

戦略的創造研究推進事業 CREST  
研究領域「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」  
研究課題「シリコン基板上窒化物等異種材料タン  
DEM太陽電池の研究開発」

## 研究終了報告書

研究期間 平成22年10月～平成28年3月

研究代表者：重川 直輝  
(公立大学法人 大阪市立大学  
大学院工学研究科、教授)

## § 1 研究実施の概要

### (1)実施概要

当チームでは高効率かつ低コストの太陽電池の実現を目指して、シリコンセルをボトムセルとし、化合物半導体(窒化物系、As/P 系)セルをトップセル・ミドルセルとするタンデム太陽電池の研究開発を行った。短期間～中期間での技術実証を目標とするシリコンセル上化合物半導体セル貼り合せ技術(ハイブリッド)と、中長期的なブレークスルーを目標とするシリコンセル上窒化物半導体セル結晶成長技術(モノシック)の2系統に分けて研究を進めた。

ハイブリッドタンデムセル研究においては、研究分野を「従来技術により結晶成長されるトップセル、ミドルセル構造とシリコンセルを表面活性化ボンディング(SAB)法により貼りあわせることによりタンデム化を目指す」デバイスプロセス研究と、「トップセル、ミドルセルに適したバンドギャップの実現を目指す」結晶成長研究に大別し、それぞれを大阪市立大・重川グループ及びNTT・渡邊グループにおいて実施した。モノシックタンデムセル研究においては、福井大・葛原グループ(平成25年3月末まで山本グループ)において、InGa<sub>N</sub>/Siタンデムセル構造の成長を目指しInGa<sub>N</sub>層の結晶成長の研究が行われた。

大阪市立大・重川グループにおいては、Si系接合を用いてSAB界面の基本特性把握を行ったうえで、GaAs/Si接合界面のバンドラインナップ解明、界面抵抗低減の検討を行った。Si系接合を用いた検討により、SAB界面にバリア障壁が形成されること、熱処理によってバリアが低くなること、を示した。この結果は表面・界面の電気特性に対して表面活性化が影響を与え、一方で熱処理によりその影響が軽減されることを実験的に示している。GaAs/Si接合については、バンドプロファイルが、GaAsの伝導帯がSiの伝導帯と比較して高エネルギー位置にあるタイプIIの特徴を有することを示した。また、異なる不純物濃度の基板を接合し電流-電圧特性を評価することで、不純物濃度と界面抵抗の関係をはじめとして系統的に調べた。実効的不純物濃度の増加に伴い界面抵抗が低下することを示し、pn接合における最も低い抵抗値として0.13 Ωcm<sup>2</sup>を得(p<sup>+</sup>-GaAs/n<sup>+</sup>-Si)、n型アイソタイプヘテロ接合において接合後のアニールにより0.074 Ωcm<sup>2</sup>を得た。本結果はAM1.5G/one sun条件下で許容範囲内の界面抵抗値が実現可能であることを意味する。GaAs基板上に結晶成長したInGaP/GaAs2接合セルエピ構造とSiボトムセル構造を接合し、GaAs基板の選択エッチング、メサエッチング、アニール等の半導体デバイスプロセスを経て3接合タンデム太陽電池プロトタイプを作製した。電流-電圧特性の測定から変換効率≈26%を得た。これによりSAB法とデバイスプロセスとの親和性が実証された。分光感度特性を測定することによりタンデム太陽電池の効率向上にはSiセル構造最適化、特性向上、接合界面特性の設計性向上が必要であることが示された。

NTT・渡邊グループにおいては、InGaPとGaAsに代わりうるトップセル、ミドルセルの候補として、窒化物半導体及び歪InGaP多重量子井戸の可能性を探索した。窒化物半導体に関しては、分極を活用したトンネル接合動作を実証した。InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>多重量子井戸を受光層として使用し、太陽電池特性の測定結果に基づき多重量子井戸中のキャリアの輸送モデルを提案した。InGaP多重量子井戸については、歪補償によりバルクのInGaPと比較して狭いバンドギャップを有する受光層を制御良く実現可能であることを実証した。また、従来知られていなかった成長モードでInGaP一次元細線が成長可能であることを示した。

福井大学・葛原グループにおいては、中間組成のバルクInGa<sub>N</sub>のMOVPE成長の基本検討を行い、基板及び成長温度の最適化によって相分離現象が従来の理論的予測通りに生じることを実験的に示した。さらに、成長温度に依存した相分離の臨界膜厚が存在することを新しく見出した。InGa<sub>N</sub>に添加した不純物がGaサイトにInサイトに均等に取り込まれるのではなくInサイトのみに優先的に取込まれるという、混晶中での特異な不純物挙動を明らかにした。この現象を利用することにより、ワイドギャップなトンネル接合が実現できる可能性があることを明らかにした。セラミック状NH<sub>3</sub>分解触媒を用いた窒化物半導体のMOVPE技術を確立し、400℃程度の低温でInGa<sub>N</sub>のエピタキシャル成長が可能であり、さらに、成長膜中へのC汚染量の大幅低減が可能であることを実証した。本方法が将来のIn<sub>N</sub>関連材料の主要なエピタキシャル成長技術として発展

する可能性がある。また、サファイア基板上に  $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$  セル構造を成長し  $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$  を受光層とする太陽電池動作を実証した。以上により  $\text{InGaN}/\text{Si}$  2 接合タンデムセル結晶成長のための基盤技術を構築した。

これら各グループの研究により、シリコン上高効率タンデムセル・モジュールを実現するために当面重要な技術(ハイブリッド=貼りあわせ)と長いタイムスケールにおいて必須な技術(モノシック=結晶成長)のそれぞれにおいて重要な進展が得られた。今後は、貼り合せ技術を短期～中期のセル・モジュール開発に提供しつつ、結晶成長によるタンデム化実現を目指す中長期的な研究開発ロードマップの中で窒化物半導体成長技術の研究の推進が必要である。

## (2) 顕著な成果

< 優れた基礎研究としての成果 >

### 1. MOVPE成長InGaN膜の相分離現象の解明

概要：MOVPE法によるInGaN膜成長において、基板及び成長温度の最適化によって相分離現象が従来の理論的予測通りに生じることを実験的に示し、これまで実験的に確認され難かった原因を明らかにした。さらに、成長温度に依存した相分離の臨界膜厚が存在することを新しく見出した[A. Yamamoto, et al. J. Crystal Growth, **419**, 64 (2015).]。

### 2. InGaN混晶中でのドナ、アクセプタ不純物の挙動解明

概要：InGaNに添加したSi、MgがGaサイトInサイトに均等に取り込まれるのではなくInサイトのみに優先的に取込まれるという、混晶中での特異な不純物挙動を明らかにした。この現象を利用することにより、ワイドギャップなトンネル接合が実現できる可能性があることを明らかにした[A. Yamamoto, et al. Appl. Phys. Lett. 103 082113 (2013)., A. Yamamoto, et al. Physica Stat. Solidi B, **1-4**, (2015) DOI: 10.1002/pssb.201451736.]。

### 3. 傾斜基板上の量子細線構造の自己形成

概要：GaAs 傾斜基板上に InGaP/InGaP 歪補償多重量子井戸を結晶成長し、Ga 組成の高い領域(障壁領域)内に細線状の形状の In 組成の高い領域(井戸領域)が自己形成されることを見出した。この原因は障壁領域における周期的な膜厚の変調にある。膜厚の変調は特定の結晶面(高指数面)が出現することによるものではなく、基板の傾斜角度や成長条件によって制御できる。この結果は、これまで報告の無い特徴を有する量子細線構造が自己形成できることを示す[満原等 第44回結晶成長国内会議、東京、2014年11月6日～11月8日]。

< 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

### 1. InGaP/GaAs/Si 3 接合タンデム太陽電池プロトタイプの実証

概要：GaAs 基板上に結晶成長した InGaP/GaAs 2 接合セルエビ構造と Si ボトムセル構造を表面活性化接合(SAB)法により接合した。半導体デバイスプロセスを経て 3 接合タンデム太陽電池プロトタイプを作製しタンデム動作を実証した。これにより SAB 法とデバイスプロセスとの親和性が実証された。タンデム太陽電池の変換効率 $\approx 26\%$ を得た。分光感度特性からタンデム太陽電池の効率向上には Si セル構造最適化、特性向上が必要であることが示された [Naoteru Shigekawa, et al. Jpn. J. Appl. Phys. **54**, 08KE03 (2015).]。

### 2. 表面活性化ボンディング法に依る高濃度半導体接合における界面抵抗の低減

概要：表面活性化ボンディング法を用いて異なる不純物濃度の基板を接合し、その接合界面抵抗を評価することで、不純物濃度と界面抵抗の関係をはじめて系統的に調べた。同種材料、異種材料接合いずれにおいても実効的不純物濃度の増加に伴い界面抵抗が低下することが分かった。pn 接合における最も低い抵抗値として  $0.13 \Omega\text{cm}^2$  を得た

(p<sup>+</sup>-GaAs/n<sup>+</sup>-Si)。n 型アイソタイプヘテロ接合において 0.074 Ωcm<sup>2</sup>を得た。本結果は、ボンディングにより非集光動作用途において許容範囲内の界面抵抗値が実現可能であることを意味する[J. Liang, et al. Elec. Lett., 49 (13) pp.830-832 (2013)、Jianbo Liang, et al. Jpn. J. Appl. Phys. **54**. 030211 (2015).]。

### 3. InN系窒化物半導体のNH<sub>3</sub>分解触媒援用MOVPE技術の確立

概要：セラミック状NH<sub>3</sub>分解触媒を用いた窒化物半導体のMOVPE技術を確立し、400°C程度の低温でInGaNのエピタキシャル成長が可能であり、さらに、成長膜中へのC汚染量の大幅低減が可能であることを実証した。本方法が将来のInN関連材料の主要なエピタキシャル成長技術として発展する可能性がある[K. Sugita, et al. Jpn. J. Appl. Phys. **52**, 8, 2013 (08JD04).]。

## § 2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

### ① 「大阪市立大学」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
重川 直輝	大阪市立大学大学院 工学研究科	教授	H23.10～
梁 剣波	同上	有期博士研究員	H24.4～H27.3
		講師	H27.4～

研究項目

・ハイブリッドタンデムセルプロセスの研究

### ② 「NTT」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
重川 直輝	日本電信電話株式会社 フォトニクス研究所	主幹研究員	H22.10～H23.9
渡邊 則之	日本電信電話株式会社 先端集積デバイス研究所	主幹研究員	H22.10～H28.3 (H23.10 より共 同研究者)
横山 春喜	同上	主任研究員	H22.10～H27.3
満原 学	同上	主任研究員	H22.10～H28.3
大磯 義孝	日本電信電話株式会社 フォトニクス研究所	主任研究員	H22.10～H23.9
伊賀 龍三	同上	主任研究員	H22.10～H23.9
山本 あき勇	福井大学大学院 工学研究科	教授	H22.10～H23.3

研究項目

・ハイブリッドタンデムセル結晶成長の研究

### ③ 「福井大学」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加期間
山本 あき勇	福井大学 産学官連携本部	客員教授 (H23.4～H24.3 工学研究科教 授。H24.4～ H26.3 工学研究 科特命教授)	H23.4～H28.3 (H23.3 まで重 川グループ)
Ashraful Ghani Bhuiyan	福井大学大学院 工学研究科	客員教授	H23.4～H23.9
杉田 憲一	福井大学大学院 工学研究科	CREST 博士研究員	H23.4～H23.10
鄭 仰東	福井大学大学院 工学研究科	CREST 博士研究員	H24.4～H25.3

三原 章宏	福井大学大学院 工学研究科	CREST 研究員	H24.4～H26.3
TANVIR MD. HASAN	福井大学大学院 工学研究科	CREST 博士研究員	H25.10～H26.8
葛原 正明	福井大学大学院 工学研究科	教授	H25.4～H28.3
野村 裕之	福井大学大学院 工学研究科	CREST 研究補佐員	H26.4～H28.3
児玉 和樹	福井大学大学院 工学研究科	CREST 博士研究員	H27.4～H28.3

#### 研究項目

- ・ シリコン基板上モノリシック窒化物半導体タンデム太陽電池の研究開発

(2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について  
ハイブリッドタンデムセルプロセスの研究においては、

- InGaP 系サブセルと Si ボトムセルのハイブリッド多接合セル研究開発に関して、チーム外の化合物半導体太陽電池メーカーと協力関係を構築し、同社よりトップセル、ミドルセルエピ構造を入手する体制を構築した。
- 産学連携で常温接合による界面創成を目的とする学術振興会産学協力研究委員会(接合界面創成技術第 191 委員会)の設立(2015 年 10 月発足)に参加している。今後、常温接合技術の異種半導体界面物性の解明、同技術の半導体デバイスプロセスへの導入、新デバイス創成を目指し、幹事として活動していく。
- 表面活性化接合の太陽電池以外の応用可能性につき、国内の複数企業から問い合わせを受け、共同研究を展開中である。1 件の共同研究においてワイドギャップ系材料へ SAB 技術の用途が拡大する可能性を探索している。
- 国内、国外の複数大学より接合依頼、試料提供の申し出を受けた。福井大・塩島准教授と共同で Si/SiC 接合界面の photoemission spectroscopy 測定を行い、共著での国際会議を行うなど分野の活性化に貢献している。

モノリシックタンデムセル太陽電池の研究開発においては、

- MOVPE 成長 InGaN の物性研究に関する連携: 国内外研究機関からの要請に基づき、作製した高品質 InGaN 膜を提供し、低温フォトルミネッセンス物性評価(ロシア Ioffe 物理学研究所)、高圧下での発光特性評価(ポーランド UNIPRESS 研究所)、ラマン分光評価(京都工芸繊維大学)、低温超伝導物性評価(東海大学)等の基礎物性研究の進展に貢献した。
- 窒化物半導体の MOVPE 成長技術の高度化に向けた連携: InN 系混晶半導体の MOVPE 成長技術の高度化に向けて東北大学金属材料研究所との連携を進めた。
- 固体高分子型燃料電池用 InGaN 膜被覆金属セパレータに関する連携: InGaN 膜の高導電性と耐腐食性を生かすことができる燃料電池用金属セパレータの被覆膜として InGaN 膜の応用に関し、福井大学産学官連携本部、地域企業との技術情報の交換など連携を進めた。

### § 3 研究実施内容及び成果

#### 3.1 ハイブリッドタンデムセルプロセスの研究(大阪市立大学 重川グループ)

本グループにおいては、ハイブリッド法による Si セルをボトムセルとする高効率・多(≧3)接合タンデムセルのプロセス研究を行った。中間評価以前の第一ステップでは、高効率化に適するトップ(ミドル)セル材料の絞り込みを行い、中間評価以降の第二ステップにおいて、絞り込んだ材料系について研究を加速した。

第一ステップにおいてはヒ素・リン系化合物半導体(InGaP、(In)GaAs 等)、窒化物系化合物半導体(InGaN)をトップセル、ミドルセルの候補とした。ハイブリッド法の一つとして、表面活性化ボンディング(SAB)法に着目した。同手法は高真空中において Ar ビームを照射することにより試料表面を活性化し、その後に常温でウェハをボンディングするという手法であり、熱膨張係数差に依らず再現性良く異種材料をボンディングすることが可能である。研究開始時点で SAB 法は実装技術の一部とみなされており、半導体デバイスプロセスへの適用例は皆無であった。本計画では SAB 法のタンデム太陽電池への応用可能性を明確化するために下記の5つのカテゴリについて研究を行った。

##### SAB 法による半導体接合形成技術

- 3.1.(1) 接合界面特性制御技術
- 3.1.(2) 接合界面低抵抗化技術
- 3.1.(3) タンデム太陽電池作製技術・設計技術
- 3.1.(4) SAB 技術の適用先開拓

以下、3.1.(1)から 3.1.(5)の各項目について主な成果を位置づけとともに示す。

#### 3.1.(1) SAB 法による半導体接合形成技術

##### 3.1.(1).1 Si/Si 接合の作製

Si 基板とサファイア基板の接合により、基板全面に接合が形成されることを確認した。

Si/Si 接合を作製し、ダイシングを行ってもチップの飛び等の破損が生じないことを検証した(図 A-1、A-2)。これらの結果は SAB 法による接合が半導体デバイスプロセスと整合しうることを示している。TEM 観察により、接合後の界面には厚さ数 nm のアモルファス層が形成されること、接合後の熱処理(1000 °C)によりアモルファス層が再結晶化することを確認した(図 A-3(a)(b))【論文 42】。

アモルファス層の形成と熱処理に依る消失は他機関の先行研究と一致する。

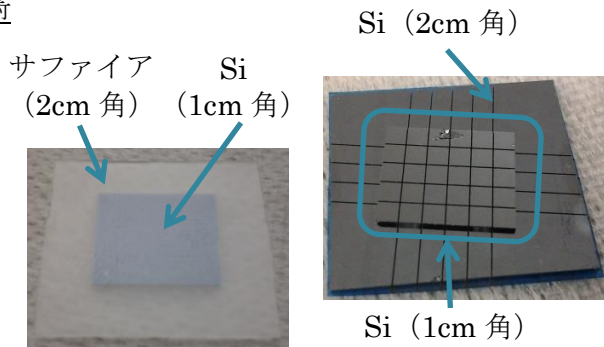


図 A-1. Si 基板とサファイア基板の接合。

図 A-2. Si 基板/Si 基板接合のダイシング。

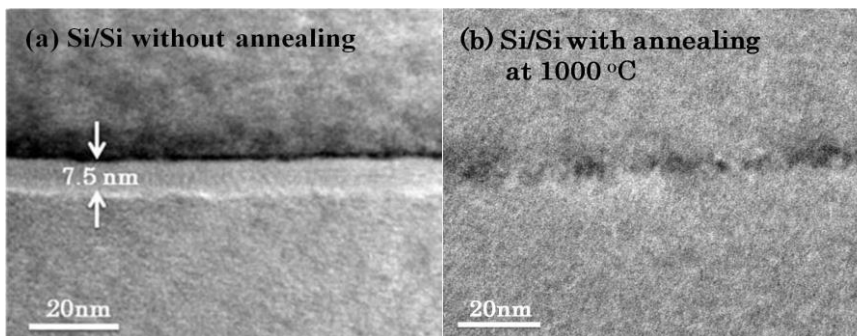


図 A-3. Si/Si 接合の断面 TEM 写真。(a) : 接合直後、(b) : 1000°Cアニール後。

### 3.1.(1).2 Ar ビーム照射による Si 基板表面の形状変化

Arビーム照射によって半導体表面に生ずる形状変化を Si 基板表面の AFM により評価した。表面平均荒さ Ra を図 A-4 に示す。長時間の照射により表面の Ra が増加することが分かる。あわせて Ar ビーム照射により 2-3 nm/min. 程度のレートで Si 基板表面がエッチングされることを明らかにした。

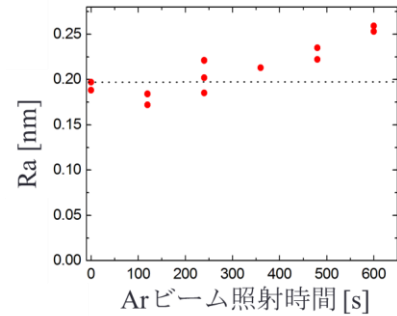


図 A-4. Si 基板表面の Ra の Ar ビーム照射時間依存性。

### 3.1.(1).3 接合の電気特性の検証【原著論文 23】及び Ar ビーム照射による接合界面電気特性への影響

p 型 Si 基板と n 型 Si 基板の接合の電気特性を測定し、pn 接合としての非対称な電流-電圧特性を示すことを確認した。p-Si(100)基板(基板濃度  $8.7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ )と n-Si(100)基板(基板濃度  $2.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ )の pn 接合(p-Si/n-Si 接合)と p<sup>-</sup>-Si(100)基板(基板濃度  $2.4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ )と n<sup>+</sup>-Si(100)基板(基板濃度  $2.6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ )の pn 接合(p<sup>-</sup>-Si/n<sup>+</sup>-Si 接合)の電流-電圧特性の温度依存性を評価した結果を図 A-5 及び図 A-6 に示す。p-Si/n-Si 接合における逆バイアス電圧に対する電流-電圧特性の勾配は温度に依存せず、従ってそのキャリア輸送特性は、Trap Assisted Tunnelling モデルにより説明可能と考えられる。一方 p<sup>-</sup>-Si/n<sup>+</sup>-Si 接合においては、温度増加により逆バイアス電圧に対する電流-電圧特性の勾配は減少している。温度依存性の解析の結果、逆方向バイアス電圧に対するキャリア輸送特性は Poole-Frenkel モデルにより説明可能であることを明らかとした。適応されるモデルの違いは p-Si/n-Si 接合における各層の空乏層厚さがほぼ同程度(無バイアス電圧時の空乏層の厚さ:p-Si(100)基板:5.8 nm、n-Si(100)基板:20.6 nm)であるのに対して、p<sup>-</sup>-Si/n<sup>+</sup>-Si 接合の各層の空乏層厚さに著しい違いがある(無バイアス電圧時の空乏層の厚さ:p<sup>-</sup>-Si(100)基板:72.6 nm、n<sup>+</sup>-Si(100)基板:0.7 nm)ためと考えられる。

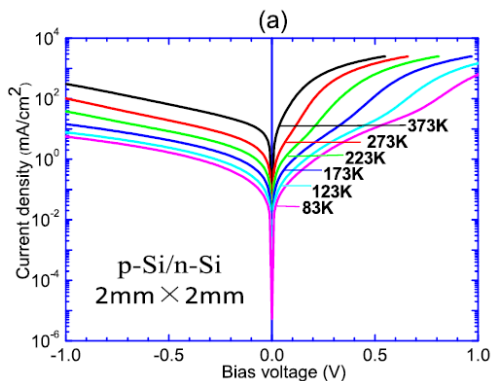


図 A-5. p-Si/n-Si 接合の電流-電圧特性の温度依存性。

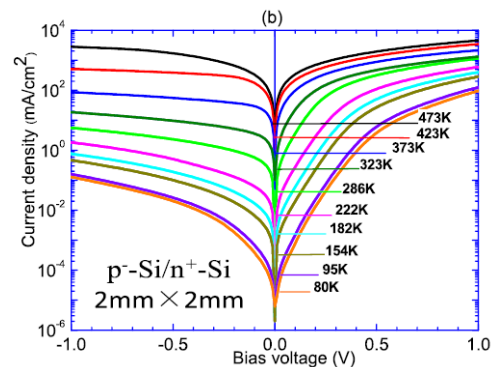


図 A-6. p<sup>-</sup>-Si/n<sup>+</sup>-Si 接合の電流-電圧特性の温度依存性。

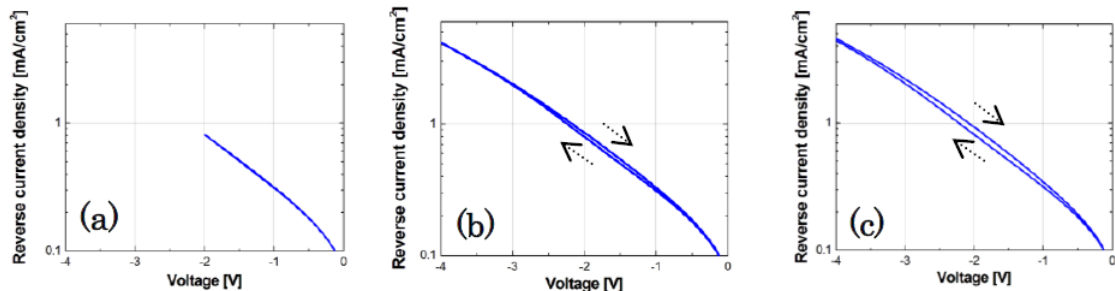


図 A-7. 300 秒照射後の p-Si/n-Si 接合の逆方向の電流-電圧特性。(a) : 0 V → -2 V → 0 V。(b) : 0 V → -4 V → 0 V。(c) : 0 V → -8 V → 0 V。



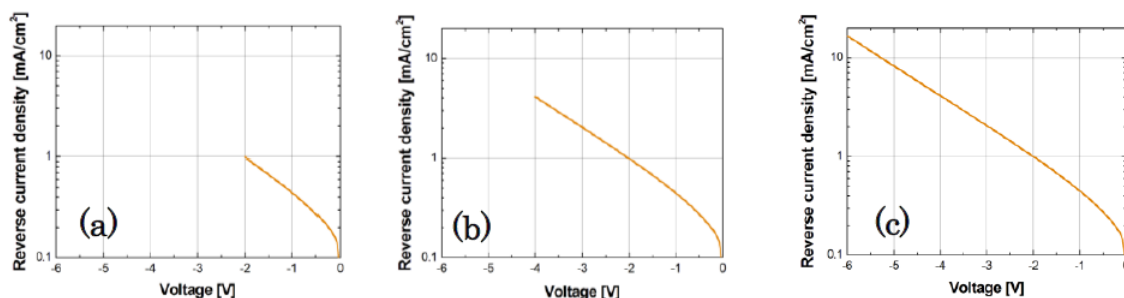


図 A-8. 300 秒照射後の  $p^-$ -Si/ $n^+$ -Si 接合の逆方向の電流-電圧特性。(a) : 0 V $\rightarrow$ -2 V $\rightarrow$ 0 V。  
(b) : 0 V $\rightarrow$ -4 V $\rightarrow$ 0 V。(c) : 0 V $\rightarrow$ -8 V $\rightarrow$ 0 V。

これら 2 種類の pn 接合の電流電圧特性に対する Ar ビーム照射の効果を照射時間 300 秒の試料における逆バイアス電圧に対する電流-電圧特性のヒステリシスの有無により検証した。p-Si/n-Si 接合においては逆バイアス電圧の増加によりヒステリシスが発生したが、 $p^-$ -Si/ $n^+$ -Si 接合においては同一バイアス条件下ではヒステリシスの発生は認められなかった(図 A-7 及び図 A-8)。この結果は長時間の Ar ビーム照射によって接合界面にトラップが形成され、そのトラップが p-Si/ $n^+$ -Si 接合における逆バイアス電圧に対する電気特性に影響を与えていることを示唆し、そのキャリア輸送特性が Trap Assisted Tunnelling モデルにより説明可能という上の結果と整合している。

上記の他、基板表面に凹凸を有し接合不可能なウェハを研磨することにより、表面に研磨痕が生ずるにもかかわらず表面が擬似的に平坦化されることにより接合が可能となることを確認した。これらの結果はタンデム太陽電池プロセスへの SAB 法を適用する上で基盤となる知見である。

### 3. 1. (2) 接合界面特性制御技術

#### 3. 1. (2). 1 Ar ビーム照射によるショットキ特性の変化

n-Si 基板、p-Si 基板のそれぞれの一部に Ar ビームを照射し、照射後に Au を蒸着してショットキダイオードを形成した。Au/n-Si と Au/p-Si のそれぞれにおいて、ショットキ電極蒸着前の照射の有無が電気特性に及ぼす影響を調べた。それらの室温における電流-電圧特性を図 A-9 及び図 A-10 に示す。Au/n-Si においては Ar ビーム照射によって逆方向電流が著しく増加している一方で、Au/p-Si においては逆方向電流が減少し、半導体基板の極性によって逆の傾向があることが分かった。Si 基板への Ar イオン注入によっても類似の結果が得られるとの報告がある【S. Ashok and K. Giewont, Jpn. J. Appl. Phys. 24, L533 (1985).】。同報告中では、Ar イオン注入によって Si 表面にドナ型の欠陥が導入されるとの議論がなされており、今回の結果も同様の解釈が可能である。今回の結果は中性原子ビームによるショットキ特性の変化の報告としては初めての物である。

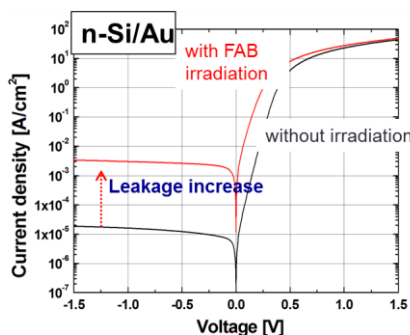


図 A-9. Au/n-Si ダイオードの電流-電圧特性に対する Ar 照射効果。

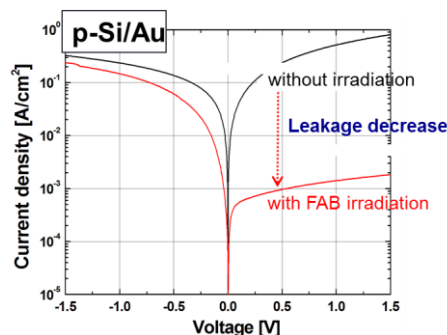


図 A-10. Au/p-Si ダイオードの電流-電圧特性に対する Ar 照射効果。

それらの室温における電流-電圧特性を図 A-9 及び図 A-10 に示す。Au/n-Si においては Ar ビーム照射によって逆方向電流が著しく増加している一方で、Au/p-Si においては逆方向電流が減少し、半導体基板の極性によって逆の傾向があることが分かった。Si 基板への Ar イオン注入によっても類似の結果が得られるとの報告がある【S. Ashok and K. Giewont, Jpn. J. Appl. Phys. 24, L533 (1985).】。同報告中では、Ar イオン注入によって Si 表面にドナ型の欠陥が導入されるとの議論がなされており、今回の結果も同様の解釈が可能である。今回の結果は中性原子ビームによるショットキ特性の変化の報告としては初めての物である。

#### 3. 1. (2). 2 電荷中性点モデルの適用による接合界面電気特性検討及び熱処理による界面準位密度低減の可能性【原著論文 42】

SAB 法により作製される接合界面にはバンドギャップ内に界面準位が発生し、その準位の挙動は接合形成時の Ar ビーム照射、接合後の熱処理に依存すると予測される。上記予測に基づき界面

の電気特性の測定結果を解析し、界面準位の挙動の議論を行った。

解析に際しては以下の仮定を設けた。(1) 電荷中性点の位置及び界面準位密度は、接合形成条件及び熱処理条件に依存し、基板の不純物濃度、極性には寄らない。(2) 界面準位密度はバンドギャップ内エネルギーに依らず一定である。上記仮定に基づき以下の手順で解析を行った。p-Si/p-Si 接合、n-Si/n-Si接合の電流-電圧特性の温度依存性を測定し、バイアス電圧 0 V におけるコンダクタンスの温度依存性から thermionic emission モデルを仮定して各接合に形成されるバリア障壁高さを求めた。バリア障壁高さより各 Si 基板の空乏層厚さ、更には空間電荷面密度を求めた。また各半導体基板の不純物濃度から界面におけるフェルミレベルの位置を決定した。電荷中性条件は空間電荷面密度と同量かつ逆符号の電荷が接合界面に存在することを要求する。所定の界面電荷をもたらす電荷中性点の位置と界面準位密度の関係を求めた。p-Si/p-Si 接合、n-Si/n-Si 接合のそれぞれについて電荷中性点の位置と界面準位密度の関係を求め、それらの交点から電荷中性点の位置、界面準位密度を決定した。異なる温度でアニールされた接合について上記測定及び解析を行い、電荷中性点及び界面準位密度のアニール温度依存性を求めた。測定された電流-電圧特性の一例、p-Si/p-Si, n-Si/n-Si 接合のバリア障壁高さの熱処理温度依存性を図 A-11、A-12 に示す。上記の手法により推定された電荷中性点のエネルギー(価電子帯端とのエネルギー差)及び界面準位密度のアニール温度依存性を図 A-13 に示す。高温でのアニールにより界面準位密度が低下する傾向にあることが示された。電荷中性点(価電子帯端から 0.65~0.75 eV)は文献値(価電子帯端から 0.33-0.36 eV)と比較して伝導帯に近い位置にある。この結果は Ar イオン注入により Si 表面にドナ型の欠陥が導入されるという上に述べた先行研究の結果と整合する。我々は接合界面の断面 TEM 観察により、アニールの結果接合界面のアモルファス層が再結晶化することを確認しており【3.1.(1)】、アニールによる界面準位密度の低減と関連する物と考えられる。

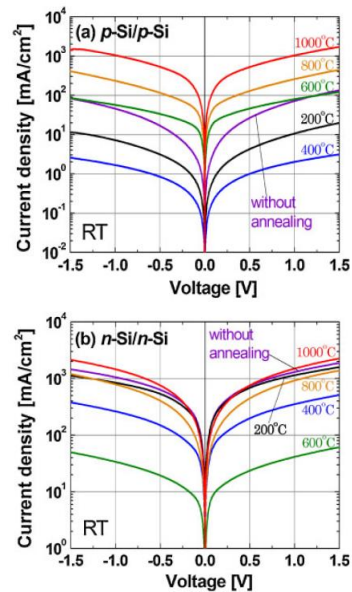


図 A-11. p-Si/p-Si, n-Si/n-Si の電流-電圧特性。

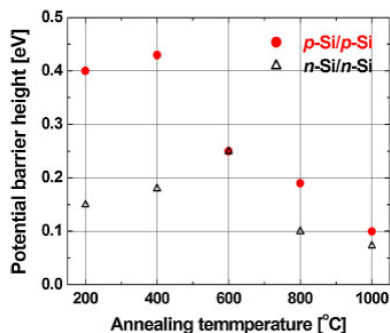


図 A-12. バリア障壁のアニール温度依存性。

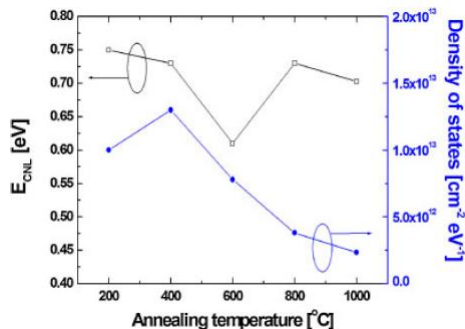


図 A-13. 界面準位密度、電荷中性点のアニール温度依存性。

### 3.1. (2).3 Si/GaAs バンド構造検討. type II のバンドプロファイルを実証【原著論文 14, 36】

SAB 法により作製した p-GaAs/n-Si 接合の容量-電圧特性の測定により GaAs の伝導帯が Si の伝導帯よりも高いエネルギーを有し、かつ、GaAs の価電子帯が Si の価電子帯よりも高いエネルギーを有すること(バンドラインナップがタイプ II であること)を示した(図 A-14)。n-GaAs/p-Si 接合においても同様の結果が得られた。この結果は p 型の GaAs と n 型の Si を貼りあわせることにより作製さ

れるトンネル接合において、接合界面のバンドギャップが GaAs、Si と比較して実効的に狭くなることを意味し、トンネル接合の低抵抗化上有利である。他方、光吸収時に n 型 Si エミッタ中に生ずる少数キャリア (ホール) の一部は、GaAs/Si の界面方向へ拡散し、界面再結合を起こす (発電に寄与しない) ことを意味する。Si ボトムセルの開放電圧低下が懸念され、少数キャリアの界面再結合を抑制するための構造検討が必要である。

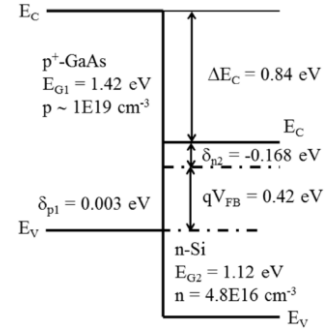


図 A-14. 容量-電圧特性から求めた p-GaAs/n-Si 接合のバンドラインナップ。

### 3. 1. (3) 異種材料接合界面低抵抗化技術【原著論文 20, 43】

不純物濃度、極性の異なる種々の基板 (Si、GaAs、InGaP) から pn 接合を作製し電流電圧特性を測定した。タンデムセルにおける界面の電気特性の影響を、シリコン上 2 合タンデムセル構造における最大短絡電流 (AM1.5G, 1sun において 22 mA/cm<sup>2</sup>) に対する消費電力 (損失) として見積もった (図 A-15)。その結果、接合層の不純物濃度が高いほど界面の抵抗が低下すること、更に実効的不純物濃度

$$N^* = \frac{N_A N_D}{N_A + N_D}$$

( $N_A$ : アクセプタ濃度、 $N_D$ : ドナ濃度)

の増加に伴い損失が低下することが分かった。最も低い損失の推定値は 0.063%、対応する抵抗値は 0.13 Ωcm<sup>2</sup> であった (p<sup>+</sup>(1E19 cm<sup>-3</sup>)-GaAs/n<sup>+</sup>(6E19 cm<sup>-3</sup>)-Si 接合における値)。更に n<sup>+</sup>(1E19 cm<sup>-3</sup>)-GaAs/n<sup>+</sup>(2E19 cm<sup>-3</sup>)-Si 接合において界面抵抗のアニール温度依存性を評価し、最も低い抵抗値として 0.074 Ωcm<sup>2</sup> を得た。これらの結果は、接合前の前処理、接合時の加熱等を行うことなく、ボンディングにより非集光動作条件で許容可能な界面抵抗値が実現できることを意味する。

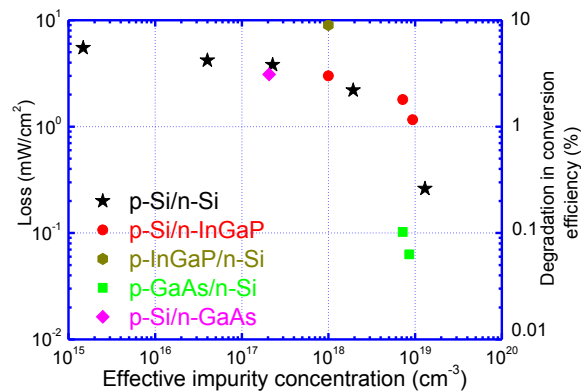


図 A-15. 各種 pn 接合の界面抵抗の太陽電池特性に及ぼす影響 (Si 上 2 接合タンデムセルの場合)。

### 3. 1. (4) タンデム太陽電池作製技術・設計技術

#### 3. 1. (4).1 InGaN/Si【原著論文 34】、InGaP/Si【原著論文 32】 2接合タンデムセル

GaAs 基板上に結晶成長した InGaP トップセル構造エピトイオン注入により作製した Si ボトムセルからなる n-on-p InGaP/Si (100) 2 接合タンデムセルの作製を検討した。ボンディング後に GaAs 基板の選択エッチングを行い、更に半導体プロセスを用いて 2 接合タンデムセルを作製した。タンデムセルの特性を、室温、AM1.5G, 1sun にて評価した (図 A-16 (a))。タンデム動作時の開放電圧は各サブセルの開放電圧の和にほぼ等しい。タンデム動作時の変換効率

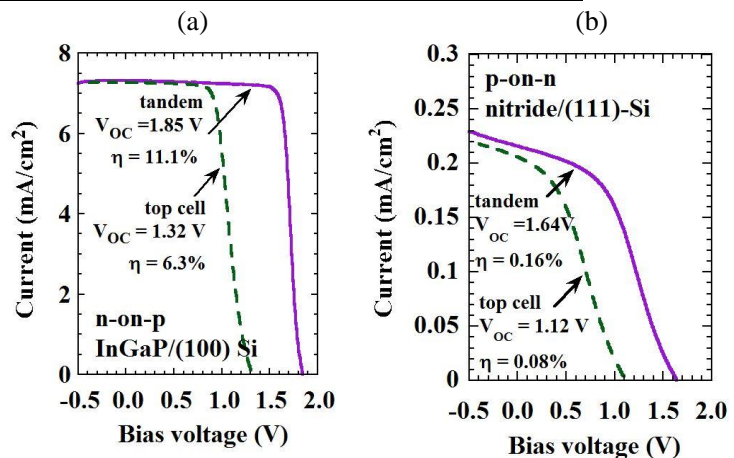


図 A-16. 2 接合タンデムセルの AM1.5G/one sun における電流-電圧特性。(a) InGaP/Si(100) (b) 窒化物/Si(111)。

(11.1%) が各サブセルの効率を上回りタンデム動作の優位性が示された。同時に n-on-p InGaP/Si (111) 2 接合タンデムセルの作製を検討し、ボトムセルが Si (100) の場合と同様のタンデム特性が得られることを検証した。この結果は SAB 法を用いることで接合面の面方位によらず良好な電気伝導特性が得られることを示している。

GaN 基板の上に結晶成長した InGaN/GaN 多重量子井戸トップセル (プロセス済み) と Si ボトムセルからなる p-on-n 窒化物/Si (111) 2 接合タンデムセルを作製した。窒化物系セルの結晶成長は GaN(0001) 基板の上に NTT グループにて行った。GaN 基板の裏面は 100 nm 程度の Ra のためこのままではボトムセルとの接合は不可能である。セル作製後の GaN 基板裏面を研磨し、Ra < 1 nm を得てボトムセルとの接合を実現した。実現した窒化物/Si 2 接合セルにおいて開放電圧の加算は実証されたもののタンデム動作時の変換効率は 0.2% 程度にとどまった (図 A-16 (b))。

これらより、特性向上のためには、InGaP/Si 2 接合セルにおいては、トップセルの短絡電流密度の向上 (トップセル層構造最適化)、直列抵抗低減 (コンタクト抵抗の低減) が、窒化物/Si 2 接合セルにおいては、トップセルの結晶性向上、受光層のバルク InGaN 化、接合界面の抵抗低減が必要であることが示された。

本結果に基づき、研究期間の後半は InGaP、GaAs をハイブリッドタンデムセルのトップセル、ミドルセル用材料とする 3 接合セルについて研究を重点化することとした。

### 3.1. (4).2 InGaP/SiInGaP/GaAs/Si 3 接合タンデムセル特性【原著論文 37, 46, 49】

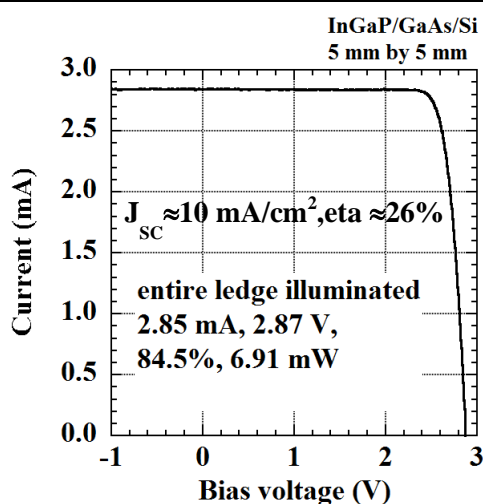


図 A-17. 3 接合セル (5mm 角) の電流-電圧特性。

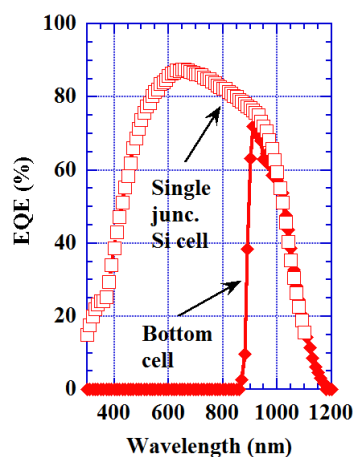


図 A-18. 3 接合セルのボトムセルの外部量子効率と単接合 Si セルの外部量子効率。

GaAs 基板の上に MOCVD 法により結晶成長した n-on-p InGaP/GaAs 2 接合太陽電池構造を Si ボトムセル構造に SAB 法により接合することにより、InGaP/GaAs/Si 3 接合タンデム太陽電池を作製した。5mm 角セルの電流-電圧特性を内部のソーラシミュレータを用いて評価することにより、AM1.5G/one sun の元で Si ペリフェリの寄与とシャドウロスの影響を除いた状態の効率及び短絡電流値をそれぞれ  $\approx 26\%$ 、 $\approx 10 \text{ mA/cm}^2$  と推定した (図 A-17)。

2mm 角 3 接合セルに対して LED をバイアス光とする分光感度測定を行った。3 接合セルにおけるボトムセルと同一基板上に作製された 2mm 角 Si 単接合セルの外部量子効率スペクトルの比較を図 A-18 に示す。2つの外部量子効率スペクトルは  $\geq 880 \text{ nm}$  の長波長帯でほぼ一致している。このことは接合界面の電氣的、光学的な影響は無視しうるほど小さいことを示唆する【論文 37】。

5mm 角 3 接合セルの各サブセルの外部量子効率及び AM1.5G/one sun 条件下の光電流を求めた (図 A-19)。ボトムセルの光電流値が最も小さく、各サブセルのバンドギャップからの予測と合致する。短絡電流 (推定値: 10 mA/cm<sup>2</sup>) はサブセル光電流の中間の値となった。サブセル間で何らかのカップリングが生じていることを示唆する。メカニズムの解明が必要である。

Fraunhofer 研究所より、本構造と類似の InGaP/GaAs/Si 3 接合セル特性が報告されている【S. Essig, et al. IEEE J. Photovoltaics, 5, 977, 2015.】。彼らの構造においてはミドルセルを薄層化し、本来はミドルセルで吸収されるべき光を一部ボトムセルに吸収させることによって、ボトムセルの光電流の増加を実現している。

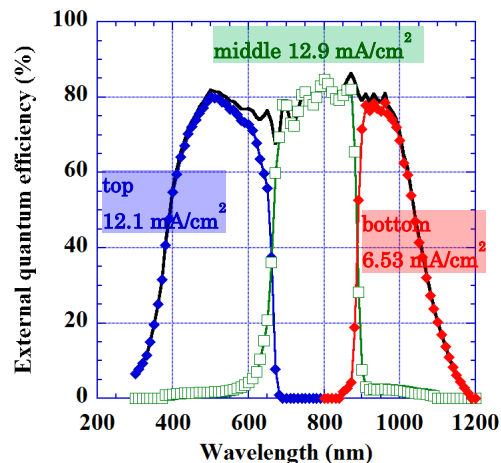


図 A-19. 3 接合セルの外部量子効率

### 3.1.(5) SAB 技術の適用先開拓

#### 3.1.(5).1 逆ピラミッド構造上の接合

表面に逆ピラミッド構造を有する Si ボトムセルと GaAs 基板上に成長した InGaP/GaAs エピ層 (層厚 900 nm) を接合後に GaAs 基板を選択エッチングで除去し、InGaP/GaAs エピ層上にエミッタ電極を形成した。SEM 観察により GaAs 基板の選択エッチング時に接合の剥離は起こらなかった (図 A-20(a))。この結果は SAB 法の用途は平面同士の接合に限定されず、規則的な凹凸を有する試料も接合可能であることを意味する。電流-電圧特性に関しては、実効的に接合面積が低下したことによる直列抵抗の増加が認められる (図 A-20 (b))。接合層の更なる高濃度化により単位面積当たりの界面抵抗の低減が必要である。

#### 3.1.(5).2 SiC/Si 接合の検討【原著論文 35,38,43】

ハイブリッドタンデムセルプロセス研究の究極の目標は、接合界面の電気特性、光学特性の設計性を構築し、それに基づいてタンデムセルのプロセスを構築することにある。そのためには、3 接合セルで用いられる GaAs/Si 以

外の半導体材料の組み合わせについて界面特性の理解を深めることが必要である。上記認識に基づきワイドギャップ材料 (GaN, SiC) と Si, GaAs の接合を形成し、電気特性評価を行った。p<sup>+</sup>-Si 基板/n<sup>-</sup>-SiC エピ基板接合が、材料間の著しい熱膨張係数差にもかかわらず 1000 °C の熱処理に耐えることを見出した。熱処理の前後の電流-電圧特性の環境温度依存性を評価し (図 A-21(a) (b))、熱処理によって逆方向リークが低減すること、熱処理後のリーク電流の活性化エネルギーから、Si 中のバンド間熱励起により発生する少数キャリアである電子がリークの源と考えらえることを見出した。更に 4H-SiC をエミッタとし Si をベース、コレクタとするバイポーラトランジスタ構造を作製し、4H-SiC エミッタから Si ベースへ少数キャリア注入が可能であることを示した。

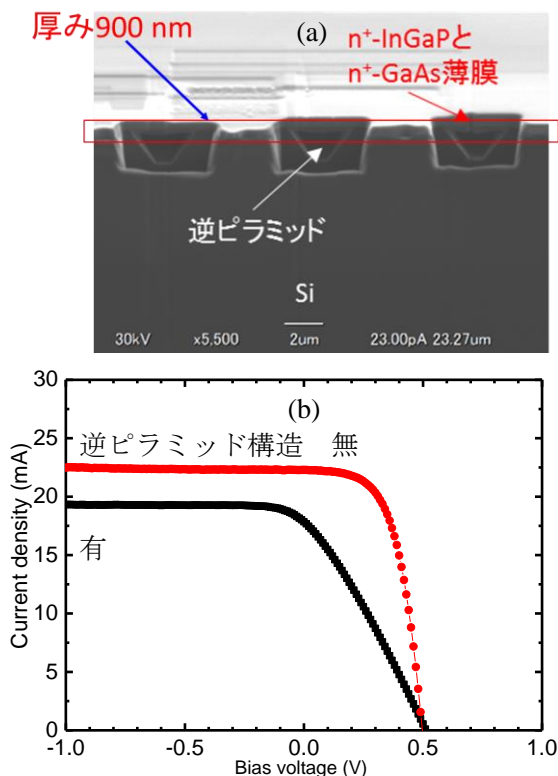


図 A-20. InGaP/GaAs エピ層を接合した逆ピラミッド構造 Si セルの (a) SEM 像及び (b) 電流-電圧特性。

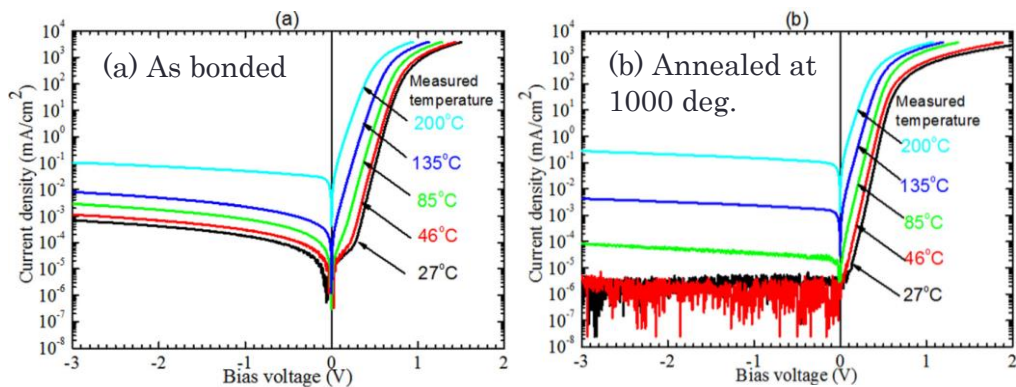


図 A-21. p<sup>+</sup>-Si/n<sup>-</sup>-4H-SiC 接合の電流-電圧特性の温度依存性 (a) 接合後熱処理無 (b)1000 °Cにてアニール後。

3. 2 ハイブリッドタンデムセル結晶成長の研究(日本電信電話株式会社 渡邊グループ)  
Si をボトムセルとするハイブリッドタンデムセルへの適用を前提に窒化物系セル構造、InGaP 系セル構造の検討を行った。主な検討項目と成果の概要は以下のとおりである。

< 主な検討項目と成果の概要 >

番号	主要検討項目	主な成果
1	分極効果を利用したトンネル接合形成技術	InGaN/AlGaIn/GaN 接合により線型な電流・電圧特性を示す接合を得ることができた。単位面積当たりの抵抗値はおよそ 0.2Ω (100mA/cm <sup>2</sup> の電流密度に対し電圧降下 0.02V に相当)。タンデム太陽電池への適用可能性を示した。
2	InGaIn/GaN 系 MQW 構造成長と太陽電池特性との相関	InGaIn/GaN MQW 構造を有する太陽電池における短絡電流を記述するモデルを提案。MQW 内のキャリア輸送特性を特徴づけるパラメータ(特性長)により短絡電流の MQW 構造依存性を説明できることを示した。
3	InGaP/InGaP 歪 MQW 構造形成技術と太陽電池セルへの応用	As を含まない InGaP のみから構成される歪 MQW を光吸収層とする構造を提案し、トップセルに適した 1.8 eV 以下のバンドギャップを実現した。さらに、この歪 MQW 成長技術を傾斜基板上的の成長に応用し、これまで報告のない量子細線構造が自己形成されることを見出した。量子細線構造を用いた単体セルでは、変換効率を維持したまま、短絡電流を増加できることを示した。

以下、各項目の成果について報告する。

3. 2. (1) タンデム太陽電池作製技術・設計技術

分極効果を利用したトンネル接合形成について、InGaIn/AlGaIn/GaN 接合を作製して電流・電圧特性を調べた(図 B-1)。トンネル接合に特徴的な微分負性抵抗特性は観測されなかったものの、印加電圧 0V 周辺において電圧に対して線型な電流値を得ることができた。その傾きから接合部の抵抗値を見積もったところ、1cm<sup>2</sup> 当たりの抵抗値は約 0.2Ω であった。したがって、100mA/cm<sup>2</sup> の電流に対する電圧降下は 0.02V となり、タンデム太陽電池に適用した場合に必要な最低限の特性を示

したものと言える。(図 B-1)【原著論文 17】。

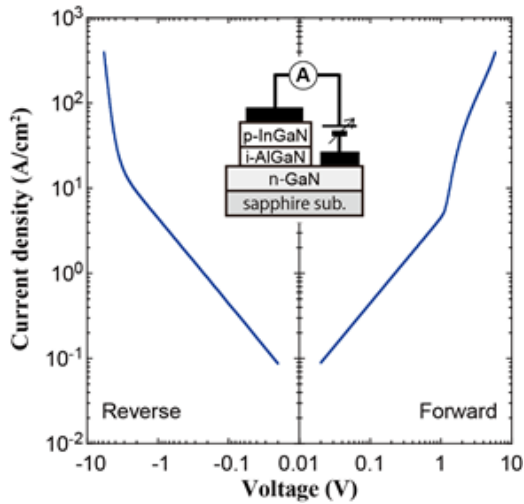


図 B-1. p 型 InGaN/アンドープ AlGaIn/n 型 GaN 構造における電流・電圧特性 (両対数プロット)。印加電圧が 0V 周辺で線型の依存性を示している。

### 3. 2. (2) InGaN/GaN 系 MQW 構造と太陽電池特性の相関【原著論文 8,39】

InGaN/GaN MQW 構造と太陽電池特性、特に、短絡電流との相関を調べ、MQW 内のキャリア輸送を特徴づけるパラメータである特性長と MQW 構造との関係記述するモデルを提案、さらに MQW 構造における吸収過程を取り入れ、短絡電流最大化に向けた MQW 構造に関する考察を行った。

まず、短絡電流の井戸数依存性を図 B-2 に示す。ここで、MQW を構成する InGaN 井戸層の In 組成は 13%、層厚は 3~4nm、GaN バリア層厚は 5~6nm である。井戸数増に伴い、短絡電流が単調に増大する傾向を示している。ただし、線型の依存性ではなく、井戸数増加に対して飽和する依存性を示している。そこで、MQW 層内で生成した光誘起キャリアの輸送特性を考慮したモデルによる説明を試みた。

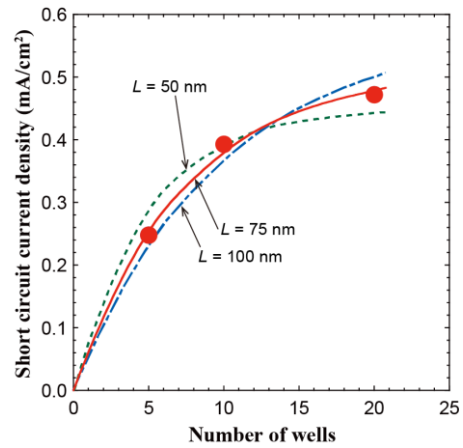


図 B-2. InGaN/GaN MQW 太陽電池における短絡電流の井戸数依存性。曲線はいくつかの特性長に対する式(1)による計算値。

提案するモデルを簡単に説明する。モデル導出における仮定は以下の 4 点である。

- (a) 太陽電池に入射された光は InGaN 井戸層でのみ吸収される。
- (b) InGaN 井戸層のバンドギャップエネルギーよりも低エネルギーの光は完全に透過し、高エネルギーの光は一定の吸収定数  $\alpha$  で吸収される。
- (c) InGaN 井戸層で生成されたキャリア(電子、および、正孔)の一部が電極に到達して短絡電流となる。キャリア輸送特性は特性長  $L$  で特徴づけられる。特性長は、光誘起キャリアが  $L$  だけ移動したあとの存在確率が  $1/e$  となる距離として定義される。
- (d) 電子・正孔の特性長は等しい。

これらの仮定の下で井戸数  $N$  の MQW を吸収層とする太陽電池の短絡電流密度は、

$$I_{sc} = A \sum_{i=1}^N (I_{i-1} - I_i) \{ \eta_n(i) + \eta_p(i) \} \quad (1)$$

と表される。ここで、 $I_i$  は表面側から  $i$  番目の InGaN 井戸層を通過したあとの光子数、 $\eta_n(i)$  および  $\eta_p(i)$  は表面から  $i$  番目の InGaN 井戸層で生成された電子および正孔がそれぞれ電極

(2)

層に到達する確率であり、式(2)~(4)で与えられる。

$$I_i = I_0(\lambda) \exp(-i\alpha w_W)$$

$$\eta_n(i) = \exp\left\{-\frac{(N-i+1)(w_B + w_W)}{L}\right\} \quad (3)$$

$$\eta_p(i) = \exp\left\{-\frac{i(w_B + w_W)}{L}\right\} \quad (4)$$

ここで、 $I_0(\lambda)$ は太陽光スペクトルに含まれる光子のうち吸収端波長 $\lambda$ よりも短波長（すなわち、吸収端エネルギーよりも高エネルギー）である光子数、 $w_W$ および $w_B$ はそれぞれ InGaN 井戸層および GaN バリア層の層厚である。なお、式(1)の  $A$  はフィッティングパラメータである。このモデルにおいて、いくつかの  $L$  に対して短絡電流を計算した結果を図 B-2 に合わせてプロットしてある。この結果から、ここで用いた MQW 構造においては  $L=75\text{nm}$  と結論付けられる。

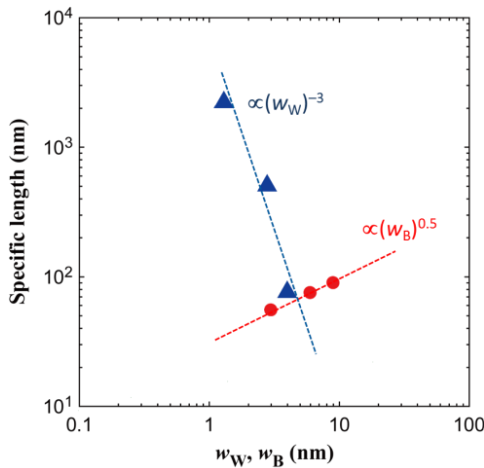


図 B-3. 特性長のバリア層厚および井戸層厚に対する依存性。

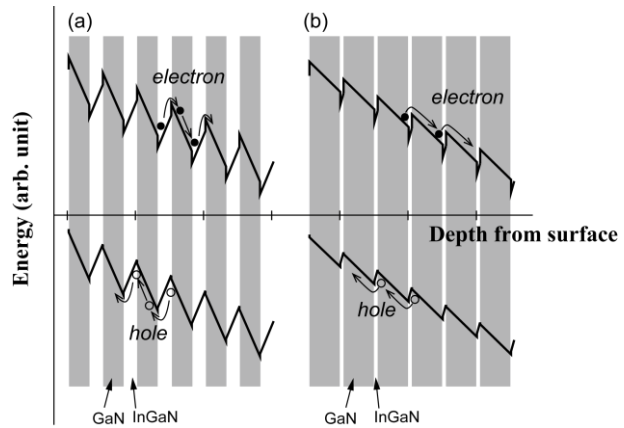


図 B-4. MQW 構造のバンドプロファイル。(a)  $w_B \approx w_W$  の場合、および、(b)  $w_B \gg w_W$  の場合。(b)のような状況になることにより、キャリア輸送がドリフト過程に近くなり、特性長が増大する。

このモデルを井戸層厚・バリア層厚の異なる MQW 構造を有する InGaN/GaN MQW 太陽電池特性に適用して特性長  $L$  を導き、バリア層厚あるいは井戸層厚に対してプロットすると、図 B-3 の結果が得られた。すなわち、バリア層厚に対しては、バリア層が厚くなるほど特性長が伸びるが、その依存性はバリア層厚の 1/2 乗程度の弱い依存性を示すにとどまっているのに対し、井戸層厚に対しては、井戸層厚が厚くなるほどその値の 3 乗に反比例して急激に特性長が低減する傾向を示すことがわかった。このような依存性の違いは、井戸層とバリア層のキャリア輸送過程における役割の違いを考慮することで理解できる。MQW 領域内のバンドプロファイルには窒化物半導体の有する強い分極効果の影響で内部電界が存在する。バリア層の内部電界はキャリアのドリフトを促進する方向となっており、特性長を増加させる役割を持っている。これに対し、井戸層ではそれとは逆にキャリア輸送を妨げる方向の内部電界が存在する。さらに、井戸層のエネルギーバンドギャップはバリア層のそれよりも小さいことから、井戸層→バリア層の方向にはキャリア輸送を妨げるポテンシャル障壁が存在することになる。蓄積したキャリアは再結合過程を介して消滅する確率が高くなる。このように、井戸層は特性長を減らす役割を有している。したがって、バリア層厚が厚く、かつ、井戸層が薄くなるにつれて特性長は増大することになる。特に、井



戸層はドリフトを妨げるだけでなく、再結合過程を促進する働きも有していることから、より強い影響を与えることになると考えられる (図 B-4)。

### 3.2.(3) InGaP/InGaP 歪 MQW 構造形成技術と太陽電池セルへの応用

#### 3.2.(3).1 As フリー材料によるトップセル用歪 MQW 構造の提案と成長

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 1.8 eV 以下のバンドギャップが可能な材料として、As フリー材料であり、さらに基板に用いる GaAs を容易に除去可能な InGaP のみで構成される歪補償 MQW 構造を考案し、MOMBE により成長した。図 B-5 は、成長温度及び井戸層の成長速度を変えて成長した InGaP/InGaP 歪補償 MQW の室温での PL 発光スペクトルを比較したものである。いずれの試料でも 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を実現可能である。成長温度を 530 °C から 510 °C に下げることによって発光強度を約 50 倍も増加させることができることが分かった。さらに、井戸層の成長速度を上げることにより、発光強度を増加させ、半値幅も狭くすることができることが分かった。

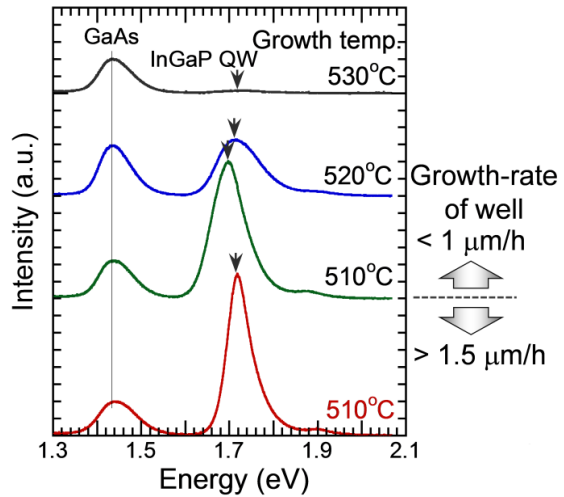


図 B-5. InGaP/InGaP 歪 MQW の室温での PL 発光スペクトルの成長温度及び井戸層成長速度による変化

#### 3.2.(3).2 傾斜基板上的自己形成 InGaP/InGaP 量子細線構造【招待講演 11】

図 B-5 で示したように InGaP/InGaP 歪補償 MQW を用いることでバンドギャップが 1.8 eV 以下の構造を As フリーの材料で実現したが、太陽電池にした場合、短絡電流が小さいという問題が生じた。この主要因は、Ga 組成比の大きい障壁層で炭素が関与した電子トラップが発生したことによるものであった。電子トラップの発生を抑制するには、障壁層の成長速度を小さくすることが有効だが、MQW の界面形成が難しくなり PL 発光強度が低下する問題が発生した。この解決のため、界面形成において大きな役割を果たす成長表面のステップに着目し、傾斜基板を用いることでこのステップ密度を変化させた。図 B-6 は、(100) GaAs 傾斜基板に成長条件を変えずに成長した試料の PL 発光ピーク強度及び基板表面のステップ密度の基板傾斜角による変化を示したものである。PL 強度は基板の傾斜角度に伴い 10 倍以上も増加し、また、この増加は基板表面のステップ密度の増加とほぼ対応していることが分かった。

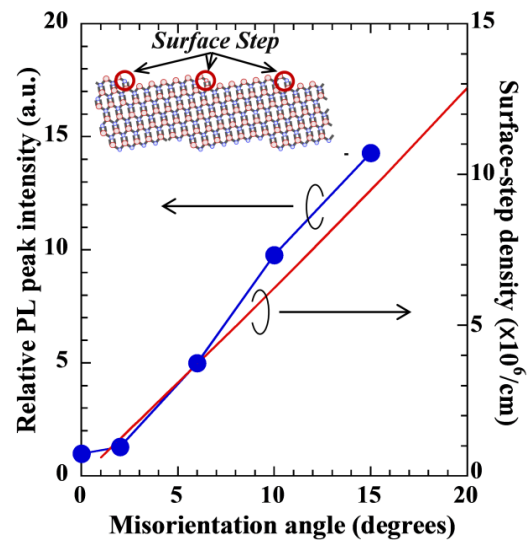


図 B-6. 傾斜基板に成長した試料の PL 発光ピーク強度と基板表面のステップ密度の基板傾斜角による変化

この傾斜基板上的試料の構造を詳細に調べた結果、これまで報告のない特徴を持つ量子細線構造が自己形成されていることが分かった。図 B-7(a)は、傾斜角が 10°の基板に成長し

た試料の断面 TEM 像を示したものである。TEM 像において、暗部は In 組成が大きい井戸領域、明部は Ga 組成が大きい障壁領域であり、ほぼ形状の揃った細線構造が 10 段以上も多重積層されている。詳細に見ると、この細線構造は障壁領域で周期的な膜厚変調が起き、この上に成長する井戸領域が表面を平坦化するという過程を繰り返していることが分かる。さらに、この障壁領域における膜厚変調は、特定の結晶面（高指数面）が出現することによるものではなく、基板の傾斜角度や成長条件によつての制御できることが分かった。図 B-7(b)は、試料表面の AFM 像を示したものである。AFM 像から、この細線構造は基板の傾斜方向である(011)方向に沿って周期的に配列していることが分かる。さらに、広範囲での AFM 観察を行い、細線構造は長さが 5  $\mu\text{m}$  以上も途切れることなく形成されていることを確認した。

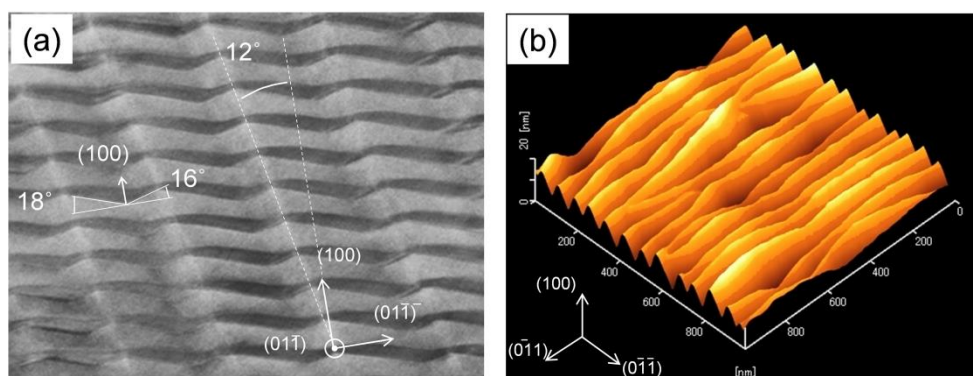


図 B-7. 傾斜角 10°の基板上に成長した試料の (a) 断面の TEM 像と(b) 表面の AFM 像

### 3.2.(3).3 InGaP/InGaP 量子細線構造の太陽電池セルへの応用

自己形成 InGaP/InGaP 量子細線構造を光吸収層とする単体セルを作製した。量子細線構造は、傾斜角 10°の基板上に井戸領域と障壁領域を 1 ペアとして 20 段成長させた（総膜厚 $\sim$ 0.41  $\mu\text{m}$ ）。PL 発光ピークエネルギー（ $\approx$ バンドギャップ）は、Si ボトムセルとのタンデム化を考慮し 1.75 eV とした。比較のため、InGaP バルク層（膜厚 $\sim$ 0.42  $\mu\text{m}$ 、PL 発光ピークエネルギー $\sim$ 1.91 eV）を光吸収層とする単体セルも作製した。図 B-8 は、作製したセルの電流-電圧特性を示したものである。量子細線構造を用いたセルの変換効率は 5.5% であり、InGaP バルク層を用いたセルからの低下は見られなかった。詳細に見ると、光吸収層を InGaP バルク層から量子細線構造に変えることで開放電圧は 1.07 eV から 1.05 eV へと低下するものの、短絡電流密度は 6.8  $\text{mA}/\text{cm}^2$  から 7.2  $\text{mA}/\text{cm}^2$  へと増加した。これらの変化は、量子細線構造にしたことで吸収端が InGaP バルク層よりも低エネルギー側へシフトしたことで説明できる。InGaP/InGaP 量子細線構造を用いたセルは、変換効率を低下させずに短絡電流密度を増加させることが可能なため、タンデム化の際の電流整合を得る上でも有用な構造と考えられる。

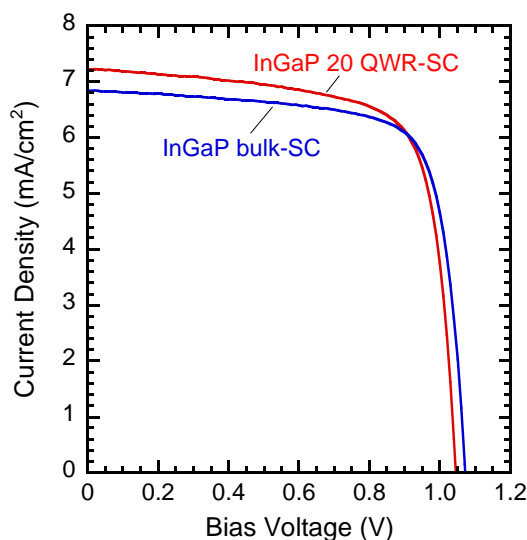


図 B-8. 傾斜角 10°の基板上に成長した量子細線構造 (QWR) 及び InGaP バルク層を光吸収層とする単体セルの電流-電圧特性

### 3.3 シリコン基板上モノリシック窒化物半導体タンデム太陽電池の研究開発 (福井大学 葛原グループ)

InGaN/Si 2 接合タンデム太陽電池の実現をねらいとして以下の検討を進めた。

#### 3.3.(1) Si pn 接合基板上への中間組成 InGaN 厚膜成長技術の開発

##### 3.3.(1).1 InGaN/Si 2 接合タンデム太陽電池の特性シミュレーション【口頭発表 3, 原著論文 15】

InGaN 上部セルとして最適な In 組成を決定するために、シミュレーションにより、InGaN の禁止帯幅を関数として InGaN/Si 2 接合タンデム太陽電池の各セルの発生電流と変換効率を求めた。結果を図 C-1 に示す。この結果から、InGaN の禁止帯幅が約 1.8eV のとき上下セルの電流整合が実現され、30% 以上の変換効率が期待できることがわかる。禁止帯幅が 1.8eV となる In 組成は約 0.45 である。また、太陽電池特性に及ぼす InGaN 中の分極電荷の影響を理論的に明らかにした。

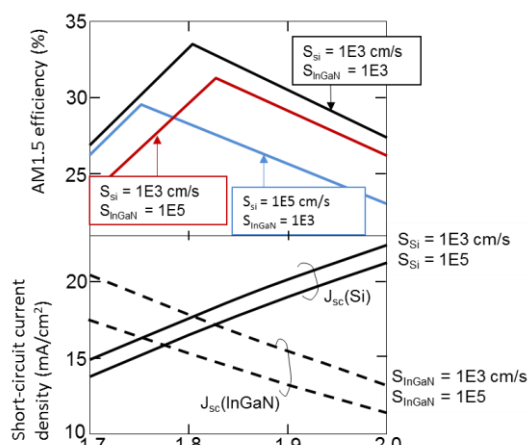


図 C-1. InGaN の禁止帯幅を関数とした InGaN/Si 2 接合タンデム太陽電池の変換効率と各セルの発生電流。

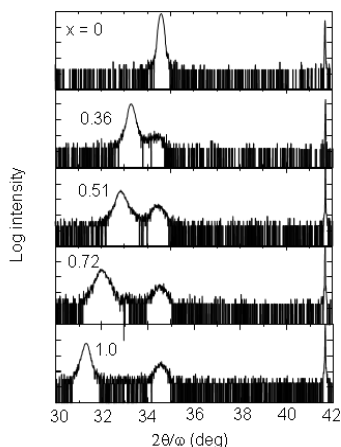


図 C-2. サファイア(0001)基板上に GaN バッファ層を用いて成長させた  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ( $x = 0 \sim 1$ ) の X 線  $2\theta/\omega$  回折図形。

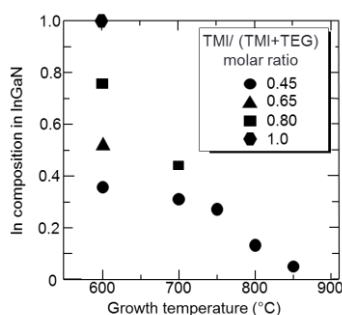


図 C-3. TMI/(TMI+TEG)モル比と成長温度による InGaN 膜の In 組成制御。

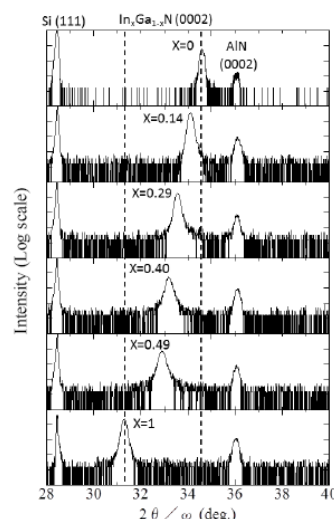


図 C-4. AlN を中間層として Si(111)基板上に成長させた InGaN 膜の X 線  $2\theta/\omega$  回折図形。

#### 3.3.(1).2 MOVPE 法による Si(111)pn 接合基板上への InGaN ヘテロエピ成長技術の開発【原著論文 1,7, 10,12,13,18,26,27,28】

横型反応管方式の MOVPE 装置を用い、トリメチルインジウム(TMI)、トリエチルガリウム(TEG)、アンモニア( $\text{NH}_3$ )を原料とした InGaN の薄膜成長について検討した。図 C-2 はサファイア(0001)基板上に GaN バッファ層を用いて成長させた  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ( $x = 0 \sim 1$ ) の X 線  $2\theta/\omega$  回折図形である。このように、In 組成 0~1 の全組成域の InGaN 膜が作製できる成膜条件を明確にした。さらに、図 C-3 に示すように、In 組成は TMI/(TMI+TEG)モル比のみならず、成長温度によっても制御できる。これは 700°C 以上では成長表面から In 原子が脱離する現象を利用している。

上記の技術を Si 基板上への InGaN 膜成長に適用した。立方晶である Si 基板上への六方晶 InGaN 膜の成長に当っては、表面原子配列が類似している面方位(111)の Si 基板を用いるとともに、中間

層として厚さ 100nm の AlN を用いた。図 C-4 に AlN を中間層として Si(111)基板上に成長させた InGaN 膜の X 線  $2\theta/\omega$  回折図形を示す。このように、GaN/サファイア基板の場合と同様に、ほぼ全組成域に渡って InGaN 単結晶薄膜の形成が可能であることを明らかにした。図 C-5 に、 $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$  膜を形成した 3 インチ Si(111)ウェハの写真を示す。このように、全面が鏡面で均一性に優れた InGaN 膜が形成できた。続いて、タンデムセル作製へのアプローチとして、イオン注入により表面に p 層を形成した n 型 Si 基板上への InGaN 膜成長を検討した。結果の一例を図 C-6 に示す。このように、下地に pn 接合が形成されていても何ら問題なく、In 組成 0.45 付近の InGaN 単結晶膜が成長できることを確認した。図 C-7 は異なる 3 種類の基板上に成長させた InGaN 膜の X 線(0002) ロッキングカーブ半値幅である。InGaN 膜の結晶性は GaN/サファイア、AlN/p-Si、AlN/pn-Si の 3 種類の基板の間ではほとんど差がないことがわかった。

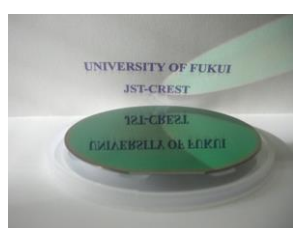


図 C-5. AlN を中間層として  $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$  膜を成長させた 3 インチ Si(111)ウェハ。

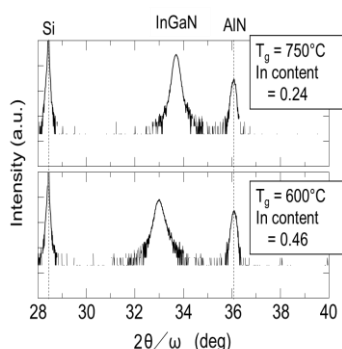


図 C-6. pn 接合を形成した Si(111)基板上に成長させた InGaN 膜の X 線  $2\theta/\omega$  回折図形。

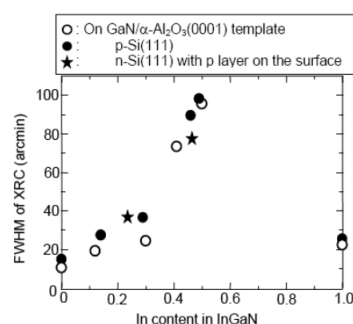


図 C-7. 異なる 3 種類の基板上に成長させた InGaN 膜の X 線(0002)ロッキングカーブ半値幅。

### 3.3.(1).3 AlN 中間層を通しての n-InGaN/p-Si 間の電気伝導特性の評価(オーム性伝導の実現)

#### 【原著論文 16】

Si など通常の半導体に比べて InGaN 中の伝導帯、価電子帯のエネルギー位置がかなり深いことが知られており、そのために、n-InGaN と p-Si とが接触した場合にトンネル接合が自然に形成されることが報告されている。本提案はこのような InGaN/Si 界面の特徴を生かすことをねらいとしているが、Si 基板上への InGaN 等の窒化物の直接成長では、Si 表面の窒化による非晶質化や Ga 金属によるメルトバックの問題が生じ、均一な単結晶膜の成長が難しいことが知られている。そのために、中間層として AlN 系の中間層を用いる必要がある。一方、AlN 等の中間層の導入により n-InGaN と p-Si の直接接触ができなくなるばかりでなく、絶縁体である AlN 等を通して上下セル間に十分な電流を流せるのかという懸念が生じる。そこで、厚さ 100 nm の AlN 中間層を用いて In 組成 0.1~0.5 の n-InGaN を成長させた n-InGaN/AlN/p-Si 構造の電気伝導特性を調べた。結果を図 C-8 に示す。図 C-8(a)は I-V 特性であり、何れの In 組成の場合にもオーム性の伝導特性が得られていることがわかる。図 C-8(b)は I-V 特性の傾きから求めた抵抗値を In 組成に対してプロットしたもので、In 組成の増大とともに抵抗値が急激に低下していることがわかる。このように、AlN 膜を通してかなりの電流が流れることがわかったが、後述するように、InGaN 成長直前の AlN/Si 基板表面の清浄化処理 ( $\text{NH}_3$  気流中熱処理) 時の温度や時間によっても抵抗値が大きく異なることから、 $\text{NH}_3$  気流中熱処理時に AlN 膜中への Si や C の拡散等が生じている可能性が考えられる。なお、この実験での  $\text{NH}_3$  気流中熱処理温度は  $1000^\circ\text{C}$  であるが、後述するように、Si pn 接合の劣化防止の観点から、処理温度を  $900^\circ\text{C}$  程度まで低減する必要があることがわかった。

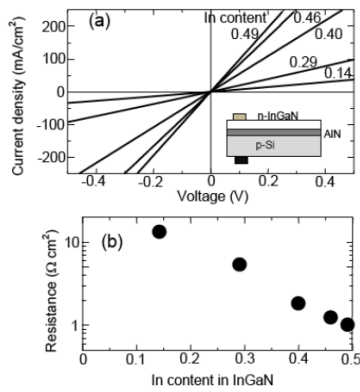


図 C-8. In 組成 0.1~0.5 の n-InGaN を成長させた n-InGaN/AIN/p-Si 構造の電気伝導特性

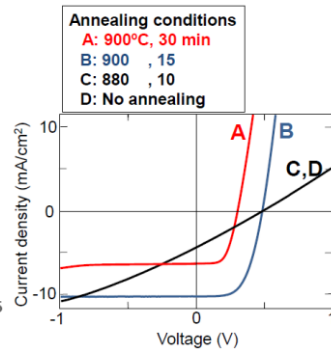


図 C-9. n-InGaN 成長直前の AIN/Si 基板の NH<sub>3</sub> 気流中熱処理条件の異なる n-InGaN/AIN/pn-Si 構造の発電特性

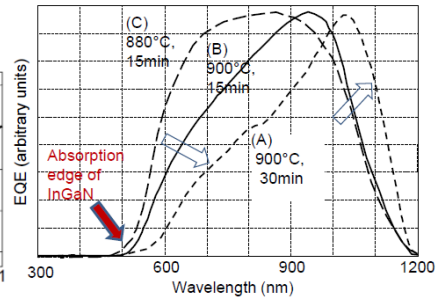


図 C-10. n-InGaN 成長直前の AIN/Si 基板の NH<sub>3</sub> 気流中熱処理条件の異なる n-InGaN/AIN/pn-Si 構造の分光感度特性

### 3.3.(1).4 InGaN 膜成長時の Si-pn 接合の特性劣化【原著論文 47】

上記のように、InGaN/Si タンデムセルの作製に当っては、Si pn 接合の作製後にかなりの高温の表面処理を伴う InGaN 成長を行うことから、その Si 接合特性への影響を調べる必要がある。図 C-9 は n-InGaN 成長直前の AIN/Si 基板の NH<sub>3</sub> 気流中熱処理条件の異なる n-InGaN/AIN/pn-Si 構造の発電特性である。このように NH<sub>3</sub> 気流中熱処理条件によって I-V 特性は大きく異なる。高温、長時間の熱処理を行った場合、開放端電圧、短絡電流の低下がみられる一方、直列抵抗は大幅に減少する。例えば、図 C-9 中の試料 A, B の直列抵抗として 5 Ω cm<sup>2</sup> が見積もられるのに対し、試料 C, D のそれは 100 Ω cm<sup>2</sup> である。今回の Si pn 接合は n-Si 基板に B<sup>+</sup> イオン注入と 1000°C の RTA により作製したものであるが、開放端電圧、短絡電流の低下は Si pn 接合の劣化によるものであり、注入ホウ素(B)原子の拡散などが原因として考えられる。図 C-10 は図 C-9 中の試料 A, B, C の分光感度特性である。この結果からわかるように、高温、長時間の熱処理を行った場合には短波長域の分光感度が低下していることから、NH<sub>3</sub> 気流中熱処理によって接合深さが増大した可能性が大きい。NH<sub>3</sub> 気流中熱処理処理は InGaN 成長時に AIN/Si 基板表面に金属 In が析出するのを防止するのに不可欠な処理であり、また、n-InGaN/AIN/p-Si 構造の電気伝導性を向上させるうえでも重要な処理であるが、一方、この処理が Si pn 接合の劣化を引き起こすことから、その防止のために、熱処理条件の最適化が重要な課題であることが明らかになった。

### 3.3.(2) InGaN 膜の相分離現象の解明と低温成長技術の開発

#### 3.3.(2).1 InGaN 厚膜の相分離現象の解明とその抑制条件の検討【原著論文 31,45】

熱力学的な理論的研究によれば、混晶としての InGaN は構成する Ga-N 結合と In-N 結合の長さが大きく異なるため非混和となり易く、例え熱非平衡の状態でも最終的には相分離することが予想されていた。しかしながら、実験的には、相分離に関して肯定的、否定的両方の報告例が存在していた。本研究でも、上記のように、全組成域に渡って単相膜が形成されていたが、InGaN のホモ接合を形成する必要性から 1 μm 以上の厚膜化を検討する過程で相分離問題に直面することとなった。この問題は半導体材料としての InGaN の信頼性、将来性を大きく左右する重要な問題であることから、その実態解明とともに、従来、相分離が実験的に明確に確認されてこなかった原因を明らかにするための検討を行った。図 C-11 は 650°C 成長の In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N (x~0.3) 膜の X 線 2θ/ω 回折図形であり、相分離の進行の状況を示すものである。図中、試料 A は成長温度 650°C で膜厚 0.7 μm に成長させたもので、相分離はみられない。試料 B は A と同様の条件で膜厚を 1.1 μm まで増大したもので、本来、A よりも高強度であるべき In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N の回折ピークがむしろ低下し高角側に移動しているほか、その両サイドに金属 In<sub>1-y</sub>Ga<sub>y</sub> と GaN-rich In<sub>z</sub>Ga<sub>1-z</sub>N のピークが出現

現している。試料 C は B を  $\text{NH}_3$  中、 $650^\circ\text{C}$  で熱処理したもので、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ピークの更なる低下と高角側移動がみられる。さらには、 $\text{InN}$ -rich  $\text{In}_{1-y}\text{Ga}_y\text{N}$  のピークが弱いながらも観察される。この結果から、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  の相分離について次のように説明できる。まず、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  は膜厚の小さい状況では相分離を起こさないが、ある膜厚を越えると、Stringfellow らが理論的に予想したスキーム (図 C-12) に沿って  $\text{InN}$ -rich  $\text{In}_{1-y}\text{Ga}_y\text{N}$  と  $\text{GaN}$ -rich  $\text{In}_z\text{Ga}_{1-z}\text{N}$  とに分離する。y, z の値は  $650^\circ\text{C}$  程度の温度では  $0.02 \sim 0.05$  である。成長温度  $650^\circ\text{C}$  程度では  $\text{InN}$ -rich  $\text{In}_{1-y}\text{Ga}_y\text{N}$  が熱的に分解し金属  $\text{In}_{1-y}\text{Ga}_y$  に変化する。従来、相分離が明瞭に確認できなかった原因のひとつは、下地に  $\text{GaN}$  を用いた場合が多く、その場合 X 線  $2\theta/\omega$  回折図形上で  $\text{GaN}$ -rich  $\text{In}_z\text{Ga}_{1-z}\text{N}$  ピークが下地  $\text{GaN}$  ピークとほぼ重なるため、その存在が確認できなかったことである。今回、 $\text{AlN}/\text{Si}$  を基板として用いることによりこの問題が解決できた。他の原因の一つは成長温度の問題である。成長温度  $700^\circ\text{C}$  以上では  $\text{InN}$ -rich  $\text{In}_{1-y}\text{Ga}_y\text{N}$  の存在はもちろん、金属  $\text{In}_{1-y}\text{Ga}_y$  も、主要成分である  $\text{In}$  が蒸発するため確認されないことである。今回、 $650^\circ\text{C}$  という成長温度を採用することで、弱いながらも  $\text{InN}$ -rich  $\text{In}_{1-y}\text{Ga}_y\text{N}$  の存在が確認でき、その分解結果としての金属  $\text{In}_{1-y}\text{Ga}_y$  も確認できた。さらに、図 C-11 の結果は、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  の相分離は  $\text{InN}$  成分の多い部分から優先的に進行すること、さらに、一旦、相分離が始まると  $\text{NH}_3$  中に保持してもこれを抑制できないということを示しており、この現象は相分離であると同時に分解という側面を強く有しているといえる。また、一連の検討で、相分離のスタート位置が基板界面近傍ではなく膜の中央部～表面の間であることも明確になっており、 $\text{InGaN}$  成長中に生じた高  $\text{In}$  組成部分などが引き金になっている可能性が高いことも明らかになった。上記のように、 $\text{InGaN}$  膜厚が小さいうちは相分離が起こり難いということが明らかとなったので、厚さの異なる  $\text{InGaN}$  膜を異なる温度で作製し相分離の有無を調べた。図 C-13 は  $\text{InGaN}$  膜厚と成長温度との関係でみた相分離の有無の状況を示したものである。この結果からわかるように、相分離には図中の破線で示すような臨界膜厚が存在し、臨界膜厚は成長温度の上昇とともに顕著に減少する。図 C-13 には、 $700^\circ\text{C}$  以上の成長温度で作製した  $\text{InGaN}$  膜に関する文献例についても示した。これらの報告では相分離の有無については明言されていないが、成長膜が二層構造になることが報告されている。実は、このような二層構造は相分離の結果であることが図 C-13 の結果から明白である。

以上示したように、 $\text{InGaN}$  ホモ接合を作製するために  $1\mu\text{m}$  以上の厚膜を成長させる場合、成長温度を  $600^\circ\text{C}$  以下にする必要があるという重要な知見が得られた。

### 650°C-grown $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ( $x \sim 0.3$ )

- (A) 0.7  $\mu\text{m}$  thick
- (B) 1.1  $\mu\text{m}$  thick
- (C) 1.1  $\mu\text{m}$  thick (post-growth annealed in  $\text{NH}_3$ )

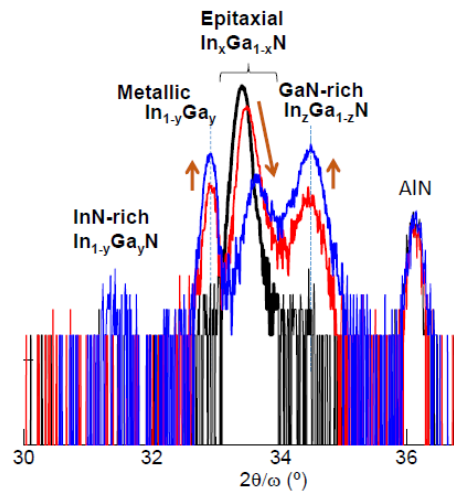


図 C-11.  $650^\circ\text{C}$  成長の  $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.6}\text{N}$  膜の相分離の進行状況 (X 線  $2\theta/\omega$  回折図形、縦軸は回折強度で Log scale)

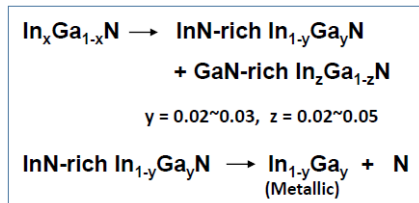


図 C-12. 成長温度  $650^\circ\text{C}$  付近での  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  の相分離のスキーム

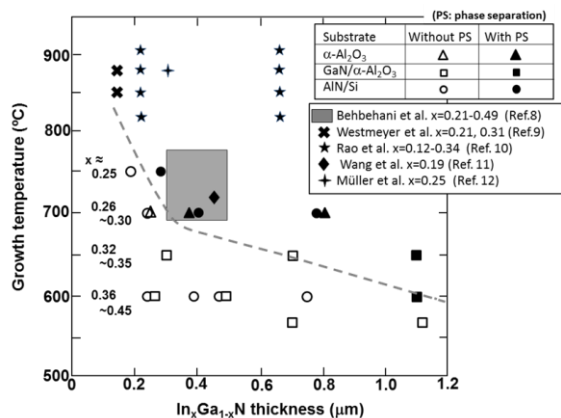


図 C-13.  $\text{InGaN}$  中の  $\text{In}$  膜厚と成長温度との関係でみた相分離の有無。破線は相分離の臨界膜厚を示す。

### 3.3.(2).2 アンモニア分解触媒援用 MOVPE (CA-MOVPE) 技術の開発【原著論文 3,4,11,19,口頭発表 67,68,69】

上記のように、1 $\mu\text{m}$  以上の InGa $\text{N}$  厚膜を成長させる場合、成長温度を 600 $^{\circ}\text{C}$  以下にする必要があることが明確になった。一方、 $\text{NH}_3$  を窒素源とする窒化物の MOVPE 成長では成長温度の低下は  $\text{NH}_3$  分解率の大幅な低下をもたらす、活性窒素不足を生じることになる。このことは In $\text{N}$  の MOVPE 成長において明らかになっている。そこで、 $\text{NH}_3$  分解率の向上を目指して  $\text{NH}_3$  分解触媒を用いた窒化物の MOVPE 成長 (CA-MOVPE 成長) について検討した。 $\text{NH}_3$  分解触媒援用 MOVPE 成長については、これまで触媒材料として Pt や Ir 細線を用いた In $\text{N}$ 、Ga $\text{N}$  成長の検討を行い、電気的特性や結晶性の向上を確認したが、成長挙動が変化するほどの影響はみられなかった。その原因が使用した触媒金属の表面積が小さいためだと考えられることから、表面積の大きなペレット状セラミック触媒 (日揮触媒化学製 N134) を用いた検討を行った。図 C-14 は今回使用した CA-MOVPE 用反応管の模式図である。この反応管を用いて In $\text{N}$ 、Ga $\text{N}$ 、InGa $\text{N}$  膜を成長させた。その結果、本触媒の採用によって In $\text{N}$  の成長挙動が大きく影響を受けることがわかった。特に、通常の MOVPE 法に比べて 200 $^{\circ}\text{C}$  も低温である 400 $^{\circ}\text{C}$  でも金属 In の析出の無い良好な In $\text{N}$  単結晶が成長でき、さらに、450 $^{\circ}\text{C}$  付近では X 線ロッキングカーブ (0002) 半値幅が 367 arcsec という MOVPE 成長 In $\text{N}$  膜としてはベストデータとなる優れた結晶性が実現できることがわかった。図 C-15 に CA-MOVPE 法を用い温度  $T_g=400\sim 520^{\circ}\text{C}$  で成長させた In $\text{N}$  膜の表面モフォロジーを示す。ここに示すように、成長する In $\text{N}$  の結晶粒径が  $T_g=500^{\circ}\text{C}$  付近から急激に大きくなり、520 $^{\circ}\text{C}$  付近では 1 $\mu\text{m}$  を越える結晶粒が得られる。一方、 $T_g=600^{\circ}\text{C}$  付近では基板上に堆積物がほとんど得られないことがわかった。このような急激な結晶粒成長や堆積速度の低下は  $\text{NH}_3$  分解により生じた水素 ( $\text{H}$ ,  $\text{H}_2$ ) によるエッチング効果であると考えられる。図 C-16 は CA-MOVPE 法で成長させた In $\text{N}$ 、InGa $\text{N}$  膜の X 線 (0002) ロッキングカーブ半値幅を従来法と比較したものである。本法による In $\text{N}$ 、InGa $\text{N}$  の結晶性が大幅に改善されていることがわかる。InGa $\text{N}$  に関しては、 $T_g=450\sim 500^{\circ}\text{C}$  において従来法の 700 $^{\circ}\text{C}$  成長の場合を上回る良好な結果が得られている。図 C-17 は CA-MOVPE 法で成長させた Ga $\text{N}$ 、InGa $\text{N}$  膜の電気抵抗を従来法と比較したものである。この結果からわかるように、今回の CA-MOVPE 法では成長膜の大幅な低抵抗化が実現されている。一般に、Ga $\text{N}$  や InGa $\text{N}$  を 600 $^{\circ}\text{C}$  程度の低温で MOVPE 成長させた場合、原料の有機金属からの炭素 C がアクセプタとして混入し、その補償効果で高抵抗化することが知られている。今回このような低抵抗化がみられたことは C 汚染が大幅に低減されたことを示している。C 汚染の低減には原子状水素 H の効果が大きいことが知られていることから、今回、 $\text{NH}_3$  分解により発生した H が重要な寄与をしているものと考えられる。

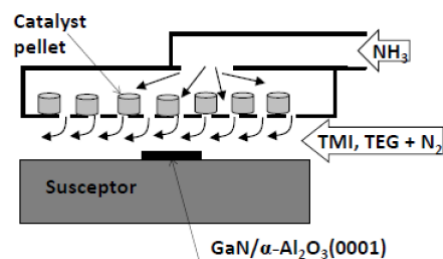


図 C-14.  $\text{NH}_3$  分解触媒援用 MOVPE (CA-MOVPE) 成長に用いた反応管の模式図

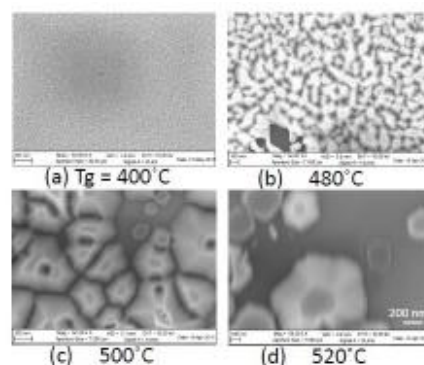


図 C-15. CA-MOVPE 法を用い成長温度  $T_g=400\sim 520^{\circ}\text{C}$  で成長させた In $\text{N}$  膜の表面モフォロジー

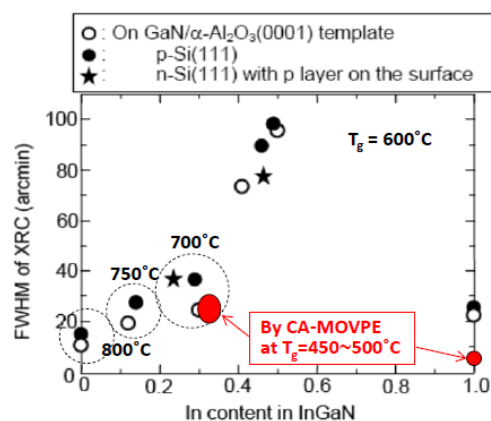


図 C-16. CA-MOVPE 法で成長させた In $\text{N}$ 、InGa $\text{N}$  膜の X 線 (0002) ロッキングカーブ半値幅 (従来法との比較)

3.3.(3) InGaN ホモ pn 接合技術と InGaN/Si タンデムセル作製技術の開発

3.3.(3).1 Si ドーピング技術【原著論文 22】

ドナ不純物として Si を選び、モノメチルシラン (MMSi) を用いて InGaN への Si ドーピングについて検討した。図 C-18 に InGaN 膜の電気的特性の MMSi 流量依存性を示す。濃度 0.2% の MMSi を 10 ~ 50 sccm 導入することで  $10^{21} \sim 10^{22}/\text{cm}^3$  の Si 原子がドープされ  $10^{20} \sim 10^{21}/\text{cm}^3$  の電子濃度が得られた。図 C-19 は異なる MMSi 流量で成長させた InGaN 膜の X 線  $2\theta/\omega$  回折図形である。この結果からわかるように、Si ドープにより InGaN 膜中の In 組成が大幅に減少し、図 C-20 に示すように、約 0.7 eV の顕著なワイドギャップ化が生じることがわかった。このようなドーピングによるワイドギャップ化は InGaN のトンネル接合作製に有効に利用できるものと考えられる。図 C-19 にみられる現象は In 原子が入るべき格子位置に Si 原子が選択的に取り込まれていることを示している。その原因としては、結合長が  $\text{In-N} > \text{Ga-N} > \text{Si-N}$  の順にあることから、Ga-N 結合が多数を占める結晶中に In-N 結合が導入されると、その周囲に生じる局所歪を最も結合長が小さい Si を取り込むことで緩和するためだと考えることができる。ノドープの場合に比べて減少した In 原子数と結晶中に取り込まれた Si 原子数とがほぼ一致することも確認した。なお、図 C-18 からわかるように、Si 原子のドナとしての活性化率は添加 Si 原子数  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$  のとき約 10% である。

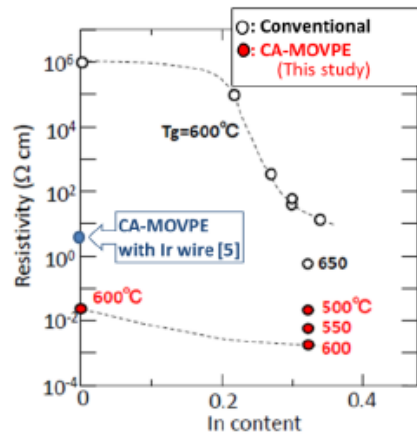


図 C-17. CA-MOVPE 法で成長させた GaN、InGaN 膜の電気抵抗 (従来法との比較)

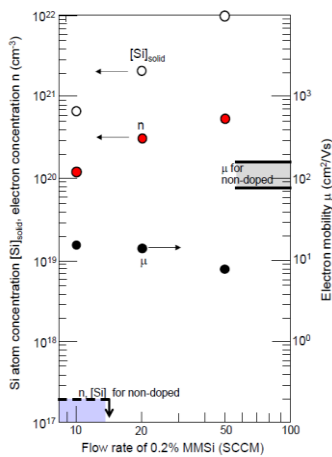


図 C-18. InGaN 膜の電気的特性の MMSi 流量依存性

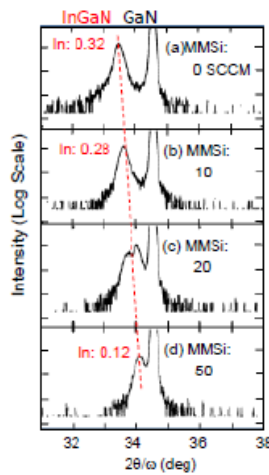


図 C-19. 異なる MMSi 流量で成長させた InGaN 膜の X 線  $2\theta/\omega$  回折図形

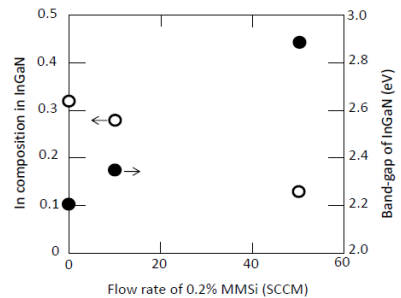


図 C-20. 異なる MMSi 流量で成長させた InGaN 膜の In 組成と禁止帯幅



### 3.3.(3).2 Mgドーピングと RTA による Mg の活性化熱処理条件の確立【原著論文 2,6,44】

窒化物半導体に添加された Mg の活性化には通常 700°C 以上の窒素ガス中熱処理が必要であるとされている。しかしながら、成長温度 600°C 以下で成長させた InGaN 膜に 700°C の熱処理を施せば相分離が生じる。そこで、RTA による Mg 活性化処理を検討したところ、図 C-21 に示すように 850°C、20 秒程度の処理で、相分離なく p-InGaN が得られることを確認した。

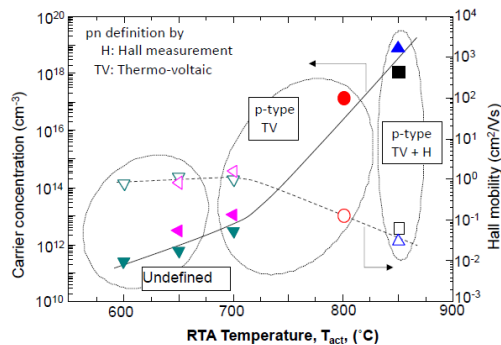


図 C-21. RTA による InGaN 中の Mg 活性化処理: 処理温度とキャリア濃度、移動度の関係

### 3.3.(3).3 n<sup>+</sup>-p 構造 In<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>N セルの作製【原著論文 29、ポスター発表 52】

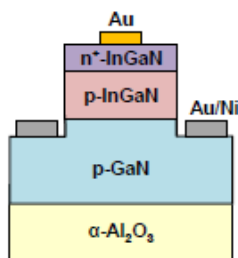


図 C-22. 作製した n<sup>+</sup>-p 接合構造 InGaN セル

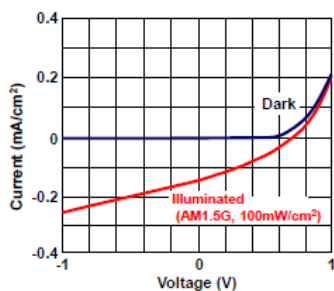


図 C-23. n<sup>+</sup>-p 接合構造 InGaN セルの I-V 特性

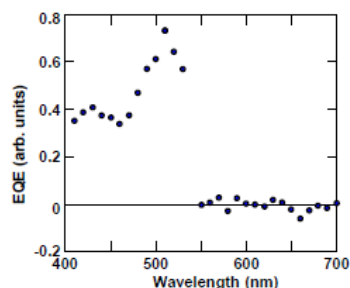


図 C-24. n<sup>+</sup>-p 接合構造 InGaN セルの分光感度特性

作製が比較的容易な n<sup>+</sup>-p 接合構造の In<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>N セルをサファイア基板上に作製した。図 C-22 に作製したセルの構造を、図 C-23 に InGaN セルの I-V 特性を、図 C-24 に分光感度特性を示す。これらの結果からわかるように、整流性を示す I-V 特性ならびに光電流が観測され、しかも、In<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>N の光吸収端である 550nm より短波長域で感度が得られていることから、In<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>N がキャリア発生層として機能していることがわかる。しかしながら、最も大きな問題は短絡電流が 0.1 mA/cm<sup>2</sup> 程度とかなり小さいことである。InGaN 中での少数キャリア寿命がかなり小さいことが考えられるほか、InGaN 層の抵抗が高いために表面電極の近傍からのみの電流しか収集できていない可能性も考えられる。

### 3.3.(3).4 p<sup>+</sup>-n InGaN/p<sup>+</sup>-n Si 構造タンデムセルの作製

以上示したように、p<sup>+</sup>-n InGaN/p<sup>+</sup>-n Si 構造タンデムセル作製の要素技術は確立できており、現在、図 C-25 に示すようなセル構造を作製し動作確認に向けた検討を進めている。

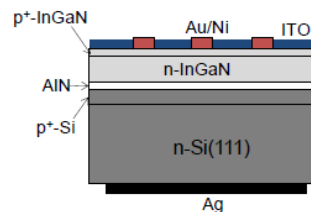


図 C-25. 検討中の p<sup>+</sup>-n InGaN/p<sup>+</sup>-n Si 構造タンデムセルの構造

## § 4 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌 0件、国際(欧文)誌 52件)

1. 著者、論文タイトル、掲載誌 巻、号、発行年

1. K. Sugita, M. Tanaka, K. Sasamoto, A. G. Bhuiyan, A. Hashimoto, A. Yamamoto, "MOVPE growth of InAlN/InGaN heterostructures with an intermediate range of In content", *J. Cryst. Growth*, **318**, 1, 2011 (p.505-508).
2. K. Sasamoto, T. Hotta, K. Sugita, A. G. Bhuiyan, A. Hashimoto, A. Yamamoto, K. Kinoshita, Y. Kohji, "MOVPE growth of high quality p-type InGaN with intermediate In compositions", *J. Cryst. Growth*, **318**, 1, 2011 (p.492-495).
3. K. Sasamoto, K. Sugita, A. Hashimoto, A. Yamamoto, "Platinum-catalyst-assisted metalorganic vapor phase epitaxy of InN", *J. Cryst. Growth*, **314**, 1, 2011(p. 62-65).
4. K. Sasamoto, T. Hotta, M. Tanaka, K. Sugita, A. G. Bhuiyan, A. Hashimoto, A. Yamamoto, "Low temperature growth of GaN using catalyst-assisted MOVPE", *Phys. Status Sol. (c)*, **8**, 7-8, 2011 (p. 2092-2094).
5. S. M. Muhtadi, S. M. Sajjad Hossain, A. G. Bhuiyan, K. Sugita, A. Hashimoto, A. Yamamoto, M. Mofazzal Hossain, "DC and RF performance of an In<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N/InN high electron mobility transistor", *Phys. Status Sol. (c)*, **8**, 7-8, 2011 (p.2292-2295).
6. K. Sugita, K. Sasamoto, A. Hashimoto, A. Yamamoto, "Effects of Cp<sub>2</sub>Mg supply on MOVPE growth behavior of InN", *Phys. Status Sol. (c)*, **8**, 7-8, 2011 (p. 2506-2508).
7. T. Inushima, D. K. Maude, H. Lu, W. J. Schaff, T. Iizuka, S. Kimura, A. Yamamoto, K. Fukui, "Superconducting properties of InN with low carrier density near the Mott transition", *J. Phys. Soc. Jpn.*, Vol. 81, No.4, 044704, 2012 (DOI: 10.1143/JPSJ.81.044704).
8. Noriyuki Watanabe, Haruki Yokoyama, Naoteru Shigekawa, Ken-ichi Sugita, and Akio Yamamoto, "Barrier Thickness Dependence of Photovoltaic Characteristics of InGaN/GaN Multiple Quantum Well Solar Cells", *Jpn. J. Appl. Phys.* 51 (10) pp. 10ND10-1-10ND10-5 (2012).
9. Md. M. Hossain, Md. A.-Alhumayun, Md. T. Hasan, A. G. Bhuiyan, A. Hashimoto, A. Yamamoto, "Proposal of high performance 1.55 um quantum dot heterostructure laser using InN", *IEICE Transactions on Electronics*, **95-C**, 2, 2012 (p.255-261).
10. J.G. Kim, Y. Kamei, A. Kimura, N. Hasuike, H. Harima, K. Kisoda, T. Hotta, K. Sasamoto, A. Yamamoto, "Observation of A<sub>1</sub>(LO) and B<sub>1</sub>(high) phonon modes in In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N alloys" *Phys. Status Sol. (c)*, **9**, 3-4, 2012 (p.730-732).
11. K. Sugita, T. Hotta, M. Tanaka, K. Sasamoto, A. G. Bhuiyan, A. Hashimoto, A. Yamamoto, "Highly enhanced migration in Pt-catalyst-assisted MOVPE InN by controlling the catalyst temperature", *Phys. Status Sol. (c)*, **9**, 3-4, 2012 (p.697-699).
12. 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 Sol. (c)*, **9**, 3-4, 2012 (p.670-672).
13. M. Shimahashi, K. Matsui, K. Okada, K. Sugita, H. Sasaki, A. Yamamoto, "Anti-corrosive SUS separator coated with MOCVD InGaN for polymer electrolyte fuel cell (PEFC)", *Phys. Status Sol. (c)*, **9**, 3-4, 2012 (p.673-676).
14. Jianbo Liang, Tatsuya Miyazaki, Masashi Morimoto, Shota Nishida, Noriyuki Watanabe, and Naoteru Shigekawa, "Electrical Properties of p-Si/n-GaAs Heterojunctions by Using Surface Activated Bonding", *Appl. Phys. Express* 6 021801 (2013).
15. Y.D. Zheng, A. Mihara, A. Yamamoto, "Analysis of In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/Si p-n heterojunction solar cells and the effects of spontaneous and piezoelectric polarization charges", *Appl. Phys. Lett.*, **103**, 15, 2013 (153509).
16. A. Yamamoto, A. Mihara, D. Hironaga, K. Sugita, A. G. Bhuiyan, A. Hashimoto, N. Shigekawa, and N. Watanabe, "MOVPE Growth of In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N (x~0.5) on Si(111) substrates with a pn junction on the surface", *Phys. Status Solidi C10* (3) pp. 437-440 (2013).
17. N. Watanabe, H. Yokoyama, and N. Shigekawa, "Observation of Negative Differential Resistance in a GaN/AlGaIn/GaN: Possible Tunneling Junction Using Polarization", *Jpn. J. Appl. Phys.* 52 08JN03 (2013).

18. A. Yamamoto, A. Mihara, Y. Zheng, and N. Shigekawa, "A Comparative Study on Metalorganic Vapor Phase Epitaxial InGa<sub>N</sub> with Intermediate In Compositions Grown on GaN/Sapphire Template and AlN/Si(111) Substrate", *Jpn. J. Appl. Phys.* 52 08JB19 (2013).
19. K. Sugita, D. Hironaga, A. Mihara, A. Hashimoto, A. Yamamoto, "Catalyst Temperature Dependence of NH<sub>3</sub> Decomposition for InN Grown by Metal Organic Vapor Phase Epitaxy", *Jpn. J. Appl. Phys.* **52**, 8, 2013 (08JD04).
20. J. Liang, S. Nishida, M. Morimoto, and N. Shigekawa, "Surface-activating-bonding-based low-resistance Si/III-V junctions", *Elec. Lett.* 49 (13) pp. 830-832 (2013).
21. A. Yamamoto, A. Mihara, N. Shigekawa, and N. Narita, "Marked suppression of In incorporation in heavily Si-doped In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N (x~0.3) grown on GaN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(0001) template", *Appl. Phys. Lett.* 103 082113 (2013).
22. J. Liang, M. Morimoto, S. Nishida, and N. Shigekawa, "Band structures of Si/InGaP heterojunctions by using surface-activated bonding", *Phys. Status Solidi C* 10 1644 (2013).
23. 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.* 114 183703 (2013).
24. A. Yamamoto, A. Mihara, N. Narita, N. Shigekawa, "Effects of MOVPE InGa<sub>N</sub> 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.
25. N. Shigekawa, J. Liang, and N. Watanabe, "Demonstration of Nitride-on-Phosphide Hybrid Tandem Solar Cells by Using Surface Activated Bonding," *Proc. 39th IEEE Photovoltaic Specialists Conference* pp. 2470-2473 (2013).
26. Md. Arafat Hossain, Md. Rafiqul Islam, M. K. Hossain, A. Hashimoto, A. Yamamoto, "Dislocation reduction in heteroepitaxial In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>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).
27. A. Yamamoto, K. Sugita, A. G. Bhuiyan, A. Hashimoto, and N. Narita, "MOVPE growth of InGa<sub>N</sub> and InAlN for multi-junction tandem solar cells", *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, **2**, 2, 2013 (2 :10 )
28. A. Kaminska, P. Nowakowski, G. Staszczak, T. Suski, J.-F. Carlin, N. Grandjean, R. Martin, A. Yamamoto, "Peculiarities in the pressure dependence of photoluminescence in InAlN", *Phys. Status Sol. (b)*, **250**, 4, 2013 (p.677-682).
29. Md. Rafiqul Islam, Md. Rejvi Kaysir, Md. Jahirul Islam, A. Hashimoto, A. Yamamoto, "MOVPE Growth of In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N (x~0.4) and Fabrication of Homo-junction Solar Cells", *J. Mater. Sci. Technol.*, **29**, 2, 2013 (p.128-136).
30. A. Yamamoto, D. Hironaga, A. Mihara, Y. Muramatsu, K. Sugita, A. G. Bhuiyan, A. Hashimoto, N. Shigekawa, and N. Watanabe, "MOVPE growth of In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N (x~0.5) on Si(111) substrates with a pn junction on the surface", *Phys. Status Sol. (c)*, **10**, 3, 2013 (p.437-440).
31. A. Yamamoto, M. T. Hasan, A. Mihara, N. Shigekawa, and M. Kuzuhara, "Phase separation of thick (~1  $\mu$ m) In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N (x~0.3) grown on AlN/Si (111): Simultaneous emergence of metallic In-Ga and GaN-rich InGa<sub>N</sub>", *Appl. Phys. Express* 7 035502 (2014).
32. N. Shigekawa, M. Morimoto, S. Nishida, and J. Liang, "Surface-activated-bonding-based InGaP-on-Si double-junction cells", *Jpn. J. Appl. Phys.* 53 04ER05 (2014).
33. 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* 778---780 718 (2014).
34. 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* 11 644 (2014).
35. J. Liang, S. Nishida, M. Arai, and N. Shigekawa, "Effects of thermal annealing process on the electrical properties of p+-Si/n-SiC heterojunctions," *Appl. Phys. Lett.* 104, 161604 (2014).
36. Naoteru Shigekawa, Jianbo Liang, Masashi Morimoto, and Shota Nishida, "Type-II Band Profile of GaAs/Si Hetero Junctions by Surface Activated Bonding for Hybrid Tandem Cells," *ECS Trans.* 64 (5) 235 (2014).
37. Naoteru Shigekawa, Li Chai, Masashi Morimoto, Jianbo Liang, Ryusuke Onitsuka, Takaaki

- Agui, Hiroyuki Juso, and Tatsuya Takamoto, "Hybrid Triple-Junction Solar Cells by Surface Activated Bonding of III-V Double-Junction-Cell Heterostructures to Ion-Implantation-Based Si Cells," Proc. 40th IEEE Photovoltaic Specialists Conference pp. 534-537 (2014).
38. J. Liang, S. Nishida, T. Hayashi, M. Arai, and N. Shigekawa, "Effects of interface state charges on the electrical properties of Si/SiC heterojunctions," Appl. Phys. Lett. **105**, 151607 (2014).
  39. N. Watanabe, M. Mitsuhashi, H. Yokoyama, J. Liang, and N. Shigekawa, "Influence of InGaN/GaN multiple quantum well structure on photovoltaic characteristics of solar cell," Jpn. J. Appl. Phys. **53**, 112301 (2014).
  40. Akio Yamamoto, Kazuki Kodama, Md. Tanvir Hasan, Norihiko Narita, Naoteru Shigekawa, and Masaaki Kuzuhara, "MOVPE GROWTH OF THICK (~1 μm) InGaN ON AlN/Si SUBSTRATES FOR InGaN/Si TANDEM SOLAR CELL", Technical Digest of the 6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, pp. 95-96, 2014 (1TuPo.2.14).
  41. Shota Nishida, Jianbo Liang, Tomohiro Hayashi, Manabu Arai and Naoteru Shigekawa, "Correlation between the electrical properties of p-Si/n-4H-SiC junctions and concentrations of acceptors in Si," Jpn. J. Appl. Phys. **54**, 030210 (2015).
  42. Masashi Morimoto, Jianbo Liang, Shota Nishida and Naoteru Shigekawa, "Effects of annealing on electrical properties of Si/Si junctions by surface-activated bonding," Jpn. J. Appl. Phys. **54**, 030212 (2015).
  43. Jianbo Liang, Li Chai, Shota Nishida, Masashi Morimoto and Naoteru Shigekawa, "Investigation on the interface resistance of Si/GaAs heterojunctions fabricated by surface-activated bonding," Jpn. J. Appl. Phys. **54**, 030211 (2015).
  44. A. Yamamoto, T. Md. Hasan, K. Kodama, N. Shigekawa, and M. Kuzuhara, "Thick (~1 μm) p-type In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N (x~0.36) grown by MOVPE at a low temperature (~570 °C)," Physica Stat. Solidi B, **1-4**, (2015) DOI: 10.1002/pssb.201451736.
  45. A. Yamamoto, Tanvir Md. Hasan, K. Kodama, N. Shigekawa, and M. Kuzuhara, "Growth temperature dependent critical thickness for phase separation in thick (~1 μm) In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N (x=0.2-0.4)", J. Crystal Growth, **419**, 64 (2015).
  46. Naoteru Shigekawa, Jianbo Liang, Ryusuke Onitsuka, Takaaki Agui, Hiroyuki Juso, and Tatsuya Takamoto, "Current-voltage and spectral-response characteristics of surface-activated-bonding-based InGaP/GaAs/Si hybrid triple-junction cells," Jpn. J. Appl. Phys. **54**, 08KE03 (2015).
  47. Akio Yamamoto, Kazuki Kodama, Md. Tanvir Hasan, Naoteru Shigekawa, and Masaaki Kuzuhara, "MOCVD growth of thick (~1 μm) InGaN on AlN/Si substrates for InGaN/Si tandem solar cells," Jpn. J. Appl. Phys. **54**, 08KA12 (2015).
  48. Jianbo Liang, Sae Shimizu, Shota Nishida, Naoteru Shigekawa, and Manabu Arai, "4H-SiC/Si heterojunction bipolar transistors fabricated by surface activated bonding," ECS Solid State Lett. **4**, Q55-Q57 (2015).
  49. Naoteru Shigekawa and Jianbo Liang, "Impacts of optical properties of anti-reflection coatings on characteristics of InGaP/GaAs/Si hybrid triple-junction cells," in Proc. 2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialists Conference. DOI: 10.1109/PVSC.2015.7356076
  50. Masato Shingo, Jianbo Liang, Naoteru Shigekawa, Manabu Arai, and Kenji Shiojima, "Mapping of Si/SiC p-n heterojunctions using scanning internal photoemission microscopy," Jpn. J. Appl. Phys. **55**, 04ER15 (2016).
  51. Akio Yamamoto, Kazuki Kodama, Naoteru Shigekawa, Takashi Matsuoka, and Masaaki Kuzuhara, "Low-temperature (≥400 °C) growth of InN by metalorganic vapor phase epitaxy using an NH<sub>3</sub> decomposition catalyst," Jpn. J. Appl. Phys. **55**, 05FD04 (2016).
  52. M. Mitsuhashi, N. Watanabe, H. Yokoyama, R. Iga, and N. Shigekawa, "Thickness modulation and strain relaxation in strain-compensated InGaP/InGaP multiple-quantum-well structures grown by metalorganic molecular beam epitaxy on GaAs (100) substrate," J. Crystal Growth **449**, **86** (2016).

(2)その他の著作物(総説、書籍など)

1. 山本 嵩勇・ブイヤン アシユラフル G., "窒化インジウム系半導体太陽電池の最近の動向と課題", Journal of the Vacuum Society of Japan, Vol. 55, No. 12 pp. 541-547, 2012.

2. Ashrafal Ghani Bhuiyan, Kenichi Sugita, Akihiro Hashimoto, and Akio Yamamoto, “InGaN Solar Cells: Present State of the Art and Important Challenges”, IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS, Vol. 2, No. 3, pp.276-293, 2012. (DOI: 10.1109/JPHOTOV.2012.2193384)

(3)国際学会発表及び主要な国内学会発表

① 招待講演 (国内会議 5件、国際会議 7件)

1. 発表者(所属)、タイトル、学会名、場所、月日

1. A. Yamamoto (Univ. of Fukui), K. Sasamoto (Univ. of Fukui), K. Sugita (Univ. of Fukui), A. Hashimoto (Univ. of Fukui), "Catalyst-assisted MOVPE growth of InN and GaN", European Materials Research Society (E-MRS) 2011 SPRING MEETING, Nice (France), 2011年5月11日
2. 山本 あき勇, "窒化物半導体を用いた高効率タンデム構造太陽電池", 平成 23 年度日本真空協会 11 月例会, 金沢市, 2011 年 11 月 25 日
3. 重川直輝・渡邊則之・横山春喜(以上 NTT)・杉田憲一・山本あき勇(以上福井大), 「MOVPE 成長による Si 基板上 InGa<sub>n</sub>N 系太陽電池」、平成 23 年電気学会電子・情報・システム部門大会、富山、2011 年 9 月 7 日～9 月 9 日
4. Akio Yamamoto and Ashraful G. Bhuiyan (Univ. Fukui), "Recent Progress in MOVPE grown III-N Solar Cells" NSAP 2012, Makuhari, Chiba, Japan, May 10-11, 2012.
5. A. Mihara (Univ. of Fukui), Y.D. Zheng (Univ. of Fukui), D. Hironaga (Univ. of Fukui), A. Hashimoto (Univ. of Fukui), N. Shigekawa (Osaka City Univ.), A. Yamamoto (Univ. of Fukui), "MOVPE InGa<sub>n</sub>N with intermediate In compositions grown on GaN/sapphire template and AlN/Si(111)", 第 73 回応用物理学会学術講演会分科企画シンポジウム, 松山市, 2012 年 9 月 11 日.
6. Akio Yamamoto and Ken-ichi Sugita (Univ. Fukui), "Growth of InN by the conventional, ArF excimer laser-assisted, and Pt catalyst-assisted MOCVD methods", Intensive Discussion on Growth of Nitride Semiconductors, Sendai, Japan, Oct. 22-23, 2012.
7. A. Yamamoto, K. Sugita, A. G. Bhuiyan, A. Hashimoto, N. Narita (Univ. Fukui), and N. Shigekawa (Osaka City Univ.), "MOVPE growth of InN-based alloys, InGa<sub>n</sub>N and InAlN, with intermediate In compositions", 2012 Collaborative Conference on Crystal Growth, Orland, USA, Dec. 11-14, 2012.
8. A. Yamamoto, A. Mihara, K. Sugita (Univ. Fukui), V. Yu Davydov, N. Shigekawa (Osaka City Univ.), "MOVPE-grown n-In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N (x~0.5)/p-Si(111) template as a novel substrate", Photonics West 2013, San Francisco, USA, Paper Number: 8641-22, Feb. 2-7, 2013.
9. 渡邊則之 (NTT): 「III-V 窒化物半導体太陽電池の開発状況と課題」、電気学会「次世代化合物電子デバイスとその応用」調査専門委員会、小金井、2013 年 11 月 18 日.
10. N. Shigekawa, J. Liang (Osaka City Univ.), and N. Watanabe (NTT), "Application of Surface Activated Bonding for Fabricating Multi Junction Solar Cells", International Union of Materials Research Societies – International Conference in Asia – 2013 (IUMRS-ICA 2013), Bangalore India, Dec. 16-20, 2013.
11. 満原学、渡邊則之、横山春喜 (NTT)、重川直輝 (大阪市大)、 「GaAs 傾斜基板上に成長した InGaP/InGaP 多重量子細線構造」、第 44 回結晶成長国内会議、東京、2014 年 11 月 6 日～11 月 8 日。
12. N. Shigekawa (Osaka City Univ.), "III-V-on-Si hybrid tandem cells by room-temperature surface-activated bonding," EMN Meeting on Photovoltaic 2016, Hong Kong, China, Jan. 18-21, 2016.

② 口頭発表 (国内会議 57 件、国際会議 15 件)

1. 発表者(所属)、タイトル、学会名、場所、月日

1. 渡邊則之 (NTT)、横山春喜 (NTT)、重川直輝 (NTT)、杉田憲一 (福井大)、山本あき勇 (福井大)「InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> MQW構造を有するSi基板上にMOCVD成長した窒化物系太陽電池」電気学会電子デバイス研究会 (群馬県みなかみ町、2011年3月1-2日)
2. 渡邊則之 (NTT)、横山春喜 (NTT)、重川直輝 (NTT)、杉田憲一 (福井大)、山本あき勇 (福井大)「MOCVD成長したSi基板上InGa<sub>N</sub>系太陽電池」2011年春季第58回 応用物理学関係連合講演会 (神奈川県厚木市、2011年3月24-27日)
3. A. G. Bhuiyan, 杉田憲一, 三上達也, 橋本明弘, 山本あき勇 (以上 福井大), 重川直輝 (NTT), “InGa<sub>N</sub>/Si 2 接合タンデム太陽電池の出力特性シミュレーション”, 第58回応用物理学関係連合講演会, 厚木市, 2011年3月24日.
4. 笹本紘平, 廣長大造, 堀田徹, 杉田憲一, A. G. Bhuiyan, 橋本明弘, 山本あき勇 (以上 福井大), 木下勝弘 (関西電力), “高濃度MgドープMOVPE-InGa<sub>N</sub>の成長挙動”, 第58回応用物理学関係連合講演会, 厚木市, 2011年3月27日.
5. 杉田憲一, 江崎岳志, 三原章宏, A. G. Bhuiyan, 橋本明弘, 山本あき勇 (以上 福井大), 渡邊 則之 (NTT), 横川春喜(NTT), 重川直輝 (NTT), “Si(111)基板上へのInGa<sub>N</sub>のMOVPE成長”, 第58回応用物理学関係連合講演会, 厚木市, 2011年3月27日.
6. 渡邊則之 (NTT)、横山春喜 (NTT)、重川直輝 (NTT)、杉田憲一 (NTT)、山本あき勇 (福井大)、「InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> MQW 太陽電池特性のバリア厚依存性」、第72回応用物理学学会学術講演会、山形、2011年8月29日～9月2日
7. 廣長大造, 堀田徹, 三原章宏, 杉田憲一, A. G. Bhuiyan, 橋本明弘, 山本あき勇 (以上 福井大), “NH<sub>3</sub>分解用Pt触媒援用MOVPE法In<sub>N</sub>成長におけるPt触媒の温度(RT~1000°C)の効果”, 第72回応用物理学学会学術講演会, 山形市, 2011年8月31日.
8. 堀田徹, 廣長大造, 三原章宏, 杉田憲一, A. G. Bhuiyan, 橋本明弘, 山本あき勇 (以上 福井大), “MOVPE法による中間組成域n-InAlN/p-InGa<sub>N</sub>ヘテロ接合の作製”, 第72回応用物理学学会学術講演会, 山形市, 2011年9月2日.
9. 三原章宏, 杉田憲一, A. G. Bhuiyan, 橋本明弘, 山本あき勇, (以上 福井大) 渡邊則之 (NTT), 重川直輝 (NTT), “MOVPE法によるSi(111)基板上への中間組成InGa<sub>N</sub>膜の成長”, 信学技報CPM2011-120(2011-10).
10. 堀田徹, 杉田憲一, A. G. Bhuiyan, 橋本明弘, 山本あき勇 (以上 福井大), “MOVPE法による中間組成域n-InAlN/p-InGa<sub>N</sub>ヘテロ接合の作製”, 電子情報通信学会部品材料研究会, 福井市, 2011年10月26日.
11. 嶋橋政徳 (アイテック), 松井和也(福井大), 岡田晃治 (アイテック(株)), 杉田 憲一 (福井大), 佐々木肇 (アイテック), 山本あき勇 (福井大), “MOCVD法によるInGa<sub>N</sub>膜を被覆した高耐食性固体高分子形燃料電池用ステンレス鋼セパレータ”, 電子情報通信学会部品材料研究会, 福井市, 2011年10月26日.
12. 廣長大造, 杉田憲一, A.G. Bhuiyan, 橋本明弘, 山本あき勇 (以上 福井大), “NH<sub>3</sub>分解触媒を用いたIn<sub>N</sub>のMOVPE成長”, 電子情報通信学会部品材料研究会, 福井市, 2011年10月27日.
13. 村松佑樹、三原彰宏、堀田徹、杉田憲一、A. G. Bhuiyan、橋本明弘、山本あき勇 (以上 福井大)、渡邊則之 (NTT)、重川直輝 (NTT), “MOVPE法により作製したn-InGa<sub>N</sub>/p-Siヘテロ構造の電流-電圧特性”, 平成23年度応用物理学学会北陸・信越支部学術講演会予稿集, 2011年11月18日～19日, 金沢市, 19a-B-03.
14. 吉村啓吾、三原彰宏、堀田徹、杉田憲一、A. G. Bhuiyan、橋本明弘、山本あき勇 (以上 福井大)、渡邊則之 (NTT)、重川直輝 (NTT), “Si(111)基板上のMOVPE成長InGa<sub>N</sub>膜の表面モフォロジ”, 平成23年度応用物理学学会北陸・信越支部学術講演会予稿集, 2011年11月18日～19日, 金沢市, 19a-E-11.

15. 重川直輝(大阪市大)、渡邊則之(NTT)、日暮栄治(東大)、「表面活性化ウエハボンディングによる半導体接合の特性評価」、第59回応用物理学関係連合講演会、東京、2012年3月15日～3月18日
16. 渡邊則之・満原学・横山春喜(以上 NTT)・重川直輝(大阪市大)、「InGaN/GaN MQW 構造におけるキャリア寿命特性のペア数依存性」、第59回応用物理学関係連合講演会、東京、2012年3月15日～3月18日
17. 満原学・渡邊則之・横山春喜・伊賀龍三(以上 NTT)・重川直輝(大阪市大)、「タンデム型太陽電池への応用に向けた歪補償 InGaP/InGaP MQW」、第59回応用物理学関係連合講演会、東京、2012年3月15日～3月18日
18. 廣長大造、三原彰宏、村松佑樹、吉村啓吾、杉田憲一、山本嵩勇(以上 福井大)、渡邊則之(NTT)、重川直輝(大阪市大)、「MOVPE法による n-InGaN/p-Si 構造の作製」、第59回応用物理学関係連合講演会予稿集、2012年3月15日～18日、東京。
19. A. Yamamoto, D. Hironaga, A. Mihara, Y. Muramatsu, K. Sugita, A. G. Bhuiyan, A. Hashimoto (Univ. Fukui), N. Shigekawa (Osaka City Univ.), and N. Watanabe (NTT), “MOVPE growth of  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ( $x\sim 0.5$ ) on Si(111) substrates with a pn junction on the surface”, 4<sup>th</sup> International Symposium on Growth of Nitride Semiconductors, St. Petersburg, Russia, Th-7o, 16-19 July, 2012.
20. 梁 剣波、宮崎達也、西田将太、森本雅史、福田常男、重川直輝(以上 大阪市大)、「表面活性化ボンディングによる p-Si/n<sup>+</sup>-Si 貼り合わせ構造の輸送特性評価」、2012年秋季 第73回応用物理学会学術講演会、松山、2012年9月11日。
21. 1. 満原 学、渡邊則之、横山春喜(以上 NTT)、重川直輝(大阪市大)、「MOMBE 成長による GaAs 基板上 Sn ドープ InGaP の n 型ドーピング制御」、2012年第73回応用物理学会学術講演会、松山、2012年9月11日。
22. A. Mihara, Y. D. Zheng, D. Hironaga, A. Hashimoto (Univ. of Fukui), N. Shigekawa (Osaka City Univ.) and A. Yamamoto (Univ. of Fukui), “MOVPE InGaN with intermediate *In* compositions grown on GaN/sapphire template and AlN/Si(111) substrate”, 2012年秋季 第73回応用物理学会学術講演会、松山、11p-H10-12, 2012年9月11日。
23. 梁 剣波、宮崎達也、西田将太、森本雅史、重川直輝(以上 大阪市大)、渡邊則之(NTT)、「表面活性化ウエハボンディングによる p-Si/n-GaAs 貼り合せ構造の特性評価」、2012年秋季 第73回応用物理学会学術講演会、松山、2012年9月12日。
24. N. Watanabe (NTT), H. Yokoyama (NTT), and N. Shigekawa (Osaka City Univ.), “First observation of negative differential resistivity in a GaN/AlGaN/GaN: possible tunneling junction using polarization”, International Workshop on Nitride Semiconductors 2012, Sapporo, Japan, October 14-19, 2012.
25. 梁 剣波、重川直輝(以上 大阪市大)、日暮栄治(東大)、「表面活性化ボンディングによる Si・異種材料接合の電気特性評価」、電子情報通信学会電子デバイス研究会(ED)、大阪、2012年11月29日。
26. 渡邊則之、横山春喜(以上 NTT)、重川直輝(大阪市大)、「GaN/AlGaIn/GaN 接合を有するダイオードにおける特異な I-V 特性」、電子情報通信学会電子デバイス研究会(ED)、大阪、2012年11月29日。
27. 梁剣波、宮崎達也、西田将太、森本雅史、重川直輝(以上 大阪市大)、「表面活性化ボンディングによる n-Si/n-4H-SiC ヘテロ接合の作製及び評価」、2013年 第60回応用物理学会春季学術講演会、厚木、2013年3月28日。
28. 梁剣波、宮崎達也、西田将太、森本雅史、重川直輝(以上 大阪市大)、「表面活性化ボンディングによる Si/InGaP ヘテロ接合のバンド構造評価」、2013年 第60回応用物理学会春季学術講演会、厚木、2013年3月29日。
29. Noriyuki Watanabe (NTT), Manabu Mitsuhashi (NTT), Haruki Yokoyama (NTT), Jianbo Liang (Osaka City Univ.), and Naoteru Shigekawa (Osaka City Univ.), “Well-number dependence of photovoltaic properties of InGaN/GaN multiple quantum well solar cells”, The 40th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2013), TuA2-2, May 19-23, 2013, Kobe, Japan.



30. Naoteru Shigekawa (Osaka City Univ.), Jianbo Liang (Osaka City Univ.), Noriyuki Watanabe (NTT) and Akio Yamamoto (Univ. of Fukui), "Fabrication of Nitride/Si Hybrid Tandem Cell Structures with Low Environmental Burden by Surface Activated Bonding", B6.06, 10th International Conference on Nitride Semiconductors, Washington DC, USA, Aug. 25-30, 2013.
31. Naoteru Shigekawa (Osaka City Univ.), Jiabo Liang (Osaka City Univ.), and Noriyuki Watanabe (NTT), "Application of Surface Activated Bonding for Fabricating Tandem Solar Cell Structures", 2013 JSAP-MRS Joint Symposia, 18p-M2-3, Kyoto, Japan, Sept. 16-20, 2013.
32. 三原章宏(福井大), 重川直輝(大阪市大), 山本あき勇(福井大), 「 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ( $x\sim 0.3$ )膜の MOVPE 成長に伴う下地 p-on-n Si 太陽電池の特性変化」、第 74 回応用物理学会秋季学術講演会、17p-D6-7、京都、2013 年 9 月 16 日-20 日。
33. 梁 劍波, 森本雅史, 西田将太, 重川直輝(大阪市大), 「表面活性化ボンディングによる InGaP/Si タンデム太陽電池の作成」、第 74 回応用物理学会秋季学術講演会、17p-D6-9、京都、2013 年 9 月 16 日-20 日。
34. 西田将太, 梁 劍波, 森本雅史, 重川直輝(以上 大阪市大), 新井 学(新日本無線), 「表面活性化ボンディング法による Si/4H-SiC 接合のブレークダウン特性」、第 74 回応用物理学会秋季学術講演会、17p-B3-14、京都、2013 年 9 月 16 日-20 日。
35. 三原章宏(福井大), 重川直輝(大阪市大), 山本あき勇(福井大), 「InGaN の MOVPE 成長における Si doping による In 取込量の抑制」、第 74 回応用物理学会秋季学術講演会、19a-B5-10、京都、2013 年 9 月 16 日-20 日。
36. 満原 学, 渡邊則之, 横山春喜(以上 NTT), 重川直輝(大阪市大), 「GaAs 基板上に成長した歪 InGaP/InGaP MQW における面内の構造的異方性」、第 74 回応用物理学会秋季学術講演会、19p-D3-7、京都、2013 年 9 月 16 日-20 日。
37. 森本雅史, 梁 劍波, 西田将太, 重川直輝(大阪市大), 「SAB 法による Si/Si 接合特性における Ar プラズマ照射効果」、第 74 回応用物理学会秋季学術講演会、19p-B4-13、京都、2013 年 9 月 16 日-20 日。
38. Naoteru Shigekawa (Osaka City Univ.), Masashi Morimoto (Osaka City Univ.), Shota Nishida (Osaka City Univ.), and Jianbo Liang (Osaka City Univ.), "Surface-Activated-Bonding Based InGaP-on-Si Double Junction Cells", Extended Abstracts of the 2013 International Conference on Solid State Devices and Materials, Fukuoka, Japan, Sept. 24-27, 2013, pp. 1184-1185.
39. A. Yamamoto, A. Mihara, N. Narita (Univ. Fukui), N. Shigekawa (Osaka City Univ.), "Effects of MOVPE InGaN growth conditions on the solar cell properties of p-on-n structure Si substrate", The 23rd International Photovoltaic Science and Engineering Conference, Taipei, Taiwan, Oct. 31.
40. 西田将太, 梁 劍波, 森本雅史, 重川直輝(以上大阪市大), 新井 学(新日本無線), 「表面活性化ボンディング法により形成した Si/SiC ヘテロ接合の電気特性」、電子情報通信学会研究会、ED2013-68、大阪、2013 年 11 月 28-29 日。
41. 梁 劍波, 西田将太, 森本雅史, 重川直輝(大阪市大), 「表面活性化ボンディング法によるタンデム太陽電池の作成」、電子情報通信学会研究会、ED2013-69、大阪、2013 年 11 月 28-29 日。
42. 渡邊則之, 満原 学, 横山春喜(以上 NTT), 梁 劍波, 重川直輝(以上大阪市大), 「InGaN/GaN MQW 太陽電池における MQW 構造最適化に関する考察」、電子情報通信学会研究会、ED2013-70、大阪、2013 年 11 月 28-29 日。
43. 満原学, 渡邊則之, 横山春喜(以上 NTT), 重川直輝(大阪市大), 「GaAs(100)傾斜基板上への歪 InGaP/InGaP MQW の MOMBE 成長」、第 61 回応用物理学会春季学術講演会、17a-E11-10、相模原、2014 年 3 月 17 日-20 日。
44. Md.tanvirHasan, 三原章宏, 成田憲彦(以上福井大), 重川直輝(大阪市大), 山本暁勇(福井大), 「Phase separation of MOVPE-grown thick ( $\sim 1 \mu\text{m}$ )  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ( $x\sim 0.3$ )(I): Simultaneous emergence of metallic In-Ga and GaN-rich InGaN」、第 61 回応用物理学会春季学術講演会、17p-E13-1、相模原、2014 年 3 月 17 日-20 日。
45. Md.tanvirHasan, 三原章宏, 成田憲彦(以上福井大), 重川直輝(大阪市大), 山本暁勇(福井大), 「Phase separation of MOVPE-grown thick ( $\sim 1 \mu\text{m}$ )  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ( $x\sim$

- 0.3)(ID): Suppression of the phase separation」、第 61 回応用物理学会春季学術講演会、17p-E13-2、相模原、2014 年 3 月 17 日–20 日。
46. 森本雅史, 梁劍波, 西田将太, 重川直輝, 柴麗, 竹村光司, 林朋宏 (大阪市大)、「表面活性化ボンディング法による Si/Si 接合特性における熱処理依存性」、第 61 回応用物理学会春季学術講演会、18p-E14-18、相模原、2014 年 3 月 17 日–20 日。
  47. 梁劍波 (大阪市大), 新井学 (新日本無線), 西田将太, 森本雅史, 重川直輝 (以上大阪市大)、「Si/4H-SiC ヘテロ接合界面に対する熱処理の効果」、第 61 回応用物理学会春季学術講演会、18p-E5-3、相模原、2014 年 3 月 17 日–20 日。
  48. 西田将太, 梁劍波, 林朋宏, 森本雅史, 重川直輝 (以上大阪市大), 新井学 (新日本無線)、「SAB 法による p<sup>+</sup>-Si / n-4H-SiC 接合のアニール温度依存性」、第 61 回応用物理学会春季学術講演会、18p-E5-4、相模原、2014 年 3 月 17 日–20 日。
  49. A. Yamamoto, A. Mihara, T. Md Hasan, N. Shigekawa, M. Kuzuhara, “Growth temperature dependent critical thickness for phase separation in thick (~1 μm) In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N (x = 0.2~0.4)”, 2014 International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN 2014), Wroclaw (Poland), Aug. 27, 2014. URL: <http://iwn2014.nazwa.pl/wordpress/wp-content/uploads/2014/07/Growth.pdf>
  50. 梁劍波、西田将太、林朋宏、森本雅史、重川直輝 (以上大阪市大)、新井学 (新日本無線)、「SiC 基板上 Si 薄膜のウェット酸化と界面構造の安定」、17p-A17-9、第 75 回応用物理学会秋季学術講演会、札幌、2014.9.17-20.
  51. Md. Tanvir Hasan, A. Mihara (Univ. Fukui), N. Shigekawa (Osaka City Univ.), A. Yamamoto, M. Kuzuhara (Univ. Fukui), “RTA of MOVPEgrown Mg-doped In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N (x~0.3) for Mg activation”, 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 札幌, 9 月 17 日。
  52. N. Shigekawa, J. Liang, M. Morimoto, and S. Nishida, "Type-II Band Profile of GaAs/Si Hetero Junctions by Surface Activated Bonding for Hybrid Tandem Cells", 1726, 226th Meeting of The Electrochemical Society, Cancun Mexico, Oct. 6-9, 2014.
  53. Naoteru Shigekawa, Li Chai, Masashi Morimoto, Jianbo Liang, Ryusuke Onitsuka, Takaaki Agui, Hiroyuki Juso, and Tatsuya Takamoto, "InGaP/GaAs/Si Hybrid Triple-Junction Cells by Surface-Activated Bonding of Invertedly-Grown III-V Heterostructures to Si- Based Bottom Cells", 5WeO.4.6, The 6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Kyoto, Japan, Nov. 23-27, 2014. Program URL: <http://wcepec6.com/pdf/wcepec6program.pdf>
  54. 渡邊則之、満原学、横山春喜 (以上 NTT)、梁劍波、重川直輝 (以上大阪市大)、「InGaN/GaN MQW 太陽電池における MQW 構造が短絡電流に与える影響」、電子情報通信学会電子デバイス研究会、ED2014-94、吹田、2014 年 11 月 27 日~11 月 28 日。
  55. 児玉 和樹、H a s a n M d T a n v i r、野村 裕之 (以上福井大)、重川 直輝 (大阪市大)、山本 嵩勇、葛原 正明 (以上福井大)、“MOVPE 成長 InGaN 厚膜における相分離の臨界膜厚”、電子情報通信学会電子デバイス研究会、吹田、11 月 27 日。
  56. 梁 劍波、柴 麗、西田 将太、重川 直輝 (福井大)、「タンデム太陽電池応用のための Si/InGaP ヘテロ接合の電気伝導特性」、11a-A21-1、2015 年第 62 回応用物理学会春季学術講演会、平塚、2015.3.11-14.
  57. 児玉 和樹、野村 裕之 (以上福井大)、重川 直輝 (大阪市大)、山本 嵩勇、葛原 正明 (以上福井大)、“MOVPE 法による n<sup>+</sup>-p 構造 In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N (x~0.3)光起電力素子の作製”、第 62 回応用物理学会春季学術講演会、平塚市、3 月 12 日。
  58. N. Shigekawa, J. Liang, T. Nishimura (Osaka City Univ.), N. Watanabe (NTT), " Surface-activated bonding of n<sup>+</sup>-Si to n-GaN: A possible process for fabricating ohmic contacts to nitrides with smooth surface," 39th Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits, Smolenice, Slovak, June 10, 2015.
  59. 山本 高勇、児玉 和樹 (以上福井大)、重川 直輝 (大阪市大)、松岡 隆志 (東北大)、葛原 正明 (福井大)、「NH<sub>3</sub> 分解触媒援用 MOVPE 法による InN 系材料の低温(~400°C)成長(I): InN 成長」2015 年 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会、14a-1D-1、名古屋、2015 年 9 月 13 日–16 日。
  60. 山本 高勇、児玉 和樹 (以上福井大)、重川 直輝 (大阪市大)、松岡 隆志 (東北大)、

- 葛原 正明 (福井大)、「NH<sub>3</sub> 分解触媒援用 MOVPE 法による InN 系材料の低温(～400°C) 成長(Ⅱ): In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N(x～0.3)の成長」2015 年 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会、14a-1D-2、名古屋、2015 年 9 月 13 日－16 日。
61. 梁 劍波、重川 直輝 (以上大阪市大)、「多接合太陽電池のボトムセル応用のための Si 逆ピラミッド構造の検討」2015 年 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会、14p-2M-2、名古屋、2015 年 9 月 13 日－16 日。
  62. 西村 拓也、梁 劍波 (以上大阪市大)、渡邊 則之 (NTT)、重川 直輝 (大阪市大)、「表面活性化接合による p-Si/n-GaN 接合の電気特性評価」2015 年 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会、15p-4C-10、名古屋、2015 年 9 月 13 日－16 日。
  63. 山條 翔二、梁 劍波 (以上大阪市大)、渡邊 則之 (NTT)、重川 直輝 (大阪市大)、「表面活性化ボンディング法による GaAs/GaN 接合の電気特性の評価」2015 年 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会、15p-4C-12、名古屋、2015 年 9 月 13 日－16 日。
  64. 柴 麗、梁 劍波、重川 直輝 (大阪市大)「GaAs/GaAs 接合界面の電気特性に対するアニール効果の抽出の試み」2015 年 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会、16a-4C-1、名古屋、2015 年 9 月 13 日－16 日。
  65. 新郷 正人 (福井大)、Jianbo Liang、重川 直輝 (以上大阪市大)、新井 学 (新日本無線)、塩島 謙次 (福井大)、「界面顕微光応答法による Si/SiC ヘテロ p-n 接合の 2 次元評価」2015 年 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会、16p-4C-1、名古屋、2015 年 9 月 13 日－16 日。
  66. 清水 彩絵、梁 劍波 (以上大阪市大)、新井 学 (新日本無線)、重川 直輝 (大阪市大)、「常温接合法による GaAs/4H-SiC ヘテロ接合作製及び電気特性評価」2015 年 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会、16p-4C-2、名古屋、2015 年 9 月 13 日－16 日。
  67. A. Yamamoto, K. Kodama (Univ. of Fukui), N. Shigekawa (Osaka City Univ.), T. Matsuoka (Tohoku Univ.), M. Kuzuhara (Univ. of Fukui), “Low-resistivity In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N (x=0～0.35) grown by low-temperature (≦ 600°C) MOVPE using NH<sub>3</sub> decomposition catalysts” 6th International Symposium on Growth of III-Nitrides, Hamamatsu (Japan), 2015 年 11 月 10 日。
  68. A. Yamamoto, K. Kodama (Univ. of Fukui), N. Shigekawa (Osaka City Univ.), T. Matsuoka (Tohoku Univ.), M. Kuzuhara (Univ. of Fukui),” Migration-enhanced, low-temperature (～400°C) MOVPE growth of InN using NH<sub>3</sub> decomposition catalysts”, 6th International Symposium on Growth of III-Nitrides, Hamamatsu (Japan), 2015 年 11 月 11 日。
  69. 3. A. Yamamoto, K. Kodama (Univ. of Fukui), N. Shigekawa (Osaka City Univ.), M. Kuzuhara (Univ. of Fukui), “NH<sub>3</sub> decomposition catalyst-assisted MOVPE growth of In<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>N for solar cell application”, PVSEC-25, Busan (Korea), 2015 年 11 月 16 日。
  70. 柴 麗、梁 劍波、重川 直輝 (大阪市立大)「GaAs/GaAs 接合の電気特性に対するアニール効果」電子情報通信学会電子デバイス研究会、ED2015-89、大阪、2015 年 11 月 27 日。
  71. 林 朋宏、梁 劍波 (以上大阪市立大)、新井 学 (新日本無線)、重川 直輝 (大阪市立大)、「表面活性化ボンディング法に依る Si/SiC 接合の電気特性」電子情報通信学会電子デバイス研究会、ED2015-90、大阪、2015 年 11 月 27 日。
  72. 渡邊則之、満原学 (以上 NTT)、重川直輝 (大阪市大)、「GaN/Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 基板および GaN 基板に成長した InGaN/GaN MQW 太陽電池特性」、第 63 回応用物理学会春季学術講演会、19p-W541-12、東京、2016 年 3 月 19 日－22 日。
  73. 山條 翔二、尹 翔至、梁 劍波 (以上大阪市立大)、渡邊 則之 (NTT)、重川 直輝 (大阪市立大)、「Si 基板上 GaAs/GaN ヘテロ接合の縦方向電気特性評価」第 63 回応用物理学会春季学術講演会、21p-W541-12、東京、2016 年 3 月 19 日－22 日。

③ ポスター発表 (国内会議 26 件、国際会議 38 件)

1. 発表者(所属)、タイトル、学会名、場所、月日

1. 杉田憲一, 堀田徹, 廣長大造, 三原章宏, A. G. Bhuiyan, 橋本明弘, 山本あき勇 (以上 福井大), "温度制御された NH<sub>3</sub> 分解用 Pt 触媒を用いた MOVPE 法 InN 成長におけるマイグレーション促進効果", 第 3 回窒化物半導体結晶成長講演会, 春日市(福岡県)2011 年 6 月 17 日
2. 重川直輝・渡邊則之・横山春喜(以上 NTT)・杉田憲一・山本あき勇(以上福井大), 「シリコン基板上タンデムセル実現を目指す InGaN 系 PV セルの作製・評価」、第 8 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム、岐阜、2011 年 6 月 30 日～7 月 1 日
3. 杉田憲一, 三原彰宏, A. G. Bhuiyan, 山本嵩勇 (以上福井大), 渡邊則之, 重川直輝 (以上 NTT), "(111)Si 基板上への InGaN の MOVPE 成長と評価", 第 8 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム、岐阜、2011 年 6 月 30 日～7 月 1 日, C-46.
4. A. G. Bhuiyan, T. Esaki, A. Mihara, K. Sugita, A. Hashimoto, A. Yamamoto (Univ. Fukui), N. Watanabe, H. Yokoyama, N. Shigekawa (NTT), "MOVPE Growth of InGaN on Si(111) Substrates With an Intermediate Range of In Content", ICNS-9, July 10-15, 2011, Glasgow, UK, PD3.27.
5. J. K. Kim, Y. Kamei, A. Kimura, N. Hasuike, H. Harima, K. Kisoda (KIT), T. Hotta, K. Sasamoto, A. Yamamoto (Univ. of Fukui), "Observation of A1(LO) and B1(high) phonon modes in In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N alloys", 9th International Conference on Nitride Semiconductors, Glasgow (UK), 2011 年 7 月 13 日.
6. M. Shimahashi (Eye Tech), K. Matsui, K. Okada (Eye Tech), K. Sugita (Univ. of Fukui), H. Sasaki (Eye Tech), A. Yamamoto (Univ. of Fukui), "Anti-corrosive SUS separator coated with MOCVD InGaN for polymer electrolyte fuel cell (PEFC)", 9th International Conference on Nitride Semiconductors, Glasgow (UK), 2011 年 7 月 13 日
7. K. Sugita, T. Hotta, M. Tanaka, K. Sasamoto, A. G. Bhuiyan, A. Hashimoto, A. Yamamoto (Univ. of Fukui), "MOVPE Growth of InAlN/InGaN Hetero-junction", 9th International Conference on Nitride Semiconductors, Glasgow (UK), 2011 年 7 月 13 日
8. K. Sugita, T. Hotta, D. Hironaga, A. Mihara, A. G. Bhuiyan, A. Hashimoto, A. Yamamoto (Univ. of Fukui), "Highly enhanced migration in Pt-catalyst-assisted MOVPE InN by controlling the catalyst temperature", 9th International Conference on Nitride Semiconductors, Glasgow (UK), 2011 年 7 月 13 日
9. A. Mihara, K. Sugita, A. G. Bhuiyan, A. Hashimoto, A. Yamamoto (Univ. Fukui), N. Watanabe, N. Shigekawa, H. Yokoyama (NTT), "FABRICATION OF InGaN/Si(111) HETERO-STRUCTURE WITH INTERMEDIATE In CONTENTS FOR 2-JUNCTION TANDEM SOLAR CELLS", 21st International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-21), Nov. 28-Dec.2, 2011, Fukuoka, Japan, 2D-4P-20.
10. Noriyuki Watanabe, Haruki Yokoyama, Naoteru Shigekawa (NTT), Ken-ichi Sugita and Akio Yamamoto (Univ. Fukui) "Barrier thickness dependence of photovoltaic characteristics of InGaN/GaN Multiple Quantum Well Solar Cells", 21st International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-21), Fukuoka (Japan), 2011.11.28~12.2.
11. N. Shigekawa (Osaka City Univ.), N. Watanabe (NTT), and E. Higurashi (Univ. Tokyo), "Electrical Properties of Si-based Junctions by SAB", 3rd International IEEE Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration, Tokyo, Japan, May 22-23, 2012.
12. 渡邊則之、横山春喜、満原学(以上 NTT)、重川直輝(大阪市大), 「InGaN/GaN MQW におけるキャリア寿命特性の井戸層厚依存性」、2012 年第 73 回応用物理学会学術講演会、松山、2012 年 9 月 13 日。
13. A. Mihara, Y.D. Zheng, D. Hironaga, A. Hashimoto (Univ. Fukui), N. Shigekawa (Osaka City Univ.) and A. Yamamoto (Univ. Fukui), "A comparative study on MOVPE InGaN with intermediate In compositions grown on GaN/sapphire template and AlN/Si(111) substrate", International Workshop on Nitride Semiconductors 2012, Sapporo, Japan, TuP-GR-12, October 14-19, 2012.

14. K. Sugita, D. Hironaga, A. Mihara, A. Hashimoto, and A. Yamamoto (Univ. Fukui), “Catalyst temperature (RT-1000°C) dependence of NH<sub>3</sub> decomposition for MOVPE growth of InN” International Workshop on Nitride Semiconductors 2012, Sapporo, Japan, ThP-LN-2, October 14-19, 2012.
15. 森本雅史、梁劍波、宮崎達也、西田将太、重川直輝(大阪市大)、「表面活性化ボンディングによるメサエッチング Si 基板の接合特性評価」、2013 年 第 60 回応用物理学会春季学術講演会、厚木、2013 年 3 月 27 日。
16. 三原章宏、鄭 仰東(以上福井大)、重川直輝(大阪市大)、山本嵩勇(福井大)、「MOVPE 成長 In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N (x.0.3)膜の Si ドーピング効果」、2013 年第 60 回応用物理学会春季学術講演会、厚木、28p-PA-7、2013 年 3 月 28 日。
17. 梁劍波、宮崎達也、西田将太、森本雅史、重川直輝(大阪市大)、「表面活性化ボンディングによる Si/GaAs ヘテロ接合のバンド構造評価」、2013 年 第 60 回応用物理学会春季学術講演会、厚木、2013 年 3 月 29 日。
18. 重川直輝、梁劍波(大阪市大)、「表面活性化ボンディングによる低抵抗 Si/III-V 接合」、2013 年 第 60 回応用物理学会春季学術講演会、厚木、2013 年 3 月 29 日。
19. 西田将太、梁劍波、宮崎達也、森本雅史、重川直輝(以上大阪市大)、新井学(新日本無線)、「表面活性化ボンディング法による Si/4H-SiC 接合の C-V 特性評価」、2013 年 第 60 回応用物理学会春季学術講演会、厚木、2013 年 3 月 29 日。
20. 渡邊則之、横山春喜、満原学(以上 NTT)、梁劍波、重川直輝(以上大阪市大)、「InGaN/GaN MQW 太陽電池特性のペア数依存性」、2013 年 第 60 回応用物理学会春季学術講演会、厚木、2013 年 3 月 29 日。
21. M. Morimoto, J. Liang, S. Nishida, T. Miyazaki, and N. Shigekawa (Osaka City Univ.), “Type II band lineup in SAB-based GaAs/Si heterojunctions”, 2013 International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai (IMFEDK 2013), pp. 48-49, June 5-6, 2013, Osaka, Japan.
22. J. Liang, T. Miyazaki, S. Nishida, M. Morimoto, and N. Shigekawa (Osaka City Univ.), “Band Structures of Si/InGaP Heterojunctions by Using Surface-Activated Bonding”, The 40th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2013), MoPC-10-03, May 19-23, 2013, Kobe, Japan.
23. A. Yamamoto, A. Mihara (Univ. Fukui), and N. Shigekawa (Osaka City Univ.), “Reduction of In Incorporation by Si-Doping in MOVPE-Grown In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N (x~0.3)”, AP1.70, 10th International Conference on Nitride Semiconductors, Washington DC, USA, Aug. 25-30, 2013.
24. J. Liang, M. Morimoto, S. Nishida (Osaka City Univ.), M. Arai (New Japan Radio Co.), and N. Shigekawa (Osaka City Univ.), “Electrical properties of p<sup>+</sup>-Si/n-SiC heterojunctions by using surface-activated bonding”, 10th Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics, 10-8, Hakodate, Japan, Sep. 2-5, 2013.
25. 渡邊則之、満原 学、横山春喜(以上 NTT)、梁 劍波、重川直輝(以上 大阪市大)、「InGaN/GaN MQW 太陽電池における短絡電流と MQW 構造の相関」、第 74 回応用物理学会秋季学術講演会、18p-P12-16、京都、2013 年 9 月 16 日—20 日。
26. S. Nishida, J. Liang, M. Morimoto, N. Shigekawa (Osaka City Univ.), and M. Arai (New Japan Radio Co.), “I-V Characteristics in Surface-Activated Bonding (SAB) Based Si/SiC Junctions at Raised Ambient Temperatures”, International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2013, Mo-P-32, Miyazaki, Japan, Sep. 29-Oct. 4, 2013.
27. 柴麗、梁劍波、西田将太、森本雅史、重川直輝(大阪市大)、「ハイブリッドタンDEM 太陽電池構造の接合界面に対するアニール効果」、第 61 回応用物理学会春季学術講演会、18p-PG4-2、相模原、2014 年 3 月 17 日—20 日。
28. 渡邊則之、満原学、横山春喜(以上 NTT)、重川直輝(大阪市大)、「InGaN/AlGaIn/GaN 構造によるトンネル接合」、第 61 回応用物理学会春季学術講演会、18p-PG4-7、相模原、2014 年 3 月 17 日—20 日。
29. 竹村光司、森本雅史、西田将太、梁劍波、重川直輝(大阪市大)、「SAB 法による深いメサ構造を有する Si/Si 接合における寄生容量の低減」、第 61 回応用物理学会春季学術講演会、19p-PG3-31、相模原、2014 年 3 月 17 日—20 日。

30. A. Yamamoto, Md. Tanvir Hasan, A. Mihara (Univ. Fukui), N. Shigekawa (Osaka City Univ.), M. Kuzuhara (Univ. Fukui), "Observation of phase separation for thick ( $\sim 1 \mu\text{m}$ )  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ( $x \sim 0.3$ ) grown on  $\text{AlN}/\text{Si}$  substrate", 5th International Symposium on Growth of III-Nitrides (ISGN-5), Atlanta (USA), May 19, 2014.
31. Naoteru Shigekawa, Li Chai, Masashi Morimoto, Jianbo Liang (Osaka City Univ.), Ryusuke Onitsuka, Takaaki Agui, Hiroyuki Juso, and Tatsuya Takamoto (Sharp), "Hybrid Triple-Junction Solar Cells by Surface Activate Bonding of III-V Double-Junction-Cell Heterostructures to Ion-Implantation-Based Si Cells", 169-F32, 40th IEEE PHOTOVOLTAIC SPECIALISTS CONFERENCE, Denver, USA, June 8-13, 2014.
32. T. Hayashi, J. Liang, S. Nishida, N. Shigekawa (Osaka City Univ.), and M. Arai (New Japan Radio Co.), "Improvement in electrical properties in SAB-based  $\text{n}^+\text{-Si}/\text{n-4H-SiC}$  junctions by annealing", 2014 IEEE International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai (IMFEDK), Kyoto, Japan, 19-20 June 2014.
33. K. Takemura, M. Morimoto, S. Nishida, J. Liang, and N. Shigekawa (Osaka City Univ.), "Fabrication and characterization of  $\text{Si}/\sim 10\text{-}\mu\text{m}$  mesa-etched Si junctions by surface activated bonding", 2014 IEEE International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai (IMFEDK), Kyoto, Japan, 19-20 June 2014.
34. 重川 直輝、柴 麗、森本 雅史、梁 劍波 (大阪市立大)、鬼塚 隆祐、安居院 高明、十楚 博行、高本 達也 (シャープ)、"III-V 系半導体セルとイオン注入 Si セルの貼り合せによるハイブリッド 3 接合セル"、C-31、第 11 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム、宮崎、日本、2014.7.3-4.
35. L. Chai, J. Liang, S. Nishida, M. Morimoto, and N. Shigekawa (Osaka City Univ.), "Effects of annealing on  $\text{GaAs}/\text{Si}$  bonding interfaces for hybrid tandem solar cells", 2014 4th IEEE International Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration (LTB-3D), Tokyo, Japan, 15-16 July 2014.
36. M. Morimoto, J. Liang, S. Nishida, L. Chai, K. Takemura, and N. Shigekawa (Osaka City Univ.), "Annealing temperature dependence of SAB based  $\text{Si}/\text{Si}$  junctions ", 2014 4th IEEE International Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration (LTB-3D), Tokyo, Japan, 15-16 July 2014.
37. J. Liang, S. Nishida, T. Hayashi, M. Morimoto, N. Shigekawa (Osaka City Univ.), and M. Arai (New Japan Radio Co.), "Investigation on the effects of annealing process on the electrical properties of  $\text{n}^+\text{-Si}/\text{n-SiC}$  junctions", 2014 4th IEEE International Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration (LTB-3D) Tokyo, Japan, 15-16 July 2014.
38. S. Nishida, S. J. Liang, T. Hayashi, M. Morimoto, N. Shigekawa (Osaka City Univ.), and M. Arai (New Japan Radio Co.), "Annealing characteristics of  $\text{p}^+\text{-Si}/\text{n-4H-SiC}$  junctions by using surface-activated bonding ", 2014 4th IEEE International Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration (LTB-3D) Tokyo, Japan, 15-16 July 2014.
39. Md. Tanvir Hasan (Univ. Fukui), N. Shigekawa (Osaka City Univ.), A. Yamamoto, M. Kuzuhara (Univ. Fukui), "p-type  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ( $x \sim 0.3$ ) grown by MOVPE at a low temperature ( $\sim 570^\circ\text{C}$ )", 2014 International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN 2014), Wroclaw (Poland), Aug.27, 2014.
40. 重川 直輝、柴 麗、森本 雅史、梁 劍波 (以上大阪市大)、鬼塚 隆祐、安居院 高明、十楚 博行、高本 達也 (シャープ)、"異種材料直接接合による  $\text{InGaP}/\text{GaAs}/\text{Si}$  タンデムセル"、19p-PB3-4、第 75 回応用物理学会秋季学術講演会、札幌、日本、2014.9.17-20.
41. 満原学、渡邊則之、横山春喜 (以上 NTT)、重川直輝 (大阪市大)、"GaAs 傾斜基板上に多重積層させた自己形成  $\text{InGaP}/\text{InGaP}$  量子細線状構造"、第 75 回応用物理学会秋季学術講演会、19p-PB5-5、札幌、2014 年 9 月 17 日～9 月 20 日
42. A. Yamamoto, K. Kodama, Md. T. Hasan, N. Narita (Univ. Fukui), N. Shigekawa (Osaka City Univ.), M. Kuzuhara (Univ. Fukui), "MOVPE GROWTH OF THICK ( $\sim 1 \mu\text{m}$ )  $\text{InGaN}$  ON  $\text{AlN}/\text{Si}$  SUBSTRATES FOR  $\text{InGaN}/\text{Si}$  TANDEM SOLAR CELL", 6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-6), Kyoto (Japan), Nov. 25, 2014.
43. 清水 彩絵、西田 将太、梁 劍波、森本 雅史、重川 直輝 (大阪市大)、新井 学 (新日本無線)、"SAB 法による  $4\text{H-SiC}/\text{Si}$  HBT 構造における少数キャリア注入特性"、

- 11p-P2-15、2015 年第 62 回応用物理学会春季学術講演会、平塚、日本、2015.3.11-14.
44. 山條 翔二、森本 雅史、梁 劍波、重川 直輝 (大阪市大)、「SAB 法による Si/Si 接合の界面特性の評価」、13a-P14-11、2015 年第 62 回応用物理学会春季学術講演会、平塚、日本、2015.3.11-14.
  45. 西村 拓也、梁 劍波 (以上大阪市大)、渡邊 則之 (NTT)、重川 直輝 (大阪市大)、「表面活性化接合による n+-Si/n-GaN コンタクトの検討」、13p-P17-22、2015 年第 62 回応用物理学会春季学術講演会、平塚、日本、2015.3.11-14.
  46. 重川 直輝、梁 劍波 (大阪市大)、「AR 膜による InGaP/GaAs/Si 3 接合セル中サブセル特性の制御」、13p-P19-15、2015 年第 62 回応用物理学会春季学術講演会、平塚、日本、2015.3.11-14.
  47. Li Chai, Jianbo Liang, Shota Nishida, Masashi Morimoto and Naoteru Shigekawa (Osaka City Univ.), "Electrical characterization of GaAs/GaAs bonding interfaces," The 2015 International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai, PA-06 (pp. 44-45), Kyoto, Japan, June 4-5, 2015.
  48. Takuya Nishimura, Jianbo Liang (Osaka City Univ.), Noriyuki Watanabe (NTT) and Naoteru Shigekawa (Osaka City Univ.), "Electrical properties of n+-Si/n-GaN junctions by room temperature bonding," The 2015 International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai, PA-07 (pp. 46-47), Kyoto, Japan, June 4-5, 2015.
  49. Shoji Yamajo, Masashi Morimoto, Jianbo Liang and Naoteru Shigekawa (Osaka City Univ.), "Interface characteristics of Si/Si junctions by using surface-activated bonding," The 2015 International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai, PB-03 (pp. 62-63), Kyoto, Japan, June 4-5, 2015.
  50. Sae Shimizu, Shota Nishida, Jianbo Liang, Masashi Morimoto and Naoteru Shigekawa (Osaka City Univ.), "Fabrication and characterization of Si-based bipolar transistor structures using low-temperature bonding," The 2015 International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai, PB-04 (pp. 64-65), Kyoto, Japan, June 4-5, 2015.
  51. Naoteru Shigekawa and Jianbo Liang (Osaka City Univ.), "Impacts of optical properties of anti-reflection coatings on characteristics of InGaP/GaAs/Si hybrid triple-junction cells," 42nd IEEE International Photovoltaic Specialists Conference, H10 (428), New Orleans, USA, June 14-19, 2015.
  52. S. Shimizu, "Fabrication and characterization of GaAs/4H-SiC junctions by using SAB," 11th Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics, 4-4, Takayama, Japan, Aug. 23-26, 2015.
  53. Takuya Nishimura, "Impacts of annealing in N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> ambient on electrical properties of Si/GaN junctions," 11th Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics, 4-5, Takayama, Japan, Aug. 23-26, 2015.
  54. Shoji Yamajo, "Band lineups in GaAs/GaN junctions using surfaceactivated bonding," 11th Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics, 4-6, Takayama, Japan, Aug. 23-26, 2015.
  55. Kazuki Kodama (Univ. Fukui), Hiroyuki Nomura (Univ. Fukui), Naoteru Shigekawa (Osaka City Univ.), Akio Yamamoto (Univ. Fukui), and Masaaki Kuzuhara (Univ. Fukui), "MOVPE Growth and Device Fabrication of Thick N<sup>+</sup>-P InGaN with in Composition of 0.3 and No Phase Separation at 600 °C," 11th International Conference on Nitride Semiconductors, TuGP84, Beijing, China, Aug. 30-Sep. 4, 2015.
  56. Jianbo Liang (Osaka City Univ.), Takuya Nishimura (Osaka City Univ.), Noriyuki Watanabe (NTT), and Naoteru Shigekawa (Osaka City Univ.), "Electrical Properties of Room Temperature Bonded Si/GaN Heterojunctions without Buffer Layers," 11th International Conference on Nitride Semiconductors, WeEP6, Beijing, China, Aug. 30-Sep. 4, 2015.
  57. 渡邊 則之、満原 学 (以上 NTT)、重川 直輝 (大阪市大)、「GaN/Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> テンプレート基板上に成長した InGaN/GaN MQW 太陽電池構造」2015 年 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会、15p-PB1-1、名古屋、2015 年 9 月 13 日 - 16 日。
  58. J. Liang, S. Shimizu, S. Nishida, N. Shigekawa (Osaka City Univ.) and M. Arai (New Japan Radio Co.), "Transport Characteristics of Minority Carriers in 4H-SiC/Si Heterojunction

- Bipolar Transistor Structures Fabricated by Surface Activated Bonding," 2015 International Conference on Solid State Devices and Materials, PS-14-5, Sapporo, Japan, Sept. 29, 2015.
59. M. Shingo (Univ. Fukui), J. Liang, N. Shigekawa (Osaka City Univ.), M. Arai (New Japan Radio Co.) and K. Shiojima (Univ. Fukui), "Mapping of Si/SiC Hetero p-n Junctions Using Scanning Internal Photoemission Microscopy," 2015 International Conference on Solid State Devices and Materials, PS-14-11, Sapporo, Japan, Sept. 29, 2015.
  60. N. Shigekawa, J. Liang (Osaka City Univ.), M. Shingo (Univ. Fukui), M. Arai (New Japan Radio Co.) and K. Shiojima (Univ. Fukui), "Photoemission Spectroscopy Measurements of  $p^+$ -Si/n-SiC and  $n^+$ -Si/n-SiC Junctions by Surface Activated Bonding," 2015 International Conference on Solid State Devices and Materials, PS-14-12, Sapporo, Japan, Sept. 29, 2015.
  61. 渡邊則之, 満原学 (以上 NTT), 重川直輝 (大阪市大), 「GaN 基板上 InGaN/GaN MQW 太陽電池における井戸層厚と太陽電池特性」、第 63 回応用物理学会春季学術講演会、20p-P14-1、東京、2016 年 3 月 19 日—22 日。
  62. 清水 彩絵、梁 剣波 (以上 大阪市立大)、新井 学 (新日本無線)、重川 直輝 (大阪市立大), 「熱処理による 4H-SiC/Si HBT の電気特性の改善」、第 63 回応用物理学会春季学術講演会、21p-P10-12、東京、2016 年 3 月 19 日—22 日。
  63. 古名 克也、梁 剣波、(以上 大阪市立大)、松原 萌子、西尾 佳高 (以上 東洋アルミニウム)、重川 直輝 (大阪市大工), 「表面活性化ボンディング法による Al 箔/Si 接合の電気特性評価」、第 63 回応用物理学会春季学術講演会、21p-P17-9、東京、2016 年 3 月 19 日—22 日。
  64. 山本嵩勇 (福井大), 児玉和樹 (福井大), 松岡隆志 (東北大), 重川直輝 (大阪市大), 葛原正明 (福井大), “NH<sub>3</sub> 分解触媒援用 MOVPE 成長 In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N(x~0.35)の Mg ドーピング挙動” 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 22a-P6-9, 東京, 2016 年 3 月 22 日。



#### (4)知財出願

##### ①国内出願 (14 件)

1. タンデム太陽電池セル、重川直輝、日本電信電話株式会社、2011/3/10、特願 2011-052918(特許第 5221695 号)
2. 太陽電池およびその製造方法、渡邊則之、日本電信電話株式会社、2011/8/1、特願 2011-168118(拒絶査定)
3. 2 接合太陽電池、満原学、日本電信電話株式会社、2012/2/22、特願 2012-036223(拒絶査定)
4. 半導体素子、渡邊則之、日本電信電話株式会社、2012/2/23、特願 2012-037033(拒絶査定)
5. 太陽電池、渡邊則之、日本電信電話株式会社、2013/2/1、特願 2013-018111(特許第 05559370 号)
6. 多接合太陽電池およびその製造方法、渡邊則之、重川直輝、日本電信電話株式会社、公立大学法人大阪市立大学、2013/5/8、特願 2013-098150(特許第 05669228 号)
7. 多接合太陽電池、満原学、重川直輝、日本電信電話株式会社、公立大学法人大阪市立大学、2013/5/8、特願 2013-098151、拒絶査定
8. 太陽電池、渡邊則之、日本電信電話株式会社、2013/9/3、特願 2013-181962(拒絶査定)
9. 半導体装置、及び半導体装置の製造方法、重川直輝、梁剣波、公立大学法人大阪市立大学、2014/2/14、特願 2014-026134
10. 太陽光発電システム、渡邊則之、日本電信電話株式会社、2014/3/26、特願 2014-063318(特許第 5778816 号)
11. 量子細線構造、満原学、渡邊則之、日本電信電話株式会社、2014/8/21、特願 2014-168185(特許第 5890492 号)
12. 太陽電池の製造方法、渡邊則之、日本電信電話株式会社、2014/11/27、特願 2014-239686(特許第 5876562 号)
13. 電界効果トランジスタ及び電界効果トランジスタの製造方法、重川直輝、梁剣波、公立大学法人大阪市立大学、2015/7/23、特願 2015-145514

##### ② 外出願 (0 件)

##### ③その他の知的財産権

無

##### (5)受賞・報道等

無

#### (6)成果展開事例

##### ①実用化に向けての展開

- 大阪市立大学のハイブリッドタンデムセルプロセスの研究が NEDO の「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」事業に採択（再委託）され、現在実施中。課題名「超高効率・低コストⅢ-V 化合物太陽電池モジュールの研究開発」（H27～31）

##### ②社会還元的な展開活動

- ハイブリッドタンデムセルプロセス研究の結果得られた成果について、中国・上海市で開催される国際展示会「中国国際工業博覧会」（2015/11/3-7）に「由异种半导体材料贴合而成的高效率、低成本太阳能电池」（邦題 異種半導体材料貼りあわせで作る高効率・低コスト太陽電池）と題してパネル展示を行った。

## § 5 研究期間中の活動

### 5. 1 主なワークショップ、シンポジウム、アウトリーチ等の活動

ハイブリッドタンデムセルプロセス研究の成果に関連して以下の活動を行った。

年月日	名称	場所	参加人数	概要
2013/1/12	応用物理学会関西支部 セミナー	大阪	30	「ハイブリッドタンデム型太陽電池実現を目指す表面活性化異種半導体接合形成」と題して講演
2013/1/23	CREST 公開シンポジウム	豊田	30	「Si 基板上窒化物等異種材料タンデム太陽電池実現に向けたサブセル間接合方法の検討」と題してポスター展示
2013/3/4	電子情報通信学会 ED 研特別ワークショップ「電子デバイスから見たエネルギーハーベストの最新技術と展開」	東京	20	「高効率発電を目指す Group-III-Nitride 系太陽電池技術」と題して講演
2013/9/12	半導体理工学研究センター STARC ワークショップ 2013	横浜	50	「表面活性化ボンディング法によるタンデム太陽電池等ハイブリッドデバイスの実現可能性探索」と題して講演及びポスター展示
2014/2/24	CREST 公開シンポジウム	豊田	30	「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ーハイブリッドタンデム太陽電池、モノリシックタンデム太陽電池ー」と題して講演
2014/5/1	大阪市立大学 第 58 回 オープン・ラボラトリー	大阪	50	「半導体の貼り合せで作る新型太陽電池」と題して講演
2015/1/22	CREST 公開シンポジウム	豊田	30	「Si 基板上窒化物等異種材料タンデム太陽電池の研究開発」と題してポスター展示
2015/2/4	大阪市立大学 専門家 講座	大阪	10	「太陽電池の仕組みと高効率化のためのナノ接合技術」と題する市民向け講演。
2015/12/8	大阪府立大学・大阪市立 大学 ニューテクノフェア 2015	大阪		「異なる半導体の貼りあわせで作る高効率太陽電池」と題して講演及びポスター展示

## §6 最後に

「Si 基板上のハイブリッドタンデムセルの実現」という共通目標に対して、技術完成までに必要な時間が異なるアプローチ(ハイブリッド、モノシック)を別々のグループが担当するスタイルでチーム運営を行った。ハイブリッドタンデムセルの研究開発においては、企業との連携により3 接合セル特性により SAB 法の有効性を実証するとともに更に高い変換効率を実現する上でクリアしなければならない技術課題を明確化した。SAB 法の本質にかかわる学術的な課題は未解決のままだが、次のステップとしての開発に移行したことで一定の成果は上げたと考えている。モノシックタンデムセルの研究開発においては、Si ボトムセル構造上に中間組成の InGa<sub>N</sub> 層からなる pn 接合の結晶成長を目指して、触媒援用成長など革新的な骨太技術の可能性を示すことができた(写真は導入した SAB 装置)。



導入した SAB 装置