

「太陽光を利用した独創的クリーンエネルギー生成技術の創出」
平成 23 年度採択研究代表者

H26 年度 実績報告書

野田 進

京都大学工学研究科
教授

フォトリソグラフィ・ナノ構造を活用した新しい光マネジメント技術の開発

§ 1. 研究実施体制

(1) 総合研究推進グループ(京大+シャープ+産総研齋氏グループ)

① 研究代表者:野田 進 (京都大学工学研究科、教授)

② 研究項目

本総合研究推進グループにより、フォトリソグラフィ・ナノ構造による新しい光マネジメント技術の解析および試料作製・評価を含めた本プロジェクト全体を遂行する。

§ 2. 研究実施の概要

本研究は、微結晶 Si($\mu\text{c-Si}$)等の、薄膜 Si 太陽電池の効率向上を目指し、フォトニック結晶を核とするフォトニック・ナノ構造による新しい光マネジメント技術の開発を目指すものである。具体的には図1に示すように、薄膜 Si 太陽電池に、フォトニック結晶を導入することにより、フォトニック結晶のもつ Γ 点バンド端での大面積共振作用を活用し、Si の光吸収係数が低下する波長帯域(600-1,000 nm)における光吸収率を増大させ、光電変換効率を増大させることを目指すものである。昨年度までに、まず、多数のバンド端共振モードを広帯域に渡って形成することで、広い波長範囲で光トラップ効果を実現可能であることを理論的に示した。

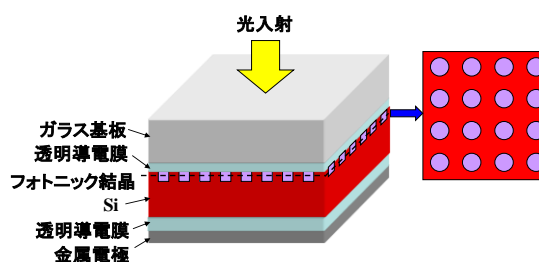


図1：本研究で研究対象とする、フォトニック結晶を有する薄膜太陽電池構造の模式図

続いて、フォトニック結晶を導入した極薄(~500 nm 厚) $\mu\text{c-Si}$ 太陽電池の作製法に関して検討を行い、クラックの発生をほぼ抑制しつつ $\mu\text{c-Si}$ 太陽電池を作製する条件を確立した。そして実際に $\mu\text{c-Si}$ 太陽電池を作製し、フォトニック結晶をもたない同一厚さの太陽電池構造と比較して、1.2 倍以上の変換効率増大が可能であることを示した。本年度は、昨年度の時点で得られた変換効率をさらに向上するべく、(1)フォトニック結晶上に成膜した $\mu\text{c-Si}$ の膜質改善による開放端電圧・曲線因子の改善、(2)裏面 Ag 電極のプラズモンの影響の理論解析と、その影響の抑制法の検討、を中心に研究を行い、~500nm 厚の $\mu\text{c-Si}$ 太陽電池としては世界最大級の変換効率である、9.2%の変換効率を実現することに成功した。以下に主な成果[1-3]をまとめる。

(1) 微結晶 Si の i 層の膜質改善の検討

まず、開放端電圧や曲線因子の向上に向けて、フォトニック結晶上の $\mu\text{c-Si}$ の膜特性について検討した。まず、これまでの CVD 法による成膜条件(SiH_4 の濃度を 5.25%で一定とした場合)について、 $\mu\text{c-Si}$ の結晶化率を、ラマン分光法を用いて分析したところ、表面付近では、~50%程度の結晶化率が得られているが、成膜初期段階では結晶化率が~30%程度と低くなっていることが判明した。そこで、成膜初期の結晶化率を増大させるため、 $\mu\text{c-Si}$ の成膜時の SiH_4 の濃度を調整した結果、厚さ方向に均一な結晶化率(~50%)をもつ $\mu\text{c-Si}$ を成膜可能となった。さらに、微結晶粒の成長時に、衝突が生じることによる欠陥形成を抑制すべく、緩やかな曲面状のフォトニック結晶構造を採用した。これらの結果を基に、~500nm 厚の $\mu\text{c-Si}$ 太陽電池を作製し、変換効率として 8.7%を得ることに成功した。

(2) 裏面 Ag 電極のプラズモンの影響の理論解析と、その抑制法の検討

上記のような膜特性の検討に加えて、さらなる効率向上のためには、発電に寄与しない寄生吸収の影響も含めた議論が重要となる。そこで、新たに RCWA 法を用いた解析法を構築し、Ag 等の電極材料の吸収をも含めて、光吸収の解析を行った。その結果、波長 500 nm より長波長領域で、Ag のプラズモン吸収の影響が強く現れていることが見られた。このような Ag のプラズモン吸収の影響を抑制する手法の一つとして、GZO 層の厚さを変化させ、Ag 表面に分布する光強度を低下させることを検討したところ、GZO 層を 50 nm から 100nm に増加させるのみで、Ag による光吸収量を低下でき、短絡電流密度が向上することが分かった。この結果を基に、GZO 厚さを調整した試料を作製したところ、短絡電流のさらなる増大が実現され、8.9%の変換効率を得ることに成功した。

上記のような検討に加え、薄膜 Si 太陽電池の専門家である産総研の齋氏のグループとの連携

を本年度より開始し、極薄膜(~500nm 厚) $\mu\text{c-Si}$ 太陽電池としては世界最大級の変換効率である、9%超(9.2%)の変換効率を実現することにも成功した。

- [1] Y. Tanaka, K. Ishizaki, M. D. Zoysa, T. Umeda, Y. Kawamoto, S. Fujita and S. Noda, "Photonic crystal microcrystalline silicon solar cells", Progress in Photovoltaics: Research and Applications, published online (2015) (DOI: 10.1002/pip.2577).
- [2] A. Oskooi, M. De Zoysa, K. Ishizaki and S. noda, "Experimental Demonstration of Quasi-resonant Absorption in Silicon Thin Films for Enhanced Solar Light Trapping", ACS Photonics, vol. 1, pp. 304-309 (2014) (DOI: 10.1021/ph400140f).
- [3] T. Inoue, M. D. Zoysa, T. Asano, and S. Noda: "Realization of dynamic thermal emission control", Nature Materials, vol. 13, no. 10, pp. 928-931 (2014) (DOI: 10.1038/NMAT4043).