

# 太陽光発電の効率を引き上げる 新しい技術

ジェフ・ヘクト

太陽電池の性能は多年にわたり徐々に改善されてきた。現在の開発者たちは新しい設計と構造を探索し、エネルギー効率の大幅な向上を目指している。

クリーンでグリーンな電力の明るい将来性は、資本家と政府による太陽光発電の技術と設備への大型投資を誘発している。過去35年間に、太陽電池の光から電力へのエネルギー変換効率は着実に増加した(図1)。しかしながら、半導体エレクトロニクスに比べると、その進歩は緩慢であったと言わざるを得ない。例えば机の上のコンピュ

ータは、1977年当時の最新技術であった1MHzのプロセッサと4KバイトRAMのApple IIから考えると、激しい競争を繰返し、現在ではその性能は信じがたいほど向上している。一方で、この33年間の単結晶シリコン太陽電池のエネルギー変換効率は、1977年の13%から現在の約28%へと、2倍に改善されるに過ぎない。

現在の開発者たちは、新世代の太陽電池の光起電力性能に関して、非常に高いレベルへの改善が可能になると考えている。彼らの目標は、新しい光起電力材料の発見ではなく、既存の材料のエネルギー変換効率を増強する新しい技術の利用に重点が置かれている。その目標の一つは、安価な基板上に薄膜として蒸着することであり、大型太

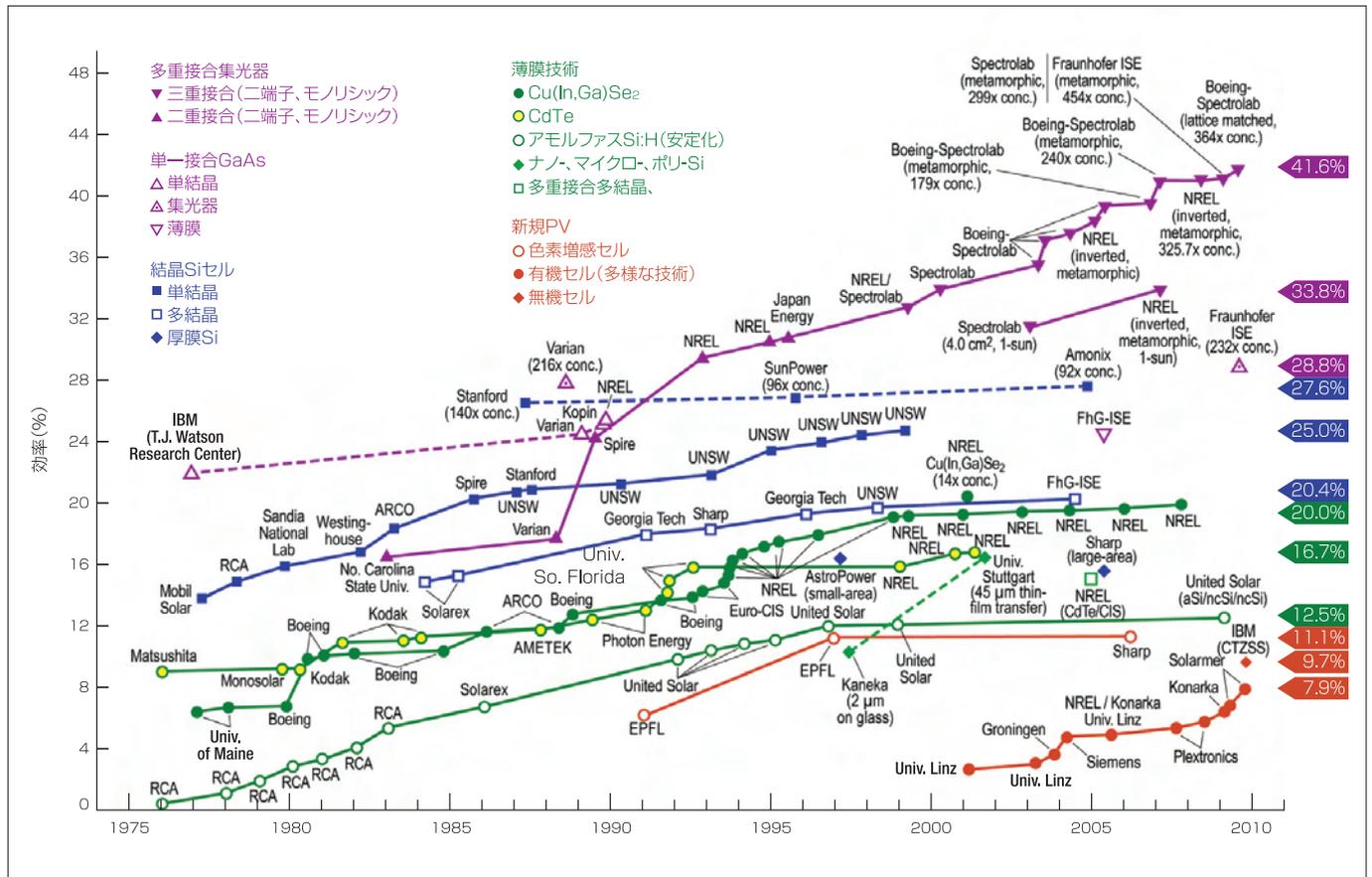


図1 光を電気に変換する太陽光発電の効率は、NRELによる一覧表が示すように、1970年代の中頃から着実に改善されている。これらの測定は比較可能な条件下のソーラシミュレータを使用し、実験室レベルのデバイスに対して行われている。

陽電池の低コスト生産を可能にする無機半導体薄膜の内部構造の精密化にある。もう一つの目標は、内部構造のマイクロ化とナノ化であり、光の捕集、変換および電力発生効率を改善することにある。その他の開発については Laser Focus World Japan 8月号 p.30 に記載されている。

## CdTe 効率の2倍化

無機半導体に基づく薄膜は大規模太陽光発電施設用の技術として支持されているが、それはガラスなどの安価な基板に蒸着可能であり、その結果、太陽電池パネルの材料コストが大幅に低減することによる。

有機薄膜材料はテルル化カドミウム

(CdTe)が最も大規模に使われている。米国立再生可能エネルギー研究所(NREL)は小さなCdTe太陽電池を使用して、16.7%のエネルギー変換効率を実験室で達成したが、この太陽電池は高価な基板が必要であった。米コロラド州立大学のW・S・サンパス氏(W. S. Sampath)によると、ガラス上のCdTeを用いて実現される最高効率は13.8%になる。ガラスをスクライビングし、それぞれの太陽電池の直列接続に必要な電子回路を付加すると、変換効率は10~11%に減少する。

本年6月、米国立科学財団(NSF)はコロラド州立大学に対して、次世代太陽光発電の産業/大学共同研究センターの開設と運営に必要となる5年間で

45万ドルの研究助成金の交付を決定し、サンパス氏がリーダに就任した。コロラド州立大学は米アバウンドソーラー社(Abound Solar)、カナダの5Nプラス社(5N Plus)、米ピルキントン・ノースアメリカ社(Pilkington North America)、米イオンエッジ社(Ion Edge)、米MBI社の5社とチームを組んだ。この各社も、総計40万ドルを5年間にわたって提供することになっている。サンパス氏は「20%、できれば30%の変換効率を商用デバイスで達成することが目標になる」と語っている。

現在、米ファーストソーラー社(First Solar)が低コストで量産している現代のCdTe光起電力製品は、単一接合デバイスから構成され、保護膜付き窓

## PennWell が 世界を相手にした マーケティングをお手伝いします。

貴社の技術 / 製品を必要としているバイヤーは、国内だけに限りません。PennWellでは、「フォトニクス」に関わるすべてのアプリケーションをカバーする Laser Focus World のほか、加工、バイオ、LED など成長分野に特化したメディアをグローバルな読者にお届けしています。技術 / 製品の情報を世界に発信するメディアとして、PennWell の各誌をご活用ください。



[www.laserfocusworld.com](http://www.laserfocusworld.com)



[www.industrial-lasers.com](http://www.industrial-lasers.com)



[www.bioopticsworld.com](http://www.bioopticsworld.com)



[www.ledsmagazine.com](http://www.ledsmagazine.com)

各誌の資料をご用意しています。  
広告掲載については、お気軽に下記までお問い合わせください。

株式会社 ICS コンベンションデザイン  
Tel: 03-3219-3641 email: [lfwj@ics-inc.co.jp](mailto:lfwj@ics-inc.co.jp)

ガラスの2×4ft基板上に硫化カドミウムとCdTeの2層が蒸着されている。サンパス氏は「われわれは性能を改善するために、現在の生産技術の利点を完全に維持しながら、より複雑な半導体化合物と材料を開発したい」と語っている。

サンパス氏によると、このプロジェクトは三元系と四元系の化合物を含めた多重接合構造を研究する。研究者たちは短波長用のテルル化カドミウム亜鉛(CdZnTe)とテルル化カドミウムマグネシウム(CdMgTe)と長波長用のその他の化合物を調べている。挑戦課題には材料間の境界における保護膜の形成と基底層の損傷のない付加接合の実現が含まれる。

### 薄膜のインクジェット印刷

米テキサス大学オースチン校のブライアン・コーゲル氏(Brian Korgel)もNSFコンソーシアムに参加して、セレン化銅インジウムガリウム(CIGS)を含めたその他の薄膜材料の性能改善を研究している。研究所レベルの効率は20%に達したが、CIGSはCdTeのような商

用を目的した開発が行われていない。

コーゲル氏は安価な基板上に印刷できる無機半導体「インク」を開発している。彼は「われわれはCIGSを気に入っている」と語っているが、それは30年間の研究を通して、太陽電池用のシリコンはCIGSとCdTeだけに代替の可能性があると結論に達したためである。しかし、彼はその他の材料の可能性も調べている。印刷可能な材料は気相蒸着の場合に必要な高真空と高温の加工が不要になり、プラスチックのようなフレキシブル材料にも印刷できる。その結果、太陽電池の生産コストが10分の1に低減し、新しい用途の開拓も可能になる。

### ナノ構造:円柱と同軸

その他のグループは、伝統的な平面構造の太陽電池の可能性を上回る光吸収と電流発生を可能にする太陽電池構造の劇的な設計変更を検討している。この場合は光吸収と電流伝導のバランスが基本的な問題になる。光吸収は半導体を通る光の距離とともに増加するが、電子は半導体層が厚いほど、

そこを通過するときにエネルギーを失う。そこで、開発者たちは、光と電流が異なる経路で材料を通過できる構造を探している。

一つのアプローチは、表面上に半導体ナノ円柱のアレイを規則的な間隔で形成する。円柱を垂直方向に通過する光からは円柱の側面を水平方向に伝導する電流が発生し、発生した電流は表面上の透明導電層のような導電性のより高い材料へ移動する。米カリフォルニア大学バークレー校のアリ・ジャヴェイ氏(Ali Javey)と彼の同僚が昨年実証した選択肢は、まず単結晶CdSのナノ円柱を作製し、次に円柱の周りに多結晶CdTe層を被覆する。ほとんどの光はCdTe層に吸収され、CdSのナノ円柱は電子の導体として機能する<sup>(1)</sup>。

米ボストンカレッジのマイケル・ノートン氏(Michael Naughton)によると、より良い導電性は単純なナノ円柱ではなく、表面上に「ナノ同軸」を形成することで可能になる。この構造は表面から立上るナノ円柱をもつシリコン基板上に多層膜を蒸着して形成される(図2)。ノートン氏はボストンカレッジのクリス・カンパ氏(Kris Kempa)およびシフェン・レン氏(Shifeng Ren)と共同して、まずナノ円柱を金属導体層で被覆し、次にアモルファスシリコンの*p-i-n*多層膜を使用して、ナノ円柱上に薄膜太陽電池の被膜を形成した。さらに、この構造に透明導体を被覆してナノ同軸を作製した。

その導体は表面に対して垂直入射する光を吸収する光アンテナとして動作する。しかし、光は吸収され、発生する正孔と電子は水平方向に移動する。接合部からは電場が発生し、正孔と電子からなるキャリア対は分離され、正孔は導電層の一つに、電子はもう一つの導電層へ移動する。これらの導体は

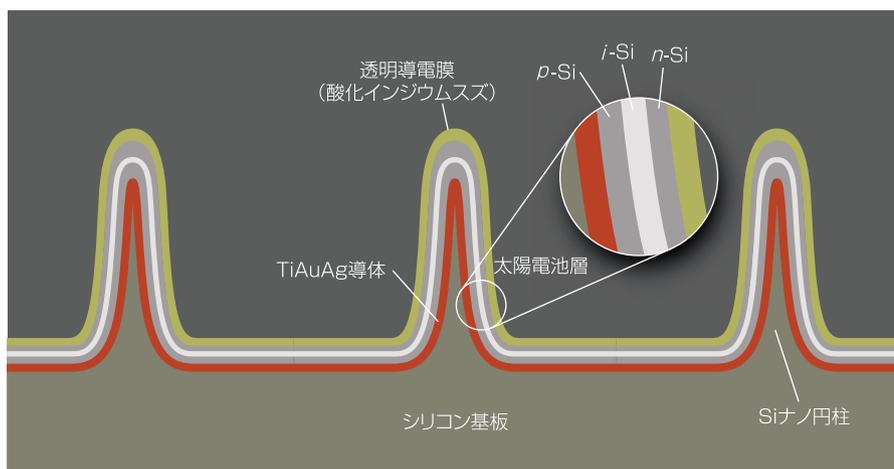


図2 ボストンカレッジのマイケル・ノートン氏のグループが開発したナノ-同軸構造は、短いスタブ同軸ケーブルとの類似性がある。中心導体はシリコンのナノ円柱の周りにチタン-金-銀の金属薄膜が蒸着されている。この金属薄膜の表面はアモルファスシリコンの*n-i-p*層で覆われ、太陽電池接合を形成している。このアモルファスシリコンの多層膜は透明導電膜で被覆されている。二つの金属層は電子と正孔を分離する導体になる。

ナノ同軸層の頭部または底部に移動して光電圧を発生する。このようにして光と電流キャリアを分離すると、光を効率よく吸収する厚い垂直方向の層と、電流を効率よく導電する水平方向の薄い層が形成される。ノードン氏の最初の実験では9%のエネルギー変換効率が達成された<sup>(2)</sup>。インタビューの際、ノートン氏は、現在NRELでは10.5%の効率が確認され、アモルファスシリコンとしては最高の12.5%の記録に近づいていると語った。

### ホットエレクトロンの移動

ノートン氏によると、光と電流キャリアの分離は、非常に効率のよい太陽電池の構造を再構築し、第3(新)世代の高効率太陽電池を創成するために必要となる開発の3段階の一つでしかない。開発者たちは太陽電池のバンドギャップエネルギーだけでなく、入射する光子のすべてのエネルギーを捕獲したいと考えている。実際のところ、入射する光子はすべてのエネルギーを電子に与えて価電子帯を励起状態にする。一般に、このような過剰エネルギーはすべてが1ピコ秒(ps)以内に失われ、フォノンとなって半導体内部の分子振動を励起してしまう。昨年ノートン氏は、これらの光子の一部は非常に薄い太陽電池層から抽出できるが、光吸収があまりにも遅く、実用的ではないことを明らかにした<sup>(3)</sup>。本年6月、テキサス大学オースチン校のシャオヤン・チュー氏(Xiaoyang Zhu)のグループは、ホットエレクトロンを捕獲する良い方法を発見した<sup>(4)</sup>。彼らはセレン化鉛(PbSe)の量子ドットを使用した。この材料の場合は最高の光子エネルギーよりもはるかに高いエネルギーによって、電子エネルギー準位の分離が起こる。その結果、単一光子の増加にと

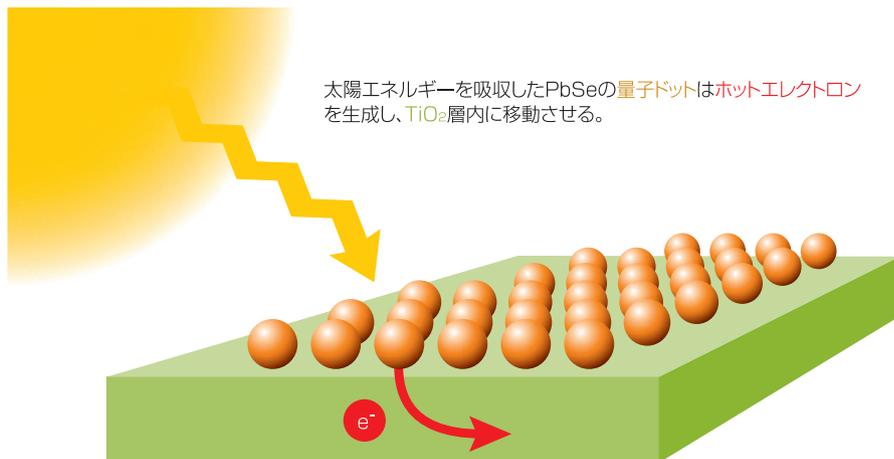


図3 太陽光から発生したPbSe量子ドット中のホットエレクトロンは、50fs以内にTiO<sub>2</sub>層内で結合する。(資料提供:テキサス大学オースチン校)

もなうエネルギー損失が生じて、ホットエレクトロンを保持する「フォノンボトルネック」が生成される。その結果、ホットエレクトロンのPbSeから隣接の二酸化チタン(TiO<sub>2</sub>)層への移動が50fs以内に起こる(図3)。

チュー氏のグループは論文のなかで、ホットキャリアからすべてのエネルギーを抽出すると、太陽電池の効率は66%に達し、これは単一接合電池から得られた最高記録の2倍以上になると述べている。ノートン氏は「これは素晴らしい成果だが、このような構造はもはや太陽電池ではない」と語っている。ホットエレクトロン抽出は光と電流キャリアのそれぞれの経路との組み合わせが必要になり、すべてを太陽電池のなかに実装し、ホットキャリアのエネルギーが配線のなかで消費しないように電気導体と接続しなければなら

い。このことが容易にできるとは誰も予想しないが、この新しい実験はそれを当然のこのように思わせる。

### 将来展望

研究所レベルでの実証の成功は、実用となる次世代の太陽電池に向けた初期の段階でしかない。その技術は手ごろなコストで実現できる必要があり、コストと性能のトレードオフの関係は生産と設置の両方において解決されなければならない。今日の最高の効率をもつ太陽電池を作製しようとする、平方センチメートル当たりのコストは最高になり、最高の性能を得るにはソーラー集光器が必要になる場合も多い。ここで述べたソーラーの将来像の実現は非常に大きな挑戦だが、われわれはその日が近づいていることの兆候に勇気付けられる。

### 参考文献

- (1) Z. Fan et al., "Three-dimensional nanopillar-array photovoltaics on low-cost and flexible substrates," *Nature Materials* 8, 648-653(2009); doi: 10.1038/NMAT2493.
- (2) M. Naughton et al., "Efficient nanocoax-based solar cells," *Phys. Status Solidi Rapid Res. Lett.* 4, 181-183(2010); doi: 10.1002/pssr201004154.
- (3) K. Kempa et al., "Hot electron effect in nanoscopically thin photovoltaic junctions," *Appl. Phys. Lett.* 95, 233121(2009).
- (4) W.A. Tisdale et al., "Hot electron transfer from semiconductor nanocrystals," *Science* 328, 1543-1547(June 18, 2010).