

2022年3月31日

金沢大学 ナノマテリアル研究所 當摩哲也

■ 研究課題

「バックコンタクト型ペロブスカイト太陽電池実現のための斜め蒸着製膜法の開発」

■ 研究目的

現在の太陽光発電市場の約9割を占めている結晶シリコン (Si) 太陽電池は、理論効率は30%未満であり [T. Tiedje et al., IEEE Trans. Electron Dev. 31, 711 (1984)], 今後の大幅な効率向上は見込めない。一方、近年急速に開発が進んでいる、ペロブスカイト型結晶構造を持つ半導体を利用した太陽電池 (以下、ペロブスカイト太陽電池) は、塗布法での薄膜形成で、小面積ながら25%を超える変換効率が報告されている [J. J. Yoo. et al., Nature 590, 587-593 (2021)]。ペロブスカイト太陽電池は高性能に加え、塗布や真空蒸着など簡便な製造法が適用できる超低コスト太陽電池として注目されている。

有機系太陽電池や Si 太陽電池を含めたすべての太陽電池は、各種半導体膜を上下から電極で挟んだサンドイッチ構造をしている。このサンドイッチ構造は太陽電池の基本構造であり、半導体の材料によって構成する材料や膜厚・膜構造を変えている。この構造は、単純に積層するため製造方法が簡便で低コスト化と大面積化が容易な利点がある。しかし、透明電極から光を入射させるため、透明電極の透過率により、光の利得が減少して光起電流が減少してしまう問題や、そもそも透明電極が高価でありさらなる低コスト化の弊害になっている問題もある。

本研究では上記問題を解決する技術として、p 層と n 層が交互配列したバックコンタクト型ペロブスカイト太陽電池を提案する。サンドイッチ構造とは異なり、キャリアを整流する p 層と n 層は膜の片側に交互配列した構造で製膜されており、光吸収をする半導体層の反対側には何もない構造となっている。この構造は Si 太陽電池では実用化されており、株式会社カネカより 26.3%の世界最高効率が報告されている。この構造の利点は、透明電極を使わないため光吸収効率が高くなり、電流値が向上するため高性能化が可能になる。しかし、Si ではドーピングにより p 型半導体層と n 型半導体層の配列を構成させるためにフォトリソグラフィなどの Si 微細構造作製プロセスが必要となり低コスト化が難しいことから普及に至っていない。本提案の研究では、申請者らが開発した後述

独自の製膜方法を導入することにより、高価なフォトリソグラフィ技術を用いずに、簡便かつ低コストな p 層と n 層の交互配列構造を完成させる。それを用いて、従来のサンドイッチ型ペロブスカイト太陽電池が記録する変換効率 25% を超える世界最高性能バックコンタクト型ペロブスカイト太陽電池の実現を目指す。

■ 研究成果

バックコンタクト構造の優位性を示すため、3次元有限差分時間領域 (FDTD) 法によるデバイスシミュレーションを行った。波長 300nm の単色紫外線下でのフロントコンタクトとペロブスカイト吸収体のパワー密度プロファイル进行调查した。ペロブスカイト型デバイスのサンドイッチ構造では、太陽光を吸収するペロブスカイト層が、電子輸送層 (ETL 層) とホール輸送層 (HTL 層) に挟まれている。つまり、太陽光はデバイスのフロントコンタクトを通過してペロブスカイト吸収層に到達する必要がある。このため、太陽光の一部はフロントコンタクト (透明電極ガラス基板 (TCO) /ETL) で反射、散乱、吸収され、大きな光量損失となる。ペロブスカイト吸収層は紫外可視光 (300~800nm) を吸収して電気に変換することができるが、フロントコンタクトの TCO/ETL は紫外光 (300~400nm) を吸収するため、可視光 (400~800nm) しかペロブスカイト吸収層には到達しないのである。一方、バックコンタクト構造では、ペロブスカイト吸収体の同じ側に (+) 電極と (-) 電極を配置し、ほとんどの入射光子はペロブスカイト層で吸収されて、ETL と HTL を介して電子とホールに変換され、対応する電極に到達する。バックコンタクト構造ペロブスカイト素子の 300 nm 光照射下でのパワー密度プロファイルは、反射防止膜 (ARC) 層を持つペロブスカイトではほとんど光子の損失がないことを示した (図 1)。

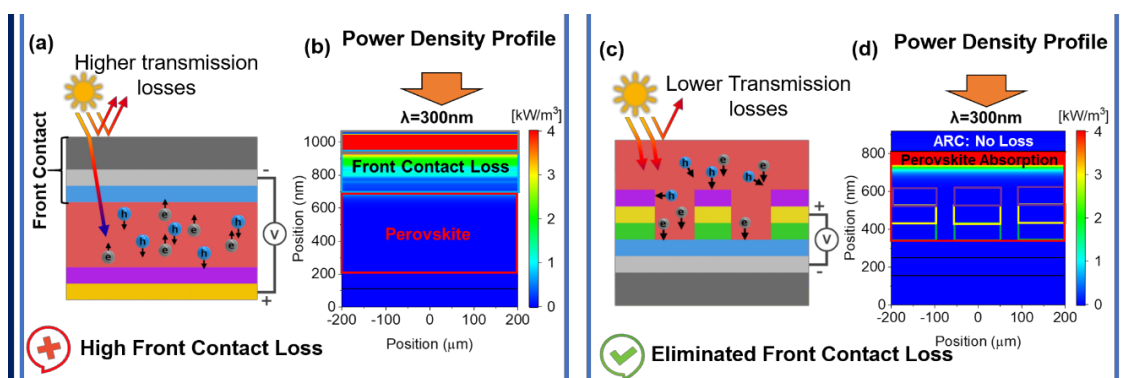


図 1 サンドイッチ型 PSC とバックコンタクト型 PSC のデバイスシミュレーションの結果。

次に、実際に真空蒸着技術を用いて、バックコンタクトが可能となる薄膜構造をパターン化できるか実験を行った。図2の写真に示すように、マスクを通して段階的に薄膜を形成することに成功している。ペロブスカイトを除く各層の厚さは100 nmであり、クラックや欠陥は見られなかった。このことは、真空蒸着法により、均一なパターン化された薄膜を形成できる可能性を証明している。ペロブスカイトの厚さは500 nmであり、断面SEM像では、200 μmのギャップと幅を持つ電極ギャップを使用した場合、非常に精密なバックコンタクト構造に近い構造の構築に成功している。

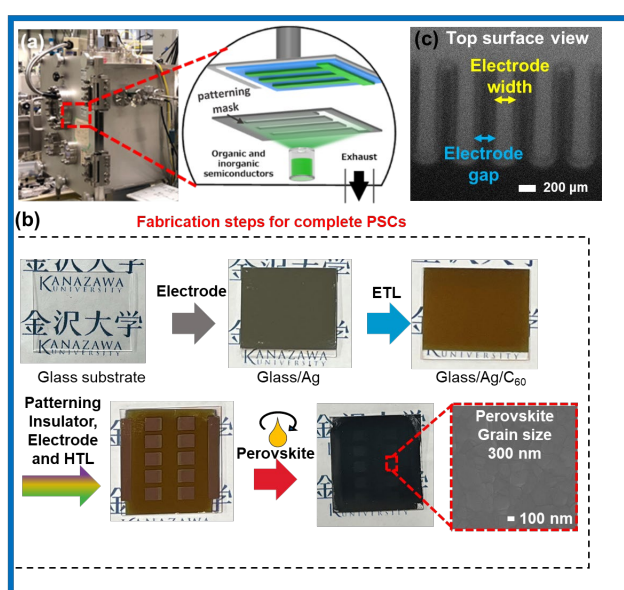


図2 実際にバックコンタクト構造を簡易な真空蒸着法で製膜した実験結果

以上、本研究では、バックコンタクト構造と真空蒸着による構造構築の可能性を示すことができた。今後の予定としては、材料や膜厚、マスクサイズの最適化により、シミュレーション構造と同じ構造を実際に構築することにより、世界最高性能のバックコンタクト型PSCの実現を目指す予定である。