



Co-funded by
the European Union

Teaching unit: Il Viaggio Fotovoltaico: Catturare il Sole

DiFC - University of Palermo



BIOS4YOU
AR 2.0

BIO-INSPIRED STEM TOPICS FOR ENGAGING YOUNG GENERATIONS
THANKS TO THE USE OF AUGMENTED REALITY

Project Number: KA220-BW-23-30-126516

"Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them."





Contents

1. <i>Il Viaggio Fotovoltaico: Catturare il Sole</i>	3
Conversione energetica nelle celle solari; dai fotoni agli elettroni; fisica dei sistemi fotovoltaici	3
2. <i>Explore Module</i>	5
Engagement phase	5
Brainstorming in classe	5
Basic Level	6
Fisica della Conversione dell'Energia Solare	6
Dai fotoni agli elettroni: la giunzione P-N	8
Struttura stratificata e raccolta di carica	9
Dalla giunzione al circuito: corrente e tensione	10
Dalla teoria agli oggetti quotidiani	10
Risorse web	11
Advanced Level	11
Flipped Learning:	14
3. <i>Operation Module</i>	14
Basic Level	14
Advanced Level	16
Attività:	17
4. <i>Referenze</i>	20





General topic of the learning path	Il Viaggio Fotovoltaico: Catturare il Sole
Specific name of the learning unit	Conversione energetica nelle celle solari; dai fotoni agli elettroni; fisica dei sistemi fotovoltaici
Age of the target users	17–19 anni
Requirements for the learner	Conoscenze di base di fisica (onde elettromagnetiche, energia, corrente elettrica e tensione), chimica (struttura atomica, elettroni, legami chimici) e concetti introduttivi di elettricità e conversione energetica.
Description of the learning unit	L'unità guida studenti e insegnanti attraverso un percorso interdisciplinare che integra fisica, chimica e tecnologia per comprendere come l'energia solare viene catturata e convertita in energia elettrica attraverso le celle fotovoltaiche. Gli studenti esploreranno il viaggio dei fotoni dalla luce solare alla generazione di corrente elettrica, analizzando la struttura stratificata delle celle solari (giunzione P-N, semiconduttori), l'effetto fotovoltaico e i meccanismi di flusso degli elettroni. L'utilizzo di strumenti digitali e AR è finalizzato a rendere visibili processi altrimenti invisibili (assorbimento dei fotoni, generazione di coppie elettrone-lacuna, campo elettrico nella giunzione, flusso di corrente), collegando in modo chiaro e progressivo i principi fisici con le applicazioni tecnologiche per la generazione di energia sostenibile.





Subject: Parties involved	Fisica (Ottica, Elettromagnetismo), Chimica (Materiali semiconduttori), Tecnologia (Ingegneria fotovoltaica), Sostenibilità (Energie rinnovabili)
Keywords	Energia solare; Cella fotovoltaica; Fotoni; Elettroni; Giunzione P-N; Semiconduttori; Conversione energetica; Corrente elettrica; Energie rinnovabili; AR; Apprendimento basato su scene
Key qualifications, skills and knowledge that can be acquired	• Ragionamento e risoluzione di problemi sui processi di conversione energetica • Design thinking applicato alla visualizzazione sequenziale di fenomeni fisici • Conoscenze pratiche: effetto fotovoltaico, fisica dei semiconduttori, struttura delle celle solari, circuiti elettrici • Competenze digitali/AR: visualizzazione 3D di processi su scala atomica, diagrammi interattivi, navigazione tra scene
Resources and didactic aids used	Piattaforme AR (ad es., Delightex Studio – Spaces, Marker), risorse web affidabili e video educativi sull'energia solare e il fotovoltaico, articoli scientifici e database; diagrammi e modelli 3D (strati delle celle solari, giunzione P-N, flusso di elettroni, sistemi fotovoltaici) e sovrapposizioni testuali per i dati chiave.
Assessment criteria and evaluation	Valutazione delle conoscenze (sequenza fotone-elettrone-corrente), delle abilità (relazioni causa-effetto tra assorbimento di fotoni e generazione di energia elettrica) e delle competenze (uso consapevole degli strumenti AR, integrazione interdisciplinare tra fisica e tecnologia dell'energia sostenibile).



1. Il Viaggio Fotovoltaico: Catturare il Sole

Conversione energetica nelle celle solari; dai fotoni agli elettroni; fisica dei sistemi fotovoltaici

La conversione dell'energia solare nasce dall'intersezione tra fisica quantistica e ingegneria dei materiali. La luce solare, composta da fotoni che trasportano pacchetti discreti di energia, colpisce la superficie di una cella fotovoltaica e interagisce con materiali semiconduttori.

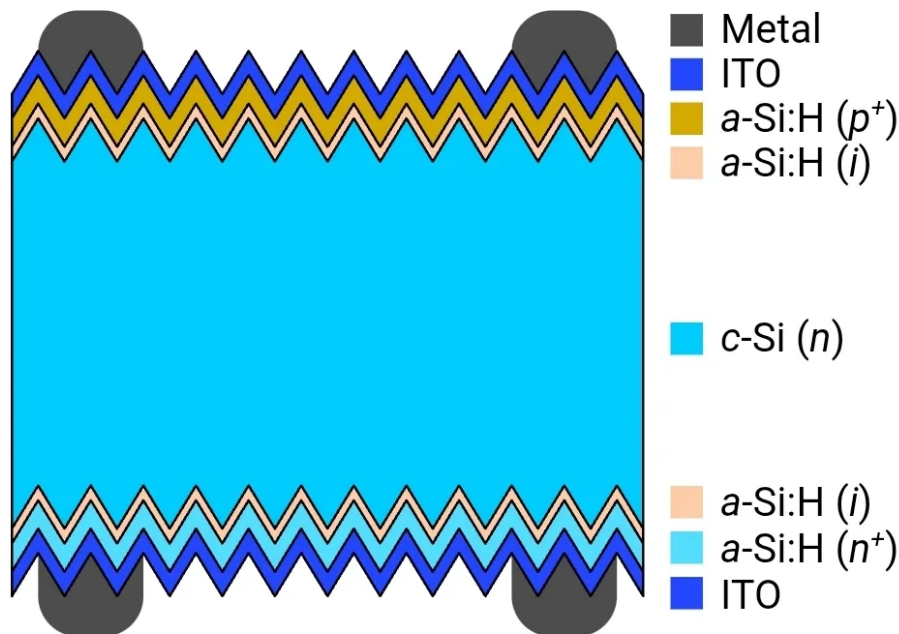


Figura 1. Struttura in sezione trasversale di una cella solare a eterogiunzione di silicio che mostra l'architettura stratificata. Il silicio cristallino di tipo n (c-Si) forma lo strato assorbitore principale, con sottili strati di passivazione in silicio amorfo (a-Si:H) e contatti ITO trasparenti. (Fonte: Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0)

Qui, i fotoni vengono assorbiti, generando coppie elettrone-lacuna che, sotto l'influenza di un campo elettrico interno, si separano e fluiscono attraverso un circuito esterno. Sfruttare l'energia solare non significa raccogliere passivamente calore, ma convertire attivamente la luce in corrente elettrica utilizzabile attraverso strutture su scala atomica progettate con precisione.

L'efficienza della conversione energetica dipende dalle proprietà dei materiali e dall'architettura della cella solare. Il silicio, il semiconduttore più comunemente utilizzato, viene "drogato" con impurità per creare due regioni distinte: uno strato di tipo N (ricco di elettroni) e uno strato di tipo P (ricco di lacune). All'interfaccia tra questi strati la giunzione P-N-si forma naturalmente un campo elettrico. Questo campo è essenziale: fornisce la forza motrice che separa elettroni e lacune fotogenerati, impedendo loro di ricombinarsi e garantendo che i portatori di carica fluiscano in una direzione specifica per produrre corrente.





L'effetto fotovoltaico inizia quando un fotone con energia sufficiente colpisce il materiale semiconduttore. Se l'energia del fotone supera il gap di banda-l'energia minima richiesta per liberare un elettrone dal suo legame atomico-l'elettrone viene promosso dalla banda di valenza alla banda di conduzione, lasciando dietro di sé una "lacuna" carica positivamente. Questa coppia elettrone-lacuna rappresenta l'unità fondamentale della conversione dell'energia solare: energia luminosa trasformata in separazione di carica a livello atomico.

La giunzione P-N agisce come una porta unidirezionale per i portatori di carica. Il campo elettrico intrinseco spinge gli elettroni verso la regione di tipo N e le lacune verso la regione di tipo P. Quando contatti metallici vengono applicati su entrambi i lati e collegati attraverso un circuito esterno, gli elettroni fluiscono dal lato N attraverso il circuito al lato P, generando corrente elettrica. La tensione prodotta da una singola cella di silicio è di circa 0,5–0,6 volt; più celle vengono collegate in serie per ottenere tensioni più elevate adatte ad applicazioni pratiche.

La produzione di energia e l'efficienza sono influenzate da diversi fattori: l'intensità e lo spettro della luce incidente, la qualità dei materiali semiconduttori, la temperatura della cella e il design dei rivestimenti antiriflesso che massimizzano l'assorbimento dei fotoni. Le moderne celle solari al silicio raggiungono efficienze del 15–22%, il che significa che solo una frazione dell'energia solare incidente viene convertita in elettricità. Materiali avanzati come le perovskiti e le celle a multigiunzione spingono le efficienze più in alto, ma i compromessi in termini di costo, stabilità e complessità di produzione rimangono aree di ricerca attive.

Dal punto di vista educativo, è fondamentale chiarire la catena sequenziale degli eventi: (1) i fotoni arrivano e penetrano la superficie della cella; (2) i fotoni con energia adeguata generano coppie elettrone-lacuna nel semiconduttore; (3) il campo elettrico alla giunzione P-N separa questi portatori di carica; (4) gli elettroni fluiscono attraverso un circuito esterno, producendo corrente elettrica; (5) l'energia viene fornita a un carico (lampada, batteria, rete). Presentare questi passaggi in modo ordinato aiuta gli studenti a collegare i fenomeni su scala quantistica con la generazione di energia macroscopica. L'uso mirato di strumenti digitali e di realtà aumentata rende possibile visualizzare processi altrimenti invisibili, come l'assorbimento dei fotoni a livello atomico, la formazione della regione di svuotamento nella giunzione P-N e il flusso direzionale degli elettroni attraverso il circuito. La visualizzazione scena per scena facilita la comprensione delle relazioni tra la fisica microscopica e i sistemi di energia rinnovabile su larga scala.

Riflettiamo insieme

Perché non possiamo estrarre energia elettrica dalla luce solare senza semiconduttori? Come fa la giunzione P-N a trasformare l'assorbimento casuale di fotoni in un flusso direzionale di elettroni? Quale ruolo gioca l'energia del gap di banda nel determinare quali lunghezze d'onda della luce possono essere convertite in elettricità? Queste domande aiutano a collegare i fenomeni osservabili dell'energia solare ai meccanismi quantistici ed elettrici sottostanti.





2. Explore Module

Engagement phase

Domanda principale. *Possiamo estrarre elettricità dalla luce solare senza parti mobili?*

La lezione si apre con una breve dimostrazione: un piccolo pannello solare collegato a un LED o a una calcolatrice. Quando esposto alla luce, il dispositivo funziona; quando coperto, si ferma. Lo scopo non è semplicemente mostrare che "i pannelli solari funzionano", ma introdurre l'idea che l'energia luminosa può essere convertita direttamente in energia elettrica attraverso la fisica dello stato solido-senza turbine, senza combustione, senza movimento meccanico richiesto.

Stimoli iniziali (video e risorse brevi)

Come funzionano i pannelli solari? TED-Ed: una chiara panoramica animata delle celle fotovoltaiche, della giunzione P-N e del flusso di elettroni.

<https://www.youtube.com/watch?v=xKxrkht7CpY>

Solar Energy Basics – U.S. Department of Energy: un'introduzione accessibile alla tecnologia fotovoltaica e ai sistemi di energia rinnovabile.

<https://www.energy.gov/eere/solar/solar-photovoltaic-technology-basics>

Effetto Fotoelettrico: esplorazione interattiva di come i fotoni interagiscono con superfici metalliche per espellere elettroni, dimostrando le proprietà quantistiche della luce.

<https://phet.colorado.edu/en/simulations/photoelectric>

Attività iniziale (5–10 min).

Una rapida dimostrazione o video che mostra una cella solare alimentare un piccolo motore o caricare una batteria invita gli studenti a chiedersi: "Come diventa la luce elettricità senza fili in movimento o reazioni chimiche?" L'obiettivo è evidenziare che la conversione energetica è un processo quantistico che avviene a livello atomico all'interno dei materiali semiconduttori, non una trasformazione meccanica o termica macroscopica.

Video suggerito: *How Solar Panels Work* (SciShow)

https://www.youtube.com/watch?v=L_q6LRgKpTw

Brainstorming in classe

Domanda principale. Senza luce, non c'è corrente fotovoltaica: cosa succede ai fotoni quando entrano nella cella solare e come generano un segnale elettrico che può alimentare dispositivi?

Domande stimolo





Cosa determina se un fotone può generare elettricità in una cella solare?

L'energia del fotone deve superare il gap di banda del semiconduttore; il gap di banda del silicio ($\sim 1,1$ eV) significa che solo i fotoni con lunghezze d'onda inferiori a ~ 1100 nm (luce visibile e infrarosso vicino) possono liberare elettroni e generare corrente.

Perché non possiamo usare tutta la luce solare che colpisce un pannello solare?

Perché i fotoni con energia inferiore al gap di banda passano attraverso senza generare portatori di carica, mentre i fotoni con energia molto più elevata sprecano l'energia in eccesso come calore. Questo è il motivo per cui le celle al silicio a singola giunzione hanno un'efficienza massima teorica di $\sim 33\%$ (limite di Shockley-Queisser).

La cella solare "immagazzina" elettricità come una batteria?

No; la cella solare genera corrente solo quando illuminata. L'effetto fotovoltaico produce separazione e flusso di carica in tempo reale; per immagazzinare energia, è necessaria una batteria esterna o un condensatore.

Perché alcuni pannelli solari funzionano meglio alla luce diretta del sole che all'ombra?

Perché l'intensità luminosa (flusso di fotoni) influenza direttamente il numero di coppie elettrone-lacuna generate. Minore intensità significa meno fotoni, meno portatori di carica e ridotta produzione di corrente. La tensione rimane relativamente stabile, ma la corrente diminuisce significativamente.

Micro-task.

Etichettare gli strati di una cella solare (rivestimento antiriflesso, silicio di tipo N, giunzione P-N, silicio di tipo P, contatto posteriore) utilizzando un foglio di lavoro o un diagramma interattivo.

Risorsa suggerita: **Solar Cell Structure Diagram** - Encyclopædia Britannica

<https://www.britannica.com/technology/solar-cell>

Basic Level

Fisica della Conversione dell'Energia Solare

Luce, assorbimento ed energia dei fotoni

La conversione dell'energia solare inizia quando i fotoni dalla luce solare colpiscono la superficie di una cella fotovoltaica. La luce solare è una miscela di onde elettromagnetiche che spaziano dalle lunghezze d'onda ultraviolette, visibili e infrarosse. Ogni fotone trasporta un pacchetto discreto di energia determinato dalla sua lunghezza d'onda: lunghezze d'onda più corte (luce blu) trasportano più energia rispetto a lunghezze d'onda più lunghe (luce rossa).



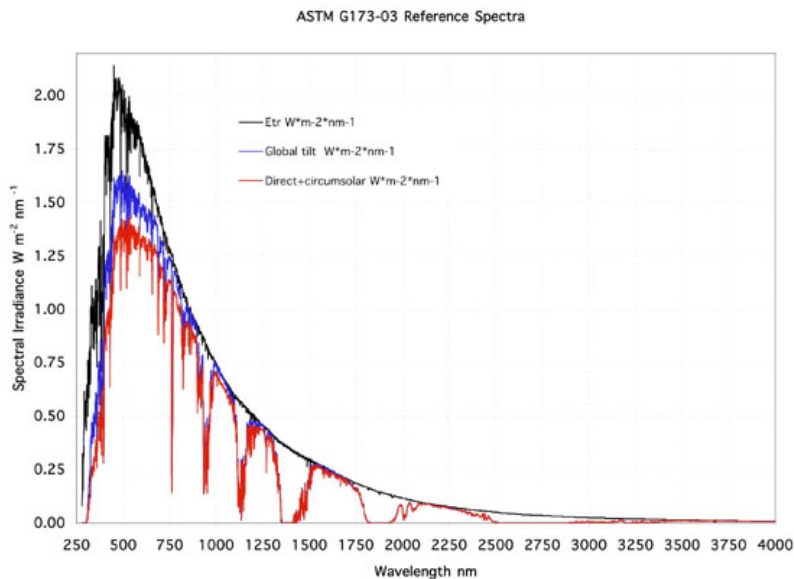


Figura 2. Irradianza spettrale solare (spettri di riferimento ASTM G173-03) che mostra la distribuzione dell'energia dei fotoni attraverso le lunghezze d'onda. Le celle solari al silicio con un gap di banda di $\sim 1,1$ eV (corrispondente a una lunghezza d'onda di ~ 1100 nm) possono convertire solo i fotoni visibili e dell'infrarosso vicino. (Fonte: NREL)

Quando un fotone entra in un materiale semiconduttore come il silicio, può essere assorbito, riflesso o trasmesso.

L'assorbimento è fondamentale: se l'energia del fotone eguaglia o supera l'energia del gap di banda del materiale (l'energia minima richiesta per liberare un elettrone dal suo legame atomico), l'elettrone viene promosso dalla banda di valenza alla banda di conduzione.

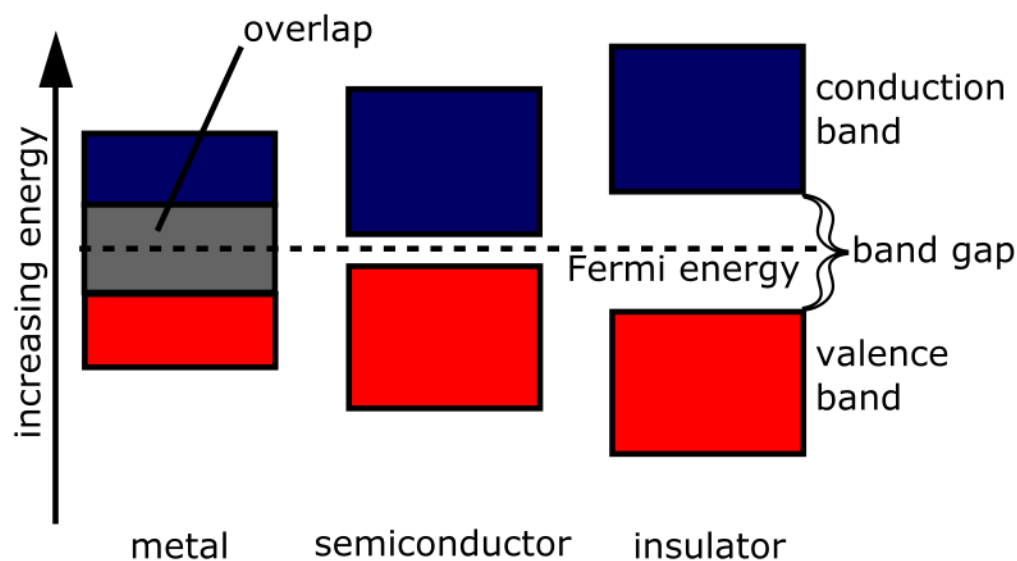


Figura 3. Confronto delle strutture delle bande energetiche in metalli, semiconduttori e isolanti. Nei semiconduttori come il silicio, il gap di banda ($E_g \approx 1,1$ eV) è abbastanza piccolo da permettere ai fotoni di eccitare gli elettroni dalla





banda di valenza (rosso) alla banda di conduzione (blu), consentendo la conversione energetica fotovoltaica. (Fonte: Wikimedia Commons, Pubblico Dominio)

Questo crea una coppia elettrone-lacuna-una carica negativa mobile (elettrone) e una corrispondente vacanza positiva (lacuna).

Cosa determina se un fotone viene assorbito o passa attraverso?

La relazione tra l'energia del fotone e il gap di banda del semiconduttore. Il gap di banda del silicio è $\sim 1,1$ eV, corrispondente alla luce infrarossa a ~ 1100 nm. I fotoni con meno energia passano attraverso; i fotoni con molta più energia generano calore dopo aver liberato elettroni.

Dai fotoni agli elettroni: la giunzione P-N

Il fotone assorbito crea una coppia elettrone-lacuna, ma senza un campo elettrico interno, queste cariche si ricombinerebbero rapidamente, rilasciando energia come calore anziché elettricità. Qui è dove la giunzione P-N diventa essenziale.

Il silicio viene "potenziato/miscelato" con impurità per creare due regioni distinte:

- **Silicio di tipo N:** con fosforo (elettroni extra $\rightarrow$ portatori di carica negativi)
- **Silicio di tipo P:** con boro (deficit di elettroni $\rightarrow$ "lacune" positive)

Al confine tra le regioni di tipo N e di tipo P, si forma naturalmente una zona di svuotamento. Gli elettroni dal lato N diffondono attraverso per riempire le lacune sul lato P, lasciando dietro atomi caricati positivamente sul lato N e atomi caricati negativamente sul lato P. Questa separazione di carica crea un campo elettrico intrinseco che punta da N a P.

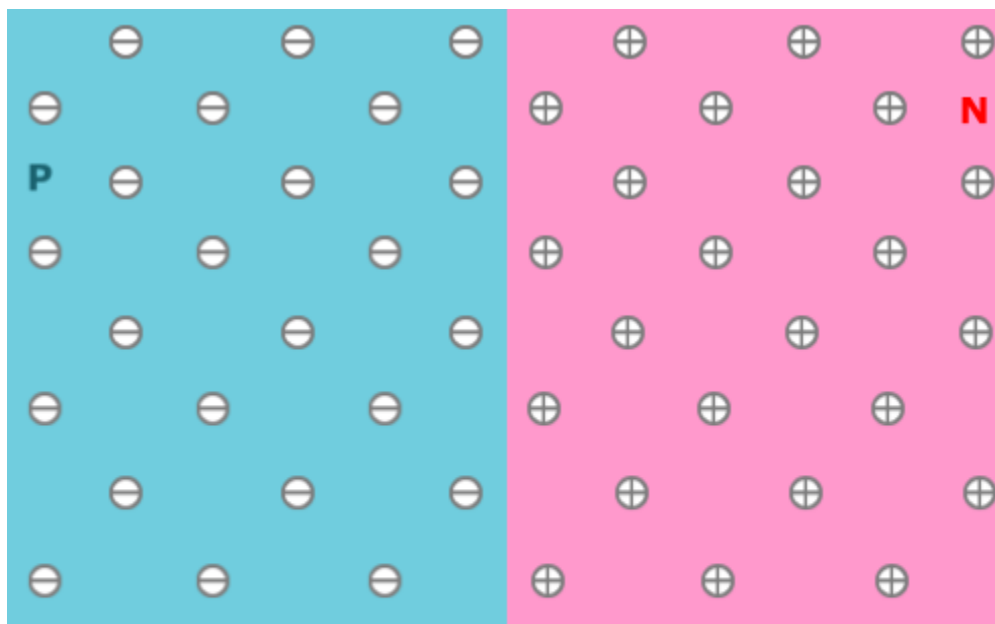


Figura 4. Rappresentazione schematica di una giunzione P-N prima dell'equilibrio. La regione di tipo P (sinistra, ciano) contiene lacune in eccesso (portatori di carica positivi), mentre la regione di tipo N (destra, rosa) contiene elettroni in eccesso (portatori di carica negativi). Quando le due regioni vengono messe a contatto, i portatori di carica diffondono attraverso la giunzione. (Fonte: PVEducation.org, uso educativo)

Quando un fotone genera una coppia elettrone-lacuna vicino alla giunzione, il campo elettrico spinge l'elettrone verso il lato N e la lacuna verso il lato P. Questa separazione previene la ricombinazione e spinge i portatori di carica in direzioni opposte, creando una differenza di tensione tra i due lati della cella.

Perché le coppie elettrone-lacuna si separano invece di ricombinarsi immediatamente?

Perché il campo elettrico alla giunzione P-N fornisce una forza motrice più forte del moto termico casuale, dirigendo elettroni e lacune lontano l'uno dall'altro prima che possano ricombinarsi.

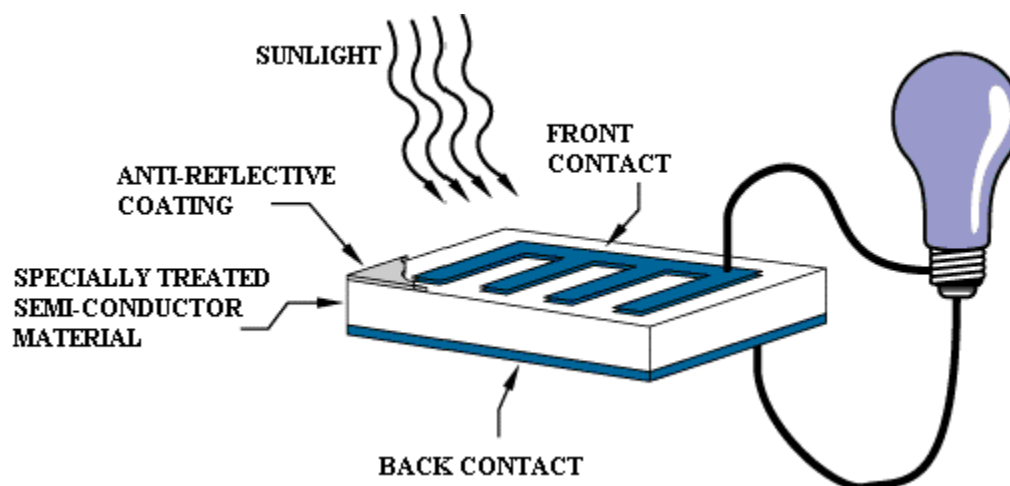


Figura 5. Funzionamento completo della cella solare che mostra la conversione della luce solare in corrente elettrica. I fotoni colpiscono il materiale semiconduttore attraverso il rivestimento antiriflesso, generando coppie elettrone-lacuna che vengono separate dal campo elettrico interno. Gli elettroni fluiscono attraverso il circuito esterno (rappresentato dalla lampadina) prima di tornare a ricombinarsi, creando energia elettrica utilizzabile. (Fonte: Wikimedia Commons, Pubblico Dominio)

Struttura stratificata e raccolta di carica

Una tipica cella solare al silicio ha più strati ottimizzati per l'assorbimento della luce e la raccolta di carica:

- **Rivestimento antiriflesso (superiore):** riduce la riflessione, massimizzando l'ingresso dei fotoni
- **Silicio di tipo N (strato sottile):** regione ricca di elettroni dove vengono raccolti gli elettroni
- **Giunzione P-N (interfaccia):** dove il campo elettrico separa i portatori di carica
- **Silicio di tipo P (base più spessa):** dove vengono raccolte le lacune
- **Contatti metallici (superiore e inferiore):** conducono gli elettroni verso un circuito esterno





Il contatto anteriore è progettato come un modello a griglia per ridurre al minimo l'ombreggiamento mentre raccoglie la corrente. Il contatto posteriore copre l'intera superficie posteriore per la massima conduttività.

Perché lo strato N è più sottile dello strato P?

Perché la maggior parte dei fotoni viene assorbita vicino alla superficie; uno strato N sottile garantisce che i portatori fotogenerati siano vicini al campo elettrico della giunzione per una separazione efficiente, mentre lo strato P più spesso assorbe i fotoni a lunghezza d'onda più lunga più in profondità nel materiale.

Dalla giunzione al circuito: corrente e tensione

Quando la luce solare illumina la cella, l'assorbimento continuo di fotoni genera un flusso costante di coppie elettrone-lacuna. Il campo elettrico della giunzione separa continuamente queste cariche, spingendo gli elettroni verso il lato N e le lacune verso il lato P.

Quando i contatti metallici vengono applicati e collegati attraverso un circuito esterno, gli elettroni fluiscono dal lato N, attraverso il circuito (alimentando un carico), e tornano al lato P per ricombinarsi con le lacune. Questo flusso costituisce la corrente fotovoltaica.

La tensione prodotta da una singola cella di silicio è di circa 0,5–0,6 volt, determinata dall'energia del gap di banda e dalle caratteristiche della giunzione. La corrente dipende dall'intensità luminosa e dall'area della cella: più fotoni → più coppie elettrone-lacuna → corrente più alta.

Se una singola cella produce solo ~0,5V, come fanno i pannelli solari a generare tensioni utili?

Più celle vengono collegate in serie (terminale positivo di una al terminale negativo della successiva) per sommare le tensioni. Un pannello tipico contiene 60–72 celle in serie, producendo 30–40 volt in condizioni standard.

Dalla teoria agli oggetti quotidiani

Gli stessi principi operanti nelle celle solari si trovano in:

- **Calcolatrici solari:** piccole celle che forniscono milliwatt di potenza per dispositivi a basso consumo energetico
- **Pannelli solari sui tetti:** array di celle collegate in serie che generano kilowatt per le abitazioni
- **Parchi solari:** installazioni su larga scala che producono megawatt per la rete elettrica
- **Satelliti spaziali:** celle a multigiunzione ad alta efficienza che alimentano veicoli spaziali dove l'affidabilità è critica

Portare la fisica quantistica fuori dall'astratto aiuta gli studenti a comprendere non solo come funzionano i fotovoltaici, ma perché le scelte progettuali (selezione del gap di banda, rivestimenti antiriflesso, spessore della cella) influenzano direttamente le prestazioni energetiche nel mondo reale.





Riflettiamo insieme

Convertire la luce solare in elettricità richiede un controllo preciso a livello atomico. Se la giunzione P-N è essenziale per la separazione di carica, perché non possiamo usare qualsiasi semiconduttore? Quale ruolo gioca il drogaggio nella creazione del campo elettrico interno? Come influenzano la temperatura, l'ombreggiamento e la qualità del materiale l'efficienza della conversione energetica?

Risorse web

Come funzionano i pannelli solari? – TED-Ed

<https://www.youtube.com/watch?v=xKxrkt7CpY>

Spiegazione animata delle celle fotovoltaiche e del flusso di elettroni.

Solar Photovoltaic Technology Basics – U.S. Department of Energy

<https://www.energy.gov/eere/solar/solar-photovoltaic-technology-basics>

Panoramica della tecnologia FV e della conversione dell'energia solare.

PhET – Effetto fotoelettrico

<https://phet.colorado.edu/en/simulations/photoelectric>

Esplorazione interattiva dell'energia dei fotoni e dell'eiezione di elettroni

Advanced Level

Meccanica quantistica della conversione fotovoltaica

L'effetto fotovoltaico è fondamentalmente un fenomeno quantistico. Quando un fotone viene assorbito da un atomo di silicio, la sua energia deve superare l'energia del gap di banda ($E_g \approx 1,1$ eV per il silicio cristallino) per promuovere un elettrone dalla banda di valenza alla banda di conduzione. Questo processo crea una coppia elettrone-lacuna con una probabilità determinata dal coefficiente di assorbimento del materiale e dall'energia del fotone.

Le perdite energetiche si verificano in più fasi:

- I fotoni con $E < E_g$ passano attraverso senza generare portatori di carica (perdite per trasmissione)
- I fotoni con $E \gg E_g$ generano portatori "caldi" che perdono rapidamente l'energia in eccesso come calore attraverso la termalizzazione
- Riflessione superficiale (senza rivestimento antiriflesso, ~30% della luce incidente viene persa)
- Ricombinazione (le coppie elettrone-lacuna si ricombinano prima di raggiungere i contatti, rilasciando energia come calore o luce)

Il limite di Shockley-Queisser stabilisce l'efficienza massima teorica per una cella solare a singola giunzione a ~33% sotto lo spettro solare standard (AM1.5G). Le celle al silicio reali raggiungono il 15–22%





a causa di perdite aggiuntive dovute a resistenza, materiali imperfetti e proprietà non ideali della giunzione.

Efficienza, risposta spettrale e ottimizzazione del materiale

L'efficienza della cella solare dipende criticamente da quanto bene il gap di banda del semiconduttore corrisponde allo spettro solare. Il gap di banda di 1,1 eV del silicio è un compromesso: cattura efficacemente la luce visibile e dell'infrarosso vicino ma non può utilizzare i fotoni infrarossi a bassa energia o sfruttare completamente i fotoni ultravioletti ad alta energia.

Strategie avanzate per superare il limite di Shockley-Queisser:

- **Celle a multigiunzione (tandem):** impilare semiconduttori con diversi gap di banda (es. GaInP/GaAs/Ge) in modo che ogni strato assorba una porzione specifica dello spettro. Le efficienze di laboratorio superano il 47% sotto luce solare concentrata.
- **Celle a perovskite:** materiali ibridi organici-inorganici con gap di banda sintonizzabili, trasporto rapido di carica e fabbricazione processabile in soluzione. Le efficienze attuali si avvicinano al 26%, ma stabilità e scalabilità rimangono sfide.
- **Celle a portatori caldi (sperimentali):** raccogliere energia dai portatori caldi prima della termalizzazione, potenzialmente superando il 66% di efficienza. Richiede meccanismi di estrazione di carica ultraveloci non ancora commercialmente praticabili.

Perché i fotoni ad alta energia riducono l'efficienza complessiva? Perché l'energia in eccesso sopra il gap di banda viene rapidamente persa come calore attraverso l'emissione di fononi (termalizzazione) entro picosecondi. Un fotone da 3 eV (UV) genera la stessa singola coppia elettrone-lacuna di un fotone da 1,2 eV (rosso), sprecando 1,9 eV come calore.

Perché non possiamo semplicemente usare un gap di banda molto piccolo per catturare tutti i fotoni?

Perché gap di banda più piccoli producono tensioni più basse ($V \propto E_g$), e la generazione termica di portatori aumenta, aumentando la "corrente oscura" che riduce l'efficienza netta. C'è un gap di banda ottimale (~1,1–1,4 eV) che bilancia l'assorbimento dei fotoni e la produzione di tensione.

Trasporto di carica, ricombinazione e fisica dei dispositivi

Dopo la generazione alla giunzione, i portatori di carica devono viaggiare ai contatti senza ricombinarsi. I meccanismi di ricombinazione limitano l'efficienza:

- **Ricombinazione radiativa:** le coppie elettrone-lacuna si ricombinano, emettendo fotoni (significativa nei materiali a gap diretto come GaAs, minima nel silicio)
- **Ricombinazione Auger:** interazione a tre particelle dove l'energia viene trasferita a un terzo portatore invece di essere emessa come luce (aumenta ad alte densità di portatori)
- **Ricombinazione Shockley-Read-Hall (SRH):** difetti e impurità nel reticolo cristallino intrappolano i portatori, facilitando la ricombinazione (domina nel silicio di qualità inferiore)





Il silicio cristallino di alta qualità minimizza la ricombinazione SRH attraverso una produzione controllata. Gli strati di passivazione (es. nitrato di silicio, ossido di alluminio) sulle superfici riducono la ricombinazione all'interfaccia. I profili di drogaggio sono ottimizzati in modo che il campo elettrico si estenda attraverso la regione attiva, garantendo una rapida separazione dei portatori.

Perché la temperatura riduce l'efficienza della cella solare? Perché temperature più elevate aumentano le vibrazioni reticolari (fononi), che disperdono i portatori di carica, riducono la mobilità e aumentano i tassi di ricombinazione. Inoltre, il gap di banda diminuisce leggermente con la temperatura ($\sim -0,3$ meV/K per il silicio), riducendo la produzione di tensione. Perdita di efficienza tipica: $\sim 0,4\%$ per $^{\circ}\text{C}$ sopra i 25°C .

Integrazione del sistema e prestazioni nel mondo reale

Un sistema fotovoltaico include non solo celle solari, ma:

- **Inverter:** convertono l'uscita DC in AC per la compatibilità con la rete
- **Inseguimento del Punto di Massima Potenza (MPPT):** regola continuamente il carico per estrarre la massima potenza al variare delle condizioni di luce
- **Accumulo di energia (opzionale):** le batterie immagazzinano la generazione in eccesso per i periodi notturni o nuvolosi
- **Connessione alla rete:** immettono l'energia in eccesso nella rete elettrica, spesso con politiche di misurazione netta

Il fattore di capacità (produzione energetica effettiva / massimo teorico) per le installazioni solari è tipicamente del 15–25%, vincolato da:

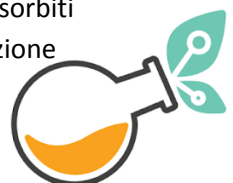
- Cicli giorno/notte
- Variabilità meteorologica
- Cambiamenti stagionali nell'angolo del sole
- Perdite di sistema (resistenza dei cavi, inefficienza dell'inverter, ombreggiamento)

Perché i pannelli solari si degradano nel tempo? L'esposizione ai raggi UV, l'ingresso di umidità, i cicli termici e il degrado indotto dal potenziale (PID) riducono gradualmente l'efficienza. I moduli di alta qualità perdono $\sim 0,5\%$ di efficienza all'anno; le garanzie garantiscono tipicamente l'80% della produzione dopo 25 anni.

Riflettiamo insieme

Perché le celle solari moderne operano ancora molto al di sotto del limite di Shockley-Queisser? Perché i materiali del mondo reale hanno difetti, le superfici introducono ricombinazione e l'estrazione di carica non è perfettamente efficiente. Colmare il divario tra prestazioni teoriche e pratiche guida la ricerca continua nella scienza dei materiali e nell'ingegneria dei dispositivi.

Perché non possiamo raggiungere il 100% di efficienza anche con materiali perfetti? Perché si applicano vincoli termodinamici e di meccanica quantistica fondamentali: non tutti i fotoni possono essere assorbiti (disadattamento spettrale), la termalizzazione spreca i fotoni ad alta energia e mantenere la produzione





di tensione richiede una certa dissipazione di energia. La seconda legge della termodinamica limita in definitiva l'efficienza di conversione.

Flipped Learning:

Obiettivo. Prepararsi alla discussione in classe comprendendo la sequenza fotone → assorbimento → separazione di carica → flusso di corrente e le connessioni fisiche/ingegneristiche nei sistemi fotovoltaici.

1. **Breve lettura sulla struttura di una cella solare al silicio e sul percorso dei fotoni.** Evidenziare: rivestimento antiriflesso, strato di tipo N, giunzione P-N, strato di tipo P, contatti metallici.
2. **Foglio di lavoro "Silicio di tipo N vs tipo P":** completare una tabella con:
 - o Elemento drogante (fosforo/boro)
 - o Portatore di carica maggioritario (elettroni/lacune)
 - o Ruolo nella separazione di carica
 - o Posizione nella struttura della cella (superiore/inferiore)
3. **Simulazione PhET Semiconduttori:** creare due screenshot: a. Silicio intrinseco (non drogato): osservare le bande energetiche e la mancanza di portatori liberi b. Silicio drogato (giunzione N+P): osservare la curvatura delle bande, il campo elettrico intrinseco e la separazione di carica sotto illuminazione
4. **Breve sintesi (max 120 parole):** spiegare con parole proprie come la cella solare non "raccolge" la luce solare come un pannello termico ma converte l'energia dei fotoni in cariche elettriche separate attraverso l'assorbimento quantistico e la fisica della giunzione.
5. **Tre domande di debriefing:**
 - o Una sulla fisica quantistica: Perché l'energia del fotone deve superare il gap di banda?
 - o Una sulla scienza dei materiali: Come crea il drogaggio un campo elettrico?
 - o Una sull'ingegneria dei sistemi: Perché i pannelli solari producono DC ma le case usano AC?

Consegna

Caricare il PDF o le slide sul canale della classe prima della lezione.

3. Operation Module

Basic Level

La comprensione del processo di conversione fotovoltaica può essere approfondita attraverso una serie di attività pratiche che consentono agli studenti di osservare sia i fenomeni quantistici che elettrici coinvolti nella cattura dell'energia solare. L'obiettivo di questa sezione è applicare, in modo guidato, i concetti di assorbimento dei fotoni, separazione di carica e generazione di corrente studiati nella parte teorica, collegando la fisica dei semiconduttori con i sistemi energetici reali.





Quando la luce colpisce un materiale semiconduttore, i fotoni con energia sufficiente eccitano gli elettroni da stati legati a portatori di carica mobili-un fenomeno quantistico invisibile all'osservazione diretta ma misurabile attraverso strumenti elettrici. Gli studenti possono osservare questo comportamento utilizzando un semplice esperimento: collegare una piccola cella solare a un multimetro ed esporla a diverse sorgenti luminose (luce solare, lampada LED, torcia). All'aumentare dell'intensità luminosa, la corrente aumenta proporzionalmente, mentre la tensione rimane relativamente stabile. Questa misurazione diretta illustra come il flusso di fotoni si traduce in produzione elettrica. Attraverso la simulazione, gli studenti possono osservare i diagrammi delle bande energetiche, applicare il drogaggio per creare regioni di tipo N e di tipo P e visualizzare come la giunzione P-N genera un campo elettrico intrinseco. Quando viene introdotta la luce, gli studenti vedono le coppie elettrone-lacuna generate e separate dal campo della giunzione, producendo flusso di corrente. Questa attività aiuta gli studenti a comprendere come il drogaggio e la fisica della giunzione consentano il trasporto direzionale di carica-il fondamento del funzionamento fotovoltaico.

Da queste osservazioni sorgono domande essenziali: Qual è la relazione tra l'energia del fotone e l'eccitazione dell'elettrone? Perché il drogaggio crea un campo elettrico interno senza tensione esterna? Confrontare il semiconduttore simulato con la struttura reale della cella solare chiarisce come l'ingegneria dei materiali su scala atomica determini le prestazioni elettriche macroscopiche.

L'attenzione si sposta quindi sull'architettura stratificata delle celle solari. Gli studenti analizzano la disposizione degli strati funzionali-rivestimento antiriflesso, emettitore di tipo N, giunzione P-N, base di tipo P, contatti metallici-e i loro ruoli complementari:

- Il rivestimento antiriflesso massimizza l'ingresso dei fotoni riducendo la riflessione superficiale
- Lo strato N sottile cattura gli elettroni generati vicino alla superficie
- La giunzione P-N crea il campo elettrico che separa i portatori di carica
- Lo strato P spesso assorbe i fotoni a lunghezza d'onda più lunga più in profondità nel materiale
- I contatti metallici raccolgono e conducono la corrente ai circuiti esterni

La discussione in classe continua analizzando il comportamento della cella in condizioni di luce variabili.

Perché la produzione di corrente cambia drasticamente con l'ombreggiamento mentre la tensione rimane relativamente stabile? La risposta risiede nella proporzionalità diretta tra flusso di fotoni e generazione di portatori di carica. Questa riflessione collettiva aiuta gli studenti a comprendere come la progettazione del sistema solare debba tenere conto dell'ombreggiamento parziale, dell'orientamento e delle variazioni nell'ora del giorno.

Gli studenti sono quindi invitati a confrontare le celle solari con dispositivi energetici quotidiani:

- **Calcolatrici solari:** applicazioni a bassa potenza dove piccole celle forniscono energia sufficiente
- **Pannelli sui tetti:** celle collegate in serie che generano energia su scala domestica
- **Parchi solari su scala di rete:** installazioni da megawatt con inverter, trasformatori e sistemi di accumulo
- **Satelliti spaziali:** celle a multigiunzione ad alta efficienza dove affidabilità e peso sono critici





Attraverso questa analogia, il fotovoltaico viene reinterpretato come una catena di conversione energetica dal quantistico alla rete che collega la fisica atomica, l'ingegneria dei materiali e i sistemi elettrici.

Riflettiamo insieme. La conversione dell'energia solare è un processo complesso che combina meccanica quantistica, fisica dello stato solido e ingegneria elettrica. Come limita il gap di banda del semiconduttore le lunghezze d'onda che possono essere convertite in elettricità? Quali strategie ingegneristiche massimizzano l'assorbimento dei fotoni e minimizzano la ricombinazione di carica? Come influenzano i vincoli del mondo reale-costi, durabilità, scalabilità-le scelte di progettazione delle celle solari?

Advanced Level

Il livello avanzato approfondisce la connessione tra l'assorbimento dei fotoni e il flusso di corrente elettrica attraverso circuiti esterni. Gli studenti osservano come l'energia luminosa viene convertita in cariche separate all'interno della giunzione P-N e come questi portatori di carica si propagano attraverso il semiconduttore e i contatti metallici per fornire energia.

Per comprendere la sequenza degli eventi, viene introdotto il concetto di curvatura delle bande alla giunzione P-N: quando le regioni di tipo N e di tipo P entrano in contatto, gli elettroni diffondono da N a P e le lacune diffondono da P a N fino a raggiungere un equilibrio. Questo crea una regione di svuotamento priva di portatori mobili, con cariche positive fisse sul lato N e cariche negative fisse sul lato P. Il campo elettrico risultante ($\sim 10^5$ V/cm) è abbastanza forte da separare le coppie elettrone-lacuna fotogenerate prima che si ricombinino.

La propagazione dei portatori di carica e la generazione di corrente elettrica viene illustrata attraverso una simulazione in Realtà Aumentata sviluppata con Delightex Studio – Spaces (Marker):

<https://edu.delightex.com/Studio/Spaces>

Utilizzando dispositivi mobili, gli studenti esplorano un modello tridimensionale di una cella solare:

1. Osservano i fotoni che colpiscono la superficie e penetrano il semiconduttore
2. Visualizzano la generazione di coppie elettrone-lacuna quando l'energia del fotone supera il gap di banda
3. Seguono gli elettroni spinti verso lo strato N e le lacune verso lo strato P dal campo della giunzione
4. Vedono gli elettroni fluire attraverso il circuito esterno (filo, carico, percorso di ritorno)
5. Tracciano il circuito completo di corrente dalla generazione al carico e ritorno

Durante l'attività, vengono proposte domande guida:

– **In quale punto della cella la luce diventa cariche elettriche separate?** Alla giunzione P-N, dove il campo elettrico intrinseco separa elettroni e lacune fotogenerati prima che si ricombinino.





– **Perché la corrente fluisce attraverso il circuito esterno quando la cella è illuminata?** Perché la giunzione genera continuamente una differenza di tensione (fototensione) tra il lato N e il lato P, spingendo gli elettroni attraverso il circuito per minimizzare la differenza di potenziale.

– **Come produce energia la cella solare senza consumare carburante o parti mobili?** Convertendo direttamente l'energia dei fotoni in separazione di carica attraverso l'assorbimento quantistico, quindi estraendo quelle cariche separate come corrente attraverso contatti metallici-una conversione energetica allo stato solido senza trasformazioni meccaniche o chimiche.

Le risposte emergono attraverso la discussione di gruppo e il confronto tra la generazione di portatori su scala quantistica e le misurazioni elettriche macroscopiche.

La lezione si conclude con una riflessione sull'evoluzione della tecnologia fotovoltaica. Gli studenti confrontano le celle al silicio cristallino di prima generazione con le tecnologie emergenti:

Tecnologia	Efficienza	Vantaggi	Sfide
Silicio Cristallino	15–22%	Maturo, stabile, scalabile	Ad alta intensità di risorse, rigido
Film Sottile (CdTe, CIGS)	10–15%	Flessibile, leggero	Efficienza inferiore, materiali tossici
Perovskite	20–26% (lab)	Alta efficienza, lavorazione a basso costo	Stabilità, degradazione, contenuto di piombo
Multigiunzione (GaAs)	30–47%	Efficienza ultra-elevata	Costoso, usato nello spazio/concentratori

Riflettiamo insieme. Le moderne tecnologie solari si avvicinano davvero ai limiti fisici fondamentali, o c'è spazio per innovazioni nella scienza dei materiali e nell'architettura dei dispositivi? Possiamo progettare celle che convertono tutte le lunghezze d'onda solari in modo efficiente, o il disadattamento spettrale vincola sempre i sistemi a singola giunzione? Come influenzano i fattori economici e ambientali (energia di produzione, materiali rari, riciclaggio) quali tecnologie si espandono globalmente?

Attività:

Le attività conclusive mirano a consolidare l'apprendimento e incoraggiare la collaborazione tra pari.

Attività 1: Mappa Concettuale

Gli studenti creano una mappa concettuale che rappresenta la sequenza completa della conversione fotovoltaica, dal fotone all'energia elettrica, indicando per ogni fase:

- Il fenomeno fisico (assorbimento, eccitazione, separazione, flusso)
- Il materiale/struttura coinvolto (semiconduttore, giunzione P-N, contatti, circuito)
- Il tipo di energia (fotone → cinetica → potenziale → elettrica)





Attività 2: Esperienza in Realtà Aumentata

Gli studenti sperimentano un viaggio completo in Realtà Aumentata attraverso il processo di conversione fotovoltaica utilizzando Delightex Studio – Spaces (Marker). L'esercizio AR guida gli studenti attraverso 5 scene sequenziali che visualizzano ogni fase della conversione dell'energia solare:

Scena 1: Introduzione con sole animato e pulsante START

Scena 2: Arrivo dei fotoni e requisiti energetici (soglia del gap di banda)

Scena 3: Struttura della giunzione P-N e separazione di carica

Scena 4: Flusso di corrente attraverso circuito esterno e fornitura di energia al carico

Scena 5: Valutazione finale con quiz concettuali sequenziali

Ogni scena include elementi visivi (diagrammi, particelle animate, sfere codificate per colore per elettroni/lacune), sovrapposizioni di testo esplicativo e quiz interattivi con feedback immediato. Gli studenti navigano sequenzialmente toccando pulsanti, osservando conseguenze visive (desaturazione del colore per risposte errate, effetti fuochi d'artificio per il successo) e rispondendo a domande sulle soglie energetiche dei fotoni, sulla funzione della giunzione P-N e sul comportamento del circuito. Il viaggio completo richiede circa 5-7 minuti e può essere sperimentato individualmente o in piccoli gruppi per una discussione collaborativa.

Estensione opzionale: In piccoli gruppi, gli studenti possono progettare scene di approfondimento incentrate su argomenti avanzati come rivestimenti antiriflesso, celle a multigiunzione o installazioni di pannelli solari reali, aggiungendo i propri testi esplicativi e indicatori visivi.

Attività 3: Quiz Interattivo

Per verificare la comprensione in ogni fase, l'esperienza AR include quiz integrati con feedback visivo immediato. Gli studenti rispondono a domande a scelta multipla incorporate nelle scene sequenziali:

Quiz Scena 2:

- Cosa determina se un fotone può generare elettricità?
(Corretto: Energia del fotone vs gap di banda)

Quiz Scena 3:

- Cosa crea il campo elettrico che separa i portatori di carica?
(Corretto: Drogaggio della giunzione P-N)

Quiz Scena 4:

- Perché la corrente si interrompe quando copriamo il pannello solare?
(Corretto: Nessun fotone = nessuna coppia elettrone-lacuna generata)





Valutazione Finale Scena 5 (3 quiz sequenziali):

1. Come aumentiamo la produzione di tensione?
(Corretto: Collegare le celle in serie)
2. Perché i fotoni infrarossi non possono generare corrente nel silicio?
(Corretto: Energia < gap di banda a 1,1 eV)
3. Cosa impedisce la ricombinazione elettrone-lacuna?
(Corretto: Campo elettrico della giunzione P-N)

Ogni quiz fornisce feedback visivo: le risposte corrette mantengono colori vivaci e consentono la progressione alla scena successiva, mentre le risposte errate attivano conseguenze visive (desaturazione, animazione si ferma) e consentono tentativi illimitati, incoraggiando il ragionamento senza penalità.

Domande di discussione opzionali per l'esplorazione avanzata:

- Perché l'ombreggiamento riduce la corrente ma non la tensione nelle celle collegate in serie?
- Cosa limita l'efficienza massima delle celle solari a singola giunzione?
- Come superano le celle a multigiunzione il limite di Shockley-Queisser?

Attività 4: Discussione Plenaria

Il modulo si chiude con una discussione plenaria in cui gli studenti:

- Analizzano criticamente i risultati ottenuti dalle simulazioni e dalle esperienze AR
- Confrontano la conversione fotovoltaica con altre tecnologie energetiche (combustibili fossili, eolico, idroelettrico)
- Riflettono sul ruolo dell'energia solare nella decarbonizzazione globale e nella sostenibilità
- Discutono i compromessi tra efficienza, costo, impatto ambientale e scalabilità

Risultati attesi

Alla fine del Modulo Operation, gli studenti dovrebbero essere in grado di:

- Descrivere in linguaggio scientifico la sequenza completa della conversione fotovoltaica, dall'assorbimento dei fotoni alla generazione di corrente elettrica
- Collegare la fisica quantistica (gap di banda, energia dei fotoni, portatori di carica) con il comportamento elettrico macroscopico (tensione, corrente, potenza)
- Utilizzare strumenti digitali e AR per rappresentare fenomeni complessi su scala atomica e visualizzare il flusso di energia attraverso i sistemi fotovoltaici
- Sviluppare un approccio critico verso le tecnologie dell'energia solare, comprendendo i loro limiti fisici, i compromessi ingegneristici e le implicazioni sociali per la transizione verso le energie rinnovabili





4. Reference

TED-Ed, How do solar panels work? (animated video). Clear explanation of photovoltaic cells, P-N junctions, and electron flow. Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=xKxrkt7CpY>

U.S. Department of Energy (DOE), Solar Photovoltaic Technology Basics. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. Available at: <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-photovoltaic-technology-basics>

University of Colorado Boulder - PhET Interactive Simulations, Photoelectric Effect. Interactive exploration of photon energy, electron ejection, and quantum properties of light. Available at: <https://phet.colorado.edu/en/simulations/photoelectric>

Encyclopædia Britannica, Solar Cell. Comprehensive overview of solar cell structure, operation, and materials. Available at: <https://www.britannica.com/technology/solar-cell>

National Renewable Energy Laboratory (NREL), Photovoltaic Research. U.S. Department of Energy. Available at: <https://www.nrel.gov/pv/>

National Renewable Energy Laboratory (NREL), Best Research-Cell Efficiency Chart. Updated record efficiencies for various photovoltaic technologies. Available at: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>

NASA, How NASA Uses and Improves Solar Power. Available at: <https://science.nasa.gov/sun/how-nasa-uses-and-improves-solar-power>

Delightex Studio - Spaces (Marker), Educational AR platform for interactive scene creation. Available at: <https://edu.delightex.com/Studio/Spaces>

Shockley, W., & Queisser, H. J. (1961). Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells. Journal of Applied Physics, 32(3), 510-519. Available at: <https://doi.org/10.1063/1.1736034>

Green, M. A., et al. (2024). Solar cell efficiency tables (Version 63). Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 32(1), 3-13. Available at: <https://doi.org/10.1002/pip.3750>

MIT OpenCourseWare, Fundamentals of Photovoltaics. Lecture notes and video content on semiconductor physics and solar cell design. Available at: <https://ocw.mit.edu/courses/2-627-fundamentals-of-photovoltaics-fall-2013/>





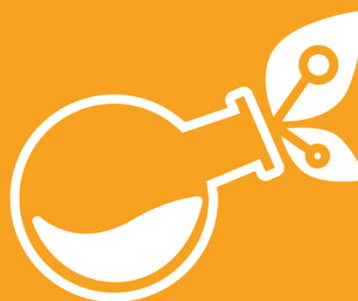
International Energy Agency (IEA), Solar PV Technology Report. Global trends, projections, and technology analysis. Available at: <https://www.iea.org/reports/solar-pv>

Image credits: Wikimedia Commons (CC BY-SA / Public Domain), National Renewable Energy Laboratory (NREL), U.S. Department of Energy, Encyclopædia Britannica, and NASA educational resources - educational use.





Co-funded by
the European Union



BIOS4YOU AR 2.0

BIO-INSPIRED STEM TOPICS FOR ENGAGING YOUNG GENERATIONS
THANKS TO THE USE OF AUGMENTED REALITY



Project Number: KA220-BW-23-30-126516

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.