戦略的創造研究推進事業 CREST 研究領域「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」 研究課題「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」

# 研究終了報告書

研究期間 平成23年10月~平成29年3月

# 研究代表者:野田 進

(京都大学 大学院工学研究科、教授)

# §1 研究実施の概要

# (1)実施概要

# <u>目的</u>:

近年、シリコン(Si)系の太陽光発電デバイスは、世界中で需要が急増している。現 在、主に用いられているのは通常、数百 µm 程度の厚さの単結晶 Si・多結晶 Si を用い たデバイスであるが、これらのデバイスでは、究極的には、Si 資源の枯渇、価格的な問 題が生じてくると考えられる。このため、数 µm~数十 µm 程度以下の厚さで動作可能 なアモルファス Si や微結晶 Si、さらには超薄膜単結晶 Si などの薄膜 Si 太陽光発電デ バイスの研究が重要になると考えられる。しかしながら、薄膜 Si デバイスでは、太陽光 の放射照度の強い波長である 600~1000 nm の帯域における光子エネルギーが、吸収材 料の電子バンドギャップに近づくため、光吸収率が大幅に減少し、充分な光電流を得る ことが出来ず、結果として変換効率が低下することが課題となっている。

本研究は、上述の課題を解決し、変換効率を向上させることを目指して、フォトニック結晶を核とするフォトニック・ナノ構造を活用した、新しい光マネジメント技術の開発を目指す。具体的には、研究代表者独自の「フォトニック結晶のバンド端効果に基づく大面積共振作用」を用いて、薄膜 Si において光吸収の減少が顕著となる波長域(600~1000 nm)において、効果的な光閉じ込めを可能とする光マネジメント技術の開発を行っていくことを目的とする。

# 主な成果の概要:

本研究では、まず、(1)理論検討を中心としたフォトニック・ナノ構造による光吸収増 大特性の基礎検討により、ランダムテクスチャ構造を上回る光吸収の実現の可能性を明 らかにした。このような効果を実験的に検証するために、(II)フォトニック結晶構造を導 入した太陽電池の実現法の構築と吸収増大、変換効率の向上効果の実証を行ってきた。 具体的には、(A)Si 層の厚さが~500 nm 程度の非常に薄い微結晶 Si(uc-Si)太陽電池構造 を用いたフォトニック結晶の導入とその効果の実証を行い、また産総研の齋氏のグルー プと連携することにより、アクティブエリア評価にて、9%以上の変換効率(AIST 評価チ <u>ームによる世界認証値)を実現することに成功した。このことは、この極薄の uc-Si 太陽</u> 電池(認証値)として、世界最高の短絡電流密度かつ変換効率が実現したことを意味す る。さらに、研究の進捗を受けて追加した研究項目として、(B)より光吸収を増大させる ために、μc-Si 太陽電池における一般的な膜厚である、数μm 厚さのμc-Si 太陽電池へと 展開し、フォトニック結晶構造導入法の検討とその実証を行った。この際、μc-Si内部の 欠陥発生の抑制の観点から、平坦な下地に uc-Si を成膜し、その後上部にフォトニック 結晶を形成するという手法を検討し、アクティブエリア評価にて、11%の変換効率を実 現し、n/i/p 層の全てが Si からなる µc-Si 太陽電池として、世界最高の効率を得るこ に成功した。また、~12%という世界最大級の変換効率を得るための指針を示した。さら に、開放電圧・FFの改善の観点および世界の動向を先取りする形で、(C) 20(~50) µm という厚さの、単結晶 Si としては極めて薄い太陽電池へのフォトニック結晶導入につ いても検討を行い、20 μm 以下の厚さの単結晶 Si 太陽電池において世界最大となる、 36.1 mA/cm<sup>2</sup>の短絡電流密度を実現することに成功した。以下に、主な成果を示す。

# (I) フォトニック・ナノ構造を活用した光マネジメント理論の確立

多数のバンド端共振状態を形成する手法として、厚さ方向の高次モードの利用、複数の格子点を活用した 2~4 倍周期の「フォトニック超格子」の導入を提案し、~500 nm 程度の非常に薄い µc-Si 太陽電池構造において、大きな光吸収の増大効果が得られること(平坦構造の 1.8 倍)を示した。これにより、<u>ランダムテクスチャ構造におけるランバシアン限界を超える、光吸収の増大が実現可能であることを明らかにした</u>。

- 太陽電池の表裏面に2重のフォトニック結晶構造を形成することで、4倍周期のフォトニック超格子を超える光吸収増大効果が得られることを見出した。さらに、フォトニック結晶形状を制御し、上下方向の干渉を抑制することが光吸収増大に重要であることを示すとともに、透明導電膜やAg電極での不要な寄生吸収を抑制する設計をも行った。
- 以上により得られた電流密度と、一般に薄膜微結晶 Si 太陽電池で報告されている開 放電圧と曲線因子を考慮して、全厚が~500 nm と極めて薄い微結晶 Si 太陽電池に おいても、<u>9%を超える世界最高級の変換効率が達成可能という指針</u>を示すことに成 功した。
- さらに、(II)(B)の項目で詳しく述べるように、数 µm 厚の微結晶 Si へのフォトニック結晶の導入へと展開した。意図しない欠陥形成を避けうる、平坦な Si 層の上部にフォトニック結晶を形成した構造を提案し、斜め放射損失を抑制できるサブミクロン周期のフォトニック結晶の導入、および三角格子や非対称格子点形状により光吸収に寄与するバンド端密度を増加させることにより、短絡電流密度として、2 µm 厚の微結晶 Si にて 30 mA/cm<sup>2</sup>を超える光トラップが実現可能なことを示した。
- (II)(C)の項目で述べるように、20(~50) μm 厚の極薄単結晶 Si 太陽電池にも、フォトニック結晶を適用することで、20 μm 厚の単結晶 Si で短絡電流密度として 38 mA/cm<sup>2</sup>を超える光トラップの可能性を示した。

# (II)フォトニック結晶構造を導入した太陽電池の実現法の構築とフォトニック結晶導入 効果の実証

# (A)極薄 (~500 nm) µc-Si 太陽電池における、フォトニック結晶導入による変換効率 9%以上(アクティブエリア評価)の実証と世界認証

- フォトニック結晶構造上への微結晶 Si の成膜法ならびに膜特性について考察し、 テーパ状の側壁かつ膜厚程度以上の周期をもつフォトニック結晶構造において、 空洞欠陥・クラックを抑制した、良質な成膜が可能となることを見出した。
- 上下2重のフォトニック結晶構造を導入した太陽電池において、バンド端共振モードに起因する光吸収の増大効果を、光吸収スペクトル、外部量子効率において、初めて明快に観察し、変換効率の向上を示すことに成功した。
- 作製した構造を再現した構造に対して数値解析を行い、フォトニック結晶下地上に μc-Si を成膜することで得られた、上下2重のフォトニック結晶構造が、4 倍周期のフォトニック超格子を超える光吸収増大効果をもたらすことを見出した。
- フォトニック結晶上に成膜した µc-Si の膜質向上に関する検討を行うとともに、産総研の齋氏のグループとも連携することにより、~500 nm という極薄の µc-Si 太陽電池において、アクティブエリア評価にて 9%以上の変換効率(世界認証値)を実験的に達成した(500nm という極薄の µc-Si 太陽電池(認証値)として、世界最高の短絡電流密度かつ変換効率を実現した)。

# (B)数 μm 級の厚さの μc-Si 太陽電池へのフォトニック結晶構造導入による変換効率 11%(アクティブエリア評価)の実現と~12%の可能性の実証

- より一層の光電流の増加に向けて、(A)で述べた、極薄(~500 nm)µc-Si 太陽電池の検討に加え、新たに、µc-Si 太陽電池における一般的な膜厚である、数µm 厚さのµc-Si 太陽電池における、フォトニック結晶による光マネジメント技術の開発へと展開した。
- ・ 意図しない欠陥形成を避けうる、平坦な Si 層の上部にフォトニック結晶を形成した構造を提案し、サブミクロン周期のフォトニック結晶の導入により斜め放射損失を抑制すること、さらに三角格子や非対称格子点形状により、斜め漏れを抑えた状態でかつ光吸収に寄与するバンド端密度をより一層増加させるという、フォト

ニック結晶ならではの設計指針を築き、30 mA/cm<sup>2</sup> を超える短絡電流密度が期待 されることを示した。

- 下地へのフォトニック結晶構造を導入した場合に生じる、µc-Si層への意図しない 欠陥形成による電気特性の劣化を避けるために、平坦な下地にµc-Siを成膜し、µc-Si表面にフォトニック結晶を形成するという手法を構築した。本構造において、 良好な電気特性を実現するため、µc-Siのi層表面へのフォトニック結晶加工法を 詳細に検討し、µc-Siを構成する結晶相とアモルファス相のエッチングバランスが 均一となるようにエッチング加工を施すことが重要であることを示した。
- 理論検討に基づき、バンド端増大のための三角格子構造の導入、また寄生吸収抑制のための透明導電膜キャリア密度の低減による自由キャリア吸収の抑制を実験的に検討し、さらに光吸収増大のための膜特性の改善(結晶化率の増大)を行い、28mA/cm<sup>2</sup>を超える短絡電流密度を得た。さらに、開放電圧増大のためにドープ層成膜手法の最適化等をも行った結果、<u>表面にフォトニック結晶構造を形成した世界的に例のない太陽電池構造において、アクティブエリア評価にて11%の変換効率が実験的に得られ、n/i/p層の全てがSiからなるµc-Si太陽電池における世界最高</u>効率を実現することに成功した。
- 上記の結果を一歩進め、ワイドギャップ窓層(p-nc-SiO<sub>x</sub>)等による短波長吸収損失の抑制による、さらなる短絡電流密度の増大を、理論・実験の両面から示した。 さらなるフォトニック結晶構造の最適化(孔形状・深さの制御、非対称性導入による結合可能なバンド端密度の増加)によって、さらに短絡電流密度を増大させるとともに、深いフォトニック結晶構造でも電気特性を低下させないよう、加工表面の 欠陥を修復しうる表面への成膜条件の詳細な検討、産総研の齋氏のグループとの 連携により、変換効率~12%の実現が期待される。

#### (C)薄膜 (20(~50) µm 程度) 単結晶 Si 太陽電池への展開

- µc-Siと比較して、開放電圧・FFの改善が可能という観点、また単結晶 Si 太陽電 池における世界の動向を先取りする形で、20(~50)µm という厚さの、結晶 Si とし ては極めて薄い太陽電池への展開についても初期検討を進めた。
- µc-Si において得られた知見を基に、薄膜単結晶における吸収特性の解析を行い、 裏面に電極を集約したバックコンタクト型の太陽電池構造において表面での吸収 損失を抑制することで、厚さが 20µm の場合でも、短絡電流密度が 38 mA/cm<sup>2</sup>を 超えうることを示した。また、表面再結合を 30 cm/s 以下へと抑え、20µm 厚での キャリア寿命として~40µs 以上を得ていくことで、この膜厚では最大となる ~ 18%以上の変換効率が期待されることを示し、薄膜単結晶太陽電池として有効な構 造の設計に成功した。
- SOI ウエハを用いたスラブ状の Si 層の形成法、バックコンタクト型の p/n ドープ 領域のイオン注入・活性化アニール処理の手法を構築し、20(~50) µm 程度の薄膜 デバイスの作製法を確立した。さらに、各種プロセスがキャリア寿命に与える影響 を調査し、特に活性化アニール時の表面の保護が重要であることを見出した。
- これらを元に、20(~50) µmの薄膜単結晶 Si 太陽電池へのフォトニック結晶の導入を行い、フォトニック結晶を導入しない場合の 30.5 mA/cm<sup>2</sup>に対して、フォトニック結晶の導入により 36.1 mA/cm<sup>2</sup>まで短絡電流密度を増大させることに成功した。この結果は、20 µm以下の膜厚の単結晶 Si 太陽電池における世界最高値であり、世界の動向である、単結晶 Si の薄膜化に対する、本技術の有用性が明らかになった。さらに、フォーミングガスアニールによる界面状態の向上、ドープ領域・電極の占める割合の低減等による開放電圧の向上についても検討を行い、高効率動作への指針を得た。

注)上記のうち、(B)数 µm 級の厚さの µc-Si 太陽電池へのフォトニック結晶構造導入 および(C)薄膜(20(~50) µm)単結晶 Si 太陽電池への展開は、当初の計画書にはない 項目であったが、研究の進捗とともに、さらに追加的に研究を進めることになった項目 であることに注意されたい。

#### (2)顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

# <u>1.フォトニック結晶のバンド端共振作用の利用による光トラップという新しい概念の</u> 提唱

薄膜 Si 太陽電池における光吸収を増大させる手法として、フォトニック結晶により 形成されるバンド端共振モードに光を結合させ、Si と光を長時間相互作用させることで、 光吸収を増大させるという新たな手法を提案した。厚さ方向の高次モードの利用、超格 子構造、三角格子や非対称形状の導入によって、多数のバンド端を密に形成して広帯域 で光を吸収させる方法を構築し、全厚が~500 nmの極薄 μc-Si 層において、変換効率と して 9%を超える可能性を、全厚が数 μm 程度の μc-Si 層において、変換効率として 11~12 %を実現する可能性を、薄膜単結晶 Si 層太陽電池(20(~50) μm 程度の厚さ)にお いて、変換効率として 18 %を超える可能性を、理論的に明らかにすることに成功した。

#### 2. フォトニック結晶 µc-Si 太陽電池における光トラップ効果の実験的実証

上記1にて述べたように、微結晶 Si 層をもつ太陽電池にて、高い変換効率を実現する 可能性を示した。この結果を受け、µc-Si 層内部に欠陥等が生成されないようにするため のフォトニック結晶 µc-Si 太陽電池の作製法の検討を行った。さらに、µc-Si 太陽電池の 専門家である、産総研の齋氏のグループと連携も進めた。これらにより、~500 nm 程度 の極薄 µc-Si 層の太陽電池にて、実験的に変換効率 9%以上(アクティブエリア評価・世 界認証値)を達成(この極薄の µc-Si 太陽電池(認証値)として、世界最高の短絡電流 密度かつ変換効率を実現)した。また、~2 µm 厚さの µc-Si 太陽電池において、微結晶 シリコン上部にサブミクロン周期のフォトニック結晶を形成するという世界的にも例 を見ない全く新たな構造により、11%のアクティブエリア効率を実験的に達成し、n/i/p 層の全てが Si からなる µc-Si 太陽電池における世界最高効率を実現した。また、フォト ニック結晶形状・成膜条件のさらなる最適化、さらには産総研の齋氏のグループとの連 携による高品質微結晶 Si を用いることで、世界最大級の変換効率~12%の実現が期待で きることを示した。

# 3. 薄膜 (20(~50) µm 程度) 単結晶 Si 太陽電池へのフォトニック結晶構造の導入

上記2にて述べた微結晶 Si 太陽電池に加え、開放電圧・FF の根本的な改善の観点、 また単結晶 Si 太陽電池における世界の動向を先取りする形で、20(~50) μm 程度という 単結晶 Si としては極めて薄い太陽電池への展開をも行った。電極を裏面に集約したバ ックコンタクト型構造の厚さ 20 μm の太陽電池構造において、フォトニック結晶の導入 により短絡電流密度が 38 mA/cm<sup>2</sup>を超えうることを理論解析により示し、表面再結合を 30 cm/s 程度以下へと抑えることで、この厚さでは最大級となる 18%超の変換効率が期 待できることを示した。このような素子の実現に向けて、極薄の太陽電池構造の形成法 を検討し、電極形成やパッシベーション、アニールの技術を確立し、フォトニック結晶 を導入しない場合の 30.5 mA/cm<sup>2</sup> に対して、<u>フォトニック結晶の導入により 36.1</u> mA/cm<sup>2</sup>へと短絡電流密度を増大させることに成功した。この結果は、20 μm 以下の膜 厚の結晶 Si 太陽電池における世界最高の短絡電流密度であり、単結晶 Si の薄膜化とい う世界的な動向の中で、フォトニック結晶により、薄膜単結晶 Si 太陽電池において高い 光閉じ込め効果を実現することに成功した。 <科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>

# 1. 基本概念および関連研究に関する多くの特許出願

前述のように、フォトニック結晶により形成されるバンド端共振モードに光を結合させ、Si と光を長時間相互作用させることで、薄膜 Si 太陽電池における光吸収を増大させるという基本概念を提案してきた。また、新たな展開として、太陽光を効率的に利用する太陽光熱光発電へとつながる、狭帯域熱輻射光源の基礎開発も進めている。このような研究成果に関連した特許を、国内出願 16 件、外国出願 8 件出願し、産業化を見据えた活動を行ってきた。

#### 2. 実太陽電池デバイスでのフォトニック・ナノ構造による光マネジメント技術の実証

上記1にて述べた基本概念の提案・理論実証にとどまらず、実際に、フォトニック結 晶構造を導入した微結晶 Si 太陽電池および極薄単結晶 Si 太陽電池を作製し、その実証 を行ってきた。その際、産業化を見据え、微結晶 Si 太陽電池においては、µc-Si 層内部 に欠陥等が生成されない作製法を、単結晶 Si 太陽電池においては、パッシベーションや アニール等、表面再結合を抑制する加工が可能な作製法をも実証し、実試料で高い変換 効率を実証することに成功した。

#### 3. 薄膜単結晶 Si 太陽電池デバイスへの展開

現在、最も広く用いられている実用太陽電池である結晶 Si 系の太陽電池において、これま で数百 µm 程度の厚さのものが用いられてきたが、最近、Si 層の厚さを薄くするとい う流れが世界中で広まりつつある。Si 層の厚さが薄くなると、光吸収量が小さくなる ため、光マネジメント技術が従来にも増して重要になると考えられる。本研究で進めた 薄膜単結晶 Si 太陽電池におけるフォトニック結晶効果の実証は、まさにこの世の中の 潮流に合致したものであり、科学技術イノベーションに大きく貢献すると考えられる。

# <u>4. その他</u>

上述の、太陽電池において、光吸収量を増大させ、変換効率を向上させることを目指 した研究のほか、太陽からの熱輻射を、通常の太陽電池が吸収可能な狭帯域の熱輻射に 変換・集約する技術に関する検討も、着実に進めた。また、本研究の基になっているバ ンド端共振モードを用いたレーザに関する研究が、JST「ACCEL」事業および NEDO 事業に採択され、さらなる発展、実用化に向けた研究開発を進めている。

# §2 研究実施体制

# (1)研究チームの体制について

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)」 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
野田 進	京都大学 大学院工学研究科 電子工学専攻	教授	H23. 10~H29. 3
浅野 卓	京都大学 大学院工学研究科 電子工学専攻	准教授	H23. 10~H29. 3
富士田 誠之	大阪大学 大学院基礎工学 研究科 システム創成専攻	准教授	H23. 10~H29. 3
田中良典	京都大学 大学院工学研究科 電子工学専攻	講師	H23. 10~H29. 3 (CREST 雇用は H24.4~H26.11)
石崎 賢司	京都大学 大学院工学研究科 電子工学専攻	助教	H23. 10~H29. 3
MENAKA CHAMINDA	京都大学 大学院工学研究科 電子工学専攻	講師	H23. 10~H29. 3
Ardavan Oskooi	京都大学 大学院工学研究科 電子工学専攻	研究員	H23. $10 \sim$ H25. 12
Jeon SeungWoo	京都大学 大学院工学研究科 電子工学専攻	研究員	H27. 4~H29. 3
鈴木 克佳	京都大学 大学院工学研究科 電子工学専攻	修士博士連携 コース5年	H23. 10~H25. 3
中村 達也	京都大学 大学院工学研究科 電子工学専攻	修士博士連携 コース5年	H23. 10~H26. 3
梁 永	京都大学 大学院工学研究科 電子工学専攻	研究員	H23. 10~H27. 3
川本 洋輔	京都大学 大学院工学研究科 電子工学専攻	修士博士連携 コース5年	H23. 10~H28. 3 (CREST 雇用は H25.4~H27.3)
西本 昌哉	京都大学 大学院工学研究科 電子工学専攻	修士博士連携 コース5年	H23. 10~H28. 3
井上 卓也	京都大学 大学院工学研究科 電子工学専攻	特定助教	H23. 10~H29. 3
権平 皓	京都大学 大学院工学研究科 電子工学専攻	修士博士連携 コース5年	H25. 4~H29. 3
沖野 剛士	京都大学 大学院工学研究科 電子工学専攻	修士課程2年	H25. 4~H26. 3
北野 圭輔	京都大学 大学院工学研究科 電子工学専攻	修士博士連携 コース4年	H25. 4~H29. 3
梅田尚実	京都大学 大学院工学研究科 電子工学専攻	修士課程2年	H25. 4~H27. 3
橋本 康平	京都大学 大学院工学研究科 電子工学専攻	修士課程2年	H25. 4 $\sim$ H27. 3
前川 享平	京都大学 大学院工学研究科 電子工学専攻	修士課程2年	H25. 4~H28. 3

藤田 奨也	京都大学 大学院工学研究科 電子工学専攻	修士課程2年	H26. 4~H28. 3
安田 大貴	京都大学 大学院工学研究科 電子工学専攻	修士課程2年	H26. 4~H28. 3
元平 暉人	京都大学 大学院工学研究科 電子工学専攻	修士課程2年	H27. 4~H29. 3
中川 翔太	京都大学 大学院工学研究科 電子工学専攻	修士課程2年	H27. 4~H29. 3
吉田 昌宏	京都大学 大学院工学研究科 電子工学専攻	修士課程2年	H27. 4~H29. 3
長谷川 創	京都大学 大学院工学研究科 電子工学専攻	修士課程1年	H28. 4~H29. 3
小林 大河	京都大学 大学院工学研究科 電子工学専攻	修士課程1年	H28. 4~H29. 3
西後 淳貴	京都大学 大学院工学研究科 電子工学専攻	修士課程1年	H28. 4~H29. 3
小川 裕之	シャープ(株)研究開発本部	研究員	H23. 10~H25. 3
采山 和弘	シャープ(株)研究開発本部	チーフ	H25. 4~H26. 3
小出 直城	シャープ(株)研究開発本部	チーフ	H26. 4~H29. 3
重田 博昭	シャープ(株)研究開発本部	研究員	H23. 10~H29. 3
齋 均		主任研究員	H26. 4~H29. 3
岡田 桜子	京都大学 大学院工学研究科 電子工学専攻	研究・事務補 佐員	H24. 4~H28. 11

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)国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

本研究プロジェクトは、平成 25 年度まで、シャープから、直接、研究員の派遣を受けて 連携しながら研究を進めていた。平成 26 年度以降は、山口研究統括にご紹介いただき、新 たに、薄膜微結晶 Si 太陽電池の専門家である、産総研の齋氏との共同研究を推進した。フ オトニック結晶構造の形成を京都大学で、μe-Si の成膜を産総研で行うことで、厚さ~500 nm 程 度の極薄 μe-Si 層の太陽電池にて、実験的に変換効率 9%以上(アクティブエリア評価・世 界認証値)を実現するに至った。また、厚さ2 μm 級の μc-Si 太陽電池についても、高効率 化のための検討を現在共同で進めている。

さらに関連技術である熱輻射制御では、他の2社、さらに、バンド端効果を用いたデバイ ス関係では、他の4社との共同研究が開始するなど、産業界との連携が強化されている。

# §3 研究実施内容及び成果

本研究は、総合研究推進グループが、一体となって研究を推進している。従って、チーム 全体=総合研究推進グループとなるため、以下、総合研究推進グループの成果を示す。

# 3.1 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)研究実施内容および成果

# ① <u>研究の狙い</u>

近年、Si系の太陽光発電デバイスは、世 界中で需要が急増している。現在、主に用 いられているのは単結晶 Si・多結晶 Si を 用いたデバイスであるが、これらのデバイ スでは、100~200 μm 程度の厚さの Si が必 要となることから、将来的な Si 資源の枯渇 や、これに伴う価格の上昇といった課題を 考えると、μm オーダー以下の厚さで動作 可能なアモルファス Si や微結晶 Si などの 薄膜 Si 太陽光発電デバイスの研究開発は、 重要と言える。しかしながら、薄膜 Si デバ



# 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。

イスでは、太陽光の放射照度の強い波長 600~1000 nm の帯域における光子エネルギーが、 吸収材料の電子バンドギャップに近づくため、光吸収率が大幅に減少し、充分な吸収電流を えることが出来ず、結果として変換効率が低下してしまうことが課題となっている。

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・ナノ構造を活用した、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 トニック結晶の利用により、「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構造を組み込 んだ太陽電池において、「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(600~1000 nm)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に示すようなフォトニック結晶構造を導入した 薄膜太陽電池構造に対して、バンド端における共鳴効果による光トラップ効果を用いて光 吸収率を増大させる。また多数のバンド端を形成し、広い波長範囲で光トラップ効果を実現 することを目指す。その際、理論的な検討を行うと同時に、実験的な検証を行うために、デ バイス作製法の構築(Si層の成膜条件、フォトニック結晶形成プロセスの深化、フォトニ ック結晶構造の太陽電池構造への導入法、さらにはフォトニック結晶形成の簡便化など)や、 電気的な界面・膜中欠陥の特性の把握についても詳細な検討を加えていく。これにより、実 際的な太陽電池において、広帯域・高効率な光閉じ込めを実現することを目指す。

# ② 研究実施方法

実施体制:研究代表者 野田のリーダシップのもと、1名の准教授、3名の講師・助教、 20人以上の京都大学の研究員や学生、ならびにシャープからの派遣研究員が携わり、 理論・実験の両面から研究を実施してきた。研究推進に当たっては、毎週、研究代表者 の統括のもと、ミーティングを行い、研究課題の進捗や問題点などの議論を行ない、研 究を滞りなく進めた。

また、平成 26 年度からは、<u>産総研の齋氏のグループとの連携</u>を行い、齋氏のグルー プの成膜技術を生かすことで、微結晶 Si について、より高い変換効率を実現すること をも目指した。

解析:フォトニック結晶の設計や、動作解析は、大型計算機を用いて、主として FDTD

法や RCWA 法による電磁界解析により行なった。

<u>試料作製</u>:薄膜微結晶 Si 太陽電池の作製については、フォトニック結晶構造の作製には、既存の電子ビーム露光装置・エッチング装置を用いた。フォトニック結晶の加工の後、本 CREST において新たに導入した <u>PE-CVD 装置(H24 年度)を活用して、</u> 微結晶 Si を成膜した。また、透明電極層の成膜のために、RF マグネトロンスパッタ リング装置を H25 年度に導入した。

薄膜単結晶 Si 太陽電池の作製については、欠陥の少ない SOI 基板を用いて既存のエ ッチング装置により薄膜化したのち、電子ビーム露光装置・エッチング装置を用いて フォトニック結晶構造の作製、<u>PE-CVD 装置を活用したパッシベーション膜の成膜</u>を 行った。p,nのドープ層の形成は、本 CREST 経費にて外注にて行い、活性化アニー ルは、H27 年度に導入した加熱チャンバーユニットを利用した。

本 CREST で導入した装置は、微結晶および単結晶薄膜 Si 太陽電池において、フォト ニック結晶との組み合わせにより最大限の効率を実現していくための探索において、 大きな威力を発揮している。

構造評価・光学特性評価:作製した試料の特性評価には、本 CREST において H24 年度 に購入したソーラーシミュレータや積分球・分光装置、H25 年度に購入した EBIC(電 子線誘起電流法)装置を活用し、また分光感度測定装置等も利用して、着実に研究を推 進した。各種膜質の評価には、高精度電子顕微鏡や、H26 年度に購入した μ-PCD 装 置、レーザラマン分光装置、ホール測定装置等を用いた。

# ③ 研究成果

§1 および§2 にも、すでに記したように、フォトニック結晶における大面積共振作用を用 いた光吸収増大の概念を理論的に構築するとともに、実験的にもその実証に取り組んでき た。これらの結果、微結晶 Si 層の全厚がわずか~500 nm 程度の極薄 μc-Si 太陽電池におい て、アクティブエリア評価にて、9.1 %の変換効率(世界認証値)を実現することに成功した (この厚さの μc-Si 太陽電池(認証値) としては世界最高の短絡電流密度かつ変換効率)。さ らに、数 μm 厚さの μc-Si 太陽電池においても、フォトニック結晶構造の導入により、アク ティブエリア評価にて、11%の変換効率を実現し、n/i/p 層の全てが Si からなる μc-Si 太陽 電池において最大の効率を得ることに成功するとともに、変換効率~12%の実現が期待でき ることを示した。さらに、開放電圧・FF の改善の観点および、単結晶 Si 太陽電池の薄膜化 という世界の動向を先取りする形で、極薄単結晶 Si 太陽電池へのフォトニック結晶導入に ついても検討を行い、20 μm 以下の膜厚の結晶 Si 太陽電池において世界最高となる 36.1 mA/cm<sup>2</sup>の短絡電流密度を得ることに成功した。以上のように、全体として、当初の研究計 画を超える進展が得られたと考えている。以下に、その成果の概要を述べる。

# (I)フォトニック・ナノ構造を活用した光マネジメント理論の確立

本研究は、研究代表者独自の、フォトニック結晶のバンド端における大面積共振作用を基本として、共振モードに光をトラップさせることで、薄膜 Si における光吸収の増大を目指していくものである。その基盤として、フォトニック・ナノ構造、フォトニック結晶のバンド端共振作用による吸収増大効果について、理論的な検討を行った。

# 共振モードによる光トラップ効果の基本概念の構築

本研究では、まず、どのような特性をもつバンド端において吸収の増大効果が得られるのか、検討を行った。共振作用を用いた光トラップによる光吸収増大を考える場合、共振モードへ単に光をトラップするのみならず、その光を効率よく吸収させうる条件を検討する必要があると考えられる。そこで、単一のバンド端共振モードと外部との結合により決まる *Q* 

値(Qv:結合時定数に相当)と、光吸収材料への吸収により決まる Q値(QA:吸収時定数に相当)を考慮して、図 2(a)に示すような、一般化した光の結合モデルにおいて、吸収率が どのように変化するのかを検討した。モード結合理論を用いて共振波長における吸収率を 計算した結果、図 2(b)に示されるように、外部との結合による Qvと、光吸収材料への吸収 による QAをマッチングさせる(Qv=QAとする)ことで、吸収係数には依らずに、すなわ ち吸収係数が小さい場合でも、バンド端共振波長において 100%の吸収率が得られることが 判明した。さらに、Q値が 10 倍程度異なる場合においても、40%程度以上の高い吸収率が 得られることも明らかとなった。



**図2**: (a)モード結合理論による解析モデル、(b)モード結合理論を用いて計算 した  $Q_v/Q_A$ に対する吸収率の計算結果。 $Q_v/Q_A=1$ のときに 100%の光吸収が 得られることが分かる。

このような *Q*値のマッチングを利用した光吸収増大効果については、極薄膜(50 nm) Si フォトダイオード構造と単一のバンド端共振モードをもつ 2 次元フォトニック結晶の融 合により、その効果を実験的に実証(光吸収電流の 20 倍の増大を観察)することにも成功 している。

厚さ方向の高次モードによる複数のバンド端共鳴モードによる広帯域光トラップ法の検討

上記の予備的な知見の下、図 3(a)に示すような、フォトニック結晶構造を導入した薄膜 Si 太陽電池を想定して、光トラップ効果の解析を開始した。円柱ロッド状のフォトニック 結晶(格子定数 a:275 nm)を導入した構造を考え、製造コスト低減の観点、ならびに光吸収 により生じたキャリアの効率的な取り出しの観点から、微結晶 Si 層の厚さとしては、 400~500 nm 程度を想定して検討を行った。これは、通常の微結晶 Si 太陽電池と比べて 1/4~1/5 程度の薄さである。なお、図 3(b)に、計算で用いた微結晶 Si の光吸収係数を示す。



図3: (a)解析モデルの模式図、(b)計算で用いた微結晶 Si 層の光吸収係数。

微結晶 Si 層の厚さを 400 nm とした場合において、光の分散関係(フォトニックバンド 構造)を解析した結果を図 4(a)に示す。同図より、微結晶 Si 層の厚さを 400 nm とした場 合には、図 4(b)に示すような、基本モード(0次モード)に加えて、厚さ方向の高次モード (1次モード、2次モード)が存在し、これにより複数のバンド端を形成でき、これにより、 複数の波長で光吸収を増大しうることが判明した。そこで、本構造において、太陽電池に対 し垂直に光を照射した場合の吸収スペクトルの計算を行った結果が図 5 である。ここでは フォトニック結晶の効果を純粋に確認するため、光吸収については微結晶 Si 層のみを考慮 し、透明導電膜(TCO)での光吸収が存在しないとした。裏面電極については完全導体を用い た。(なお、後の実験の部分では、TCO 層の吸収などの効果を取り込んで計算していること に注意)図5に示すように、平坦な構造の場合(図中黒破線)と比べて、波長 600~930 nm の範囲に複数の吸収率のピークが得られ、フォトニックバンド構造(図4(a))との比較によ り、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 することが明らかになった。なお、これらの吸収ピークについて、Qマッチングの観点から 評価した結果を、表1に示す。同表より、波長 822 nm や 832 nm においては特に、Qマッ チング条件(Qv/Qaが1に近い)を満足しており、これらの波長において、特にバンド端 共振による光吸収の増大が起こっていることが明らかとなった。



図 4: (a)フォトニックバンド構造の計算結果、(b)厚さ方向の高次モード生成の概念図。



図 5: 垂直入射に対する光吸収スペクトル。ここでの計算では、光吸収については微結晶 Si 層のみ考慮し、透明導電膜(TCO)・裏面電極の吸収はないとしている。(註:後の実験結 果に関わる解析では TCO 等の吸収を考慮している。)

波長	$Q_{ m v}$	$Q_{ m abs}$	$Q_{\rm v}/Q_{\rm abs}$	吸収率
822 nm	72	324	0.222	0.565
832 nm	986	369	2.67	0.871
922 nm	70300	1379	51.0	0.091
932 nm	278	1632	0.170	0.411

**表1**:吸収ピークにおけるQマッチング特性。

#### フォトニック超格子構造の導入によるさらなる広帯域光トラップ法の検討

上記のように、基本となるフォトニック結晶構造を導入し、微結晶 Si の厚さ方向の高次 モードをも活用することで、複数の波長で吸収の増大が可能となることを明らかにするこ とが出来た。さらなる吸収増大のためには、多数のバンド端共振モードを密に形成すること が不可欠となる。この手法として、新たに、フォトニック超格子の導入を検討した。フォト ニック超格子とは、複数の格子点をひとまとめとして新たな格子点として配置した格子構 造であり、図 6(a)の上段に示す基本の周期構造から、図 6(b)、(c)の上段に示すような、2 周 期×2 周期、4 周期×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 子と呼ぶ)を考えた。このとき、実効的な周期が長くなることから基本逆格子ベクトルの長 さが短くなるため、基本ブリルアン領域も小さくなる。この結果、図 6 下段に示すようにブ リルアン領域にモードが折り返されるため、Γ点に、非常に多くのバンド端を形成すること が可能となる。このとき、フォトニック超格子においては、基本的に元の周期性を維持しな がら構造に変調を加えていることから、超格子を導入する前の基本周期構造における Qマ ッチングの特性を大きく乱すことなしに、バンド端の数を増加させる効果があるものと期 待できる。



図6:超格子構造の導入とバンド構造の変化。



図 7: 超格子構造の導入による光吸収スペクトルの変化。光吸収については微結晶 Si 層のみ考慮し、透明導電膜(TCO)・裏面電極の吸収はないとしている。(註:後の実験 結果に関わる解析では TCO 等の吸収を考慮している。)

これらの超格子を導入した構造に対し、垂直方向から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。ここにおいても、前述の計算と同様、微結晶 Si 層の吸収のみを考慮し、透明導電膜(TCO)での光吸収が存在しないとした。裏面電極については完全導体を用いた。計算結果を図7に示す。2倍超格子構造(図7(a))においては、5の基本格子の場合と比較して、ピーク間に新たな吸収ピークが発生し、これに伴い光吸収がさらに増大し、さらに、4倍超格子(図7(b))とした場合には、より吸収ピークの密度が増加し、ほぼ連続的に、光吸収の増大効果が現れることが明らかとなった。

光吸収の増大効果をを定量的に評価するために、太陽光の分光感度特性を考慮し、波長 500~1000 nm 帯での光吸収量を、以下のように計算した。



ここで、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)としている。図8に、フォトニック結晶なし構造と比較した、光吸収の増大効果をまとめた結果を示す。基本周期のフォトニック結晶の導入により、フォトニック結晶のない構造と比較して 1.6 倍の増大が得られ、さらに4 倍超格子の導入により 1.8 倍とさらに増加するという結果が得られた。



図8:フォトニック結晶なし構造と比較した吸収率の増大率。

ここで、フォトニック結晶の効果を議論するために、太陽電池において標準的に用いられ ている光閉じ込め構造である、ランダムなテクスチャ構造との比較を考えた。この場合には、 ランバシアン限界と呼ばれる吸収増大効果の予測限界が議論されている。これは、ランダム なテクスチャ構造により、太陽電池の内部で、光がランバシアン分布に従う角度方向に散乱 されると仮定するものであり、この仮定において、平均光路長が厚さの2倍となる。また、 デバイス表面における全反射による光閉じ込め効果も考慮に入れる。上記で検討した構造 と同一の厚さである、400 nm の微結晶 Si 層に対する、ランバシアン構造の光吸収率を図 8 の赤点線で示す。同図より、2 倍超格子を超えたあたりから、ランバシアン(テクスチャ構 造)を上回る光吸収が得られる可能性が判明した。

以上より、フォトニック結晶・超格子構造の導入により、多数のバンド端共振モードを形 成し、光をトラップさせ、吸収を増大させるという本研究の基本概念は、ランダムな構造等 による限界を上回る性能を有する、新たな光マネジメント技術として有用であることを明 らかに出来た。

#### フォトニック結晶の構造揺らぎの影響・効果の検討

上記の検討では、フォトニック結晶構造が完全に周期的に配置された構造に関しての検

討を行ってきたが、現実に作製された構造においては、試料作製プロセスにおける不完全性のために、格子点の位置や形状などがばらつく構造揺らぎが存在する可能性がある。したがって、このような構造揺らぎが存在したときに、光吸収特性にどのような影響・効果があるかを検討することは重要であると考えられるため、その検討を行った。

計算においては、フォトニック結晶の格子点の位置が、ランダムにばらついた場合について検討を行った。この際、与える揺らぎとして、揺らぎの最大値が $\Delta p$ の一様分布であるとし、 $\Delta p$ を変えながら解析を行った。この結果、 $\Delta p < 0.1 \sim 0.2a$ (a:フォトニック結晶の格子定数)程度の、比較的小さい構造揺らぎの場合には、フォトニック結晶のバンド端共振モードに起因する光吸収ピークのピーク強度は低下するが、線幅は広くなることが判明した。結果として、波長積算をすると、トータルの吸収量は、フォトニック結晶の揺らぎのない場合と比較して、光吸収が増大しうるということが明らかになった。この結果は、試料作製プロセスにおける不完全性が許容される、あるいはこのような揺らぎを積極的に取り込むことで、さらに吸収増大が図れることを示唆するものであると考えられる。

# (II)フォトニック結晶構造を導入した太陽電池の実現法の構築とフォトニック 結晶導入効果の実証

上記のような、理論的な検討結果を実験により検討することは、基本概念の実証にとどま らず、実際のデバイス特性をも考慮して、より高効率な光吸収の増大を得るという観点から も、極めて重要となる。そこで、本研究では、まず、極薄(~500 nm) µc-Si 太陽電池、に、 フォトニック結晶構造を導入した構造の作製に、注力することとした。特に、本研究では、pin 接合をもつ微結晶 Si 太陽電池とフォトニック結晶との融合を検討した。その後、新たな展 開として、数 µm 級の厚さの µc-Si 太陽電池、薄膜(20(~50) µm 程度)単結晶 Si 太陽電池 についても、フォトニック結晶との融合を検討し、実験的にフォトニック結晶効果の実証を 進めた。以下に、これらの内容について説明する。

# (A)極薄 (~500 nm) μc-Si 太陽電池における、フォトニック結晶導入による変換効率 9% 以上(アクティブエリア評価)の実証と世界認証

# 微結晶 Si 太陽電池へのフォトニック結晶構造の形成・導入技術の構築

上記のような、フォトニック結晶構造を有する微結晶 Si 太陽電池の実現のためには、フ オトニック結晶構造上に、欠陥等の生成を抑制しながら、高品質な微結晶 Si を成膜してい くことが、不可欠となる。フォトニック結晶の形成法としては、電子線(EB)露光と誘導結合 プラズマを用いた反応性イオンエッチング(ICP-RIE)を用いることを検討した。まず、フォ トニック結晶構造を形成した基板上に、微結晶 Si を成膜した場合に、どのような形状にな るのか、調査した。図 9 は、SiO<sub>2</sub> 膜に対して、ロッド状の 2 次元配列からなるフォトニッ ク結晶構造を形成し、この上に、プラズマ CVD を用いて微結晶 Si を成膜した結果を示し ている。この結果、図 9(a)に示すように、フォトニック結晶を形成するロッドが円柱状であ る場合には、ロッドとロッドの中間に、空孔が形成されてしまうことが判明した。さらに、 各ロッド上から成長した微結晶 Si 同士が衝突し、明瞭なクラックを生じてしまうことも明 らかとなった。

これらの欠陥は、太陽電池における電流取り出しを阻害する要因となりうる。そこで、こ のような欠陥を生じさせずに微結晶 Si を成膜する方法について検討を行った。本研究では、 先述のように EB 露光と ICP-RIE により形成した垂直な側壁をもつロッドを、O2 プラズマ 処理によってテーパ状に事後成形するという手法を採用し、様々な経過段階のロッド形状 に対して、特性を評価した。図 9(b)-(d)は、その結果の例を示している。同図から分かるよ うに、ロッドの側壁を垂直からテーパ状とし、ロッドを円柱から円錐形状へと変化させれば 空洞欠陥の発生を抑制でき、さらに、より緩やかな形状を採用していくことで、クラックの 発生をほぼ抑制した状態で、微結晶 Si の成膜が可能となることを示すことが出来た。

上述のような欠陥の影響に関して詳細に議論するために、膜中に含まれる、不要な原子間

の結合状態の発生の可能性を評価した。クラック等の欠陥による酸素の混入を考え、Si-O 結合の発生を、フーリエ変換赤外分光法を用いた評価した結果を図 10 に示す。なお、本測定は、成膜後、3 日経過後に行ったため、欠陥が存在すると表面が十分酸化されるため Si-O 結合が生成すると考えられる。図 10 において、2000 cm<sup>-1</sup>付近のディップは、Si-H 結合によるものであり、これは、Si 薄膜の比較的良質なパッシベーションに由来していると考え



**図9**:フォトニック結晶構造上への微結晶 Si 成膜の検討。(a)-(d)において、 SiO<sub>2</sub>ロッドに対する O<sub>2</sub> プラズマ処理時間を変化させることで、ロッドの形 状を円柱状から円錐状へと変化させた。



図 10: フーリエ変換赤外分光法による微結晶 Si 層における Si-O 結合の形成の評価

られる。一方、1100 cm<sup>-1</sup>付近のディップは、Si-O 結合に由来するものである。図 10 より、 ロッドが垂直の側壁をもち、空洞欠陥や結晶粒の欠陥が多くみられる構造ほど、Si-O に起 因する特徴的な吸収ディップが現れる一方、ロッドをテーパ状にすることにより、Si-O 起 因の吸収ディップが抑制されていることが分かる。この結果は、空洞欠陥が存在すると、欠 陥部分に空気が侵入し、ダングリングボンドを終端する、あるいは Si-H の結合を破壊する ことによって、新たに Si-O 結合が生成したことによるものと考えられる。以上の結果および、膜特性のフォトルミネッセンス等による評価についても検討し、テーパ構造の導入による欠陥の低減が、重要であることを明らかとしたる。

さらに、微結晶 Si 層の成膜の、格子定数依存性についての検討を行った。図 11 に、格子 定数 300 nm および 600 nm のフォトニック結晶構造上に、微結晶 Si を厚さ 1 µm 成膜し た構造の断面 SEM 像を示す。同図より、微結晶 Si 層の上部にクラック状の欠陥が生成さ れていることが分かる。この欠陥は、格子定数が 300 nm の場合には、底面から約 300 nm 付近より上部に、格子定数が 600 nm の場合には、底面から約 600 nm 付近より上部に、生 成されていることが分かる。この結果から、クラック状の欠陥を抑制するためには、微結晶 Si 層の膜厚を、フォトニック結晶の格子定数よりも小さくすることが重要であることが分 かる。(なお、この結果は、一般のテクスチャ構造においては、様々な間隔で、凹凸が形成 されているため、成膜した微結晶 Si の膜厚によっては、欠陥が意図せずして導入される可 能性があるが、フォトニック結晶の場合は、常に一定の間隔での凹凸状への成長であるため、 欠陥の発生がうまく抑えらえるという副次効果があることをも示唆する。)



図11:微結晶 Si 層成膜の格子定数依存性。

フォトニック結晶構造を導入した微結晶 Si 太陽電池の作製と高効率化に向けた検討 —初期太陽電池の作製と評価—



図 12:フォトニック結晶構造を導入した微結晶 Si 太陽電池の形成法の検討。 あらかじめフォトニック結晶構造を形成した基板を用意し、この上に Ag/GZO 裏面電極、微結晶 Si(nip)層、ITO/Ag 櫛形電極を順次形成する手法 を採用した。

以上の検討により、太陽電池の作製条件、ならびにフォトニック結晶を微結晶 Si 太陽電 池内に適切に形成するための基盤が整った。そこで、透明電極等の成膜法の構築をも進め、 実際に、フォトニック結晶構造を有する、太陽電池の試作へと展開した。図 12 に示すよう に、あらかじめ基板に対して、フォトニック結晶構造を形成しておき、この上に Ag/GZO の 裏面電極を成膜、そしてこの構造上に微結晶 Si ならびに ITO 層/櫛型 Ag 電極を順次成膜す ることで、フォトニック結晶構造を内包した太陽電池を作製することとした。この際、先述 のように、フォトニック結晶構造には、あらかじめテーパ加工を施したものを用意した。また、微結晶 Si 層の厚さとして、一般には 1.5~2 μm 程度とすることが一般的であるが、本研究では、Si 資源の有効利用やコスト面を考慮し、まずは、通常の 1/4 程度の厚さである、 ~500 nm 程度の微結晶 Si 層厚さの太陽電池について検討を行うこととした。なお、フォトニック結晶の格子間隔については、前述のように、微結晶 Si 層の厚さが格子間隔よりも大きくなると、クラック状の欠陥が生じてしまうことが明らかになっているため、狙いの Si 層厚さが~500 nm 程度であることから、本研究では格子定数を 600 nm とした。ここで、重要な点として、~600 nm の格子定数の採用は、先述の理論検討における、基本格子 275 nm に対して、2 倍周期(2 倍超格子構造)のフォトニック構造を導入したことに相当し、バンド端共振モードの増加作用が期待出来る。(註:なお、後述するように、最終的に完成した構造は、上下に2 重のフォトニック結晶構造をもつ構造となり、2 倍超格子構造であっても、4 倍超格子構造以上に相当する効果が得られることが新たに判明した。)

図 13(a)は、フォトニック結晶を形成した基板上に、Ag 層および GZO 層を堆積した結果の俯瞰 SEM 像であり、テーパ状のロッドが、Ag/GZO 層の成膜後にも、反映されていることが確認出来る。この構造に対して、微結晶 Si (i 層を~500 nm、p 層: 10 nm、n 層: 30 nm)および ITO を成膜した結果を図 13(b)に示す。良好にフォトニック結晶構造を維持しながら、太陽電池構造が実現したことが確認出来る。



図13:作製した太陽電池の SEM 像。



図14: (a)太陽電池の光吸収スペクトル、(b)I-V 特性の評価結果。

このようにして作製した素子について、光吸収スペクトルを測定した結果、図 14(a)のように、フォトニック結晶を導入することにより、600~1000 nm の波長域での大幅な光吸収の増大が実証出来た。多数の吸収ピークが見られており、バンド端共振効果の活用により、広帯域における光吸収増大効果を示すことに成功したといえる。次に、これらの太陽電池の電流・電圧特性を測定した結果、図 14(b)に示すように、明快な短絡電流密度の増大が得られた。平坦な場合の 15.0 mA/cm<sup>2</sup> から、フォトニック結晶の導入により 19.6 mA/cm<sup>2</sup> へと、1.3 倍の増大効果が得られた。変換効率については、平坦な構造の 5.6%から、フォトニック結晶導入により 6.8%まで向上した(アクティブエリア評価)。また、外部量子効率の波長依存性について評価した結果、図 15 に示すように、確かに、波長 600~1000 nm 域での量子

効率が増加しており、これが、短絡電流密度の向上に寄与していることが明らかとなった。 これらの結果から、バンド端共振効果の活用による広帯域における光吸収増大効果、光電変 換特性の向上効果について、基礎実証に成功したといえる。



さらに、図 13 に示す構造において期待される光吸収量について、FDTD 法を用いた電磁 界解析により詳細に検討した。図 13 に示す構造に見られるようなデバイス表面の特徴的な 球状の上面形状の効果を取り込んだ。また、(I)節で述べた計算とは異なり、透明導電膜 (ITO,GZO)における吸収をも考慮した、図 16(a)に示すような解析モデルへと展開した。な お、金属については完全導体として計算を行った。この構造に対して、垂直入射光に対する 光吸収スペクトルの計算を行った。この際、光電変換に寄与すると考えられる Si 層、およ び光電変換に寄与しないと考えられる透明導電膜(ITO,GZO)の光吸収を分離しするように した。計算結果を図 16(b)に示す。次に、図 17 に、フォトニック結晶構造と、フォトニッ ク結晶のない平坦構造に対して、微結晶 Si 層部分のみの光吸収量を計算した結果を合わせ て示す。同図の結果は図 15 に示す外部量子効率のスペクトルと似た傾向を示しているが、 FDTD 計算結果のほうが、より大きな値を示しており、潜在的により高効率な太陽電池を 実現出来る可能性を示唆している。ここで、図 17 に示す吸収スペクトルと太陽光スペクト ルから見積もった短絡電流密度は、25.7 mA/cm<sup>2</sup>と計算され、本結果は全厚が~500 nm 程 度の非常に薄い微結晶 Si 層でも、9%を超える光電変換効率が期待出来ることを示している と考えられる。なお、このような高い吸収が得られる要因として、詳細は後述するが、実験 で得られたドーム状の表面となっている効果が重要であることが判明した。また、2×2 超格 子相当の構造でありながら、4×4 超格子の吸収効果を超えるような吸収が得られており、こ の点は、当初予定していなかった新たな発見と言える。



図 16: (a)作製した太陽電池構造の FDTD 解析モデル、(b)Si 層・透明導電膜 層の光吸収スペクトルの計算結果。



図 17:フォトニック結晶構造と平坦構造の微結晶 Si 層のみの光吸収スペクト ルの計算結果。

# 一フォトニック結晶上への微結晶 Si 太陽電池作製の深化とさらなる高効率化-

以上のように、通常の 1/3~1/4 程度の、全厚が~500 nm 程度の極薄構造であっても高い 変換効率を得られる可能性が明らかとなったため、実験的なさらなる高効率化にも取り組 んだ。特に、吸収層である微結晶 Si の i 層の品質改善は、短絡電流密度の向上に加えて、 開放電圧や曲線因子の改善にも直結するため、重要となる。そこで、フォトニック結晶上に 成膜した微結晶 Si 層について、特に重要である結晶化特性の観点から調査を行い、デバイ ス作製によりその効果の検証を行った。図 18 は、前記の太陽電池の成膜条件として、PE-CVD 時に、SiH<sub>4</sub>とH<sub>2</sub>の流量比を一定(SiH<sub>4</sub>ガスとH<sub>2</sub>ガスの流量比: 5.25%)として成膜し た場合の、結晶化特性の膜厚依存性を調べた結果を示している。表面付近では、一般に太陽 電池に好適とされている~50%の結晶化率となっているが、成膜初期段階では、結晶化率が 低く、不均一な膜となっていることが判明した。これは、光吸収特性の観点ならびに、キャ リア輸送特性の観点から、改善の余地があるといえる。そこで、逐次SiH4/H2の流量比を制 御し、膜厚方向に一定の~50%の結晶化特性となるように、成膜条件の探索を行った。図 19(a)に示すように、SiH4/H2の流量比を変えながら成膜した場合の結晶化率の膜厚依存性 の測定結果を図 19(b)に示すが、結晶化率が厚さ方向に均一(~50%)となる微結晶 Si の成膜 を実現することに成功した。また図 20 に透過型電子顕微鏡(TEM)像(暗視野で観測)と、電 子線の回折パターンを示す。同図より、特に成膜初期段階でも結晶化が進んでいることが確 認され、また回折パターンより、(220)配向/(111)配向の回折強度比が 1.3 倍程度増加してい ることも確認した。



**図 18**: SiH<sub>4</sub> ガスと H<sub>2</sub> ガスの流量比を 5.25%と一定として成膜した場合の結晶化率の厚さ依存性。



**図 19**: (a)結晶化率を一定とするための SiH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> ガスの流量比の変化、(b) (a) に基づいて作製した試料の結晶化率の厚さ方向依存性。



**図 20**: 試料断面の透過型電子顕微鏡(TEM)像(暗視野)と電子線の回折パターン。(a) SiH4/H2 ガスの流量比一定の従来条件で作製した試料、(b)試料の結晶 化率を 50%で一定とした試料。

そこで、上述のような、結晶化率を均一化した条件を用いて、太陽電池を作製した。なお、 太陽電池作製時には、SiH4/H2の流量比を、図 19 に示すような離散的ではなく、連続的に 変化させるようにした。また、素子完成後のアニーリング条件や、測定温度についてもあわ せて検討を行った。作製した太陽電池構造の SEM 写真を図 21(a)に示す。本素子の電気特 性の評価を行った結果、図 21(b)のように、短絡電流密度、開放電圧、曲線因子のそれぞれ を改善することが出来、8%を超える変換効率(アクティブエリア評価)を得ることに成功 した。



図 21: (a) 結晶化率一定として作製した太陽電池構造の SEM 像、(b)本太陽 電池の電流電圧特性 図 14(b)に示した特性も合わせて示す。

さらに i 層の膜質を良くする観点から、図 20(b)に示す TEM 像の分析を行ったところ、 ロッドの側面から成長した微結晶 Si 粒と、底面から成長した微結晶 Si 粒とが、衝突してい ることを見出した。この結果を踏まえて、図 22 の TEM 像および SEM 像に示すような、 より緩やかな曲線状の底面構造を導入することをも検討した。図 22(a)に示す TEM 像より、 微結晶 Si 粒の衝突が抑制出来ていることが分かる。この結果を踏まえて太陽電池構造を作 製し、電気特性の測定を行った結果を図 23 に示す。図 21 に示す試料と比較して、短絡電 流密度・開放電圧・曲線因子のさらなる改善が見られ、結果として、<u>変換効率 8.7%(アク</u> ティブエリア評価)まで得ることに成功した。



図 22:底面を緩やかにした太陽電池構造。(a)TEM 像、(b)SEM 像。



図23:底面を緩やかにした太陽電池構造の電気特性。

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て議論することが重要となる。当初の検討においては、時間領域差分法 (FDTD 法)を用いた解析を行い、µc-Si 層だけでなく、透明導電膜の光吸収も含めた解析を 行ってきたが、裏面の Ag については、FDTD 法では現実的な計算時間での解析が難しいた めに、完全導体として解析を行ってきた。そこで、新たに、厳密結合波理論(RCWA)法を用 いた解析法を構築し、Ag の電極材料の吸収をも含めた、より厳密な太陽電池構造の光吸収 の分析を行った。図 22 に示す、緩やかな曲面状の底面構造を導入した太陽電池構造におい て、光吸収の分析を行った結果を図 24(b)に示す。図中の赤色で示した領域は、光電流に寄 与する i 層 µc-Si での吸収を、銀色は、Ag 電極での吸収損失を表す。同図より、波長 500 nm より長波長の領域で、Ag の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 銀のプラズモン吸収の影響を抑制する手法の1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。図 24(a)に、GZO 層の厚さを 10 nm に 減少させた場合、図 24(c)に、GZO 層の厚さを 100 nm に増加させた場合の吸収スペクトル を示す。同図より、銀と  $\mu$ c-Si の距離を近づけると、Ag による吸収量が増加し、 $\mu$ c-Si への 吸収量が減少する。逆に銀と  $\mu$ c-Si の距離を離すと、Ag による吸収量を低下できることが 分かる。GZO 層を 50 nm から 100 nm に増加させるのみで、銀による吸収量を低下でき、 短絡電流密度の計算値が 20.9 mA/cm<sup>2</sup> から 21.6 mA/cm<sup>2</sup> へと向上することが分かった。



**図 24:** GZO 厚さを変化させた構造に対して RCWA 法で計算した光吸収スペクトル。(a) GZO 厚さ 10 nm、(b) GZO 厚さ 50 nm、(c) GZO 厚さ 100 nm。

この結果を基に、GZO 厚さを 100 nm と厚くした試料を作製した。図 25(a)に作製した SEM 像を示す。図 25(b)に、作製した太陽電池構造の EQE、図 25 (c)に電流電圧特性を示 す。図 25 に示す GZO 厚さ 50 nm の構造と比較して、短絡電流密度のさらなる増大が実現 され、8.9%の変換効率(アクティブエリア評価)を得ることに成功した。



#### 産総研との連携による高効率化と世界認証評価

以上のような京都大学での検討に加え、平成26年度より、山口研究統括からのご示唆に より、薄膜 µc-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新たに開始 した。京都大学で作製した下地上に、齋氏のグループが µc-Si 層を成膜することで、太陽電 池の作製を行った。<u>まず、2 mm×4mm 角の大きさの素子にて、ラボ評価を行った結果を図</u> 26に示す。同図より、アクティブエリア評価にて変換効率9.2%を実現することに成功した。



**図26:** 産総研の齋氏のグループとの連携により作製した太陽電池特性の評価 結果(小面積セル・ラボ評価)。アクティブエリア評価にて変換効率~9.2%を実 現することに成功した。

さらに、世界認証を目指して、図 27(a)に示すような 1cm 角の太陽電池を作製した。図 27(b)に、AIST の評価チームにより世界認証された太陽電池特性を示す。変換効率 9.1%(ア クティブエリア評価:測定された実効変換効率 8.64%を、電極面積の測定値を考慮して 0.952 で除したもの)が得られ、9%以上の世界認証効率を実現することに成功した。



図 27: (a)認証評価用太陽電池、(b) AIST の評価チームにより世界認証された 太陽電池特性。アクティブエリア評価にて 9.1%の変換効率を実現することに 成功した。

以上のように、微結晶 Si 太陽電池において、<u>微結晶 Si 層の厚さが~500 nm 程度と非常</u> に薄いにもかかわらず、9.1%という、この厚さでは世界最高の変換効率・短絡電流密度の 太陽電池(世界認証値・アクティブエリア評価)を実現でき、当初の予定を上回る発展があ ったと考えている。

# (B)数 μm 級の厚さの μc-Si 太陽電池へのフォトニック結晶構造導入による変換効率 11%(アクティブエリア評価)の実現と~12%の可能性の実証

(A)で述べた、i層厚さが~500 nmの極薄 µc-Si 太陽電池に加え、より一層の光電流の増加を実現する観点から、一般的な µc-Si 太陽電池の膜厚である、数 µm 程度の厚さの微結 晶 Si 太陽電池へのフォトニック結晶効果の実証に成功すれば、産業上において極めて有用であると考えられるため、次に、数 µm 程度の µc-Si 太陽電池へのフォトニック結晶構造 の導入とその変換効率の向上に向けて検討を行った。この際、(A)で述べたような、µc-Si をフォトニック結晶下地上に形成する従来法の場合には、欠陥発生の観点から µc-Si 厚さ が限定される。この課題を解決するため、平坦な下地に µc-Si を成膜し、その後上部にフ ォトニック結晶を形成するという手法を検討した。

#### μc-Si 太陽電池上面へのフォトニック結晶構造導入効果の実証

まず、uc-Si 太陽電池の上面のフォトニック結晶形成による効果を確認するために、電磁 界解析による理論検討を行った。解析モデルとして、図 28(a)に示すような、 μc-Si の上面 に逆ピラミッド型のフォトニック結晶構造を形成した構造を考えた。μc-Si 厚さは、平均厚 さが 2 µm となるように調整した。フォトニック結晶深さ・格子定数をパラメータとして光 吸収スペクトルの計算を行い、i 層での光吸収から短絡電流密度を計算した。図 28(b)に、 パラメータに対する短絡電流密度の計算結果を示す。格子定数 800 nm、深さ 700 nm と、 格子定数 1400-1500 nm、深さ~1100 nm の構造において、高い短絡電流密度が期待できる ことがわかる。ここで、それぞれの格子定数の場合について、逆格子空間におけるΓ点バン ド端の分布を図 29 に示す。また、同図に、フォトニック結晶によって光吸収を増加させる 波長域である 850~1000 nm の光に対するライトコーンも合わせて示す。同図より、波長 域である 850~1000 nm の範囲について考えると、格子定数 1400-1500 nm の場合におい ては、ライトコーン内部に原点以外の複数Γ点バンド端が存在しており、これらは全反射条 件を満たさない。この結果、Γ点バンド端に結合した光の一部が、斜め方向へと放射し、損 失となる。一方で、格子定数 800 nm の場合、ライトコーン内部に原点以外のΓ点バンド端 は存在せず、斜め方向への放射損失の影響はないと考えられる。したがって、格子定数800 nm の構造が有利と考えられるため、以下ではこの格子定数の場合について検討を行った。



図 28: (a) 微結晶 Si 太陽電池の上面のフォトニック結晶形成効果に関する解 析モデル、(b)フォトニック結晶深さ・格子定数に対する短絡電流密度の計算結 果。



**図 29:** 逆格子空間における「点とライトコーン・斜め放射成分。

この理論解析結果を受け、次に、µc·Siのi層表面へのフォトニック結晶加工の加工法に ついて検討した。まず、KOH等によるウエットエッチングをµc·Siに適用することを検討 したところ、局所的に深いエッチング孔が生じるなど、フォトニック結晶形成には不適であ ることが明らかとなった。続いて、プラズマを用いたドライエッチングを検討した。図 30(a) は、各種のプロセスガスを用いて、表面をエッチング(ただし、フォトニック結晶は形成せ ずに)した後に、微結晶Siのp層および表面電極を成膜し、太陽電池を形成した結果を示 している。同図より、ガス種等を選択することによって、未加工の場合と同等の開放電圧や フィルファクターを維持できることが明らかとなった。ここで、特性劣化が見られた加工条 件(例として、H2プラズマによるエッチング)において、ラマン分光測定を行った結果を、 図 30(b)に示す。同図より、エッチング後には、µc-Si 膜表面付近の結晶相とアモルファス 相との比率が変化していることが見て取れ、結晶とアモルファス相のエッチングバランス が均一となるように表面加工を施すことが重要であることが示唆された。



図 30: 表面への加工法の検討。(a) 表面に平坦なドライエッチング加工を施 した太陽電池の特性、(b) ドライエッチング(H<sub>2</sub> プラズマ)の影響の評価。

上記の知見の下、µc·Siのi層に対してフォトニック結晶構造を形成した例を、図 31(a) に示す。同図(b)のラマンスペクトルより、フォトニック結晶加工を施しても、結晶とアモ ルファス成分のバランスを保つことが可能であることが見て取れる。様々な深さ・孔径をも つフォトニック結晶構造を表面に形成した~1 µm 厚太陽電池を試作した結果を、図 32 に 示す。ここで、図 32(a)に示されるように、フォトニック結晶を形成した場合には、平坦な 場合と比べてµc·Siの i層の体積が小さくなっていることに注意が必要である。同図(b)よ り、フォトニック結晶を導入し、孔の深さおよび径を大きくした構造において、µc·Si層の 体積が減少するにもかかわらず、長波長域(600-1,000 nm 帯域)の光吸収量が増大して いく様子が明らかとなった。





**図 32**: フォトニック結晶を導入した太陽電池(~1 µm 厚)の作製。(a) 作製 した構造の SEM 像、(b) 外部量子効率の測定結果。

図 32 の PC (III)の構造および平坦な構造について、電流-電圧特性を評価した結果を図 33 に示す。平坦な場合と同等の開放電圧・フィルファクターを保ったままで短絡電流密度 が向上し、9.9%の変換効率 (アクティブエリア評価)が得られた。さらに、同様の構造を~ 2  $\mu$ m 厚さの太陽電池に形成した結果、図 34 に示すように、アクティブエリア評価にて 10% を超える変換効率 ( $\eta$ =10.2%、 $J_{sc}$ =26.5 mA/cm<sup>2</sup>、 $V_{oc}$ =0.517 V、FF=0.740)を得ることにも成功した。



#### さらなる変換効率向上のための検討

上述のように、μc-Si 太陽電池上面へのフォトニック結晶構造導入に関する検討を行い、 ~2μm 厚さの太陽電池において、10.2%の変換効率(アクティブエリア評価)を実現した。 ここで、さらなる変換効率の向上について考えると、現状の *J*<sub>sc</sub> = 26.5 mA/cm<sup>2</sup>にさらなる 改善の余地があると考えられる。この際、現状の *V*<sub>oc</sub>を維持しつつも、さらに増大すること を念頭に以下に述べる検討を行った。

#### (i) 短絡電流密度の増大

#### ・寄生吸収抑制による光電流増大

μc-Si 層観点から光吸収スペクトルについて詳細に検討を行った結果、800-1,000 nm の 帯域において、透明導電膜への光吸収が、Si への光吸収を阻害していることが判明した。 このような観点から、ITO・GZO のドープ密度を、電気特性を悪化させない範囲で減少さ せ、光吸収を低減することを考えた。ITO のドープ密度を 4×10<sup>19</sup> cm<sup>-3</sup> と、従来考えてきた ものの 1/10 に、GZO のドープ密度を 2×10<sup>19</sup> cm<sup>-3</sup> と、従来考えてきたものの 1/5 にして、 光吸収スペクトルの計算を行った。フォトニック結晶構造としては、格子定数 800 nm、深 さ 700 nm の逆ピラミッド構造を考えた。結果を図 35 に示す。同図より、特に波長 800 nm より長波の領域において、μc-Si 層への光吸収が増大し、短絡電流密度が 0.8 mA/cm<sup>2</sup> 増加 可能であることが判明した。



図 35: 寄生吸収を抑制した構造における光吸収スペクトルの計算結果。

# ・µc-Siの光吸収特性向上による光電流増大

~数μmのμc-Siにおける光吸収増大のために、膜そのものの長波長域(600-1000 nm)の 光吸収特性を向上させることを考えた。このためには、膜の結晶化率を増加させ、ナローギ ャップ化し、長波長の吸収係数を増大させることが有効であると考えられる。(A)にて述べ た、膜厚~500 nmの構造においては、結晶化率 30~45%(厚さ方向依存)から、全体を 50%に 増大(均一化)することにより、短絡電流密度が増大する傾向がみられており、結晶化率を、 さらに増加させることを検討した。ここでは、膜中の欠陥を増やしすぎない観点から、~70% 程度を目標と設定した。成膜時のSiH4/(SiH4+H2)比を 5.32%から 5.03%へ低下させ、成膜 したμc-Siのラマンスペクトルを図 36(a)に示す。同図より、アモルファス成分の割合が減 少し、結晶化率が~70%程度に増大していることが分かる。図 36(b)に、結晶化率を~70%程 度として成膜した太陽電池の EQE スペクトルを示すが、結晶化率が~50%程度の試料と比 較して、長波長側の EQE が増加しており、長波長領域の吸収係数増大効果がみられる(な お、併せて、前述のように、ITO/GZO のキャリア濃度をそれぞれ 1/10,1/5 とし、寄生吸収 を抑制している)



図 36: (a) SiH<sub>4</sub>/(SiH<sub>4</sub>+H<sub>2</sub>)比を 5.32%から 5.03%に低下させた µc-Si のラマンス ペクトル。結晶化率が~50%から~70%に増大していることが分かる。(b) 結晶 化率を~70%程度とした太陽電池の EQE スペクトル。長波長側の EQE が増加 しており、長波長領域の吸収係数増大効果がみられる。

# ・三角格子フォトニック結晶の導入

さらに、斜め方向の漏れ損失を抑えつつも、バンド端の数をさらに増大する手法として、 三角格子のフォトニック結晶の採用を考えた。図 37 に、正方格子と三角格子の、実空間お よび逆格子空間の模式図を示す。また、同図に、フォトニック結晶によって光吸収を増加さ せる波長域である 850~1000 nm の光に対するライトコーンも合わせて示す。同図より、 ライトコーン内部に原点以外のΓ点バンド端が存在しない条件で、三角格子のほうが、逆格 子点の密度が増大していることが分かる。そこで、三角格子フォトニック結晶を導入した試 料の作製・評価を行った。作製した太陽電池の SEM 像および EQE スペクトルを図 38 に 示す。前述の結晶化率増大効果と合わせて、EQE が増加しており、短絡電流密度にして 1.8 mA/cm<sup>2</sup>の増大効果が得られた。



図 37: 正方格子と三角格子の逆格子空間の概念図。



図 38: 三角格子構造フォトニック結晶を導入した太陽電池の SEM 像と EQE スペクトル。前述の結晶化率増大効果と合わせて 1.8 mA/cm<sup>2</sup>の短絡電流密度 増大効果が得られた。

# ・吸収に寄与する共振モード数の増大のための非対称形状の導入

また、波長 900~1000 nm において、吸収に寄与する共振モード数の増大の余地がある と考えられるため、光吸収に寄与するバンド端モード密度の増大法について検討を行った。 これまでの検討では、高い対称性(4回対称)のフォトニック結晶構造を採用してきた。こ こで、Γ点バンド端における共振モードの電磁界分布の例を図 39 に示す。垂直入射光との 結合が大きいために、太陽電池の光吸収増大に寄与するモードのほかに、垂直入射光との結 合の小さいモードが存在している。ここで、フォトニック結晶構造の対称性を崩すことによ り、この結合の小さいモードについても太陽電池の光吸収増大に寄与できると考えられ、よ り大きな短絡電流密度の実現が期待できる。ここで、具体的には図 40(a)に示すように、逆 四角錐の頂点の位置をシフトさせた構造を考え、検討を行った。シフト量に対する、短絡電 流密度の増加分 δJsc を図 40(b)に示す。同図より、頂点位置シフトにより 1 mA/cm<sup>2</sup>程度の 短絡電流密度の増加ができることがわかる。



**図 39:** 高い対称性(4回対称)のフォトニック結晶構造における Г点バンド端 における共振モードの電磁界分布の例。



**図 40:** (a) 逆四角錐の頂点の位置をシフトさせたフォトニック結晶をもつ太陽 電池構造の模式図、(b)短絡電流密度の増加分 δ*J*<sub>sc</sub>の計算結果。

# (ii)開放電圧の向上

上記のように光吸収を増大した状態においても、初期の素子における開放電圧を維持し つつ、さらにその増大を図るために、(a) 微結晶 Si 膜そのもの、特に、光吸収層である i 層 および、表面ドープ層である p 層の特性向上、および(b) i 層表面へのフォトニック結晶加 工条件の詳細な検討を行った。以下、これらの検討結果について述べる。

## ・成膜条件の検討

まず、i層の膜構造について、検討を行った。前述(図 36)のように、光吸収の増大の観 点からは、~70%程度と高い結晶化率のi層を用い、ナローギャップ化することで長波長域 における光吸収係数が増加し、短絡電流密度の増大が得られる。一方、開放電圧の観点から は、膜全体の結晶化率を増加させた場合には、バンドギャップのナローギャップ化に起因し て、図 41 に示すように、開放電圧が低下してしまうという、トレードオフの関係にあるこ とが明らかになった。そこで、光吸収・短絡電流密度を増大させつつも、開放電圧の低下を 抑制する方策を検討した。具体的に、膜の底部(n層側)の結晶化率を~70%として光吸収 を増大させ、表面付近(p層側)の結晶化率を低下させて~50%とすることによってワイド ギャップ化し、開放電圧を高く維持することを検討した。実際に、PE-CVD 法による成膜 において、底部と上部で SiH4/H2比を 2 段階に変化させ、i層を成膜し、表面にエッチング 加工を施さずに、平坦な太陽電池を作製した結果、図 41 に示すように、膜全体の結晶化率 が~50%の場合と、同等の開放電圧を得ることに成功した。また、このとき、短絡電流密度 も高いまま維持されることが確認できた。



図 41: 上部は低結晶化率、底部は高結晶化率とした構造(平坦未加工)の V<sub>oc</sub> の変化量の測定結果(結晶化率 50%一様の場合の値に対する相対値)。上部の 結晶化率を 50%とし、底部の結晶化率を 70%と増大させた場合、結晶化率が 一様に 50%の構造と同等の V<sub>oc</sub>が得られている。

さらに、表面ドープ層である p 層の改善により、内蔵電位差を大きくし、開放電圧を向上 させることについても検討した。具体的には、PE-CVD 法による成膜時の、ドーパントを 供給する B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>ガスの流量比を増加し、キャリア密度を増大することを検討した。なおこの 時、B2H6の流量の増加によって、成膜時の膜表面の Si-H 結合から H 原子が引き抜かれ、 微結晶化が進みにくくなり、結晶化率が低下するという効果も生じることが明らかとなっ た。図 42 に、B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>の流量比を増加させて、表面にエッチング加工を施していない平坦な太 陽電池構造を作製した結果を示す。同図において、三角点が、p層の成膜を行い、その上に 上部電極(ITO/Ag)を成膜した直後の結果、丸点が、作製した素子全体を 150℃・N₂ 雰囲気 でアニールした後の結果を示している。従来条件(黒)と比較して、B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>の流量を2倍~ 4 倍へと増加させることで、開放電圧がより向上する様子が見て取れる。ここで、B2H6の 流量を4倍にした場合には、p層の結晶化率低下と膜厚の増加によって、p層吸収損失が増 加し、短絡電流密度が減少する傾向が見られたため、まずは~2倍程度が適切であると考え た。さらに、p層の活性化をより促進することで、キャリア密度を増加させることについて も検討した。p層の成膜においては、B-H-Siの結合が、ドーパントを不活性化させており、 アニールによって活性化が促進されることから、不要な H を離脱させるために、p 層成膜 直後に、p層そのものを200℃でアニールを行い、活性化を促すことを検討した。この結果 として、図 43 に示すように、素子全体のアニール前でもより高い開放電圧が得られつつ、 さらに素子全体のアニールを施すことによって、従来条件と比較しておよそ 5 mV 程度の 開放電圧の増大が得られた。



図 42: 成膜時の B<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 流量に対する開放電圧の増分の測定結果(太陽電池は平 坦・未加工)。



図 43: p 層成膜直後に 200℃でアニールを行った試料に対する開放電圧の増分の測定結果(太陽電池は平坦・未加工)。

# ・エッチング条件の詳細な検討

上記の検討は表面に加工を施していない太陽電池について行ったが、続いて、表面加工法の最適化についても、詳細な検討を行った。表面加工の基本的な方針としては、図 30 において述べたように、微結晶 Si を構成するアモルファス相と結晶相のエッチングバランスを保つことが重要であることを示しているが、より深い孔形状をもつ最適なフォトニック結晶の導入に向けて、より詳細な条件検討を行った。

まず、フォトニック結晶を形成せずに、μc-Si 表面を平坦にエッチングする場合から、検 討を行った。図 44 には、エッチング時の、化学的なエッチングと物理的なエッチングのバ ランスを、極微調整した際の、μc-Si 表面状態を SEM 観察した結果の一例を示している。 ICP 電力は 40 W で固定し、BIAS 電力をわずかずつ増加させ、物理的なエッチングの効果 を少しずつ強めていくと、3 W 程度を境として、それ以下では、表面に粒状の残留物が見ら れるのに対して、それ以上では平滑化されていく様子が見て取れる。このとき、ラマンスペ クトルを評価したところ、優位な差は見られなかったものの、SEM 観察の結果から、物理 的なエッチングが相対的に弱い条件では、極わずかに a-Si 成分の残渣が生じている可能性 が考えられる。



図 44: BIAS 電力を変化させながら、µc-Si 表面を平坦にエッチングした場合の 試料表面の SEM 像。BIAS 電力を増やす(物理的なエッチング効果を強くする) にしたがい、表面に粒状の残留物が見られなくなり、平滑化されていく様子が 見て取れる。 このような表面状態のわずかな違いが、電気的特性に与える影響を調べるため、p 平坦に エッチングした表面に p 層を成膜し、ITO/Ag 電極を形成して、太陽電池を作製し、開放電 圧を評価した(フォトニック結晶構造は形成していない)。エッチングを行わない比較試料 との開放電圧の差ΔV<sub>oc</sub>の測定結果を、図 45 に示す。(なお、ここでは、膜全体が~50%の 結晶化率の i 層を評価に用いているが、先述のように、底部の結晶化率を 70%程度とした 場合でも、表面近傍は~50%とするため、同様の傾向になるものと考えられる。)同図より、 図 44 において、残渣のない表面が得られ始める条件にて、高い開放電圧が得られているこ とが分かる。ただし、他の実験から、BIAS 電力を大きくすると、物理的な衝撃によるダメ ージによる、特性劣化の可能性も示唆された。これらのことから、表面のわずかな残渣物等 が発生することで、界面近傍での再結合が増加し、表面加工太陽電池の特性に大きく影響を 与えるということが明らかとなり、完全にバランスよくエッチングされる条件でのエッチ ングが、極めて重要であるという重要な知見が見出された。



**図 45:** BIAS 電力を変化させながら、µc-Si 表面を平坦にエッチングしたのちに 形成した太陽電池構造(フォトニック結晶構造は形成していない)における、 エッチングを行わない比較試料との開放電圧の差ΔV<sub>0</sub>の測定結果。表面に a-Si 成分の残渣が見られない、BIAS 電力3W以上の条件で、高い開放電圧が得ら れていることが分かる。

次に、同様の条件をフォトニック結晶に対して適用し、表面エッチング条件の影響を調査 した。この際、前述の検討結果より、表面の状態が開放電圧に影響を与えると考えられるこ とから、フォトニック結晶を形成後、再度エッチングを行い、最終表面の仕上げを行うこと を考え、その条件探索を行った。具体的には、初期のフォトニック結晶形状を、共通の条件 で作製した後、最終表面のエッチングを、前記の平坦エッチング時と同様に、ICP 電力は 40 W で固定し、様々な BIAS 電力に対して行った。エッチングを行わない比較試料との開 放電圧の差ΔV<sub>oc</sub>の変化の様子を、図 46(a)に示す。同図より、フォトニック結晶の形成時に は、平坦エッチング時とは異なり、比較的 BIAS 電力が低い条件において、開放電圧が高く なる傾向が得られた。これは、フォトニック結晶の形成時には、斜面が形成されるが、この 斜面では BIAS 電力が比較的小さいところでエッチングバランスが適当なものとなるため であると考えられる。実際に、エッチング後の表面を観察した結果(図 46(b): BIAS 1W の 場合)、平坦エッチング時には粒状の残渣が見られる条件であっても、フォトニック結晶孔 の斜面においては比較的平滑なエッチングが得られていることが確認された。



図 46: (a)フォトニック結晶を形成後、BIAS 電力を変化させながら、µc-Si 最終 表面をエッチングしたのちに形成した太陽電池構造における、エッチングを行 わない比較試料との開放電圧の差△Vocの測定結果。(b) BIAS 1W の場合におい て、エッチング後の表面を観察した結果。平坦エッチング時には粒状の残渣が 見られる条件であっても、フォトニック結晶孔の斜面においては比較的平滑 なエッチングが得られている。

続いて、前述の検討で 40 W とした ICP 電力を変化させて、フォトニック結晶に適した 最終表面のエッチング条件の検討を行った。前記の結果を踏まえて BIAS 電力は低パワー (0W)に固定した状態で、ICP 電力を変化させ、エッチングレートを変化させながら、所 定の膜厚をエッチングして作製したフォトニック結晶太陽電池について、開放電圧を評価 した結果を、図 47 に示す(同図においては、前述の検討で用いた ICP 電力 40 W の場合を 基準とした相対値で示している)。同図より、最終表面の仕上げを、より低 ICP パワー・低 速のエッチングにより行うことで、より高い開放電圧が得られる傾向にあることが見て取 れる。



図 47: フォトニック結晶加工時の ICP 電力に対する開放電圧の測定結果。

# 上記の検討結果を総合した試料作製・評価

以上に述べた、短絡電流密度および開放電圧のそれぞれの観点から、特性向上について検 討した結果を踏まえて、表面加工太陽電池の作製を行った。底部が高結晶化率(~70%)、上 部が低結晶化率(~50%)のi層 µc-Siを成膜後、フォトニック結晶の形成を行った。その 後、前述の検討結果を踏まえ、最終表面のエッチングを ICP 電力を 5 W まで低下させ、 BIAS 電力 0 W にて行った。また、p 層は、前述の、B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>の流量比を 2 倍とした条件にて 成膜し、その直後に 200℃でアニールを行った。その後、ITO/Ag 電極の形成を行い、素子 全体のアニールを行った。作製した試料の SEM 像を図 48(a)に示す。フォトニック結晶に はバンド端密度の増加が期待できる三角格子構造とし、さらに、図 34 や図 38 の構造より も光吸収の増大が期待できる、より深い孔形状を形成した(試料(I))。また、同様の条件を 用いて、直列抵抗を低減するために、抵抗率の小さな ITO を用い、フォトニック結晶深さ をやや浅くした試料も作製した(試料(II))。これらの試料における、電流・電圧特性の評価 結果を図 48(b)に示す。同図に示されるように、アクティブエリア評価にて、試料(I)におい て変換効率 $\eta = 10.8\%$  ( $J_{sc} = 28.9 \text{ mA/cm}^2$ 、 $V_{oc} = 0.517 \text{ V}$ 、FF = 0.718)、および試料(II)に おいて変換効率 $\eta = 11.0\%$  ( $J_{sc} = 28.4 \text{ mA/cm}^2$ 、 $V_{oc} = 0.522 \text{ V}$ 、FF = 0.714)を実現するこ とに成功した。図 34 に示した構造と比較すると、短絡電流密度が~2 mA/cm<sup>2</sup>以上向上し ている一方で、図 34 よりもより深く吸収増大が可能なフォトニック結晶構造を導入したに もかかわらず、膜特性・エッチング条件を改善した結果として、 $V_{oc}$ を維持することができ ている。



図 48: (a)変換効率の向上のための各種検討を総合して作製した太陽電池構造の SEM 像、(b)太陽電池構造の電流電圧特性。<u>n/i/p 層の全てが Si からなる微</u> 結晶 Si 太陽電池において世界最高となる、アクティブエリア効率 11%を実現 することに成功した。

以上のように、<u>当初予定しなかった、数 µm 厚さの微結晶 Si 層太陽電池においても、微</u> 結晶シリコンの上部のみにサブミクロン周期のフォトニック結晶を形成するというこれま でになかった新たな構造において、フォトニック結晶効果による光吸収・短絡電流密度の増 大を実現し、最大効率 11% (アクティブエリア評価)を得ることに成功した。図 49 には、 これらの成果の位置づけを示している。図 49(a)に示すように、<u>今回得られたアクティブエ</u> リア効率は、n/i/p 層の全てが Si からなる微結晶 Si 太陽電池において、世界最高値となっ ており、表面フォトニック結晶の導入の有用性が極めて明快なものとなった。今後、これら の成果に対して、同図(b)に示すワイドギャップの nc-SiOx をドープ層として用いたドープ 層での寄生吸収の抑制や、さらに産総研グループのように、低ダメージで MOCVD 成膜し た分厚い透明導電膜 (BZO) 等の技術を適用していくことで、<u>図 48 の特性をより一層向上</u> させ、世界最大級の変換効率となる~12%への展開も期待される。



**図 49:** 微結晶 Si 太陽電池における効率の比較。(a) n/i/p 全層が Si からなる微結晶 Si 太陽電池。(b) n/p 層にワイドバンドギャップの nc-SiOx を用いた微結晶 Si 太陽電池。AIST グループの結果は、MOCVD 法で成膜した厚い BZO を透明導電膜として用いるなど、特殊な処理を導入している。

上記のようなさらなる特性向上に向けて、光吸収のさらなる増大のための、ワイドギャッ プ窓層(p-nc-SiO<sub>x</sub>など)を活用した短波長吸収損失の抑制についても、実験的な検討を行 った。プラズマ CVD 装置に、酸化膜形成のための CO2 ガスラインを導入し、成膜条件の探 索を行った。条件探索の結果、単純に CO2 を添加すると、p-nc-SiOx 膜中に含まれるアモル ファスSi成分が増加してしまい、その結果として、膜中の一部がSiOxとしてワイドギャッ プ化されて透過率が上がったとしても、アモルファス Si 成分による吸収によって、短波長 吸収損失が抑制できないことが明らかとなった。そこで、アモルファス Si 成分をエッチン グする作用のある水素プラズマの割合を増加させ、膜中のアモルファス Si 成分の増加を抑 制し、結晶 Si 成分を残したままで、膜中に SiOx を形成するための条件を探索した。この結 果として得られた p-nc-SiOx 膜の吸収率の測定結果を、図 50(a)に示す。同図のように、こ れまでの p-µc-Si の場合と比べて、波長 <800 nm の短波長域の吸収が抑制される様子が確 認された。このような p-nc-SiOx 膜を、実際の表面にフォトニック結晶を形成した微結晶 Si 太陽電池に適用した結果、図 50(b)に示すように、短波長域の EQE が向上し、~1.4 mA/cm<sup>2</sup> の短絡電流密度の増大が得られ、世界最大級の29.5 mA/cm<sup>2</sup>へと向上する結果が得られた。 今後、さらにフォトニック結晶構造の最適化等を施すことにによって、30 mA/cm<sup>2</sup> 以上へ と短絡電流密度を向上させられるものと期待される。



**図 50:** ワイドギャップ窓層(p-nc-SiO<sub>x</sub>)導入の検討。(a) 単層膜(~300 nm 厚)における吸収率の測定結果。(b) 表面にフォトニック結晶を形成した太陽 電池における EQE の測定結果。短波長の EQE の向上により、~1.4 mA/cm<sup>2</sup> の短絡電流密度の増大が得られた。
今後、上記のような太陽電池において、フォトニック結晶構造の最適化(孔形状・深さの 制御による太陽光取り込みの増大、非対称性導入による結合可能なバンド端密度の増加)を 行うとともに、光学的に最適化したフォトニック結晶構造に対して、電気特性を低下させな いような加工表面状態の制御についても、これまでの実験的に得られた知見から、p層成膜 時に、H₂比率の高い条件を用いて低速で成膜しつつ、H プラズマによって表面の欠陥・ダ ングリングボンドを終端しながら p層を成膜していくことで、より高い効率に繋がること が期待される。また、産総研グループと連携し、上記で得られたワイドギャップ nc-SiO<sub>x</sub>の 成膜に関する知見をフィードバックし、さらに最高品質の微結晶 Si や BZO 透明導電膜膜 技術とも総合することで、開放電圧のさらなる向上も含めて、~12%へのさらなる効率向上 が可能と期待される。

#### <u>(C) 薄膜(20(~50) µm 程度)単結晶 Si 太陽電池への展開</u>

上記のように、本研究では、薄膜 μc-Si 太陽電池におけるフォトニック・ナノ構造による 光吸収増大・変換効率の向上の検討を行ってきた。このような技術を、長いキャリア寿命を 有し、より高い開放電圧や FF が期待される単結晶 Si (c-Si) 薄膜へと展開していくことで、 より高い変換効率が期待される。また、近年、100~200 μm 程度の膜厚からの薄型化への 関心が高まっていることから、単結晶 Si 薄膜において、フォトニック・ナノ構造による効 果的な光閉じ込めを実現し、高い短絡電流密度を得ることができれば、結晶系太陽電池の技 術革新にも大いに寄与できるものと期待される。このような背景のもと、薄膜単結晶 Si (膜 厚 20(~50) μm 程度) 太陽電池における、フォトニック結晶の有用性を実証することを目 指し、研究を行った。

まず、薄膜の単結晶 Si へとフォトニック結晶を導入した太陽電池構造の第一試作として、 薄い単結晶 Si のトップ層をもつ SOI(Silicon-on-Insulator)ウエハを利用し、これを他の支 持材に転写する方法による作製を検討した。図 51 に、第一試作構造の形成手法の模式図を 示す。まず、SOI 基板の上面に、最終的に裏面電極となる i/n 型の a-Si 層および GZO・Ag を成膜し、これを支持材に貼り合わせた。その後、不要な SOI 基板を除去したのち、表面 にフォトニック結晶を形成し、表面側の電極(i/p 型の a-Si 層および ITO・櫛状 Ag)を形 成した。



図 51: SOI 基板を用いた第一試作構造薄膜単結晶 Si 太陽電池の作製手法。

第一試作においては、目標よりさらに薄い、Si 層厚さ 5 µm の薄膜単結晶 Si 太陽電池を 形成した。フォトニック結晶については、(B)で検討した、µc-Si の表面加工に用いたものと 同様の形状とした。作製した太陽電池の写真および、フォトニック結晶構造の SEM 像を図 52 に示す。図 53(a)に、作製した太陽電池の EQE スペクトルを示す。同図より、フォトニ ック結晶構造の導入により、波長 600 nm より長波長の領域で、フォトニック結晶のない構 造と比較して大幅に EQE が増大しており、短絡電流密度が 21.7 mA/cm<sup>2</sup> から 29.3 mA/cm<sup>2</sup> へと大きく増大していることがわかる。また、図 53(b)に、RCWA 法により解析した光吸収 スペクトルを示すが、理論解析と実験結果がよく一致していることが分かる。このように、 第一試作として、5µm 程度の非常に薄い単結晶 Si 太陽電池において、フォトニック結晶の 導入による光吸収・短絡電流密度増大を示すことに成功した。



**図 52:** (a)SOI 基板を用いた第一試作の薄膜単結晶 Si 太陽電池、(b)フォトニック結晶構造部分の SEM 像。



**図 53:** (a) 第一試作の薄膜(~5 µm 厚) 単結晶 Si 太陽電池の EQE スペクト ル、(b)実験に対応する構造に対する計算により得られた i 層吸収スペクトル。

一方、この第一試作の太陽電池の電流・電圧特性を評価したところ、図 54 に示すように、 フォトニック結晶構造を導入していない構造においても、開放電圧が 0.540 V と低く、また フォトニック結晶構造を導入した構造においては 0.394 V であり、また FF も 0.6~0.7 程 度にとどまっている。この結果に対して、デバイスシミュレーションにより、改善の方向性 についての検討を行った結果、p,n 層のドープ密度の増加および、表面における再結合速度 を低減することにより、特性向上が期待できることが判明した。



図 54: 第一試作の太陽電池の電流電圧特性。なお、単結晶 Si の厚さは、ここでは、5 µm と薄いものを用いていることに注意。後の検討では、20 µm 厚へと展開している。

上記の第一試作構造の分析結果を踏まえて、20(~50) µm 程度の薄膜単結晶 Si 太陽電池 構造の最適化を検討した。まず、光吸収の観点からは、図 53 の実験および解析結果より、 表面の a-Si 層や ITO 層による短波長域の吸収損失が大きいことが明らかとなった。そこ で、図 55(a)に示すように、p 型および n 型の電極を、両方とも裏面に集約したバックコン タクト構造を採用することを検討した。本構造において、初期的な光吸収スペクトルの解析 を行った結果を、図 55(b)-(d)に示す。ここでは、Si 層の厚さを 20 um とし、格子定数 800 nm、深さ~700 nm の三角格子の逆円錐型のフォトニック結晶構造を形成した場合の結果を示し ている。このとき、Si は SiNx で保護されその裏に反射鏡としての Al がデポされている領 域、Si に直接 Al 電極が接触している領域、および Si は SiNx で保護されその後は空気とな っている領域の3領域を考慮して、それぞれに対して解析を行った。同図より、バックコン タクト構造を採用することにより、表面の電極・ドープ層による吸収の影響を排除すること で、短波長領域(~600 nm 以下)における Si 層での吸収が増大するとともに、長波長領域 (~900 nm 以上)においてはフォトニックバンド端効果により密な共振ピークが形成でき、 結果として高い光吸収率が得られる様子が見て取れる。Si が SiNx で保護されその裏に反射 鏡としての Al がデポされている領域において、~20 μm 厚でも、38 mA/cm<sup>2</sup>を超える短絡 電流密度が期待できることが明らかとなった。また、電極の形成を考慮して各領域の平均を とった場合においても、36 mA/cm<sup>2</sup>を超える、20 µm 以下の膜厚の単結晶 Si 太陽電池では 世界最大となる短絡電流密度が得られうることが明らかになった。



**図 55:** (a) 短絡電流密度および開放電圧・FF 向上のためのデバイス構造の模 式図。(b)-(d) 光トラップ効果の解析結果。Si が SiNx で保護されその裏に反射 鏡としての AI がデポされている領域(b)、Si に直接 AI 電極が接触している領 域(c)、および Si が SiNx で保護されその後は空気となっている領域(c)の 3 領 域を考慮した。

また、電気特性の観点からは、ドープ領域として、位置を指定して選択的にドーピングすることのできるイオン注入法を用いて十分なドーピングを行いつつ、Si表面を適切に保護し、表面再結合を抑制することを考えた。本構造において、光トラップ効果の実証に向けてデバイスパラメータの影響を検討した結果を、図56に示す。p++および n++のドープ領域の

ドープ量を 10<sup>20</sup> cm<sup>-3</sup>として、表裏面での再結合速度および p<sup>++</sup>/n<sup>++</sup>電極間の間隔をパラメー タとして、バンドギャップナローイング等の高ドープ領域の特性を考慮して、電流・電圧特 性をデバイスシミュレータ(Silvaco 社製 ATLAS)を利用して解析した。図 56(a)より、表面 再結合速度を~500 cm/s 以下に抑えつつ、電極間隔を 10 µm 程度と膜厚と同程度以下に小 さくすることで、光吸収から見積もられる、ほぼ理想通りの短絡電流密度が得られることが 期待される。また、開放電圧の向上のためには、さらに表面再結合速度を抑えつつ、電極間 隔を大きくすることで、キャリアの再結合を抑制していくことが重要であることが見て取 れる。表面再結合速度を~30 cm/s 以下へと抑制していくことで、0.64V 以上の開放電圧が 期待でき、そのような構造において、20 µm 程度の薄膜結晶 Si 太陽電池において ~18%以 上の効率が期待できることが明らかとなった。



**図 56:** デバイスシミュレータによる解析結果。(a) 短絡電流密度、(b) 開放電 圧。

上記の指針に基づき、バックコンタクト型フォトニック結晶薄膜単結晶 Si 太陽電池の実 証構造の作製法を検討した。作製プロセスを、図 57 に示す。まず、SOI 基板を利用し、そ のトップ Si 層の上面に、リソグラフィーとイオン注入により、p++/n++領域を、順次形成す る。この構造に対して、注入領域を活性化するためのアニールを行った後、支持基板の一部 および SiO2 層を除去して、単結晶 Si 薄膜が宙に浮いた構造を形成する。その後、下面側に フォトニック結晶を形成し、上下両面に対してパッシベーション膜を形成し、表面再結合を 抑制する。最終的に、上面側に電極を形成すれば、太陽電池が完成する。



図 57: バックコンタクト型薄膜単結晶 Si 太陽電池の作製プロセス。

まず、上記ステップ3における、単結晶 Si 薄膜の形成が可能であるか、実験的に検討した。20 μm 厚の Si のトップ層をもつ SOI ウエハを用い、裏面の基板を、ドライエッチング

プロセスによって除去する手法を導入した。その後、SiO<sub>2</sub>層を HF を用いたウエットエッ チングによって除去することで、薄膜 Si 層を形成した。図 58 に示すように、様々な評価に 十分な直径 10~15 mm 程度の単結晶 Si 薄膜を形成することに成功した。



#### 図 58: 結晶 Si 層薄膜構造の形成例 (Si 厚さ:20 µm)。

次に、p<sup>++</sup>,n<sup>++</sup>領域のドーピング条件についての検討を行った。条件の検討のために、平坦 なSi 基板全体に、ボロンイオン(p型)またはリンイオン(n型)の注入を行った。注入深さは 200 nm 程度とし、注入後、活性化のために N₂雰囲気にて 10 分間、1000℃でアニールを 行った。この試料に対して、Al 電極を形成し、600℃でアニールした後に、ホール効果測定 を行い、キャリア濃度を評価した。図 59 に、イオン注入シミュレーションにより見積もっ たキャリア濃度の計算値と、ホール効果測定により得られたキャリア濃度の実測値の関係 を示す。同図より、p型・n型ともに、およそ計算による見積もりと対応するキャリア濃度 が、実際にイオン注入したサンプルにおいて得られていることが確認できる。この結果をも とに、初期の実験では、所望の 3~4×10<sup>20</sup> cm<sup>-3</sup>のキャリア濃度を用いることとした。



**図 59:** キャリア濃度の計算値と、ホール測定により得られたキャリア濃度の 実測値の関係。

次に、薄膜 Si 層におけるキャリア寿命に関して、検討を行った。~20 µm の薄膜 Si にお いて、光トラップ効果の実証のための指標となる表面再結合速度:~500 cm/s 以下は、キ ャリア寿命として、~2 µs 以上と対応する。そこで、各プロセス毎に、µ-PCD 法を用いて キャリア寿命の測定を行いながら、適宜キャリア寿命の低下を抑制する手法を導入し、プロ セス技術の基礎構築を進めた。以下で、主要なプロセス検討の結果について述べる。まず、 ドーピングを行っていない単結晶 Si 薄膜の表裏面をシリコン窒化膜(SiN<sub>x</sub>)を用いて保護 することを検討した。SiN<sub>x</sub>膜の成膜には PE-CVD 法を用い、SiH4/NH3 流量比、成膜温度、 圧力を調整し、表面保護の条件を探索した。初期的な検討の結果、µ-PCD 法による測定(励 起波長 349 nm)により、少なくとも、10 µs 以上のキャリア寿命が得られ、表面再結合は

100 cm/s 以下に抑えることができることが明らかになった(なお、後述するように、成膜 条件および成膜後のアニーリング条件の改善により、さらなる表面再結合の抑制も可能で ある)。次に、イオン注入・活性化等のデバイスプロセスの影響を調査した。この結果とし て、特に、イオン注入後の活性化アニールプロセスの手法が、重要となることが判明した。 イオン注入後、N2雰囲気にて 1000℃でアニールを行い、その後パッシベーション用の SiNx 「腹を堆積した試料(この場合は、フォトニック結晶は形成していないもの)について、キャ リア寿命の測定を行ったところ、図 60 の橙線にて示すように、~1 us 以下という非常に短 いキャリア寿命であることが判明した。この結果が、イオン注入によるものか、それともア ニールプロセスによるものか確認するため、イオン注入を行わずに同様のアニール処理の みを行い、SiNx膜を堆積した試料についてもキャリア寿命を測定したところ、図 60 の紫線 のように、この場合も、キャリア寿命が~1 us 以下に小さくなっていることが判明した。以 上の結果より、アニール時に単結晶 Si の表面状態が劣化しており、その後に SiNx 膜で保 護したとしても、表面再結合の影響を大きく受けてしまったということが示唆される。そこ で、アニールの際の表面を、何らかの保護膜で覆い、表面を劣化させないプロセスへと改善 することを検討した。具体的には、図 61(a)に示すように、アニールの前に表面保護用 SiNx 層を堆積しておき、アニール後、一旦 SiNx層を除去したのち、再度パッシベーション用の SiN<sub>x</sub>層を形成するという手法を導入した。本手法で形成した膜に対し、イオン注入は行っ ていない状態でキャリア寿命の測定を行ったところ、図 61(b)に示すように、11 us (表面再 結合速度: 90 cm/s)と見積もられ、キャリア寿命の改善が得られることが明らかとなった。







図 61: (a)活性化アニール前に保護用 SiN<sub>x</sub> 膜を形成する新たなプロセスフロ ーの概略図 (b)アニールの際に表面を保護した場合のキャリア寿命測定結果 (ただし、フォトニック結晶形成およびイオン注入は実施していない試料)。 アニール時の SiN<sub>x</sub>膜による保護により、キャリア寿命が 11 µs (表面再結合 速度: 90 cm/s) まで向上した。

さらに、実際に太陽電池化していくために、実際に、イオン注入・活性化、薄膜化、フォ トニック結晶形成、ならびに SiN<sub>x</sub>膜の堆積を行い、電極形成直前までのプロセスを行った ~20 μm 厚の Si 層における、キャリア寿命の測定を行った。フォトニック結晶は、先述の μc-Si の表面加工と同様のエッチング条件においてドライエッチングにより形成し、その表 面を、RCA 洗浄プロセスを用いて、洗浄し、表裏面に SiN<sub>x</sub>膜を堆積した。図 62 は、実際 に、片面にフォトニック結晶を形成した~20 μm 厚さの薄膜 Si 層(イオン注入・活性化も 行ったもの)の両面に、SiN<sub>x</sub>膜を成膜したサンプルにおいて、μ-PCD 法によりキャリア寿 命の測定を行った結果を示している。同図より、キャリア寿命として、光トラップ効果の実 証が可能と考えられる、~3 μs が得られた(最大の表面再結合速度として、~300 cm/s と 見積もられる)。(なお、後述するように、高ドープ領域のドープ量の抑制および面積割合の 減少等により、さらなるキャリア寿命の向上・表面再結合の抑制も可能である。)



図 62: イオン注入・活性化アニール、薄膜化、フォトニック結晶形成、および SiN<sub>x</sub> 膜堆積後の薄膜 Si のキャリア寿命評価。

上記の、アニールおよびパッシベーション技術開発に引き続いて、電極形成プロセスに関 しても検討を行った。図 57 のステップ 6 に示すように、バックコンタクト構造の電極側の SiNx膜に対して、線状にイオン注入を行った部分のみに貫通溝を形成した後、図 63(a)のよ うに n 型/p 型の電極を集約した構造を形成するプロセスの検討を行った。貫通溝の形成に ついては、将来的な微小な貫通孔形状にも対応できるように、レジストマスクを用いて、ド ライエッチングにより加工する方法を用いた。SiNx に貫通溝を形成した後、レジストへの パターニングとリフトオフプロセスによって、Al 電極を形成した様子を、図 63(b)に示す。 10 µm 間隔という狭い間隔においても、p 側と n 側の電極が交互に並んだ形状を、良好に 形成することができた。



**図 63:** 電極プロセスの検討。(a) 電極の配置の概念図、(b)リフトオフによる AI 電極パターンの形成後の顕微鏡写真。

以上のようにして構築した薄膜 Si 単結晶太陽電池の作製プロセスの基礎技術をもとに、 実際に 18.5 µm 厚の薄膜単結晶 Si 太陽電池を作製し、フォトニック結晶による光トラップ 効果を評価した。EQE の測定結果を、図 64(a)に示す。同図には、Si 層での吸収の計算結 果も合わせて示した。また、比較のため、図 64 (b)には、フォトニック結晶を導入しない平 坦構造の測定結果を示す。同図より、理論計算と概ね一致する波長応答特性が得られており、 フォトニック結晶効果により、36.1 mA/cm<sup>2</sup>の短絡電流密度を実現することに成功した。得 られた効果を、薄膜(≤20 µm) Si 太陽電池における短絡電流密度の世界中での研究と比較 した結果を、図 65 に示す。同図に示されるように、20 µm 以下の膜厚の結晶 Si 太陽電池 で世界最大の短絡電流密度を実現することに成功した。



**図 64:** 作製した薄膜単結晶 Si 太陽電池(18.5 µm 厚)の光トラップ効果の測 定結果。(a) フォトニック結晶を形成した太陽電池、(b) 平坦な太陽電池(リ ファレンス)。



図 65: 薄膜 (≤20 µm) Si 太陽電池における光トラップ効果 (短絡電流密度) の世界の研究との比較。

以上のようにして作製した薄膜 Si 太陽電池について、短絡電流密度に加えて、開放電圧、 FF をまとめた結果を図 66 に示す。同図(a),(b)には、図 64 に示した太陽電池等の短絡電流 密度および開放電圧について、実効的な表面再結合速度に対する依存性をプロットしてい る。なお、開放電圧は、測定時の温度上昇を考慮して補正した値を示している。また、同図 (c)には、直列抵抗に対する FF の依存性を示している。図 66(a)において、図 56 において シミュレーションを行った結果と対応して、表面再結合速度を 500 cm/s 程度以下とするこ とで、ほぼ理想的な短絡電流密度が得られるようになっている様子が見て取れる。また、開 放電圧についても、シミュレーションと対応して、実効的な表面再結合速度の低下によって 次第に高くなっている様子が明らかである。FF についても、直列抵抗の低減によって~0.8 程度に近づいている。以上の結果より、各因子の最大値を総合的に実現した際に得られる効



○サンプルA (フォトニック結晶)、○サンプルB (平坦)、○サンプルC (フォトニック結晶)\*並列抵抗小
 ○サンプルD (フォトニック結晶)\*SiN,膜の厚さの調整により、36 mA/cm²以上のJ<sub>2</sub>が期待

図 66:作製した薄膜単結晶 Si 太陽電池の特性。(a) 短絡電流密度、(b) 開放 電圧、(c) FF。

最後に、上記の結果を踏まえて、高効率動作の実現に向けた検討を行った。図 66 より、 実効的な表面再結合をさらに抑制していくことで、さらなる開放電圧の向上が可能であり、 高効率動作に繋がることが期待される。まず、n<sup>-</sup>のSi層を保護する、SiN<sub>x</sub>膜のパッシベー ション性能の向上について検討を行った。この結果、SiNx膜をプラズマ CVD 法により体積 した後に、フォーミングガス雰囲気で 350℃~400℃程度の温度でアニーリングを行うこと で、20 μm 厚の薄膜 Si においてもキャリア寿命として 70-100 μs が得られ、表面再結合速 度としては 10~15 cm/s にまで抑制できることが明らかとなった。続いて、高ドープ領域 /Al 電極での再結合の影響について検討を行った。初期の実証実験では、高ドープ領域/Al 電 極を線状として、10 µm 間隔で形成していたため、素子面積に対して高ドープ領域および Al 電極が占める割合 30~50%程度と大きく、それらの領域での再結合が多く、実効的な表 面再結合が増加していると考えられる状況であった。そこで、図 67(a)に示すように、高ド ープ領域・電極の間隔を大きくし、さらに領域の形状を線状から点状へと変形することで、 ドープ領域や電極での再結合の影響を抑制することを検討した。図 67(b)は、高ドープ領域 の面積割合を変えた試料について、活性化アニールおよび表裏面の SiNx によるパッシベー ション・アニールを行った段階で、キャリア寿命を実測評価した結果を示している。同図よ り、図 66 における実験と同じキャリア濃度(~10<sup>20</sup> cm<sup>-3</sup>)の注入時において、高ドープ領 域の面積割合を低下させることで、キャリア寿命が増加(実効的な表面再結合速度が低下) する様子が見て取れる。また、同様の評価を、高ドープ領域のキャリア濃度を~10<sup>19</sup> cm<sup>-3</sup> へ と低下させた試料ついても行ったところ、よりキャリア寿命が向上する傾向が得られた。こ こで、理想的な場合においては、高ドープ領域のキャリア濃度が高いほど内蔵電位差が大き くなり、最表面での再結合の影響が抑制され、キャリア寿命が増加することが期待されるが、 本研究において用いたイオン注入による高ドープ領域においては、~10<sup>20</sup> cm<sup>-3</sup>の注入時に おいて欠陥が多数形成され、再結合損失が増加した結果として、~10<sup>19</sup> cm<sup>-3</sup> へと注入量を 減らした方が長いキャリア寿命が得られたものと考えられる。実際、〜10<sup>20</sup> cm<sup>-3</sup> のボロン イオン注入を行った領域において、その表面を顕微鏡観察したところ、多数の欠陥の形成を 示唆する荒れが発生していることが明らかとなった。



図 67: デバイス構造(電極配置)の検討。(a)構造の模式図、(b) キャリア寿命(実効的な表面再結合速度)の測定結果。

以上の結果を踏まえて、キャリア濃度を~10<sup>19</sup> cm<sup>-3</sup> へと低減し、かつ高ドープ領域の面 積割合を~3.5%へと低下させた試料において、AI 電極の面積割合を~2%としてデバイスを 作製した結果を図 68 に示す。同図(a)に示すように、電極形成後も~50 cm/s 以下の実効表 面再結合速度に抑えることができており、その結果として同図(b)に示すように、~0.64 V 程度へと開放電圧を向上させることができた。一方、本構造においては、これまでのキャリ ア濃度を $\sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ とした構造と比べて、FF が低下する傾向が見られた。これは、 $p^{++}$ お よび n<sup>++</sup>の両方の高ドープ領域においてキャリア濃度を~10<sup>19</sup> cm<sup>-3</sup> ~と低減したこと、およ び電極領域の面積割合を低減したことから、直列抵抗成分が増加したためであると考えら れる。また、接触抵抗を低下させるためにアニール処理を高温化した場合には、Al 電極と Siの共晶を生じ、リーク電流が増加する傾向が見られた。この点については、今後、キャリ ア濃度を最適化するとともに、低キャリア濃度でも良好なコンタクトが得られる電極を採 用していくことで、改善できると考えられる。キャリア濃度の最適化においては、p++領域 においては、1019~1020 cm-3の間の中間的な値において、イオン注入によるダメージを抑制 しつつも良好なコンタクトを得ることができると考えられる。また、n++領域においては、 ~10<sup>20</sup> cm<sup>-3</sup>程度の注入でも明らかな荒れが観察されなかったことから、~10<sup>20</sup> cm<sup>-3</sup>近傍で 最適化することが考えられる。また、電極については、Si との共晶を生じずに、良好なオー ミック接触が期待される Ti/Ag 系の材料へと改善していくことが有用であると考えられる。



図 68: デバイス構造の改善の効果。(a) キャリア寿命の測定結果、(b) 開放電 圧の測定結果とシミュレーションとの比較。

以上のように、ドーピングおよび電極材料の改善により FF を向上しつつ、これまでのフ オトニック結晶による光吸収・短絡電流密度の増大効果および、高ドープ領域・電極の面積 割合の低下による開放電圧の向上等を総合することで、20 µm 以下の厚さにおいて、18%以 上への効率の実現が可能となるものと期待される。また、さらに高品質な表面保護を目的として、北陸先端科学技術大学院大学の松村先生のグループの Cat-CVD による高品質 a-Si/SiN パッシベーション技術の薄膜単結晶 Si への適用についても、松村先生のグループとの連携研究も検討しており、さらなる表面再結合の抑制による開放電圧の向上に繋がることが期待される。

## その他当初計画では想定されていなかった新しい展開

上で述べた、(A)極薄(~500 nm)μc-Si 太陽電池における、フォトニック結晶導入効果の 実証の項目においては、微結晶 Si 太陽電池へのフォトニック結晶形成・埋め込み法など、 当初計画では想定していなかった多くの検討を行い、新たな知見も多く得られた。また、(B) 数μm級の厚さのμc-Si 太陽電池へのフォトニック結晶構造導入および(C)薄膜単結晶 Si 太 陽電池への展開は、いずれも、検討項目自体が当初計画では想定していなかったものである。 このように、本研究では、当初計画では想定していなかった新しい展開が数多く得られてい るといえる。

これらに加え、今後太陽電池のさらなる効率向上を実現していくうえで、重要となる、新 たな知見・展開が得られたので、以下で述べる。

#### (a)実験的に作製された構造の分析と構造が吸収に与える効果の検証

実験では、図 13 に示すような特徴的な 2 重構造が現れることが判明した。この構造が、 太陽電池の光吸収に与える効果について考察を行った。

計算モデルとして、図 69 に示すように、上面の曲率半径を様々に変化させた構造を考え た。この際、微結晶 Si 層だけでなく、透明導電膜(ITO,GZO)における吸収も考慮した計算 を行い、Si 層に吸収される光の量を計算している。なお、金属については完全導体として 計算を行った。これらに対して、光吸収スペクトルを計算し、標準太陽光に対する理論短絡 電流密度の計算を行った。この際、Si 層の体積は均一になるように設定している。曲率半 径に対する、理論短絡電流密度の計算結果を図 70 に示す。同図から分かるように、曲率半 径が 0.55a のときに、最大値を取っていることが分かる。これは、曲率半径が 0.55a より小 さくなる場合、大きくなる場合、ともに上部の構造が平坦化しているため、フォトニック結 晶の効果が小さくなっていると考えられる。図 71 に、曲率半径が 0.0*a*(平坦上面)、0.55*a*、 1.0aの場合の光吸収スペクトルを示す。同図より、0.55aのときと比較して、0.0a(平坦上 面)および1.0aの場合、光吸収が周期的に減少している様子が見て取れる。これらの結果よ り、適切な上下2重構造が吸収増大に大きく寄与することが判明した。また、図71に、ラ ンバシアンテクスチャ構造の光吸収スペクトルを併せて示す。同図より、0.55aの場合に、 ランバシアンテクスチャ構造を超える光吸収が得られており、2×2 超格子相当の構造であり ながら、4×4 超格子の吸収効果を超えているような吸収増大に大きく寄与していることが明 らかになった。



図 69:上面の曲率半径を様々に変化させた構造の計算モデル。



**図 71**:上面の曲率半径に対する光吸収スペクトルの計算結果 ランバシアン テクスチャ構造のスペクトルも合わせて示す。

#### (b)感度解析法によるフォトニック結晶構造の自動最適化

(I)節にて述べたように、フォトニック超格子構造を導入することで、バンド端が増加し、 結果として光吸収が増大することを示した。しかし、光吸収を最大化するためのフォトニッ ク結晶構造の設計指針を得るために、本研究では、さらに踏み込んだ方法を検討した。具体 的には、感度解析法と呼ばれる、微小構造変化に対する特性の応答の解析結果をベースに、 構造を変調し、最適構造を見出していく手法を導入することを考えた。

ここでは、フォトニック結晶構造の最適化を行うために、以下の2ステップで構造設計 を行った。まず、第一のステップとして、図72(a)に示す4周期×4周期の超格子を構成する フォトニック結晶ロッドを、構造の4回対称性を考慮して図中の1~6と示す6種類に分類 し、これらの半径をパラメータとして変化させながら、吸収率が高くなる構造を探索した。 半径としては、計算機資源を考慮して0.0a,0.15a,0.30a,0.45aの4種類とし、合計 4<sup>6</sup>(=4096)パターンについて計算した。また、計算を簡単化するため、中心波長800 nm、周 波数半値全幅300 nmのパルスに対する吸収率を計算し、またSiの吸収係数として波長 800 nmの光に対するものを用いた。また、TCOの吸収は無視し、裏面電極については完 全導体を用いた。太陽電池の構造は、図3(a)の場合と同様とした。基本格子定数としては、 275 nmの場合を想定した。探索の結果得られた吸収率が最大の構造を、図72(b)に示す。



**図 72**: (a) 超格子構造におけるフォトニック結晶ロッドの分類。図中の同じ色 のロッドが同一の半径となるようにした (b)4<sup>6</sup>=4096 通りの探索により得られ た吸収率が最大の構造。

そして、第二のステップとして、この構造を初期構造として、微小構造変化を与えたとき の光吸収量の変化を評価する「感度解析法」を取り入れ、自動的に、詳細に、構造を最適化 することを検討した。感度解析法では、フォトニック結晶構造を微小なメッシュに区切り、 各部分に誘電率(および吸収係数)の変化を与えた際の、吸収の増減を評価する。これによ り、どの部分を構造変化させるべきかの指針が得られる。この手法を、本太陽電池に適用す るために、2次元面内構造のメッシュ化を行い、メッシュ状に区切った全ての点における誘 電率変化に対する吸収率変化を、FDTD 法による解析によって一括して求める手法を確立 した。

図 73(a)は、ロッド径変化のみによる探索により得られた吸収率の高い4 倍周期構造(図 72(b)の構造)に対して、本手法を1回適用した結果の例である。同図において、赤色の部分の誘電率を増加し、青色の部分の誘電率を減少させた場合に、光吸収が増大することが示されている。この結果に従い、誘電率を増減させながら構造を少しずつ変化させ(この過程では、実際には取りえない中間の誘電率も許容するとした)、繰り返し吸収の解析を行った結果を図 73(b)に示す。同図には、解析に用いた中心波長 800 nm、半値幅~300 nmの光に対する吸収率の変化を示している。同図より、元の格子点の結合や、新たな格子点の発生などにより、吸収率が増大していき、最終的に構造変化・吸収率が飽和していくことが分かる。これにより、吸収増大に適した構造が、自動的に求められるようになった。



図 73:(a) 図 72(b)の構造に対して感度解析法を 1 回適用した結果の例。赤色 の部分の誘電率を増加し、青色の部分の誘電率を減少させた場合に、光吸収が 増大することが示されている。(b)感度解析法による構造変化を 900 回繰り返 した場合の、光吸収率と構造の変化。

前述の計算により得られた、図 73(b)の 900step に示す構造に対して、Si 層への吸収スペクトルを計算した結果を図 74 に示す(なおここでは透明導電膜や金属の吸収は除いて計算している)。(I)節の図 6(c)にて示した 4 周期×4 周期超格子と比べて、特に 700~900 nm の

波長帯域において、より高い吸収ピークが得られていることが分かる。太陽光スペクトルで 重みづけした、波長 500~1000 nm 帯での光吸収率を平均した値は、フォトニック結晶のな い構造と比較すると 2 倍以上に向上することが分かる。



図74: FDTD 法により計算した吸収スペクトル。前述の図 6(c)の構造と比較 して、光吸収の増大効果が確認出来る。

以上の検討では、計算の簡単化のために TCO や裏面電極の吸収は無視してきたが、現 実には TCO や裏面電極の吸収も存在し、かつこれらに吸収された光は太陽電池の電流に は寄与しないと考えられる。したがって、より現実的な設計を行うためには、TCO や裏面 電極の吸収を含めた計算を行ったうえで、微結晶 Si の吸収を最大化する設計が必要となる と考えられ、そのための設計手法の開発を行った。具体的には、TCO および裏面電極の吸 収を含めた構造に対して解析を行い、

$$F = \int \left( \int_{Silayer} \frac{\alpha c}{n} \frac{1}{2} \epsilon E^2 dV \right) dt$$

で表される微結晶 Si 層への光吸収量を最大化するような計算を行った。(ただし、**E**は電界、  $\varepsilon$ は誘電率、nは材料の屈折率、cは真空中の光速、aは材料の光吸収係数である)。ここで は、図 75 に示すような解析モデルに対して計算を行った。前述の計算と同様、材料のパラ メータは波長 800 nm の光に対するものを用いた。この際、前述の計算とは異なり TCO 層 の光吸収を取り込んだ。また、本計算においては、裏面の銀の光吸収の影響についても、表 面インピーダンス法を用いることで取り込んだ。設計においては、前述の計算と同様、中心 波長 800 nm、半値幅~300 nm のパルスに対して吸収率の計算を行った。このパルスに対す る、微結晶 Si 層への光吸収量の変化を図 76 に示す(同図では初期構造に対する吸収率で規 格化している)。



図 75: TCO の吸収も加味した解析における計算モデル。



図76:感度解析法により得られた構造と光吸収量の変化

次に、微結晶 Si、透明導電膜、裏面電極の波長分散を取り込み、光吸収スペクトルを計算 し、Si 層で吸収された光が全て電子正孔対生成に寄与すると仮定した際に得られる、理論 短絡電流密度(Js)を計算すると、厚さ 600 nm の μc-Si の太陽電池において、初期構造の 19.8 mA/cm<sup>2</sup>に対し、25.2 mA/cm<sup>2</sup>となり、電流密度が 1.3 倍増大していることが判明した。 以上の検討により、光吸収の大きいフォトニック結晶を設計するための手法として、感度

解析法が有効であることが明らかになった。

# §4 成果発表等

- (1)原著論文発表 (国内(和文)誌0件、国際(欧文)誌38件) 1.著者、論文タイトル、掲載誌 巻、号、発行年
- 1. Y. Liang, P. Chao, K. Sakai, S. Iwahashi, and S. Noda, "Three-dimensional coupledwave model for square-lattice photonic crystal lasers with transverse electric polarization: A general approach", Physical Review B, vol. 84, no. 19, pp. 195119 (2011).
- 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).
- 3. 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, vol.100, issue 18, pp. 181110 (2012).
- 4. 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).
- 5. 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).
- 6. S. Iwahashi, K. Sakai, Y. Kurosaka, and S. Noda, "Centered-rectangular lattice surface-emitting photonic-crystal lasers", Physical Review B, vol. 85, no. 3, pp. 035304 (2012).
- 7. 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).
- 8. 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).
- 9. Y. Tanaka, Y. Kawamoto, M. Fujita, and S. Noda, "Enhancement of broadband optical absorption in photovoltaic devices by band-edge effect of photonic crystals", Optics Express, vol. 21, Issue 17, pp. 20111-20118, (2013).
- 10. T. Inoue, M. De Zoysa, T. Asano, and S. Noda, "Single-peak narrow-bandwidth midinfrared thermal emitters based on quantum wells and photonic crystals", Applied Physics Letters, vol. 102, pp. 191110 (2013).
- 11. 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, pp. 565-580 (2013).
- 12. 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, pp. 042002 (2013).
- 13. K. Kitamura, T. T. Xu, and S. Noda, "Investigation of electric field enhancement between metal blocks at the focused field generated by a radially polarized beam", Optics Express, vol. 21, Issue 26, pp. 32217-32224 (2013).
- 14. Y. Kawamoto, Y. Tanaka, K. Ishizaki, M. De Zoysa, T. Asano, and S. Noda, "Structural optimization of photonic crystals for enhancing optical absorption of thin film silicon solar cell structures", IEEE Photonics Journal, vol. 6, no. 1, pp. 4700110 (2014).
- 15. A. Oskooi, Y. Tanaka and S. Noda, "Tandem photonic crystal thin films surpassing

Lambertian light-trapping limit over broad bandwidth and angular range", Appl. Phys. Lett. vol. 104, pp. 091121 (2014).

- 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).
- 17. T. Asano, T. Inoue, M. De Zoysa, and S. Noda, "Analysis of emissivity and absorptivity of two overlapping guided modes in two-dimensional periodic structures", Physical Review A, vol. 89, pp. 033811 (2014).
- 18. T. Inoue, M. De Zoysa, T. Asano, and S. Noda, "Filter-free nondispersive infrared sensing using narrow-bandwidth mid-infrared thermal emitters", Applied Physics Express, vol. 7, no. 1, pp. 012103 (2014).
- 19. Y. Liang, T. Okino, K. Kitamura, C. Peng, K. Ishizaki, and S. Noda, "Mode stability in photonic-crystal surface-emitting lasers with large κ<sub>1D</sub>*L*", Applied Physics Letters, vol. 104, pp. 021102 (2014).
- Y. Yang, C. Peng, Y. Liang, Z. Li, and S. Noda, "Analytical perspective for bound states in the continuum in photonic crystal slabs", Phys. Rev. Lett. vol. 113, pp. 037401-1-5 (2014).
- 21. Y. Yang, C. Peng, Y. Liang, Z. Li, and S. Noda, "Three-dimensional coupled-wave theory for the guided mode resonance in photonic crystal slabs: TM-like polarization", Opt. Lett., vol. 39, no. 15, pp. 4498-4501 (2014).
- 22. T. Inoue, M. De Zoysa, T. Asano, and S. Noda, "Realization of dynamic thermal emission control", Nature Materials, vol. 13, no. 10, pp. 928-931 (2014).
- 23. M. Nishimoto, K. Ishizaki, K. Maekawa, Y. Liang, K. Kitamura, and S. Noda, "Fabrication of Photonic-Crystal Lasers by MBE Air-Hole Retained Growth", Applied Physics Express, vol.7, No.9, pp.092703 (2014).
- 24. T. Inoue, M. De Zoysa, T. Asano, and S. Noda, "Realization of narrowband thermal emission with optical nanostructures", Optica, vol. 2, no. 1, pp. 27-35 (2015).
- Y. Tanaka, K. Ishizaki, M. De Zoysa, T. Umeda, Y. Kawamoto, S. Fujita and S. Noda, "Photonic crystal microcrystalline silicon solar cells", Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 23, pp. 1475–1483 (2015)
- 26. K. Ishizaki, M. De Zoysa, Y. Tanaka, T. Umeda, Y. Kawamoto, and S. Noda, "Improved efficiency of ultra-thin μc-Si solar cells with photonic-crystal structures", Optics Express, vol. 23, pp. A1040-A1050 (2015).
- 27. Y. Kawamoto, Y. Tanaka, K. Ishizaki, M. De Zoysa, T. Asano, and S. Noda, "Structural design of photonic crystal thin film silicon solar cells by sensitivity analysis: Inclusion of electrode absorption", Optics Express, vol. 23, pp. A896-A902 (2015).
- 28. M. De Zoysa, T. Asano, T. Inoue, K. Mochizuki, and S. Noda, "Investigation of narrow-band thermal emission from intersubband transitions in quantum wells", Journal of Applied Physics, vol. 118, 103101 (2015).
- 29. T. Inoue, M. De Zoysa, T. Asano, and S. Noda, "Electrical tuning of emissivity and linewidth of thermal emission spectra", Physical Review B, vol. 91, pp. 235316 (2015).
- 30. J. Gelleta, Y. Liang, H. Kitagawa, and S. Noda, "Influence of external reflection on the TE mode of photonic crystal surface-emitting lasers", Journal of the Optical Society of America B, vol. 32, pp. 1435-1441 (2015).
- 31. T. Inoue, M. De Zoysa, T. Asano, and S. Noda, "On-chip integration and high-speed switching of multi-wavelength narrowband thermal emitters", Applied Physics Letters, vol. 108, pp. 091101 (2016).
- 32. M. Yoshida, M. Kawasaki, M. De Zoysa, K. Ishizaki, R. Hatsuda, and S. Noda, "Fabrication of photonic crystal structures by tertiary-butyl arsine-based metalorganic vapor-phase epitaxy for photonic crystal lasers", Applied Physics Express, vol. 9, pp. 062702 (2016).
- 33. T. Inoue, M. De Zoysa, T. Asano, and S. Noda, "High-Q mid-infrared thermal

emitters operating with high power-utilization efficiency", Optics Express, vol 24, pp. 15101-15109 (2016).

- 34. T. Asano, M. Suemitsu, K. Hashimoto, M. De Zoysa, T. Shibahara, T. Tsutsumi, and S. Noda, "Near-infrared-to-visible highly selective thermal emitters based on an intrinsic semiconductor", Science Advances, vol. 2, pp. e1600499 (2016).
- 35. M. De Zoysa, K. Ishizaki, Y. Tanaka, H. Sai, and S. Noda, "Enhanced efficiency of ultrathin (~500 nm)-film microcrystalline silicon photonic crystal solar cells", Applied Physics Express, vol 10, pp. 012302 (2017).
- 36. M. Nishimoto, K. Maekawa, and S. Noda, "Design of photonic-crystal surfaceemitting lasers with circularly-polarized beam", Optics Express, vol. 25, pp. 6104-6111 (2017).
- 37. K. Ishizaki, T. Umeda, M. De Zoysa, A. Motohira, Y. Tanaka, and S. Noda, "Microcrystalline silicon solar cells with photonic crystals on top surface", IEEE Journal of Photovoltaics (2017). DOI: 10.1109/JPHOTOV.2017.2695524.
- 38. K. Ishizaki, Y. Tanaka, S. Jeon, M. De Zoysa, and S. Noda, "Progress in thin-film silicon solar cells based on photnic-crystal structures", (submitted to Japanease Journal of Applied Physics as Invited Review Article).

## (2)その他の著作物(総説、書籍など)

- 1. 野田進, "フォトニック結晶と太陽電池への応用" (シーエムシー出版 "超高効率太陽電 池・関連材料の最前線", 第2章第3節, 2011年).
- 2. 野田進, "総論-ここまで来たフォトニック結晶-", OPTRONICS, 32 巻 9 号, pp. 78-80, 2013.
- 3. 浅野卓, M. De Zoysa, 井上卓也, 野田進, "電子状態と格子状態の制御による熱輻射の 狭帯域化-高効率熱光発電や新しい熱輻射高原実現に向けて-", OPTRONICS, 32 巻 9 号, 81-87 (2013).
- 4. 野田進, "フォトニック結晶の研究を振り返って", 応用物理, pp. 598-603, 2015年7月号.
- 5. 野田進, "フォトニック結晶研究の経緯と現状 (特集 世界に誇れる日本の光学技術)", O plus E: Optics・Electronics 37 巻 10 号, pp. 819-825, 2015.
- 6. 野田進, "第二世代フォトニック結晶" OPTRONICS, 34 巻 4 号, 2015.
- 7. 井上 卓也, De Zoysa Menaka, 浅野 卓, 野田進, "量子井戸とフォトニック結晶に基づく 熱輻射の高速制御", 固体物理 50 巻 4 号, pp. 171-178, 2015.
- 8. 野田進, "単一モード高出力フォトニック結晶面発光レーザー(「面発光型半導体レーザーの 最新研究」特集号)", レーザー学会誌 43 巻 7 号, pp. 447-451, 2015.
- 9. 野田進, 高橋和, 浅野卓, メーナカ・デ・ゾイサ, "フォトニック結晶技術を用いた半導体レーザ ーの小型化", レーザー学会誌 44 巻 8 号, pp514-519, 2016.
- 10. Menaka De Zoysa, 井上卓也, 浅野卓, 野田進, "フォトニック結晶による光制御の動向", OPTRONICS 35 巻 10 号, pp83-89, 2016.

## (3)国際学会発表及び主要な国内学会発表

①招待講演(国内会議 22 件、国際会議 47 件)1. 発表者(所属)、タイトル、学会名、場所、月日

(国際会議)

1. S. Noda, "Advanced Light Manipulation with Photonic Crystal Nanostructures", The 1st International Symposium on Photonics and Electronics Convergence -Advanced Nanophotonics and Silicon Device Systems-, E-1, University of Tokyo, Tokyo, Japan, Nov. 15 (2011).

- 2. S. Noda, "Recent Progress in Photonic Crystals and Their Device Applications", Photons, Electrons, Bands: A Symposium on the Diversity of Opto-Electronics, UC Berkeley, California, USA, Jan. 27 (2012).
- 3. S. Noda, "Recent Progress in Photonic Crystals From Dynamic Control to Solar Cells", META12: 3rd International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics, TELECOM ParisTech, Paris, France, Apr. 19 (2012).
- 4. T. Asano and S. Noda, "Manipulation of photons by photonic crystals" ICMCTF: International Conference on Metallurgical Coatings & Thin Films, C1.1-1, Town & Country Convention Center, San Diego, California, USA, Apr. 23 (2012).
- 5. S. Noda, "Recent Progresses in 3D and 2D Photonic Crystals", PECS-X: 10th International Symposium on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures Eldorado Hotel & Spa, Santa Fe, New Mexico, USA, Jun. 2 (2012).
- T. Asano and S. Noda, "Recent Progress and Future Prospects of Photonic Crystals", ICOOPMA2012: International Conference on Optical, Optoelectronic and Photonic Materials and Applications, 3PL1-1, Nara Prefectural New Public Hall, Nara, Japan, Jun. 4 (2012).
- S. Noda, "Recent Progress in Manipulation of Photons by Photonic Crystals", OECC 2012: The 17th OptoElectronics and Communications Conference, 4F3-2, Busan Exhibition & Convention Center, Busan, Korea, Jul. 4 (2012).
- 8. S. Noda, "Advanced Light Manipulation with Photonic Crystal Nanostructures", GFP 2012 9th International Conference on Group IV Photonics, (8/29-8/31) FC6 Holiday Inn on the Bay Hote, San Diego, California, USA, Aug. 29 (2012).
- 9. S. Noda, "Recent Progress in Photonic Crystals and their Device Applications", LW4I.2 FiO/LS2012 Frontiers in Optics & Laser Science, Rochester, New York, USA, Oct. 14 (2012).
- 10. T. Asano and S. Noda, "Manipulation of Photons by Photonic Crystals", IT03 ICNME2012: 10th International Conference on Nano-Molecular Electronics, Awaji Yumebutai International Conference Center, Hyogo, Japan, Dec. 12 (2012).
- 11. S. Noda, "Recent Progress in Photonic Crystals and their Applications", META'13: The 4th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics, University of Sharjah, Sharjah, United Arab Emirates, Mar. 18 (2013).
- 12. S. Noda, "Recent Progress in Photonic Crystals and their Applications", KIST-IMCM symposium, Seoul, Korea, May 10, (2013).
- 13. S. Noda, "Photonic Crystal Lasers", Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO-2013), San Jose, USA, Jun. 11, (2013).
- 14. S. Noda, "Photonic Crystal Lasers", The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR 2013), Kyoto, Japan, Jun. 30, (2013).
- 15. T. Inoue, M. De Zoysa, T. Asano, and S. Noda, "Single-mode, Narrowband Thermal Emitters Based on Quantum Wells and Photonic Crystals", The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR 2013), Kyoto, Japan, Jun. 30, (2013).
- 16. S. Noda, "Recent Progress in Photonic Crystals and their Applications", IEEE photonics society summer topical meeting 2013, Kona, USA, Jul. 8, (2013).
- S. Noda, "Recent Progress in Photonic Crystals and Their Applications", Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2013), Stockholm, Sweden, Aug. 13, (2013).
- S. Noda, "Recent Progress in Photonic Crystals", SPIE Optics + Photonics 2013, San Diego, USA, Aug. 25, (2013) (Plenary).
- S. Noda: "Photonic-Crystal Resonant Effects for Broad-Area Coherent-Lasers and Highly-Efficient Solar Cells", OSA Frontier in Optics (FiO) 2013, Orlando, USA, Oct. 6, (2013).
- 20. T. Asano and S. Noda, "Advanced Light Manipulation with Photonic Crystal Nanostructures", 3rd International Symposium on Photonics and Electronics

Convergence (ISPEC 2013), Tokyo, Japan, Nov. 18, (2013).

- 21. S. Noda, "Recent Progress in Photonic Crystals", Swiss-Kyoto Symposium, Zurich, Switzerland, Nov. 22, (2013).
- 22. S. Noda, "Manipulation of Photons by Photonic Crystals", JSPS Japanese-German Colloquium "Frontier of Laser Science", Bonn, Germany, Jan. 17, (2014)
- 23. T. Asano, and S. Noda, "Thermal radiation control by photonic crystals for sensing and photovoltaics", Compound Semiconductor Week 2014, Montpellier, France, May 12, (2014).
- 24. S. Noda, "Recent progress in photonic crystals and their applications", The 11th International Symposium on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures (PECS-XI), Shanghai, China, May. 12, (2014).
- 25. S. Noda, "Recent progress in photonic crystals and their applications", Optoelectronics and communications conference 2014 & Australian conference on optical fiber technology (OECC/ACOFT 2014), Melbourne, Australia, Jul. 7, (2014).
- 26. S. Noda, "Recent progress in photonic crystals and their applications", SPIE Optics + Photonics, San Diego, USA, Aug. 20, (2014).
- 27. S. Noda, "Manipulation of Photons by Photonic Crystals", Kyoto University & National Taiwan University Symposium, Kyoto, Japan, Sep. 1, (2014).
- S. Noda, "Recent progress in photonic crystal Lasers", 24th IEEE International Semiconductor Laser Conference (ISLC 2014), Palma de Mallorca, Spain, Sep. 8, (2014).
- 29. Y. Kawamoto, Y. Tanaka, K. Ishizaki, M. De Zoysa, T. Asano and S. Noda: "Structural optimization of photonic crystals for enhancing optical absorption in thin film silicon solar cells", IEEE Photonics Conference 2014, San Diego, USA, Oct. 12, (2014).
- 30. S. Noda, "Recent progress in manipulation of photons by photonic crystals", The 5th conference on Advances in Optoelectronics and Micro/nano-optics (AOM 2015), Oct. 30 (2015).
- 31. K. Kitamura and S. Noda, "Photonic-Crystal Lasers for Needle-like Focus Properties", International Symposium on Optical Memory 2015, Oct. 6 (2015).
- 32. S. Noda, "Recent progress in Photonic Crystals and Their Applications", 2th Sweden - Japan QNANO Workshop, Sep. 24 (2015).
- 33. S. Noda, "Recent progress in photonic crystals and their device applications", SPIE Optics + Photonics, Aug. 9 (2015).
- 34. S. Noda, M. D. Doysa, T. Inoue, and T. Asano, "Thermal emission control by manipulating electronic and photonic states: Energy Recycling and Dynamic Control", META'15, the 6th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics, Aug. 7 (2015).
- 35. S. Noda, "Dynamic control of photonic crystals", The 7th International Symposium on Ultrafast Photonic Technologies (ISUPT2015) and International Symposium on extremely advanced transmission technology (EXAT 2015), Jul. 13 (2015).
- 36. S. Noda, "Recent progress in photonic crystals and their applications", The 5th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies (EM-NANO 2015), Jun. 16 (2015).
- S. Noda, "Recent Progress in Photonic Crystals and Their Device Applications", COOC2015(The 22nd Conference on Optoelectronics & Optical Communications), Jun. 3 (2015).
- 38. K. Ishizaki, Y. Tanaka, D. Z. Menaka, and S. Noda, "Photonic-Crystal Thin-Film-Silicon Solar Cells", The Energy, Materials, and Nanotechnology (EMN) Photovoltaics Meeting 2016, Jan. 20 (2016).
- 39. S. Noda, "Photonic Crystal Nanocavities", 2016 Optical Fiber Communication Conference and Exhibition (OFC), Mar. 24 (2016).
- 40. S. Noda, "Manipulation of Photons by Photonic Crystals", The 15th International Symposium on Science and Technology of Lighting (LS15), Shiran-kaikan, Kyoto,

May 27 (2016).

- 41. T. Inoue, T. Asano, M. De Zoysa, and S. Noda: "Highy efficient high-speed thermal emitters based on quantum wells and photonic crystals (Invited)", The 7th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META2016), 1A12-2, Torremolinos Congress Center, Malaga, Spain, Jul. 25 (2016).
- S. Noda, "Manipulation of Photons by Photonic Crystals", Compound Semiconductor Week (CSW 2016), Toyama International Conference Center, Toyama, Japan, Jun. 26 (2016).
- 43. S. Noda, "High Power Photonic-Crystal Lasers with High-Beam Quality", OptoElectronics and Communications Conference (OECC2016) / Photonics in Switching 2016 (PS2016), Toki Messe Niigata Convention Center, Niigata Japan, Jul. 3 (2016).
- 44. S. Noda, "Thermal Emission Control by Photonic Crystals", OptoElectronics and Communications Conference (OECC2016) / Photonics in Switching 2016 (PS2016), Toki Messe Niigata Convention Center, Niigata Japan, Jul. 5 (2016).
- 45. S. Noda, "Recent progresses and their applications of photonic crystals", The Conference on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures (PECS) XII, University of York, UK, Jul. 18 (2016).
- 46. S. Noda, "Progress and Future Prospects of Photonic Crystal Lasers", 25th International Semiconductor Laser Conference (ISLC 2016), AWS4, Kobe Meriken Park Oriental Hotel, Hyogo, Japan, Sep. 15 (2016).
- 47. S. Noda, "Recent Progress in Photonic Crystals", OSA Frontiers in Optics / Laser Science (FiO/LS 2016), LF1I.1, Rochester, New York, United States, Oct. 21 (2016).

(国内会議)

- 1. 野田進, "フォトニック結晶による光制御の現状", 大阪大学・丸文財団連携シンポジウム「最先端を走る研究者たちが語る日本の省エネ・創エネ」, 千里中央ライフサイエンスセンター, 豊中市 2011 年 12 月 17 日.
- 2. 北村恭子,西本昌哉,酒井恭輔,野田進,"フォトニック結晶レーザによる特異な集光特 性を有するビームの発生",電子情報通信学会 レーザ・量子エレクトロニクス研究会, LQE2012-127,機械振興会館,東京都港区,2012年12月13日.
- 3. M. De Zoysa, 浅野卓, 野田進, "新型太陽光発電に向けた熱輻射スペクトル制御", 応用 物理学会関西支部セミナー「光物性とその光機能-太陽光エネルギーハーベスティン グのための新しい光機能-」,大阪市立大学,大阪市, 2013 年 1 月 12 日.
- 4. 浅野卓, M. De Zoysa, 野田進, "電子および光状態制御による熱輻射制御 —高効率熱 光発電や新しい熱輻射光源実現に向けて—", 電子情報通信学会総合大会, C-3-19, 岐阜 大学, 岐阜市, 2013 年 3 月 20 日.
- 5. 野田進, "フォトニクス・エネルギー融合", 電子情報通信学会次世代ナノ技術研究会材 料デバイスサマーセミナー「ナノデバイスを用いたフォトニクスの広がり」, 東京都, 2013年6月21日.
- 6. 野田進, "フォトニック結晶の現状と将来展望", 理化学研究所光量子工学セミナー, 和 光市, 2014 年 3 月 14 日.
- 7. 野田進, "フォトニック結晶が拓く新しい光制御の可能性 その基礎から、シリコンレ ーザ、大面積コヒーレントレーザ、高効率太陽電池応用まで–", サイテックサロン, 東 京都, 2014 年 3 月 15 日.
- 8. 西本昌哉,石崎賢司,前川亨平,梁永,北村恭子,野田進,"分子線エピタキシー法によるフォトニック結晶レーザ構造の作製 III —空孔形状がレーザの特性に与える影響の検討—",第61回応用物理学会春季講演会,相模原市,2014年3月17日.
- 9. 井上卓也, Menaka De Zoysa, 浅野卓, 野田進, "狭帯域熱輻射光源の電圧高速変調 -実験的進展-", 2014 年第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学札幌キャンパス,

札幌市, 2014年9月17日.

- 10. 野田進, "フォトニック結晶技術の進展と将来展望", 光・量子エレクトロニクス特別講 演会, 機械振興会館, 2014 年 12 月 18 日.
- 11. 野田進, "フォトニック結晶工学の進展と今後の展望", 2015 年第 62 回応用物理学会春 季学術講演会, 東海大学湘南キャンパス, 平塚市, 2015 年 3 月 12 日.
- 田中良典, 浅野卓, 野田進, "FDTD 法を用いたフォトニック・ナノ構造の電磁界解析", 応用物理学会関西支部平成 26 年度第 2 回講演会, 神戸大学, 神戸市, 2014 年 11 月 12 日.
- 13. 浅野卓, "半導体ヘテロ構造とフォトニック結晶を用いた光状態制御", 日本物理学会 第70回年次大会, 早稲田大学, 東京都, 2015年3月23日.
- 14. 浅野卓, 野田進, "SiC 材料による可視~赤外域フォトニック結晶", シリコン・フォトニクス 第 21 回研究会 Si-photonics; What's next?, 東京工業大学, 東京都, 2014 年 7 月 29 日.
- 15. 野田進, "フォトニック結晶による光制御の現状と将来展望", IEEE Photonics Society Kansai Chapter 2015 国際光年記念講演会, 京都工芸繊維大学 松ヶ崎キャンパス, 京都市, 2015 年 10 月 14 日.
- 16. 安田大貴, 沖野剛士, 北村恭子, 野田進, "変調フォトニック結晶レーザービーム出射方 向と偏光特性の制御ー", 2016年電子情報通信学会総合大会, 九州大学伊都キャンパス, 福岡市, 2016年3月17日.
- 17. 井上卓也, De Zoysa Menaka, 浅野卓, 野田進, "電子・光子両状態制御に基づく高効率・ 高速熱輻射光源の開発", レーザー学会学術講演会第36回年次大会, 名城大学 天白キ ャンパス, 名古屋市, 2016年1月10日.
- 18. 井上卓也, De Zoysa Menaka, 浅野卓, 野田進, "量子井戸とフォトニック結晶に基づく 高効率・高速熱輻射光源の開発", 電子情報通信学会 レーザ・量子エレクトロニクス 研究会, 機械振興会館, 東京都, 2015 年 12 月 18 日.
- 19. 野田進, "フォトニック結晶の現状と事業化への展望", 第 8 回光・電波フォーラム, 大阪工業大学, 大阪市, 2016 年 8 月 2 日.
- 20. 浅野卓, "フォトニック結晶デバイスの基礎と光子操作への応用", フォトニクス・イノ ベーションセミナー, 東京大学, 東京都, 2016 年 10 月 7 日
- 井上卓也, De Zoysa Menaka, 浅野卓, 野田進, "波長切替可能な狭帯域熱輻射光源の開発と展望", 2017 年第 64 回応用物理学会春期学術講演会, パシフィコ横浜, 神奈川県, 2017 年 3 月 15 日.
- 22. 北村 恭子、野田 進、"フォトニック結晶レーザによる様々な形状・偏光/位相分布ビームの発 生-光圧の自在なデザインに向けて--", 2017 年第 64 回応用物理学会春期学術講演会,パ シフィコ横浜,神奈川県, 2017 年 3 月 14 日.
- ②口頭発表(国内会議 85 件、国際会議 34 件)1. 発表者(所属)、タイトル、学会名、場所、月日

(国際会議)

- S. Iwahashi, T. Nobuoka, Y. Kurosaka, and S. Noda: "Comprehensive Investigation of Composite Photonic-Crystal Cavities Emitting Arbitrary-Angled Laser Beams", 2011 IEEE Photonic Conference, WP 1, Marriott Crystal Gateway, Arlington, VA, USA, Oct. 12 (2011).
- 2. S. Noda: "Progress in Manipulation of Photons by Photonic Crystals", 5th GCOE International Symposium on Photonics and Electronics Science and Engineering, Kyoto University, Kyoto, Japan, Mar. 9 (2012).
- 3. A. Oskooi, and S. Noda, "Partially-disordered photonic-crystal thin films for enhanced and robust photovoltaics", PECS-X: 10th International Symposium on

Photonic and Electromagnetic Crystal Structures, Eldorado Hotel & Spa, Santa Fe, New Mexico, USA, Jun. 2 (2012).

- M. Fujita, H. Shigeta, Y. Tanaka, A. Oskooi, H. Ogawa, Y. Tsuda, and S. Noda, "Photocurrent enhancement in ultrathin silicon by the photonic band-edge effect", IEEE Photonics Conference (IPC) 2012 Hyatt Regency San Francisco Airport Burlingame, California, USA. Sep. 27 (2012).
- 5. Y. Kurosaka, A. Wantanabe, T. Sugiyama, K. Hirose and S. Noda: "Direction-Controllable, Single-Lobed Photonic Crystal Lasers for Beam Steering Functionality", Conference on Lasers and Electro-Optics(CLEO) 2012, CTu1N.1, San Jose Convention Center, San Jose, California, USA, May 8 (2012).
- 6. K. Kitamura, M. Nishimoto, K. Sakai and S. Noda: "Photonic-crystal ring-cavity lasers emitting a beam with needle-like focus characteristics", Conference on Lasers and Electro-Optics(CLEO) 2012, CTu1N.3, San Jose Convention Center, San Jose, California, USA, May 8 (2012).
- K. Hirose, Y. Kurosaka, A. Watanabe, T. Sugiyama and S. Noda: "Effects of Non-Lasing Band in 2D Photonic Crystal Lasers", Conference on Lasers and Electro-Optics(CLEO) 2012, CF1M.5 San Jose Convention Center, San Jose, California, USA, May 11 (2012).
- Y. Tanaka, Y. Kawamoto, M. Fujita, and S. Noda: "Enhancement of Optical Absorption in Solar Cells by Band-Edge Effect of Photonic Crystals. I –Formation of Multiple Bandedges-", The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR 2013), Kyoto, Japan, Jun. 30, (2013).
- Y. Kawamoto, Y. Tanaka and S. Noda: "Enhancement of Optical Absorption in Solar Cells by Band-Edge Effect of Photonic Crystals. II —Topology Optimization for Further Absorption—", The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR 2013), Kyoto, Japan, Jun. 30, (2013).
- 10. Y. Kawamoto, Y. Tanaka and S. Noda: "Enhancement of Optical Absorption in Thin Film Silicon Solar Cells with Band-Edge Effect of Photonic Crystals", Bristol-Kyoto Symposium, Kyoto, Japan, Jan. 9, (2014).
- 11. M. Nishimoto, K. Ishizaki, K. Maekawa, K. Kitamura, and S. Noda: "Air-hole Retained Growth on Photonic-crystal Structures by MBE", The 40th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS 2013), Kobe, Japan, May 19, (2013).
- 12. Y. Liang, C. Peng, S. Iwahashi, Y. Tanaka, K. Ishizaki, and S. Noda "Three-Dimensional Coupled-Wave Theory for Centered-Rectangular Lattice Photonic-Crystal Lasers", The 7th International Conference on Nanophotonics (ICNP)/ 3rd Conference on Advances in Optoelectronics and Micro/Nano Optics (AOM) (ICNP/AOM 2013), Hong Kong, China, May 19, (2013).
- T. Nobuoka, K. Kitamura, S. Iwahashi, T. Okino, Y. Liang and S. Noda "Twodimensional Beam-steering Achieved Using Photonic-crystal Lasers", The Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2013), San Jose, USA, Jun. 9, (2013).
- 14. A. Watanabe, T. Sugiyama, Y. Kurosaka, K. Hirose, and S. Noda: "Single Mode Operation of Edge-Emitting Semiconductor Lasers with 2D Photonic Crystal.", The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR 2013), Kyoto, Japan, Jun. 30, (2013).
- 15. K. Hirose, Y. Kurosaka, A. Watanabe, T. Sugiyama, Y. Liang, and S. Noda: "High power Photonic-Crystal Surface-Emitting Lasers.", The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR 2013), Kyoto, Japan, Jun. 30, (2013).
- Y. Liang, C. Peng, K. Ishizaki, S. Iwahashi, K. Sakai, Y. Tanaka, K. Kitamura, and S. Noda: "Three-Dimensional Coupled-Wave Theory for Triangular-Lattice Photonic Crystal Lasers.", The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR 2013), Kyoto, Japan, Jun. 30, (2013).

- 17. M. Nishimoto, K. Ishizaki, K. Maekawa, K. Kitamura, and S. Noda: "Fabrication of Photonic Crystal Lasers by Molecular Beam Epitaxy", Swiss-Kyoto Symposium, Zurich, Switzerland, Nov. 22, (2013).
- 18. M. De Zoysa, T. Inoue, T. Asano, and S. Noda: "Narrowing thermal emission by controlling both electric and photonic states", Bristol-Kyoto Symposium, Kyoto, Japan, Jan. 9, (2014).
- 19. M. Nishimoto, K. Ishizaki, K. Maekawa, K. Kitamura, and S. Noda: "Fabrication of Photonic Crystal Lasers by Molecular Beam Epitaxy", Bristol-Kyoto Symposium, Kyoto, Japan, Jan. 9, (2014).
- 20. K. Hirose, Y. Kurosaka, A. Watanabe, T. Sugiyama, Y. Liang, and S. Noda: "Demonstration of Watt-class High-power Photonic-Crystal Lasers", Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO-2014), San Jose, USA, Jun. 11, (2014).
- 21. Y. Tanaka, K. Ishizaki, M. De Zoysa, T. Umeda, Y. Kawamoto, S. Fujita, and S Noda: "Microcrystalline Silicon Solar Cells with Photonic Crystals", IEEE Photonics Conference 2014, San Diego, USA, Oct. 15, (2014).
- 22. T. Inoue, M. De Zoysa, T. Asano, S. Noda: "Dynamic control of narrowband thermal emission", IEEE Photonics Conference 2014, San Diego, USA, Oct. 16, (2014).
- 23. K. Kitamura, and S. Noda, "Generation of Strong Electric Fields with Pure Longitudinal Polarization by Using a Dielectric Structure and a Focused Radially Polarized Beam", CLEO/Europe-EQEC 2015, Jun. 24 (2015).
- 24. K. Kitamura, and S. Noda, "Creation of Small and Strong Electric Fields by Using a Dielectric Structure and a Focused Radially Polarized Beam", The Optical Manipulation Conference (OMC) 2015 of the Optics & Photonics International Congress (OPIC) 2015, Apr. 22 (2015).
- 25. M. Suemitsu, T. Tsutsumi, T. Asano, M. De Zoysa, and S. Noda, "Visible to nearinfrared narrow-band thermal emitters based on silicon-rod photonic crystals", SPIE Photonics West, Feb. 18 (2016).
- M. Nishimoto, K. Maekawa, K. Ishizaki, K. Kitamura and S. Noda, "Development of MBE Air-Hole Retained Growth Technique for Fabrication of Photonic-Crystal Lasers", Collaborative Conference on Crystal Growth 2015 - (3CG 2015), Dec. 14 (2015).
- 27. T. Inoue, M. De Zoysa, T. Asano, S. Noda: "Demonstration of Single-mode High-Q Thermal Emitters Operating with High Power-utilization Efficiency", 17th International Conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures (PLMCN17), We9, Todaiji Temple Cultural Center, Nara, Japan, Mar. 30 (2016).
- 28. Masahiro Suemitsu, Tatsunori Tsutsumi, Takashi Asano, Menaka De Zoysa, Susumu Noda: "Observation of highly selective near-infrared thermal emission from silicon-rod photonic crystals",17th International Conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures (PLMCN17), We9, Todaiji Temple Cultural Center, Nara, Japan, Mar. 30 (2016).
- 29. D. Kang, T. Inoue, T. Asano, S. Noda: "GaN-Based Photonic-Crystal Thermal Emitters Operating in the Middle-Wavelength Infrared Range", Conference on Lasers and Electro-Optics 2016 (CLEO2016), SM4E.4, San Jose Convention Center, San Jose, USA, Jun. 07 (2016).
- 30. T. Inoue, A. Ji, M. De Zoysa, T. Asano, S. Noda: "Electrical Wavelength Switching of Thermal Emitters Based on Quantum Wells and Photonic Crystals", Conference on Lasers and Electro-Optics 2016 (CLEO2016), SF1E.3, San Jose Convention Center, San Jose, USA, Jun. 10 (2016).
- T. Inoue, A. Ji, M. De Zoysa, T. Asano, S. Noda: "Two-wavelength Switchable Narrowband Thermal Emitters", Compound Smiconductor Week 2016 (CSW2016), TuB3-2, Toyama International Conference Center, Toyama, Japan, Jun. 28 (2016).
- 32. M. Yoshida, M. De Zoysa, K. Ishizaki, R. Hatsuda, Y. Tanaka, H. Kitagawa, S. Noda: "Fabrication of photonic-crystal structures by TBAs-based MOVPE for photonic-

crystal lasers", Compound Smiconductor Week 2016 (CSW2016), TuB3-6, Toyama International Conference Center, Toyama, Japan, Jun. 28 (2016).

- 33. M. De Zoysa, T. Kobayashi, M. Yoshida, M. Kawasaki, K. Ishizaki, R. Hatsuda, and S. Noda, "In-plane Mutual Wavelength Locking of Photonic Crystal Lasers", 25th International Semiconductor Laser Conference (ISLC 2016), ThC4, Kobe Meriken Park Oriental Hotel, Hyogo, Japan, Sep. 15 (2016).
- 34. D. Yasuda, K. Kitamura, and S. Noda, "Realization of Two-dimensional Beam Steering by Position-modulated Photonic-crystal Lasers", 25th International Semiconductor Laser Conference (ISLC 2016), ThC6, Kobe Meriken Park Oriental Hotel, Hyogo, Japan, Sep. 15 (2016).

(国内会議)

- 1. 田中良典, Ardavan Oskooi, 冨士田誠之, 重田博昭, 原潤一, 宮西晋太郎, 野田進, "光 起電力素子の光電変換効率増大に向けたフォトニック結晶共振作用の最適化(IV)", 2012 年春季 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 15p-E5-16, 早稲田大学, 東京都, 2012 年 3 月 15 日.
- 2. Oskooi Ardavan, Favuzzi Pedro, 田中良典, 重田博昭, 原潤一, 宮西晋太郎, 川上養一, 野田進, "光起電力素子の光電変換効率増大に向けたフォトニック結晶共振作用の最適 化(V)~ランダム構造フォトニック結晶の導入~", 2012 年春季 第 59 回応用物理学関 係連合講演会, 15p-E5-17, 早稲田大学, 東京都, 2012 年 3 月 15 日.
- 信岡俊之, 岩橋清太, 沖野剛士, 野田進, "正方格子 M 点フォトニック結晶共振器を用 いた2次元ビーム偏向操作", 2012 年春季 第59回応用物理学関係連合講演会, 16a-E5-2, 早稲田大学, 東京都, 2012 年3月16日.
- 梁 永, Chao Peng, 酒井恭輔, 岩橋清太, 野田進, "2 次元フォトニック結晶レーザの結 合波理論による解析 VIII - 三角格子の解析-", 2012 年春季 第 59 回応用物理学関係連合 講演会, 16a-E5-4, 早稲田大学, 東京都, 2012 年 3 月 16 日.
- 5. 田中良典, 川本洋輔, Ardavan Oskooi, 冨士田誠之, 重田博昭, 野田進, "光起電力素子 の光電変換効率増大に向けたフォトニック結晶共振作用の最適化(VI) ~超格子構造の 導入~", 2012 年秋季 第 73 回応用物理学会学術講演会, 13p-B1-15, 愛媛大学・松山大 学, 松山市, 2012 年 9 月 11-14 日.
- 6. 川本洋輔, De Zoysa Menaka, 石崎賢司, 梅田尚実, 田中良典, 重田博昭, 冨士田誠之, 浅野卓, 野田進, "フォトニック結晶のバンド端共鳴効果による広帯域光吸収増大効果 の実験的検討", 2013 年 第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 29a-C1-1, 神奈川工科 大学, 厚木市, 2013 年 3 月 27-30 日.
- 川本洋輔,田中良典, Ardavan Oskooi,石崎賢司, De Zoysa Menaka,浅野卓,野田進, "光トラップ効率増大に向けたフォトニック結晶構造の検討(A)フォトニック超格子構 造とトポロジー最適化に基づくアプローチ",2013年第60回応用物理学会春季学術講 演会,29a-C1-2,神奈川工科大学,厚木市,2013年3月27-30日.
- Oskooi Ardavan, 田中良典, 野田進, "光トラップ効率増大に向けたフォトニック結晶 構造の検討(B) トポロジー最適化と部分的ランダム化に基づくアプローチ", 2013 年 第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 29a-C1-6, 神奈川工科大学, 厚木市, 2013 年 3 月 27-30 日.
- 9. 沖野剛士, 梁永, 北村恭子, 野田進, "フォトニック結晶レーザのビーム出射方向制御 変調フォトニック結晶構造の導入-",2013 年 第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 28-C1-17, 神奈川工科大学, 厚木市, 2013 年 3 月 27-30 日.
- 10. Menaka De Zoysa, 石崎賢司, 川本洋輔, 梅田尚実, 田中良典, 浅野卓, 重田博昭, 冨 士田誠之, 野田進, "フォトニック結晶上への微結晶シリコン形成に関する検討", 第 74 回応用物理学会秋季講演会, 京田辺市, 2013 年 9 月 16 日.
- 11. 田中良典, 川本洋輔, 野田進, "光トラップ効率増大に向けたフォトニック結晶構造の検 討 – 厚さ方向高次モード vs 超格子構造 –", 第74回応用物理学会秋季講演会, 京田

辺市, 2013年9月16日.

- 12. 井上卓也, Menaka De Zoysa, 浅野卓, 野田進, "単峰・狭帯域中赤外熱輻射光源を用いた非分散型赤外センシングの検討", 第74回応用物理学会秋季講演会, 京田辺市, 2013 年9月16日.
- 13. Menaka De Zoysa, 井上卓也, 浅野卓, 児島貴徳, 野田進, "動的熱輻射制御 –2 パルス 光を用いた時間応答測定–", 第 74 回応用物理学会秋季講演会, 京田辺市, 2013 年 9 月 16 日.
- 14. Y. Liang, T. Okino, K. Kitamura, K. Ishizaki, and S. Noda, "Coupled-wave analysis for photonic-crystal surface-emitting lasers (XI) –Nonuniformity of gain profile–", 第 74 回応用物理学会秋季講演会, 京田辺市, 2013 年 9 月 16 日.
- 15. 重田博昭,田中良典,富士田誠之,石崎賢司, De Zoysa Menaka,野田進,"フォトニック結晶を用いたスーパーストレート型薄膜シリコン太陽電池の検討",第 61 回応用物 理学会春季講演会,相模原市,2014年3月17日.
- 16. 梅田尚実, De Zoysa Menaka, 石崎賢司, 田中良典, 川本洋輔, 藤田奨也, 重田博昭, 冨 士田誠之, 野田進, "フォトニック結晶を導入した微結晶シリコン太陽電池の作製", 第 61 回応用物理学会春季講演会, 相模原市, 2014 年 3 月 17 日.
- 17. 田中良典, 川本洋輔, 石崎賢司, De Zoysa Menaka, 梅田尚実, 藤田奨也, 浅野卓, 重田 博昭, 冨士田誠之, 野田進, "フォトニック結晶を有する µc-Si 太陽電池実構造の光吸収 の理論解析", 第 61 回応用物理学会春季講演会, 相模原市, 2014 年 3 月 17 日.
- 18. Menaka De Zoysa, 石崎賢司, 梅田尚実, 田中良典, 藤田奨也, 川本洋輔, 重田博昭, 冨士田誠之, 野田進, "フォトニック結晶を導入した μc-Si 太陽電池の特性評価", 第 61 回応用物理学会春季講演会, 相模原市, 2014 年 3 月 17 日.
- 19. 石崎賢司, MenakaDeZoysa, 田中良典, 梅田尚実, 川本洋輔, 藤田奨也, 重田博昭, 富 士田誠之, 野田進, "フォトニック結晶構造を有する微結晶シリコン太陽電池の基礎検 討", 第 61 回応用物理学会春季講演会, 相模原市, 2014 年 3 月 17 日.
- 20. 井上卓也, 中島嘉久, De Zoysa Menaka, 浅野卓, 野田進, "狭帯域熱輻射光源の電圧高 速変調 -光源設計-", 第 61 回応用物理学会春季講演会, 相模原市, 2014 年 3 月 17 日.
- 21. 井上卓也, 中島嘉久, De Zoysa Menaka, 浅野卓, 野田進, "狭帯域熱輻射光源の電圧高 速変調 –実験的実証–", 第 61 回応用物理学会春季講演会, 相模原市, 2014 年 3 月 17 日.
- 22. 沖野剛士,北村恭子,梁永,安田大貴,野田進,"フォトニック結晶レーザの2次元連続 ビーム走査の検討",第61回応用物理学会春季講演会,相模原市,2014年3月17日.
- 23. Menaka De Zoysa, 石崎賢司, 梅田尚実, 田中良典, 藤田奨也, 川本洋輔, 野田進, "フ オトニック結晶を導入した μc-Si 太陽電池の評価", 2014 年第 75 回応用物理学会秋季 学術講演会, 北海道大学札幌キャンパス, 札幌市, 2014 年 9 月 19 日.
- 24. 石崎賢司, Menaka De Zoysa, 梅田尚実, 田中良典, 川本洋輔, 藤田奨也, 野田進, "フォ トニック結晶を有する μc-Si 太陽電池の変換効率向上の検討", 2014 年第 75 回応用物 理学会秋季学術講演会, 北海道大学札幌キャンパス, 札幌市, 2014 年 9 月 19 日.
- 25. 田中良典, 川本洋輔, 石崎賢司, Menaka De Zoysa, 梅田尚実, 藤田奨也, 浅野卓, 野田 進, "フォトニック結晶 μc-Si 太陽電池における形状効果の検討", 2014 年第75 回応用物 理学会秋季学術講演会, 北海道大学札幌キャンパス, 札幌市, 2014 年 9 月 18 日.
- 26. 川本洋輔,田中良典,石崎賢司, Menaka De Zoysa,野田進,"光トラップ効率増大に向 けたフォトニック結晶構造設計 —電極吸収を考慮した設計—",2014 年第 75 回応用物 理学会秋季学術講演会,北海道大学札幌キャンパス,札幌市,2014 年 9 月 18 日.
- 27. 井上卓也, Menaka De Zoysa, 浅野卓, 野田進, "吸収と放射のQ 値整合による狭帯域・ 高放射率熱輻射スペクトルの実現", 2014 年第75 回応用物理学会秋季学術講演会, 北 海道大学札幌キャンパス, 札幌市, 2014 年9月18日.
- 28. 末光真大, Menaka De Zoysa, 橋本康平, 井上卓也, 浅野卓, 野田進, "熱光発電のため

の輻射制御に関する検討", 2014 年第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学 札幌キャンパス, 札幌市, 2014 年 9 月 18 日.

- 29. 橋本康平, Menaka De Zoysa, 末光真大, 井上卓也, 浅野卓, 野田進, "狭帯域近赤外 Si フォトニック結晶熱輻射光源の検討(V)", 2014 年第75 回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学札幌キャンパス, 札幌市, 2014 年 9 月 18 日.
- 30. 李潤植, 北村恭子, 浅野卓, 石崎賢司, 野田進, "Theoretical investigation of local interaction and effects in photonic-crystal laser with embedded metallic nano-structures", 2014年第75回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学札幌キャンパス, 札幌市, 2014年9月18日.
- 31. 梁永, 北川均, ジョン ゲレタ, 石崎賢司, 北村恭子, 野田進, "フォトニック結晶レーザの大面積高出力動作に向けたダブルホール孔形状の設計", 2014 年第75回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学札幌キャンパス, 札幌市, 2014 年 9 月 18 日.
- 32. ジョン ゲレタ, 梁永, 北川均, 野田進, "Coupled-wave analysis for photonic-crystal surface-emitting lasers (XIV) –Effect of external reflection on the TE resonant mode–", 2014 年第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学札幌キャンパス, 札幌市, 2014 年 9 月 18 日.
- 33. 北村恭子,野田進,"径偏光ビームの集光点における誘電体を用いたz偏光電場形成の提案",2014年第75回応用物理学会秋季学術講演会,北海道大学札幌キャンパス,札幌市,2014年9月19日.
- 34. 田中良典, 石崎賢司, De Zoysa Menaka, 川本洋輔, 梅田尚実, 藤田奨也, 元平暉人, 野田進, "フォトニック結晶を有する極薄 µc-Si 太陽電池の光吸収の解析 -Ag 電極プラズモン 吸収の検討-", 2015 年第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学湘南キャンパス, 平塚市, 2015 年 3 月 12 日.
- 35. 石崎賢司, De Zoysa Menaka, 田中良典, 梅田尚実, 川本洋輔, 藤田奨也, 野田進, "フォトニック結晶による極薄 µc-Si 太陽電池の変換効率向上 Ag 電極プラズモン吸収の抑制– ", 2015 年第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学湘南キャンパス, 平塚市, 2015 年 3 月 12 日.
- 36. 川本洋輔,田中良典,石崎賢司, De Zoysa Menaka,梅田尚実,元平暉人,藤田奨也,浅 野卓,野田進, "表面にフォトニック結晶を形成した μc-Si 太陽電池の理論解析", 2015 年第 62 回応用物理学会春季学術講演会,東海大学湘南キャンパス,平塚市, 2015 年 3 月 13 日.
- 37. 梅田尚実, 元平暉人, 石崎賢司, De Zoysa Menaka, 田中良典, 川本洋輔, 藤田奨也, 野田進, "フォトニック結晶 µc-Si 太陽電池の作製—表面層のみへのフォトニック結晶形成効果の検討ー", 2015 年第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学湘南キャンパス, 平塚市, 2015 年 3 月 13 日.
- 38. 井上卓也, De Zoysa Menaka, 浅野卓, 野田進, "低消費電力・狭帯域熱輻射光源の開発", 2015 年第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学湘南キャンパス, 平塚市, 2015 年 3 月 13 日.
- 39. 末光真大,橋本康平,浅野卓,堤達紀, De Zoysa Menaka,野田進,"狭帯域近赤外 Si フ オトニック結晶熱輻射光源の検討(VI)", 2015 年第 62 回応用物理学会春季学術講演会,東 海大学湘南キャンパス,平塚市,2015 年 3 月 13 日.
- 40. 井上卓也, De Zoysa Menaka, 浅野卓, 野田進, "量子井戸とフォトニック結晶に基づく狭帯 域・高速熱輻射光源の開発", 電子情報通信学会 レーザ・量子エレクトロニクス研究会, 大 阪大学 豊中キャンパス, 2015 年 1 月 29 日.
- 41. 田中良典, 川本洋輔, 石崎賢司, De Zoysa Menaka, 野田進, "表面にフォトニック結晶を形成した μc-Si 太陽電池の理論解析 -フォトニック結晶構造の詳細検討と寄生吸収の抑制-", 2015 年第 76 回応用物理学会秋期学術講演会, 名古屋国際会議場, 名古屋市, 2015 年 9 月 14 日.
- 42. 石崎賢司,田中良典, De Zoysa Menaka,元平暉人,野田進, "表面にフォトニック結晶を形

成した µc-Si 太陽電池 -表面層へのフォトニック結晶導入効果の実験評価 -", 2015 年第76回応用物理学会秋期学術講演会,名古屋国際会議場,名古屋市, 2015 年9月14日.

- 43. 川本洋輔,田中良典,石崎賢司, De Zoysa Menaka,野田 進, "表面にフォトニック結晶を 形成した μc-Si 太陽電池の理論解析(II)・感度解析法による構造最適化検討-", 2015 年第 76 回応用物理学会秋期学術講演会,名古屋国際会議場,名古屋市,2015 年 9 月 16 日.
- 44. 元平暉人,石崎賢司,田中良典, De Zoysa Menaka,長谷川創,野田進,"表面にフォトニ ック結晶構造を有するuc-Si太陽電池",2016年第63回応用物理学会春期学術講演会,東 京工業大学,東京都,2016年3月22日.
- 45. 長谷川創, 石崎賢司, 田中良典, 元平暉人, 川本洋輔, De Zoysa Menaka, 藤田奨也, 野田進, "表面にフォトニック結晶を形成した µc-Si 太陽電池の理論解析-非対称形状導入の検討-", 2016 年第 63 回応用物理学会春期学術講演会, 東京工業大学, 東京都, 2016 年 3月 22 日.
- 46. 北村恭子, 安田大貴, 野田進, "フォトニック結晶レーザによる2次元ビーム走査", 電子情報 通信学会レーザ・量子エレクトロニクス(LQE)研究会, 2015年5月21日.
- 47. 前川享平,西本昌哉,石崎賢司,北村恭子,野田進,"円偏光ビームを出射するフォトニック 結晶レーザ構造の検討Ⅱ-斜めエッチング法を用いた新構造の提案--",2015 年第76回応 用物理学会秋期学術講演会,名古屋国際会議場,名古屋市,2015 年9月16日.
- 48. 安田大貴, 北村恭子, 野田進, "2 次元ビームフォトニック結晶レーザの格子・デバイス構造の 検討(II)", 2015 年第76回応用物理学会秋期学術講演会, 名古屋国際会議場, 名古屋市, 2015 年9月16日.
- 49. 西本昌哉,前川享平,石崎賢司,北村恭子,野田進,"MBE 空孔埋め込み法における原子 状水素表面処理に関する検討",2015 年第 76 回応用物理学会秋期学術講演会,名古屋国 際会議場,名古屋市,2015 年 9 月 15 日.
- 50. 吉田昌宏, Menaka De Zoysa, 初田蘭子, 石崎賢司, 田中良典, 北川均, 野田進, "TBA-MOVPE を用いたフォトニック結晶構造の形成(II)", 2015 年第 76 回応用物理学会秋期 学術講演会, 名古屋国際会議場, 名古屋市 2015 年 9 月 15 日.
- 51. Menaka De Zoysa, 吉田昌宏, 石崎賢司, 初田蘭子, 田中良典, 北川均, 野田進, "TBA-MOVPE を用いたフォトニック結晶レーザの作製", 2015 年第 76 回応用物理学会秋期学術 講演会, 名古屋国際会議場, 名古屋市, 2015 年 9 月 16 日.
- 52. 井上卓也, De Zoysa Menaka, 浅野卓, 野田進, "波長切替可能な狭帯域熱輻射光源", 2015 年第 76 回応用物理学会秋期学術講演会, 名古屋国際会議場, 名古屋市, 2015 年 9 月 15 日.
- 53. 北村恭子, 安田大貴, 野田進, "フォトニック結晶レーザの機能性付加に向けた表面加工の 検討", 2015 年第 76 回応用物理学会秋期学術講演会, 名古屋国際会議場, 名古屋市, 2015 年 9 月 16 日.
- 54. 北川均,田中良典, Menaka De Zoysa,中川翔太, John Gelleta,野田進,"フォトニック結 晶レーザにおける温度分布の影響の理論解析", 2015 年第 76 回応用物理学会秋期学術講 演会,名古屋国際会議場,名古屋市, 2015 年 9 月 16 日.
- 55. 渡辺明佳,廣瀬和義,杉山貴浩,梁永,北川均,野田進,"ダブルホール格子点をもつフォトニック結晶レーザの作製(II)",2015 年第76回応用物理学会秋期学術講演会,名古屋国際会議場,名古屋市,2015 年9月16日.
- 56. 小林大河, Menaka De Zoysa, 吉田昌宏, 河崎正人, 初田蘭子, 石崎賢司, 田中良典, 北 川均, 野田進, "フォトニック結晶レーザにおける面内相互引き込み現象に関する検討", 2016 年第 63 回応用物理学会春期学術講演会, 東京工業大学, 東京都, 2016 年 3 月 21 日.
- 57. 田中良典, 北川均, 中川翔太, 野田進, "フォトニック結晶レーザの大面積化のための格子点 構造の設計", 2016 年第 63 回応用物理学会春期学術講演会, 東京工業大学, 東京都, 2016 年 3 月 21 日.
- 58. 安田大貴, 西後淳貴, 北村恭子, 野田進, "2 次元ビーム走査可能なフォトニック結晶レーザ の検討 (III)", 2016 年第 63 回応用物理学会春期学術講演会, 東京工業大学, 東京都,

2016年3月21日.

- 59. 吉田昌宏,河崎正人, Menaka De Zoysa,初田蘭子,石崎賢司,田中良典,北川均,野田進, "TBA-MOVPE を用いたフォトニック結晶構造の形成(III)", 2016 年第 63 回応用物理学 会春期学術講演会,東京工業大学,東京都, 2016 年 3 月 21 日.
- 60. 末光真大, 堤達紀, 浅野卓, De Zoysa Menaka, 野田進, "MgO 基板上の狭帯域近赤外 Si フォトニック結晶熱輻射光源の開発", 2016 年第 63 回応用物理学会春期学術講演会, 2016 年 3 月 21 日.
- 61. 渡邉明佳, 廣瀬和義, 杉山貴浩, 北川均, 野田進, "三角形ダブルホール格子点をもつフォ トニック結晶レーザの作製(Ⅲ)", 2016 年第 63 回応用物理学会春期学術講演会, 2016 年 3 月 21 日.
- 62. 井上卓也, 浅野卓, 野田 進, "動的熱輻射制御に伴う光源温度及び輻射パワーの過渡応答 特性", 2016 年第 63 回応用物理学会春期学術講演会, 2016 年 3 月 21 日.
- 63. キアンキ,井上卓也, De Zoysa Menaka, 浅野卓,野田進, "2 波長切替型中赤外熱輻射光 源の設計", 2016 年第 63 回応用物理学会春期学術講演会, 2016 年 3 月 21 日.
- 64. Kang Daniel Dongyeon, 井上卓也, 浅野卓, 野田進, "GaN/AlGaN 多重量子井戸とフォ トニック結晶に基づく中波長赤外熱輻射光源の開発", 2016 年第 63 回応用物理学会春期学 術講演会, 2016 年 3 月 21 日.
- 65. J. Gelleta, 北川均, 野田進, "Coupled-Wave Analysis for Photonic-Crystal Surface-Emitting Lasers - Effect of External Reflection on Photonic Crystals with Asymmetric Air Holes", 2015 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2015 年 9 月 9 日.
- 66. 石崎賢司, 元平暉人, 田中良典, 長谷川創, 野田進, "表面にフォトニック結晶構造を有する μc-Si 太陽電池 –変換効率向上に向けた膜構造・フォトニック結晶構造の検討ー", 第77回 応用物理学会秋季学術講演会, 15p-B4-9, 朱鷺メッセ, 新潟市, 2016 年 9 月 15 日.
- 67. 田中良典, 中川翔太, 野田進, "フォトニック結晶レーザの面内回折効果と閾値利得差についての考察", 第77回応用物理学会秋季学術講演会, 15p-B4-20, 朱鷺メッセ, 新潟市, 2016年9月15日.
- 68. 中川翔太,田中良典,北川均,野田進,"フォトニック結晶レーザの大面積化のための格子点構造の設計(II)",第77回応用物理学会秋季学術講演会,15p-B4-15,朱鷺メッセ,新潟市,2016年9月15日.
- 69. 北澤美紀,北村恭子,野田進,"フォトニック結晶レーザの表面加工による光渦ビームの生成 とその特性評価",第77回応用物理学会秋季学術講演会,15p-B4-18,朱鷺メッセ,新潟市, 2016年9月15日.
- 70. 吉田昌宏, De Zoysa Menaka, 河崎正人, 初田蘭子, 田中良典, 野田進, "円形ダブルホー ルフォトニック結晶レーザの作製", 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 15p-B4-16, 朱 鷺メッセ, 新潟市, 2016 年 9 月 15 日.
- 71. 西田比呂, 郭晓杨, 時田茂樹, 石崎賢司, 野田進, 廣瀬和義, 杉山貴浩, 渡邊明佳, 河仲 準二, "PCSEL の短パルス発振による高出力化", 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 13p-B3-2, 朱鷺メッセ, 新潟市, 2016 年 9 月 13 日.
- 72. 井上卓也, 浅野卓, 野田進, "近接場熱輻射伝達による狭帯域熱輻射増強", 第 77 回応用 物理学会秋季学術講演会, 15a-B4-11, 朱鷺メッセ, 新潟市, 2016 年 9 月 15 日.
- 73. Kang Daniel Dongyeon, 井上卓也, 浅野卓, 野田進, "GaN/AlGaN 量子井戸・フォトニッ ク結晶熱輻射光源の開発(2) —低屈折率基板を利用した大面積化の検討—", 第 77 回応用 物理学会秋季学術講演会, 15p-B4-14, 朱鷺メッセ, 新潟市, 2016 年 9 月 15 日.
- 74. 末光真大, 堤達紀, 浅野卓, De Zoysa Menaka, 野田進, "Si フォトニック結晶熱輻射光源 を用いた熱光発電の性能検討", 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 15p-B4-11, 朱鷺 メッセ, 新潟市, 2016 年 9 月 15 日.
- 75. 元平暉人, 石崎賢司, 田中良典, De Zoysa Menaka, 長谷川創, 野田進, "表面にフォトニック結晶構造を有する µc-Si 太陽電池の光電変換効率の向上", 2017 年第 64 回応用物理 学会春期学術講演会, パシフィコ横浜, 神奈川県, 2017 年 3 月 16 日.

- 76. 石崎賢司,田昇愚,長谷川創,田中良典, De Zoysa Menaka,野田進,"フォトニック結晶を 導入した薄膜単結晶シリコン太陽電池の検討(IV)", 2017 年第 64 回応用物理学会春期学 術講演会,パシフィコ横浜,神奈川県,2017 年 3 月 16 日.
- 77. 吉田昌宏, De Zoysa Menaka, 福原真, 河崎正人, 初田蘭子, 田中良典, 石崎賢司, 野田 進, "楕円ダブルホールフォトニック結晶レーザの特性評価", 2017 年第 64 回応用物理学会 春期学術講演会, パシフィコ横浜, 神奈川県, 2017 年 3 月 15 日.
- 78. 福原真, "De Zoysa Menaka, 吉田昌宏, 河崎正人, 初田蘭子, 石崎賢司, 田中良典, 野田進, 楕円ダブルホールフォトニック結晶レーザの室温連続動作", 2017 年第 64 回応用物理学会春期学術講演会, パシフィコ横浜, 神奈川県, 2017 年 3 月 15 日.
- 79. 中川翔太,田中良典,北川均,野田進,"フォトニック結晶レーザの大面積化のための格子点 構造の設計(III) ", 2017 年第 64 回応用物理学会春期学術講演会,パシフィコ横浜,神奈 川県, 2017 年 3 月 15 日.
- 80. 田中良典, De Zoysa Menaka, 野田進, "三角格子フォトニック結晶レーザの高出力化のための格子点設計", 2017 年第 64 回応用物理学会春期学術講演会, パシフィコ横浜, 神奈川県, 2017 年 3 月 15 日.
- 81. 井上卓也, 森田遼平, 田中良典, 野田進, "3 次元結合波理論によるフォトニック結晶レーザの過渡応答解析", 2017 年第64回応用物理学会春期学術講演会, パシフィコ横浜, 神奈川県, 2017 年3月15日.
- 82. 小泉朋朗, 江本渓, 園田純一, De Zoysa Menaka, 田中良典, 野田進, "GaN 系フォトニッ ク結晶レーザ実現のための MOVPE 空孔形成法の検討", 2017 年第 64 回応用物理学会春 期学術講演会, パシフィコ横浜, 神奈川県, 2017 年 3 月 15 日.
- 83. 米雅子, 北村恭子, 野田進, "変調フォトニック結晶レーザによるベクトルビームの発生", 2017 年第 64 回応用物理学会春期学術講演会, パシフィコ横浜, 神奈川県, 2017 年 3 月 15 日.
- 84. 浅野卓, 堤達紀, 末光真大, De Zoysa Menaka, 野田進, "Si ロッド型熱輻射光源への透明 酸化物コーティングによる耐熱性向上(II)", 2017 年第 64 回応用物理学会春期学術講演会, パシフィコ横浜, 神奈川県, 2017 年 3 月 14 日.
- 85. 井上卓也,渡辺晃平,浅野卓,野田進,"中間透明基板を利用した高効率近接場熱輻射伝 達",2017 年第 64 回応用物理学会春期学術講演会,パシフィコ横浜,神奈川県,2017 年 3 月 14 日.
- ④ ポスター発表(国内会議 35 件、国際会議 5 件)
  1. 発表者(所属)、タイトル、学会名、場所、月日

(国際会議)

- 1. 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", 10th International Symposium on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures (PECS-X), Eldorado Hotel & Spa, Santa Fe, New Mexco, USA, Jun. 3-8 (2012).
- Y. Kawamoto, Y. Tanaka, K. Ishizaki, M. De Zoysa and S. Noda, "Sensitivity analysis design of photonic crystals for optical absorption enhancement of thin film silicon solar cells", The 6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-6), Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan, Nov. 25 (2014).
- 3. M. De Zoysa, K. Ishizaki, Y. Tanaka, T. Umeda, Y. Kawamoto, S. Fujita and S. Noda, "Photonic Crystal Microcrystalline Silicon Solar Cells", Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan, Nov. 25 (2014).
- 4. R. Konoike, H. Nakagawa, T. Asano, Y. Tanaka, and S. Noda, "Experimental Study of On-Demand Light Transfer among Distant Photonic Crystal Nanocavities", The 4th International Symposium on Photonics and Electronics Convergence - Advanced

Nanophotonics and Silicon Device Systems - (ISPEC 2014) Tokyo, Japan, Nov. 18 (2014).

 K. Gondaira, K. Ishizaki, K. Kitano, T. Asano, S. Noda, "Analysis of coupling between parallel horizontal waveguides in three-dimensional photonic crystals", The 4th International Symposium on Photonics and Electronics Convergence - Advanced Nanophotonics and Silicon Device Systems - (ISPEC 2014), Tokyo, Japan, Nov. 18 (2014).

(国内会議)

- A. Oskooi, P. A. Favuzzi, 田中良典, 重田博昭, 野田進, "Photonic Crystal Effect for Enhancement of Optical Absorption in Photovoltaic Devices ~Partially-Disordered Photonic Crystal Structures for Photovoltaic Applications~", 2012 年秋季 第 73 回応 用物理学会学術講演会, 13a-PA5-9, 愛媛大学·松山大学, 松山市, 2012 年 9 月 11-14 日.
- 岩橋清太,野田進,"面心長方格子フォトニック結晶レーザの発振特性(V)-非Γ点に おけるバンド端発振とビーム偏向制御-",2012 年春季 第59回応用物理学関係連合講 演会,15a-GP-1,早稲田大学,東京都,2012 年3月15日.
- 3. Y. Liang, K. Ishizaki, C. Peng, K. Kitamura, Y. Tanaka, T. Okino, M. Nishimoto, and S. Noda, Coupled-wave analysis for photonic-crystal surface-emitting lasers IX Finite-size effects on modal properties–, 2012 年秋季 第73 回応用物理学会学術講演 会, 13a-PA5-10, 愛媛大学・松山大学, 松山市, 2012 年 9 月 11-14 日.
- 4. 田中良典, 川本洋輔, Ardavan Oskooi, 野田進, "フォトニック結晶を有する光起電力素 子の誘電率分布のフーリエ空間解析 ー構造変調効果の検討—"2013 年 第 60 回応用物 理学会春季学術講演会, 29-PA7-12, 神奈川工科大学, 厚木市, 2013 年 3 月 27-30 日.
- 5. 北村恭子, 野田進, "径偏光ビームの集光点における電場増強効果の検討", 2013 年 第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 29-PA7-19, 神奈川工科大学, 厚木市, 2013 年 3 月 27-30 日.
- 6. 梁永,石崎賢司,沖野剛士,北村恭子,田中良典,西本昌哉,野田進, "Coupled-wave analysis for photonic-crystal surface-emitting lasers (X) -Above-threshold analysis", 2013 年 第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 29-PA7-15, 神奈川工科大学,厚木市, 2013 年 3 月 27-30 日.
- 7. 野田進,田中良典,石崎賢司, Menaka De Zoysa,川本洋輔,梅田尚実,重田博昭,"フォトニック結晶による光マネージメント技術の開発 -薄膜太陽電池の光トラップ効率向上を目指して-",日本学術振興会第175委員会 第10回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム,金沢市,2013年5月23日.
- 8. Y. Kawamoto, Y. Tanaka, and S. Noda, "Structural design of photonic crystals for enhancing optical absorption of solar cells", 第 33 回電子材料シンポジウム, 守山市, 2013 年 7 月 10 日.
- 9. 川本洋輔,田中良典,野田進,"光トラップ効率増大に向けたフォトニック結晶構造の検討 一感度解析法を用いたフォトニック超格子構造設計の深化---",第74回応用物理学 会秋季講演会,京田辺市,2013年9月16日.
- 10. 川本洋輔,田中良典,石崎賢司, De Zoysa Menaka,野田進,"光トラップ増大に向けた フォトニック結晶構造設計 —感度解析法の利用(2)—",第61回応用物理学会春季講 演会,相模原市,2014年3月17日.
- 11. 橋本康平, Menaka De Zoysa, 井上卓也, 浅野卓, 野田進, "狭帯域近赤外 Si フォトニック結晶熱輻射光源の検討(III)", 第 74 回応用物理学会秋季講演会, 京田辺市, 2013 年 9月 16 日.
- 12. 橋本康平, De Zoysa Menaka, 末光真大, 井上卓也, 浅野卓, 野田進, "狭帯域近赤外 Si フォトニック結晶熱輻射光源の検討(IV)", 第61回応用物理学会春季講演会, 相模原市, 2014年3月17日.
- 13. 北村恭子, ジョ テイテイ, 野田進, "径偏光ビームの集光点における位相操作の検討",

第61回応用物理学会春季講演会,相模原市,2014年3月17日.

- 14. 梅田尚実, 石崎賢司, Menaka De Zoysa, 田中良典, 川本洋輔, 藤田奨也, 野田進, "フォ トニック結晶を導入した µc-Si 太陽電池の電子線誘起電流法による評価", 2014 年第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学札幌キャンパス, 札幌市, 2014 年 9 月 17 日.
- 15. 李潤植,北村恭子,浅野卓,石崎賢司,野田進,"フォトニック結晶バンド端共振器とナノ金属共振器の相互作用",2015 年第 62 回応用物理学会春季学術講演会,東海大学湘南キャンパス,平塚市,2015 年 3 月 11 日.
- 16. 堤達紀, 末光真大, 橋本康平, 浅野卓, De Zoysa Menaka, 野田進, "熱光発電のための 赤外透明基板の熱輻射スペクトルの評価", 2015 年第 62 回応用物理学会春季学術講演 会, 東海大学湘南キャンパス, 平塚市, 2015 年 3 月 11 日.
- 17. 井上卓也, De Zoysa Menaka, 浅野卓, 野田進, "フォトニック結晶に基づく狭帯域・高 速熱輻射光源の開発", 第4回先端フォトニクスシンポジウム, 日本学術会議講堂, 2014 年8月8日.
- 18. 藤田奨也,石崎賢司,田中良典, De Zoysa Menaka,川本洋輔,元平暉人,野田進,"超薄 膜単結晶シリコン太陽電池の作製法の検討",2015 年第 76 回応用物理学会秋期学術講 演会,名古屋国際会議場,名古屋市,2015 年 9 月 15 日.
- 19. 藤田奨也,石崎賢司,田中良典,De Zoysa Menaka,川本洋輔,元平暉人,長谷川創,野 田進,"フォトニック結晶を導入した超薄膜単結晶シリコン太陽電池の検討",2016年第 63 回応用物理学会春期学術講演会,東京工業大学,東京都,2016年3月20日.
- 20. 中川翔太, 北川均, 田中良典, 野田進, "フォトニック結晶レーザ特性に与える格子点の 形状・材質の影響の考察", 2015 年第 76 回応用物理学会秋期学術講演会, 名古屋国際会 議場, 名古屋市 2015 年 9 月 15 日.
- 21. J. Gelleta, 北川均, 野田進, "Coupled-wave analysis for photonic-crystal surfaceemitting lasers II Optical loss in photonic crystals with external reflection –", 2016 年第 63 回応用物理学会春期学術講演会, 東京工業大学, 2016 年 3 月 20 日.
- 22. 中川翔太, 北川均, 田中良典, 野田進, "フォトニック結晶レーザ特性に与える格子点の 形状・材質の影響の考察Ⅱ", 2016 年第 63 回応用物理学会春期学術講演会, 東京工業大 学, 東京都, 2016 年 3 月 20 日.
- 23. 前川享平, 西本昌哉, 安田大貴, 石崎賢司, 北村恭子, 野田進, "傾斜した空孔を有する フォトニック結晶構造の作製—円偏光ビームの出射に向けて—", 2016 年第 63 回応用物 理学会春期学術講演会, 東京工業大学, 東京都, 2016 年 3 月 20 日.
- 24. 堤達紀, 末光真大, 浅野卓, De Zoysa Menaka, 野田進, "Si ロッド型熱輻射光源への透明酸化物コーティングの光学的影響", 2016 年第63 回応用物理学会春期学術講演会, 東京工業大学, 東京都, 2016 年 3 月 20 日.
- 25. M. Yoshida, M. De Zoysa, K. Ishizaki, R. Hatsuda and S. Noda, "Photonic-crystal structure grown by tertiary-butyl arsine-based MOVPE for photonic-crystal lasers", 第 35 回電子材料シンポジウム, We2-14, 守山市, 2013 年 7 月 6 日.
- 26. 田昇愚, 石崎賢司, 田中良典, 野田進, "フォトニック結晶を導入した超薄膜単結晶シリ コン太陽電池の検討 (III)", 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 14p-P14-2, 朱鷺メ ッセ, 新潟市, 2016 年 9 月 14 日.
- 27. 渡邉明佳,廣瀬和義,杉山貴浩,北川均,野田進,"三角形ダブルホール格子点をもつフ オトニック結晶レーザの作製(IV)",第77回応用物理学会秋季学術講演会,朱鷺メッ セ,新潟市,2016年9月14日.
- 28. 小林大河, De Zoysa Menaka, 吉田昌宏, 河崎正人, 北川均, 初田蘭子, 石崎賢司, 田中 良典, 野田進, "フォトニック結晶レーザにおける面内引き込み現象に関する検討(Ⅱ)", 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 朱鷺メッセ, 新潟市, 2016 年 9 月 14 日.
- 29. 堤達紀, 末光真大, 浅野卓, De Zoysa Menaka, 野田進, "Si ロッド型熱輻射光源への透明酸化物コーティングによる耐熱性向上", 第77回応用物理学会秋季学術講演会, 14p-

P14-8, 朱鷺メッセ, 新潟市, 2016年9月14日.

- 30. 森田遼平,井上卓也,北川均,野田進,"フォトニック結晶レーザの高出力・短パルス動作の解析",2017 年第 64 回応用物理学会春期学術講演会,パシフィコ横浜,神奈川県,2017 年 3 月 14 日.
- 31. 小林大河, Menaka De Zoysa, 吉田昌宏, 北川均, 河崎正人, 初田蘭子, 田中良典, 石崎 賢司, 野田進, "フォトニック結晶レーザにおける面内引き込み現象に関する検討(III)", 2017 年第 64 回応用物理学会春期学術講演会, パシフィコ横浜, 神奈川県, 2017 年 3 月 14 日.
- 32. 渡邉明佳, 廣瀬和義, 杉山貴浩, 北川均, メーナカ ゾイサ, 田中良典, 野田進, "三角形 ダブルホール格子点をもつフォトニック結晶レーザの作製(V)", 2017 年第 64 回応用 物理学会春期学術講演会, パシフィコ横浜, 神奈川県, 2017 年 3 月 14 日.
- 33. 末光真大, 堤達紀, 浅野卓, De Zoysa Menaka, 野田進, "ジュール加熱型低熱損失 Si ロ ッド型フォトニック結晶熱輻射光源の開発", 2017 年第 64 回応用物理学会春期学術講 演会, パシフィコ横浜, 神奈川県, 2017 年 3 月 14 日.
- 34. Kang Daniel Dongyeon, 井上卓也, 浅野卓, 野田進, "GaN/AlGaN 電圧変調型狭帯域 熱輻射光源の設計", 2017 年第 64 回応用物理学会春期学術講演会, パシフィコ横浜, 神 奈川県, 2017 年 3 月 14 日.
- 35. 渡辺晃平, 井上卓也, 浅野卓, 野田進, "近接場熱輻射伝達の実証のための熱輻射光源支 持構造の設計", 2017 年第64回応用物理学会春期学術講演会, パシフィコ横浜, 神奈川 県, 2017 年3月14日.

## (4)知財出願

①国内出願(16件)

- 1. "太陽電池、フォトニック結晶基板、太陽電池パネルおよび太陽電池を備えた装置",発明者:野田進,富士田誠之,田中良典,重田博昭,宮西晋太郎,小川裕之,川森秀次,出願人:京都大学・シャープ株式会社,2011/11/8,特願 2011-244869.
- "太陽電池、太陽電池パネル、太陽電池を備えた装置、及び、太陽電池パネルを備えた装置",発明者:野田進,富士田誠之,田中良典,重田博昭,菅勝行,小川裕之,川森秀次,出願人:京都大学・シャープ株式会社,2011/11/21,特願 2011-254338.
- "2 次元フォトニック結晶",発明者:野田進,田中良典,オスクイ アルダバン,ファブ ッチ ペドロ,重田博昭,宮西晋太郎,小川裕之,川森秀次,出願人:京都大学・シャー プ株式会社,特願 2012-019111, 2012/1/31.
- "太陽電池",発明者:野田進,田中良典,オスクイ アルダバン,ファブッチ ペドロ, 重田博昭,宮西晋太郎,小川裕之,川森秀次,出願人:京都大学・シャープ株式会社,特 願 2012-019112, 2012/1/31.
- "熱を光に変換する熱輻射光源",発明者:野田進、芝原達哉、デ ゾイサ メーナカ、 浅野卓、北野圭輔、鈴木克佳、井上卓也、石崎賢司,出願人:京都大学,2013/3/8,特願 2013-11322462.
- "光電変換素子",発明者:野田進,オスクイ アルダバン,田中良典,出願人:科学技術 振興機構,2013/4/17,特願 2013-086902.
- "光電変換素子",発明者:野田進,田中良典,川本洋輔,重田博昭,出願人:京都大学・ シャープ株式会社,2013/8/2,特願 2013-161806.
- 8. "光電変換素子", 発明者: 野田進, 田中良典, 石崎賢司, デ ゾイサ メーナカ, 重田博 昭, 出願人: 京都大学・シャープ株式会社, 2013/8/20, 特願 2013-170654.
- 9. "アブソーバ・エミッタ", 発明者: 野田進, 浅野卓, 北川均, 出願人: 京都大学, 2013/4/23, 特願 2013-090436.
- 10. "熱光発電装置",発明者: 野田進, 浅野卓, 北川均, 出願人: 京都大学, 2013/4/23, 特願 2013-090437.
- 11. "熱輻射光源、および該光源に用いるフォトニック結晶"発明者:野田進,井上卓也,浅

野卓, デ ゾイサ メーナカ, 出願人: 京都大学, 2014/2/28, 特願 2014-039298.

- 12. "光電変換素子および光電変換システム", 発明者: 野田進, 重田博昭, 出願人: 京都大 学・シャープ株式会社, 2014/6/26,特願 2014-131791.
- 13. "熱輻射光源", 発明者: 野田進, 井上卓也, カン ドンヨン, 浅野卓, 出願人: 京都大学, 2016/2/26, 特願 2016-035999.
- 14. "熱輻射光源", 発明者: 野田進, 井上卓也, 紀安琪, 浅野卓, 出願人: 京都大学, 2016/2/29, 特願 2016-037217.
- 15. "熱輻射光源", 発明者: 野田進、浅野卓、デ ゾイサ メーナカ, 末光真大、齋藤禎, 出願 人: 京都大学, 2016/9/9, 特願 2016-177128.
- 16. "熱輻射光発電装置", 発明者: 野田進, 井上卓也, 渡辺晃平, 浅野卓, 出願人: 京都大学, 2017/2/27, 特願 2017-034724.

②海外出願(8件)

- "光センサ素子内蔵の液晶表示装置",発明者:野田進,冨士田誠之,田中良典,重田博昭,小川裕之,津田裕介,出願人:京都大学・シャープ株式会社,2011/10/17, PCT/JP2011/073866.
- 2. "太陽電池、太陽電池パネルおよび太陽電池を備えた装置",発明者:野田進,冨士田誠之, 田中良典,重田博昭,小川裕之,津田裕介,小川裕之,出願人:京都大学・シャープ株式 会社,2012/4/9, PCT/JP2012/059704.
- 3. "太陽電池、フォトニック結晶基板、太陽電池パネルおよび太陽電池を備えた装置",発明者:野田進,冨士田誠之,田中良典,重田博昭,宮西晋太郎,小川裕之,川森秀次,出願人:京都大学・シャープ株式会社,2012/11/8,PCT/JP2012/79012.
- 4. "太陽電池、太陽電池パネル、太陽電池を備えた装置、及び、太陽電池パネルを備えた装置"発明者:野田進,富士田誠之,田中良典,重田博昭,菅勝行,小川裕之,川森秀次,出 願人:京都大学・シャープ株式会社,2012/11/15, PCT/JP2012/79713.
- 5. "熱輻射光源", 発明者: 野田進, 芝原達哉, デ ゾイサ メーナカ, 浅野卓, 北野圭輔, 鈴木克佳, 井上卓也, 石崎賢司, 出願人: 京都大学, 2014/2/28, PCT/JP2014/055056,.
- 6. "光電変換素子",発明者:野田進,オスクイ アルダバン,田中良典,出願人:科学技術 振興機構,2014/4/15, PCT/JP2014/060731.
- 7. "熱輻射光源、および該光源に用いるフォトニック結晶",発明者:野田進,井上卓也,浅 野卓,デゾイサメーナカ,出願人:京都大学,2015/2/28, PCT/JP2015/055161.
- 8. "熱輻射光源", 発明者: 野田進, 井上卓也, 紀安琪, 浅野卓, 出願人: 京都大学, 2017/2/13, PCT/JP2017/005160.

③その他の知的財産権なし

#### (5)受賞·報道等

①受賞

- 1. 紫綬褒章, 野田 進, 2014 年 11 月 3 日
- 2. 第15回応用物理学会業績賞(研究業績),野田進,2015年3月11日
- 3. Best Paper Awards of CLEO-PR, 井上卓也, 2013 年 7 月 3 日
- 4. 第4回日本学術振興会 育志賞, 梁 永, 2014年2月24日
- 5. 第 35 回(2013 年秋季)応用物理学会講演奨励賞, 西本昌哉, 2014 年 3 月 17 日
- 6. 第 33 回電子材料シンポジウム EMS 賞, 西本昌哉, 2014 年 7 月 11 日
- 7. 第36回(2014年春季)応用物理学会講演奨励賞,井上卓也,2014年9月17日
- 8. 2014 年度電子情報通信学会 LQE 奨励賞, 井上卓也, 2015 年 3 月 16 日
- 9. Outstanding Student Poster Presentation Awards of Asian CORE student Meeting, 紀安琪, 2015 年 12 月 9 日

- 10. 第6回日本学術振興会 育志賞, 井上卓也, 2016年3月2日
- 11. The Green Photonics Award in Renewable Energy Generation: Fusion and Photovoltaics of SPIE Photonics West 2016,末光真大, 2016年2月13-18日
- 12. 第1回応用物理学会フォトニクス奨励賞, 井上卓也, 2017年3月15日

②マスコミ(新聞・TV等)報道

- 1. 産経新聞, "光の波長 特殊板で変換 太陽光発電効率最大4倍アップ", 2012年7月9日
- 2. 朝日新聞, "太陽光発電パワー2倍に 京大、特殊フィルター開発", 2012年7月9日
- 京都新聞, "太陽電池 発電効率2倍 加熱すると特定波長の光放射 京大グループ", 2012 年7月9日
- 4. 中日新聞, "太陽光発電効率アップ 京大グループ新素材開発 未使用エネルギー利用可 能に転換", 2012 年 7 月 10 日
- 5. 日本経済新聞, "太陽電池変換効率 京大、40%超に改善", 2012年7月10日
- 6. 日刊工業新聞, "加熱物質の電子発光現象光波長を狭帯域化", 2012年7月11日
- 7. 日本経済新聞, "太陽光を使い尽くせ 発電効率2倍 人工光合成も", 2012年9月9日
- 8. 日経産業新聞、"光を自在に操る結晶 発電効率向上の切り札"、2013 年 7 月 30 日
- 9. 日経産業新聞, "光を自在に操る結晶 LED や太陽電池応用", 2013 年 7 月 31 日
- 10. 静岡新聞,中国新聞 他 3 紙, "科学する人 光を制御する結晶作製 野田進さん", 2014 年 6 月 6 日より 1 週間毎に計 5 回連載
- 11. 日刊工業新聞, "物体の光放射 高速制御 赤外線光源などに応用", 2014 年 7 月 28 日
- 12. 日本経済新聞, "赤外線センサー 小型で安く作製", 2014 年 7 月 29 日
- 13. 京都新聞, "消費電力が従来の 100 分の 1 赤外線センサー光源を開発", 2014 年 8 月 23 日
- 14. 日経産業新聞, "大学解剖 京大 スター研究者 多分野に", 2014年9月24日
- 15. 京都新聞, "探究人 京大工学研究科野田進教授 フォトニック結晶の第一人者", 2014 年 9月 27日
- 16. 日本経済新聞、"太陽電池製造コストを半減 京大や阪大"、2014年11月5日
- 17. 毎日新聞, "秋の褒章 734人 21 団体", 2014年 11月 2日
- 18. 京都新聞, "受章の喜び 思い新た 紫綬褒章", 2014年11月2日
- 19. 朝日新聞, "光操る「フォトニック結晶」 紫綬褒章 野田進さん", 2014年11月2日
- 20. 科学新聞, "秋の褒章 学術分野5氏に紫綬受章", 2014年11月7日
- 21. 日本経済新聞, "私の新人時代 京都大学教授 野田進氏", 2015年11月10日
- 22. 科学新聞, "第6回日本学術振興会育志賞 優秀な大学院博士課程学生18人に"2016年2月5日
- 23. 京都新聞, "太陽電池吸収 効率的 素材加熱の光", 2016年12月24日
- 24. 日本経済新聞, "効率的に熱で発電 シリコン製の素子", 2016年12月26日

③その他

第61回応用物理学会春季講演会にて以下の2件が注目論文として紹介:
 (a)石崎賢司,野田進,他,"フォトニック結晶構造を有する微結晶シリコン太陽電池の基礎検討"

(b)井上卓也, 野田進他, "狭帯域熱輻射光源の電圧高速変調 - 実験的実証--"

- Nature Photonics 2014 年 6 月号の、第 61 回応用物理学会春季講演会報告記事(View from JSAP spring meeting 2014)にて、石崎賢司,野田進他:"フォトニック結晶構造を 有する微結晶シリコン太陽電池の基礎検討"が取り上げられた。
- 3. IEEE Photonics Journal に掲載された、Y. Kawamoto, et al., "Structural optimization of photonic crystals for enhancing optical absorption of thin film silicon solar cell structures" (vol. 6, no. 1, pp. 4700110, (2014))が、<u>"Hot" Papers として選出</u>され、2014

**IEEE** Photonics Conference にて開催された、'Hot Papers and Meet the Editors' セッションにて招待講演を行った。

- 4. Nature Materials 誌に掲載された、T. Inoue, et al., "Realization of dynamic thermal emission control" (vol. 13, no. 10, pp. 928-931 (2014))が、同誌の News and Views に "Thermal emission: Ultrafast dynamic control"として紹介された。
- 5. Applied Physics Letters 誌に掲載された、T. Inoue, et al., "On-chip integration and high-speed switching of multi-wavelength narrowband thermal emitters" (vol. 108, pp. 091101, (2016)) が、Nature Photonics 誌の News and Views に"Mid-infrared optics: Photonic crystal thermal emitters"として紹介された。

## (6)成果展開事例

## ①実用化に向けての展開

- 本研究の基になっているバンド端共振モードを用いたレーザに関する研究が、以下の2 事業に採択され、現在実施中である。
- ・JST「ACCEL」 採択課題名「フォトニック結晶レーザの高輝度・高出力化」(H25~29)
- ・NEDO 採択課題名「フォトニック結晶レーザーの短パルス化・短波長化」(H28~32)

## ②社会還元的な展開活動

- 本研究成果をインターネット(URL:http://www.qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp/)で公開し、一般に情報提供している。
- 「物体からの熱輻射スペクトルの大幅な狭帯域化に成功」
- 「物体からの熱輻射を超高速に制御することに世界で初めて成功」
- •「「熱エネルギー」を太陽電池が効率よく発電できる波長の「光」に変換することに初め て成功」
## §5 研究期間中の活動

年月日	名称	場所	参加人数	概要
2011年11月25日   2012年2月20日   2012年12月11日	光・電子コロキ アム	京都大学桂 キャンパス	80 人程度	関連研究の著名な研究者 のセミナーを行い、議論を 行なった
2012年3月9日   2013年3月11日   2015年3月9日   2016年3月11日   2017年3月10日	光・電子国際シ ンポジウム	京都大学桂 キャンパス	100 人 程度	フォトニック結晶の太陽電 池応用を含む、最新光・電 子技術に関するシンポジウ ムを行なった
2013年11月22-23 日	Swiss-Kyoto Symposium	チューリッ ヒ工科大学	30 人	京都大学とチューリッヒ 工科大学との合同シンポ ジウムにて、ナノエレク トロニクス・ナノフォト ニクスのセッションを主 催した
2014年1月9-10日	Bristol- Kyoto Symposium	京都大学桂 キャンパス	30 人	京都大学とブリストル大 学との合同シンポジウム にて、ナノフォトニクス のセッションを主催した
2015年3月21日	光・電子理工学 シンポジウム	京都ブライ トンホテル	150 人 程度	最新光・電子技術に関する シンポジウムを行なった

## 5.1 主なワークショップ、シンポジウム、アウトリーチ等の活動

## §6 最後に

5年半の研究期間を通して、フォトニック結晶による太陽電池の光マネジメント技術につ いて、理論面のみならず、実デバイスの作製・評価を通じた実験的な検証を行ってきた。そ の結果として、~500 nm 程度の極薄 µc-Si 層の太陽電池にて、実験的に世界最高の短絡電 流密度および認証変換効率(アクティブエリア評価にて 9%以上)を達成した。また、数 µm 厚さの µc-Si 太陽電池において、アクテ<u>ィブエリア評価にて、n/i/p の全層が Si からなる微</u> 結晶 Si 太陽電池において世界最大の~11%の変換効率を実験的に達成するとともに、フォ トニック結晶形状・成膜条件のさらなる最適化、さらには産総研の齋氏のグループとの連携 による高品質微結晶 Siを用いることで、変換効率~12%の実現が期待できることを示した。 また、開放電圧・FFの根本的な改善の観点、また単結晶 Si 太陽電池における世界の動向を 先取りする形で、20(~50) μm 程度という単結晶 Si としては極めて薄い太陽電池への展開 を図り、厚さ 20 μm の太陽電池構造において、フォトニック結晶の導入により短絡電流密 度が 38 mA/cm<sup>2</sup>を超えうることを理論解析により示すとともに、表面再結合を抑制し、高 い開放電圧・FF を実現するためのパッシベーション、アニールの技術を確立し、20 µm 以 下の膜厚の単結晶 Si 太陽電池において世界最高の 36.1 mA/cm<sup>2</sup>の短絡電流密度を実現する ことに成功した。上記のうち、数 µm 級の厚さの µc-Si 太陽電池へのフォトニック結晶構造 導入および、薄膜単結晶 Si 太陽電池の研究は、当初計画にはない研究項目であり、全体と して当初目標を上回る成果が得られたものと考えている。本 CREST にて開発した太陽電 池の光マネジメント技術は、特に Si 層の厚さの薄い太陽電池において重要になると考えら れ、産業応用上も有用な結果が得られたと考えられる。

上記のような成果を得るために、毎週金曜日に行った定例のミーティングの他、必要に応じてグループ内での議論を密に行い、課題を早期に発見し、研究方針を臨機応変に修正しながら研究を遂行してきた。また、本 CREST 経費にて購入した各種の装置は、上述の成果を得る上において大いに役立ったと感じている。

最後に、領域会議等を通じて有益なご指導をいただいた、山口研究統括および領域アドバ イザーの先生方に感謝の意を表します。



