ニュースリリース

令和 8 年 11 月 27 日

報道機関　各位

国立大学法人電気通信大学

スズ系ペロブスカイト太陽電池の高効率化に向けた光励起電荷キャリアの損失メカニズムを解明

【ポイント】

＊スズ系・鉛系ペロブスカイト太陽電池の性能差を電荷輸送の観点から比較
＊バイアス変調過渡電気測定を用いて電荷損失メカニズムを解明
＊鉛フリーペロブスカイト太陽電池の効率向上に指針を示した

【概要】

電気通信大学大学院情報理工学研究科基盤理工学専攻の沈青教授と、同大学 i-パワードエネルギー・システム研究センターの早瀬修二特任教授らによる共同研究チームは、バイアス変調過渡電気測定と数値シミュレーションを用いて、高性能スズ系ペロブスカイト太陽電池において、これまで十分に解明されていなかった電荷抽出の遅延に起因する電荷損失メカニズムを明らかにしました。

バイアス変調過渡電気測定と数値シミュレーションを用いて、高性能スズ系ペロブスカイト太陽電池における、これまで十分に解明されていなかった電荷抽出の遅延に起因する電荷損失メカニズムを明らかにしました。スズ系と鉛系ペロブスカイト太陽電池の電荷輸送ダイナミクスを比較することで、スズ系特有の自己ドーピングによる内部電界の弱まりと、電子・正孔の移動度の不均衡が相まって電子の抽出を遅らせ、動作電圧下で無輻射再結合（※1）による電荷損失を増大させることを明らかにしました。本成果は、スズ系ペロブスカイト太陽電池の発電性能を低下させる原因の解明につながるものであり、環境負荷の低い高効率な鉛フリー太陽電池の開発に向けた重要な指針となることが期待されます。

【背景】

ペロブスカイト太陽電池は、高い光電変換効率と低コストでの製造が期待される次世代太陽電池として注目されています。鉛系ペロブスカイト太陽電池では 27%を超える変換効率が達成されていますが、鉛の毒性及び環境への影響が懸念されるため、鉛を使用しないスズ系ペロブスカイト太陽電池の開発が進められています。

近年、スズ系ペロブスカイト太陽電池の光電変換効率は 17%を超えたものの、鉛系との間には依然として約 10%の効率差があります。これまで、その主な原因はスズの酸化やスズ空孔に由来する欠陥と自己ドーピング（※2）による無輻射再結合の損失と考えられ、欠陥の抑制や界面パッシベーションを中心とした研究が進められてきました。しかし、自己ドーピングが電池の動作条件における電荷輸送、特に電荷の抽出と収集（※3）に及ぼす影響については、十分に理解されていませんでした。

【手法】

研究チームは、電子輸送層との界面を段階的に改良したスズ系ペロブスカイト太陽電池を作製し、高性能な鉛系デバイスを参照として、動作中の電荷輸送を比較しました。バイアス変調過渡光電流（m-TPC）・光電圧（m-TPV）測定により、印加電圧に応じた電荷抽出効率と電荷収集効率を分けて評価しました。さらに、薄膜の深さ方向の発光、結晶構造、化学状態、界面欠陥、容量－電圧特性を調べ、数値シミュレーションで損失の物理要因を検証しました。

【成果】

本研究では、スズ系ペロブスカイト太陽電池において順方向電圧で顕著な電荷抽出効率低下に起因する電荷損失が生じることを観察されました。過渡電気測定の結果より、電荷の高速抽出過程と低速抽出過程が明確に分離されていることが示されました。また、高い順方向電圧を印加した場合、低速抽出過程とキャリア再結合過程との競合によって電荷損失が発生し、これが太陽電池の開放電圧（V_{oc}）および曲線因子（*FF*）の低下を引き起こすことが示唆されました。

さらに、数値シミュレーションにより、電子輸送層側における自己ドーピングによる吸光層内部での電界の遮蔽効果（※4）と、電子・正孔移動度の不均衡との相乗作用が、この損失を引き起こす主な物理的な要因であることを解明しました。本成果により、スズ系ペロブスカイト太陽電池の光電変換効率低下に対する理解を、従来の欠陥誘起無輻射再結合過程に加え、電荷輸送過程中の電荷損失へと発展させました。これにより、鉛フリーペロブスカイト太陽電池の効率向上に向けた指針が得られました。

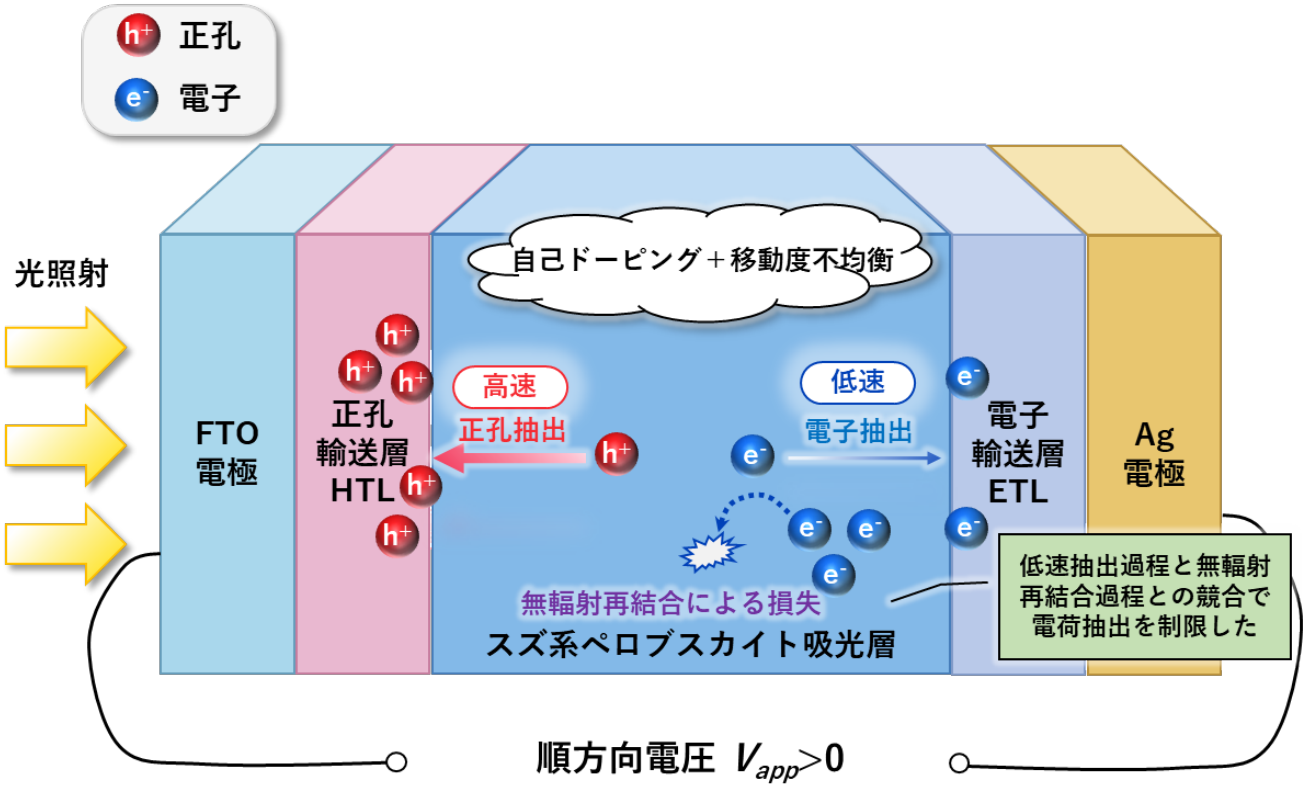


図 1. スズ系ペロブスカイト太陽電池における電荷抽出の遅延に起因する電荷損失メカニズムの模式図。

電子輸送層（ETL）側の界面近傍における p 型自己ドーピングにより、吸光層内部の電界が弱まり、電子と正孔の移動度の不均衡と相まって、電子の抽出が遅延する。特に順方向バイアス下では、抽出されにくい電子が吸光層内に滞留し、無輻射再結合によって失われる。その結果、開放電圧（*Voc*）と曲線因子（*FF*）が低下し、太陽電池の変換効率が制限される。

【今後の期待】

本研究は、スズ系ペロブスカイト太陽電池の高効率化に向けた新たな設計指針を示すものです。今後、従来の欠陥パッシベーションに加え、自己ドーピングの分布制御、内部電界の維持、電子・正孔のバランス的な輸送の改善により、V_{oc} と *FF* の損失低減が期待されます。これらの知見は、高

効率な鉛フリーペロブスカイト太陽電池の開発に貢献し、将来的には住宅や建物などへの応用も期待されています。

（論文情報）

雑誌名：「ACS Energy Letters」
論文タイトル： Extraction-limited Charge Loss in Tin-based Perovskite Solar Cells
著者： Yusheng Li, Dong Liu, Dandan Wang, Jiaqi Liu, Huan Bi, Liang Wang, Shuzi Hayase, Qing Shen
DOI： 10.1021/acsenergylett.6c02852

（外部資金情報）

本研究は、科学技術振興機構（JST）未来社会創造事業（JPMJMI22E2）および文部科学省科学研究費助成事業（KAKENHI、課題番号：24K01295、26286013）の支援を受けて実施されました。

（用語説明）

※1:無輻射再結合
半導体中で光を吸収することによって生成された電子と正孔が、光を放出せずに再結合する現象。再結合によって生じるエネルギーは主に熱として失われるため、太陽電池の発電効率や発光デバイスの発光効率を低下させる原因となる。

※2:自己ドーピング
材料自身の欠陥などによって、電子や正孔の濃度が変化する現象。

※3:電荷抽出と収集
電荷抽出：光励起によって太陽電池内部に生じた電子や正孔が、吸光層から電子・正孔輸送層へ移動する過程。
電荷収集：輸送層に抽出された電荷が電極へ移動する過程。

※4:電界の遮蔽効果
電荷の分布によって材料内部の電界が弱められ、電荷の移動が妨げられる現象。

【連絡先】

＜研究内容に関すること＞
電気通信大学大学院情報理工学研究科　基盤理工学専攻
【職名】教授
【氏名】沈　青
Tel：042-443-5471　　E-Mail：shen@pc.uec.ac.jp

電気通信大学　i-パワードエネルギー・システム研究センター
【職名】特任教授
【氏名】早瀬修二
Tel：042-443-5885　　E-Mail：hayase@uec.ac.jp

＜報道に関すること＞
電気通信大学総務部総務企画課広報係
Tel： 042-443-5019　Fax： 042-443-5887
E-Mail：kouhou-k@office.uec.ac.jp