

京都大学	博士 (工学)	氏名	川本 洋輔
論文題目	薄膜シリコン太陽電池の光吸収増大に向けたフォトニック結晶構造の設計に関する研究		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、薄膜シリコン (Si) 太陽電池の高効率化に向けて、光吸収増大を図るべくフォトニック結晶の導入を検討し、その構造設計手法を構築するとともに、高い光吸収を有する薄膜 Si (特に薄膜微結晶 Si) 太陽電池の実現に向けた理論検討をまとめたものであって、全 6 章から構成される。</p> <p>自然エネルギーの中で注目を集める太陽光発電の主流は材料として Si を用いたものである。Si 系太陽電池の利用が今後拡大することを考えると、資源の有効利用の観点から薄膜の Si を用いた太陽電池の重要性が高いと考えられる。しかし、薄膜 Si 太陽電池は Si 膜厚が数百 nm から数 μm であることから光路長が短く、電子バンド端に近い波長 600~1000 nm の波長帯域では光吸収が小さいことから、変換効率が低いことが課題となっている。そのため、幅広い波長帯域でエネルギーを有する太陽光を有効利用できる光マネジメント技術が薄膜 Si 太陽電池の高効率化においては重要であると考えられる。本研究では、フォトニック結晶のバンド端共振モードに着目し、この共振モードに光を結合させることにより実効的な光路長が長くし、薄膜 Si (具体的には、微結晶 Si) 太陽電池の光吸収を増大させることを狙っている。具体的には、太陽電池に適したフォトニック結晶構造の設計手法を確立し、十分な高い光吸収を有するフォトニック結晶の設計に成功している。</p> <p>本研究で用いた主たる設計手法としては、フォトニック結晶構造の微小構造変化に対する Si の光吸収変化が計算でき、細かな構造設計が可能であるという特徴をもつ、感度解析法である。まず、電極等の吸収のない理想的な微結晶 Si (厚さ 400~600 nm の極薄) 太陽電池構造に対し、感度解析法による光吸収増大の基礎検証を行った後、電極の光吸収や材料の波長分散も取り込んだ検討にも踏み込んでいる。続いて、微結晶 Si の膜厚が数 μm 程度の太陽電池にもフォトニック結晶構造の最適設計を検討している。この際、電極の吸収の抑制に関する構造設計にも言及している。これらの体系的な理論設計により、最終的に、フォトニック結晶をもたない微結晶 Si 光吸収に比べ、最大 2 倍以上もの光吸収増大効果を得ることに成功している。以下、各章の内容を要約する。</p> <p>第 1 章は序論であり、研究背景として薄膜 Si 太陽電池の重要性と課題を概観した上で、フォトニック結晶導入による薄膜 Si 太陽電池の高効率化の期待が述べられるとともに、フォトニック結晶構造の設計手法の確立が重要であり、その設計には感度解析法を利用することが述べられている。</p> <p>第 2 章ではフォトニック結晶のバンド端共振効果について説明した後、この効果による薄膜 Si 太陽電池の光吸収増大について数値解析を行うことにより議論を行っている。計算結果により、バンド端共振効果による光吸収増大が示されるとともに、バンド端モードと外部との結合で決まるレートと、Si の光吸収で決まる吸収レートを一致させることが重要であることも述べている。そして、広帯域に亘る光吸収増大に向け</p>			

てバンド端の数を増大すべく、超格子フォトニック結晶構造を導入した場合の光吸収特性について述べており、バンド端数の増大に伴う光吸収増大を示している。

第 3 章では感度解析法を用いたフォトニック結晶構造設計手法について説明している。まず、構造の設計指針を与える感度を計算する際に必要となる目的関数と設計変数の設定について述べた上で、感度をどのように構造設計に適用するかについて述べ、最後に、感度を有限差分時間領域法により計算する手法を述べている。

第 4 章では極薄微結晶シリコンを発電層としてもつ太陽電池に対し、感度解析法を用いたフォトニック結晶の設計について論じている。まず、電極等の吸収のない理想的な微結晶 Si (厚さ 400~600 nm) 太陽電池構造に対し、感度解析法による光吸収増大の基礎検証を行っている。ここでは、構造設計の計算を簡便に行うべく、入射光としてパルス光およびその中心波長に対応する材料パラメータを用いている。感度の計算において、目的関数を Si の光吸収量、設計変数をフォトニック結晶面内構造の誘電率・導電率に割り当てている。この基礎検証において、感度解析法により得られたフォトニック結晶による極薄 Si 太陽電池の光吸収は、フォトニック結晶を有さないそれと比較して、2 倍以上の光吸収増大効果を実現するとともに、ランバシアン限界と呼ばれる、光を Si 層内へ等方的に散乱させるような理想的な散乱構造を導入した場合の光吸収特性をも上回ることに成功している。次に、電極の光吸収を考慮した詳細な構造設計について検討し、同様に、ランバシアン限界を上回る光吸収増大効果を得ることに成功している。更なる検討として、材料の波長分散を考慮した構造設計を行うべく、中心波長の異なる複数のパルス光、および各中心波長の材料パラメータを用いた構造設計についても述べられている。設計検討の結果、直前に述べた検討と同程度の光吸収増大効果が得られたことから、感度解析法を用いた構造設計では、1 つのパルス光、およびその中心波長に対応する材料パラメータを用いればよいことが示されている。

第 4 章では極薄微結晶シリコン発電層の太陽電池に対する設計を行ったが、第 5 章では、数 μm 厚の微結晶シリコン発電層に対する感度解析法によるフォトニック結晶の立体形状設計の検討について述べている。設計変数をフォトニック結晶の高さに割り当てることにより立体形状設計を検討し、フォトニック結晶を有さない場合と比較して 1.4 倍の光吸収増大を実現した。次に、長波長側での透明導電膜の光吸収を抑制し、Si 層の光吸収を増大すべく、透明導電膜の光吸収を抑制した場合における構造設計について述べている。上部・下部の透明導電膜の吸収を抑制して設計を行った結果、フォトニック結晶を有さない場合と比較して、最大で 1.5 倍以上高い短絡電流密度 32.0 mA/cm^2 を得ることに成功している。

第 6 章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。この章では、第 5 章の検討で得られた電流密度が実験検討で実現できたと仮定した際に期待される変換効率について述べられており、文献で報告されている薄膜微結晶 Si 太陽電池の開放電圧および曲線因子の値を用いると、12.8%と求められ、現状報告されている世界最高効率を上回ることを予言している。最後に、将来の展望について述べられている。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は薄膜 Si 太陽電池の高効率化に向けて、光吸収増大を図るべくフォトニック結晶の導入を検討し、その構造設計手法を構築するとともに、高い光吸収を有する薄膜 Si (特に薄膜微結晶 Si) 太陽電池の実現に向けた理論検討をまとめたものである。これまで、太陽電池に適したフォトニック結晶構造の具体的な設計手法に関する検討は行われていなかった。それに対して、本論文では、フォトニック結晶のバンド端モード数を増大させることが、広帯域に亘る光吸収増大を実現することを示すとともに、設計手法として、フォトニック結晶構造の微小構造変化に対する Si の光吸収変化が計算でき、細かな構造設計が可能であるという特徴を有する感度解析法を主たる方法として用い、それによって得られたフォトニック結晶構造が広帯域に亘って更に大きな光吸収を実現可能なことを示している。また、現状得られている世界最高効率を上回る可能性を示唆する結果をも得ている。本論文において得られた主な成果は次のようにまとめられる。

1. フォトニック結晶による薄膜 Si 太陽電池の光吸収増大を示すとともに、広帯域に亘って光吸収を増大すべくバンド端モードの数を増やした構造についても検討し、実際にバンド端数増大に伴う光吸収増大効果を理論的に示している。
2. 感度解析法を用いたフォトニック結晶面内構造設計を行い、微結晶 Si (厚さ 400 ~ 600 nm の極薄) 太陽電池構造の光吸収が、フォトニック結晶がない場合と比較して最大で 2 倍以上に増大させることに成功している。また、その光吸収特性はランバシアン限界を上回ることに成功している。
3. 感度解析法によるフォトニック結晶構造設計を 3 次元方向に拡張した検討についてもを行い、厚さ 2 μm の微結晶 Si 太陽電池の光吸収が、フォトニック結晶がない場合と比較して 1.4 倍増大させることに成功している。さらに、透明導電膜の光吸収を抑制した構造設計についても検討し、最大で 32.0 mA/cm² の短絡電流密度を得ることに成功している。現状報告されている微結晶 Si 太陽電池の開放電圧および曲線因子を考慮すると世界最大の効率が得られる可能性を示唆している。

以上のように、本論文において確立された設計手法は、薄膜 Si (特に、微結晶 Si) 太陽電池の高効率化に向けたフォトニック結晶構造の具体的な設計指針、および適切な構造を示す有力な手段となり得る。そのため、フォトニクスやエネルギー分野の発展に大きく寄与することが期待でき、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 28 年 2 月 5 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第 14 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。