

Ge 量子ドットにおける光電変換機能の探索

研究代表者名

京都大学・化学研究所・太野垣健

1. はじめに

高い変換効率をもった太陽電池に向けて、新しい光電変換材料・機能の探索が進められている。量子ドットなどのナノ構造半導体では、離散的な電子準位を示すといった特徴などにより、電子格子相互作用の抑制や電子間相互作用の増強などの、バルク材料には見られない特性が期待されている。これを利用して、太陽電池の効率を低減する主要因である熱散逸を抑制することや、一つの光子の吸収によって多数の電子ホール対が生成されるキャリア増殖過程を利用できるようになることが期待される。

Ge 量子ドットは近赤外域にバンドギャップエネルギーを有するナノ構造半導体であり、結晶シリコンでの光吸収が困難となる近赤外光を光吸収する光電変換材料として期待されている。また、Ge/Si ヘテロナノ構造においては、ナノ構造形状などを精緻に制御することができるため、その電氣的・光学的特性を系統的に調べることができる。特に、結晶シリコン中の Ge 量子ドットにおいては、Ge/Si 界面においては電荷分離型のバンドオフセットが形成されることから、特異な光電変換機能の発現が期待される。しかし、これまで、光電変換機能について詳細な研究は行われておらず、Ge/Si 界面の特性やナノ構造形状、電子構造、キャリアダイナミクスが光電変換機能に果たす役割はよくわかっていない。

本研究においては、結晶シリコン中に太陽電池中に Ge 量子ドットを挿入した量子ドット型太陽電池について、その光電変換特性の計測、時間分解レーザー分光を用いた光励起キャリアダイナミクスの追跡を行い、光電変換メカニズムを明らかにすることを目的とした。

2. 研究経過

Ge 量子ドットを挿入した結晶シリコン太陽電池を作製し、Ge/Si 量子ドットの基礎的な光学特性および Ge/Si 量子ドット太陽電池の光電変換特性について実験的研究を行った。

3. 研究成果

- p-i-n 構造を形成し太陽電池を作成するには、結晶シリコン上に作製された Ge 量子ドットに熱アニール処理が行われる。Ge/Si 界面においては、熱供給により原子拡散が起こるため、Ge/Si 量子ドット界面での混晶化が起こりナノ構造体の形状が変化する。そこで、異なる温度で熱処理した試料について、系統的に光電変換特性を調べた。その結果、高温での熱処理を行うと結晶シリコンにドーパントが高濃度に添加されるため高い電圧が得られるようになることがわかった。一方、Ge 量子ドットが SiGe に混晶化してしまうため、バンド間遷移エネルギーが大きくなり、近赤外域の光吸収が弱くなることがわかった。Ge/Si ナノ構造を保持したまま p-i-n 構造を形成するには、低熱供給の条件で p-i-n 構造を形成することが必要であることがわかった。
- フラッシュランプアニールを用いて低熱供給条件で p-i-n 構造を形成した太陽電池について光電変換特性を調べた。結晶シリコン太陽電池に量子ドットの導入し、適切な表面処理を行うことで、結晶シリコンよりも高い光電変換効率を得られることがわかってきている。そこで、このような Ge/Si 量子ドット太陽電池において効率が增大したメカニズムの解明を進めた。Ge/Si ナノ構造およびそこから形成されるフォトリック構造について、電磁波シミュレーションを用いた検討を行った。量子ドットなどのナノ構造体による光トラッピング効果により、入射光の反射ロスが抑えられ、透過光が光散乱されるために光吸収増大が起きることがわかった。
- 集光などによって量子ドットに閉じ込められたキャリア濃度を増大させることで、光電流の生成効率が増大する傾向を見出した。高いキャリア濃度の条件において、キャリアが Ge/Si 量子ドットから効率良く取り出されることを示唆している。そのメカニズムとして、多数キャリア間の相互作用によりキャリアが量子ドットより取り出される可能生成や、複数の光学吸収過程が関与してキャリアが取り出される可能性などについて検討を行っている。

4. まとめ

Ge/Si 量子ドット太陽電池の作製を行い、基礎的な光学特性・光電特性の計測を行った。異なる温度でプロセスを行った試料の比較から、熱供給を減じたプロセスの開発の必要性を明らかとした。また、実際に熱供給を低減したプロセスを用いた Ge 量子ドットを用いた新しい Ge/Si 量子ドット太陽電池において、フォトリックナノ構造による光散乱効果について検討を行った。さらに、Ge 量子ドットからキャリアを取り出す方法に関連して、キャリア生成を増大させることで取り出し効率も増大できる可能性を見出した。今後は、新しいデバイス構造の実証を進めるとともに、構造の最適化および新規構造の探索によってより高い効率を示す光電変換デバイスの開発を進める。