

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04544

研究課題名(和文) フォトニクス活用型エネルギーハーベスティングデバイスの開発

研究課題名(英文) Development of energy harvesting devices utilizing photonics

研究代表者

齋 均 (SAI, Hitoshi)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エネルギー・環境領域・上級主任研究員

研究者番号：50462825

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：IoT技術の発展に伴い、各種センサ・通信素子駆動用の独立電源として環境光から電力を得るエネルギーハーベスティング用太陽電池(EHPV)への期待が高まっている。本研究では、EHPVの発電効率の向上を目的に、フォトニクス技術を活用した光吸収増強に関する実験的検証を行った。ガラス基板上にフォトニック結晶を形成し、その上に各層を堆積して薄膜シリコン太陽電池を形成した。検討の結果、フォトニック結晶において適切な単位構造の形状を選定し適切な周期・アスペクト比を選ぶことで、平坦基板に比べ、短絡電流密度が最大50%、発電効率が最大40%向上する結果を得た。本手法が発電効率向上に極めて有効であることが実証された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光を電力に変換する太陽電池では、発電可能な波長域の入射光を最大限に吸収し、光電流として取り出すことが基本的に重要である。シリコンは、安定・無毒な優れた半導体材料として知られるが、太陽電池応用では光吸収係数が小さいことが欠点であり、特に薄膜シリコン太陽電池では、発電効率が光吸収で制限されてしまう。本研究では、透明基板に形成したフォトニック結晶構造を導入することにより、薄膜シリコン太陽電池の大幅な光吸収増強および発電効率の向上が可能であることを実証した。将来的なエネルギーハーベスティング素子の効率向上に資する成果である。

研究成果の概要(英文)：Demands for energy harvesting photovoltaic devices is growing for further penetration of IoT technologies. To meet this demands, low-cost and high-efficiency thin-film photovoltaic devices are highly required. In this work, the potential of photonic crystals for enhancing light absorption within thin-film photovoltaic devices was explored experimentally. Transparent glass substrates with photonic crystals were prepared and applied to thin-film silicon photovoltaic cells. It was found that light absorption was enhanced significantly by applying photonic crystals with an appropriate combination of the period and the aspect ratio. The precise control of the cross-sectional profile of 2D photonic crystal was also important. As a result, a drastic increase in photo-current density by 50% was realized, demonstrating the potential of this approach.

研究分野：太陽電池

キーワード：太陽電池 フォトニクス 光吸収 薄膜シリコン エネルギーハーベスティング

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

IoT技術の発展に伴い、各種センサ・通信素子駆動用の独立電源として環境光から電力を得るエナジーハーベスティング用太陽電池（EHPV）への期待が高まっている。EHPVでは、必要とされる電力量に依るが、多くの場合は、軽量かつ小型化が容易で、寸法自由度の高いことが求められるため、電力用途として一般的な板状の結晶シリコン基板を用いた太陽電池ではなく、薄膜型の太陽電池が用いられることが多い。本研究では既にEHPVとして実績があり、信頼性に定評のある薄膜シリコン太陽電池（厚さ数ミクロン以下）に着目する。

シリコンは、毒性が無く化学的に安定という特長がある一方、光吸収係数が小さい欠点があり、特に薄膜化した場合は光吸収の不足が効率の制約となる。これまでに光吸収を増強させるための様々な技術が試みられてきたが、その効果はいまだ限定的であった。

2. 研究の目的

上記のように、EHPVとして有用な薄膜シリコン太陽電池では、光吸収の不足が効率制約となってきた。本研究では、フォトニック結晶に代表されるフォトニクス技術を活用することで、感度波長帯の光吸収増強を図り、EHPVの発電効率の大幅な向上を目指す。数値解析により、光吸収増強効果を最大化するフォトニック結晶構造を探索する。さらに、解析結果を元に実際にEHPV素子を作製・評価することにより、その効果を実証する。

3. 研究の方法

本研究では、薄膜の微結晶シリコン太陽電池を対象とした。また、フォトニック結晶構造としては、薄膜シリコン太陽電池に容易に実装できる形態を重視し、面内方向にのみ周期を有する2次元構造に限定して検討を行う。製膜基板上にフォトニック結晶を形成し、その上に各種薄膜を堆積して、薄膜シリコン太陽電池を形成する。

（1）フォトニック基板の作製と評価

フォトニック結晶構造を有する基板は、以下の方法で作製した。まず、結晶シリコンウェーハに対してフォトリソグラフィとエッチングを行い、所望のフォトニック結晶を形成したのち、これを鋳型としてフォトニック結晶の反転構造を持つモールドを作製した。このモールドを使用し、ガラス基板上にsol-gelガラスをインプリントすることにより、フォトニック結晶構造を持つガラス基板を作製した。さらに、フォトニック結晶構造を有する面に、透明導電膜としてアルミドープ酸化亜鉛（AZO）膜をスパッタリング法で形成し、導電性を持つ太陽電池用の基板とした。作製したフォトニック基板の形状は、走査型電子顕微鏡観察にて評価した。

（2）薄膜シリコン太陽電池の作製と評価

フォトニック基板上に、モノシランガスを原料とするプラズマ化学気相堆積法を用いて微結晶シリコンからなるp層、i層、n層をそれぞれ順に積層した。p型、n型へのドーピングはそれぞれB、Pを添加した。pin構造を作製したのち、スパッタリング法を用いて透明導電膜および銀電極からなる裏面電極を形成して薄膜シリコン太陽電池を作製した。太陽電池の面積は1cm²である。比較のために、平坦な基板に対しても同様のプロセスで太陽電池を作製した。作製した太陽電池に対し、光吸収スペクトルおよび分光感度特性を評価し、フォトニック基板による光吸収効果を検証した。また、疑似太陽光照射下での電流・電圧特性を評価することで、フォトニック基板による発電特性への影響を評価した。

4. 研究成果

（1）フォトニック基板の作製

作製に先立ち、光学シミュレーションにより、光吸収を効果的に高め得るフォトニック基板の形状を検討した。その結果、基本パラメータである周期、アスペクト比に加えて、単位構造の形状が光吸収効果に大きな影響を与える結果を得た。特に、単位構造をステップ型ではなく、テーパ型でとすることによって光吸収が効果的に増強できることが確認された。

上記の結果を踏まえ、フォトリソグラフィ工程やエッチング工程を調整し、お椀型の単位構造が得られる条件を見出し、モールドを作製した。こうして得られたモールドを使用してガラスインプリントを行うことにより、図1に示すような、滑らかなお椀型の凹みが三角格子状に配列された、フォトニック基板を得ることに成功した。周期は最小で1ミクロン、アスペクト

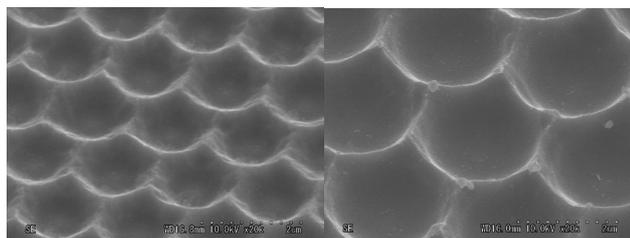


図1. 本研究で作製したガラス上フォトニック基板
（左：周期1.5ミクロン、右：周期2.5ミクロン）

比は最大で 0.3 の基板が得られた。ここでアスペクト比は凹凸の最大高さと周期の比と定義する。本研究では、周期を 1~2.5 ミクロン、アスペクト比を変化させたフォトニック基板を作製した。

(2) フォトニック基板を用いた太陽電池の作製と評価

作製した各種フォトニック基板に対して、薄膜シリコン太陽電池を作製し、その特性を評価した。フォトニック基板を適用した太陽電池では、光吸収増強効果により外部量子効率 (EQE) が向上することが期待される。図 2 に、フォトニック基板 (周期 1.5 ミクロン、アスペクト比 0.2) 上に作製した薄膜シリコン太陽電池の EQE スペクトルを示す。発電層の膜厚は約 1 ミクロンである。同条件で作製した平坦基板を用いた太陽電池と比較すると、600nm よりも長波長側で EQE が大きく向上することを確認した。このような光吸収増強効果により、図 2 に示すフォトニック基板を用いた太陽電池では、基準太陽光下での短絡電流密度 (J_{sc}) として 24.2 mA/cm^2 が得られ、平坦基板 (16.3 mA/cm^2) に較べて約 1.5 倍に増大することを確認した。

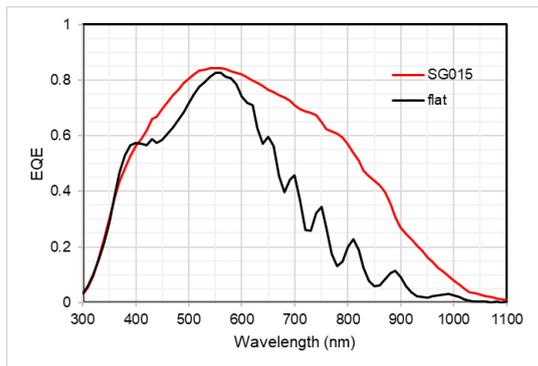


図 2. ガラス上フォトニック基板 (SG015) および平坦基板に作製した薄膜シリコン太陽電池の外部量子効率スペクトル

図 2 と同様な方法で、周期やアスペクト比を変調させて薄膜シリコン太陽電池を多数作製して発電特性の評価を行った。太陽電池の膜厚は約 1 ミクロンで固定した。フォトニック結晶の周期及びアスペクト比と J_{sc} の相関を実験的に評価した結果を図 3 に示す。まず図 3 左側に示す周期の影響を確認する。ここでアスペクト比は 0.17~0.23 で概ね一定としている。フォトニック結晶の導入することで、周期に関わらず J_{sc} が向上すること、最適値が周期 1.5 ミクロン付近であることが確認出来る。なお、本図では割愛するが、最適な周期は太陽電池の膜厚にも依存し、厚膜化すると最適周期が大きくなる傾向も確認された。次に、図 3 右側のアスペクト比の影響を確認する。ここでは周期は 1.5 ミクロンで固定した。本図から、アスペクト比の増大に伴って J_{sc} が大きく向上するが、アスペクト比 0.2 付近で最大値を取り、その後はやや減少傾向を示すことが確認された。フォトニック結晶のアスペクト比が大きいくほど光吸収増強効果が高まると期待されたが、実験的には必ずしもそのような結果は得られなかった。このような結果となった理由は、アスペクト比が過度に大きくなると、その上に形成される発電層の品質が低下するため、と推測される。この仮説が正しいとすれば、最適なアスペクト比は、純粋な光学的効果のみならず、その上に形成される発電層の特性にも依存することになる。図 3 の結果は、薄膜シリコン太陽電池で確認されたものであり、他の材料系では異なる傾向を示す可能性もある。

このようにフォトニック結晶を導入したガラス基板を用いた検討を行い、薄膜シリコン太陽電池において光吸収増強効果を確認するとともに J_{sc} を最大で 1.5 倍まで大幅に向上させた。また、 J_{sc} 向上のみならず、発電効率そのものも大きく向上し、平坦基板での効率 5.8% に対し、フォトニック基板では効率 8.3% を得ることに成功した。

本研究成果で特に重要な点は、透明なガラス基板上にフォトニック構造を形成した系でこのような大幅な電流増強および効率向上を実現したことであり、薄膜シリコンに限らず、透明な導電性基板を使用する薄膜太陽電池に応用可能な知見を得た。

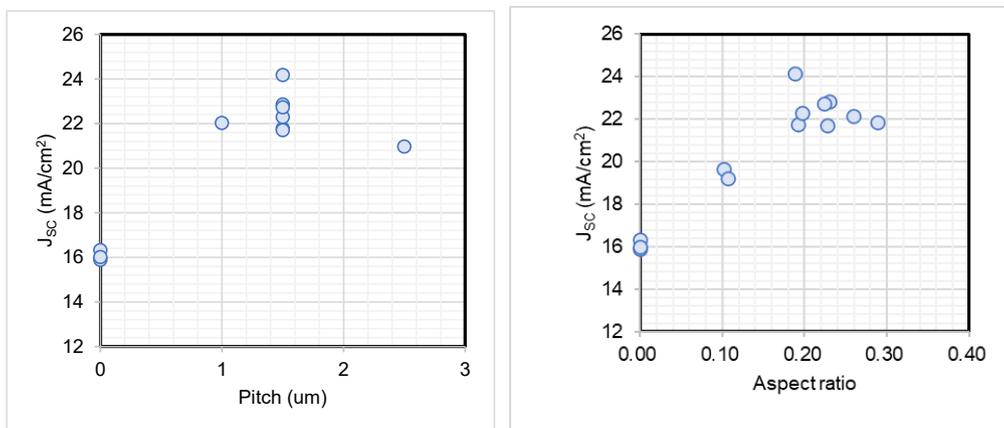


図 3. ガラス上フォトニック基板 (SG015) および平坦基板に作製した薄膜シリコン太陽電池の外部量子効率スペクトル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------