

太陽光を利用した独創的クリーンエネルギー生成技術の創出
平成 21 年度採択研究代表者

H25 年度
実績報告

堀越 佳治

早稲田大学 理工学術院
教授

励起子吸収による増感を利用した高効率太陽電池の研究

§ 1. 研究実施体制

(1) 堀越グループ (早稲田大学)

① 研究代表者: 堀越 佳治 (早稲田大学先進理工学部、教授)

② 研究項目

- $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 太陽電池の研究
- 超格子太陽電池の理論的研究
- CuGaSe_2 の高品質化とドーピング制御
- $\text{CuGaSe}_2/\text{CuInSe}_2$ 超格子の研究

(2) 松岡グループ (東北大学)

① 主たる共同研究者: 松岡 隆志 (東北大学金属材料研究科、教授)

② 研究項目

- 窒化物半導体の MOVPE 法による結晶成長
- 窒化物半導体結晶の品質評価
- InN 単結晶の高品質化
- 窒化物半導体超格子太陽電池の研究

§ 2. 研究実施の概要

1) はじめに

太陽電池のコスト低減の最も直接的な方向は太陽電池の薄膜化である。しかし薄膜化は太陽光の吸収効率を減少させ、したがって変換効率を下げってしまう。これを防いで変換効率の上昇を図るためには、薄膜化した太陽電池の吸収効率を上げなければならない。これを実現する方法には

① 反射鏡などの利用により、太陽電池に照射された太陽光を太陽電池内に閉じ込めて吸収

② 薄膜材料の光吸収係数そのものを増大させる

などの方法が考えられる。①についてはこれまでに多くの試みがあり、成果を上げている。しかし②についてはほとんど検討が行われていない。そこで本プロジェクトではこの点に焦点を合わせ、研究を進めた。光吸収係数は一般に(状態密度×遷移確率)で表されるが、状態密度は構成する物質の密度に依存する量であり、これを増加させることは困難である。これに対し遷移確率は電子と正孔の波動関数の重なり具合に依存する量であるため、材料の特徴や幾何学的な構造によって変調が可能である。とくに高い遷移確率をもつ機構は励起子遷移であるため、本研究では励起子遷移による吸収係数の増大を目指した。

2) 具体的な方法

吸収係数そのものの増大を図る場合、励起子遷移を利用することはほぼ唯一の選択である。一方励起子遷移による吸収係数の増大を図るためには、室温または室温以上の温度において強い励起子吸収を生じる必要があり、このためには高い励起子束縛エネルギーを持つ材料が望ましい。そこでまず高い励起子束縛エネルギーを持つ材料の探索を行った。その結果太陽光スペクトルに整合するバンドギャップを持つ半導体材料では、一般に励起子束縛エネルギーがきわめて低く、励起子吸収による増感は期待できないことが判明した。これらの材料の中にあつて CuGaSe_2 は例外的に励起子束縛エネルギーが高く、この材料による太陽電池の実現を一つの目標に定めた。また励起子束縛エネルギーが低い材料でも、超格子構造にすると高温で励起子吸収が安定に生じることが古くから知られていた。この現象を太陽電池の吸収率増大に利用できるのではないかと予想し、超格子構造を用いた太陽電池の研究を進めた。とくに $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 超格子および $\text{In}_x\text{Ga}_y\text{Al}_{1-x-y}\text{N}/\text{GaN}$ 超格子を用いた太陽電池に焦点を合わせて研究を進めた。

3) これまでの結果

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 超格子太陽電池の研究は GaAs バルク太陽電池との特性比較を念頭に研究を進めた。その結果吸収層厚 $3\ \mu\text{m}$ では両者に効率の差は現れないが、 $1\ \mu\text{m}$ では超格子太陽電池の効率減少は、 GaAs バルク太陽電池に比べわずかであった。さらに 100°C までの高温動作実験では、バルク太陽電池の効率変化は $-0.28\%/^\circ\text{C}$ であったのに対し、超格子太陽電池では $-0.22\%/^\circ\text{C}$ であった。 $\text{In}_x\text{Ga}_y\text{Al}_{1-x-y}\text{N}/\text{GaN}$ 超格子を用いた太陽電池に関しては、励起キャリアの取り出し効率はヘテロ接合における自発分極の影響を強く受ける。自発分極をうまく利用するには N 極性面への成長が必要である。本研究ではこの技術を確認し、Ga 極性面に比べて 7~8 倍の取り出し効率を実現した。カルコパイライト結晶 CuGaSe_2 に関してはその有効性を確認すると共に、分子線エピタキシー法を用いた結晶の高品質化を達成した。移動度はレコード値を達成しているが、n 型ドーピングは実現していない。

§ 3. 成果発表等

(3-1) 原著論文発表

論文詳細情報(国際)

1. J. Nishinaga and Y. Horikoshi, “Crystalline and electrical characteristics of C_{60} uniformly doped GaAs layers”, *J. Cryst. Growth* 378, pp. 81-84, 2013 (DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2012.12.044)
2. M. Fujita, A. Kawaharazuka, and Y. Horikoshi, “Characteristics of $CuGaSe_2$ layers grown on GaAs substrates,” *J. Cryst. Growth* 378, pp.154-157, 2013 (DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2012.12.171)
3. M. Zander, J. Nishinaga, and Y. Horikoshi, “Selective area growth of InAs nanostructures on faceted GaAs microstructure by migration enhanced epitaxy”, *J. Cryst. Growth* 378, pp.480-484, 2013 (DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2012.12.089)
4. J. Nishinaga, A. Kawaharazuka, K. Onomitsu, and Y. Horikoshi, “High Absorption Efficiency Superlattice Solar Cells by Excitons”, *Jpn. J. Appl. Phys.* 52, P.112302, 2013 (DOI: 10.7567/JJAP.52.112302)
5. M. Zander, J. Nishinaga, H. Gotoh, and Y. Horikoshi, “Controlled nucleation and optical properties of InAs quantum dots grown on faceted GaAs microstructures”, *Phys. Status Solidi C* 10, PP.1500-1504, 2013 (DOI: 10.1002/pssc.201300274)
6. S. Thiru, M. Fujita, A. Kawaharazuka, and Y. Horikoshi, “Photoluminescence study of Si doped and undoped Chalcopyrite $CuGaSe_2$ ”, *Appl. Phys. A* 113, PP.257-261, 2013 (DOI: 10.1007/s00339-013-7951-5)
7. J. H. Choi, K. Shojiki, T. Tanikawa, T. Hanada, R. Katayama, and T. Matsuoka, “Investigation of Indium incorporation into InGaN by Nitridation of Sapphire Substrate in MOVPE”, *Phys. Status Solidi (C)* 10, PP.417-420, 2013 (DOI: 10.1002/pssc.201200667)
8. Y. T. Zhang, T. Kimura, K. Prasertusk, T. Iwabuchi, S. Kumar, Y. H. Liu, R. Katayama, and T. Matsuoka, “Optical Properties of InN films Grown by Pressurized-reactor Metalorganic Vapor Phase Epitaxy”, *Thin Solid Films* 536, pp. 152-155, 2013 (DOI:

10.1016/j.tsf.2013.04.004)

(3-2) 知財出願

- ① 平成 25 年度特許出願件数 (国内 1 件)
- ② CREST 研究期間累積件数(国内 4 件)