

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 22 年度採択研究代表者

H25 年度 実績報告

重川 直輝

公立大学法人 大阪市立大学 工学研究科
教授

シリコン基板上窒化物等異種材料タンデム太陽電池の研究開発

§ 1. 研究実施体制

(1) 大阪市立大学グループ

- ① 研究代表者: 重川 直輝 (大阪市立大学工学研究科、教授)
- ② 研究項目
 - ・ハイブリッドタンデムセルプロセス検討

(2) NTT フォトニクス研究所グループ

- ① 主たる共同研究者: 渡邊 則之 (NTT フォトニクス研究所、主幹研究員)
- ② 研究項目
 - ・ハイブリッドタンデムセル用結晶成長検討

(3) 福井大学グループ

- ① 主たる共同研究者: 葛原 正明 (福井大学、教授)
- ② 研究項目
 - ・モノリシックタンデムセル用結晶成長検討

§ 2. 研究実施の概要

本研究は、太陽電池材料として最も広く使用されているシリコン(Si)太陽電池(ボトムセル)上に異なる吸収端を有する太陽電池を積層することにより、高い変換効率と低い発電コストを両立させたタンデム太陽電池を実現することを狙いとする。「表面活性化ボンディング(SAB)法によるSiと異種材料の接合(ハイブリッド)」及び「Si上への窒化物半導体結晶成長(モノリシック)」により、窒化物半導体等の異種材料(InGaN, InGaP, GaAs等)からなるトップセル、ミドルセルを有するタンデム太陽電池プロトタイプ¹⁾の作製、高効率実現のための課題の抽出・解決の指針提示を目指す。あわせてトップセル、ミドルセル用材料の研究(電流整合を実現に向けたバンドギャップ制御、導電性制御、キャリア輸送機構解明)を行い、30%以上の変換効率実現を目指す。「A. ハイブリッドタンデム太陽電池プロセス検討」(大阪市立大)「B. ハイブリッドタンデム太陽電池結晶成長検討」(NTTフォトニクス研究所)「C. モノリシックタンデム太陽電池結晶成長検討」(福井大)という役割分担にて研究を実施する。今年度の進捗は以下の通りである。

A. ハイブリッドタンデム太陽電池プロセス検討においては、課題(1)「SAB法による異種材料接合の界面物性解明(電気特性・界面構造・プロセス条件の相関明確化)。界面電気抵抗低減」、課題(2)「タンデム太陽電池構造の作製。タンデム動作実証。多接合化の効果実証」に取り組んだ。(1)については、Si/GaAs異種材料接合界面の電気抵抗が接合層の不純物濃度増加に従い低下すること、電気抵抗は熱処理により変化すること、界面のアモルファス層が熱処理により消失すること、を見出した。(2)についてはInGaP/Si、InGaN/Si₂接合タンデムセルを作製し開放電圧の加算を実証した。今後は、接合界面のバンド構造を解明を進め、効率増大に向けたサブセル構造をバンドエンジニアリングの観点から検討する。あわせて多(≥3)接合化によりタンデム化の効果を増大させる。

B. ハイブリッドタンデム太陽電池結晶成長検討においては、(3)「トップセル用窒化物半導体の成長」、(4)「トップ・ミドルセル用リン系半導体の成長」が課題である。(3)においては、InGaN/AlGaIn/GaN構造のトンネル接合動作の可能性検証、InGaN/GaN多重量子井戸の光励起キャリアの輸送特性と太陽電池特性(短絡電流)を関連付けるモデルの提示・検証を行った。(4)においては、バンドギャップ制御を目的とする歪InGaP/InGaP多重量子井戸の成長法を検討しPL発光強度増大を達成した。今後移動層からのキャリア引き抜き効率を向上させセル特性向上、Siとのタンデム化を目指す。

C. モノリシックタンデム太陽電池結晶成長検討においては、課題(5)「InGaN厚膜化に伴う相分離の抑制」、課題(6)「InGaN/AlN/pn-Si構造の電氣的・光学的特性の評価」に取り組んだ。(5)においてはIn組成0.3のInGaNの厚膜成長にて相分離が発生すること、相分離の発生は理論予測と合致すること、低温(600℃)での結晶成長にて相分離が抑制可能であること、を見出した。(6)においてはInGaN層成長前の熱処理がSiボトムセルの特性に大きく影響すること、AlN中間層の抵抗を低減させること、を見出した。今後はこれらの知見をもとに、モノリシックタンデム太陽電池の実現、特性向上を目指す。

§ 3. 成果発表等

(3-1) 原著論文発表

論文詳細情報(国際)

1. N. Watanabe, H. Yokoyama, and N. Shigekawa, "Observation of Negative Differential Resistance in a GaN/AlGa_xN/GaN: Possible Tunneling Junction Using Polarization", Jpn. J. Appl. Phys. vol. 52 pp. 08JN03-1-08JN03-3, 2013. (DOI: 10.7567/JJAP.52.08JN03)
2. J. Liang, S. Nishida, M. Morimoto, and N. Shigekawa, "Surface-activating-bonding-based low-resistance Si/III-V junctions", Elec. Lett. vol. 49, no. 13, pp.830-832, 2013 (DOI: 10.1049/el.2013.1553)
3. A. Yamamoto, A. Mihara, N. Shigekawa, and N. Narita, "Marked suppression of In incorporation in heavily Si-doped In_xGa_{1-x}N (x~0.3) grown on GaN/α-Al₂O₃ (0001) template", Appl. Phys. Lett. vol. 103, pp.082113-1-082113-4, 2013 (DOI: 10.1063/1.4819075).
4. Y.D. Zheng, A. Mihara, A. Yamamoto, "Analysis of In_xGa_{1-x}N/Si p-n heterojunction solar cells and the effects of spontaneous and piezoelectric polarization charges", Applied Physics Letters, Vol. 103, 153509, 2013 (DOI: 10.1063/1.4824885)
5. J. Liang, M. Morimoto, S. Nishida, and N. Shigekawa, "Band structures of Si/InGaP heterojunctions by using surface-activated bonding", Phys. Status Solidi C vol. 10 pp. 1644-1647, 2013 (DOI: 10.1002/pssc.201300235).
6. Md. Arafat Hossain, Md. Rafiqul Islam, M. K. Hossain, A. Hashimoto, A. Yamamoto, "Dislocation reduction in heteroepitaxial In_xGa_{1-x}N using step-graded interlayer for future solar cells", Materials for Renewable and Sustainable Energy, Vol. 2, 20, 2013 (DOI :10.1007/s40243-013-0020-3).
7. J. Liang, T. Miyazaki, M. Morimoto, S. Nishida, and N. Shigekawa, "Electrical properties of Si/Si interfaces by using surface-activated bonding", J. Appl. Phys. vol. 114 pp. 183703-1-183703-6, 2013 (DOI: 10.1063/1.4829676).
8. A. Yamamoto, M. T. Hasan, A. Mihara, N. Shigekawa, and M. Kuzuhara, "Phase separation of thick (~1 μm) In_xGa_{1-x}N (x~0.3) grown on AlN/Si (111): Simultaneous emergence of metallic In-Ga and GaN-rich InGaN", Appl. Phys. Express vol. 7 pp.

035502-1-035502-4, 2014 (DOI: 10.7567/APEX.7.035502).

9. N. Shigekawa, M. Morimoto, S. Nishida, and J. Liang, "Surface-activated-bonding-ased InGaP-on-Si double-junction cells", Jpn. J. Appl. Phys. vol. 53 pp.04ER05-1-4ER05-4, 2014 (DOI: 10.7567/JJAP.53.04ER05).

10. S. Nishida, J. Liang, M. Morimoto, N. Shigekawa, and M. Arai, "I-V characteristics in surface-activated bonding (SAB) based Si/SiC junctions in raised ambient temperatures", Materials Science Forum vol. 778---780 pp. 718-721, 2014 (DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.778-780.718)

11. N. Shigekawa, J. Liang, N. Watanabe, and A. Yamamoto, " Fabrication of nitride/Si tandem cell structures with low environmental burden by surface activated bonding", Physica Status Solidi C (in press).

12. N. Shigekawa, J. Liang, and N. Watanabe, "Demonstration of Nitride-on-Phosphide Hybrid Tandem Solar Cells by Using Surface-Activated Bonding", Proc. 2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), pp.2470-2473, 2014 (DOI:10.1109/VSC.2013.6744976).

13. A. Yamamoto, A. Mihara, N. Narita, N. Shigekawa, "Effects of MOVPE InGaN growth conditions on the solar cell properties of p-on-n structure Si substrate", Technical Digests of the 23rd International Photovoltaic Science and Engineering Conference, Oct. 28-Nov. 1, 2013, Taipei, Taiwan, Paper No. 4-O-11 1377.

(3-2) 知財出願

① 平成 25 年度特許出願件数 (国内 4 件)

② CREST 研究期間累積件数(国内 9 件)