovabili, come il nucleare e il carbone. Si nota che tutte le centrali elencate si trovano in paesi orientali, a testimonianza della loro leadership nella produzione energetica su larga scala. La Cina, in particolare, si è distinta nel 2022 per il 55 % degli investimenti globali in energie rinnovabili, con 164 miliardi di dollari destinati a nuove centrali solari e 109 miliardi a nuovi parchi eolici [38], consolidando la sua posizione di primo piano nel panorama energetico mondiale, anche in termini di energia prodotta da fonte solare, come si può osservare in figura 3.4 (anno 2023).

3.1.2 Rete elettrica e Smart Grids

Un aspetto importante quanto la produzione di energia, quantitativamente riportata in figura 3.3 e suddivisa per regioni geografiche, è la distribuzione di tale energia, dalle centrali ai centri abitati o alle industrie. La **rete elettrica** è l’infrastruttura che consente il trasporto, la distribuzione e l’utilizzo dell’energia elettrica. Nelle centrali termoelettriche, idroelettriche, nucleari, l’energia viene tipicamente generata direttamente in corrente alternata (AC), grazie a turbine collegate a generatori sincroni. Le centrali fotovoltaiche, invece, generano di norma energia elettrica sottoforma di corrente continua (DC) poiché i pannelli solari producono una tensione costante derivante dall’interazione diretta della luce con il materiale semiconduttore.

La maggior parte delle reti di trasporto e distribuzione elettrica opera in corrente alternata (AC), che è più efficiente per il trasferimento su lunghe distanze grazie alla minore potenza dissipata per *effetto Joule* ed alla possibilità di aumentare o diminuire la tensione tramite trasformatori. Dunque, per le centrali fotovoltaiche si rende necessaria una conversione della corrente da continua ad alternata tramite i già citati *inverter*.

Nelle reti di trasporto si distinguono: la **trasmissione** dalle centrali di generazione ai

centri di consumo principali, che avviene attraverso linee ad alta tensione, il cui voltaggio può variare tra:

- **110-220 kV** per distanze intermedie e per collegare sottostazioni regionali;
- **330-400 kV** per lunghe distanze e per reti nazionali in molte parti del mondo;
- **500–800 kV** utilizzato in alcuni paesi per la trasmissione ultra-alta tensione (UHV) su distanze molto lunghe, come negli Stati Uniti, Cina e Russia.

Successivamente, si ha la **distribuzione primaria** alle sottostazioni, dove la tensione viene ridotta fino a $10 - 30 \text{ kV}$. Infine, la **distribuzione secondaria** riduce ulteriormente la tensione, 230 V nel caso dell'Italia, adatta per il consumo diretto e sicuro.

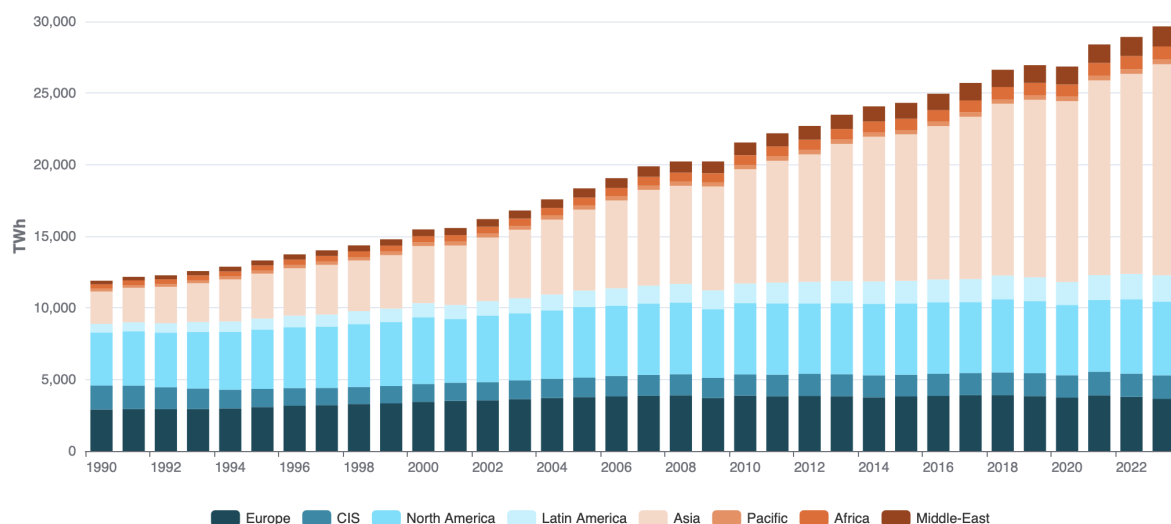


Figura 3.3: **Produzione di energia elettrica misurata in TWh dal 1990 al 2023 suddivisa per regioni geografiche.** L'istogramma mostra come la produzione di elettricità sia variata nelle diverse aree del mondo, mettendo in evidenza l'aumento della capacità nelle regioni in via di sviluppo e la continua crescita globale [39]. Si tratta dei dati relativi alla produzione complessiva di energia elettrica, mentre in figura 3.4 è mostrata nel dettaglio la distribuzione geografica della produzione di energia elettrica *da fonte solare* nel 2023.

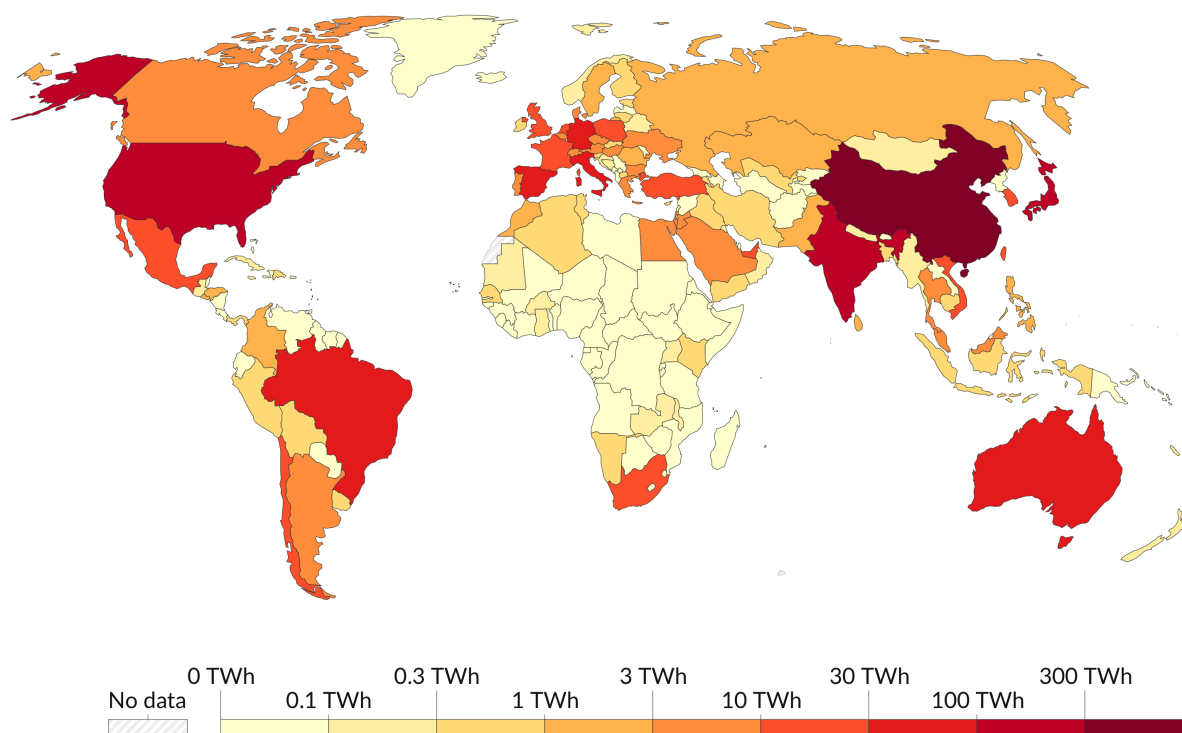


Figura 3.4: **Produzione di energia elettrica da fonte solare nel 2023**, espressa in terawattora (TWh) all'anno. La mappa mostra la distribuzione della produzione solare globale, evidenziando come le regioni con una significativa capacità fotovoltaica installata e un alto irraggiamento solare, come Cina, Stati Uniti, India e Australia, abbiano livelli di generazione molto elevati (fino a $300 TWh$ o più). Altri paesi, pur con potenziale solare favorevole, mostrano una produzione più contenuta, segno delle differenze nelle infrastrutture e politiche di investimento nella tecnologia solare [40].

A partire dagli anni 2000, ma in maniera preponderante nell'ultimo decennio negli Stati Uniti, in Cina ed in alcuni Stati europei, si sono diffuse le cosiddette **Smart Grids**, o reti elettriche intelligenti. Si tratta di infrastrutture energetiche avanzate che integrano tecnologie informatiche, sistemi di comunicazione e dispositivi di controllo per migliorare l'efficienza, l'affidabilità e la sostenibilità della distribuzione e del consumo di energia elettrica. Il loro tratto distintivo è la gestione dinamica ed interattiva del flusso bidirezionale di energia ed informazioni tra i fornitori ed i consumatori, permettendo di:

- **Ottimizzare l'equilibrio tra domanda e offerta** attraverso la gestione in tempo reale dei carichi e la previsione della domanda energetica;
- **Integrare fonti di energia rinnovabile distribuite**³, grazie alla capacità di

³La *generazione distribuita* si riferisce ad un modello di produzione energetica in cui l'energia elettrica

gestire flussi energetici bidirezionali, come è schematicamente raffigurato in figura 3.5;

- **Migliorare la qualità e la sicurezza della rete energetica**, grazie a sistemi di monitoraggio che consentono di rilevare e isolare rapidamente guasti o anomalie, riducendo i tempi di interruzione del servizio e migliorando la resilienza della rete;

Queste caratteristiche si adattano particolarmente bene ai sistemi fotovoltaici perché la produzione di energia solare cambia significativamente nel corso di una giornata, in base alla posizione ed alla presenza del Sole, come è stato analizzato nel paragrafo 2.2.2. Questa variabilità intrinseca rende necessaria una rete in grado di adattarsi dinamicamente alla disponibilità di energia. In particolare, il flusso bidirezionale consente agli utenti dotati di impianti fotovoltaici di immettere nella rete l'energia in eccesso prodotta durante il giorno, quando la generazione può superare i consumi locali, e di prelevare energia dalla rete stessa nelle ore in cui il fotovoltaico non è operativo. Questo meccanismo, noto come **scambio sul posto**, non solo migliora l'efficienza complessiva del sistema, ma contribuisce anche a stabilizzare la rete, riducendo i picchi di domanda e sfruttando al meglio l'energia prodotta localmente. Inoltre, la capacità di queste infrastrutture di monitorare e regolare in tempo reale i flussi energetici garantisce una gestione ottimale delle risorse distribuite, minimizzando gli sprechi e migliorando l'affidabilità del sistema. Per queste ragioni, le *Smart Grids* superano i limiti della rete elettrica tradizionale, concepita per gestire flussi unidirezionali da grandi centrali verso gli utenti finali, rivelandosi particolarmente adatte ad un utilizzo integrato con il fotovoltaico.

è generata vicino al punto di utilizzo, piuttosto che in grandi centrali centralizzate e trasportata su lunghe distanze attraverso la rete di trasmissione. Questo concetto include una varietà di impianti di generazione di piccola o media scala, come pannelli fotovoltaici installati su edifici residenziali o commerciali, turbine eoliche locali, sistemi a biomassa o piccoli impianti idroelettrici.

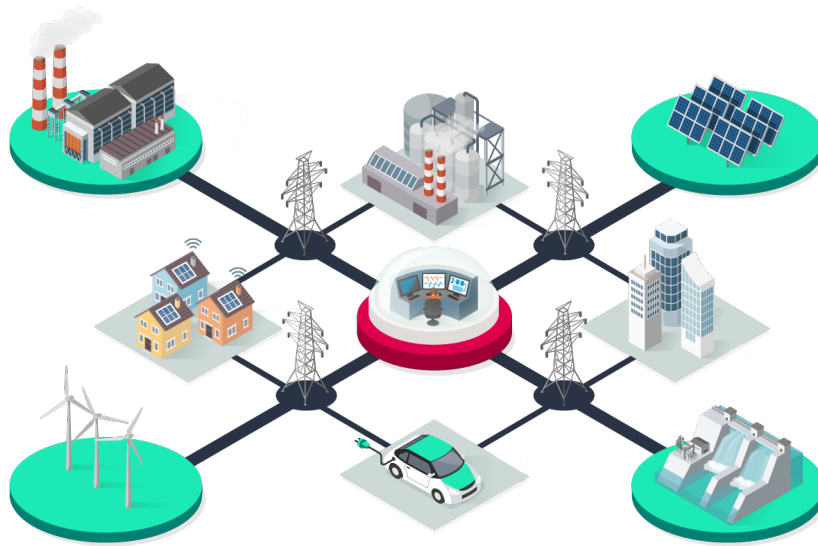


Figura 3.5: Schema illustrativo di una *Smart Grid*, che evidenzia la connessione tra diverse fonti di generazione di energia (tradizionali e rinnovabili), i consumatori finali ed un eventuale centro di controllo unificato. Le *Smart Grids* facilitano l'integrazione delle fonti di energia distribuite, come pannelli fotovoltaici e turbine eoliche, permettendo una gestione flessibile dei flussi energetici bidirezionali. In particolare, nel caso del fotovoltaico, permettono di gestire efficacemente la variabilità della produzione solare durante la giornata e ottimizzano il bilanciamento tra produzione e consumo [41].

3.2 Costi ed investimenti

Alla luce del ruolo primario dell'energia solare nel panorama energetico e della necessità di una rete elettrica avanzata per gestirne l'integrazione, il fotovoltaico emerge come una tecnologia strategica per il futuro energetico. Tuttavia, la sua diffusione su larga scala dipende anche da fattori economici, come i costi di produzione e gli investimenti richiesti per il suo sviluppo e la sua implementazione.

Come si può notare in figura 3.6, negli ultimi decenni il settore del fotovoltaico e, in generale, dell'energia solare ha visto un calo significativo dei costi di produzione ed installazione, rendendo queste tecnologie sempre più competitive rispetto alle fonti di energia tradizionali. I costi dei moduli fotovoltaici sono diminuiti costantemente, grazie a progressi tecnologici, politiche di incentivo e ad *economie di scala*⁴ derivanti dall'in-

⁴L'*economia di scala* è un fenomeno economico per cui, all'aumentare della quantità prodotta di un bene o servizio, il costo medio per unità di produzione tende a diminuire. Questo fenomeno si verifica perché, a fronte di una produzione su larga scala, i costi fissi (come ricerca, sviluppo e infrastrutture) vengono ammortizzati su un numero maggiore di unità prodotte, mentre i costi variabili possono ridursi grazie a una maggiore efficienza operativa e all'uso ottimizzato delle risorse (minore costo delle materie

cremento delle installazioni globali. In particolare, come si può osservare in figura 3.6, la **Legge di Swanson** descrive come i costi dei moduli solari diminuiscano di circa il 20.2% per ogni raddoppio della capacità *cumulativa* installata, una dinamica paragonabile alla *Legge di Moore*⁵ relativa al numero di transistor su un chip di semiconduttore. Tale percentuale viene chiamata *learning rate*, ovvero tasso di apprendimento, perché rappresenta una misura di quanto la tecnologia fotovoltaica migliori nel tempo, in virtù dell'adeguamento dei processi produttivi alla crescente diffusione e all'abbattimento dei costi, evidenziandone la crescente competitività sul mercato.

La Legge di Swanson, che costituisce un principio empirico osservato nel mercato dell'energia solare fotovoltaica dal fondatore dell'azienda *Sunpower* Richard Swanson, risulta molto utile nelle previsioni economiche, poiché indica che il continuo aumento della capacità installata di fotovoltaico può portare a ulteriori riduzioni dei costi, incentivando ulteriormente l'adozione di questa tecnologia. Essa considera solamente la produzione di energia ottenuta da celle fotovoltaiche al silicio, in quanto queste ultime rappresentano un riferimento standard nel settore da decenni.

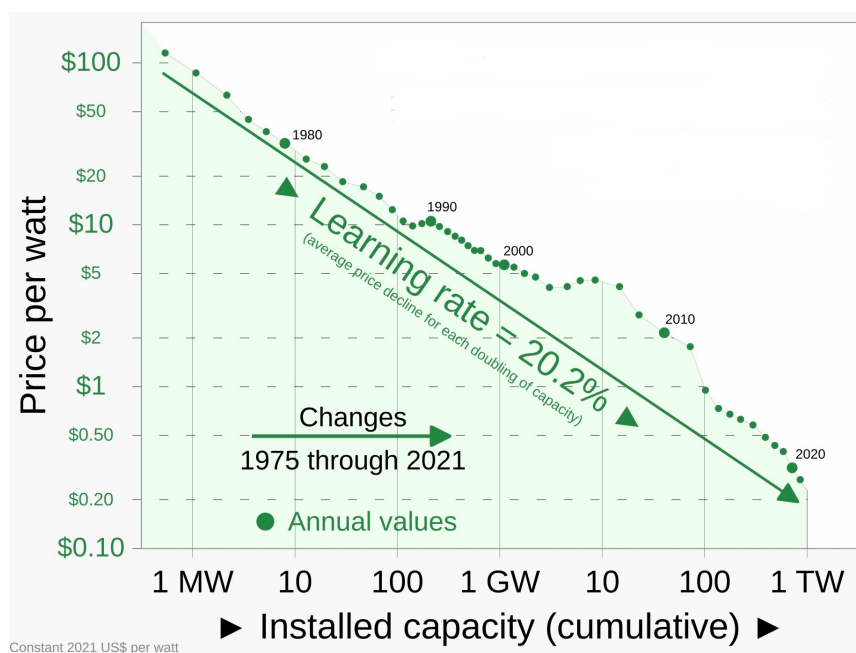


Figura 3.6: Prezzo in dollari di 1 W di potenza generata da solare fotovoltaico con celle tradizionali al silicio dal 1975 al 2021 aggiustato per l'inflazione [42].

prime grazie ad approvvigionamento su larga scala e miglioramenti nei processi produttivi).

⁵La *Legge di Moore* è un principio empirico osservato da Gordon Moore, informatico ed imprenditore statunitense, co-fondatore di Intel, secondo cui il numero di transistor su un chip di semiconduttore raddoppia approssimativamente ogni due anni, portando a un aumento esponenziale delle prestazioni computazionali ed a una riduzione dei costi per unità di elaborazione. Questo fenomeno è stato alla base dei rapidi progressi tecnologici nell'elettronica e nell'informatica a partire dagli anni '70.

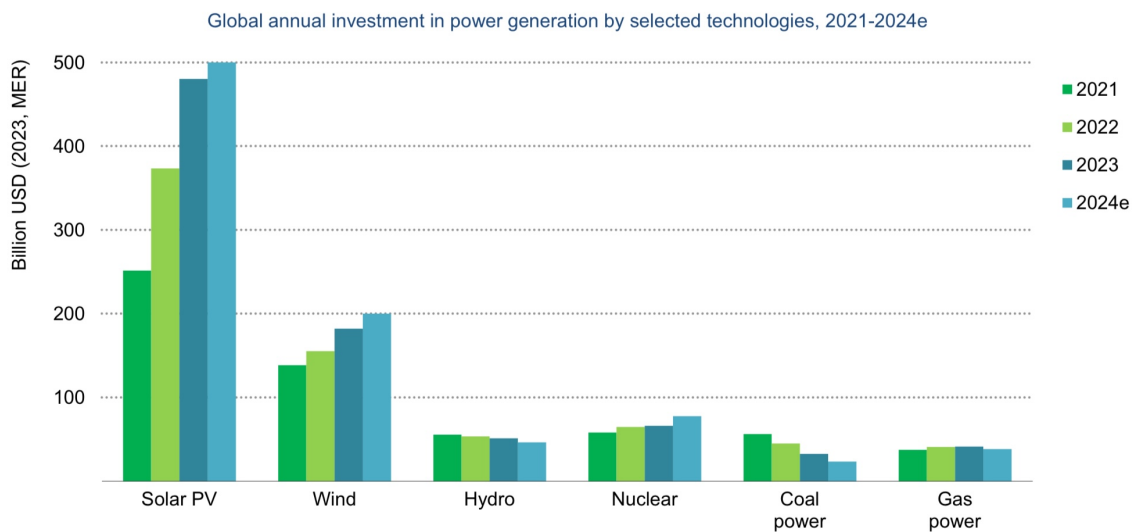


Figura 3.7: **Investimenti globali annuali nella generazione di energia per diverse tecnologie tra il 2021 e il 2024** (i cui dati sono indicati con "2024e" in quanto si tratta di una stima per l'anno corrente), espressi in miliardi di dollari. Nel 2023, il solare fotovoltaico ha raggiunto un record di 480 miliardi di dollari di investimenti, superando la somma di tutte le altre tecnologie di generazione. Si osserva una significativa crescita degli investimenti nelle energie rinnovabili, in particolare nel fotovoltaico e nell'eolico, mentre gli investimenti nel carbone sono calati del 40% rispetto al 2021 [43].

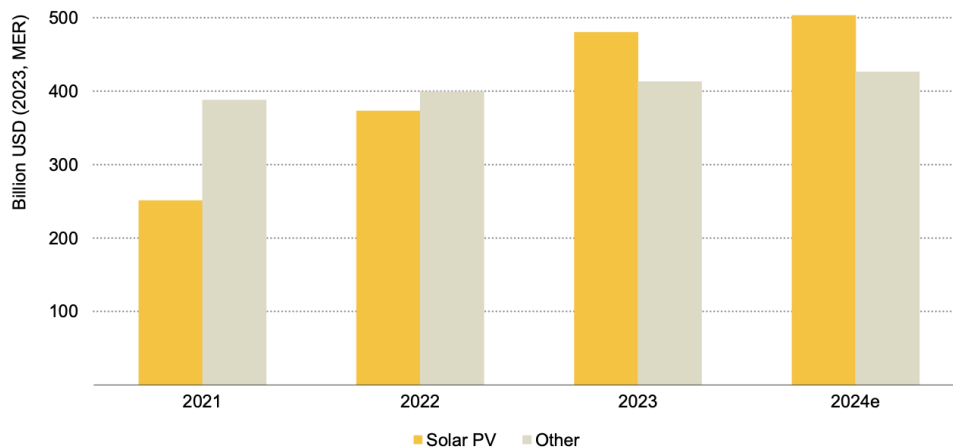


Figura 3.8: **Investimenti annuali globali dal 2021 al 2024** (stima per l'anno in corso) **destinati al fotovoltaico ed a tutte le altre principali tecnologie per la produzione energetica** (rinnovabili e non), includendo carbone, petrolio, gas naturale, energia eolica, idroelettrica e nucleare. Si nota come già nel 2023 gli investimenti totali sul fotovoltaico abbiano superato tutte le altre tecnologie menzionate [43].

Nelle figure 3.7, 3.8 si può notare come il fotovoltaico sia la forma di energia che negli ultimi anni ha attratto di gran lunga i maggiori investimenti. A questo si è giunti grazie a diversi programmi nazionali, che hanno permesso di raggiungere la *grid-parity* in circa 50 stati già nel 2015. Alcuni esempi rilevanti sono l'**Energiewende** in Germania, il progetto **Million Solar Roofs** negli Stati Uniti ed il **12^o Piano Quinquennale Cinese** del 2011 per la produzione di energia. La *grid-parity* si verifica quando il costo dell'elettricità generata da una fonte rinnovabile, come il fotovoltaico o l'eolico, diventa uguale o inferiore al costo dell'elettricità acquistata dalla rete elettrica tradizionale, prodotta principalmente con fonti fossili o nucleari. Raggiungere la *grid parity* implica che l'energia rinnovabile può competere in termini economici senza necessitare di incentivi o sussidi governativi, indicando che quest'ultima è economicamente autosufficiente al punto da poter essere adottata su larga scala.

Questo concetto si basa su una comparazione tra il costo livellato dell'energia (*Levelized Cost of Energy, LCOE*) della fonte rinnovabile e il prezzo di acquisto dell'elettricità dalla rete. Quando i costi di produzione delle rinnovabili diminuiscono grazie ai progressi tecnologici, alle economie di scala e all'efficienza produttiva, essi possono raggiungere o addirittura scendere al di sotto dei prezzi dell'elettricità convenzionale. Tale parametro rappresenta il costo complessivo di produzione dell'energia durante l'intero ciclo di vita dell'impianto, includendo sia i costi iniziali di costruzione sia i costi operativi e di manutenzione. Si misura solitamente in $\$/kWh$ o $\€/kWh$ e costituisce una stima del prezzo minimo al quale l'energia dovrebbe essere venduta per coprire tutti i costi di produzione. La formula generale per calcolarlo è

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^T \frac{C_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^T \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (3.1)$$

dove C_t rappresenta i costi nel tempo t (in generale comprende i costi di capitale, operativi e di manutenzione, nel caso del fotovoltaico il contributo prevalente è dato dai costi di capitale, dal momento che gli impianti tipicamente non richiedono grandi interventi di manutenzione), E_t è l'energia prodotta nel tempo t (generalmente espresso in anni), r è il tasso di sconto, che riflette il costo opportunità del capitale investito e riflette il rischio associato alla tecnologia ed al progetto, T è la durata complessiva di vita dell'impianto (anch'essa tipicamente espressa in anni).

Interessante è stata soprattutto la strategia adottata dalla Germania per realizzare una transizione energetica verso un sistema a basse emissioni di carbonio, basato principalmente su fonti rinnovabili e sull'efficienza energetica, detta **Energiewende**. Questo progetto è stato avviato formalmente nel 2010 con il cosiddetto *Energiekonzept*, la versione tedesca degli NDC già citati nella sezione 3.1 nel contesto dell'Accordo di Parigi. Esso ha stabilito precisi obiettivi per la transizione verso un sistema energetico sostenibile, come:

- Riduzione delle emissioni di gas serra del 40 % entro il 2020, del 55 % entro il 2030 e dell'80 – 95 % entro il 2050, rispetto ai livelli del 1990;
- Chiusura graduale delle centrali nucleari entro il 2022 (stabilito nel 2011 a seguito del disastro nucleare di Fukushima);
- Aumento della quota di energia rinnovabile nella generazione di elettricità, con target progressivi che puntano a raggiungere almeno l'80 % entro il 2050.

Lo sviluppo del fotovoltaico, in Germania ma non solo, deve molto a questa strategia, che lo ha reso competitivo sul mercato anche grazie a riforme legislative come il Sistema delle Tariffe Incentivanti (*Feed-in-Tariffs*, FiT) e, successivamente, un meccanismo di aste concorrenziali, che stabiliscono un prezzo per ogni nuova installazione. Nel periodo 2017-2018, le aste per il fotovoltaico hanno attirato numerosi partecipanti, portando a offerte molto vantaggiose rispetto al passato e rafforzando l'espansione del settore.

Entro il 2030, le proiezioni del piano di sviluppo della rete tedesca stimano un aumento della capacità fotovoltaica installata, con scenari che prevedono un ulteriore abbassamento dei costi grazie all'incremento della produzione su larga scala e alle economie di scala derivanti. In parallelo, si prevede che la quota di energia elettrica da fonti rinnovabili raggiungerà almeno il 50 % entro il 2030 e l'80 % entro il 2050, sostenuta anche dalla progressiva riduzione dei costi tecnologici e dal potenziamento della rete.

Anche negli Stati Uniti sono stati intrapresi importanti progetti per la promozione del fotovoltaico, come l'iniziativa **Million Solar Roofs**, avviato nel 1997 dall'amministrazione Clinton. Questo progetto mirava all'installazione di un milione di sistemi solari fotovoltaici e termici entro il 2010, con l'obiettivo di accelerare la diffusione dell'energia solare e di stimolare la crescita dell'industria solare domestica. Il programma ha implementato incentivi finanziari e semplificazioni normative per ridurre le barriere economiche all'adozione del fotovoltaico, abbattendo i costi iniziali di installazione per privati e aziende. Inoltre, grazie a collaborazioni pubblico-private, sono stati istituiti programmi di sovvenzione e agevolazioni fiscali, che hanno contribuito a sostenere gli investimenti necessari e a costruire una domanda stabile di mercato. Il *Million Solar Roofs* ha generato un impatto significativo sullo sviluppo del settore fotovoltaico negli Stati Uniti, rafforzando la competitività del solare rispetto alle fonti di energia tradizionali [44]. Questo progetto ha anche ispirato altre iniziative su scala statale, come il *California Solar Initiative*, che ha continuato a promuovere investimenti nel fotovoltaico e a consolidare il percorso verso la *grid parity* in diversi stati. Sebbene non sia stato raggiunto l'obiettivo di un milione di tetti solari entro il 2010, il *Million Solar Roofs* ha creato le basi per una trasformazione sostenibile nel panorama energetico statunitense, evidenziando l'importanza di politiche di incentivo che rendano l'energia solare economicamente accessibile e autonoma sul mercato senza supporti esterni.

Infine, più complesso è il caso della Cina. Nonostante si tratti del paese con i maggiori investimenti nel fotovoltaico (164 miliardi destinati all'energia solare nel 2022 [38]), sebbene possieda le più grandi centrali solari al mondo (come riportato in tabella 3.3), la *grid-parity* è stata raggiunta solo per i prezzi di picco [45]. Ciò significa che l'energia solare è competitiva economicamente principalmente durante le ore di alta domanda, quando i prezzi dell'elettricità sono elevati. Durante le ore di bassa domanda, invece, il carbone rimane la fonte più economica, continuando a dominare il *mix energetico* del paese, come si evince dalla tabella 3.6. Infatti, nonostante il **12° Piano Quinquennale del 2011** abbia posto una forte enfasi sullo sviluppo delle energie rinnovabili, stabilendo obiettivi ambiziosi per l'incremento della capacità solare installata, nel 2022 il 61 % della produzione energetica cinese proveniva ancora dal carbone, mentre solo il 5 % era generato dall'energia solare. Questa situazione evidenzia come le notevoli dimensioni territoriali e demografiche della Cina rendano particolarmente complessa la decarbonizzazione: l'ingente domanda energetica, alimentata da una rapida industrializzazione e urbanizzazione, rende più complicata l'integrazione delle energie rinnovabili su scala sufficiente a sostituire le fonti tradizionali.

Per concludere, si riporta di seguito una tabella che contiene il prezzo per watt delle diverse tecnologie fotovoltaiche attualmente disponibili sul mercato. Questa comparazione evidenzia le differenze di costo tra le varie tecnologie e aiuta a comprendere le dinamiche economiche che influenzano la scelta delle soluzioni più adatte per specifiche applicazioni.

Tecnologia Fotovoltaica	Prezzo per Watt (\$/W)
Silicio Monocristallino	0.20–0.30
Silicio Policristallino	0.18–0.28
Film Sottile (CdTe)	0.24–0.35
Film Sottile (CIGS)	0.25–0.40
Perovskite	0.50–0.70
Silicio Amorfo	0.30–0.45

Tabella 3.5: Prezzo per watt di diverse tecnologie fotovoltaiche nel 2023 [46]. I prezzi fanno riferimento al *LCOE*, spiegato all'inizio di questa sezione (3.2).

I dati mostrano che le tecnologie al silicio, sia monocristallino che policristallino, continuano a dominare il mercato grazie al loro equilibrio tra efficienza e costo. Le tecnologie a film sottile, come CdTe e CIGS, offrono vantaggi in termini di flessibilità e prestazioni in condizioni di luce diffusa, ma presentano costi superiori. Le celle a perovskite, sebbene promettenti per le loro elevate efficienze potenziali e costi di produzione ridotti, sono ancora in fase di sviluppo commerciale e presentano costi più elevati a causa della produzione su scala ridotta.

3.3 Strategie e previsioni per il futuro

Come è stato analizzato nei paragrafi precedenti, l'energia solare ed in particolare quella fotovoltaica hanno già oggi un ruolo significativo nel *mix energetico* mondiale, nonostante solo i paesi più sviluppati abbiano raggiunto una produzione in linea con il loro potenziale fotovoltaico, come si può osservare in figura 3.4.

Riprendendo i dati del 2022 riportati in figura 3.3, essi mostrano la seguente situazione:

	Totale (TWh)	% mondiale	Carb	Gas	Idro	Nucl	Eol	Sol	Petr	Bio
Mondo	28844	100 %	36	23	15	9	7	5	3	2
Cina	8849	31 %	61	3	15	5	9	5	1	2
Stati Uniti	4287	15 %	19	39	6	18	10	5	1	1
India	1858	6 %	74	3	9	2	4	5	0	2
Russia	1167	4 %	16	46	17	19	0	0	1	0
Giappone	1034	4 %	34	35	7	5	1	10	4	4
Brasile	677	2 %	2	6	63	2	12	4	2	8
Canada	660	2 %	5	13	60	13	6	1	0	1
Corea del Sud	620	2 %	34	28	1	28	1	4	1	3
Germania	567	2 %	32	14	3	6	22	11	4	8
Francia	469	2 %	1	10	10	63	8	4	2	2

Tabella 3.6: Produzione annuale di energia elettrica dei primi 10 stati e percentuali per fonte energetica. Sono state utilizzate le seguenti abbreviazioni: Carb=carbone, Gas=gas naturale, Idro=idroelettrico, Nucl=nucleare, Eol=eolico, Sol=solare, Petr=petrolio, Bio=biomassa [47].

Come si può notare dalla tabella 3.6, nel 2022 solo il 5 % del totale dell'energia prodotta nel mondo deriva dal solare, nonostante i numerosi progressi ed investimenti precedentemente discussi. Prevedere l'evoluzione dell'approvvigionamento energetico non è un compito semplice, ma numerosi studi e scenari sono stati proposti, tra cui il **Solar Futures Study**, che risulta di particolare rilievo in quanto proposto da un'istituzione autorevole come il Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti (DOE) nel 2021, e in quanto riguardante uno stato che da solo produce il 15 % dell'energia elettrica mondiale. Inoltre, come si nota dai dati in tabella 3.6, la percentuale di energia solare prodotta negli Stati Uniti è circa il 5 %, lo stesso valore della percentuale nel mondo.

Lo studio citato analizza tre possibili scenari, chiamati rispettivamente Scenario di Riferimento, Scenario di Decarbonizzazione (*Decarb*) e Scenario di Decarbonizzazione con Elettrificazione (*Decarb+E*).

Scenario di Riferimento

Lo Scenario di riferimento si basa su proiezioni di mercato senza vincoli specifici per la decarbonizzazione, assumendo le politiche esistenti fino a giugno 2020 e previsioni moderate sui costi delle tecnologie. In questo contesto, l'energia solare cresce grazie al calo dei costi e alle iniziative statali, aumentando la capacità installata di quasi sette

volte rispetto al 2020. Tuttavia, le emissioni della rete elettrica si riducono solo del 61 % rispetto ai livelli del 2005 entro il 2050, indicando che, senza politiche aggiuntive, non si raggiungerebbero gli obiettivi di decarbonizzazione più ambiziosi. L'energia solare fornisce circa il 27 % della generazione elettrica nel 2050, dimostrando una crescita significativa, ma insufficiente per una completa decarbonizzazione. Questo scenario prevede una crescita del fotovoltaico basata sul calo dei costi e sulle iniziative statali già in atto, e viene considerato il più realistico, in quanto non richiede cambiamenti radicali nelle politiche esistenti.

Scenario di Decarbonizzazione (*Decarb*)

In questo scenario, il sistema è vincolato a ridurre le emissioni della rete del 95 % entro il 2035 e del 100 % entro il 2050 rispetto ai livelli del 2005. Questo richiede progressi tecnologici avanzati e una riduzione dei costi sia per il fotovoltaico che per altre tecnologie rinnovabili e di accumulo energetico. Di conseguenza, la capacità solare installata raggiungerebbe circa 1050 *GW* entro il 2050, contribuendo al 44 % della generazione elettrica. Tale scenario prevede anche un'espansione della capacità di accumulo di energia, con 285 *GW* di capacità installata entro il 2035 per garantire la stabilità della rete. La decarbonizzazione totale resta però un obiettivo difficile sia in termini di infrastrutture che di costi, in quanto alcuni settori sono particolarmente resistenti alla transizione a tecnologie pulite, e sarebbero necessarie nuove tecnologie di accumulo di energia che si adattino al nuovo sistema energetico (ad esempio, nel caso del fotovoltaico batterie di lunga durata e sistemi di stoccaggio per compensare la variabilità solare).

Scenario di Decarbonizzazione con Elettificazione (*Decarb+E*)

Lo Scenario *Decarb+E* espande ulteriormente il ruolo dell'elettricità per decarbonizzare altri settori oltre alla rete elettrica, includendo una massiccia elettificazione dei trasporti, degli edifici e dell'industria. Questo implica un aumento del 30 % della domanda di elettricità tra il 2020 e il 2035 e un ulteriore incremento del 34 % entro il 2050, per far fronte all'elettificazione delle esigenze di riscaldamento, dei veicoli elettrici e dei processi industriali. L'energia solare fornirebbe quasi il 45 % dell'elettricità richiesta in questo scenario, con una capacità installata che raggiungerebbe circa 1570 *GW* nel 2050. Anche in questo caso, sono necessarie politiche ambiziose per sostenere i costi e incentivare lo sviluppo tecnologico, mantenendo i prezzi dell'elettricità a livelli accessibili nonostante l'aumento della domanda. In particolare, le fonti rinnovabili dovrebbero produrre energia da inserire in una *Smart Grid* capace di gestire flussi energetici bidirezionali e di integrare in modo efficiente fonti variabili come il solare. Lo studio citato riporta inoltre alcuni obiettivi intermedi riguardanti l'**energia solare** per raggiungere i due scenari di decarbonizzazione:

- **Fino al 2025**, la capacità di generazione di energia solare dovrebbe aumentare in media di 30 GW_{AC} ⁶ all'anno;

⁶La sigla GW_{AC} rappresenta la capacità netta di un impianto che fornisce energia in corrente alter-

- **Dal 2025 al 2030**, l'installazione annuale dovrebbe raddoppiare a $60 GW_{AC}$, quattro volte il tasso attuale;
- **Entro il 2035**, si prevede un totale di $1000 GW_{AC}$ di capacità solare installata;
- **Entro il 2050**, la capacità solare dovrebbe raggiungere $1600 GW_{AC}$ per sostenere una rete elettrica a zero emissioni di carbonio.

Scenario	Tecnologie di Energia Rinnovabile e Accumulo	Flessibilità della Domanda	Domanda di Energia Elettrica	Politiche
Riferimento	Riduzioni moderate dei costi	Nessuna	Riferimento U.S. Energy Information Administration	Politiche esistenti* a giugno 2020
Decarbonizzazione (<i>Decarb</i>)	Riduzioni avanzate dei costi	Nessuna	Riferimento U.S. Energy Information Administration	Politiche esistenti* + riduzione del 95 % delle emissioni di CO ₂ rispetto ai livelli del 2005 entro il 2035, 100 % entro il 2050
Decarbonizzazione con Elettrificazione (<i>Decarb+E</i>)	Riduzioni avanzate dei costi	Potenziata	Elevata elettrificazione basata su NREL Electrification Futures Study	Politiche esistenti* + riduzione del 95 % delle emissioni di CO ₂ rispetto ai livelli del 2005 entro il 2035, 100 % entro il 2050

Tabella 3.7: Quadro degli scenari per il futuro dell'energia solare secondo il Solar Futures Study.

*Le politiche esistenti considerate includono i mandati statali sulle energie rinnovabili e pulite, i limiti alle emissioni stabiliti a livello statale e regionale, nonché gli incentivi fiscali a livello federale [48].

Nella tabella 3.7 sono riassunte le principali caratteristiche dei tre scenari. Come si può evincere dai dati riportati nelle figure 3.9, 3.10, 3.11, sebbene gli scenari *Decarb* e *Decarb+E* delineino un percorso possibile verso la completa decarbonizzazione, la loro realizzazione è legata a una serie di sfide significative. Richiederebbero cambiamenti strutturali sia nella tecnologia che nelle politiche di sostegno, nonché un impegno finanziario e sociale di lungo periodo. Lo Scenario di Riferimento, invece, appare più realistico e plausibile, poiché non richiede politiche aggressive né una crescita straordinaria delle capacità tecnologiche esistenti.

nata, il formato standard per trasmissione e distribuzione grazie alla possibilità di variare la tensione tramite trasformatori, riducendo le perdite su lunghe distanze. Invece, GW_{DC} indica la capacità generata in corrente continua, come quella prodotta dai pannelli fotovoltaici, prima della conversione tramite *inverter*. La distinzione è necessaria poiché il processo di conversione da *DC* ad *AC* comporta perdite di efficienza, rendendo il valore *AC* più rappresentativo dell'energia effettivamente disponibile per la rete.

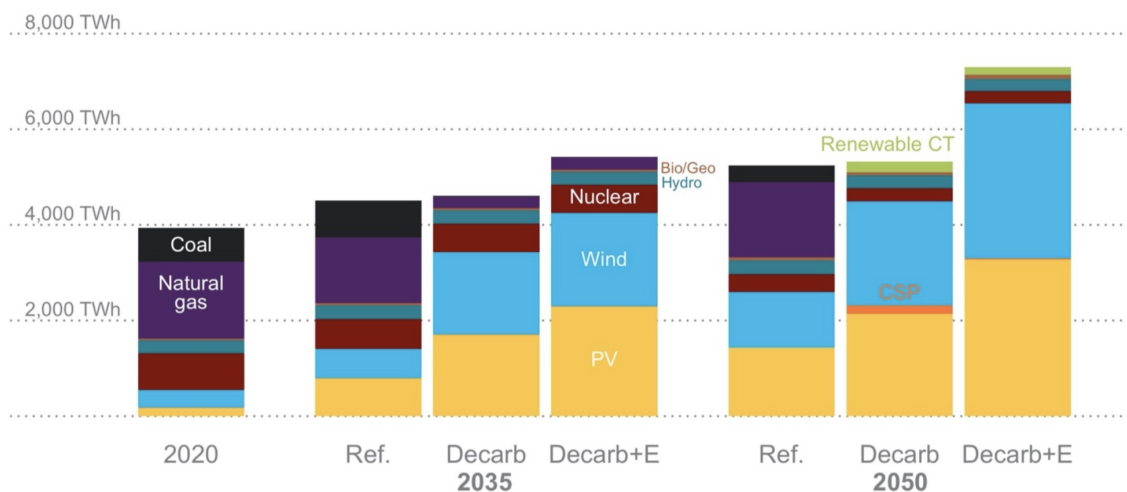


Figura 3.9: **Generazione di energia per tipologie nei tre scenari discussi** in previsioni del 2035 e del 2050, confrontata con i dati reali del 2020 negli Stati Uniti [48].

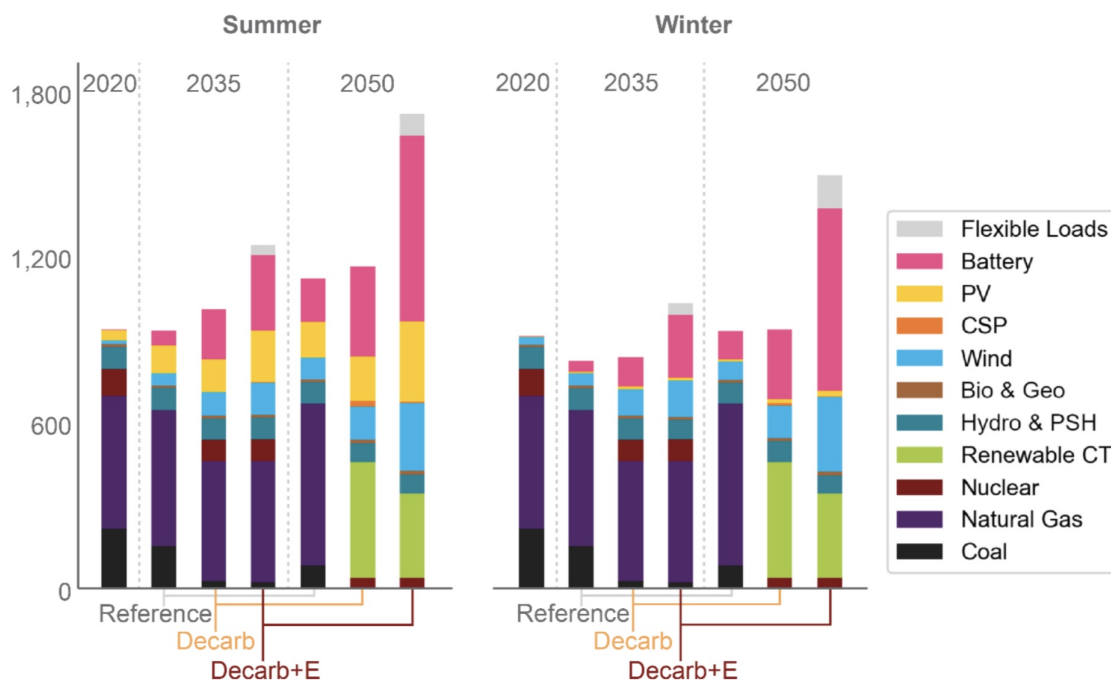


Figura 3.10: **Contributo delle diverse forme di energia alla capacità complessiva nei tre scenari discussi** (previsioni per il 2035 ed il 2050) confrontato con i dati reali del 2020 negli Stati Uniti in estate ed in inverno. Si noti il differente contributo dell'energia fotovoltaica tra estate ed inverno, e la presenza dell'energia accumulata in sistemi come batterie a lunga durata, il cui efficientamento risulta importante tanto quanto la produzione energetica in questi scenari [48].

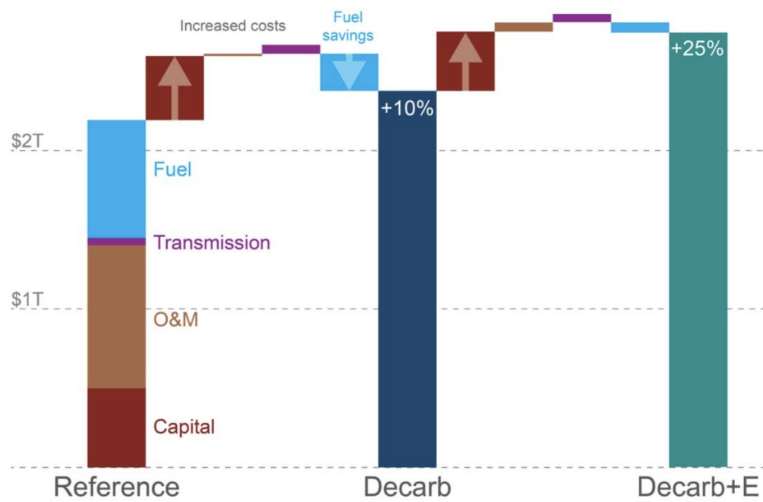


Figura 3.11: **Costi dell'elettricità nei tre scenari discussi** espressi in termini di valore attuale per il trentennio 2020-2050 applicando un *tasso di sconto reale*⁷ del 5% ed includendo diverse componenti: carburante (*Fuel*), trasmissione (*Transmission*), operazioni e manutenzione (*O&M*), e capitale (*Capital*). Nel passaggio dallo Scenario di Riferimento allo Scenario di Decarbonizzazione, si osserva una riduzione dei costi del carburante, grazie alla diminuzione dell'uso di fonti fossili, compensata tuttavia da aumenti nelle spese in capitale e manutenzione delle infrastrutture. Questo comporta un incremento netto del 10% dei costi complessivi. Lo Scenario *Decarb+E*, che prevede una maggiore elettrificazione dei consumi energetici, richiede ulteriori investimenti in infrastrutture di trasmissione e capitale, portando a un aumento complessivo dei costi del 25% rispetto allo Scenario di Riferimento [48].

⁷Il *tasso di sconto reale* (*real discount rate*) è un parametro utilizzato per attualizzare i costi e i benefici futuri di un investimento, riportandoli ad un valore presente. Esso riflette il valore temporale del denaro, tenendo conto dell'inflazione, e consente di confrontare il valore di costi o ricavi futuri con il loro equivalente in termini attuali, facilitando la valutazione della convenienza di un investimento o di un progetto. Un tasso di sconto reale alto riduce maggiormente il valore attuale dei benefici futuri, rendendo gli investimenti con ritorni a lungo termine meno appetibili, mentre un tasso di sconto reale più basso dà maggiore peso ai benefici futuri, favorendo progetti a lungo termine come quelli per le energie rinnovabili, che tendono a generare benefici per molti anni.

Conclusioni

La presente tesi ha affrontato l'analisi delle celle fotovoltaiche, investigandone i principi fisici, le tecnologie esistenti e le prospettive future. Partendo dai fondamenti della radiazione solare e del comportamento dei semiconduttori, è stato possibile descrivere in dettaglio i meccanismi che governano la conversione della luce solare in energia elettrica. Questo studio ha messo in evidenza come le proprietà dei materiali e la struttura delle celle influenzino direttamente parametri quali il *fill factor*, il coefficiente di assorbimento, l'efficienza quantistica e, più in generale, la risposta spettrale, permettendo di confrontare l'efficienza di una cella a giunzione singola con il relativo Limite di Shockley-Queisser, ovvero il limite massimo teorico di conversione, che risulta pari al 33.7%.

Successivamente, sono state analizzate le principali tipologie di celle fotovoltaiche, incluse quelle basate sul silicio, le tecnologie thin-film e le celle multigiunzione, per le quali il Limite di Shockley-Queisser arriva a 86.8%, con un focus particolare sulle celle tandem Silicio-Perovskite.

Il quadro generale è stato completato con un'analisi delle implicazioni economiche ed ambientali dell'energia solare nel contesto attuale e futuro. Attraverso l'analisi dei costi delle diverse tecnologie di fotovoltaico precedentemente discusse e degli investimenti ad esse destinati, è emerso come essi rappresentino i principali *driver* per una diffusione su larga scala, unitamente all'integrazione con le cosiddette *Smart Grids*.

Infine, sono stati analizzati alcuni programmi nazionali, come l'*Energiewende* in Germania, ed una previsione chiamata *Solar Futures Study*, che descrive tre diversi scenari indicando, per ciascuno di essi, l'evoluzione della produzione fotovoltaica dai valori attuali.

Questo lavoro, oltre a fornire una visione sistematica dell'argomento, punta a stimolare riflessioni sull'importanza della ricerca nel settore fotovoltaico. L'innovazione nei materiali e la progettazione di dispositivi più efficienti non solo offrono soluzioni concrete alla crisi climatica, ma tracciano il percorso verso un sistema energetico più avanzato, sostenibile e capace di rispondere alle sfide globali del futuro.

Bibliografia

- [1] Wikipedia Contributors. *Nellis AFB Solar Panels*. Visitato: 2024-11-07. 2023. URL: https://it.m.wikipedia.org/wiki/File:Nellis_AFB_Solar_panels.jpg.
- [2] J. Bisquert. *The Physics of Solar Cells: Perovskites, Organics, and Photovoltaic Fundamentals*. 1a ed. CRC Press, 2018. ISBN: 1138099961, 978-1-138-09996-8, 978-1-138-09997-5.
- [3] Robert L. Jaffe e Washington Taylor. *The Physics of Energy*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2018. ISBN: 978-1107016651.
- [4] LibreTexts Physics. *Blackbody Radiation*. Visitato: 2024-11-01. 2023. URL: [https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/University_Physics_\(OpenStax\)/University_Physics_III_-_Optics_and_Modern_Physics_\(OpenStax\)/06%3A_Photons_and_Matter_Waves/6.02%3A_Blackbody_Radiation](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/University_Physics_(OpenStax)/University_Physics_III_-_Optics_and_Modern_Physics_(OpenStax)/06%3A_Photons_and_Matter_Waves/6.02%3A_Blackbody_Radiation).
- [5] ScienceTech Inc. *Air Mass Diagram*. Immagine utilizzata il 2024-04-27. 2023. URL: <https://sciencetech-inc.com/page/solar-simulator>.
- [6] George C. King. *Physics of Energy Sources*. Figura tratta dal Capitolo 5, pag. 245. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2018. ISBN: 978-1-119-12075-0.
- [7] George C. King. *Physics of Energy Sources*. Figura tratta dal Capitolo 5, pag. 206. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2018. ISBN: 978-1-119-12075-0.
- [8] Sandeep Arya e Prerna Mahajan. *Solar Cells: Types and Applications*. Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2023. ISBN: 978-981-99-7332-3. DOI: 10.1007/978-981-99-7333-0.
- [9] Adrian Kitai. "Principles of Solar Cells, LEDs and Diodes: The Role of the PN Junction". In: (2011). Accessed November 2024. URL: https://www.academia.edu/34222042/Principles_of_Solar_Cells_LEDs_and_Diodes_e_role_of_the_PN_junction_KITAI_KITAI_Principles_of_Solar_Cells_LEDs_and_Diodes_e_role_of_the_PN_junction.
- [10] Wikipedia contributors. *Giunzione p-n*. Immagine tratta dalla sezione "Giunzione p-n" su Wikipedia. 2023. URL: https://it.wikipedia.org/wiki/Giunzione_p-n.

- [11] George C. King. *Physics of Energy Sources*. Figura tratta dal Capitolo 5, pag. 203. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2018. ISBN: 978-1-119-12075-0.
- [12] George C. King. *Physics of Energy Sources*. Figura tratta dal Capitolo 5, pag. 220. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2018. ISBN: 978-1-119-12075-0.
- [13] Gilda Scioli. *Slide del corso di Laboratorio di Elettronica*. Corso di Laurea in Fisica, Università degli Studi di Bologna. 2023.
- [14] Jenny Nelson. *The Physics of Solar Cells*. London, UK: Imperial College Press, 2003. ISBN: 1-86094-340-3.
- [15] Mistralab. *Fotovoltaico*. Visitato: 2024-11-22. 2024. URL: <https://www.mistralab.it/ambiente/ambiente/solare/Fotovoltaico.html>.
- [16] Martin A. Green. *Solar Cells: Operating Principles, Technology, and System Applications*. Include dati sui coefficienti di assorbimento, energie di gap, efficienze tipiche ed EQE di materiali semiconduttori utilizzati nelle celle solari. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice Hall, 1982. ISBN: 978-0138222703.
- [17] George C. King. *Physics of Energy Sources*. Figura tratta dal Capitolo 5, pag. 232. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2018. ISBN: 978-1-119-12075-0.
- [18] Utpal Kumar Das et al. “Forecasting of photovoltaic power generation and model optimization: A review”. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81 (2018), pp. 912–928. DOI: 10.1016/j.rser.2017.08.017.
- [19] George C. King. *Physics of Energy Sources*. Figura tratta dal Capitolo 5, pag. 238. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2018. ISBN: 978-1-119-12075-0.
- [20] David King et al. *Loss processes in a standard solar cell*. Visitato: 2024-11-22. 2012. URL: https://www.researchgate.net/figure/Loss-processes-in-a-standard-solar-cell-1-nonabsorption-of-below-bandgap-photons-2_fig6_228885845.
- [21] Sven Rühle. “Tabulated values of the Shockley–Queisser limit for single junction solar cells”. In: *Solar Energy* 130 (2016), pp. 139–147. DOI: 10.1016/j.solener.2016.02.015.
- [22] SunLink PV. *Monocrystalline Silicon Solar Cells*. <https://sunlinkpv.com/products/monocell.html>. Visitato: 2024-11-08.
- [23] Infobuild Energia. *Moduli fotovoltaici al silicio monocristallino*. <https://www.infobuildenergia.it/prodotti/moduli-fotovoltaici-al-silicio-monocristallino/>. Visitato: 2024-11-08.
- [24] M. Green. “Third Generation Photovoltaics: Solar Cells for 2020 and Beyond”. In: *MRS Bulletin* 32.1 (2007). Accessed November 2024, pp. 26–31. DOI: 10.1557/mrs2007.27. URL: <https://link.springer.com/article/10.1557/mrs2007.27>.

- [25] Nikhil Shrivastav et al. “Design and simulation of three-junction all perovskite tandem solar cells: A path to enhanced photovoltaic performance”. In: *Materials Letters* 362 (2024). Available online 17 February 2024, p. 136169. DOI: 10.1016/j.matlet.2024.136169.
- [26] George C. King. *Physics of Energy Sources*. Figura tratta dal Capitolo 5, pag. 244. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2018. ISBN: 978-1-119-12075-0.
- [27] Silvia D’Innocenzo et al. *Sviluppo di materiali e architetture per celle solari tandem perovskite-silicio*. Rapp. tecn. Rapporto di Ricerca del Sistema Elettrico. ENEA - Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l’energia e lo sviluppo economico sostenibile, 2021. URL: <https://www.ricercasistemmaelettrico.enea.it/archivio-documenti.html?task=download.send&id=100:sviluppo-di-materiali-e-architetture-per-celle-solari-tandem-perovskite-silicio&catid=481>.
- [28] ResearchGate. *Schematic structure of a perovskite-silicon tandem solar cell*. https://www.researchgate.net/figure/A-Schematic-structure-of-a-perovskite-silicon-tandem-solar-cell-A-heterojunction_fig1_337105123. Visitato: 2024-11-08.
- [29] National Renewable Energy Laboratory (NREL). *Best Research-Cell Efficiency Chart*. Visitato: 2024-11-02. 2023. URL: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>.
- [30] Solar Tubs. *Flat Plate Solar Collector Specifications*. Visitato: 2024-11-22. 2024. URL: <https://www.solartubs.com/flat-plate-solar-specs.html>.
- [31] Duda Solar. *Duda Solar 30 Tube Water Heater Collector Evacuated Vacuum Tubes SRCC Certified*. Visitato: 2024-11-22. 2024. URL: <https://www.amazon.com/Duda-Solar-Collector-Evacuated-Certified/dp/B00HP849D4?th=1>.
- [32] International Energy Agency. *Renewable Energy Market Update*. Rapp. tecn. International Energy Agency, 2024. URL: <https://www.iea.org/reports/renewables-2024>.
- [33] International Renewable Energy Agency (IRENA). *Renewable Energy Capacity Statistics 2024*. Visitato: 2024-16-11. 2024. URL: <https://www.irena.org/Publications/2024/Jul/Renewable-energy-statistics-2024>.
- [34] Hannah Ritchie, Pablo Rosado e Max Roser. *Data Page: Installed Solar PV Capacity, part of the publication "Energy"*. *Our World in Data*. Data adapted from IRENA. 2024. URL: <https://ourworldindata.org/grapher/installed-solar-pv-capacity>.
- [35] Wikipedia contributors. *Growth of photovoltaics* — *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Visitato: 2024-11-14. 2024. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Growth_of_photovoltaics.

- [36] Wikipedia contributors. *Major photovoltaic power stations* — *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Includes information on Midong Solar Park, Bhadla Solar Park, Huanghe Hydropower Hainan Solar Park, Pavagada Solar Park, Benban Solar Park, Tengger Desert Solar Park. Visitato: 2024-11-14. 2024. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_photovoltaic_power_stations.
- [37] Wikipedia contributors. *List of largest power stations*. Visitato: 2024-11-22. 2024. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_largest_power_stations.
- [38] BloombergNEF. *A Record \$495 Billion Invested in Renewable Energy in 2022*. Visitato: 2024-11-16. 2023. URL: <https://about.bnef.com/blog/a-record-495-billion-invested-in-renewable-energy-in-2022/>.
- [39] Enerdata. *World Electricity Production Statistics*. Visitato: 2024-11-14. 2024. URL: <https://yearbook.enerdata.net/electricity/world-electricity-production-statistics.html>.
- [40] Hannah Ritchie e Max Roser. *Solar Energy Consumption*. Our World in Data. Accessed November 2024. 2024. URL: <https://ourworldindata.org/grapher/solar-energy-consumption>.
- [41] Enel Group. *Europa e Stati Uniti: immaginare smart cities*. Accessed November 2024. 2014. URL: <https://www.enel.com/it/media/esplora/ricerca-news/notizie/2014/07/europa-stati-uniti-immaginare-smart-cities>.
- [42] Wikipedia contributors. *Price of solar panels as a function of cumulative installed capacity (1975)*. https://en.wikipedia.org/wiki/Growth_of_photovoltaics#/media/File:1975__Price_of_solar_panels_as_a_function_of_cumulative_installed_capacity.svg. 2023.
- [43] International Energy Agency (IEA). *World Energy Investment 2024*. Visitato: 2024-11-09. Paris, 2024. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2024>.
- [44] National Renewable Energy Laboratory. *Laying the Foundation for a Solar America: The Million Solar Roofs Initiative*. Rapp. tecn. Visitato: 2024-11-22. National Renewable Energy Laboratory, 2006. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy07osti/40483.pdf>.
- [45] Wikipedia contributors. *Grid parity* — *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Visitato: 2024-11-16. 2024. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Grid_parity.
- [46] International Renewable Energy Agency (IRENA). *Renewable Power Generation Costs in 2022*. Rapp. tecn. Visitato: 2024-10-14. Abu Dhabi: IRENA, 2023. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Aug/IRENA_Renewable_power_generation_costs_in_2022.pdf.

- [47] Wikipedia contributors. *List of countries by electricity production*. [Visitato: 2024-11-15]. 2024. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_electricity_production.
- [48] U.S. Department of Energy. *Solar Futures Study*. Visitato: 2024-11-15. 2021. URL: <https://www.energy.gov/sites/default/files/2021-09/Solar%20Futures%20Study.pdf>.