

「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

|                |
|----------------|
| H23 年度<br>実績報告 |
|----------------|

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+シャープ)」

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. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(3-1)に対応する)

本研究は、太陽光発電効率の飛躍的な向上を目指し、フォトニック結晶を核とするフォトニック・ナノ構造の活用により、新しい光マネジメント技術の開発を目指すものである。フォトニック結晶(PC)を利用すると、 $\Gamma$ 点バンド端と呼ばれる特異点において、大面積での共振モードが形成されるという興味深い現象が生じることが、研究代表者によるこれまでの検討により明らかになっている。本研究では、図 1 に示すようなフォトニック結晶を組み込んだ太陽電池構造を用い、 $\Gamma$ 点バンド端での大面積共振モードに光を結合させることで、特に Si の光吸収係数が低下する波長帯域(600-1000nm)における光吸収率を大幅に増大させることを目指している。具体的には、

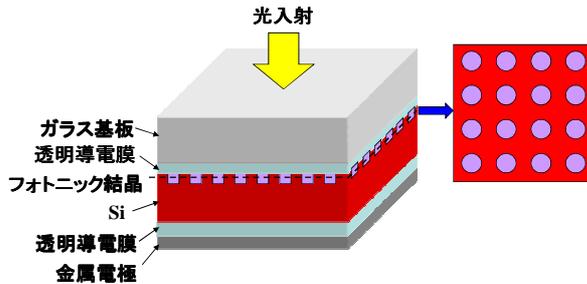


図 1：本研究で研究対象とする、フォトニック結晶を有する薄膜太陽電池構造の模式図

- I. 各種バンド端における共鳴効果と光トラップ効果の検証
  - II. 複数のバンド端モードの形成と光トラップ効果の広帯域化、光電変換効率増大の 2 つのステップで研究を進めていく。
- 本年度、ステップ I に重点をおいて、研究を進めた結果について、以下にまとめる。

### I. 各種バンド端における共鳴効果と光トラップ効果の検討

#### I-1. 基底バンド端から高次バンド端における共鳴効果<sup>1-3)</sup>と光トラップ効果の解析

本年度は、図 1 に示すような太陽電池における、Si 層での光吸収量の増大効果を、時間領域差分法(FDTD 法)を用いた電磁界解析により検討した。ガラス基板上の透明導電膜(IZO)上に SiO<sub>2</sub> の円柱ロッド(高さ 140nm、半径 130nm)を格子間隔 320nm の正方格子状に配置し、その後、薄膜 Si を 200nm 積層した構造を考えた。この構造に対し、ガラス層から太陽電池に対し垂直に平面波を導入した場合の光吸収スペクトルの計算結果を図 2 に示す。同図より、波長 650nm、730nm、790-800nm、910-920 nm において特に吸収率が增大していることが分かる。これらは、 $\Gamma$ 点バンド端の波長に対応している。これらの点では、Si による吸収と、共振モードの光閉じ込めで決まる  $Q$  値がマッチングしていることが判明した。同図の点線は、PC なしの構造の計算結果であるが、PC を導入することによる吸収の増大は明確である。太陽光の分光感度特性を考慮し、波長 500-1100nm 帯での光吸収率を平均したもの、すなわち、吸収率の波長依存性を  $I(\lambda)$ 、太陽光の AM1.5 の分光感度特性を  $S(\lambda)$  としたときに、

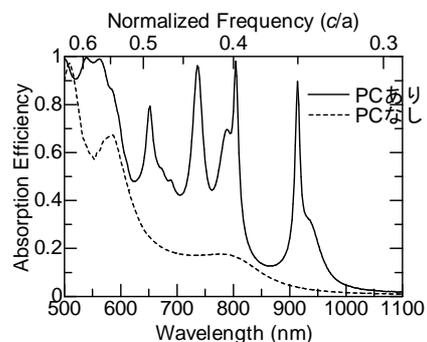


図 2：光吸収スペクトルの FDTD 計算結果。

$$\frac{\int_{500\text{nm}}^{1100\text{nm}} I(\lambda)S(\lambda)d\lambda}{\int_{500\text{nm}}^{1100\text{nm}} S(\lambda)d\lambda}$$

を計算した結果、PCなし構造での29%に対し、PCあり構造では53%と、吸収量が2倍近く増加することが明らかになった。また、構造の対称性から考えると、あらゆる偏光方向に対して同じ結果になることも明らかになった。

### Γ点バンド端共鳴効果による吸収増大の実験的実証

上述の太陽電池に対する数値解析と併せて、実験的評価をもスタートした。まず、薄膜多結晶Siを活性層に用い、pin型受光素子を形成した。ここで、Γ点バンド端共鳴モードが、1つのみ現れるように、活性層厚は50nmと薄くした。デバイス構造の模式図を図3(a)に示す。横型のpinフォトダイオードの活性層上部に設けた誘電体中に、フォトニック結晶を形成した。光吸収の増大により光電流が増大するため、光電流スペクトルの測定によりフォトニック結晶効果を検証した。図3(b)に結果を示す。設計波長846nmにおいて、光吸収はフォトニック結晶を加工していない試料(PCなし)に比べて、著しい光吸収増大効果(20倍)が見られることが分かる。ピークにおける吸収効率は、~0.4と見積もられた。この結果は、Γ点フォトニックバンド端における局在モードの形成と光吸収の増大を明確に示すものであり、薄膜Si系太陽電池構造へと展開するための第一歩となる結果が得られたと言える。すなわち光吸収率の増大やそれに伴う太陽電池の光電変換効率の向上へとつながると期待できる。

本研究では、その他、Γ点バンド端の大面積共振作用の新たな解析手法の開発やランダムなフォトニック結晶構造に対する検討<sup>4)</sup>を進めるとともに、新たな試みとして、活性層下部への3次元フォトニック結晶の導入<sup>5)</sup>や、より究極的な光電変換のための光マネジメント技術として、太陽光スペクトルの制御についても、基礎的な検討を開始した。

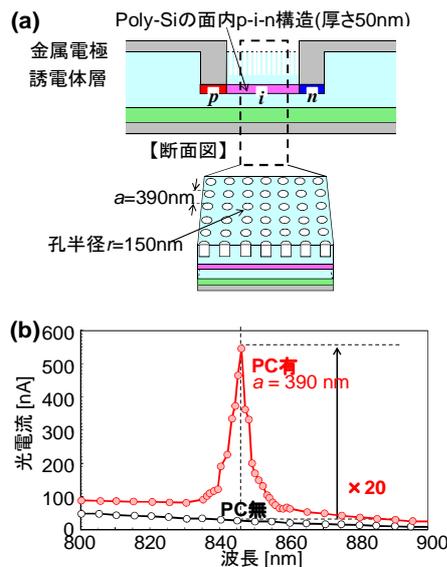


図3：(a) フォトニック結晶を導入した pin 型受光素子の概念図 (b) PC あり・なしの試料に対する光電流スペクトル。PC ありの構造の場合、846nm において光電流の増大がみられる。

### §3. 成果発表等

#### (3-1) 原著論文発表

1. Y. Liang, P. Chao, K. Sakai, S. Iwahashi, and S. Noda: "Three-dimensional coupled-wave model for square-lattice photonic crystal lasers with transverse electric polarization: A general approach", *Physical Review B*, vol. 84, no. 19 195119 (2011) DOI: 10.1103/PhysRevB.84.195119.
2. C. Peng, Y. Liang, K. Sakai, S. Iwahashi, and S. Noda: "Coupled-wave analysis for photonic-crystal surface-emitting lasers on air holes with arbitrary sidewalls", *Optics Express*, vol. 19, no. 24, pp. 24672-24686 (2011) DOI: 10.1364/OE.19.024672.
3. S. Iwahashi, K. Sakai, Y. Kurosaka, and S. Noda: "Centered-rectangular lattice surface-emitting photonic-crystal lasers", *Physical Review B*, vol. 85, no. 3 035304 (2012) DOI: 10.1103/PhysRevB.85.035304.
4. A. Oskooi, P. A. Favuzzi, Y. Tanaka, H. Shigeta, Y. Kawakami, and S. Noda: "Partially-disordered photonic-crystal thin films for enhanced and robust photovoltaics", *Applied Physics Letters*, (submitted).
5. K. Suzuki, K. Ishizaki, Y. Ohta, and S. Noda, "Surface modes of three-dimensional photonic crystals constructed using a top-down approach", *Optics Express*, vol. 19, no. 25, pp. 25651-25656 (2011) DOI: 10.1364/OE.19.025651.

#### (3-2) 知財出願

- ① 平成 23 年度特許出願件数(国内 3 件)
- ② CREST 研究期間累積件数(国内 3 件)