

「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

H23 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作製プロセス検討

(2)「NTT」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、主任研究員)
- ② 研究項目
  - ・ハイブリッドタンデムセル結晶成長検討

(3)「福井大学」グループ

- ① 主たる共同研究者: 山本 あき勇 (福井大学工学研究科、教授)
- ② 研究項目
  - ・モノリシックタンデムセル結晶成長検討

## §2. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(3-1)に対応する)

(ハイブリッドタンデムセル結晶成長・作製プロセス検討)

(研究の狙い) シリコン上ハイブリッドタンデムセル実現に向けて、電気特性、ウェハプロセスとの整合性の両面から、タンデムセル実現に必須であるトンネル接合作製手法を探索する。結晶成長においてはトップセルへの適用を目指し InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 多重量子井戸(MQW)構造の結晶性とセ

ル特性の相関明確化、P系半導体によるトップセルバンドギャップ (1.8 eV) の実現を狙う。

(研究進捗・成果) InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> MQW 構造が太陽電池特性へ及ぼす影響について検討した。InGa<sub>N</sub> 井戸層の In 組成・層厚を一定とし Ga<sub>N</sub> 障壁層の厚みを変えた MQW の時間分解 PL を室温で測定し(図 1)、薄層バリア(層厚 3nm)の試料における光励起キャリア寿命が長いことを見出した。これら MQW を吸収層とするセルを作製しその短絡電流値とキャリア寿命差の相関を明らかにした。更に MQW におけるペア数増により光励起キャリアの長寿命化を実証した。

P 系半導体を用いた検討では、シリコンボトムセルとの組み合わせで高い変換効率が得られるバンドギャップが 1.8 eV 以下のト

ップセルの構成要素として、これまで報告例のない歪 InGaP/InGaP MQW を考案し、MOMBE 法により成長した。室温における PL 発光のピークエネルギーは 1.7~1.72 eV であり、1.8 eV 以下

のバンドギャップが得られた(図 2(a))。さらに、InGaP 井戸層の成長速度を上げることにより、発光ピーク強度を増大させ、半値幅を減少できることが分かった(図 2 (b))。これらの結果を国際会議(1 件)、国内学会(招待講演 1 件、一般講演 3 件、ポスター 1 件)にて報告するとともに特許出願(3 件)を行った。表面活性化ウエハボンディング法により、n 型 Si/n 型 Si 貼合せ構造、n 型 Si/n 型 Ga<sub>N</sub> 貼合せ構造、n 型 Si/p 型 Si 貼合せ構造を作製し、その電流・電圧特性を評価した。n 型 Si/n 型 Si 貼合せ構造および n 型 Si/n 型 Ga<sub>N</sub> 貼合せ構造は、室温でオーミック性を有する電流-電圧特性を示した。n 型 Si/p 型 Si 貼合せ構造は pn 接合と同様の非対称な電流-電圧特性を示した。貼合せ構造のダイシング耐性、熱ストレス耐性(±200 °C)を検証した。これら結果を国内学会において報告した(一般講演 1 件)。左記検討に加えて、ボトムセルの予備検討(イオン注入によるシリコンセル作製・セル動作確認)、トップセル用 p 型窒化物オーミック形成条件検討を行った。

(今後の見通し) InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> MQW のバンドギャップ短縮化、InGaP MQW を用いた単体セル作製、高濃度ドーパ窒化物系、P 系半導体/低抵抗 Si 貼り合せによるトンネル接合特性検証を行う。これらを統合し、シリコンをボトムセルとするハイブリッドタンデムセル作製・動作確認を行う。

(モノリシックタンデムセル結晶成長)

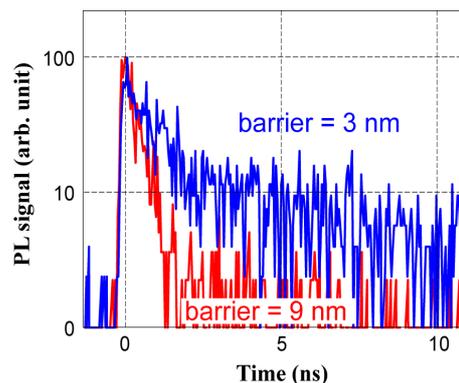


図 1. InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> MQW の時間分解 PL 測定結果。InGa<sub>N</sub> 井戸層の In 組成および層厚はいずれの試料でもそれぞれ 14% および 4nm。

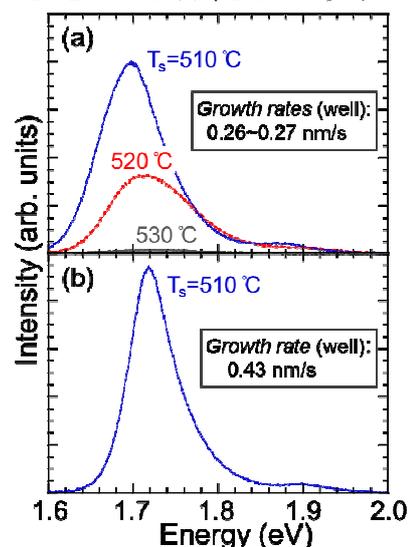


図 2. InGaP/InGaP MQW の PL スペクトル。(a) 成長速度がほぼ一定の下での成長温度に対する依存性、(b) 成長温度 510°C で成長速度を上げて成長した場合。

(研究の狙い) 変換効率 30%以上の変換効率が期待できる InGaN(1.8eV)/Si(1.1eV) 2 接合モノリシックタンデム太陽電池の実現を目指して、①p-Si(111)基板上への In 組成 $\sim 0.5$  の n-InGaN のエピタキシャル成長技術の開発および n-InGaN/p-Si 構造の電気的特性の評価、②pn 接合を形成した n-Si(111)基板上への InGaN 膜の MOCVD 成長について検討する。

(研究進捗・成果) 中間層として AlN を用いて、p-Si(111)基板上への InGaN の MOCVD 成長について検討した。図 3 の X 線  $2\theta/\omega$  回折図形に示すように、相分離や In 析出なしに In 組成 $\sim 0.5$  の単結晶膜成長を実現した(図 3)。n-InGaN 成長膜と p-Si

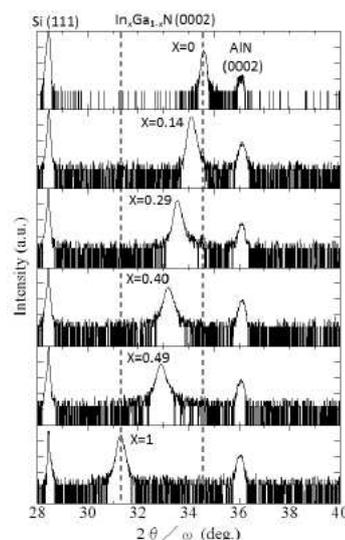


図 3. Si(111)基板上に形成した InGaN の X 線  $2\theta/\omega$  回折図形

基板との間の電流-電圧特性を評価し、n-InGaN と p-Si との間にはオーム性の電流-電圧特性が得られること、電流-電圧特性から求められる抵抗値が InGaN の In 組成の増大とともに顕著に低下することを確認した(図 4)。本結果は今後作製を計画している InGaN/Si2 接合タンデム太陽電池では、新たにトンネル接合を形成する必要がないことを意味する。

上記の成果を受けて、B イオン注入により表面に pn 接合を形成した n-Si(111)基板上への InGaN 膜の成長の検討を開始した。成長した InGaN 膜の X 線回折測定結果 ( $2\theta/\omega$ , ロッキングカーブ)により、GaN/サファイアテンプレートなどの場合と同様、相分離等の問題もなく InGaN 単結晶膜が形成可能であること、その結晶性は GaN テンプレートや通常の Si(111)基板上の InGaN 膜の結晶性と同等であることを確認した。これらの結果を国際会議(2件)国会学会(口頭発表 4 件、ポスター 1 件)にて報告の他、論文発表した[1]。

(今後の見通し) InGaN への Mg ドーピングならびに InGaNpn 接合形成を検討する。さらに InGaN/Si 2 接合タンデム太陽電池の評価と高性能化に関する検討を行う。

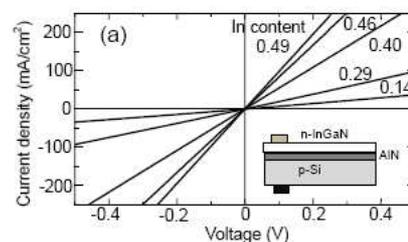


図 4. n-InGaN/p-Si 間の電流-電圧特性

### §3. 成果発表等

#### (3-1) 原著論文発表

1. A. G. Bhuiyan, T. Esaki, A. Mihara, K Sugita, A. Hashimoto, A. Yamamoto, N. Watanabe, H. Yokoyama, N. Shigekawa “MOVPE Growth of InGaN on Si(111) Substrates With an Intermediate Range of In Content”, *Phys. Status Solidi C* **9**, No. 3-4, pp. 670-672, 2012 (DOI: 10.1002/pssc.201100355)

#### (3-2) 知財出願

- ① 平成 23 年度特許出願件数(国内 3 件)
- ② CREST 研究期間累積件数(国内 4 件)