

Nye anvendelser af solenergi, I

Nye solcelletyper anvender organiske materialer i stedet for siliciumkrystaller. De er billigere at producere, men er endnu ikke effektive nok

Af Brian Seger og Signe Teuber Henriksen, The University of Queensland

Når talen falder på omdannelse af solenergi til nyttearbejde, vil de fleste tænke på den klassiske siliciumsolfcelle. Silicium-solfcellen har været kommercielt tilgængelig i årtier og har adskillige nicheanvendelser, såsom i solcellelommeregner, til at energiforsyne campingvogne og som energiforsyning i rummet. Pga. de høje omkostninger forbundet med fremstillingen af disse solceller har de dog ikke haft nogen stor betydning for den globale produktion af elektrisk strøm, og mindre end 0,1% af verdens elforbrug kommer i dag fra solceller [1]. Pga. svindende oliereserver, global opvarmning og ønsker om national energiafhængighed må forskere anvende innovativ tænkning for at finde nye måder at udnytte solens energi på. I denne og to efterfølgende artikler diskuteres tre nye anvendelser af solenergi: 1) brug af organiske solceller; 2) produktion af brint-brændstof ved vandspaltning; 3) fotokatalytisk nedbrydning af forurening.

Det fotokatalytiske system

Når en foton rammer et fotoaktivt materiale, vil fotonens energi overføres til materialet, hvilket medfører at en elektron eksiteres til et højere energiniveau (figur 1). Det er kendt som den fotoelektriske effekt (den var Albert Einstein den første til at forklare, og derfor modtog han Nobelprisen i fysik i 1921). Når elektronen eksiteres til det højere energiniveau, efterlades der et tomrum i fotokatalysatorens lavere energiniveau.

Dette tomrum kaldes typisk et *hul* (h^+ , figur 1). Under normale omstændigheder vil elektronen og hullet genforenes, og elektronen vil afgive sin energi i form af varme. Men man kan designe et fotokatalytisk system, hvor elektronen, efter at være blevet adskilt fra hullet, overføres til et elektrisk kredsløb. I dette kredsløb kan elektronen udnytte sin høje energi til at udføre arbejde. Når det fotokatalytiske system er korrekt designet, vil elektronen, efter at have afgivet noget af sin energi til kredsløbet, ende på et energiniveau, der svarer til hullets. Det er vigtigt, at elektronens energi er højere end hullets, så det er energetisk favorabelt, at genforeningen af elektron og hul finder sted. Det er dog også ønskeligt at minimere energitabet (i form af varme), der er forbundet med genforeningen. Det betyder, at i et optimalt designet fotokatalytisk system ender elektronen med en energi, der er marginalt højere end hullets.

Et fotokatalytisk system fungerer ved, at en elektron eksiteres og overføres til et kredsløb, hvor den afgiver sin energi i form af nyttearbejde for herefter at vende tilbage til sit oprindelige energiniveau i fotokatalysatoren. Den maks. spændingsforskel (U) i kredsløbet er givet ved forskellen mellem elektronens energi ved anoden og hullets energi ved katoden. I følge Ohms lov, $P = U \cdot I$, er effekten af kredsløbet givet ved spændingsforskellen (U) multipliceret med antallet af elektroner, der går gennem kredsløbet (I).



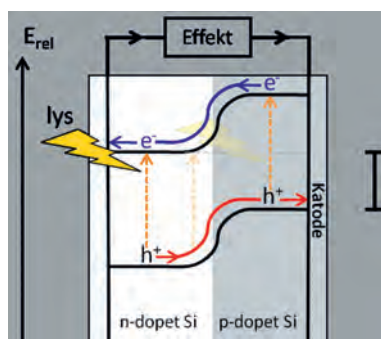
Et kreativt eksempel på en af de mange mulige anvendelser af en ny solcelletype, der anvender polymerer i stedet for silicium til at producere elektricitet. Polymersolfcellen er meget fleksibel og kan monteres på mange forskellige overflader, f.eks. på en hat som vist her. Solcellehatten kan anvendes som energikilde for bærbar elektronik.

De forskellige typer af solceller

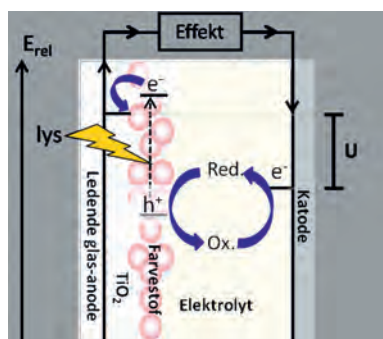
Det foregående afsnit beskriver de grundlæggende principper for alle solceller. Der er dog utallige måder, hvorpå disse principper kan implementeres, hvilket resulterer i mange forskellige typer og varianter af solceller.

Krystallinske siliciumsolfceller

I standard siliciumsolfcellen, som er blevet brugt i årtier, anvendes en ekstremt ren siliciumkrystal, hvor der er en spændingsforskel på 1,2 V mellem den lave og den høje energitilstand for elektronen. Den første siliciumsolfcelle, der var effektiv nok til at kunne drive dagligdags elektriske apparater, blev udviklet på Bell-laboratoriet i begyndelsen af 1950'erne [2]. Solfcellen



Figur 1. Skitse af hvordan en krystallinsk siliciumsolcelle virker. Lyset rammer et fotoaktivt materiale og eksiterer en elektron (e^-) til et højere energiniveau. Det efterlader et hul (h^+) i det lavere energiniveau. Elektronen overføres til et elektrisk kredsløb. Spændingsforskellen (U) i kredsløbet er givet ved forskellen mellem elektronens energi ved glasanoden og hullets energi ved katoden.



Figur 2. Farvestofs-sensibiliseret solcelle (DSC). Lyset rammer et fotoaktivt farvestof, hvorved en elektron eksiteres til et højere energiniveau, hvorfra den springer til konduktionsbåndet i TiO_2 . Herfra overføres elektronen til glasanoden og videre til et elektrisk kredsløb. Spændingsforskellen (U) i kredsløbet er givet ved energiforskellen mellem elektronen ved glasanoden og elektrolyttens redoxpotentialer ved katoden.

havde en effektivitet på 6% (til sammenligning har nutidige siliciumsolceller effektiviteter på op til 28%). For at opnå en god adskillelse af elektronen og hullet, bliver halvdelen af siliciumkrystallen negativt *dopet* (n-dopet) med phosphor. Det sænker det høje energiniveau en smule, mens den anden halvdel *dopes* positiv (p-dopet) med bor, hvilket hæver det lave energiniveau. Det stabiliserer den frie elektron og det frie hul og hindrer dem i at genforenes. Effektiviteten af disse solceller er acceptabel,

men de er meget dyre. Det skyldes at der er brug for ekstrem præcision mht. renheden af siliciumkrystallen og *doping*koncentrationen.

Farvestofs-sensibiliserede solceller

I 1991 udviklede Michael Grätzel [3] en solcelle, der anvendte et organisk farvestof (kombineret med titandioxid, TiO_2) som fotokatalysator samt en elektrolyt til at adskille elektronen og hullet. Dette er senere blevet kendt som en *Grätzel-solcelle* eller som en *farvestofs-sensibiliseret solcelle* (*dye-sensitized solar cell*, DSC). Solcellens fundamentale opbygning er vist i figur 2. Som det fremgår, adskiller denne solcelle sig væsentligt fra den silicumbaserede solcelle. I DSC rammer lyset et fotoaktivt farvestof, hvilket skaber et elektron-hulpar. Farvestoffet er fastgjort til en TiO_2 -partikel, som har et konduktionsbånd med en energi, der er lidt lavere end energien af den eksiterede elektron. Det betyder, at det er termodynamisk favorabelt for den eksiterede elektron fra farvestoffet at springe

til det lavere energiniveau i TiO_2 -konduktionsbåndet. Herfra kan elektronen overføres til det ledende glas og derfra videre til et elektrisk kredsløb, hvor den kan udføre nyttearbejde. Efter at have afgivet sin energi til kredsløbet, vil elektronen bevæge sig til modelektroden. Det fotogenererede hul, vil blive fyldt af en elektron, der stammer fra oxidationen af en elektrolyt (typisk I^-/I_3^-). Den oxiderede elektrolyt migrerer dernæst til modelektroden og reduceres. Hermed er systemets begyndelsestilstand

< 1 ppb

The identification of trace levels of chemicals, such as pesticides, is challenging. Achieving precise answers while maintaining lab productivity more so. One GC/MS is driving progress in meeting analytical challenges like these. The new **TSQ Quantum XLS**, with sensitivity in the low femtogram range, is the world's most sensitive triple quadrupole. Coupled with the ability to precisely quantitate, and confirm over 1000 compounds in a single analysis, our GC/MS systems also make your lab the most productive.

superior sensitivity

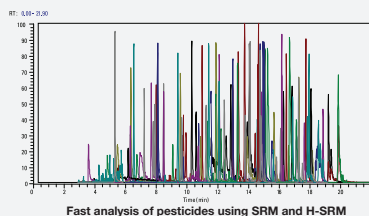
• see the full breadth of bold progress at • www.thermoscientific.com/quantumxls

For more information • +45 70 23 62 60 • analyze.dk@thermo.com



TSQ Quantum XLS
Precise, sensitive, productive triple quadrupole GC-MS/MS

- Increased sensitivity
- Greater resolution
- Precise, accurate results
- Meets China, EU, Japan and US regulations



Fast analysis of pesticides using SRM and H-SRM

Thermo
SCIENTIFIC

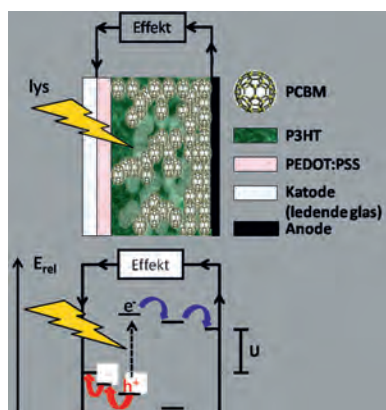
genoprettet. Undervejs er der tilført energi i form af lys og afgivet energi i form af nyttearbejde til et elektrisk kredsløb/apparat. Det nye design er særdeles økonomisk fordelagtigt, da det anvendte farvestof, TiO_2 og elektrolytten er relativt billige materialer. Desuden er det ikke nødvendigt at anvende materialer med ekstrem høj renhed i modsætning til i de krystallinske siliciumsolceller. En forskningsgruppe fra The University of Notre Dame (IN, USA) har endda vist, at det er muligt at fremstille en DSC ud fra almindelige husholdningsmaterialer: donuts, alkohol, te og iod. En video, der illustrerer dette, kan findes på youtube (www.youtube.com/watch?v=bVwzJEhMmD8).

To væsentlige problemer skal løses, før DSC kan bidrage væsentligt til den globale energiproduktion. Selv de bedste DSC har kun en effektivitet på omkring 11% [4], mens krystallinske solceller kan komme op på omkring 28% i effektivitet [4]. Dertil er holdbarheden ikke god nok pga. nedbrydning af farvestoffet og fordampning af elektrolytten. Der forskes p.t. i at reducere farvestofsnedbrydningen ved at kontrollere både lysintensiteten og -bølglængden. Det har endnu ikke været muligt at forbedre stabiliteten uden at forringe den allerede lave effektivitet. Det betyder, at DSC endnu ikke er kommercielt levedygtig (en solcelle skal som tommelfingerregel kunne holde i 20-30 år).

Polymersolceller

I midten af 1980'erne begyndte forskere at anvende fotoaktive polymerer i solceller. I modsætning til Grätzels skelsættende gennembrud under udviklingen af DSC var udviklingen af polymersolcellen kendetegnet ved flere mindre fremskridt [5,6]. Oprindeligt havde disse solceller en effektivitet på mindre end 1%, mens de på nuværende tidspunkt er nået op på 7% [7]. Figur 3 viser et grundlæggende diagram for, hvordan de fleste nutidige polymersolceller virker. Lyset rammer den fotoaktive polymer, som typisk er P3HT (poly(3-hexylthiophen)), hvorved et elektron-hul-par dannes. Elektronerne overføres derefter til et C_{60} -derivat kaldet PCBM (phenyl C-61 butansyremethylester), hvorfra de hurtigt transporteres til anoden og derfra videre til et elektrisk kredsløb, der driver et elektrisk apparat. Efter elektronen har afgivet sin energi, bevæger den sig til modelektroden. Hullet overføres fra P3HT til en hul-ledende polymer, typisk PEDOT:PSS (poly(ethylendioxythiophen):poly(styrenesulfonat)). PEDOT:PSS er en elektrisk isolator, der fungerer som en leder for hullerne, men ikke for elektronerne. Uden isolatoren vil den ledende PCBM røre begge elektroder og herved kortslutte solcellen og reducere dens effektivitet. Hullet overføres via PEDOT:PSS til den ledende glaskatode, hvor det genforenes med elektronen.

Et problem med polymersolceller er, at elektron-hul-parret genforenes for hurtigt. En væsentlig forbedring af elektron-hul-levetiden kan opnås ved at blande P3HT og PCBM, hvorved der



Figur 3. Polymersolcelle. Lyset rammer den fotoaktive polymer, P3HT, hvorved et elektron-hul-par dannes. Elektronen (e^-) bliver derefter overført til PCBM, hvorfra den transporteres til anoden og derfra videre til et elektrisk kredsløb, og til sidst ender ved glaskatoden. Hullet (h^+) overføres via PEDOT:PSS til glaskatoden. Spændingsforskellen i kredsløbet er givet ved forskellen mellem elektronens energi ved anoden og hullets energi ved katoden.

dannes en grænseflade (bulk heterojunction) mellem den fotoaktive og den hul-ledende polymer. Det er vist i figur 3 som en sammenblanding af de to materialer. Det tillader P3HT og PCBM at være i så tæt kontakt, at elektron-hul-parret adskilles, før elektronen og hullet kan nå at genforenes. Alene for polymererne P3HT og PCBM er der en lang række muligheder for variation af deres egenskaber, blandingsforhold m.m. Derfor er der hovedsageligt blevet fokuseret på disse to polymerer. På det seneste har nye fotoaktive polymerer vundet stigende interesse.

En stor fordel ved polymersolceller er, at de er særdeles billige at producere, og at der er dybdegående kendskab til forarbejdning af polymerer fra plastindustrien. Det tillader fremstilling af ekstremt tynde og fleksible polymersolceller. Denne fleksibilitet er en vigtig fordel ved polymersolceller sammenlignet med standard siliciumsolceller. Fleksibiliteten betyder f.eks., at solcellerne kan rulles sammen og transporteres væsentligt lettere end almindelige solceller, og at de kan anvendes på krumme overflader. De kan også anvendes som energiforsyning til bærbar elektronik (bærbare computere, mobiltelefoner, m.m.). En ulempe er dog, at polymerer nemt nedbrydes, hvorfor polymersolceller på nuværende tidspunkt ikke kan overleve de 20-30 år, som er retningslinjen for kommercielle solcellemoduler. At løse dette problem er en udfordring, der har stor interesse på verdensplan, og Danmarks nationale laboratorium for bæredygtig energi, Risø DTU, er blandt de førende inden for dette felt.

Potentiale til at ændre verdens energiforsyning

Den farvestof-sensibiliserede solcelle (DSC) og polymersolcellen repræsenterer to forskellige kreative løsninger på, hvordan solenergi kan omsættes til elektrisk strøm. Begge fremgangsmåder er innovative i og med, at de er forbundet med væsentligt lavere omkostninger end den klassiske siliciumsolcelle. Både DSC og polymersolcellen er på udviklingsstadiet. Før disse solceller kan gøres kommercielt tilgængelige, skal effektiviteten forbedres og levetiden forlænges. Intensiv forskning er dedikeret til at løse denne udfordring, da disse nye solceller har potentialet til at ændre verdens energiforsyning.

Man kan også drage nytte af solens energi på andre måder. I to følgende artikler beskrives det, hvordan solenergi kan anvendes til at producere brint-brændstof ved vandspaltning samt til fotokatalytisk nedbrydning af forurening.

E-mail-adresser:

Brian Seger: b.seger@uq.edu.au,

Signe Teuber Henriksen: s.henriksen@uq.edu.au

Referencer

1. Renewables 2010 Global Status Report, p. 19 Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. <http://www.ren21.net/publications/>
2. D. M. Chapin, C. S. Fuller og G. L. Pearson (1954). A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power. *Journal of Applied Physics* 25(5): 676-677.
3. B. Oregan og M. Gratzel (1991). A low-cost, high-efficiency solar-cell based on dye-sensitized colloidal TiO_2 films. *Nature* 353(6346): 737-740.
4. L. Kazmerski, National Renewable Energy Laboratory (NREL), [http://en.wikipedia.org/wiki/File:PVeff\(rev100414\).png](http://en.wikipedia.org/wiki/File:PVeff(rev100414).png)
5. H. Hoppe og N. S. Sariciftci (2004). Organic solar cells: An overview. *Journal of Materials Research* 19(7): 1924-1945.
6. H. Spanggaard og F. C. Krebs (2004). A brief history of the development of organic and polymeric photovoltaics. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 83(2-3): 125-146.
7. Y. Y. Liang, Z. Xu, J. B. Xia, S. T. Tsai, Y. Wu, G. Li, C. Ray, L. P. Yu (2010). For the Bright Future-Bulk Heterojunction Polymer Solar Cells with Power Conversion Efficiency of 7.4%. *Advanced Materials* 22(20): E135-E138.