

「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

H24年度 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、薄膜 Si 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、 Γ 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薄膜 Si 太陽電池構造を用い、 Γ 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、

I. 各種バンド端における共鳴効果と光トラップ・吸収効果の検証

II. 複数のバンド端モードの形成と光トラップ・吸収効果の広帯域化

の 2 つのステップで研究を進めていく。昨年度に引き続き、理論面・実験面においてステップ I の検討を進めつつ、本年度から新たに理論面でステップ II の検討を開始している。合わせて、実験面でも、太陽電池における光マネジメント技術の実証を目指し、新たにアモルファスシリコンおよび微結晶シリコンを形成可能な PE-CVD 装置の導入を図るとともに、複数のバンド端モードによる吸収増大効果の基礎実証を行った。

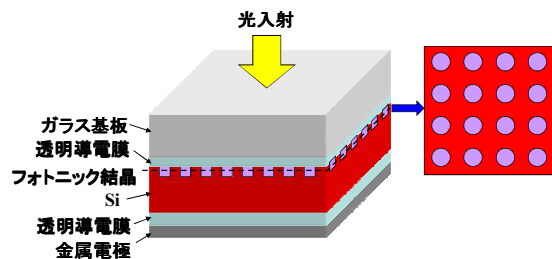


図 1：本研究で研究対象とする、フォトニック結晶を有する薄膜太陽電池構造の模式図

電磁界解析によるバンド端における共鳴効果を用いた光吸収増大効果の検討

図 1 に示すような太陽電池における、フォトニック結晶のバンド端共鳴効果²⁻⁵⁾を用いた Si 層での光吸収量増大効果を、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。ガラス基板の透明導電膜上に SiO₂ の円柱ロッド(高さ 140nm、半径 130nm)を格子間隔 275nm の正方格子状に配置し、その後、薄膜微結晶 Si を 400nm 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(a)に示す。同図から、波長 600-930 nm の範囲で複数の吸収率の増大がみられていることがわかる。同構造のフォトニックバンド構造を図 2(b)に示す。図 2(b)から、600-1000 nm の波長範囲において、厚み方向に >3 個の高次モードが存在していることがわかる。バンド図と吸収スペクトルとを比較すると、波長 920-930 nm の共振ピークが厚さ方向の基本モード、波長 820-830 nm の共振ピークが厚さ方向の 1 次モー

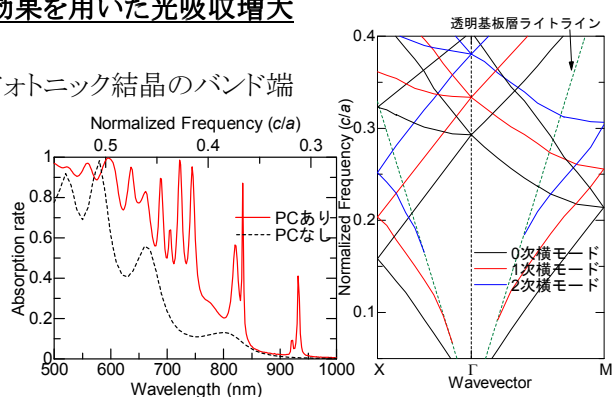


図 2：光吸収スペクトルと、フォトニックバンド構造

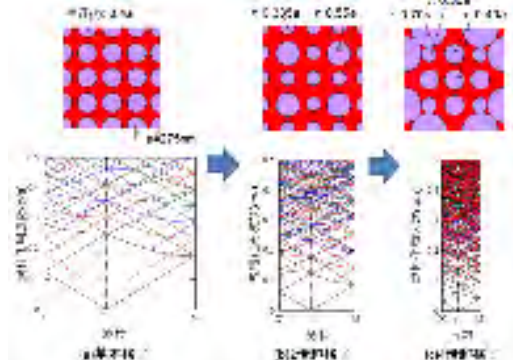


図 3：超格子構造の導入とバンド構造の変化

ド、波長 750 nm の共振ピークが厚さ方向の 2 次モードに対応していると考えられる。太陽光強度 (AM1.5) で重みづけをした、波長 500-1000 nm 帯での平均光吸収率を計算した結果、PC なし構造と比較して、吸収量が 1.61 倍増加することが明らかになった。

さらに、バンド端の複数の格子点を合体させたものを新たな格子点として配置するフォトニック超格子を考えた。図 3(a) の上図に示す基本構造から、図 3(b)(c) の上図に示すような 2×2 周期、4×4 周期の領域を新たな 1 つの格子点とする構造(2 倍超格子・4 倍超格子)を考える。この超格子化に従い、基本ブリルアン領域も小さくなる。その結果、図 3 下図に示すように基本ブリルアン領域にモードが折り返されるため、 Γ 点に、多くの共鳴点が発生するようになる。これらの超格子を導入した構造に対し、垂直に光を入射したときの光吸収スペクトルを FDTD 法を用いて計算した。

図 4 に、各々の構造に対して吸収特性を計算した結果を示す。基本格子の場合と比較して、波長 700-1000 nm の範囲で光吸収が増大していることが明快に見て取れる。太陽光強度 (AM1.5) で重みづけを行い、波長 500-1000 nm の範囲で光吸収スペクトルを平均した光吸収を計算した結果を図 5 に示すが、PC なし構造と比較すると 4 倍超格子で 1.80 倍とさらに増加するという結果が得られた。以上の結果は太陽電池へのフォトニック結晶導入により光吸収率の増大が実現できることを示す結果であると言える⁶⁾。

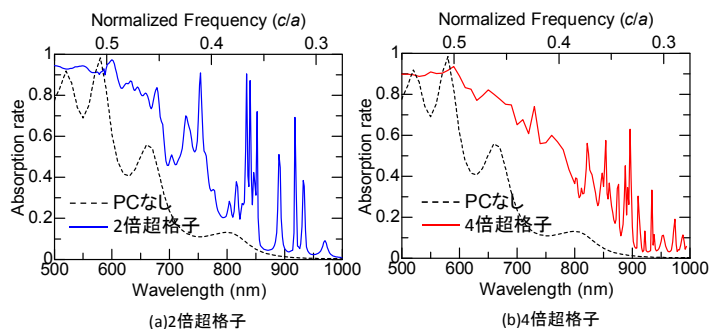


図 4：超格子構造の導入による光吸収スペクトルの変化

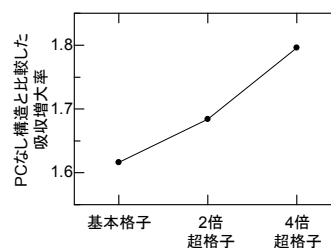


図 5：PC なし構造と比較した吸収率の増大率

実験的検証 - 太陽電池構造の実現に向けたプラズマ CVD 装置の導入と基礎検討 -

上記のようなフォトニック・ナノ構造を組み込んだ薄膜シリコン太陽電池構造の実現に向けて、アモルファルシリコンおよび微結晶シリコンの形成装置の導入を図った。具体的には、プラズマ CVD 法を用いた成膜装置を導入し、原料ガスである SiH_4/H_2 の流量比、投入電力、ならびに成膜室圧力等の検討を進め、アモルファルシリコン、微結晶シリコン膜の成膜を可能とした。得られた膜の評価の1つとして、ラマン分光スペクトルを測定したところ、微結晶シリコンにおいては結晶化が生じていることを示す 520cm^{-1} 近傍にピークが得られ、結晶化率 $\sim 50\%$ 程度の微結晶シリコン膜を得ることができた。また、積分球を用いた吸収特性の評価を行い、アモルファルシリコン、微結晶膜とも、長波長域で意図しない不要な吸収等の無い、良好なシリコン膜が得られていることを確認した。以上に加えて、 B_2H_6 および PH_3 を用いた p 型および n 型のドーピングについても検討を行い、太陽電池構造作製の基盤技術を開発した。得られたアモルファスシリコン膜 (320nm) を用い、基本周期フォトニック結晶構造を導入することで、厚さ方向の多モード化の効果により、フォトニック結晶を有しない試料に比べ、波長 500-800 nm において、1.4 倍の吸収増大が得られることを示すことにも成功した。

本研究では、その他、究極的な光電変換のための光マネジメント技術として、幅広い熱輻射スペクトルをエネルギーの損失なく狭窄化させるための基礎検討をも進めている⁷⁾。この技術を用いると、広いスペクトルをもつ太陽光を、太陽電池の電子バンドギャップ近傍の波長域の狭帯域スペクトルに変換可能となり、究極的な光電変換が可能と期待できる。

§3. 成果発表等

(3-1) 原著論文発表

●論文詳細情報

1. H. Shigeta, M. Fujita, Y. Tanaka, A. Oskooi, H. Ogawa, Y. Tsuda, and S. Noda, "Enhancement of photocurrent in ultrathin active-layer photodetecting devices with photonic crystals" *Appl. Phys. Lett.*, vol. 101, no. 16, pp. 161103, 2012 (DOI: 10.1063/1.4759149).
2. K. Kitamura, M. Nishimoto, K. Sakai and S. Noda, "Needle-like focus generation by radially polarized halo beams emitted by photonic-crystal ring-cavity laser", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 101, vol. 22, pp. 221103, 2012 (DOI: 10.1063/1.4767994).
3. Y. Kurosaka, K. Hirose, A. Watanabe, T. Sugiyama, Y. Liang, and S. Noda, "Effects of non-lasing band in two-dimensional photonic-crystal lasers clarified using omnidirectional band structure", *Opt. Express*, vol. 20, no. 19, pp. 21773-21783, 2012 (DOI: 10.1364/OE.20.021773).
4. Y. Liang, C. Peng, K. Ishizaki, S. Iwahashi, K. Sakai, Y. Tanaka, K. Kitamura, and S. Noda, "Three-dimensional coupled-wave analysis for triangular-lattice photonic crystal surface emitting lasers with transverse-electric polarization", *Optics Express*, vol.21, no. 1, 565-580, 2013 (DOI: 10.1364/OE.21.000565).
5. M. Nishimoto, K. Ishizaki, K. Maekawa, K. Kitamura, and S. Noda "Air-Hole Retained Growth by Molecular Beam Epitaxy for Fabricating GaAs-Based Photonic-Crystal Lasers", *Appl. Phys. Express*, vol. 6, no. 4, 042002, 2013 (DOI: 10.7567/APEX.6.042002).
6. Y. Tanaka, Y. Kawamoto, M. Fujita, and S. Noda, "Enhancement of Optical Absorption in Photovoltaic Devices on Multiple Wavelengths by Band-Edge Effect of Photonic Crystals", *Opt. Express*, (submitted).
7. M. De Zoysa, T. Asano, K. Mochizuki, A. Oskooi, T. Inoue, and S. Noda, "Conversion of broadband to narrowband thermal emission through energy recycling", *Nature Photonics*, vol. 6, no. 8, pp. 535-539, 2012 (DOI: 10.1038/NPHOTON.2012.146).

(3-2) 知財出願

CREST 研究期間累積件数(国内 3 件)