

「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

H27 年度 実績報告書

野田 進

京都大学工学研究科
教授

フォトニック・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+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、フォトニック・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、薄膜 Si 太陽電池へとフォトニック結晶構造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 (600–1000 nm) における光吸収を増大させ、光電変換効率を増大させることを目指すものである。平成 26 年度までに、まず、理論的に、フォトニック結晶構造の導入により、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、波長域 600–1000 nm 帯で効果的な光トラップ効果が実現できることを示した。続いて、実際に、フォトニック結晶構造を有する ~ 500 nm 厚の極薄 $\mu\text{c-Si}$ 太陽電池の開発へと展開し、i 層厚さが ~ 500 nm と極めて薄いにもかかわらず、9.2% (アクティブエリア評価、以下同様) という、この膜厚では世界最大級の変換効率を実現することに成功した。

本年度は、まず、上述の極薄 $\mu\text{c-Si}$ 太陽電池の認証評価に向けて、 ~ 1 cm 角の大面積素子の開発に取り組んだ。さらに Si 層厚さが数 μm 程度の $\mu\text{c-Si}$ 太陽電池に、高い発電層特性を維持したままフォトニック結晶構造を導入して光吸収を増大させるために、前年度に検討を開始した、発電層である $\mu\text{c-Si}$ 表面への直接加工によるフォトニック結晶構造の導入法の構築を、本格的に行った。これにより、 $\sim 2\mu\text{m}$ 厚の素子で変換効率 10.2% を達成することに成功した。以下に、これら成果の詳細を述べる。

(1) フォトニック結晶極薄微結晶 Si 太陽電池の認証評価の検討

昨年度までに実証した、i 層厚さが ~ 500 nm と極めて薄いフォトニック結晶 $\mu\text{c-Si}$ 太陽電池の認証評価に向け、図 1(a) に示すような ~ 1 cm 角の均一な下地フォトニック結晶パターンの形成手法を構築し、この上に電極層および $\mu\text{c-Si}$ 層を成膜することで、素子の作製を行った。本素子の特性について、ラボ評価装置にて測定したところ、大

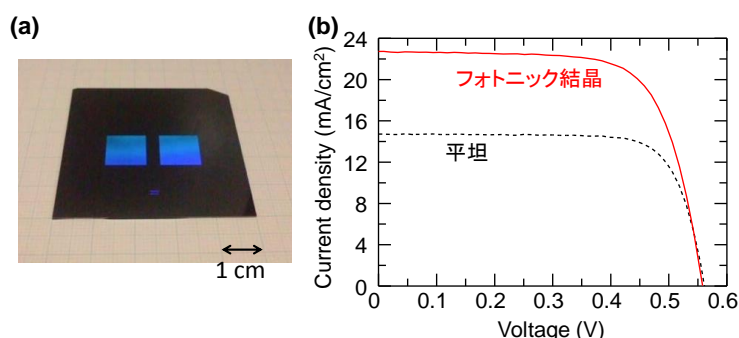


図 1: (a) ~ 1 cm 角セルのための、大面積フォトニック結晶パターン (b) 本太陽電池の電流-電圧特性 (アクティブエリア)

面積セルでも、フォトニック結晶構造の導入により、9.0% の効率を得ることに成功した。さらなる効率向上のために、詳細な検討を行った結果として、フォトニック結晶を形成した下地のロッド高さが設計よりもわずかに (20–30 nm 程度) 高いために、わずかに $\mu\text{c-Si}$ 同士の衝突が生じ、曲線因子をわずかに低下させている可能性を見出しており、この点の改善により小片素子を上回る効率も期待される。

(2) 数 μm 厚さの $\mu\text{c-Si}$ 太陽電池へのフォトニック結晶構造導入

これまで検討を進めてきた i 層厚さが ~ 500 nm の極薄 $\mu\text{c-Si}$ 太陽電池において得られた知見を基礎として、数 μm 程度の厚さの $\mu\text{c-Si}$ 太陽電池へのフォトニック結晶構造の導入による光吸収増大について検討を行った。この際、(1) で述べたような、 $\mu\text{c-Si}$ をフォトニック結晶を形成した下地の上に成膜する場合には、膜中へのクラック等の欠陥の発生を抑制する観点から、 $\mu\text{c-Si}$ 厚さがフォトニック結晶構造の格子定数以下に限定されてしまう。この課題を解決するため、前年度、平坦に成膜した $\mu\text{c-Si}$ 層の表面へとフォトニック結晶を形成し、光吸収を増大させる手法の検討に着手し

ていた。本年度は、本手法の本格的な構築を推進した。

まず、 $\mu\text{c-Si}$ のi層表面に直接フォトニック結晶加工する手法について各種検討を行った結果、プラズマを用いたドライエッチングを用い、ガス種等を選択することによって、結晶 / アモルファス相のエッチングバランスを調整しながら表面加工を施すことで、未加工の場合と同等の開放電圧や曲線因子を維持できることが明らかとなった。上記の知見の下、 $\mu\text{c-Si}$ のi層に対してフォトニック結晶構造の形成を行い、評価を行った結果、図2に示すように、10%を超える変換効率($\eta = 10.2\%$ 、 $J_{\text{sc}} = 26.5 \text{ mA/cm}^2$ 、 $V_{\text{oc}} = 0.517 \text{ V}$ 、 $\text{FF} = 0.740$)を得ることに成功した。さらに、透明導電膜による寄生吸収の抑制や、フォトニック結晶構造の改善により、より高い短絡電流密度が得られることをも明らかにし、世界最高水準の変換効率の $\mu\text{c-Si}$ 太陽電池への道筋をつけた。

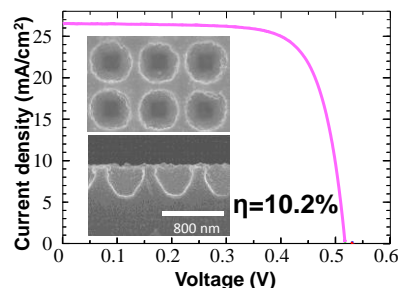


図2: 上部にフォトニック結晶を形成した厚さ2 μm の微結晶Si太陽電池の電流-電圧特性(アクティブエリア)

以上のような微結晶Si太陽電池へのフォトニック結晶構造の導入に加えて、より高い電気的特性(開放電圧、曲線因子)が期待される、単結晶シリコンの超薄膜(5~50 μm 程度)へのフォトニック結晶の導入による光吸収増大効果についても、検討を開始した。

H27年度の代表的な論文

- [1] K. Ishizaki, M. D. Zoysa, Y. Tanaka, T. Umeda, Y. Kawamoto, and S. Noda, *Optics Express*, vol. 23, pp. A1040-A1050, 2015.
- [2] Y. Kawamoto, Y. Tanaka, K. Ishizaki, M. D. Zoysa, T. Asano, and S. Noda, *Optics Express*, vol. 23, pp. A896-A902, 2015.
- [3] T. Inoue, M. D. Zoysa, T. Asano, and S. Noda, *Applied Physics Letters*, vol. 108, pp. 091101, 2016.