

論文内容の要旨

博士論文題目

Development of single crystalline silicon foil solar cells toward high efficiency

(高効率化を目指した単結晶シリコンホイル太陽電池の開発)

氏名 高橋 優

(論文内容の要旨)

本論文は、SPS (Sintered Porous Silicon) プロセスと呼ばれるポーラスシリコンを高温水素アニールすることで引き剥がし層に変化させる技術を用いた単結晶シリコンホイル太陽電池のプロセス開発と、高効率化に関して検討を行ったものである。著者が提案した裏面パッシベーション型素子を、温度 200℃以下で作製する低温一貫プロセスを検討した。パッシベーション層は PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) 法で、裏面コンタクトは LFC (Laser Fired Contact) 法を用いて形成している。設定した 15 μm (家庭食品用アルミホイルと同程度) という厚さは、現在のバルク型結晶シリコン太陽電池の 200 μm 程度と比して、極めて薄く次世代素子として有望である。得られた主な成果は次の通りである。

(1) 15 μm 厚単結晶シリコンホイルの物性評価と陽極化成条件の最適化

高温水素アニール後のシリコン単結晶層形成に最適な多層ポーラスシリコン層を形成する陽極化成電流条件を見出し、高品位シリコン層を得る技術を確認した。結晶性、膜の電子物性の向上と、引き剥がし易さとがトレードオフの関係であることを明らかにした。最適条件で作製した 15 μm 厚の単結晶シリコンホイルは少数キャリアライフタイムが約 5 μs 、少数キャリア拡散長に換算すると 120 μm となり、単結晶シリコンホイルの厚さ以上の拡散長を持つ高品質な膜を得ることが出来た。

(2) 低温での裏面パッシベーションの開発

反射防止膜とパッシベーション膜の目的で使われている SiN_x 膜を PECVD 法により堆積した。堆積前に NH_3 プラズマを照射する新規表面改質法を考案し、50 cm/s 以下の表面再結合速度を実現した。これは SiN/Si 界面において堆積前のクリーニング、水素化が行われているためである。200 $^{\circ}\text{C}$ 以下の温度で SiN_x 膜を堆積し表面再結合速度を評価した報告は皆無であり、高効率化への新しい知見が得られた。

(3) レーザーを使った低温での裏面コンタクトプロセス開発

低温裏面コンタクト形成に Laser Fired Contact (LFC) プロセスを用いた LFC-SPS セルを提案した。Nd:YAG (355 nm) パルスレーザーを使ったところ、曲線因子は 0.33 と低いものの、短絡電流密度 22.2 mA/cm^2 、開放端電圧 0.553 V を得た。内部量子効率より計算したキャリア拡散長も従来法より 2 倍近くにも増えることがわかり、単結晶シリコンホイル太陽電池の高効率化の見通しが得られた。

本論文は単結晶シリコンホイル太陽電池のプロセス開発と、高効率化に関して検討を行ったものであり、最終的に新規構造として提案した LFC-SPS セルの高効率化への指針とその提案した構造の高い有用性を示した。

(論文審査結果の要旨)

本論文は、SPS(Sintered Porous Silicon)プロセスと呼ばれるポーラスシリコンを高温水素アニールすることで引き剥がし層に変化させる技術を用いた単結晶シリコンホイル太陽電池のプロセス開発と、高効率化に関して検討を行ったものである。著者が提案した裏面パッシベーション型素子を、温度 200℃以下で作製する低温一貫プロセスを検討した。パッシベーション層は PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) 法で、裏面コンタクトは LFC(Laser Fired Contact) 法を用いて形成している。設定した 15 μm (家庭食品用アルミホイルと同程度)という厚さは、現在のバルク型結晶シリコン太陽電池の 200 μm 程度と比して、極めて薄く次世代素子として有望である。得られた主な成果は次の通りである。

(1) 15 μm 厚単結晶シリコンホイルの物性評価と陽極化成条件の最適化

高温水素アニール後のシリコン単結晶層形成に最適な多層ポーラスシリコン層を形成する陽極化成電流条件を見出し、高品位シリコン層を得る技術を確認した。結晶性、膜の電子物性の向上と、引き剥がし易さとがトレードオフの関係であることを明らかにした。最適条件で作製した 15 μm 厚の単結晶シリコンホイルは少数キャリアライフタイムが約 5 μs 、少数キャリア拡散長に換算すると 120 μm となり、単結晶シリコンホイルの厚さ以上の拡散長を持つ高品質な膜を得ることが出来た。

(2) 低温での裏面パッシベーションの開発

反射防止膜とパッシベーション膜の目的で使われている SiN_x 膜を PECVD 法により堆積した。堆積前に NH_3 プラズマを照射する新規表面改質法を考案し、50 cm/s 以下の表面再結合速度を実現した。これは SiN/Si 界面において堆積前のクリーニング、水素化が行われているためである。200℃以下の温度で SiN_x 膜を堆積し表面再結合速度を評価した報告は皆無であり、高効率化への新しい知見が得られた。

(3) レーザーを使った低温での裏面コンタクトプロセス開発

低温裏面コンタクト形成に Laser Fired Contact(LFC)プロセスを用いた LFC-SPS セルを提案した。Nd:YAG(355 nm)パルスレーザーを使ったところ、曲線因子は 0.33 と低いものの、短絡電流密度 22.2 mA/cm²、開放端電圧 0.553 V を得た。内部量子効率より計算したキャリア拡散長も従来法より 2 倍近くにも増えることがわかり、単結晶シリコンホイル太陽電池の高効率化の見通しが得られた。

以上のように、本論文は単結晶シリコンホイル太陽電池のプロセス開発と、高効率化に関して検討を行ったものであり、最終的に新規構造として提案した LFC-SPS セルの高効率化への指針とその提案した構造の高い有用性を示した。得られた結果は学術的に新しい知見を見出している。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、審査ならびに最終試験に合格したと判定した。