

(関連資料 7-(1))

【研究開発 (太陽電池)】 スクリーン印刷 シリコンナノ粒子仮訳

## NRELのシリコンインク活用のための開発戦略 (米国)

2011年9月28日

インクはいろいろなものを汚したりするが、Innovalight 社の開発したシリコンインクは、ソーラーセルに添加すれば固まったりこぼれたりせずに、セルの出力を 5~7%も向上し採算性を高めてくれる。

しかし、それは、シリコンナノ粒子を均一に浮遊させた極めて特別なインクでなくてはならない。それにより上面の金属接点の真下にシリコンエミッタをドーピングするために必要で、正確なミクロン幅の線を付着できる。それらの接点がソーラーセルを機能させるのだ。

米国カリフォルニア州サニーベールにある新興の中小企業、Innovalight 社は、極小のシリコン粒子が互いに付着したり、容器の底に沈殿したりすることなく溶液中に浮遊する独創的な方法を開発した。

その「シリコンインク」がソーラーセルの役に立つのだろうか？

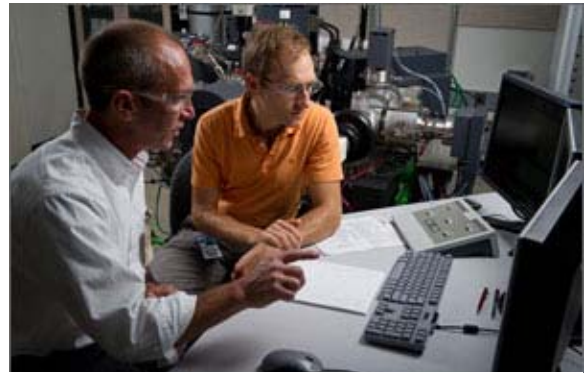
米国エネルギー省(the Department of Energy)の再生可能エネルギー研究所(the National Renewable Energy Laboratory: NREL)によると、その答えは「イエス」である。そして、「シリコンインク」がソーラーセルの製造工程で添加されると、ソーラーセルの変換効率の向上と大規模な工場の年間コストの大幅な節約が可能となることから、ここでの勝者はソーラーセル産業と環境である。

この「シリコンインク」技術で、NRELとInnovalight社は、誰もが切望する[2011 年度「R&D100 選」](#)を受賞した。「R&D 100 マガジン」誌が授与するこの「R&D 100 選」は、産業界における「発明へのオスカー賞」である。低コストな方法で変換効率を向上させることができる「シリコンインク」を、産業界では「金の液体(liquid gold)」と呼ぶ者もいる。

## シリコン中の不純物は接点や電力を作るキーである

シリコンは、毎年世界中で生産されるほとんどのソーラーセルの主要な原料である。

ドーパント、すなわち不純物は、シリコンの電導性を変化させ、光子(光子)をエレクトロン(電子)へ、そして最後に電力へと変換させる内部電界を作るために使用される。その場合の課題の一つは、正確な濃度のドーパントを、デバイス中の正確な位置に配置することである。



クリックして画像拡大

Bob Reedy 氏(左)と Manuel Romero 氏(右)が Innovalight 社の「シリコンインク」の中のドーパントと不純物の分析用機器と同様な二次イオン質量分析計(secondary ion mass spectrometer: SMIS)で作業中。クレジット: Dennis Schroeder

Innovalight 社は、シリコンナノ粒子を溶液中に均一に浮遊させる方法を開発したことにより「シリコンインク」で大成功を収めた。シリコンナノ粒子には、選択エミッタを形成するためにシリコンソーラーセルに導入されるドーパント原子が含まれている。

Innovalight 社の見込み顧客と投資家は、「シリコンインク」が、高濃度のドーパントがエミッタの極めて局所的な領域へと運ばれ、ソーラーセルの効率を向上させることができるのかどうか見極めたいと思っていた。

NREL の Senior Scientist である Kirstin Alberi 氏と David Young 氏は、Innovalight 社が実証したい事実に耳を傾け、その実証を支援するためのある実験を提案した。

「問題は、このインクが明確な線を描くことができ、はっきりとした選択エミッタを作成するために、その線の下にある材料のみにドーパントを運ぶことができるか、ということでした。」ポス・ドク研究者として 3 年前に NREL に就業した Alberi 氏は語った。もしそれが可能ならば、セルの残りの部分に含まれるドーパントは低濃度のまま、接点の直下の高濃度ドーパントは金属接点での抵抗を低下させるのではないかと – それにより効率が飛躍的に向上し、大幅なコストの削減となるのではないだろうか。

「金属部との接触をより良くするためには、エミッタはある程度高濃度にドーピングされている必要があります。」Alberi 氏は述べた。「でも他の部分に高濃度にドーピングされることは良くない。」

そのため、ソーラーセル中の正確な部分のみが高濃度にドーピングされる「選択エミッタ」が、有望な技術となる。

## インクが付着位置にとどまり、その結果セルの変換効率を向上させる

コストに関する質問: スクリーン印刷の手法を利用した「シリコンインク」は、全体に広がることなくそれぞれにドーブが異なる線に付着させることができるのか? インクが広がってしまうと、シリコンの高濃度にドーブされた箇所から、低濃度であるべき箇所へとドーパントがオーバーフローしてしまうのではないかと?

「Innovalight 社は、自分たちの会社がうまくこの点を解決できることを投資家に証明しなければなりませんでした。」と Alberi 氏は述べた。「彼らはそのすべを知ることができず、そこで私たちがお手伝いできました。」

「ユーリカ! (わかった!) という瞬間はなかったのですが、Innovalight 社が望んだ通りに「シリコンインク」が機能したことをジワリと認識できたことは、実に嬉しいものでした。」と Alberi 氏は語った。

「望んだとおりの結果を得られて嬉しいです。」と Alberi 氏は語った。

スコアカードについて: 低コストのスクリーン印刷で使用された「シリコンインク」は、ソーラーセルの変換効率において、1%の絶対値の増加をもたらした。それが顕著な増加ではないように思えたら、標準的なシリコンソーラーセルアレイでは、そこに当たるフォトンの 15% を使用可能な電力に変換するとされていることを考えてほしい。その 1% の増加は、大規模なソーラーセル製造工場では気づかれることがないほどの低コストにより、実際には従来の 15% の効率のセルの出力において 7% の増加となることを示す。

「これはコストがほとんどかからないにもかかわらず、大きな効果です。」このプロジェクトに関わる NREL の lead investigator の Richard Michell 氏は語った。

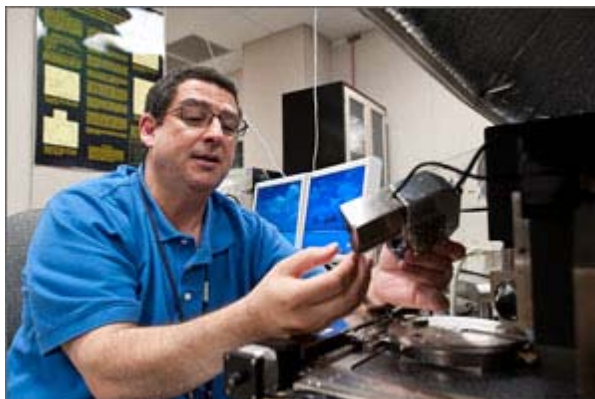


クリックして画像拡大

Principal scientist, Yanfa Yan (左)、staff scientist, Kim Jones は Innovalight 社の「シリコンインク」のような材料のトポグラフィの分析のため、集束イオンビーム電子顕微鏡で作業。クレジット: Dennis Schroeder

## 極めて特別なインク、スクリーンとヘラ

製造工程においては、「シリコンインク」をスクリーン上に流し込み、シリコンウェハが通過する一方向に向かって、ヘラ(スクイージ)でインクを押し広げる。そして新しいウェハがスクリーンの下に現れたら今度は逆方向にインクを押し広げる。そうするとインクは、スクリーンマスク上のインクを通す小さな隙間があるセル中の正確な位置にのみ行き渡る。



クリックして画像拡大

ときおり、インクの広がりを均一にすること、インク切れを避けることを確実にするために、注射器で「シリコンインク」をスクリーンに加えることもある。

NREL の Senior Scientist、Helio Moutinho 氏、走査型容量顕微鏡(scanning capacitance microscopy: SCM)によるサンプルを分析する原子間力顕微鏡のプローブを持っている。この技術で Innovalight 社のシリコンサンプルの各領域中のドーピング濃度のばらつきを調べる。クレジット: Dennis Schroeder

テストの結果、インクは付着位置にとどまった。

シリコンとドーパントが未処理のセルの正しい位置にあれば、それらは、溶けてしまわない程度に、さらに「シリコンインク」に含まれるドーパントがソーラーセルへと導入される程度まで加熱される。

「Kirstin (Alberi 氏)と他のスタッフが、Innovalight 社が、必要とされる領域に正しい選択ドーパントを実際に得ることができるということを証明するのをお手伝いしました。Mitchell 氏は述べた。「これは、プリントするまさにその場所で、セルがドーピングされる現象を示した最初の技術です。それもマイクロレベルの正確さで。」

## NREL と Innovalight 社が研究開発と障壁の克服に提携

NREL と Innovalight<sup>注1</sup>社との初のパートナーシップは、2008 年の共同研究開発契約、すなわち CRADA である。この契約で Innovalight 社は、NREL の科学者たちの専門技術の提供への対価を支払い、NREL はこの見返りとして、Innovalight 社の独占特許技術に対する守秘義務について合意した。

注1 <http://www.innovalight.com/>

後に Innovalight 社は、NREL の Photovoltaic Incubator プログラムに参入するための競争的資金を勝ち取った。その結果、同社は、NREL の科学者たちが課題の障壁を克服するために NREL の科学者が提供する支援に応じて、厳しい期限に間に合うように技術改善を行わなければならないこととなった。

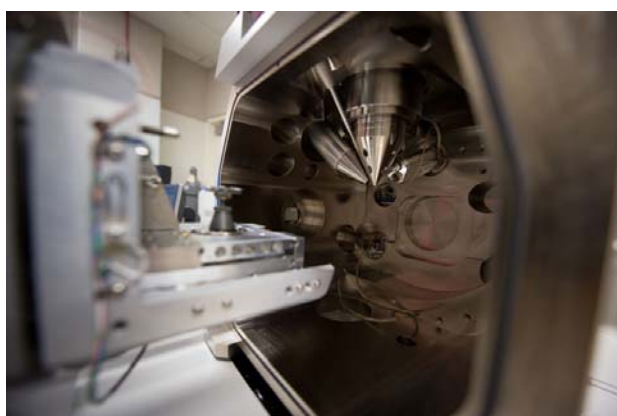
最終的に Innovalight 社は、インクジェット用に「シリコンインク」を用いる処理過程における問題点に対処した。同社は、カリフォルニア州サニーベールにある本社のアSEMBリラインでデモンストレーションを行い、見込み顧客に対してその技術を披露した。

顧客は、ソーラーセルに適用されているインクジェットプリントには馴染みがなかったため、メーカー各社は、その跳躍に二の足を踏んだ。「しかし、それらどのメーカーもすでに生産ラインにスクリーンプリンティング技術を用いていた。」と Mitchell 氏は述べ、こう続けた。「スクリーンプリンター装置をさらに増やすことは、オペレーターたちも納得することであった。」

このため、Innovalight 社と NREL の提携で目指すべきゴールは、スクリーンプリント技術を用いた「シリコンインク」の信頼性を実証することへとシフトした。

## 中国企業が米国企業に先んじてスクリーンプリントの技術提携

「シリコンインク」の使用について契約を結んだメーカーは、JASolar 社、Hanwha SolarOne 社、Jinko Solar 社など、すべて中国企業であり、彼らは自社で選択した一部のアSEMBリラインでこの技術の適用を試みている。これにより、期待どおりの結果が得られれば、彼らはこの技術を全アSEMBリラインで使用し始めるだろう。と Mitchell 氏は述べた。



クリックして画像拡大

これが成功であることが実証されれば、これらの企業はインクジェット方式を用いて「シリコンインク」を試そうとする気持ちになるかもし

Innovalight 社の「シリコンインク」のような材料のトポグラフィの分析に用いられる NREL の FEI Nova 200 デュアルビーム電子顕微鏡の試験片/真空容器の内部。この顕微鏡は、高度な空間的な微細構造分析を行うために部位特異的な断面図をとるために用いられる。



れない。このように Innovalight 社は述べており、これにより、セルの変換効率が向上し、コストを抑えられる可能性が高くなると考えられる。

先月、DuPont 社が Innovalight 社を買収したが、この動きが、「シリコンインク」技術を用いた米国ソーラーセル製造に対する展望を加速させることになるかもしれない。

NREL とのパートナーシップは、「当初から有意義な体験である」と、Innovalight 社の創業者で現在 58 名の社員を抱える DuPont Innovalight 社のゼネラルマネージャーの Conrad Burke 氏は述べている。

「NREL には、我々のような規模の企業、否、さらに大きな企業であっても、とても到達できない確かな能力がある。」と Burke 氏は述べ、こう続けた。「我々が必要なときにそれらのリソースを利用できるのであれば、それはまさに、win-win(ウィンウィン)の状態である。米国でそのようなリソースを利用できるというのは素晴らしいことだ。」

詳細については、[NRELのサイト](#)を参照のこと。

## ソーラーセルの大量生産を早く正確に行う秘訣

数百個のソーラーセルを 1 週間で生産する場合、そのプロセスは、正確さとスピードを兼ね備えたものでなければならない。

すなわち、一部ではシリコンを高濃度ドーピングしたシリコンを付着させるのに対して、他方では、低濃度ドーピングしたシリコンを付着させる迅速な方法がなければならないということである。

互いに凝集して固体化したり、底部に沈殿したりすることのない、「シリコンインク」のエマルジョン(乳濁液)<sup>注2</sup>を作る Innovalight 社の技術力が、自社製品に大変革の可能性をもたらした。その狙いは、この太陽光の大半がソーラーセルの低濃度ドーピングされた基部に吸収されるように、ゆるやかに上面のグリッドラインの間のエミッタをドーピングすることであり、グリッドライン直下のエミッタに高濃度ドーピングすることで、接点の直列抵抗を低くする。

その結果、より変換効率の良いソーラーセルとなる。すなわち、より小さなモジュールで同等量の発電が可能だということである。そして、このことはつまり、消費者にとってのコストも低くなるということであり、低料金で電気を利用できるようになり、メーカーが

---

<sup>注2</sup> 液体中に他の液体粒子が分散して乳状を成したものの。

負担するコストも低くなり、年間数百万ドルもコストを抑え、利益を急増させることができる。

## ドーパントにより形成される n 型/p 型シリコン

形成方法:

目標は、電子とホール(正孔)が均衡状態で存在し、電場において電位差のある接合部分を作ることである。これには p 型と n 型の 2 種類のシリコンが必要で、それぞれ、異なった量の不純物、つまりドーパントを必要とする。

シリコンにドーパントすなわち不純物が加えられることによって、その電気特性が変わる。リンを加えると n 型のシリコンができるが、この「n」は、マイナス自由電子を意味している。また、ボロン(ホウ素)を加えると、p 型シリコンができ、これにより、正電荷とホールが作られる。逆の電荷をもつ n 型の電子と p 型のホールが、pn 接合部で接触する時に、ソーラーセル内で電荷が運ばれる。

「シリコンインク」で、識別された不純物質を付着させるという細心の注意を要する仕事を成し遂げることができるということを実証するために、Innovalight 社は、DOE の NREL の助力を仰いだ。

「Innovalight 社は我々に、何を実証したいのかを伝え、それを我々が考慮し、いくつかの実験を行うことを提案したのだ。」と NREL の上席研究員である Kirstin Alberi 氏は述べた。

Innovalight 社によって実験用サンプルの準備が完了すると、走査型容量顕微鏡、造影、顕微鏡、顕微鏡検査の専門家とともに、NREL の測定と特性評価の技術者が加わった。

## 本実験に対応できる巨大電子顕微鏡

Helio Moutinho、Bob Reedy、Yanfa Yan、Kim Jones、Manuel Romero 各氏は、巨大な特殊電子顕微鏡で分析を開始した。Romero 氏はサンプルの造影を行い、電子顕微鏡の助けを借りて、ドーパントの深さのほか、水平方向にどのくらいまで広がるかを割り出した。

NREL の科学者たちは、二次イオン質量分析法と呼ばれるプロセスを使用して原子をス

パターニングして正確な成分を決めるため、質量分析を行った。次に、空間分解計測技術を用いて、正確にそのエレメントがサンプルの上に置かれる位置を示すマップを作成した。こうして彼らは、「シリコンインク」が p 型と n 型のシリコンをシリコンウェハの背面に配置するために使用でき、これによって、ウェハ前面に接点を作る必要性がなくなるということを実証した。

「彼らは、独自の特殊な方法でシリコン粒子を p 型 n 型へとドーピングさせる技術を開発した。シリコン粒子のサイズを合わせることができた。」と、このプロジェクトの NREL の主任研究員、Richard Mitchell 氏は述べた。

「シリコンインク」によって接点とエミッタの設計が改善されることで、個々のセルの発電効率が 1%アップするといった最大の効果が得られる。たとえば、光子から電気への変換効率は約 16%から 17%へと急激にアップし、これは実際には、全体の効率が 6~7%アップしたことになる。

このテストによって実証された内容は、今年 8 月に Innovalight 社を買収した世界的な大企業 DuPont 社を惹きつけるのに十分なものであった。

「産業力が大企業の資金を集めるために、こういった技術の実証を行うことは常に良いことだ。」と Mitchell は述べ、こう続けた。「それが購入すべき優れた技術だと判断されるまでに、彼らはそれ相応の努力をしていたのだ。」

翻訳：NEDO (担当 総務企画部 松田 典子)  
(担当 総務企画部 原田 玲子)

出典：本資料は、以下 "Silicon Ink Is Spot On, NREL Experiments Show" の記事を翻訳したものである。

[http://www.nrel.gov/news/features/feature\\_detail.cfm/feature\\_id=1596](http://www.nrel.gov/news/features/feature_detail.cfm/feature_id=1596)