



LS OSA - Conoscere i materiali e produrre energia  
**LABORATORIO ITINERANTE**  
Chimica e Scienza dei Materiali

## **COSTRUIRE UNA CELLA SOLARE DSC**

### **1. COS' È UNA CELLA SOLARE DSC?**

Le DSC (Dye-sensitized Solar Cells) sono particolari dispositivi fotovoltaici inventati da Micheal Grätzel e Brian O'Regan nel 1991; per questo motivo sono anche conosciute come Cella di Grätzel.

La differenza principale tra le DSC e le comuni celle al silicio è che in queste ultime tutte le fasi della conversione fotovoltaica sono sostenute dal solo materiale semiconduttore (il silicio appunto), mentre le Cella di Grätzel sono dispositivi multicomponente, nelle quali ogni materiale della cella ha un ruolo fondamentale nel processo che trasforma l'energia solare in energia elettrica.

### **2. CARATTERISTICHE DELLE CELLE DSC.**

Le DSC non vogliono essere un'alternativa sostitutiva alle classiche celle al silicio, anche perché le loro prestazioni in termini di efficienza di conversione fotovoltaica sono molto minori, ma possono diventare dispositivi complementari alla tecnologia ad oggi in uso, in quanto possiedono determinate caratteristiche che una cella al silicio non possiede:

- Trasparenza alla luce: le DSC sono colorate ma trasparenti e possono essere ottenute in diverse tonalità (figura 1)
- Efficienza con luce diffusa: a differenza delle celle al silicio, in cui l'angolo di incidenza dei raggi solari influisce molto sulle performance del dispositivo, nelle DSC questa dipendenza è molto meno accentuata e si

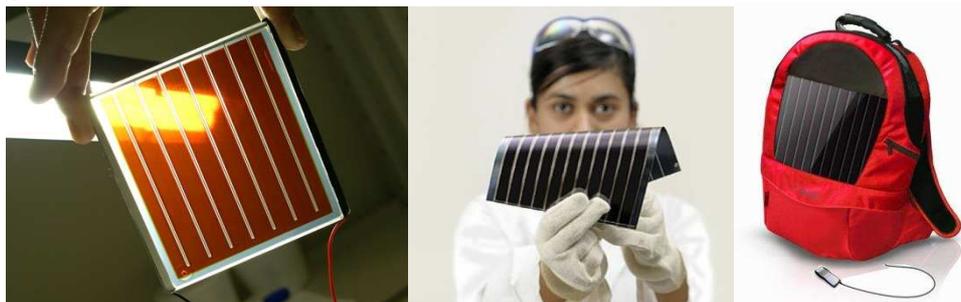
possono ottenere buone prestazioni anche con la luce diffusa che penetra in una stanza

- Flessibilità: è possibile ottenere sia moduli rigidi che moduli flessibili (figura 1).

In base a queste caratteristiche ci si può rendere conto che questi dispositivi possono essere sfruttati in maniera efficace come sistemi integrativi nella costruzione di edifici, utilizzandoli per realizzare intere vetrate colorate e fotovoltaiche, nonché oggetti di internal design.

Il motivo per cui lo sviluppo e l'utilizzo di queste celle è ulteriormente caldeggiato, consiste nell'utilizzo di materiali relativamente "poveri" e per lo più compatibili con l'ambiente, per cui la sostituzione delle celle al silicio, in determinate applicazioni, è conveniente sia dal punto di vista economico che da quello ambientale.

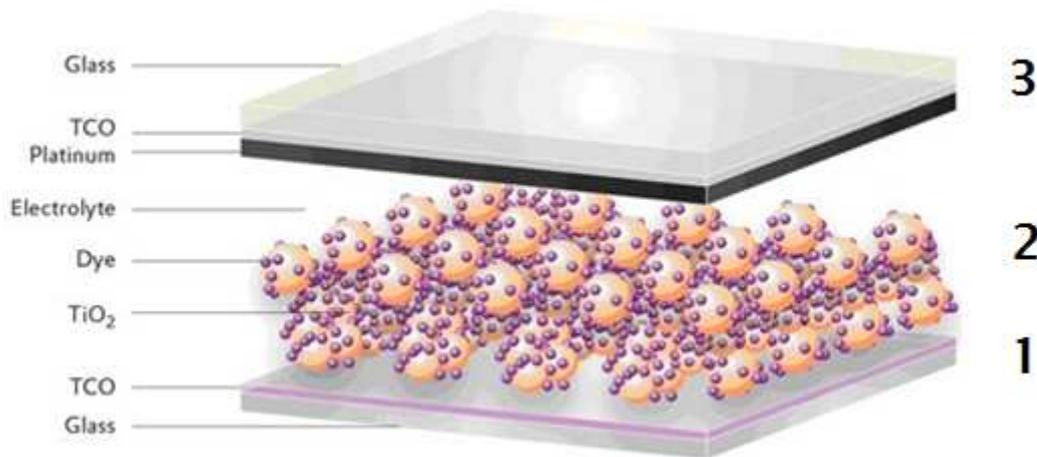
Con una buona dose di fantasia le applicazioni possono diventare davvero molte (figura 1).



*Figura 1: Aspetto e applicazioni delle DSC*

### 3. COME È COSTITUITA LA CELLA?

Come detto in precedenza le celle DSC sono dispositivi formati da diversi materiali che vengono uniti insieme con una geometria stratificata (figura 2).



*Figura 2: Schema della struttura di una DSC*

L'intero dispositivo è formato da quattro componenti principali: vetri conduttivi, biossido di titanio, colorante ed elettrolita.

- I due vetri fungono da anodo (Figura 2, zona 1) catodo (Figura 2, zona 3). Questi vetri sono resi conduttivi per deposizione di un sottile strato di ossido trasparente (TCO - Transparent Conductive Oxide) e possono essere acquistati da aziende che li producono su larga scala. (Esistono due tipi principali di vetri, ossido di stagno dopato (ossia contenente piccole quantità di un certo elemento) con indio e ossido di stagno dopato con fluoro, che vengono nominati con le sigle ITO - Indium Tin Oxide e FTO - Fluorine Tin Oxide).

Questo trattamento è effettuato su un solo lato del vetro, che quindi avrà un lato conduttivo ed un lato non conduttivo.

- Su uno dei due vetri, dalla parte del lato conduttivo, viene depositato un sottile strato di biossido di titanio (Figura 2, zona 2 - sfere arancioni, grandi) sul quale viene fatto adsorbire un colorante (dye) (Figura 2, zona 2 - sfere viola, piccole).

- Sul secondo vetro, dalla parte del lato conduttivo, viene depositato uno strato di materiale catalizzatore, solitamente platino, ma per le celle didattiche è sufficiente la grafite (Figura 2, zona 3).
- Il sistema viene chiuso a sandwich facendo combaciare i due lati conduttivi su cui sono stati depositati i materiali, aggiungendo un elettrolita liquido all'interno del sistema, in modo che vada a riempire lo spazio tra i due elettrodi (Figura 2, zona 2).
- Il dispositivo viene sigillato ed è pronto per essere utilizzato. Nel caso della nostra esperienza è sufficiente una chiusura del dispositivo mediante semplici pinzette clips fermafogli.

#### 4. DSC: PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

Il principio di funzionamento generale si basa sull'effetto fotovoltaico, esattamente come per le normali celle al silicio, ossia sull'assorbimento dei fotoni e sulla conseguente produzione di cariche elettriche libere di muoversi in un circuito.

Tale effetto fotovoltaico può avvenire con materiali particolari, detti semiconduttori, che possiedono degli elettroni di valenza ad un livello energetico molto vicino all'energia che servirebbe per metterli in moto e renderli conduttivi. Pertanto questi materiali non sono ancora in grado di condurre elettricità.

Quando però viene fornito un qualche tipo di energia dall'esterno, ad esempio energia luminosa sotto forma di fotoni, assorbita dal materiale, allora questi elettroni di valenza raggiungono un livello energetico più elevato, in grado di condurre elettricità.

Un corpo assorbe energia luminosa visibile quando è colorato.

Un corpo di colore nero assorbe tutta l'energia luminosa visibile, un corpo bianco non riesce ad assorbire energia luminosa visibile.

Il silicio è in grado di assorbire la luce visibile e ha tutte le caratteristiche per essere un buon materiale per costruire celle fotovoltaiche.

Il biossido di titanio (titania) invece è di colore bianco! Questo vuol dire che la titania non è in grado di assorbire i fotoni aventi energia nella lunghezza d'onda del visibile.

Per questo motivo la titania deve essere sensibilizzata, ovvero resa attiva verso l'assorbimento dei fotoni dello spettro visibile, mediante l'utilizzo di un colorante.

Questi coloranti sono materiali metallorganici o organici, appositamente studiati e sintetizzati in laboratorio per ottenere il massimo delle prestazioni dalle celle, ma è possibile ottenere dei risultati ed una cella funzionante utilizzando dei semplici coloranti che possiamo trovare in natura, ad esempio in alcuni tipi di frutti. Le antocianine sono molecole presenti nelle more, nei lamponi, nell'uva e sono responsabili del colore viola-rosso di questi e di altri frutti, pertanto possiamo usare succhi di frutta o vino per sensibilizzare la titania.

Il processo finale di conversione fotovoltaica sarà una vera e propria collaborazione tra i diversi materiali che compongono il dispositivo, dove ogni componente svolgerà un ruolo importante per trasformare l'energia solare in energia elettrica (figura 3).

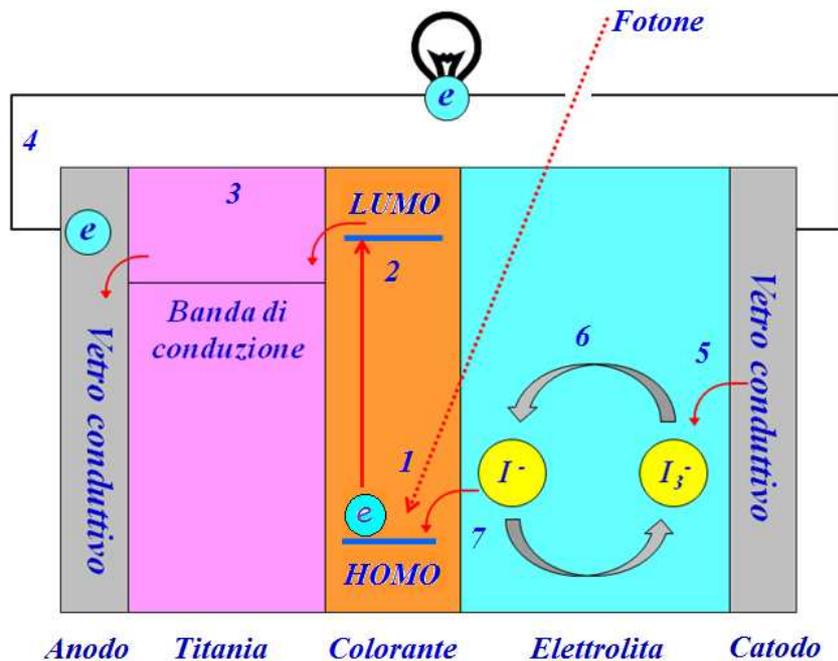


Figura 3: Schema del funzionamento di una DSC

- 1) Il fotone viene assorbito dal colorante: questa energia serve al colorante per eccitare un elettrone che viene promosso dal livello energetico più basso, detto HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital), ad un livello energetico più alto, detto LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital).
- 2) Quando l'elettrone è al livello energetico LUMO ha un'energia tale da poter essere trasferito al semiconduttore (titania).
- 3) L'elettrone viene iniettato nella Banda di Conduzione (CB - Conduction Band) della titania, ovvero quel livello energetico in cui l'elettrone è in grado di muoversi liberamente e condurre elettricità. Tale fenomeno dimostra la necessità di usare un colorante.
- 4) L'elettrone può ora giungere alla superficie conduttiva del vetrino per essere iniettato nel circuito elettrico ed essere utilizzato (elettricità).
- 5) Una volta attraversato il circuito, l'elettrone si trova al catodo da cui può essere ceduto all'elettrolita grazie alla grafite.
- 6) In questa fase diventa importante il ruolo dell'elettrolita, che ha il compito di chiudere il circuito mediante un meccanismo di Ossidoriduzione (RedOx). L'elettrolita è infatti composto da una coppia elettrochimica basata su due ioni: ioduro / triioduro,  $I^-/I_3^-$  (coppia RedOx, in cui lo ione triioduro non è altro che un complesso tra  $I^-$  e  $I_2$ , per cui la coppia elettrochimica si basa sulla trasformazione che coinvolge iodio e ioduro),

che ha il compito ossidarsi e ridursi ciclicamente durante il funzionamento della cella. Quando l'elettrone passa dal catodo (5) alla coppia RedOx, lo ione  $I_3^-$  si riduce a  $I^-$  e migra verso il colorante.

- 7) Lo ione  $I^-$  cede l'elettrone (si ossida a  $I_3^-$ ) al colorante che, in seguito all'iniziale assorbimento dell'energia luminosa, aveva perso un elettrone. Il colorante può iniziare un nuovo ciclo di lavoro.  $I_3^-$  può ora migrare di nuovo verso il catodo per assorbire un nuovo elettrone in uscita dal circuito e ricominciare il ciclo, trasportando nuovamente elettroni al colorante.

In seguito alla cessione di un elettrone al colorante da parte della coppia RedOx il colorante si dice "rigenerato", ovvero è nuovamente pronto per un altro ciclo fotovoltaico: potrà quindi assorbire un nuovo fotone, promuovere un nuovo elettrone da iniettare nuovamente nel circuito e così via...

## 5. COME POSSO COSTRUIRE UNA DSC NEL MIO LABORATORIO?

La realizzazione di una cella DSC in laboratorio non è un'impresa impossibile. Si può creare una cella completa e funzionante utilizzando materiali facilmente reperibili, strumentazioni molto semplici e una tecnologia (e manodopera) assolutamente alla portata di tutti.

I materiali necessari per costruire una cella "artigianale" sono:

- Biossido di titanio: non è tossico nè nocivo. Si consiglia di maneggiarlo indossando una mascherina per riparare naso e bocca in quanto viene venduto sottoforma di polvere sottile.
- Acqua acidificata: è una soluzione di acqua distillata e acido nitrico ( $\text{HNO}_3$ ) con un pH tra 3 e 4. Per ottenere tale soluzione è sufficiente aggiungere a 50 ml di acqua un paio di gocce di acido nitrico al 65%. Si può controllare il pH della soluzione con una cartina tornasole.
- Vetrini conduttivi: la dimensione dei vetrini consigliata è 2,5 x 2,5 cm, spessore 3 mm.
- Succo di frutta al mirtillo (o alle more) oppure vino, utilizzato come colorante. Nel nostro caso viene usato il succo di frutta blu prodotto dalla Santal, che tra quelli commerciali è quello meglio filtrato, che quindi non presenta fibre o residui solidi e facilita quindi la preparazione della cella.
- Elettrolita: è una soluzione di iodio ( $\text{I}_2$ , concentrazione 0,05 M) e ioduro di potassio (KI, concentrazione 0,5 M) in glicole etilenico. Per 100 ml di soluzione si utilizzano 1,27 g di  $\text{I}_2$  e 8,3 g di KI
- Matita HB
- Nastro adesivo di carta
- Clips per fogli

È inoltre necessario disporre di alcuni semplici pezzi di vetreria che sono disponibili in un normale laboratorio scientifico:

- Bacchetta di vetro
- Pinzette
- Spatole
- Becker (da 50 o 100 ml)
- Mortaio con pestello

È necessario disporre di etanolo per il trattamento di pulizia dei vetrini che costituiscono gli elettrodi.

Infine sono necessarie delle strumentazioni per il trattamento degli elettrodi e per la misura della cella fotovoltaica.

- Piastra riscaldatrice/agitatrice: serve per sinterizzare la titania (trattamento che spiegheremo in seguito). In alternativa si può utilizzare una pistola ad aria calda (svernicatore) che è uno strumento comunemente utilizzato dai carrozzieri ed arriva a temperature ben maggiori (fino a 500-600 °C). La soluzione migliore in assoluto è l'utilizzo di una muffola che però è uno strumento costoso e della quale pochi laboratori sono dotati.
- Tester (multimetro): ne servono 2 per eseguire le misure sulla cella, testandone il reale funzionamento. Con 1 multimetro si riesce a valutare la corrente erogata e la differenza di potenziale prodotta.
- Potenzziometro: il reostato è una resistenza variabile. Anche questo strumento è indispensabile per testare le celle in modo completo. Si consiglia un potenziometro con scala di resistenze almeno da 0 a 1 MΩ.
- Lampada: serve una fonte luminosa da puntare sulla cella per simulare la radiazione solare.

Di seguito viene elencato il procedimento di assemblaggio e misura di una DSC.

L'esperienza può essere condotta a vari livelli a seconda della disponibilità di materiali e strumentazioni ed alle competenze delle classi alle quali l'esperienza viene proposta. Pertanto parte della strumentazione indicata in quest'ultimo paragrafo può risultare non necessaria, se l'esperienza viene eseguita ad un livello base.



## PREPARAZIONE DEI COMPONENTI E ASSEMBLAGGIO DELLE CELLE DSC

### Materiale necessario per la preparazione di 3 celle:

- 2 pezzi di vetro conduttivo (2.5 X 2.5 cm) per ciascuna cella (Pilkington TEC 8 o TEC 10 o qualunque altro vetro conduttivo): totale 6 vetrini
- $\text{TiO}_2$  (P25, da NEUVENDIS, Aldrich o altro fornitore)
- Soluzione di elettrolita (KI miscelato con  $\text{I}_2$  in glicole etilenico anidro. Concentrazioni finali: KI 0.5 M;  $\text{I}_2$  0.05 M)
- Acido nitrico
- Acqua deionizzata
- Etanolo per i lavaggi
- Matita di grafite
- Colorante organico (succo di more, lamponi, mirtillo melograno, vino, oppure di sintesi)
- 2 clips fermafogli per ogni cella: totale 6 clips.
- Uno o due multimetri
- Mortaio e pestello
- Becker
- Scotch rimovibile, trasparente 3M (cod. 811) o di carta
- Una bacchetta di vetro
- Carta da laboratorio
- Dispositivi di protezione individuale: camice, guanti e occhiali di protezione, mascherina antipolvere consigliata durante le operazioni di pesatura del biossido di titanio.
- Cappa chimica in laboratorio, sotto cui pesare il biossido di titanio e iniziare la preparazione della pasta di titania.

## Procedura:

### 1) Preparazione della sospensione acquosa di $\text{TiO}_2$

- Pesare 3 g di  $\text{TiO}_2$  (P25 Degussa) in un becker e trasferirli in un mortaio (lavorare sotto cappa).
- Aggiungere 4.0 ml di una soluzione acquosa di acido nitrico (pH=3-4): goccia a goccia macinando a lungo, fino ad ottenere una pasta abbastanza densa e senza grumi. E' importante eseguire le aggiunte di acqua poco per volta, non in pochi minuti.
- La pasta deve avere aspetto e consistenza cremosa e fluida, come una crema per le mani, non troppo viscosa né troppo liquida (figura 4).



*Figura 4: Pasta di titania*

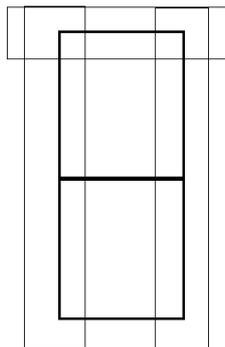
### 2) Stesura della pasta di $\text{TiO}_2$ sull'anodo

- Prelevare due lastre di vetro conduttivo (FTO, resistenza 15-20  $\Omega$ ) e lavarle con etanolo poi asciugarle con un panno morbido come ad es. la carta da laboratorio o come per le lenti degli occhiali
- Attenzione: d'ora in poi toccare le lastre solo con le pinzette o per i bordi
- Individuare con un multimetro il lato conduttivo delle lastre di vetro (accendere il multimetro in modalità "Resistenza" e selezionare il range da 0 a 200 Ohm: collegare i terminali al Multimetro, uno sulla porta COM e l'altro sulla porta di lettura del Voltaggio e delle resistenze. Toccare la superficie del vetro con i contatti dei due cavi del multimetro. Se viene visualizzato un numero, in genere tra 20 e 50, il lato corrispondente è quello conduttivo) (figura 5).



*Figura 5: Test per rilevare il lato conduttivo del vetrino*

- Posizionare le due lastre affiancate una con il lato conduttivo rivolto verso l'alto (anodo) e l'altra verso il basso (catodo).
- Utilizzare dello scotch trasparente rimovibile per fissare le due lastre al banco di lavoro coprendo anche le lastre stesse (in alto e sui bordi) per uno spazio pari a qualche millimetro (4-5 in alto, 2-3 sui lati) (figura 6).



*Figura 6: Fissaggio dei vetrini per la deposizione della titanina*

- Depositare 2-3 gocce della sospensione di  $TiO_2$  sulla lastrina che presenta la faccia conduttrice rivolta verso l'alto (meglio ancora se sul bordo coperto dallo scotch) e stendere la pasta sul vetrino con la bacchetta di vetro in modo da coprirlo in maniera uniforme, partendo dalle gocce depositate, senza far rotolare la bacchetta, e andare fino all'estremità del secondo vetrino (figura 7). E' conveniente strisciare la bacchetta proseguendo anche sulla seconda lastrina in modo che sulla prima lastrina la deposizione sia omogenea. In teoria è sufficiente una sola strisciata, senza ripassare avanti e indietro, perché spesso si peggiora la deposizione. La consistenza e viscosità della pasta sono il punto fondamentale e critico della deposizione. Una volta acquisita esperienza, le deposizioni risultano in genere molto buone.



*Figura 7: Deposizione della titania*

- Se lo strato non fosse omogeneo, è possibile ripetere la procedura dopo aver rimosso delicatamente l'ossido già depositato e rilavato con etanolo il vetrino.
- Una volta terminato, rimuovere lo scotch e lasciare asciugare all'aria per qualche minuto
- Pulire la seconda lastrina dall'eventuale ossido in eccesso, poiché essa è servita solo come supporto per aiutare a deporre bene la pasta sul primo vetrino.

### **3) Sinterizzazione dello strato di ossido di Titanio**

- Il vetrino con lo strato di ossido è pronto per essere sinterizzato a  $350^{\circ}\text{C}$ , per 1 ora (effettuabile con un agitatore/riscaldatore magnetico, uno sverniciatore da carrozziere o utilizzando una muffola) (figura 8). Le temperature massime raggiungibili sono differenti a seconda del sistema utilizzato. Note specifiche vengono fornite in appendice).
- Il vetrino viene lasciato raffreddare a temperatura ambiente molto lentamente onde evitare rotture del vetro stesso.



*Figura 8: Sinterizzazione della titania (in muffola)*

#### 4) Immersione dell'anodo nella soluzione di sensibilizzatore

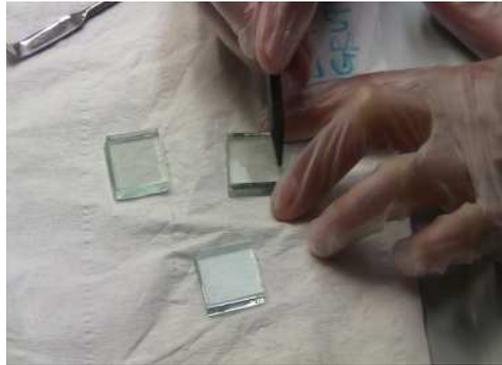
- Introdurre il vetrino delicatamente in un piccolo becker (da 50-100 ml) mantenendo la faccia coperta di ossido rivolta verso l'alto (figura 9).
- Versare nel becker in modo molto lento e dedicato il succo di mirtillo / frutta blu fino a coprire il vetrino per qualche millimetro. Chiudere il becker con film plastico (film per alimenti, Parafilm sono adatti). Coprire tutto il becker con carta stagnola e riporre in armadietto al chiuso, lontano dalla luce.
- Lasciare immerso il vetrino nel colorante fino a quando non si è pronti ad assemblare la cella (è conveniente lasciare in immersione il vetrino per una notte. Per una procedura ottimale sarebbe conveniente eseguire l'esperienza suddividendola in porzioni da eseguirsi in giorni successivi o poco distanti nel tempo. Ulteriori informazioni al riguardo sono riportate in appendice).



*Figura 9: Immersione dell'elettrodo nel colorante*

#### 5) Preparazione del contro-elettrodo (catodo)

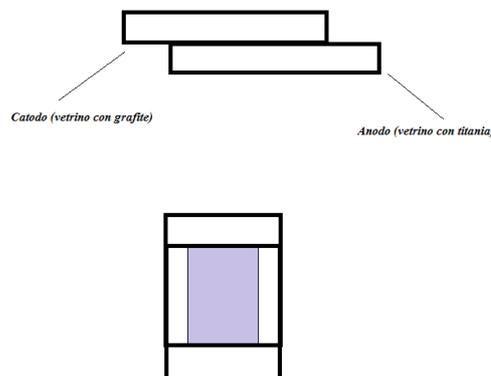
- Lavare nuovamente con etanolo il vetrino che costituirà il contro-elettrodo.
- Se necessario, determinare nuovamente il lato conduttore della seconda lastrina e coprirlo con uno strato di carbonio, usando una matita morbida (HB) (figura 10).
- Lo strato di carbonio così depositato agisce da catalizzatore per la reazione di rigenerazione dello iodio e deve perciò coprire interamente il vetrino, tranne per una striscia di 4-5 mm lungo un lato, che servirà come contatto elettrico.



*Figura 10: Deposizione della grafite sul controelettrodo*

## 6) Assemblaggio della cella

- Rimuovere il vetrino con l'ossido di titanio dal colorante, tamponarlo con carta da laboratorio senza premere sullo strato di titania e lavarlo con poco etanolo introducendolo in un becker e muovendolo leggermente.
- Estrarre nuovamente il vetrino e tamponarlo come nel primo caso. Asciugarlo delicatamente e accuratamente anche sui bordi.
- Appoggiare il vetrino colorato su una superficie piana con il lato con lo strato di ossido/colorante rivolto verso l'alto e adagiare delicatamente sopra di esso il contro-elettrodo con lo strato di carbonio rivolto verso il basso, lievemente sfalsato in modo da lasciare esposto il bordo scoperto della prima lastrina: le due estremità libere, di 4-5 mm serviranno come contatti elettrici (figura 11).



*Figura 11: Unione dei due elettrodi*

- Sollevare i due vetrini mantenendoli nella loro posizione e bloccarli con due clips (figura 12).

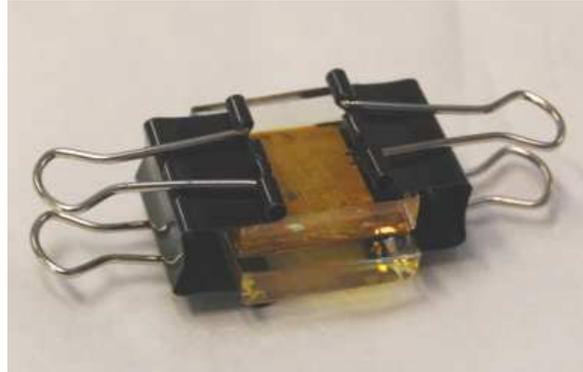
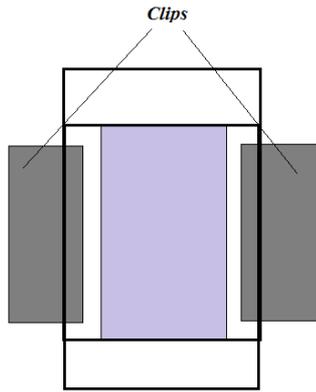


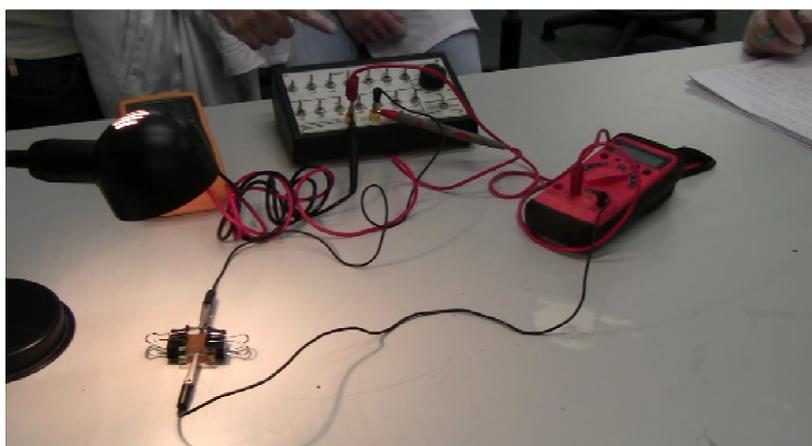
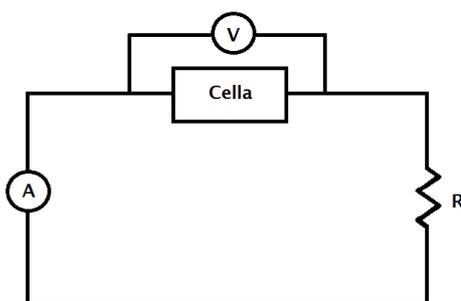
Figura 12: Fissaggio dei vetrini con le clips

- Depositare 1 o 2 gocce di soluzione elettrolitica sul bordo del dispositivo: per azione capillare, il liquido bagnerà completamente lo strato di ossido di titanio tra i due vetrini (per favorire questo processo è utile togliere e rimettere alternativamente le due clips o semplicemente allentarne la presa)
- Rimuovere l'eccesso di elettrolita dalle aree esposte dei due vetrini con carta da laboratorio. I contatti devono essere ben asciutti per poter verificare il funzionamento della cella.
- La cella fotovoltaica di Grätzel, così assemblata, è pronta per la caratterizzazione elettrica.

## 7) Misura delle caratteristiche elettriche

- Collegare la cella al multimetro mediante cavi che possiedono pinze a coccodrillo: l'elettrodo negativo è il vetrino coperto di  $\text{TiO}_2$  (cavo nero), mentre quello positivo è il contro-elettrodo (cavo rosso). È così possibile misurare la differenza di tensione ai capi della cella e la corrente massima prodotta. La caratterizzazione minima consiste nel ricavare separatamente (sotto illuminazione) la corrente prodotta e il potenziale.
- Avendo a disposizione uno strumento che funzioni come utilizzatore della corrente prodotta (resistenza variabile) e che possa regolare su un intervallo opportuno le resistenze inserite nel circuito, è possibile misurare contemporaneamente l'intensità e il potenziale di cella, grazie a due multimetri inseriti rispettivamente in serie ed in parallelo al circuito

(figura 13). Dai dati di intensità e potenziale gli studenti possono ricavare la potenza massima erogata dalla cella.



*Figura 13: Schema dei collegamenti elettrici per il circuito per la misura.*

## APPENDICE A - INFORMAZIONI AGGIUNTIVE

a) **Sinterizzazione:** prima di portare i vetri a 350°C può essere utile fare due step da 20 minuti, il primo a 60°C e il secondo 120°C, per evitare lo shock termico. Queste temperature sono da ritenersi approssimative, specialmente in considerazione del tipo di sistema di riscaldamento utilizzato. Quando si usa la piastra riscaldante (agitatore magnetico / riscaldatore) può essere utile creare un piccolo "fornetto" o "canna fumaria" con la carta d'alluminio (quella per alimenti) che copra i vetri (evitando il contatto con la titania) in modo da ottenere una temperatura più omogenea (questa procedura aiuta anche a raggiungere temperature più elevate nelle piastre che non arrivano a 350°C). Può risultare utile controllare la temperatura della piastra con un termometro esterno o ancora meglio con una sonda dedicata, controllata dalla stessa piastra. In alternativa alla piastra si può utilizzare la pistola ad aria calda (sverniciatore da carrozziere) con le stesse modalità di tempo e temperatura, avendo cura di tenere i vetri in posizione fissandoli in qualche modo, dato che la pistola produce un getto d'aria calda che può anche rovesciarli. In qualunque caso, si presti la massima attenzione nell'operare con questi sistemi di riscaldamento, poiché esiste un rischio di causarsi bruciate, anche gravi. Nel caso in cui si disponga di una muffola da laboratorio si può svolgere lo stesso trattamento, andando anche a temperature superiori (400-450°C, con una rampa che porta la temperatura da 25 a 450°C in 50 minuti e la mantiene 30 minuti a 450 con successivo raffreddamento lento.)

b) **Misura delle proprietà della cella:** la misura delle proprietà di conversione fotoelettrica della cella è l'ultimo passo della nostra esperienza, ed è il modo per testare se la cella da noi creata è funzionante o meno. In primo luogo bisogna posizionare la cella sotto una fonte luminosa. Per una caratterizzazione attendibile la fonte luminosa deve irradiare sulla cella una potenza di 1000 W/m<sup>2</sup>, che è più o meno la potenza irradiata dal Sole sulla superficie terrestre. Questo vuol dire che sulla nostra cella verrà irradiata una potenza incidente di:

$$P_{\text{incidente}} = P_{\text{fonte}} * \text{Area attiva della cella} = 0,1 \text{ W/cm}^2 * 6,25 \text{ cm}^2 \text{ (in realtà è minore perchè non tutta l'area } 2,5 \times 2,5 \text{ cm è ricoperta dalla titania)} = 0,625 \text{ W}$$

Questo dato è molto importante perché ci servirà per calcolare l'efficienza di conversione fotovoltaica della cella ( $\eta$ ) che è il valore che ci dice quanto è performante il dispositivo.

Nel caso in cui non si disponesse di una lampada di tale potenza sarà utile cercare di capire quale è la potenza incidente sulla cella, e mantenere tale geometria del sistema (distanza lampada-cella) per tutte le misure, in modo da poter avere risultati confrontabili.

In ogni caso risulta indispensabile conoscere la potenza irradiata sulla superficie della cella: si può calcolare utilizzando una sonda al silicio (che è una cella fotovoltaica comune, di efficienza nota, che per mezzo di un multimetro può dare il dato di voltaggio e quindi di potenza irradiata ad una data distanza). Nel caso in cui non si disponesse di una sonda al silicio si può cercare di risalire a tale dato dal produttore della lampada.

Per l'esecuzione delle esperienze didattiche non è necessario disporre di attrezzature sofisticate per una caratterizzazione che ha carattere qualitativo /semi-quantitativo.

Un accorgimento importante è che la cella sia perpendicolare al fascio di luce incidente.

È necessario che tutte le misure siano fatte nelle stesse condizioni (distanza lampada-cella, inclinazione della cella rispetto alla lampada, creare isolamento luminoso da altre fonti ecc) in modo da poter confrontare i risultati ottenuti per le diverse celle.

Si consideri che le DSC costruite in laboratorio hanno efficienze dell'ordine dell' 11%, con record del 15% ottenuti con particolari accorgimenti e modificazioni dei materiali utilizzati. Le celle al silicio che vengono utilizzate nelle reti domestiche hanno efficienze del 15% (tenuto conto che si tratta di grandi moduli che vengono installati sui tetti).

La caratterizzazione della cella richiede un circuito elettrico con il quale effettuare la misura, formato dalla cella, da una resistenza variabile (reostato) posta in serie con la cella, e da due multimetri utili all'esecuzione le misure: un voltmetro (V) posto in parallelo alla cella (o alla resistenza) per misurare le differenze di potenziale ed un amperometro (A) posto in serie alla cella e alla resistenza per misurare la corrente generata.

La procedura per la misura della cella ci fornirà una curva detta "caratteristica I-V" che mette in relazione la differenza di potenziale generato dalla cella (V) con l'intensità di corrente generata (I) sotto un illuminamento costante al variare di una resistenza (R). Variando opportunamente la resistenza si

ottengono coppie di valori che possono essere tabulati e messi in grafico (figura A1).

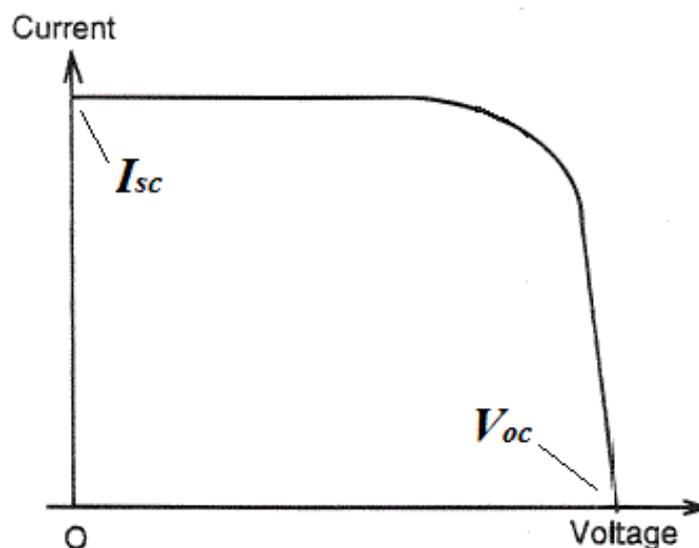


Figura A1: Curva Intensità-Potenziale (I-V) per la caratterizzazione di una cella fotovoltaica.

I primi due punti della curva da ricavare sono quelli dell'intensità di corrente di corto circuito ( $I_{sc}$ ) ovvero quando la resistenza è nulla, e la differenza di potenziale in circuito aperto ( $V_{oc}$ ) ovvero quando la resistenza è massima. Questi due punti ci daranno la massima corrente generabile dalla cella e la massima differenza di potenziale. Essi sono misurabili semplicemente collegando il multimetro alla cella, in modo da leggere la corrente o il potenziale. Questi dati costituiscono la caratterizzazione "minima" che si può eseguire sulle celle preparate dagli studenti.

Volendo eseguire una caratterizzazione più rigorosa e completa, questi due punti si trovano collegando direttamente l'amperometro ai capi della cella sotto illuminamento ( $I_{sc}$ ) in modo da non avere altre resistenze nel circuito (quindi approssimando a resistenza nulla) e aumentando la resistenza del reostato alla sua massima potenza nel circuito costruito in precedenza ( $V_{oc}$ ).

Mantenendo sempre il circuito disposto come in precedenza si possono determinare tutti i punti I-V per ottenere la curva, partendo da resistenza zero, aumentando di volta in volta la resistenza e segnandosi i valori di intensità di corrente letta sull'amperometro e di differenza di potenziale letta sul voltmetro.

Una volta ottenuta tutta la curva si può calcolare l'efficienza ( $\eta$ ) della cella, che è definita come il rapporto percentuale tra la potenza massima erogata dalla cella ( $P_{max}$ ) e la potenza incidente sulla cella ( $P_{in}$ ) con la seguente formula:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} 100$$

Dove  $P_{max}$  è la potenza massima generata dalla cella calcolata come  $P_{max} = V_{max} * I_{max}$  con  $V_{max}$  e  $I_{max}$  valori di V e di I che forniscono il punto di picco della potenza (figura A2). Ottenendo un buon numero di punti, è possibile ricavare  $P_{max}$  con sufficiente attendibilità.

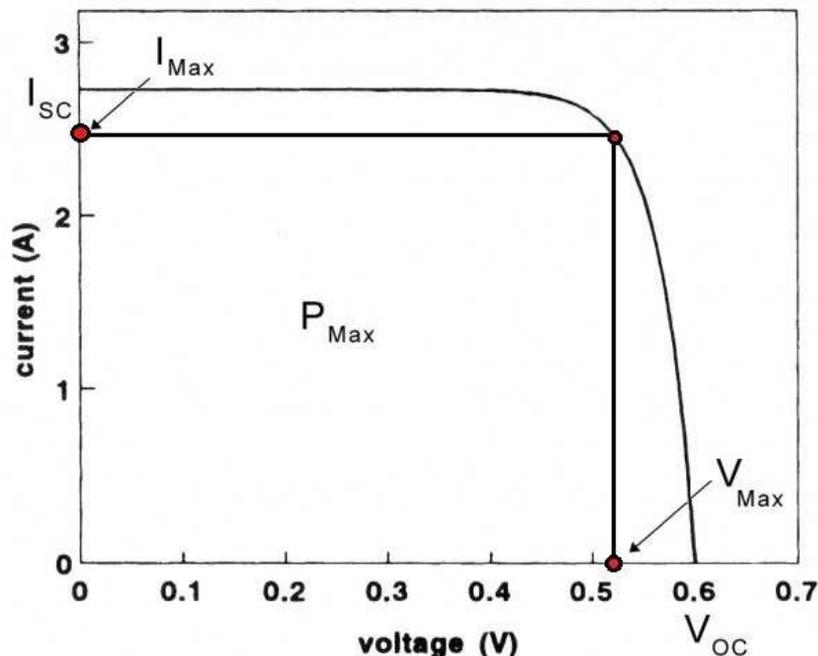


Figura A2: Curva Intensità-Potenziale (I-V). La massima potenza erogata dalla cella è ottenuta in corrispondenza di  $V_{max}$  ed  $I_{max}$ .

Ciò vuol dire che se la cella trasformasse tutta la potenza irradiata dalla fonte luminosa in potenza elettrica avremmo un'efficienza del 100%, cosa in realtà non ottenibile.

## APPENDICE B - COSTI E REPERIBILITÀ DEI MATERIALI

Biossido di titanio: si può acquistare in qualsiasi azienda che venda prodotti chimici, ad esempio Sigma Aldrich (prezzo circa: 120 euro per 100g), NEUVENDIS (prezzo di circa 350 euro per 10 Kg, quantità però enorme...).

Vetri conduttivi: sono acquistabili da aziende specializzate, ma si possono spesso reperire presso un vetraio locale. Qualunque vetro che sia ricoperto da uno strato conduttivo dovrebbe essere in grado di funzionare. Si tratta di vetro relativamente comune, utilizzato per la preparazione dei frigo da supermercato o per i distributori di bevande. E' consigliato richiedere qualche pezzo di scarto da un vetraio ed eseguire delle prove, selezionando i vetri che forniscono i risultati migliori.

Se si dispone di qualche semplice strumentazione per tagliare il vetro si può risparmiare sui costi di taglio o addirittura si possono acquistare degli scarti di taglio della lavorazione.

Colorante: Un litro di "Santal mix di frutti blu" costa circa tra 1 e 2 euro e si trova in qualsiasi supermarket. E' estremamente comodo utilizzarlo poiché l'assenza di residui, fibre ed altro semplifica molto la preparazione della cella. In alternativa è possibile macinare direttamente i frutti (more o mirtili) in un mortaio e filtrare il succo nel miglior modo possibile, per ottenere un colorante più concentrato che può anche essere diluito.

Elettrolita: iodio, ioduro di potassio e glicole etilenico si possono acquistare da aziende che vendano agenti chimici.

Tester / multimetro: si può facilmente acquistare nei negozi che vendono materiali per l'elettronica o da elettricisti. Il costo è di qualche decina di euro l'uno. Per eseguire la caratterizzazione della cella converrebbe utilizzare multimetri piuttosto precisi e una sorgente di illuminazione piuttosto potente.

Potenziometro: una resistenza variabile come un potenziometro "slider" si può acquistare in qualsiasi negozio che venda materiali per l'elettronica e sia ben fornito. Il costo è di circa 2 euro l'uno.

Sorgente di luce: La sorgente di luce deve essere una lampada di minimo 40 W, possibilmente anche maggiore. Sorgenti come le abat-jour possono già essere sufficienti per poter verificare che la cella produca una differenza di potenziale e una corrente. Per effettuare una buona caratterizzazione della cella ricavando

molti punti "Intensità - Potenziale" conviene utilizzare una sorgente piuttosto potente.

### Riferimenti:

1) Greg P. Smestad and Michael Grätzel, *Journal of Chemical Education*, **1998**, Vol. 75 No. 6, 752-756.

2) Università di Torino: materiale informativo e video - Laboratori PLS -Progetto Lauree Scientifiche.  
[http://scienzadeimateriali.campusnet.unito.it/do/home.pl/View?doc=PLS\\_Prodot ti.htm](http://scienzadeimateriali.campusnet.unito.it/do/home.pl/View?doc=PLS_Prodot ti.htm)

3) Progetto LS OSA lab: <http://ls-osa.uniroma3.it/>

4) Polo Solare Organico Regione Lazio - CHOSE - video: "La realizzazione delle celle solari organiche" <http://www.chose.uniroma2.it/gallery/video-gallery.html>