

重川 直輝

NTT フォトニクス研究所 テラビットデバイス研究部・主幹研究員

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. 研究実施の概要

高効率、高集光倍率、低環境負荷の多接合タンデム太陽電池を実現するための要素技術を構築する。高集光倍率実現のために高耐熱性、低環境負荷実現のためにヒ素使用量の少ない、究極的にはヒ素を含まないタンデム太陽電池の実現を目指す。シリコンセル上の窒化物半導体、リン系半導体等の異種材料タンデム太陽電池を実現手段の候補とし、結晶成長及びセルプロセスの両面で検討を行う。

結晶成長においては、窒化物結晶成長において InGaN のバンドギャップの In 組成依存性等の結晶成長に関する基盤的な知見を獲得するとともに、InGaN/GaN 多重量子井戸セルの温度依存性評価により高温環境下での可能性を明らかにした。更に白色バイアス光源を用いて、高光入射時の特性検証のための予備実験を行った。リン系半導体成長については、GaAs 基板上の InGaP の成長を検討し、基板前処理等の結晶成長に関する基盤的な知見を獲得した。セルプロセス検討においては、タンデムセル設計の初期段階として 2 接合タンデムセルの特性計算を行うとともに、ハイブリッドタンデムセル実現に向けてメカニカルスタック技術の予備検討を行った。

今後は、(1)タンデムセル実現のためのセル構造結晶成長検討、(2)シリコンとのメカニカルスタック技術の検討、(3)モノリシックタンデムセル実現のためのシリコン上窒化物結晶成長の検討、を進める。

§2. 研究実施体制

(1)「NTT」グループ

① 研究分担グループ長: 重川 直輝 (NTTフォトニクス研究所テラビットデバイス研究部、主幹研究員)

② 研究項目

- ・可視光～赤外光バンドギャップ窒化物半導体等材料のエピタキシャル結晶成長技術
- ・モノリシックなシリコン／窒化物タンデム太陽電池の設計・作製技術
- ・メカニカルスタック技術

§3. 研究実施内容

1) 結晶成長検討

(窒化物半導体結晶成長)

InGaN の In 組成とバンドギャップに関する知見獲得のための基礎検討を実施した。III 族原料全供給量における In 原料(トリメチルインジウム、TMIn)の供給量の割合(気相組成)をコントロールすることにより、InGaN 層における In 組成(固相組成)を 0~0.4 の範囲で変化させることが可能であることを確認した上で、InGaN 層の吸収スペクトルからバンドギャップを見積もった。バンドギャップの In 組成に対する依存性が In 組成 0~0.4 の範囲で他機関報告を再現することを確認した(図1)。

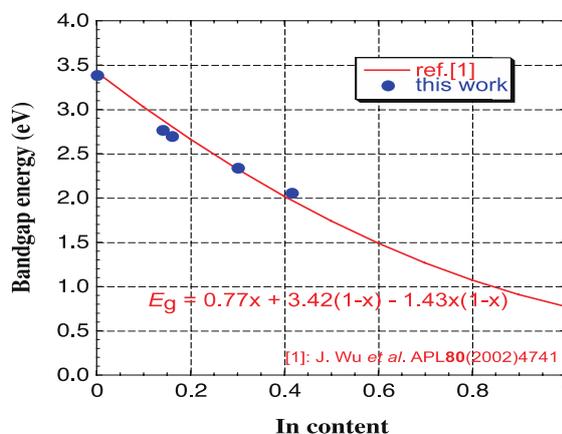


図1 InGaN におけるバンドギャップの In 組成依存性

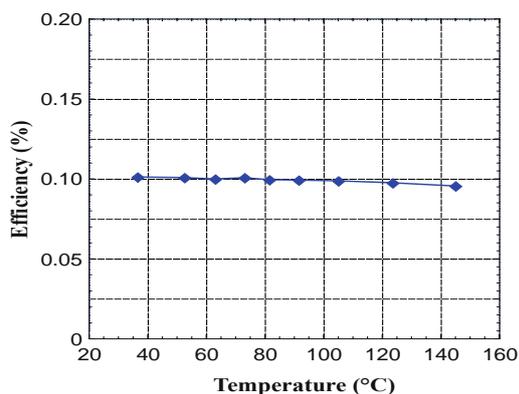


図2 InGaN/GaN 多重量子井戸セルにおける発電効率のセル温度依存性

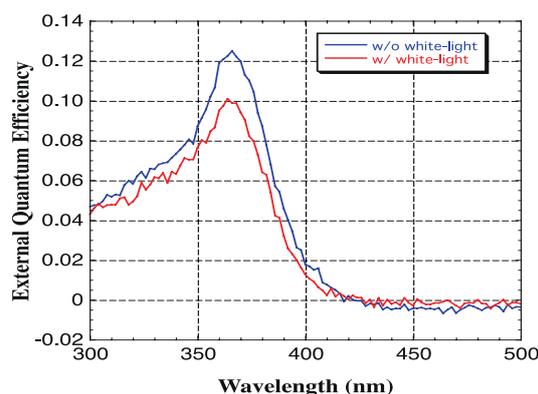


図3 InGaN/GaN 多重量子井戸セルにおける分光感度特性

窒化物半導体における高い耐熱性は集光型太陽電池への応用上有利と期待される。その予備的な知見を得るため、InGaN(In 組成 0.14、2 nm)/GaN(13 nm) 多重量子井戸構造吸収層(16 周期、240 nm)を有するセルを、ペルチェ素子を用いた温度コントローラにより温度変化させ、発電特性の温度依存性を調べた。セル温度上昇とともに開放電圧が低下し短絡電流が増大する傾向を得た。これらが相殺しあって、発電効率 η の温度依存性は非常に小さく、その温度係数 $\Delta\eta/\eta$ は $-0.05\%/^{\circ}\text{C}$ (一般的な単結晶 Si 太陽電池では $-0.65\%/^{\circ}\text{C}$) であった(図2)。これらの結果を学会、研究会にて報告した。

集光型太陽電池は高光入射条件下で使用される。入射光強度依存性評価のための予備検討として、InGaN/GaN 多重量子井戸構造の吸収層を有する太陽電池セルにおいて、 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ の

白色バイアス光の照射有無での分光感度特性の相違を調べた。バイアス光照射下で外部量子効率が若干低下する傾向が示された(図3)。

(リン系半導体結晶成長)

リン系化合物半導体系の多接合タンデム太陽電池用の基礎技術として、GaAs 基板に格子整合する InGaP 結晶の成長条件の検討を MOCVD 法ならびに MOMBE 法の2つの方法で開始した。成長条件の検討の前段階として GaAs 基板の成長前処理に関する検討を行い、基板の種類やサブライヤーによっては、前処理後の GaAs 基板に表面荒れが起こることが分かった。GaAs 基板の選定及び成長前処理方法を検討し、上記の基板前処理による表面荒れは解消した。

2) セルプロセス検討

(メカニカルスタック技術予備検討)

メカニカルスタック技術の予備検討として、低抵抗n型シリコン基板(抵抗率 0.01-0.02 Ωcm)とn型ドーパ GaN エピタキシャル結晶層(不純物濃度 $8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)の貼り合わせ構造の電気特性を評価した。図4に示す通り室温でオーミック特性に近い電流・電圧特性を得た。本結果は異種半導体材料の貼り合わせによるハイブリッドタンデムセル実現の可能性を示す。線形性の改善及び低抵抗化が今後の課題である。

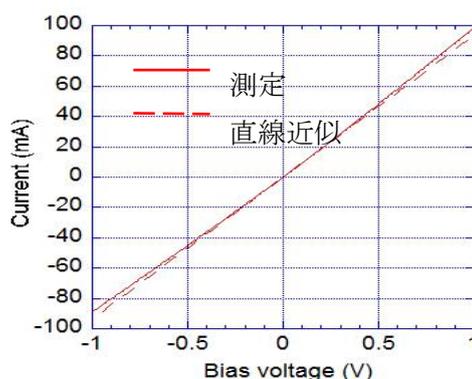


図4 シリコン/GaN 貼り合わせ構造の電流電圧特性

(タンデムセル用シリコン太陽電池構造設計)

多接合タンデムセルにおいては、各サブセルの短絡電流の内の最小の値が多接合タンデムセルの短絡電流となる。また、トップセル及びミドルセルにて波長の短い光が吸収されるため、シリコンからなるボトムセルへの入射光スペクトルの形状がシリコンセルを単独で用いる場合と異なる。タンデムセル設計の予備検討として、理想状態における窒化物/シリコン2接合タンデムセルの発電効率を計算によって求めた。窒化物サブセルのバンドギャップは 2.3 eV、吸収層厚さは 0.2 μm とした。表 1 のとおり、n-on-p 構造、p-on-n 構造いずれにおいても 14-15%の効率が期待される。

構造	シリコン基板 不純物濃度 (cm^{-3})	シリコンサブセル開放 電圧(V)	シリコンサブセル短絡電流 (mA/cm^2)	窒化物サブセル開放 電圧(V)	窒化物サブセル短絡電流 (mA/cm^2)	効率 (%)
n-on-p	3.63E16	0.588	28.24	1.875	6.32	14.0
p-on-n	4.32E16	0.622	26.10	1.87	6.57	14.7

表 1 窒化物/シリコン 2 接合タンデムセルの発電効率計算結果 (シリコン接合深さ 0.5 μm、窒化物: バンドギャップ 2.3 eV、吸収層厚 0.2 μm、不純物濃度 $N_A = 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 、 $N_D = 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)

§4. 成果発表等

(4-1) 知財出願

- ① 平成22年度特許出願件数(国内 1件)
- ② CREST 研究期間累積件数(国内 1件)