



*LEDS Divulga*

*organizzato da*

**LEDS - L'Energia Degli Studenti**

---

# IL FOTOVOLTAICO TRASPARENTE

---

Sviluppi per la diffusione invisibile dell'energia solare

Approfondimento a cura di:

Francesco Borgognoni

Alessandro Braggion

Marco Cervi

A.A. 2016/17

**LEDS – L'Energia Degli Studenti**

Associazione di studenti di Ingegneria dell'Energia, Energia  
Elettrica ed Energetica dell'Università degli Studi di Padova

Quale sarà il futuro del fotovoltaico? Sebbene oggi non vi siano più dubbi sul fatto che l'energia solare rivestirà, nei prossimi decenni – o forse secoli, un ruolo fondamentale per la sopravvivenza della nostra civiltà<sup>1</sup>, è tuttavia lecito affermare che permangano ancora incertezze e perplessità riguardo ad essa. In particolare, ci si chiede quale tecnologia sarà in grado, nel prossimo futuro, di soppiantare le attuali celle al silicio, superandole in efficienza, convenienza e versatilità.

## New Frontiers

Quando pensiamo ad una tecnologia di questo tipo, la immaginiamo capace di integrarsi in modo semplice ed efficace con l'ambiente che la circonda, minimizzando ingombro ed impatto visivo. Ed è per questo che, da tempo, ingegneri e architetti (sì, ho detto architetti) studiano soluzioni che riescano a sposare il fotovoltaico con il contesto urbano, per siglare il connubio tra energia pulita, edilizia sostenibile e design<sup>2</sup> (BIPV – Building Integrated Photovoltaics<sup>3</sup>).

Proprio in questo senso si sta muovendo la ricerca sulle celle fotovoltaiche trasparenti, il cui eventuale arrivo sul mercato aprirebbe la strada ad incredibili innovazioni basate sul solar energy harvesting<sup>4</sup>. L'idea è quella di trasformare i vetri di case ed automobili in generatori di energia a basso voltaggio, sfruttando la loro frequente esposizione alla radiazione solare, per sostenere l'autosufficienza energetica dell'edificio (o del mezzo) sul quale sono installati.

Come è noto, i pannelli fotovoltaici attualmente in uso vengono realizzati a partire da celle semiconduttive di silicio cristallino, che vengono disposte all'interno di una griglia di contatti metallici (i quali non concorrono all'assorbimento della radiazione solare, anzi, la riflettono). Un grosso limite all'efficienza intrinseca di tale tecnologia è dato dalle caratteristiche fisiche del silicio, che è in grado di convertire in elettricità una banda limitata dello spettro solare<sup>5</sup>.

- I Film Sottili

Utilizzando silicio amorfo (invece che cristallino), o altri materiali (quali CdTe<sup>6</sup>, CdS, CIS, CIGS<sup>7</sup>), è possibile realizzare, in modo relativamente economico, film sottili traslucidi o parzialmente trasparenti, con un rendimento compreso tra il 6 e il 10% (che però tende a diminuire nel tempo<sup>8</sup>).

- Le Perovskiti

La ricerca si è adoperata molto per cercare materiali alternativi al silicio, i più promettenti dei quali sembrano essere le perovskiti<sup>9</sup>, una famiglia di minerali sintetici (solo alcuni dei quali sono semiconduttori) di varia composizione<sup>10</sup>. Questi ossidi hanno destato grande entusiasmo nella comunità scientifica, poiché sembrano in grado di raggiungere rendimenti elevati (teoricamente maggiori del 20%<sup>11</sup>) nelle loro conformazioni ibride (che però fino a poco tempo fa contenevano

---

<sup>1</sup> <https://goo.gl/1cyTfz>

<sup>2</sup> <http://tinyurl.com/jtocq85>

<sup>3</sup> <https://wbdg.org/resources/bipv.php>

<sup>4</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Energy\\_harvesting](https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_harvesting)

<sup>5</sup> <http://large.stanford.edu/courses/2010/ph240/kalantarian1/>

<sup>6</sup> Il Telleruro di Cadmio (CdTe), per quanto efficiente, è tuttavia tossico <http://tinyurl.com/h298nq6>

<sup>7</sup> <http://www-3.unipv.it/leos/slides/lecture/Romeo.pdf>

<sup>8</sup> [http://www.nextville.it/Moduli\\_fotovoltaici/457/Moduli\\_in\\_silicio\\_amorfo](http://www.nextville.it/Moduli_fotovoltaici/457/Moduli_in_silicio_amorfo)

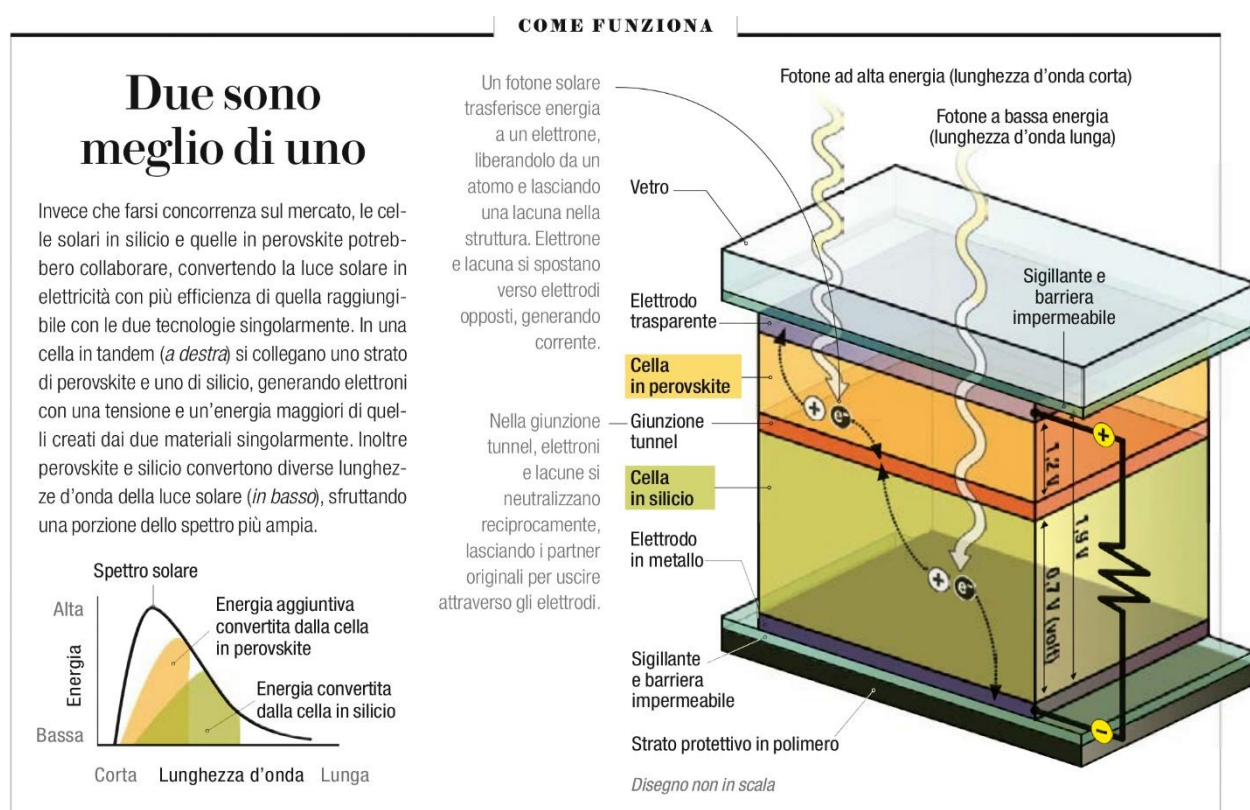
<sup>9</sup> <http://www.fotovoltaicosulweb.it/guida/la-perovskite-per-le-celle-solari-del-futuro.html>

<sup>10</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Perovskite\\_\(structure\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Perovskite_(structure))

<sup>11</sup> <http://tinyurl.com/jbjnjbj>

piombo, tossico e pericoloso<sup>12</sup>) e assorbono radiazione in una banda dello spettro solare più energetica rispetto al silicio; inoltre, possono essere depositati su lastre di vetro o substrati plastici flessibili, tramite un processo relativamente semplice a basse temperature, così da formare pannelli semi-trasparenti, rigidi o pieghevoli (a film sottile). Un gruppo di ricerca di Singapore ha persino riscontrato nelle perovskiti proprietà che sembrano adatte alla realizzazione di celle fotovoltaiche touchscreen<sup>13</sup>.

Per quanto promettenti, questi materiali presentano ancora grossi problemi di stabilità ed efficienza. Più che a soppiantare completamente il silicio, questa tecnologia sembra per ora destinata ad affiancarlo in sistemi ibridi perovskite-silicio<sup>14</sup>.



### ■ Fotovoltaico Organico

Una soluzione alternativa può essere data dal cosiddetto “fotovoltaico organico” (OPV), una tecnologia che sostituisce i semiconduttori inorganici con speciali materiali plastici<sup>15</sup>, particolarmente adatti alla realizzazione di pannelli flessibili a basso costo. Sebbene questi polimeri siano estremamente versatili e si prestino ad una progettazione delle superfici su scala molecolare, sono ben lontani dall’essere commercialmente pronti, poiché presentano grossissimi

<sup>12</sup> [http://www.lescienze.it/lanci/2015/06/09/news/cnr\\_energia\\_solare\\_e\\_pulita-2643619/](http://www.lescienze.it/lanci/2015/06/09/news/cnr_energia_solare_e_pulita-2643619/)

<sup>13</sup> <http://www.triplepundit.com/2014/03/new-solar-cell-doubles-touch-screen/>

<sup>14</sup> <http://www.rinnovabili.it/energia/fotovoltaico/fotovoltaico-in-silicio-e-perovskite-666/>

<sup>15</sup> <http://www.fotovoltaicosulweb.it/guida/il-fotovoltaico-organico-cos-e-e-quali-prospettive.html>

problemi di rendimento e durabilità. Ed è per questo che la ricerca sull'OPV si è fortemente intensificata negli ultimi anni, migliorandone le prestazioni e scoprendone interessanti proprietà<sup>16</sup>.

## Full Transparent OPV – I Risultati Del MIT

Proprio sul fotovoltaico organico gli ingegneri americani Vladimir Bulović, Richard Lunt e Miles Barr, hanno basato il loro studio<sup>17</sup> sulle celle fotovoltaiche trasparenti, presso l'Energy Frontier Research Center For Excitonics<sup>18</sup> (EFRC - CE) del Massachusetts Institute of Technology (MIT).

Quando nel 2009 i tre ricercatori hanno cominciato, l'unico modo allora noto per rendere apprezzabilmente trasparente un modulo fotovoltaico era quello di rendere i wafer di silicio talmente sottili da risultare traslucidi, ma contemporaneamente fragili e non particolarmente efficienti; un metodo alternativo consisteva nel segmentare il pannello in modo da lasciare filtrare la luce tra una cella e l'altra. In entrambi i casi, però, il risultato non era soddisfacente, né in termini di rendimento, né in termini di resa estetica. Inutile dire che la luce passante era insufficiente ad illuminare un ambiente in modo gradevole. Lunt e colleghi si chiedevano allora: come fare, dunque, a realizzare un dispositivo che sia in grado di assorbire energia solare, lasciandone contemporaneamente filtrare la luce? Si tratta all'apparenza di un paradosso.

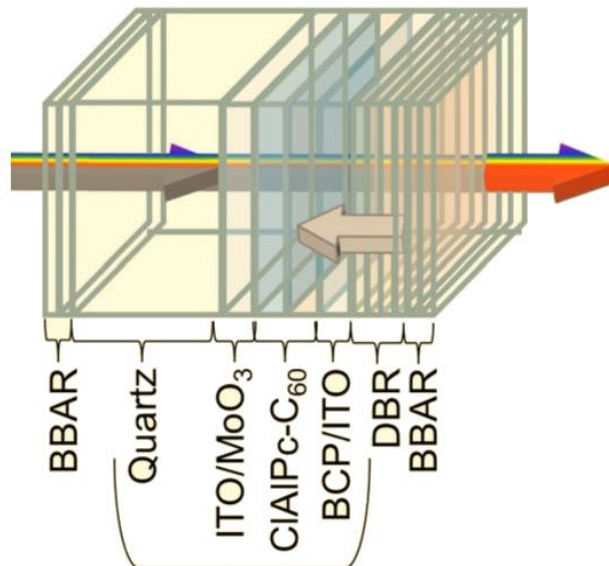
La soluzione da loro trovata è, in realtà, concettualmente semplice: è sufficiente costruire un pannello che sia trasparente alla componente visibile dello spettro solare, ma che riesca a raccogliere la radiazione nelle frequenze dell'ultravioletto o dell'infrarosso.

### ■ Il Design

In tre anni di lavoro, a base di ingegneria molecolare e progettazione ottica, il team di ricerca è riuscito ad ottenere una cella sperimentale (di qualche mm<sup>2</sup>) capace di convertire in campo elettrico le radiazioni UV e NIR (Near Infra-Red), ma di lasciar passare buona parte della luce visibile che la attraversa.

Per fare ciò, gli ingegneri hanno applicato ad un substrato in silice<sup>19</sup> un rivestimento polimerico semiconduttivo<sup>20</sup>, racchiuso tra due strati di ossido di indio-stagno (ITO), i quali fungono da elettrodi trasparenti. Per aumentare l'efficienza del dispositivo viene steso un particolare film (anch'esso trasparente alla luce visibile) che riflette determinate lunghezze d'onda (DBR – Distributed

Bragg Reflector<sup>21</sup>): qualora una parte della radiazione utile sfuggisse allo strato attivo, verrebbe poi riflessa di nuovo attraverso di questo, per essere assorbita. La cella può essere infine rivestita



<sup>16</sup> <http://www.qualenergia.it/articoli/20150713-fotovoltaico-la-cella-organica-che-accumula-energia-per-settimana>

<sup>17</sup> Si può scaricare la pubblicazione originale (2012) qui: <http://hdl.handle.net/1721.1/71948>

<sup>18</sup> <http://science.energy.gov/bes/efrc/centers/ce/>

<sup>19</sup> Il vetro comune (sodico-calcico) non è trasparente agli UV, mentre il quarzo (SiO<sub>2</sub>) sì (<http://tinyurl.com/glb6ap2>)

<sup>20</sup> Ftalocianina Cloro-Alluminio (CIAIPc <http://tinyurl.com/hplodpu>) come donatore, Fullerene (C<sub>60</sub>) come accettore

<sup>21</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Distributed\\_Bragg\\_reflector](https://en.wikipedia.org/wiki/Distributed_Bragg_reflector)

con speciali materiali protettivi anti-riflesso (BBAR – Broad-Band Anti-Reflective), per ridurre la dispersione della radiazione incidente.

Ciascuno strato, di spessore inferiore al micrometro ( $10^{-7}$ ÷ $10^{-9}$ m), è stato applicato in fase di vapore (Thermal-Evaporation Physical Vapour Deposition – TEPVD<sup>22</sup>), oppure tramite polverizzazione in camera da vuoto (Radio Frequency Sputtering<sup>23</sup>), in processi a temperatura ambiente che gli autori affermano essere completamente ecologici e non energivori.

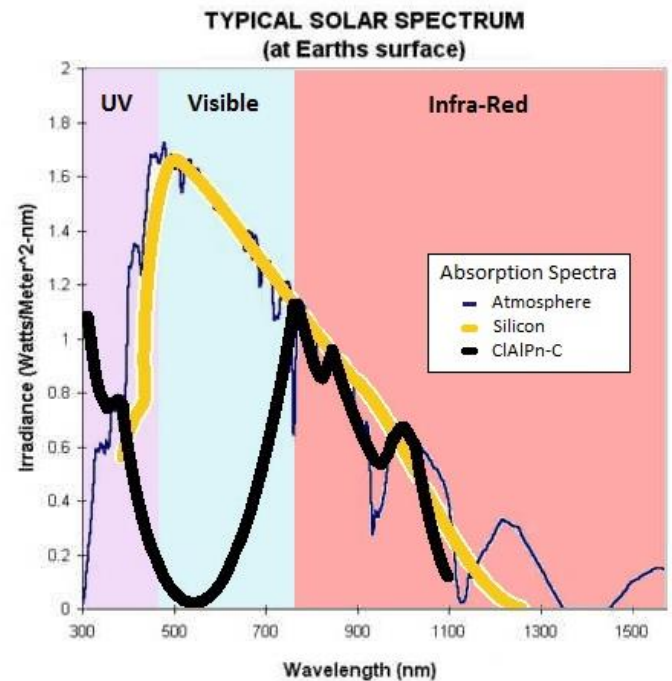
#### ▪ Efficienza

Messa la loro cella alla prova, i tre ricercatori hanno concluso che essa era in grado di assorbire raggi UV e NIR con un'efficienza di conversione pari a circa il 2%. La luce visibile che riusciva a passare attraverso di essa era il 65-70% di quella incidente, mentre quella riflessa meno del 10%; il livello di trasparenza, dunque, era comparabile o superiore a quello di vetri colorati o oscuranti attualmente in commercio. Le grandezze elettriche misurate dal team del MIT sono: la tensione generata a vuoto, che si attestava attorno ai 700÷800 mV, e la densità di corrente in corto circuito, pari a circa 20÷50  $\mu\text{A}/\text{mm}^2$ , entrambe variabili a seconda dello spessore con cui venivano realizzati gli strati. Utilizzando una batteria di queste celle collegate in serie, i tre scienziati americani sono riusciti ad alimentare un piccolo schermo LCD sfruttando soltanto la luce ambientale, dimostrando così le potenzialità del loro lavoro nel campo dell'energy harvesting per l'elettronica e i dispositivi wearable.

#### ▪ Il Futuro

Sebbene il prototipo arrivi a convertire solo il 2%<sup>24</sup> della radiazione incidente, Lunt e i suoi colleghi sono fiduciosi che il loro sistema possa raggiungere un'efficienza superiore al 10%, pur mantenendo relativamente bassi i costi di produzione. C'è da dire, però, che per una tecnologia di questo tipo l'efficienza non è l'elemento più importante: gli ingegneri ora sono maggiormente preoccupati per la durabilità e la dimensione che i pannelli potranno raggiungere.

Se immaginiamo, infatti, un futuro in cui buona parte dei vetri saranno sostituiti dal fotovoltaico trasparente, capiamo come un pannello di pochi  $\text{cm}^2$  che deteriora in breve tempo non possa, per quanto efficiente, costituire la soluzione ideale. Viceversa, un OPV trasparente con rendimento pari anche solo al 5%, ma soddisfacente le altre specifiche, potrebbe essere in grado di fornire anche fino al 25% della potenza richiesta da un intero grattacielo. Infatti, l'ampia superficie utile, offerta dalle vetrate dall'edificio, aumenterebbe di molto l'energia solare raccolta, mentre la capacità dei pannelli di assorbire radiazione IR ridurrebbe in estate i consumi per il



<sup>22</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Evaporation\\_\(deposition\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Evaporation_(deposition))

<sup>23</sup> [http://www.phasis.ch/index.php?option=com\\_content&view=article&id=57&Itemid=65](http://www.phasis.ch/index.php?option=com_content&view=article&id=57&Itemid=65)

<sup>24</sup> L'efficienza del dispositivo diminuisce all'aumentare del grado di trasparenza. Ad esempio, l'azienda tedesca Heliatek GmbH produce pannelli OPV con rendimenti del 7%, ma trasparenti al 40% (<http://tinyurl.com/hlfdzta>)

raffrescamento. Il tutto si potrebbe ottenere senza intaccare l'estetica ed il decoro architettonico. Per case e palazzi di nuova costruzione invece, si può pensare di rivestire direttamente l'interno dei vetri isolanti a doppia lastra, abbattendo ulteriormente i costi.

#### ▪ Verso L'Infinito...

Per favorire l'ingresso nel mercato delle loro idee, Barr, Lunt e Bulović hanno fondato nel 2011, assieme ad altri colleghi, una startup in California, con il primo stabilimento pilota costruito nella Silicon Valley. E, a testimonianza della fede nelle loro ricerche, l'hanno chiamata Ubiquitous Energy<sup>25</sup>: letteralmente, "Energia Onnipresente".

Dopo anni di lavoro, Ubiquitous Energy ha brevettato una tecnologia denominata ClearView Power<sup>26</sup>, che non è molto lontana dall'essere finalmente commercializzata. La prima applicazione reale potrebbe arrivare proprio sui nostri smartphone e tablet, o così almeno si augura Miles Barr<sup>27</sup>: in Ubiquitous Energy sperano infatti, con la loro idea, di rivoluzionare il mercato di questi dispositivi, convertendo i grandi (ed energivori) display in energy harvester, che riescano a ricaricare le batterie semplicemente grazie alla luce ambientale<sup>28</sup>. Questo sarebbe solo il passo intermedio che consentirebbe poi di realizzare il loro progetto più ambizioso: portare ClearView Power sui grattacieli di tutto il mondo e rendere ogni edificio più smart ed efficiente.

#### ▪ ...E Oltre

Non pago dei risultati ottenuti al MIT, Richard Lunt ha portato la sua competenza nel campo della progettazione molecolare alla Michigan State University, dove ha contribuito allo sviluppo di concentratori solari luminescenti (LSC<sup>29</sup>) trasparenti<sup>30</sup>. Questa tecnologia, che potrebbe costituire una soluzione alternativa nel breve termine, prevede l'utilizzo di speciali film polimerici che, depositati sui vetri delle finestre, sono in grado di assorbire radiazione UV o NIR e di concentrarla (grazie alla rifrazione interna al materiale stesso) sulla cornice del modulo, la quale funge da cella fotovoltaica (realizzabile anche con sistemi tradizionali al silicio).

Sebbene la resa estetica possa non essere all'altezza di un eventuale pannello OPV trasparente, questa tecnologia sembra, per ora, più matura ed abbordabile nel breve termine; nonostante infatti il rendimento del prototipo di Lunt non superi l'1%, a rendere gli LSC così appetibili è la semplicità con cui si potrà nei prossimi anni riprodurli a dimensioni paragonabili a quelle di comuni vetrate o finestre.

*Articolo Originale:* <http://energy.mit.edu/news/transparent-solar-cells/>

---

<sup>25</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Ubiquitous\\_Energy](https://en.wikipedia.org/wiki/Ubiquitous_Energy)

<sup>26</sup> <http://ubiquitous.energy/technology/>

<sup>27</sup> <http://tinyurl.com/jt39dg2/>

<sup>28</sup> <http://ubiquitous.energy/mobile/>

<sup>29</sup> <http://www.solar-facts-and-advice.com/luminescent-solar-concentrator.html>

<sup>30</sup> <http://www.wired.co.uk/article/transparent-solar-cells>