



CELLE SOLARI



Come ricavare energia dal sole:
confronto tra celle al silicio e celle organiche

Premessa al lavoro:

Abbiamo cercato di riunire il lavoro svolto all'Università nell'ambito del progetto "Lauree scientifiche" con quello fatto lo scorso anno a scuola intitolato "Produzione di idrogeno dal sole" nel quale si usava come generatore di corrente per l'elettrolisi un pannello solare al silicio.

CELLE SOLARI

Sono dispositivi attraverso i quali l'energia radiante viene trasformata in energia elettrica.

Il lavoro è composto da tre parti:

- celle solari tradizionali
- celle di Graetzel
- confronto celle

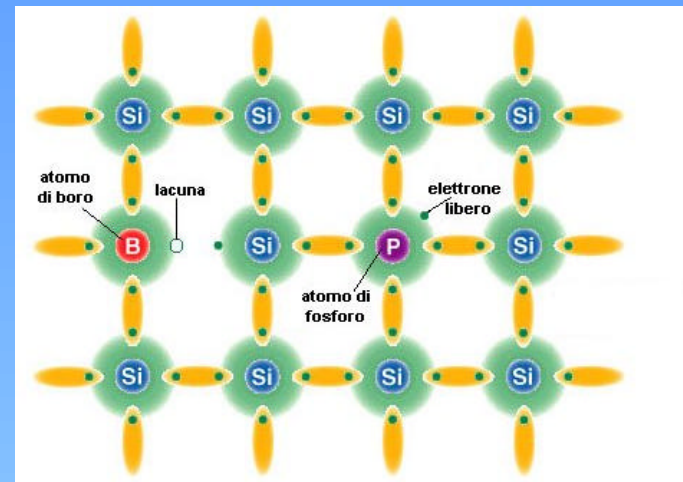
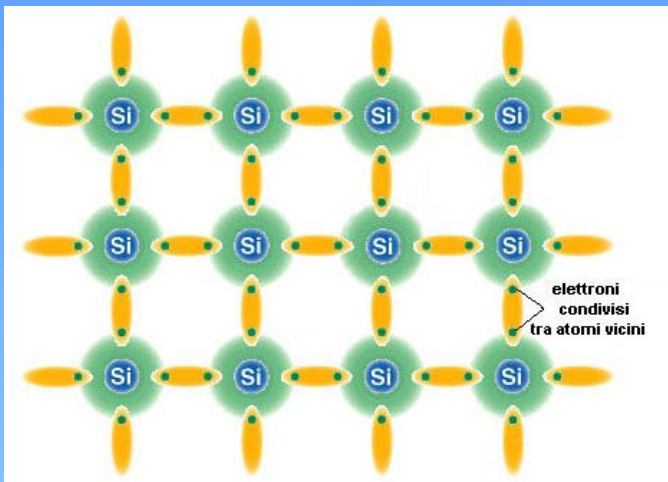
L'energia solare

“L'energia solare” consiste nella *trasformazione diretta* della luce solare in energia elettrica (effetto fotovoltaico), a differenza di quasi tutti gli altri sistemi per i quali c'è almeno un passaggio intermedio tra la fonte primaria e la produzione di energia elettrica: energia meccanica (es. eolico, idroelettrico..) o energia termica (es. termoelettrico a combustibili fossili, nucleare, ecc..).

In sintesi l'energia si ottiene quando i fotoni della radiazione solare, colpendo una cella, "strappano" gli *elettroni più esterni* (di valenza) degli atomi del semiconduttore (in genere *silicio*), gli elettroni sono raccolti dal reticolo metallico serigrafato sulla superficie visibile della cella che "incanalano" il flusso di elettroni ottenendo una *corrente continua di energia elettrica*.

I semiconduttori

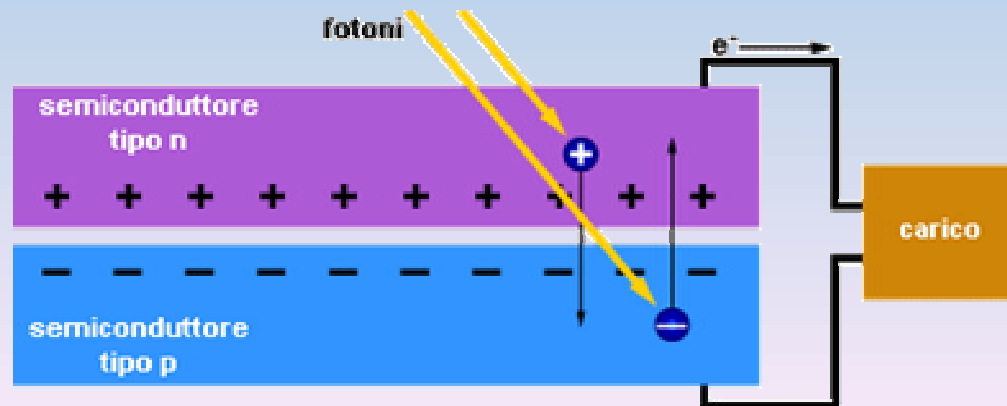
Categoria di materiali presenti in natura allo stato solido cristallino, la cui capacità di conduzione dell'elettricità, a temperatura ambiente, è intermedia tra quella degli isolanti e quella dei conduttori. A temperature molto basse, i semiconduttori puri si comportano come isolanti, ma *la loro conducibilità può crescere* drasticamente per effetto di un aumento della temperatura, di un'esposizione alla luce o di un trattamento che prevede l'aggiunta di *piccole percentuali di altre sostanze (drogaggio)*.



Per predisporre un semiconduttore alla conduzione di corrente si utilizza il metodo del drogaggio. Nel caso del silicio (Si), se *si sostituisce un atomo di Si con un atomo di fosforo (P)*, uno degli elettroni di valenza del P non riesce a legarsi agli atomi circostanti, e rimane libero per la conduzione: il tipo di semiconduttore così ottenuto si dice drogato di **tipo n**. Se un atomo del reticolo di *Si viene sostituito da un atomo di boro (B)*, viene a mancare un elettrone di valenza al completamento dei legami chimici, e si genera una "lacuna" che, agli effetti della conduzione, si comporta come una carica positiva libera: il semiconduttore così ottenuto si dice drogato di **tipo p**.

Giunzione p-n

Se, in uno stesso cristallo, vengono realizzate una zona p e una zona n adiacenti, si crea una *"giunzione p-n"*. Le proprietà di questo particolare sistema fisico sono alla base del funzionamento del *"diodo a semiconduttore"*. Infatti, gli elettroni presenti nel silicio di "tipo n" diffondono per un breve tratto nel silicio di "tipo p": il silicio di tipo n si carica positivamente, quello di tipo p si carica negativamente e si crea inoltre una regione intermedia detta zona di svuotamento. Il risultato è un campo elettrico interno al dispositivo dell'ampiezza di pochi micrometri. *Si generano delle coppie elettrone-lacuna.*



Che cosa accade

Il campo elettrico separa gli elettroni in eccesso generati dall'assorbimento della luce dalle rispettive lacune, spingendoli in direzioni opposte (gli elettroni verso la zona n e le lacune verso la zona p). Una volta attraversato il campo, gli elettroni liberi non tornano più indietro, perché il campo, agendo come un diodo (è un dispositivo in cui il passaggio di corrente è ostacolato in una direzione e facilitato in quella opposta), *impedisce loro di invertire la marcia*.

Nel circuito esterno si otterrà un flusso di elettroni che parte dallo **strato n**, a potenziale maggiore, verso la **strato p**, a potenziale minore. Fino a quando la cella resta esposta alla luce, l'elettricità fluisce con regolarità sotto forma di corrente continua.

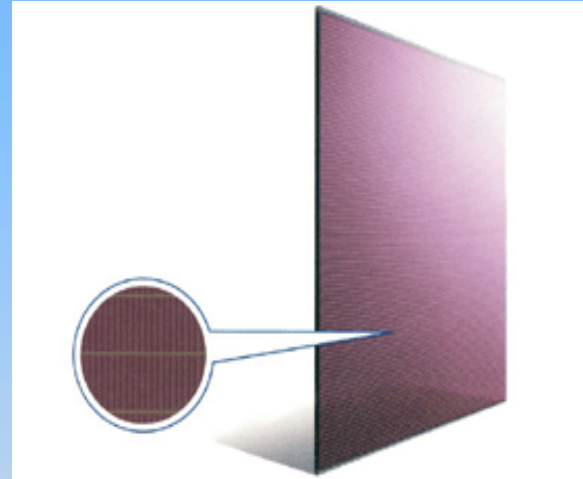
Preparazione

La cella solare viene fabbricata mediante un complesso processo di estrazione dell'ossigeno dalla comune sabbia (SiO_2) e di purificazione del rimanente silicio. Il prodotto viene poi trasformato *in piastrine di silicio fotovoltaico* di spessore 0,3 mm. Queste celle hanno dimensioni di circa 12 cm di lato e sono in grado di produrre circa 1,5 Watt di potenza in condizioni standard cioè quando si trovano ad una temperatura di 25 °C e sono sottoposte ad una potenza della radiazione pari a 1.000 W/ m².



I vari pannelli fotovoltaici

Pannelli fotovoltaici in silicio amorfo



Modulo fotovoltaico più economico, ma anche quello con il *minor rendimento* e, purtroppo, anche soggetto ad un degrado del rendimento nel tempo.

Pannelli fotovoltaici in silicio multicristallino o monocristallino



Il rendimento globale di un pannello solare in silicio monocristallino è di circa il 13-17 %, mentre quello di un pannello solare in silicio multicristallino è di circa il 12-14 %.

Quindi, a parità di spazio, rispetto al modulo solare in silicio amorfo, si hanno dei rendimenti doppi, o quasi tripli, ma comunque il costo per ogni Watt producibile del mono-multicristallino rimane comunque superiore.

La cella di Grätzel

Una cella di Grätzel è un dispositivo che produce energia elettrica convertendo energia luminosa in maniera simile alla *fotosintesi*. Infatti in questo dispositivo un pigmento organico (come la clorofilla o altre molecole) viene eccitato dalla luce solare per generare una corrente di elettroni.

In dettaglio, questa cella è costituita, nell'ordine, da un elettrodo di vetro conduttore sul quale è disposto uno strato di semiconduttore in *nanocristalli* (tipicamente TiO_2), con un elevato fattore di rugosità. Questo elettrodo è impregnato dal *colorante organico*, le cui molecole sono disposte sulla superficie dei grani di semiconduttore a distanza nanometrica. Quando la luce solare colpisce la cella, eccita una molecola di pigmento e un suo elettrone riesce a trasferirsi dalla molecola di pigmento alla banda di conduzione del semiconduttore, lasciando il *colorante ossidato*.

Si utilizzano *cristalli nanometrici* perché così lo strato ha una superficie equivalente molto grande.

Una volta arrivati sul nanocristallo, gli elettroni sono immessi nel circuito elettrico, il quale termina su un *contro-elettrodo* formato da un altro vetrino conduttore e da un *catalizzatore* (platino o carbonio); fra i due elettrodi c'è un elettrolita, nel nostro caso liquido (soluzione di ioduro di potassio)

L'elettrone arriva sul contro-elettrodo e viene ceduto all'*elettrolita* che lo trasporta alla molecola di colorante precedentemente ossidata: il circuito si chiude.

Nel processo è indispensabile il catalizzatore per la cessione dell'elettrone dal vetrino all'elettrolita altrimenti questa avverrebbe troppo lentamente.

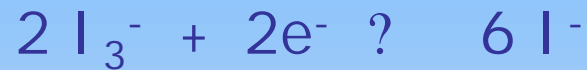
Le reazioni

Quando la molecola di colorante viene ossidata, lo iodio dell'elettrolita le cede immediatamente un suo elettrone. Lo iodio nella cella si può quindi trovare sotto due forme, come ione ioduro (I^-) a numero di ossidazione -1 e come ione triiodio (I_3^-) a numero di ossidazione -1/3, ed è coinvolto nella seguente serie di reazioni (dove R indica il colorante):



Il circuito si chiude

Lo ione triiodio (complesso formato da iodio molecolare e ioduro) migra verso il controelettrodo, dove viene ridotto a ioduro:



che a questo punto migra verso l'elettrodo di titanio chiudendo il ciclo

Costruzione di una cella solare a colorante organico:

Il dispositivo è costituito dalle seguenti parti:

- un *elettrodo* formato da un vetrino conduttore e da uno strato semiconduttore;
- un *colorante* impregnato nel semiconduttore;
- un elettrolita;
- un *contro-elettrodo* formato da un vetrino conduttore e da un catalizzatore (carbonio).

Materiali necessari

- Per l'elettrodo:
un vetrino conduttore (è stato scelto un TiO_2); scotch 3m;
1,5 g di biossido di titanio, anatase in polvere (è stato scelto l'anatase Aldrich purezza 99,7%, in nanopolvere);
5 ml di acido nitrico al 10 % in peso; polietilene glicole (<10% in volume)
- Per il colorante:
circa 25 g di more (da conservare in freezer); garza medicinale.
- Per l'elettrolita:
10 ml di etilene glicole;
127 mg di I_2 ; 830 mg di KI ; boccetta scura per conservare al buio.
- Per il contro-elettrodo:
un vetrino conduttore; una candela.

Sono inoltre necessari isopropanolo per il lavaggio, clips da cancelleria

Procedura di preparazione

L'elettrodo di biossido di titanio

- Preparare 1,5 g di polvere di TiO_2 nel mortaio ed aggiungere 5 ml di acido nitrico, 1 ml alla volta, mescolando per eliminare tutti i grumi. Aggiungere il polietilene glicole e lasciar riposare per 15 minuti.
- Una volta pronta la pasta, disporre il vetrino con il lato conduttore verso l'alto ed attaccare due strisce di scotch sui lati lunghi ed una su un lato corto in modo tale che rientrino di qualche mm. In questo modo si crea una zona incassata di spessore pari a quello dello scotch che poi sarà riempita dall'ossido di titanio.
- Stendere ora la pasta sul vetrino cercando di ottenere uno strato uniforme.

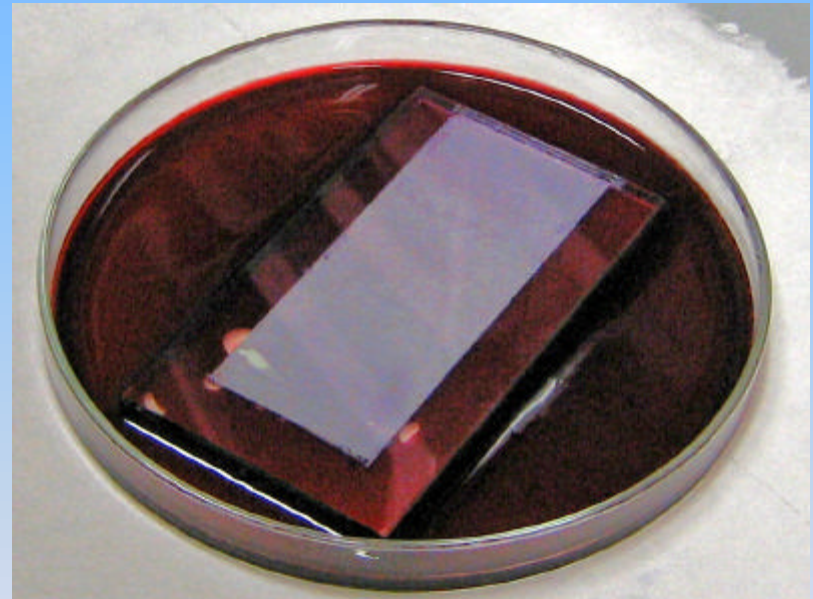
Una volta pronto, togliere lo scotch. Il vetrino va ora messo in forno e riscaldato a $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ e tale temperatura va mantenuta per circa 15 - 20 minuti.

Se mantenuto a quella temperatura per quel tempo, l'ossido di titanio aumenta la sua conduttività e ha il tempo di cristallizzarsi. Dopo il riscaldamento è necessario lasciare raffreddare il vetrino a forno chiuso per tutta la notte: altrimenti il vetro conduttore o lo strato di ossido di titanio su di esso potrebbero creparsi.



Il colorante

- Per preparare il colorante bisogna schiacciare le more usando la garza come filtro e far colare il succo in una bacinella.
- Una volta pronto il succo, immergere l'elettrodo con l'ossido di titanio nella bacinella (la faccia conduttrice va verso il basso) e lasciare penetrare il succo per capillarità per 10 o 15 minuti; si può prolungare l'immersione nel caso in cui il colorante non abbia impregnato bene il semiconduttore.
- Una volta estratto, lavare prima con acqua e poi con acetone per rimuovere le impurità



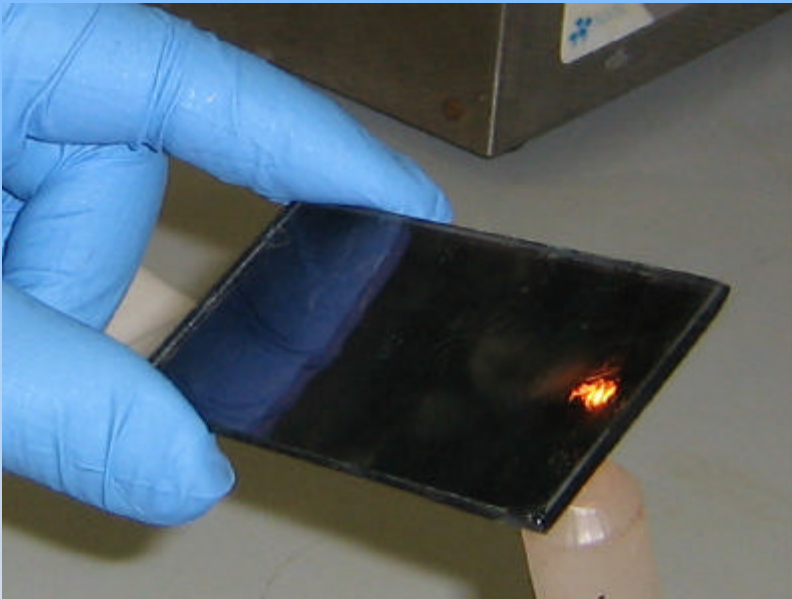
L'elettrolita e il controelettrodo

Preparazione dell'elettrolita

Si aggiungono 127 mg di I_2 all'etilene glicole, agitando e mescolando per qualche minuto per sciogliere lo iodio; successivamente aggiungere 830 mg di KI e agitare. La soluzione va conservata al buio o in una boccetta scura.

Il contro-elettrodo

Per ricoprire il contro-elettrodo dicarbonio si può usare una candela su cui affumicarlo. In questo modo il carbonio derivante dalla combustione si va a depositare sul vetro. Bisogna però fare attenzione a non spaccare il vetro per via dell'alto sbalzo termico cui è sottoposto.



Assemblaggio della cella

Ora tutti i componenti sono pronti e si può procedere all'assemblaggio della cella.

Versare 1 - 2 gocce di soluzione elettrolitica sull'elettrodo con l'ossido di titanio. Al fine di evitare corti circuiti nella cella rimuovere l'elettrolita debordato al di fuori del cristallo.

Successivamente appoggiare il contro-elettrodo sull'elettrodo di biossido di titanio facendo attenzione a non strisciarlo, altrimenti il carbonio potrebbe venir grattato via. Al momento della preparazione dell'elettrodo di ossido di titanio era stata lasciata una piccola rientranza sul lato corto preparata con lo scotch. Ebbene, ora i due vetrini vanno messi sfalsati l'un l'altro sui lati corti di una distanza pari a questa sfasatura, sulla quale si possono applicare i contatti elettrici. I vetrini vanno tenuti assieme con le due clips.

Confronto sperimentale dell'efficienza delle due celle

Durante il primo modulo di laboratorio abbiamo costruito ed assemblato la cella di Graetzel.

Nella seconda giornata abbiamo confrontato l'efficienza di un piccolo pannello in silicio policristallino con la cella di Graetzel.

Abbiamo collegato a tale scopo prima il piccolo pannello e poi la cella all'amperometro , poi abbiamo posizionato il pannello a distanze sempre minori dalla nostra sorgente luminosa (lampada da 60 W) e abbiamo misurato l'intensità di corrente prodotta dal pannello.

Sono state compilate due tabelle e tracciati i relativi grafici

Grafico relativo al pannello di silicio

Distanza (cm)	Corrente I (mA)
55	51,07
50	58,92
45	74,17
40	88,48
35	120,4
30	150,7
25	190,1
20	333
15	439
10	731
5	860

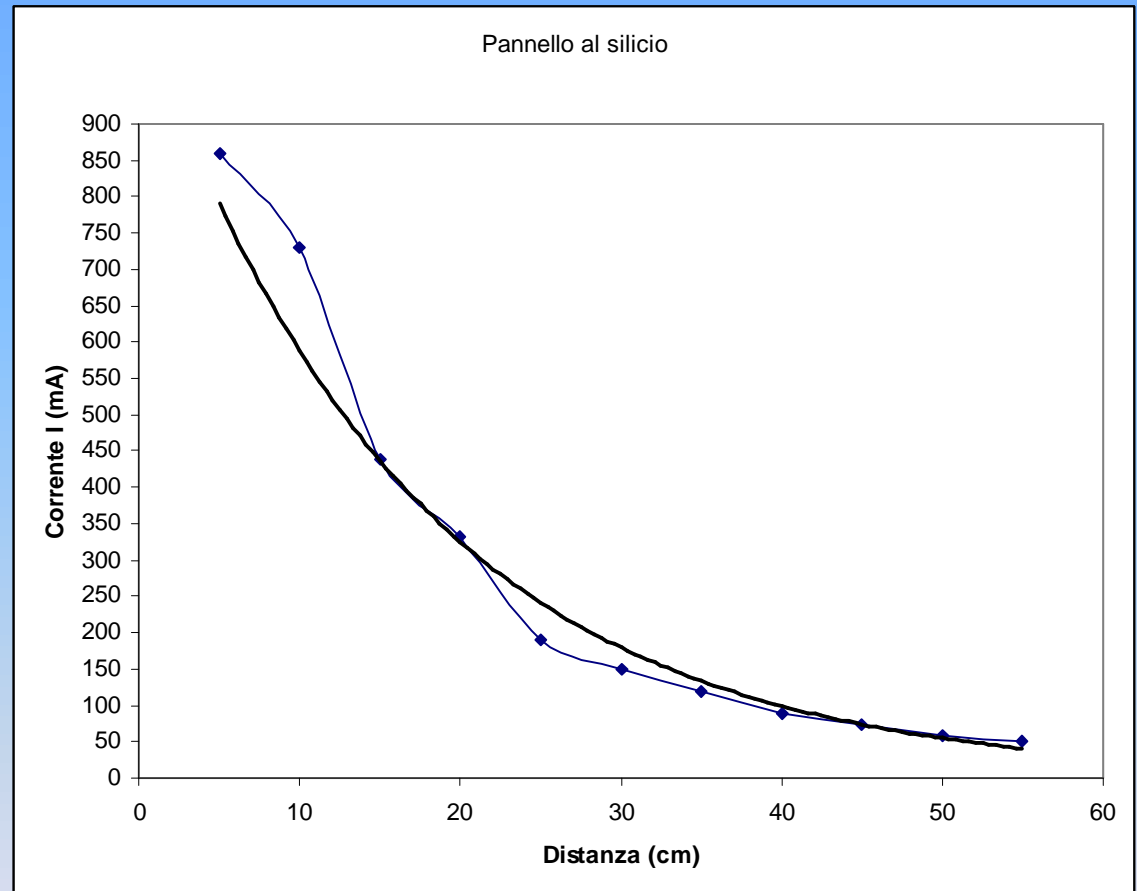
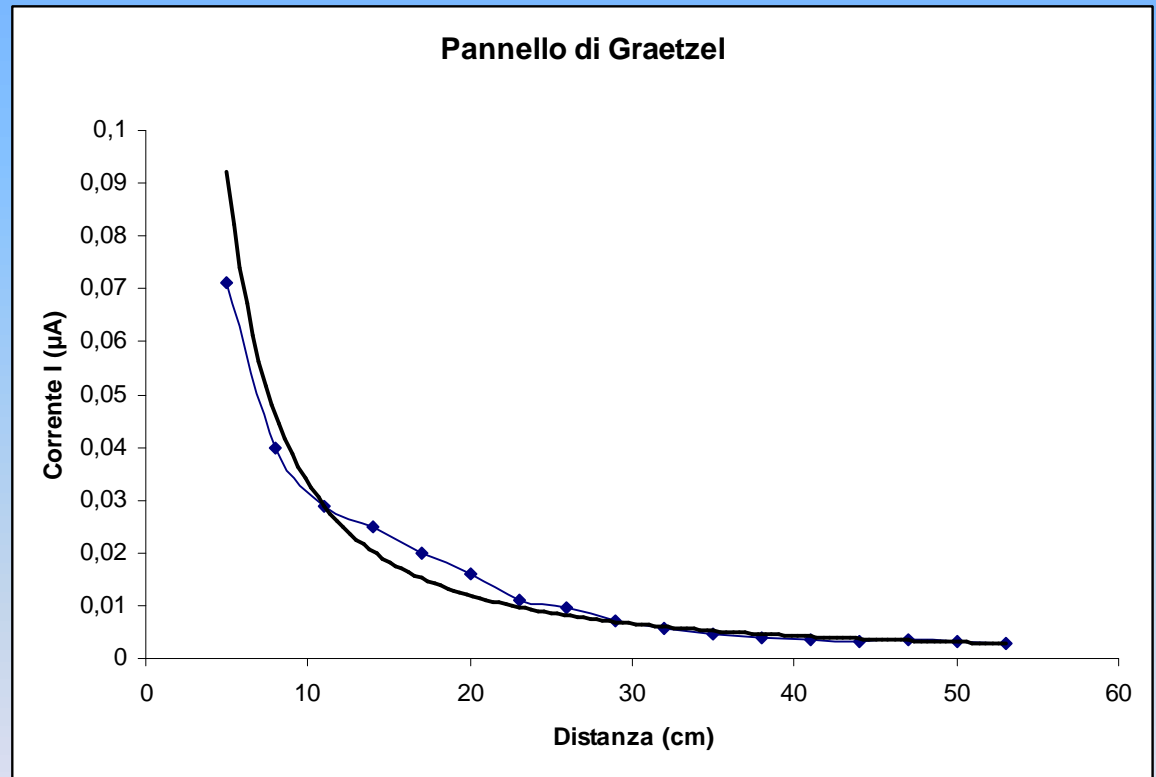


Grafico relativo alla cella solare

Distanza (cm)	Corrente I (μA)
53	0,0029
50	0,0031
47	0,0036
44	0,0031
41	0,0034
38	0,0039
35	0,0046
32	0,0056
29	0,0071
26	0,0095
23	0,0109
20	0,016
17	0,02
14	0,025
11	0,029
8	0,04
5	0,071



Conclusioni

Osservando i due grafici vediamo chiaramente che l'andamento del grafico è del tutto analogo, ma i valori assoluti riportati sull'asse delle ordinate sono assai diversi.

Anche considerando la diversa superficie delle due celle (la superficie della cella al silicio era circa 25 volte maggiore), si hanno due valori di intensità per unità di superficie assai diversi:

Alla distanza di 5cm dalla sorgente:

$$I_{\text{silicio}} = 860/25 \text{ mA/cm}^2 = 34,4 \text{ mA/cm}^2$$

$$I_{\text{Graetzel}} = 0,071 \text{ mA/cm}^2$$

Ne risulta che nelle nostre condizioni la cella al silicio è 480 volte più efficiente della cella di Graetzel

Materiali ed efficienza

L'*efficienza* e il *costo* dei diversi materiali impiegati nelle celle solari variano molto.

L'efficienza viene definita come il rapporto tra la potenza elettrica prodotta e la potenza di luce incidente.

In una giornata limpida, la radiazione solare all'equatore raggiunge i $1000 \text{ W} / \text{m}^2$, perciò un modulo fotovoltaico di un metro quadrato con un'efficienza del 10%, riesce a produrre circa 100 W.

L'efficienza delle attuali celle solari varia dal 6% per quelle basate su *silicio amorfo* fino al 30% o più per i prototipi di laboratorio a *giunzioni multiple*.

Il costo

Comunque, un' altissima efficienza può *non essere* la scelta più opportuna dal punto di vista economico:

celle basate su materiali esotici come arseniuro di gallio o selenuro di indio possono costare anche **100** volte di più di una cella commerciale a silicio amorfo, producendo solo **4** volte più potenza elettrica.

Il materiale di gran lunga più comune per le celle solari è il silicio cristallino.

celle fotoelettrochimiche

Queste celle (dette anche celle di *Graetzel*), annunciate per la prima volta nel **1991**, furono inizialmente concepite per mimare il processo di *fotosintesi*.

Questo tipo di cella permette un uso più flessibile dei materiali e la tecnologia di produzione è molto *conveniente*.

Tuttavia, i coloranti usati in queste celle soffrono *problemi di degrado* se esposti al calore o alla luce ultravioletta.

Nonostante questo problema è una tecnologia emergente con un impatto commerciale previsto entro una decina di anni.

Ambiti attuali di ricerca:

La maggior parte della ricerca è volta a rendere le celle solari *più economiche e/o più efficienti*, in modo da poter competere più efficacemente con le altre fonti di energia, compresi i combustibili fossili:

- ottenere silicio sufficientemente puro
- ridurre il materiale di scarto
- ricercare materiali e tecnologie alternativi

Per applicazioni speciali (aerospaziali, ad esempio) celle ad alta efficienza possono essere fabbricate a partire da arseniuro di gallio (GaAs) *in giunzioni multiple in serie*, che assorbono tutto lo spettro elettromagnetico: celle solari a tripla giunzione hanno raggiunto *un'efficienza del 35.2%*, ma il loro *costo* rimane estremamente *elevato*.

Celle solari organiche

Celle solari a base di *polimeri*, chiamata anche celle solari organiche, vengono costruite con strati ultra-sottili di *semiconduttori organici* (PPV, fullereni): il modello della giunzione p-n è molto semplificato per descrivere una cella di questo tipo.

Sono potenzialmente molto più *economiche da fabbricare* rispetto alle celle al silicio o a quelle inorganiche in generale, ma *l'efficienza ottenuta* finora è ancora *bassa* e sono ancora molto sensibili all'aria e allo sporco, rendendo per ora difficile la loro commercializzazione.

D'altro canto, questa tecnologia è comunque la stessa che ha permesso lo sviluppo e la commercializzazione dei LED e dei display organici.

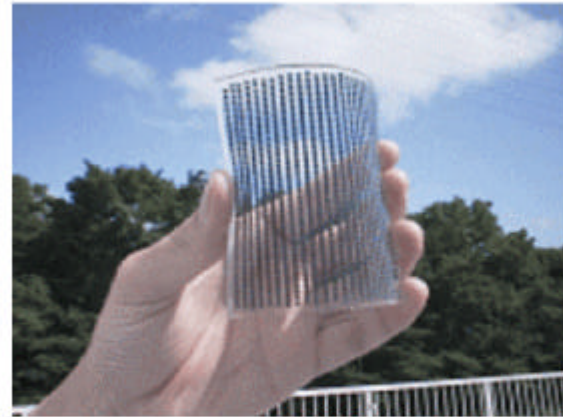


Fig.2.: celle fotovoltaica flessibile.

Celle di Graetzel: costi ed usi

Costo

Il vantaggio di queste celle è il basso costo rispetto agli altri tipi di celle (circa 600 € al kWp nel medio periodo)

Uso

Un importante uso che viene in Italia, di queste celle, è nell'isola di Ventotene, dove vengono utilizzati questi pannelli in modo tale da produrre parte dell'energia per l'isola. Quest'isola è il primo esempio di "isola a emissione zero", in quanto su di essa è vietato utilizzare la macchina.



Lavoro a cura di:

Manuel Dentice	5Fase
Eros Fiorino	5 Fase
Alessandro Pin	4 Fase
Valerio Principale	4 Fase
Lorenzo Tietto	4Fase

Allievi dell'I T I S Molinari di Milano