

「エネルギー高効率利用のための相界面科学」

平成 25 年度採択研究代表者

H29 年度
実績報告書

小林 光

大阪大学産業科学研究所
教授

相界面制御法による極低反射率の達成と結晶シリコン太陽電池の超高効率化

§ 1. 研究実施体制

(1)「小林」グループ

- ① 研究代表者:小林 光 (大阪大学産業科学研究所 教授)
- ② 研究項目:シリコンナノクリスタル層の物性解明と結晶シリコン太陽電池、及びリチウムイオン電池への応用
 - ・シリコンナノクリスタル層のパッシベーション技術の開発
 - ・裏面バックサーフェスフィールド(BSF)形成の最適化
 - ・多結晶シリコン太陽電池の高性能化
 - ・電着ワイヤーで切断された多結晶シリコンウェーハへの相界面制御法の適用
 - ・シリコンナノパーティクルから作製するリチウムイオン電池負極の特性向上
 - ・シリコンナノパーティクルのサイズ制御による負極特性の向上

(2)「井手」グループ

- ① 主たる共同研究者:井手 大介 ((株)新興製作所開発部 部長)
- ② 研究項目:シリコンナノクリスタル、シリコンナノパーティクルの形成及び洗浄法の開発と、リチウムイオン電池への応用
 - ・相界面制御法によって形成されたシリコンナノクリスタル層の洗浄技術の開発
 - ・電着固定砥粒法で形成した多結晶シリコンウェーハの極低反射率化
 - ・シリコンナノパーティクルからのリチウムイオン電池負極の形成

(3)「肥後」グループ

- ① 主たる共同研究者:肥後 徹 (日新化成(株)電子材料営業開発部 取締役・電子材料営業開発部長 兼 テクニカルラボラトリー室長)

② 研究項目:シリコンナノクリスタル、シリコンナノパーティクルの粒径制御、及びリチウムイオン電池負極への応用

- シリコンナノクリスタルとシリコンナノパーティクルの形成と粒径制御
- シリコンナノパーティクルのペースト形成及びリチウムイオン電池負極への応用

§ 2. 研究実施の概要

結晶シリコン太陽電池は、市販太陽電池の約 90%を占める最も重要な太陽電池である。太陽電池で最も重要な技術開発は、単に変換効率の向上ではなく、発電コストを低減できる技術を開発すると共に、その基本原理を見出すことである。本プロジェクトでは、単純なプロセスで単純構造の結晶シリコン太陽電池を創製してその高効率化を行うことによって、真に発電コストを低減することを目指す。そのために、相界面制御法を用いて 3%以下の極低反射率を達成し、反射防止膜を必要としない単純構造の太陽電池を創製し、その高効率化を行う。

X 線光電子分光法 (XPS) を用いて観測した価電子帯スペクトルから求めた表面近傍の連成した骨格構造シリコンナノクリスタル層の価電子帯上端のエネルギーは、相界面処理時間と共に低くなることがわかった。表面近傍のシリコンナノクリスタルは相界面制御時間と共にそのサイズが小さくなるため、量子サイズ効果によってバンドギャップが拡大して、その結果、価電子帯のエネルギーが低くなると結論できる。相界面制御処理時間と共に価電子帯エネルギーが下がることは、骨格構造シリコンナノクリスタル層の表面に近づくにつれて価電子帯エネルギーが下がることを意味している。一方、ケルビンプローブフォース顕微鏡 (KPFM) によって観測した骨格構造シリコンナノクリスタル層の伝導帯下端は、伝導帯は表面方向に向かい高エネルギー側にシフトし、最表面ではシリコンバルクと比較して約 0.2eV 高エネルギー側に位置していることがわかった。図 1 に XPS と KPFM から得られた骨格構造シリコンナノクリスタル層/p 型シリコン構造のバンド図を示す。価電子帯と伝導帯のシフトは、表面に近づくほどシリコンナノクリスタルのサイズが小さくなり、量子サイズ効果によるバンドギャップの拡大が増加するために起こっている。

pn 接合を形成した場合には、骨格構造シリコンナノクリスタル層/pn 接合シリコン構造のシリコンナノクリスタル層の伝導帯はほぼ平坦または表面方向に向かい少し低エネルギー側にシフトしていることが KPFM 測定からわかった。

上記の結果から得られた骨格構造シリコ

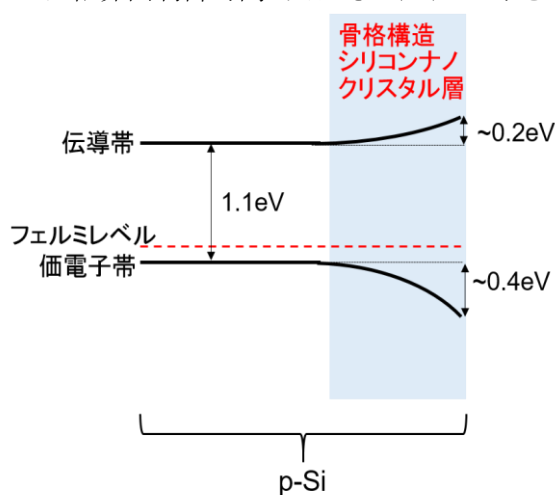


図 1. <骨格構造シリコンナノクリスタル層 / p 型シリコン>構造のバンド図

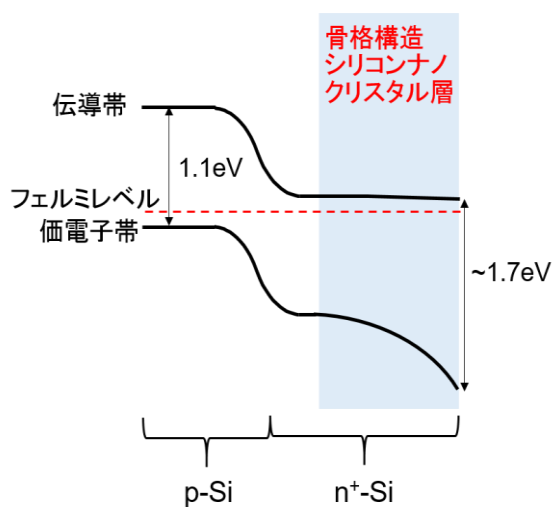


図 2. <骨格構造シリコンナノクリスタル層 / pn 接合シリコン>構造のバンド図

ンナノクリスタル層/pn 接合シリコン>構造のバンド図を図 2 に示す。骨格構造シリコンナノクリスタル層の価電子帯は表面方向に向かい低エネルギー側にシフトし、表面領域では基板シリコンに比べ約 0.6eV 低エネルギー側に位置している。一方、骨格構造シリコンナノクリスタル層の伝導帯は、表面方向に向かい若干低エネルギー側にシフトしている。骨格構造シリコンナノクリスタル層中で光生成したホールは、価電子帯のバンドベンディングによってシリコン側に、一方電子は表面側に移動するため、表面再結合が効果的に防止される。

相界面制御法を最適化することによって、<骨格構造シリコンナノクリスタル層/結晶シリコン>太陽電池の 300~400nm 領域での内部量子効率として 80%以上を達成した。この量子効率は、従来の太陽電池では達成できなかった高い値である。これは、i) PSG パッシベーション法によって、シリコンナノクリスタルの表面がほぼ完全にパッシベーションされた、ii) 骨格構造シリコンナノクリスタル層中の graded band-gap 構造による強い電界が存在し、電子とホールの分離が促進されたことによる。相界面制御法は、骨格構造シリコンナノクリスタル層の形成によって、3%以下の極低反射率が達成できると共に、PSG パッシベーション処理後には graded band-gap 構造が形成され、極めて高い短波長感度が達成できるという、多くの利点を有する技術である。

代表的な原著論文

- (1) D. Irishika, Y. Onitsuka, K. Imamura, H. Kobayashi, Improvement of conversion efficiency of silicon solar cells by submicron-textured rear reflector obtained by metal-assisted chemical etching, *Solar RRL*, 1 (2017) 1700061-1-4.
- (2) K. Imamura, D. Irishika, H. Kobayashi, Surface nanocrystalline Si structure for highly efficient crystalline Si solar cells, *Prog. Photovolt.* 25 (2017) 358-366.
- (3) K. Imamura, D. Irishika, H. Kobayashi, Mechanism of ultra-low reflectivity for nanocrystalline Si/crystalline Si structure formed by surface structure chemical transfer method, *J. Appl. Phys.* 121 (2017) 013107-1-5.