

光の波長変換機能を利用した新たな半導体接合法の開発に成功

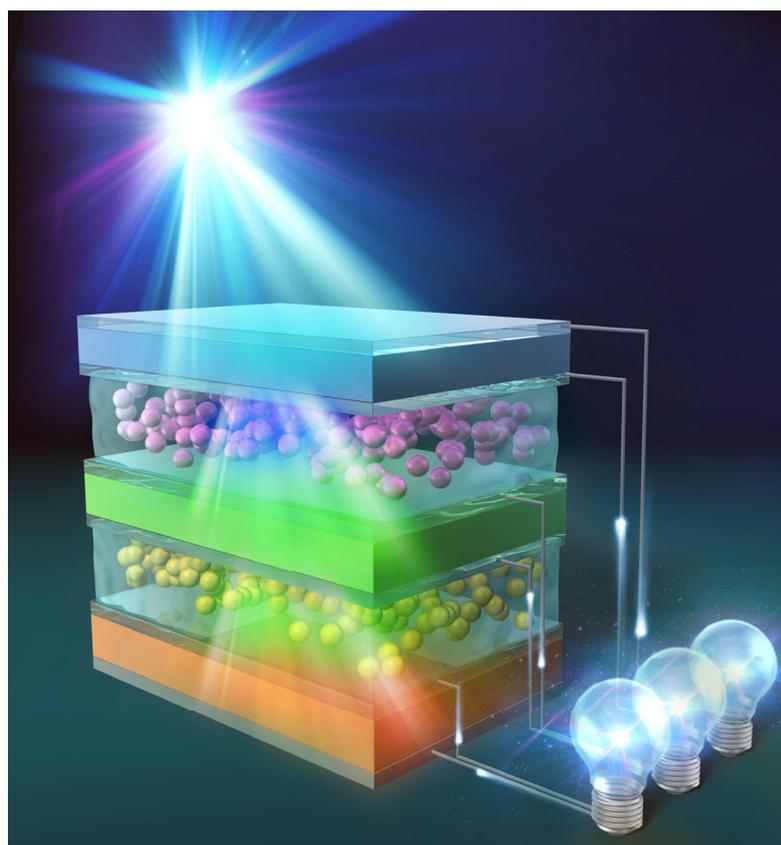
—低コストで太陽電池の光電変換効率向上が可能に—

概要

太陽電池の高性能化には、太陽光の幅広い波長域の有効活用が重要です。そのために、各々が固有の吸収波長帯を持つ半導体材料を複数積層した多接合太陽電池は、高効率化手法の代表例です。

京都大学大学院工学研究科 田辺克明 准教授、佐野直希 同修士課程学生（研究当時）、西ヶ谷紘佑 同修士課程学生（研究当時）の研究グループは、波長変換材料^{※1}を介した半導体接合法を提案、開発するとともに、当技術を用いた太陽電池を作製し、発電性能の向上を実証しました。その結果、今回開発した手法で作成した太陽電池は、一般的な従来型の太陽電池に比べて2割程度の電流の増大、3割程度の発電効率の上昇を観測しました。この手法は、これまでの技術では難しかった、接合の形成と光機能の導入を同時にもたらし得る半導体界面工学の新しい概念と言えます。汎用性の高い技術であり、多接合太陽電池の高効率化や、光コンピューター^{※2}などのデバイスの高性能化につながることを期待されます。

本成果は、2022年7月6日（現地時刻）に米国の国際学術誌「Applied Physics Letters」にオンライン掲載されました。



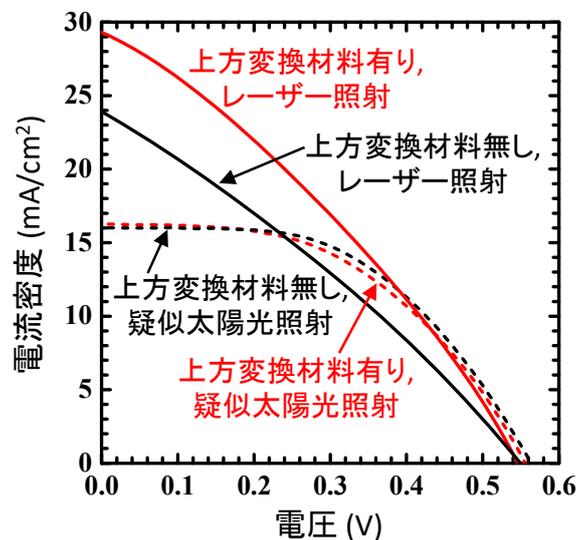
波長変換材料を介した接合から成る太陽電池のイメージ

1. 背景

太陽電池の高性能化には、太陽光の幅広い波長域の有効活用が重要です。そのために、各々が固有の吸収波長帯を持つ半導体材料を複数積層した多接合太陽電池は、高効率化手法の代表例です。従来、多接合太陽電池は気相成長法^{※3}により作製されてきました。しかし気相成長法では、半導体材料の結晶のサイズの格子整合^{※4}の制限のため、理想的な吸収波長帯の半導体の組み合わせの多接合太陽電池を作製することが困難でした。このような問題点に対し、ウェハ接合法^{※5}は、格子整合にとらわれることなく自由な組み合わせの異種半導体材料の積層を可能とし、様々な光・電子デバイスの作製に適用されています。近年では、ウェハ接合法により、発電効率の高い多接合太陽電池が作製されています。

2. 研究手法・成果

本研究では、受けた光をより波長の短い光へと変換する、上方変換材料^{※6}と呼ばれる材料に着目し、このような材料を介したウェハ接合技術の提案と開発を行いました。短波長光への変換により、ある半導体材料に吸収されなかったいわば使い古しの光成分が、同じ半導体材料ないしバンドギャップエネルギー^{※7}の近い半導体材料に吸収され発電に有効に利用されるという、光のリサイクルが可能となります。また、この技術は、接合の形成と同時に界面の光学的機能を発現させる新しい半導体プロセスの発想と言えます。この概念の実験的実証として、上方変換ナノ粒子をハイドロジェル中に分散させた接着剤を作製し、それを介して、多接合太陽電池の上側のセルを模したSi薄膜とSi太陽電池のウェハとを接合しました。その結果、上方変換材料の無い太陽電池と比較すると、本手法で作製した太陽電池では、Si太陽電池への入射光がより吸収されやすい波長帯に変換された効果により、集光型太陽電池モジュールを模したレーザー照射下において、2割程度の電流の増大、3割程度の発電効率の上昇を観測しました（下図）。



図：作製した太陽電池の出力特性

3. 波及効果、今後の予定

本研究より創出された技術は、界面材料にこのような機能性材料を採用することで、単一の作製工程で高性能な接合形成と光機能の発現という一石二鳥の高効率化が可能になり、簡便（低コスト、高スループット）でかつ高性能な光・電子デバイスの生産プロセスの実現につながります。例えば、波長変換機能を持つ接合界面

により、多接合太陽電池において太陽光から、各発電層の半導体材料のバンドギャップエネルギー値に適した波長に変換し入射させることができるようになります。加えて、発電層間の電流整合の調節にも有効であるため、高発電効率化につながります。また、光集積回路^{*8}・光コンピューターにおいて、光源を成す半導体層からの発光を、接合された変調器、導波路、受光器といった素子のそれぞれに最適な波長へと変換することで、高効率な信号処理が可能となることなどが期待されます。今後は、この接合技術を活用した高性能な多接合太陽電池やマルチカラーLEDといった光デバイスの開発へと展開していく予定です。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、日本学術振興会 科学研究費補助金 基盤研究(B) 18H01475、岩谷科学技術研究助成の支援を受けて行われました。

<用語解説>

※1 **波長変換材料**：光の成分は、例えば青色の光であればおよそ 450 ナノメートル、赤色ならおよそ 700 ナノメートルというように、それぞれ波の大きさに当たる波長という値を持っている。短い波長の光ほど高いエネルギーを持っている。ある種類の材料は、光がその材料の中を通るときに光の波長を変化させるという性質を持っており、このような材料は波長変換材料と呼ばれている。

※2 **光コンピューター**：従来の電気（電子）により動作するコンピューターにおいて、電気を光に置き換えて動作させる新しいタイプのコンピューターのこと。光を採用することによって、極めて消費電力の小さいパソコンやスマートフォンなどの機器を実現することができると言われている。

※3 **気相成長法**：雪を降り積もらせるような要領で、気体状にした半導体材料を構成する分子から、半導体基板（ウェハ）上に結晶薄膜を堆積させる手法。半導体産業において電子素子や光素子の作製に用いられている。

※4 **格子整合**：前述の気相成長法において、秩序の高い良質な結晶を形成するために、成膜する半導体材料は基板材料と結晶のサイズが同等である必要があり、このことは格子整合条件と呼ばれている。

※5 **ウェハ接合法**：熱と圧力を与えることにより二つの半導体基板を貼り合わせる技術。同種の半導体同士の接合によるホモ接合だけでなく、異種半導体同士の接合によるヘテロ接合の形成も可能。気相成長法では、半導体材料の結晶のサイズ（格子定数）が一致する半導体の組み合わせでしかヘテロ接合の形成は困難であるのに対し、ウェハ接合法では格子定数の差に関わらず、高品質なヘテロ接合形成が可能。多岐に亘る電子素子分野にて応用されるが、例えば、このウェハ接合法を利用したシリコンと化合物半導体の「ハイブリッド」半導体素子の開発が近年盛んに行われている。また、代表的な製品のひとつとして、silicon-on-insulator (SOI) ウェハおよびそれを基板として作製されている高速、低消費電力、高集積密度、高耐圧、高信頼性のコンピューター部品やパワーデバイスが挙げられる。

※6 **上方変換材料**：先述の波長変換材料の中で、特に材料に入射した光の波長をより短く変化させて出射するような種類の材料のこと。波長の長い（つまりエネルギーの低い）光の粒（光子）二つが波長の短い（エネルギーの高い）一つの光子に変換される場合が多い。

※7 **バンドギャップエネルギー**：半導体材料が吸収して電気に変換することのできる最小の光のエネルギーのこと。半導体材料ごとに異なった値を持っている。このバンドギャップエネルギーよりも低いエネルギー（つまり長い波長）の光はその半導体には吸収されず通過（透過）してしまう。

※8 **光集積回路**：光信号を処理できる回路が集積された集積回路のこと。半導体レーザー光を光導波路によって誘導し、光信号を電子的に制御して変調する変調器などを集積し、単一の基板回路上で光信号を電子的に処

理することができる。従来の電気（電子）による演算処理を光によるものに置き換えることにより、極めて消費電力の小さいコンピューター（光コンピューター）を実現することができると言われている。

<研究者のコメント>

私たちは今日、エネルギー資源や材料資源の有効活用を強く求められていると思います。本研究では一例として光のリサイクルを示しましたが、今回の新技術は余剰のパネルを通常のパネルに波長変換剤を介して接合することでプラスの発電をもたらせる可能性も示唆しており、材料のリサイクルにも有効と言えます。

本研究の題材は、二枚の板を貼り合わせる接合という一見古風でもある技術ですが、今回お示したように工夫次第で新しい発明ともなり得ます。特に若手の研究開発者の方々へのヒントや励みともなれば幸いです。

（田辺克明）

<論文タイトルと著者>

タイトル：Upconversion semiconductor interfaces by wafer bonding for photovoltaic applications（太陽電池応用向けのウェハ接合による上方変換半導体界面）

著者：Naoki Sano, Kosuke Nishigaya, and Katsuaki Tanabe

掲載誌：Applied Physics Letters DOI：https://doi.org/10.1063/5.0097427