

物質創成科学研究科 博士論文要旨

所 属 (主指導教官)	微細素子科学講座 (冬木 隆 教授)		
氏 名	山本 幸枝	提 出	平成 15 年 1 月 10 日
題 目	Device Structure Optimization and Characterization toward High Efficiency Single Crystalline Silicon Thin Film Solar Cells (単結晶シリコン薄膜太陽電池の高効率化に向けた素子構造設計および特性評価)		
要旨 近年の環境問題や、次世代のエネルギー問題の解決策として太陽光発電に対する期待が高まっている。単結晶シリコン(c-Si)薄膜太陽電池は、光吸収層を薄膜化することによる使用材料の低減、低価格化などが期待され、将来の電力システム用素子として有望視されている。 本研究では、高効率 c-Si 薄膜太陽電池の実現を目指し、2 次元デバイスシミュレーションによる素子構造最適化設計を行った。さらに、太陽電池の高効率化に対して重要なパラメータである少数キャリア拡散長、表面再結合速度の評価を行い、c-Si 薄膜太陽電池の可能性について議論した。 第 2 章では、従来の p-n 接合型太陽電池に対して活性層である p 型層部分にキャリア密度勾配を持たせ、内部電界効果を考慮した素子構造を提案した。2 次元シミュレーションにより厚さ 5μm の c-Si 薄膜太陽電池の構造最適化を行った。少数キャリア拡散長が 5μm と素子の厚さと同程度である場合、内部電界を利用したキャリアのドリフト輸送効果が素子特性向上に有効であることがわかった。内部電界効果を考慮した素子構造は高効率化に重要であり、厚さ 5μm の c-Si 薄膜太陽電池において、変換効率 10%以上が可能であることが示された。 第 3 章では、c-Si 薄膜太陽電池の少数キャリア拡散長の正確な導出方法を提案した。化学的気相堆積(CVD)法を用いて成長した厚さ 7 から 20μm の c-Si 薄膜に関して surface photovoltage 法による拡散長測定を行なった結果、拡散長は膜厚と同程度となり、少数キャリア拡散長は膜厚に制限されることが明らかとなった。2 次元シミュレーションを用いて外部量子効率の測定結果に対しフィッティングを行った結果、c-Si 薄膜の膜厚によらず少数キャリア拡散長は 100μm、表面再結合速度は $5 \times 10^4 \text{cm/s}$ と算出された。したがって、2 次元シミュレーションを用いた少数キャリア拡散長評価は、c-Si 薄膜太陽電池に対して有用であることが示された。			

第4章では、プラズマ CVD 法により堆積したシリコン窒化膜(SiN 膜)の c-Si 薄膜太陽電池に対する表面パッシベーション並びに反射防止膜としての有用性を議論した。成膜基板温度は 300°C とし、SiH₄ ガスと NH₃ ガスをプロセスガスとした。分光エリプソメータを用いて SiN 膜の屈折率測定を行った結果、プロセスガス流量比によって屈折率は 2.0 から 2.8 まで変化し、反射防止膜に適することが示された。表面パッシベーションに重要な固定電荷密度を容量-電圧測定により算出した結果、プロセスガス流量比を変化させることで、SiN 膜は正もしくは負の固定電荷を持つことがわかった。

SiN 膜の堆積前後での c-Si 薄膜太陽電池の特性を比較すると、Fig. 1 に示すように、SiN 膜を堆積することで、短絡電流の大幅な向上が見られた。高ドーパ基板上に作成した厚さ 10μm の c-Si 薄膜太陽電池において、変換効率 11%が達成された。さらに表面パッシベーションに対する固定電荷密度依存性について議論した。SiN 膜が正の固定電荷を持つ場合、分光感度特性において短波長域での感度が向上し、表面再結合速度を $2.5 \times 10^4 \text{ cm/s}$ から $4.6 \times 10^3 \text{ cm/s}$ に低減することに成功した。したがって、プラズマ CVD 法により堆積した SiN 膜は c-Si 薄膜太陽電池の表面パッシベーション並びに反射防止膜として有効であることが示された。

第5章では、SOI 基板上に厚さ 10-20μm の c-Si 薄膜太陽電池作成し、特性評価を行った。常圧 CVD 法によりエピタキシャル成長を行い、太陽電池の活性層を形成した。原料ガスとして SiH₂Cl₂ を使い、基板温度は 1050°C とした。厚さ 20μm の c-Si 薄膜太陽電池において、Fig.2 に示すように短絡電流; 24.0mA/cm²、開放電圧; 468mV、変換効率; 6.4%が得られた。さらなる高効率化には光閉じ込め構造を含めた構造最適化設計が必要であると考えられるが、c-Si 薄膜太陽電池の可能性を十分に示した結果であると考えられる。

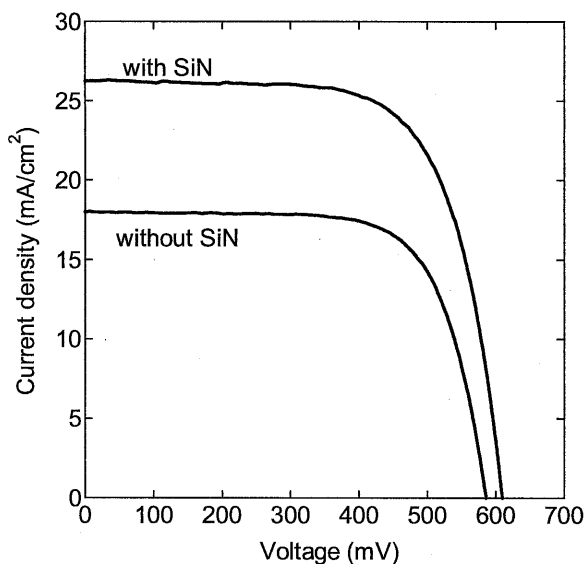


Fig.1: J-V curve of 10μm-thickness solar cell with and without SiN film under illumination.
(AM1.5, 100mW/cm²)

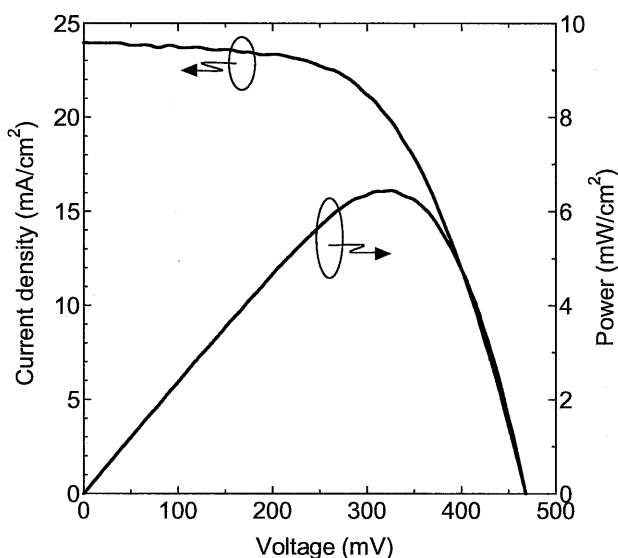


Fig.2: J-V and P-V curve of 20μm-thickness solar cell on SOI wafer under illumination.
(AM1.5, 100mW/cm²)

(論文審査結果の要旨)

単結晶シリコン(c-Si)薄膜太陽電池は、光吸収層を薄膜化することによる使用材料の低減、低価格化などが期待され、将来の電力システム用素子として有望視されている。

本論文では、高効率 c-Si 薄膜太陽電池の実現を目指し、2 次元デバイスシミュレーションによる素子構造最適化設計を行った。さらに、太陽電池の高効率化に対して重要なパラメータである少数キャリア拡散長、表面再結合速度の評価を行い、c-Si 薄膜太陽電池の可能性について議論しており、以下の重要な結果を得た。

1. p-n 接合型太陽電池において、活性層である p 型層部分にキャリア密度勾配を持たせ、内部電界効果を考慮した素子構造を提案した。2 次元シミュレーションにより厚さ $5\mu\text{m}$ の c-Si 薄膜太陽電池の構造最適化を行った。少数キャリア拡散長が $5\mu\text{m}$ と素子の厚さと同程度である場合、内部電界を利用したキャリアのドリフト輸送効果が素子特性向上に有効であり、変換効率 10%以上が可能であることが示された。

2. c-Si 薄膜太陽電池の少数キャリア拡散長の正確な導出方法を提案した。化学的気相堆積(CVD)法を用いて成長した厚さ 7 から $20\mu\text{m}$ の c-Si 薄膜に関して surface photovoltage 法による拡散長測定を行なった結果、拡散長は膜厚と同程度となり、少数キャリア拡散長は膜厚に制限されることが明らかとなった。2 次元シミュレーションを用いて外部量子効率の測定結果に対しフィッティングを行った結果、2 次元シミュレーションを用いた少数キャリア拡散長評価は、c-Si 薄膜太陽電池に対して有用であることが示された。

3. プラズマ CVD 法により堆積したシリコン窒化膜(SiN 膜)の c-Si 薄膜太陽電池に対する表面パッシベーション並びに反射防止膜としての有用性を議論した。固定電荷密度を容量-電圧測定により算出した結果、プロセスガス流量比を変化させることで、SiN 膜は正もしくは負の固定電荷を持つことがわかった。SiN 膜が正の固定電荷を持つ場合、分光感度特性において短波長域での感度が向上し、c-Si 薄膜太陽電池の表面パッシベーション並びに反射防止膜として有効であることが示された。

4. SOI 基板上に厚さ 10- $20\mu\text{m}$ の c-Si 薄膜太陽電池作成し、特性評価を行った。厚さ $20\mu\text{m}$ の c-Si 薄膜太陽電池において、短絡電流; $24.0\text{mA}/\text{cm}^2$ 、開放電圧; 468mV、変換効率; 6.4%が得られた。

さらなる高効率化には光閉じ込め構造を含めた構造最適化設計が必要であると考えられるが、以上のように、本論文は c-Si 薄膜太陽電池の可能性を十分に示した結果であると考えられる。得られた新しい知見と成果は、学術上価値が高いのみならず工学的応用としても大変有益である。よって、審査委員一同は、本論文が博士(工学)の学位論文として価値あるものと認めた。