

論文内容の要旨

博士論文題目 Development of Thin Film Polycrystalline Silicon Solar Cells
Fabricated on Foreign Substrates

(異種基板上に作製した多結晶 Si 薄膜太陽電池の素子開発)

氏 名 石河 泰明

(論文内容の要旨)

太陽電池の低コスト化且つ高効率化の為には薄膜多結晶 Si の利用が有効である。高速堆積が期待できる高温プロセスを使用した場合、変換効率は 5% と高効率には至っていない。そこで本論文では高効率多結晶 Si 薄膜太陽電池の実現の為の指針を提示する共に高品質な多結晶 Si 薄膜の異種基板上への高速堆積を目指す。また直接堆積した薄膜多結晶 Si を利用して太陽電池の作製を行う。

二章では高効率化への指針を提示する為、二次元デバイスシミュレータを用い多結晶 Si 薄膜太陽電池の特性解析を行った。柱状構造 poly-Si モデルを導入する事で、より実デバイス構造に近い擬三次元的構造の記述及びその数値解析を可能とした。高効率太陽電池の実現には以下の条件が必要となる。

- (1) 粒界再結合速度 $< 10^3$ cm/s
- (2) 粒径 $>$ 膜厚
- (3) 少数キャリア拡散長 ~ 50 μm

以上の指針を満足する事で 16% 以上の変換効率 (膜厚 > 5 μm) が期待できる事が示された。

三章では多結晶 Si の異種基板上への直接堆積を行った。堆積方法として高品質で高速堆積が期待できる常圧化学的気相堆積法を用いた。原料ガスとしてジクロロシランを使用した。堆積温度が 1050°C の時、(220) に非常に強く配向し、かつ結晶性も優れている事が確認された。(膜厚 = 40 μm) この時の堆積速度は 0.7 $\mu\text{m}/\text{min}$ と比較的速い条件である。表面観察の結果、太陽電池の表面構造に

適したテクスチャ構造を有している事が判明した。薄膜化を試みると配向特性が劣化した為、堆積温度を二種類用いる二段階堆積法を導入した。この方法により膜厚が 10 μm 程度でも非常に配向特性に優れた薄膜多結晶 Si が得られた。

四章では多結晶 Si の粒径拡大を目指し以下の新規作製技術を提案した。

(1) アルミニウム援用結晶化法を利用した多結晶 Si の作製

本方法により膜厚 400 nm、粒径 10 μm 程度の薄膜多結晶 Si が得られた。膜厚を 10 μm にする為に上記の薄膜多結晶 Si を seed 層として利用し三章で使用した堆積条件を用い多結晶 Si 堆積を行った。堆積後の粒径は 10 μm となった。比較的大粒径の薄膜多結晶 Si 作製に成功した。

(2) 原料ガスの間欠供給法を用いた核密度制御による多結晶 Si の大粒径化

結晶粒径に大きな影響を持つ核密度を原料ガスの間欠供給によって制御し、大粒径化を目指した。 $10^5 \sim 10^7 \text{ cm}^{-2}$ の範囲での核密度制御を可能とした。核密度制御後、典型的な堆積条件で多結晶 Si 堆積を行った。粒径は 22 μm となり大粒径多結晶 Si の作製に成功した。また、連続柱状構造が確認された。

五章では三章で得られた多結晶 Si を用い両面型太陽電池を作製した。リン拡散時に粒界増殖拡散をしている事が確認された。この効果により比較的高い短絡電流密度が得られたと考えられる。更なる特性改善の為、(1) 水素ラジカル照射、(2) SiN_x 膜を利用した水素化処理を行った。粒界再結合速度、少数キャリア拡散長の改善が両処理後確認され、高効率化に有効である事が示された。また、(2)の処理後の変換効率としては 1.9%まで改善できた。粒界再結合速度は $1 \times 10^4 \text{ cm/s}$ 程度、少数キャリア拡散長は 50 μm 程度となることが二章で導入した数値解析とのフィッティングにより導き出された。この少数キャリア拡散長は二章で得られた指針を満足している。この事から四章の大粒径化技術および水素化処理の最適化により更なる特性改善が期待できる。

(論文審査結果の要旨)

太陽電池の低コスト化且つ高効率化の為に薄膜多結晶 Si の利用が有効である。しかし、高速堆積が期待できる高温プロセスを使用した場合、現在の試作素子の変換効率は 5%程度と高効率には至っていない。

本論文では高効率多結晶 Si 薄膜太陽電池の実現の為に指針を提示すると共に高品質な多結晶 Si 薄膜の異種基板上への高速堆積を目指した。また直接堆積した薄膜多結晶 Si を利用して太陽電池の作製を行い下記の重要な知見を得た。

1. 高効率化への指針を提示する為、二次元デバイスシミュレータを用い多結晶 Si 薄膜太陽電池の特性解析を行った。柱状構造多結晶 Si モデルを導入する事で、実デバイス構造に近い擬三次元的構造の記述及びその数値解析を可能とした。高効率太陽電池の実現には以下の三条件が必要となる事が判明した。1.粒界再結合速度 $< 10^3$ cm/s、2.粒径 $>$ 膜厚、3.少数キャリア拡散長 50 μm 以上。これらの条件のもとで、16%以上の変換効率が期待できる事が示された。

2. 多結晶 Si の異種基板上への直接堆積を行った。堆積方法として高品質で高速堆積が期待できる常圧化学的気相堆積法を用いた。原料ガスとしてジクロロシランを使用した。得られた膜は(220)に非常に強く配向し、かつ結晶性も優れている事が確認された。この時の堆積速度は 0.7 $\mu\text{m}/\text{min}$ と比較的速い。表面観察の結果、太陽電池の表面構造に適したテクスチャ構造を有している事が判明した。さらに、堆積温度を変化させる二段階堆積法を導入することにより膜厚が 10 μm 程度でも非常に配向特性に優れた薄膜多結晶 Si が得られた。

3. 多結晶 Si の粒径拡大を目指し以下の二つの新規作製技術を提案した。

(1) アルミニウム援用結晶化法を利用した多結晶 Si の作製

蒸着アルミニウムと非晶質 Si との相互反応により膜厚 400 nm、粒径 10 μm 程度の薄膜多結晶 Si が得られた。さらに得られた膜を seed 層として利用して多結晶 Si 堆積を行い、大粒径の薄膜多結晶 Si 作製に成功した。

(2) 原料ガスの間欠供給法を用いた核密度制御による多結晶 Si の大粒径化

結晶粒径に大きな影響を持つ核密度を原料ガスの間欠供給によって制御し、大粒径化を目指した。 $10^5 \sim 10^7$ cm^{-2} の範囲での核密度制御を可能とした。核密度制御後、典型的な堆積条件で多結晶 Si 堆積を行い、大粒径多結晶 Si の作製に成功した。また、連続柱状構造が確認された。

4. 堆積した多結晶 Si を用い両面型太陽電池を作製した。リン拡散時に粒界増速拡散をしている事が確認された。この効果により比較的高い短絡電流密度が得られた。更なる特性改善の為に、(1)水素ラジカル照射、(2)SiN_x膜を利用した水素化処理を行った。粒界再結合速度、少数キャリア拡散長の改善が確認され、高効率化に有効である事が示された。

以上のように本論文は薄膜多結晶 Si 太陽電池の開発に関して、構造設計、活性層堆積、物性評価、素子試作、の全般にわたって、新しい知見と成果が得られた。これらは、学術上価値が高いのみならず工学的応用にも道を拓くものである。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定した。