

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成」
研究課題「励起子吸収による増感を利用した高効率太陽電池の研究」

研究終了報告書

研究期間 平成 21 年 10 月～平成 27 年 3 月

研究代表者：堀越佳治
(早稲田大学 名誉教授)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

太陽電池の省資源・低コスト化を実現するためには薄膜化が不可欠である。しかし薄膜化によって光吸収効率は減少し、これに伴って変換効率が低下してしまう。これを防ぐ手立ての一つとして、太陽電池表面の反射率を高くし、入射した光子を結晶内に閉じ込めて無駄なく利用する方法がとられた。これはとくに Si 太陽電池で成果を上げている。しかし本研究では、薄膜化によって生じる吸収効率の劣化を、薄膜の吸収係数そのものを増加させるという新しい方法に挑戦した。吸収係数は状態密度と遷移確率の積で表されるが、状態密度は物質の密度に関わる量であり、材料の製作法の工夫などによって増加させることは困難である。これに対し遷移確率は電子と正孔の波動関数の重複に関わる量であり、材料の選択や幾何学的構造によって増大が可能である。

そこで本研究では励起子吸収に焦点を当て、励起子吸収を積極的に利用できる材料や構造の探索を行った。太陽電池では動作時に高温になる可能性があり、励起子は高温でも安定であることが必要である。そこでまず励起子束縛エネルギーの高い材料の探索を行った。GaN や ZnO のように幾つかの半導体は高い励起子束縛エネルギーを示す。しかしこれら材料は一般にワイドバンドギャップであり、太陽光スペクトルとの整合性が著しく低い。このような中でカルコパイライト結晶の一つである CuGaSe₂ は太陽光スペクトルとの整合性が比較的良好にもかかわらず、例外的に励起子束縛エネルギーが高い。そこで CuGaSe₂ を一つの研究対象とした。一方励起子束縛エネルギーが低い材料に関しては、超格子構造を用いることによって励起子吸収を強化できる可能性がある。これを実証するため AlGaAs/GaAs 超格子に着目し理論的、実験的検討に着手した。さらに GaN や ZnO など励起子束縛エネルギーの高い材料を障壁層とする超格子では、超格子における励起子束縛エネルギーが相対的に高くなるため、AlGaInN/GaN、CdZnO/ZnO および CuInSe₂/CuGaSe₂ 超格子も研究の対象とした。さらに超格子による励起子効果が顕著に現れることが期待される Si/SiO₂ 超格子も視野に入れた。これらの超格子のうち、AlGaAs/GaAs、CuInSe₂/CuGaSe₂ については MBE 法を中心に堀越グループで、AlGaInN/GaN については MOVPE 法を中心に松岡グループで、Si/SiO₂ および CdZnO/ZnO については MBE 法とスパッタリング法を中心に堀越グループで研究を進める計画を立てた。

Al_xGa_{1-x}As/GaAs 超格子太陽電池の研究は GaAs バルク太陽電池との特性比較を念頭に研究を進めた。その結果吸収層厚 3μm では両者の効率は同等であったが、1μm では超格子太陽電池は GaAs バルク太陽電池よりも高い効率を示した。さらに 100°C までの高温動作実験では、超格子太陽電池はバルク太陽電池に比べ、高温における効率減少が軽微であることが明らかになった。CuGaSe₂/CuInSe₂ に関しては結晶成長条件の最適化により、良質の結晶成長が可能となった。とくに CuGaSe₂/CuInSe₂ ヘテロ接合では、接合面での溶融のため、これまで急峻なヘテロ界面は得られなかった。しかし各分子線強度の厳密な制御と成長条件の最適化により、原子レベルで急峻なヘテロ接合が製作可能となった。この結果原子レベルで平坦な界面を持つ CuGaSe₂/CuInSe₂ 系二重ヘテロ構造、量子井戸および超格子構造を実現した。CuGaSe₂/CuInSe₂ 系太陽電池では n 型結晶が得られないため、CdS/ZnO などが n 型材料として用いられてきた。しかし高効率化のためにはカルコパイライト系の pn 接合が不可欠と考え、CuGaSe₂/CuInSe₂ 系材料の n 型化の研究を進めてきた。現在までのところ n 型化には成功していないが高抵抗結晶を実現している。AlGaInN/GaN 超格子を用いた太陽電池に関しては、励起キャリアの取り出し効率はヘテロ接合における自発分極の影響を強く受ける。自発分極をうまく利用するには N 極性面への成長が必要であるが、従来の MOVPE 技術ではこれは不可能であった。本研究では N 極性面を実現する技術を確立し、Ga 極性面に比べて 7~8 倍の取り出し効率を持つ太陽電池を実現した。

本計画の基本は半導体における励起子吸収が薄膜太陽電池の高効率化に有効であることを実証することである。実際 AlGaAs/GaAs 超格子を用いた理論検討および実験の結果、薄膜(1μm)太陽電池では、等価な構造を持つバルク太陽電池に比べ、確かに高効率が得られることが示された。これによって本研究の所期の目的のひとつは達成された。CuGaSe₂/CuInSe₂ 系材料、AlGaInN/GaN 系材料については、太陽電池の構成で励起子の効果を検証するには至っていないが、AlGaAs/GaAs 超格子系に比べて励起子吸収の効果はさらに強くなることが予想される。

(2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

1. 励起子吸収の太陽電池への応用

概要: 太陽電池の薄膜化による光吸収効率の減少に対して、吸収係数そのものを増加する手段として、バンド間吸収に付加的に生じる励起子吸収を利用すること、および励起子束縛エネルギーの低い材料では、超格子構造によって励起子吸収を促進することが有効と考え、研究を進めた。AlGaAs/GaAs 超格子を用いてその効果を実証し、薄膜太陽電池では励起子吸収により確かに効率が上昇することを確認した。効果は高温(100°C)でも顕著であり、この事実は超格子構造により励起子束縛エネルギーが低い材料でも効果が得られるを示している。

2. 直接遷移-間接遷移ハイブリッド太陽電池の提案

概要: Si は間接遷移であるため励起キャリアの寿命が長く効率の良い太陽電池を実現することができる。反面、間接遷移のため吸収係数は低く、十分な光を吸収するためには厚い吸収層が不可欠である。これに対し光吸収は直接遷移材料が受け持ち、電極までのキャリア輸送は間接遷移材料が担うという太陽電池を提案した。具体的には $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ や AlGaInP などの混晶組成を組み合わせることにより、直接遷移材料で励起後、わずかにエネルギーの低い間接遷移バンドにキャリアを緩和させ、キャリアを取り出す。理論と実験により効果を確認した。

3. N 極性面の応用と効果

概要: GaN/ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 太陽電池を実現するにあたり、N 極性面の利用を提案し、高品質な結晶を作製する手法を提示した。加圧雰囲気下で MOVPE 成長可能な装置を自主設計・開発し、減圧雰囲気では成し得なかった高品質かつ表面平坦性に優れた InN を得ることに成功した。N 極性面上に $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ を結晶成長する際に準安定層である閃亜鉛鉱構造が混在することを発見し、過飽和度を下げることで閃亜鉛鉱構造の混在を抑制可能であることを見出した。成長温度の調整により非常に高い InN モル分率($x = 0.34$)を有する GaN/ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ の作製に成功した。

<科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>

1. CuGaSe₂/CuInSe₂ の展開

概要: CuGaSe₂/CuInSe₂ に関するヘテロエピタキシーの研究はこれまで行われてこなかった。理由はヘテロ界面が熱的に不安定なためである。本研究では MEE 法を用いた成長の最適化により、原子レベルで急峻なヘテロ接合が製作可能となった。この結果よく制御された CuGaSe₂/CuInSe₂ 二重ヘテロ構造、量子井戸および超格子構造を実現した。依然として n 型結晶の取得は実現していないが、ヘテロ構造に関しては III-V 族化合物半導体と同等の精度で成長が可能になった。

2. MBE 法による Si/SiO₂ 超格子の実現

概要: MBE 法により、初めて Si/SiO₂ 超格子を実現した。これは将来に向けた太陽電池材料として研究を進めたものがある。Si の蒸発源としては超高純度 Si、SiO₂ の蒸発源としては、光ファイバー製造の中間材料である SiO₂ ストを用い、ともに 1600~1800°C の高温セルを用いて蒸着した。このようにして得られた SiO₂ 膜は、酸素が不足した SiO_x であったが、熱処理により品質の高い Si/SiO₂ 超格子が得られた。熱処理後は Si 層は微結晶層となり、スパッタリング法に比べて良好な発光特性を示した。

3. N 極性面を用いたキャリア取り出し効率の改善

概要: 窒化物半導体の太陽電池応用に向けて、従来の Ga 極性面と反対方向にあたる N 極性面を用いることで分極電界を光生成キャリアの取り出しに有効であることを示し、N 極性面上に GaN/ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 太陽電池構造を作製し、動作を実証した。従来の Ga 極性面上 GaN/ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 太陽電池と分光感度特性を比較し、N 極性面太陽電池上においてバイアス電圧によらず光生成キャリアが効率よく引き出していることから、N 極性面の利用が有望であることを示した。

§ 2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

① 堀越グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
堀越 佳治	早稲田大学	名誉教授	H21.10～
河原塚 篤	早稲田大学理工学術院	准教授	H21.10～
藤田 実樹	同上	CREST研究員	H21.10～H25.9
西永 慈郎	早稲田大学高等研究所	研究員	H21.4～H22.3
サティアバ	早稲田大学理工学術院	D3	H24.4～
山田 明	東京工業大学工学部	アドバイザー	H21.4～
Klaus H Ploog	ポール・ドルーデ研究所	アドバイザー	H21.4～

研究項目

- ・ 超格子における励起子吸収の理論的研究
- ・ AlGaAs/GaAs 超格子太陽電池の最適設計に関する理論的研究
- ・ MBE 法による AlGaAs/GaAs 超格子太陽電池製作の研究
- ・ 直接遷移・間接遷移ハイブリッド太陽電池の研究
- ・ MBE 法による CuGaSe₂ の高品質化およびドーピングの研究
- ・ CuGaSe₂/CuInSe₂ ヘテロ接合の研究
- ・ 抵抗加熱 MBE 法による Si/SiO₂ 超格子製作の研究
- ・ 太陽電池特性評価の研究
- ・ 太陽電池パラメータを用いた太陽電池物性評価の研究

② 松岡グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
松岡 隆志	東北大学金属材料研究所	教授	H21.10～
片山 竜二	同上	准教授	H21.10～
劉 玉懷	同上	助教	H21.10～H23.6
花田 貴	同上	助教	H21.10～
谷川 智之	同上	助教	H24.4～
紀 世陽	同上	研究員	H22.4～H23.3
木村 健司	同上	D3～研究員	H24.4～
崔 正焄	同上	D1～D3	H22.10～H26.3
陸川 公美	同上	研究員	H24.4～H25.1

研究項目

- ・ MOVPE 法による超格子構造作成法の研究
- ・ InGaAlN 系超格子太陽電池作成法の研究
- ・ InGaAlN 系結晶成長および評価の研究
- ・ デバイス製作と評価に関する研究
- ・ 結晶成長シミュレーション

(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

本研究では開始時よりベルリンのポール・ドルーデ研究所の元所長 Klaus H Ploog 教授と東工大山田教授にアドバイザーに加わっていただき節目ごとに議論をしていただいた。とくに Ploog 教授は年に一度グループの研究状況についてご意見をいただいた。

§ 3 研究実施内容及び成果

3. 1AlGaAs/GaAs 超格子太陽電池の理論計算(早稲田大学 堀越グループ)

(1)研究実施内容及び成果

本研究では、励起子増感効果による光吸収効率の向上を用いた高効率薄膜太陽電池の実現である。本研究では超格子中の励起子吸収の理論的定式化を行った。この定式化のキーは、二次元電子系に対する励起子吸収の定式化および二次元電子系に対する吸収係数の定式化である。これらの定式化を行うことにより、超格子活性層中の吸収スペクトルを活性層の厚さの関数として求めることが可能となった。特に二次元系の吸収係数の定式化は我々のオリジナルな成果であり、この手法の確立により超格子、多重量子井戸等の二次元系の光吸収をバルクの光吸収と直接比較することが可能となった。本研究では主として AlGaAs/GaAs 超格子系についての解析を行ったが、その基礎となるのは有効質量近似を用いた離散順位、波動関数、励起子結合エネルギー、吸収係数の計算であり、適切なパラメータを用いることにより、多くの材料、構造に対して適用可能な汎用的定式化である。

二次元系の励起子相互作用

半導体中のワニエ励起子は有効質量近似を用いた電子・正孔二体問題として定式化できる。バルクでは、有効質量および誘電率の補正を行うことにより、水素原子の問題に還元され、解析的に解を求めることができる。光吸収は、ブロッホ関数を用いた双極子遷移に基づき定式化される。量子井戸、超格子等の二次元系においても同様に、閉じ込めポテンシャルを持つ二体問題として定式化することができる。閉じ込め方向をz軸にとると、ハミルトニアンは

$$H = -\frac{\hbar^2}{2m_e^*} \frac{\partial^2}{\partial z_e^2} + U_e(z_e) - \frac{\hbar^2}{2m_h^*} \frac{\partial^2}{\partial z_h^2} + U_h(z_h) - \frac{\hbar^2}{2\mu\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \rho \frac{\partial}{\partial \rho} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon\sqrt{\rho^2 + (z_e - z_h)^2}} \quad (1)$$

と表される。ここに U_e 、 U_h は電子および正孔の閉じ込めポテンシャルを表し、第5項が面内の相対運動、第6項が電子・正孔間のクーロン相互作用を表す。このクーロン相互作用の項のため面内方向と閉じ込め方向の運動を分離することはできない。そこで、次のような、電子と正孔の一電子波動関数 χ_e^m 、 χ_h^n およびバルク励起子の波動関数の線形結合で表される変分波動関数

$$\psi(\rho, z_e, z_h) = \frac{1}{\Lambda} \chi_e^m(z_e) \chi_h^n(z_h) \exp\left(-\frac{\sqrt{\rho^2 + (z_e - z_h)^2}}{\lambda}\right) \quad (2)$$

を用いて解を求める。指数関数の項は、励起子の 1s 軌道型の波動関数を表しており、変分パラメータ λ はボーア半径に対応する量である。

励起子の結合エネルギー

$$E_b = \min_{\lambda} \frac{\langle \chi_e | H | \chi_h \rangle}{\langle \chi_e | \chi_h \rangle} \quad (3)$$

を最小化することにより、変分パラメータ λ を決定し、規格化の条件から Λ を求める。

二次元系の吸収係数

従来の二次元系の光吸収確立は双極子遷移にフェルミの黄金律を適用し励起子波動関数、式(2)を用いると、束縛状態に対しては

$$W(\hbar\omega) = 2 \frac{\pi e^2}{\epsilon_0 m_0^2 \omega} |P_{cv}|^2 \frac{1}{L_z} \sum_{m,n} |\langle \chi_c^m | \chi_v^n \rangle|^2 L(E_g^{mn} - E_b^{mn} - \hbar\omega, \Gamma) \quad (4)$$

と表される。ここに P_{cv} は双極子行列要素、 E_g^{mn} は電子・正孔サブバンド間の有効バンドギャップであり、デルタ関数の代わりに有限の線幅 Γ をもつローレンツ関数を用いる。連続状態に対しては有限の線幅を考慮した二次元結合状態密度 D_{cv} を用いて

$$W(\hbar\omega) = 2 \frac{\pi e^2}{\epsilon_0 m_0^2 \omega} |P_{cv}|^2 \frac{1}{L_z} \sum_{m,n} |\langle \chi_c^m | \chi_v^n \rangle|^2 D_{cv} (E_g^{mn} - \hbar\omega, \Gamma) \quad (5)$$

と表される。式(4)、(5)を用いた従来の定式化の問題点は、系の厚さ L_z をどのように決めるかにある。すなわち厚いバリア層による強い閉じ込めのある多重量子井戸においては、波動関数は井戸内に局在し井戸の内での吸収が起きることから厚さ L_z は井戸の厚さの合計とするのが妥当である。一方短周期超格子の様に束縛が弱く波動関数が全体に広がった構造では吸収は構造全体で比較的一様におこり、混晶に近い性質を示すことから、厚さ L_z はバリア層を含めた構造全体の厚さとするのが妥当である。

この問題を解決するため、我々は二次元系の光吸収に対する新たな定式化手法を開発した。この手法のアイデアは深さ z に依存する吸収係数を電子と正孔の波動関数の重なりを用いて、

$$\alpha(z) \propto \chi_e^*(z) \chi_h(z) \quad (6)$$

と表す点にある。吸収係数が定数で無いことから放射強度に対する微分方程式は、

$$\frac{dI(z)}{dz} = -\alpha(z)I(z) \quad (7)$$

となり、その解は、

$$I(z) = I(0) e^{-\int_0^z \alpha(z') dz'} \quad (8)$$

とあらわされる。

改めて、波動関数を用いて吸収確率をあらわすと、

$$W(\hbar\omega) = \frac{2\pi}{\hbar} \left(\frac{e}{m_0}\right)^2 |P_{cv}|^2 \sum_{m,n} \left| \int_0^{L_z} \chi_e^{m*}(z) \chi_h^n(z) A(z) e^{iqz} dz \right|^2 \times \sum_{k_{\parallel}} \delta(E_{k_{\parallel}}^n - E_{k_{\parallel}}^m - \hbar\omega) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} W(\hbar\omega) &= \frac{2\pi}{\hbar} \left(\frac{e}{m_0}\right)^2 |P_{cv}|^2 \\ &\times \sum_{m,n} \int_0^{L_z} \chi_e^{m*}(z) \chi_h^n(z) A(z) e^{+iqz} dz \int_0^{L_z} \chi_e^m(z') \chi_h^{n*}(z') A^*(z') e^{-iqz'} dz' \\ &\times \sum_{k_{\parallel}} \delta(E_{k_{\parallel}}^n - E_{k_{\parallel}}^m - \hbar\omega) \end{aligned} \quad (10)$$

となる。ここで、電磁場は波動関数に比べて緩やかに変化すると仮定（平均場近似）し、

$$A^*(z') e^{-iqz'} = A^*(z) e^{-iqz} \quad (11)$$

積分の外に出すと、

$$\begin{aligned} W(\hbar\omega) &= \frac{2\pi}{\hbar} \left(\frac{e}{m_0}\right)^2 |P_{cv}|^2 \\ &\times \sum_{m,n} \langle \chi_h^{n*} | \chi_c^m \rangle \int_0^{L_z} \chi_c^{m*}(z) \chi_h^n(z) A(z) e^{+iqz} A^*(z) e^{-iqz} dz \\ &\times \sum_{k_{\parallel}} \delta(E_{k_{\parallel}}^n - E_{k_{\parallel}}^m - \hbar\omega) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
W(\hbar\omega) &= \frac{2\pi}{\hbar} \left(\frac{e}{m_0}\right)^2 |P_{cv}|^2 \\
&\quad \times \sum_{m,n} \langle \chi_h^{n*} | \chi_c^m \rangle \int_0^{L_z} \chi_c^{m*}(z) \chi_h^n(z) |A(z)|^2 dz \\
&\quad \times \sum_{k_{\parallel}} \delta(E_{k_{\parallel}}^n - E_{k_{\parallel}}^m - \hbar\omega)
\end{aligned} \tag{2}$$

となり、 z に依存しない定数をまとめると、

$$W(\hbar\omega) = \int_0^{L_z} \sum_{m,n} C_{mn}(\hbar\omega) \chi_c^{m*}(z) \chi_h^n(z) |A(z)|^2 dz \tag{1}$$

と表される。ここで、

$$C_{mn}(\hbar\omega) = \frac{2\pi}{\hbar} \left(\frac{e}{m_0}\right)^2 |P_{cv}|^2 \langle \chi_h^{n*} | \chi_c^m \rangle \sum_{k_{\parallel}} \delta(E_{k_{\parallel}}^n - E_{k_{\parallel}}^m - \hbar\omega) \tag{2}$$

である。一方で放射強度と吸収率の関係から、

$$W(\hbar\omega) = I(0) - I(L_z) = - \int_0^{L_z} \frac{dI(z)}{dz} dz = \int_0^{L_z} \alpha(z) I(z) dz \tag{3}$$

の関係があり、放射強度 $I(z)$ はベクトルポテンシャル $A(z)$ の 2 乗に比例するので、

$$W(\hbar\omega) = \int_0^{L_z} \alpha(z) |A(z)|^2 dz \tag{4}$$

となる。式(15)と(17)を比較すると、二次元系の吸収係数は、

$$\alpha(z, \hbar\omega) = \sum_{m,n} C_{mn}(\hbar\omega) \chi_c^{m*}(z) \chi_h^n(z) \tag{5}$$

と求まる。吸収率は放射強度を入射強度で規格化することにより求まり、

$$A = 1 - T = 1 - I(L_z)/I(0) = \int_0^{L_z} \alpha(z) e^{-\int_0^z \alpha(z') dz'} dz \tag{6}$$

となり、吸収係数 α が定数の場合には自然にバルクの吸収率

$$A = 1 - e^{-\alpha z} \tag{7}$$

に帰着する。

二次元系の励起子吸収

これまでの定式化を組み合わせることにより、二次元系における励起子吸収を求めることが可能になる。従来の定式化と同様に吸収係数の式中に現れるデルタ関数の k 空間における和を、離散状態に対しては有限の線幅のローレンツ関数で置き換え、連続状態に対してはエネルギー状態密度で置き換える。さらに励起子増感効果はゾンマーフェルト因子により取り入れることが可能であり、離散状態に対しては、

$$\alpha^{\text{Ex}}(\hbar\omega) = \frac{1}{\Lambda^2} \alpha^{\text{EH}}(\hbar\omega) \tag{1}$$

連続状態に対しては

$$\alpha^{\text{Ex}}(\hbar\omega) = S(\hbar\omega) \alpha^{\text{EH}}(\hbar\omega) \tag{2}$$

となる。ここに、 $S(\hbar\omega)$ は二次元系の連続状態におけるゾンマーフェルト因子であり、純粋な二次元系に対しては解析解がと求まる。超格子系に対しては波動関数の広がりにより、増強因子は弱まるが、漸近性を考慮することにより、

$$S(\hbar\omega) = \frac{S(E_g^{mn})}{1 + (S(E_g^{mn}) - 1)e^{-2\pi a}}, \quad a = \sqrt{\frac{E_b^{mn}}{\hbar\omega - E_g^{mn}}} \tag{3}$$

と表すことができる。ここに $S(E_g^{mn})$ 有効バンドギャップによる吸収端における増強因子であり、純粋な二次元系では 2、GaAs/AlGaAs の量子井戸に対では 1.4 となる。 $S(\hbar\omega)$ は吸収端にピークを持ちエネルギーの増加とともに1に漸近する。束縛状態と同様に、電子・正孔対吸収では増強因子は 1である。

計算結果

基本となる構造は AlGaAs/GaAs 超格子を活性層として用いた GaAs-PIN ダイオード構造太陽電池である。図 1. 1 に示すように (Al_{0.3}Ga_{0.7}As 2 nm)/(GaAs 5 nm) を単位構造とした厚さ 1 μm (140 cycle) のアンドープ超格子活性層を、P 型および N 型の GaAs で挟んだ構造である。オーミック電極を形成するため、表面に厚さ 200 nm の p-Al_{0.3}Ga_{0.7}As 窓層をもうけた。この構造の特徴は P 型層と N 型層に超格子活性層よりもバンドギャップの狭い GaAs を用いることにある。これにより出力電圧はわずかに低下するが、電流を活性層から電極に容易に取り出すことが可能になる。実験で用いた構造をシミュレートするため、計算では同じ単位構造、10 周期分からなるスーパーセルを用い、周期的境界条件のもとで計算を行った。また、ブロードニングの効果を取り入れるため、ローレンツ関数の半値幅として室温の 26 meV を仮定した。励起子吸収の効率を計算するために、まず超格子中の電子、正孔の一電子波動関数を計算する。電子の束縛状態として、二つのミニバンド(E1、E2)が得られる。一方、正孔では二つの重い正孔(HH1、HH2)および二つの軽い正孔(LH1、LH2)のミニバンドが得られる。E1 電子の波動関数は 30 meV 程度のバンド幅を持っており、超格子全体に十分広がった状態を形成している。このことから、電子は超格子中を比較的自由に運動することが可能である。一方で HH1 バンドは重い有効質量を反映した局在性の強い波動関数をもつが、すぐ下に広がった LH1 バンドがあり、熱エネルギーによる励起することが可能である。従って光吸収により生じた電子、正孔は井戸内に局在することなく電流として有効に取り出せると考えられる。つぎに、これらの波動関数を用いて励起子の結合エネルギー、および増強因子を求める。広がった電子系を扱っているため閉じ込めの効果は大きくない。結合エネルギーの平均は 5.3 meV で、バルクの結合エネルギー 4.6 meV に対してわずかに増加している程度である。最後に得られた波動関数および結合エネルギーを用いて吸収係数および吸収率の計算を行った結果を図 1. 2、図 1. 3 にそれぞれ示す。クーロン相互作用を無視した、電子・正孔対に

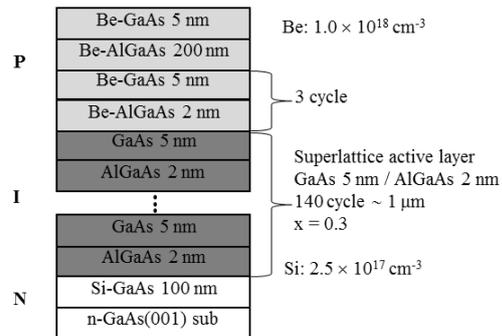


図 1.1 AlGaAs/GaAs 超格子太陽電池構造

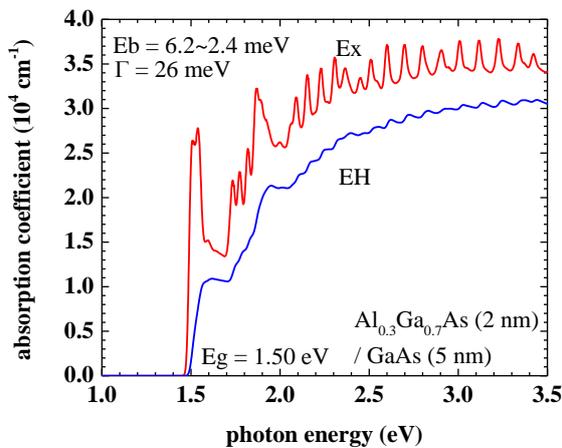


図 1.2 AlGaAs/GaAs 超格子の吸収係数スペクトル

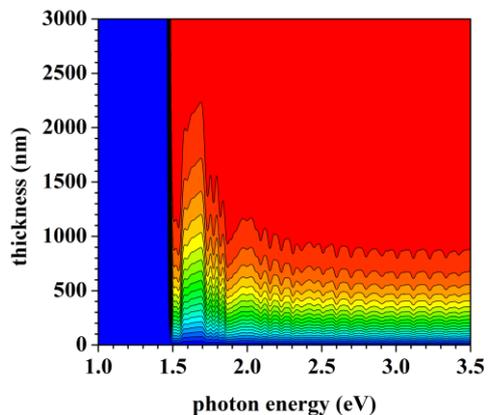


図 1.3 AlGaAs/GaAs 超格子の吸収スペクトルと活性層厚の関係

よる吸収スペクトルが超格子のサブバンド構造及び2次元の状態密度から期待されるステップ状の特性を示すのに対し、クーロン相互作用を考慮した励起子による吸収ではサブバンドのバンド端付近に非常に鋭い立ち上がりを示す。励起子吸収にみられる二つのピークはそれぞれ E1 ミニバンド、E2 ミニバンドへの遷移による吸収である。正孔のバンド幅はローレンツ関数の広がりよりも小さく、スペクトルに明確には表れていない。しかし各ピークの近傍に微細構造として表れている。ことから明確には表れていない。励起子および電子・正孔対による吸収スペクトルの差は、明らかに励起子効果により光吸収が増大することを示している。本研究を通じて確立された励起子吸収効果の理論的定式化の成果は図 1.3 に表される吸収率計算に表される。励起子効果を適切に取り入れる事、および二次元系の吸収係数を定量的に扱う手法を開発したことにより、吸収層の厚さの関数として吸収率スペクトルを計算することが可能になった。吸収率スペクトルは実験的には外部量子効率スペクトルに直接対応するものであり、実験で得られるスペクトルと直接、定量的に比較をすることが可能になった。図 1.3 の等高線は吸収率を 5%刻みでプロットしたものである。1.6 eV 付近に見られる窪みは、E1、E2 ミニバンド吸収のギャップで吸収率が低下することを示している。厚さ 1 μm の活性層では吸収率の低下が顕著に表れるが、厚さを 2 μm にすると吸収率は 90%となりわずかに窪みが見られる程度、3 μm ではほぼ 100%吸収し平坦で様な吸収特性を示す。計算の結果は、EQE スペクトルの実験結果と定量的に良く一致する。このことは確立した手法により、定量的に十分正しい値が得られることを示しており、デバイス設計に極めて有効な指針を与える事示している。

(2) 成果の位置づけと類似研究との比較

本研究の大きな成果は、二次元系における励起子吸収の定量的定式化に成功したことである。特に、二次元系の吸収係数の定式化は、本研究で得られたオリジナルな成果であり、この手法の確立により超格子、多重量子井戸等の二次元系の光吸収をバルクの光吸収と直接比較することが可能となった。解析は AlGaAs/GaAs 超格子系について行ったが、その基礎となるのは有効質量近似を用いた離散順位、波動関数、励起子結合エネルギー、吸収係数の計算であり、適切なパラメータを用いることにより、多くの材料、構造に対して適用可能な汎用的定式化であり、二次元系の光物性の研究に広く資するとともに、実用的なデバイス設計を可能にした点はインパクトが大きい。

3. 2 CuInSe₂/CuGaSe₂ 超格子太陽電池の理論計算 (早稲田大学 堀越グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

本研究は、CIGS 系化合物半導体太陽電池にバンドエンジニアリングの手法に基づく超格子構造を導入し、その効果を理論的に解析したものである。CuIn_xGa_{1-x}Se₂ は高い状態密度、大きな励起子結合エネルギーを持ち、吸収係数が大きいことから、薄膜太陽電池材料として非常に有望である。しかしながら、Ga の組成を増やしバンドギャップを最適値の 1.4 eV に近づけると太陽電池の効率が低下することが大きな問題となっており、材料の持つポテンシャルを十分に引き出すには至っていない。これは混晶化により、結晶および界面の欠陥が増大するためであると考えられ、結晶品質、界面特性の向上が重要な課題になっている。この問題の解決のため、我々は基板上にエピタキシャル成長した CuInSe₂ (CIS)/CuGaSe₂ (CGS) 歪補償超格子を用いた疑似混晶を導入した。本研究は短周期超格子疑似混晶により従来の混晶が持つ欠陥導入を抑制するとともに、歪補償の仕組みを取り入れ高品質な超格子の実現を目指す点に独自のアイデアがある。本研究では、我々が確立した二次元系の光吸収の定式化手法を用いて理論解析を行い、アイデアの有効性を示した。

GaAs 基板と CIS および CGS との格子不整合はそれぞれ -2.3% (圧縮) および +0.7% (引っ張り) であり、In 組成 $x=23\%$ の CIGS は GaAs に格子整合する。臨界膜厚 (~10 nm) 以下の CIS と CGS を交互に積層し、歪を補償した超格子構造を成長することにより、欠陥の形成を抑制し、高品質の CIGS 疑似混晶の成長が可能であると期待される。計算では、格子整合に近い組成として (CIS 1 nm)/(CGS 3 nm) を単位構造とした超格子および In 組成 25% のバルク CIGS を選び、吸収率の計算をおこなった。図 2.1 に示すように、CIS/CGS 超格子は 1.4 eV 付近に吸収端を持つ。平均的な吸収率はバルク図 2.2 に示される CIGS と同程度であり、吸収係数に換算すると励起子

吸収で $5 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ 、電子・正孔対で $3 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ 程度である。しかしながら、励起子結合エネルギーが約 15 meV と大きいことから、サブバンドの吸収端近傍には 2 次元系の励起子吸収に特徴的な非常に強い吸収が現れる。このような強い励起子増感効果は AlGaAs/GaAs 系超格子に対する CGS/CIS 超格子系の優位性を表している。さらに、比較的大きな伝導帯の有効質量に起因する高い結合状態密度を反映し高い吸収率を示すことが明らかになった。図 2.1 に示されるように 500 nm と非常に薄い活性層厚でも 80%以上の光吸収が可能であり、1 μm ではほぼ 100%の吸収率を示す。この理論解析の結果は、CIS/CGS 歪補償超格子は CIGS 系薄膜太陽電池の高効率化に有効であることを示している。

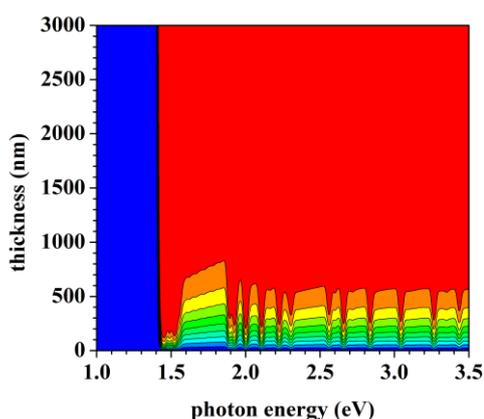


図 2.1 CGS/CIS 超格子の吸収スペクトルと活性層厚の関係

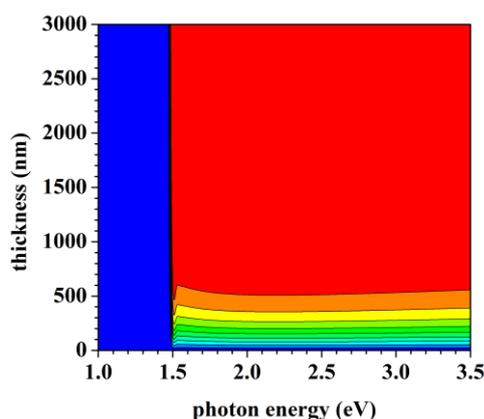


図 2.2 CIGS バルク混晶の吸収スペクトルと活性層厚の関係

(2) 成果の位置づけと類似研究との比較

本研究は、CIGS 系化合物半導体太陽電池にバンドエンジニアリングの手法に基づく超格子構造を導入し、その効果を理論的に解析したが成果である。ものである。CIGS/CGS 系のヘテロ構造の一つである CIS/CGS 超格子の理論解析はこれまでに例がなく、我々が開発した解析手法により定量的な優位性を示すことができた点は大きな成果であり、今後の実験的研究の強い動機づけとなると考えられる。

3. 3 AlGaAs/GaAs 超格子太陽電池の高性能化(早稲田大学 堀越グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

本研究は太陽電池の薄膜化に伴う吸収効率の減少を解決するために計画されたものである。このために本研究では太陽電池を構成する材料の吸収係数そのものを増加させることに挑戦した。このように吸収係数そのものを増加させようとする研究はこれまで行われていない。検討の結果、励起子吸収を利用することが唯一の手段との結論を得、研究を進めた。研究開始にあたり、励起子吸収を促進する可能性のある材料系で、当グループで取り扱い可能なものをすべて取り上げた。その後研究の進展状況を踏まえ、最終的に AlGaAs/GaAs 系および CuGaSe₂/CuInSe₂ 系の二つ系に集中して研究を進めた。この項では AlGaAs/GaAs 超格子太陽電池の製作と高性能化について述べる。

超格子太陽電池の有効性を示すため、超格子吸収に関わる理論計算を先行させた。同時に理論計算の結果に基づき、超格子太陽電池の設計、試作を行った。試作した AlGaAs/GaAs 超格子太陽電池の特性は、理論計算の予測どおり吸収端付近ばかりでなく、高エネルギー領域の全般にわたって励起子吸収による増感が確認された。当初 AlGaAs/GaAs 系材料は原理確認のため、という認識で研究を進めたが、初期の研究で、励起子吸収による増感を定量的に立証するには、高純度結晶と理想的なヘテロ界面が不可欠であることがわかり、これに適した新 MBE 装置の導入を図った。この結果良好な太陽電池特性が得られるようになった。同時に理論計算も進化させ、二次元構造の超格子太陽電池の効率を三次元的バルク太陽電池と比較するための定式化を行った。

これにより AlGaAs/GaAs 超格子太陽電池と等価な構造を持つ GaAs 太陽電池の比較が可能になり、薄膜化した場合の超格子太陽電池の優位性が確認された。

表 I 超格子および GaAs バルク太陽電池の特性比較

Solar cell	2 μm Solar cells		1 μm Solar cells	
	$V_{oc}(V)$	$\eta(\%)$	$V_{oc}(V)$	$\eta(\%)$
AlGaAs/GaAs SL	1.08	21	1.07	14.8
GaAs bulk	1.00	22	0.80	13.3

表 I は厚さの異なる太陽電池の特性比較を、AlGaAs/GaAs 超格子太陽電池と GaAs 太陽電池について行ったものである。2 μm 以上の厚さの場合、両者の特性に差はないが、1 μm の場合差は歴然となる。吸収層厚が 2 μm 以上の場合、いずれの場合もスペクトル内の光子が十分吸収されてしまうのに対し、1 μm では吸収量が減少するものの、超格子太陽電池では励起子の寄与によりこのような結果が得られたものと考えられる。とくに顕著な点は超格子では V_{oc} の低下が少ないことである。

表 II 超格子および GaAs バルク太陽電池の温度特性

Solar cell	25°C		100°C		$d\eta/dT(\%)$
	$V_{oc}(V)$	$\eta(\%)$	$V_{oc}(V)$	$\eta(\%)$	
AlGaAs/GaAs SL	1.08	20.5	0.93	16.8	0.22
GaAs bulk	1.00	19.6	0.885	11.8	0.28

表 II は 2 μm の吸収層厚をもつ超格子および GaAs バルク太陽電池の温度特性を比較したものである。動作温度を 100°C に上昇させても超格子太陽電池における V_{oc} 、変換効率の劣化は少なく、効率の温度依存性は測定された温度範囲で 0.22%/°C であった。このことは 100°C という高温でも励起子の効果が作用していることを示している。また超格子太陽電池では温度上昇に伴う V_{oc} の低下がバルク型に比べて少ない原因は、超格子におけるミニバンドのエネルギーが温度に対して安定しているためと考えられる。

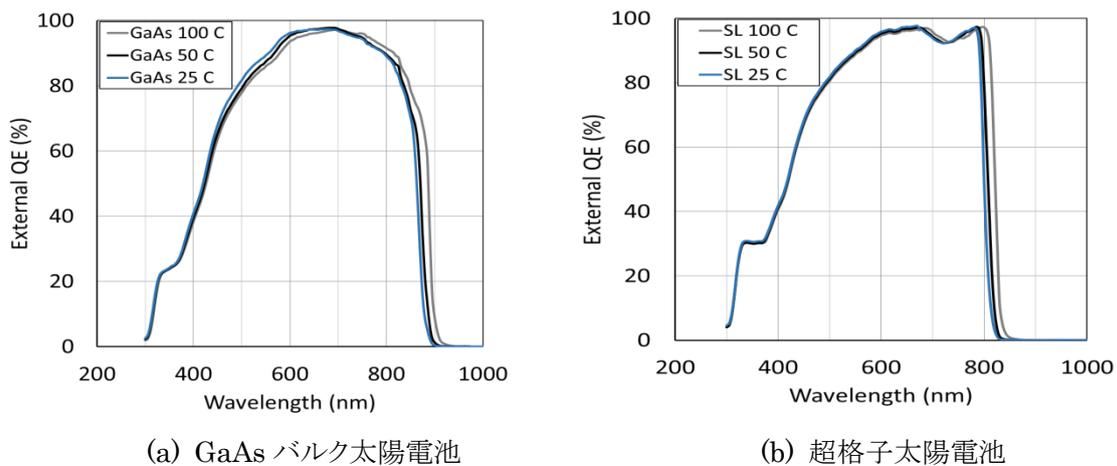


図 3.1 吸収層厚 2 μm の GaAs バルクおよび超格子太陽電池の外部量子効率の温度依存性

図 3.1 は吸収層厚 2 μm の太陽電池の外部量子効率 (EQE) スペクトルを幾つかの温度で測定したものである。バルク太陽電池では吸収端の EQE のたち上がりはバンド構造を反映してなだらかな上昇を示すのに対し、超格子太陽電池では 100°C においても急峻に立ち上がる。これは高温においても励起子吸収が強く生じていることを示している。AlGaAs/GaAs 超格子では励起子束縛エネルギーは 6 meV 程度ときわめて低い。にも拘わらず 100°C においても強い励起子吸収が得られることから、励起子による増感を得るために必ずしも高い励起子束縛エネルギーは必要ないことになる。しかし理論計算によれば CuInSe₂/CuGaSe₂ 超格子のように超格子が励起子束縛エネルギーの高い材料を含む場合、励起子吸収による増感はより大きくなる。

(2) 成果の位置づけと類似研究との比較

薄膜化による吸収効率の劣化を防ぐ方法として、一般に太陽電池裏面に反射膜をコーティングし、太陽電池に入射した光を結晶内に閉じ込め、光を無駄なく利用する方法がとられ、成果を挙げている。これに対しこの研究では、光吸収係数そのものを増加させることを考えており、この意味で他に例はない。また吸収係数そのものを増加させる方法として、励起子吸収機構を用いることはほぼ唯一の選択であり、この意味でもユニークである。効果として太陽電池の効率を 1~2% (変化率としては~10%) 上昇させるに過ぎないが、薄膜でも出力の劣化が小さいこと、高温でも安定な太陽電池動作をすることなどが実証された。励起子束縛エネルギーが 6 meV 程度の超格子において 100°C という高温でも室温や低温と同様な励起子吸収が得られることは予想を超えた現象であり、今後理論的な究明が必要になるものと考えられる。

3. 4. CuInSe₂/CuGaSe₂ の結晶成長 (早稲田大学 堀越グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

この研究はまず CuGaSe₂ の結晶成長に用いる MBE 装置の整備からスタートした。とくにカルコパイライト系材料はこれまでに経験のない材料であったため入念な準備が必要であった。超格子に関しては AlGaAs/GaAs 超格子同様、吸収係数に関する理論計算を先行させた。その結果この系の超格子構造では、励起子吸収の効果が AlGaAs/GaAs 超格子に比べてより顕著に現れることが判明した。これは CuGaSe₂ の励起子束縛エネルギーが高いことに起因している。CuGaSe₂ の結晶成長に関しては、これまでガラス基板上に多結晶膜を成長させるのが一般的であった。しかも CuGaSe₂ などカルコパイライト材料は n 型結晶が得られず、pn ホモ接合が実現できないという問題を抱えていた。これがこの材料系の太陽電池の高効率化を阻む一要因であった。本研究では n 型結晶の実現も目標に掲げ、結晶性の高い単結晶の成長を目指した。具体的には MBE 法により CuGaSe₂ とよく格子整合する GaAs(001) を基板上への成長を試みた。しかし良質の単結晶が得られるものの成長に伴って CuSe₂ の表面析出が起り、表面平坦性を著しく損なうことが判明した。そこで Cu+Ga と Se₂ を交互に供給する MEE を採用することにより、平坦性の良い単結晶が得られるようになった。MEE 成長の最適化により、X 線回折による評価では GaAs に遜色のない結晶性を実現した。通常の MBE 成長では成長に伴って RHEED 反射強度は減衰してしまうが、最適化された MEE 成長では成長終了まで初期の強度が保たれる。このことから MEE 成長では

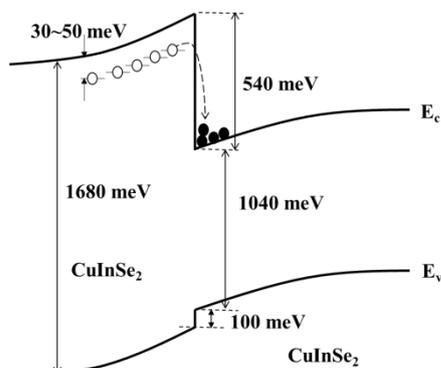


図 4.1 ヘテロ接合界面のバンド構造

結晶性、平坦性に優れた結晶が得られていることがわかる。成長したアンドープ結晶はすべて p 型で高い正孔移動度が観察された ($> 200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ at 300K, $1200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ at 150K)。

CuGaSe₂ の n 型化を狙う研究も同時に進めた。n 型不純物としては、II 族元素、IV 族元素が最も可能性が高いものと考え、Zn、Si、Ge、等についてドーピングの実験を行った。これらの不純物のドーピングに対応して、正孔濃度の減少は観察されたが n 型結晶は実現していない。この原因は CuGaSe₂ のイオン性が高く、ドナー性の不純物の増加に伴って結晶内で

Cu 空孔が増加し、ドナーを補償してしまうためと考えられる。しかしこれらの不純物をドーピングした結晶では、強いドナー・アクセプターペア(DAP)発光が観察され、これらの不純物原子が結晶中で確かにドナーを形成していることが確認できた。これらのスペクトルの解析から、ドナー準位は伝導帯の下方 30~50 meV に生じていることが分かった。

このため n 型ドーピングの研究と並行して、この系における変調ドーピングの可能性について検討を進めた。CuInSe₂とCuGaSe₂のヘテロ接合ではバンドギャップ不連続(ΔE_g)がほとんど伝導帯の側に存在する。すなわち $\Delta E_g=640$ meVに対し $\Delta E_c=540$ meV、 $\Delta E_v=100$ meVである。これを利用すれば変調ドーピングにより CuInSe₂の伝導帯に電子を蓄積することができる。ヘテロ接合の構造を図 4.1 に示す。これを実現するためには急峻な界面をもつ CuInSe₂/CuGaSe₂ ヘテロ接合が不可欠であるが、これまでそのようなヘテロ接合製作の成功例はない。この理由は CuInSe₂結晶上に CuGaSe₂を成長する場合、InSe に比べて GaSe の生成エネルギーが非常に大きいため、下地の CuInSe₂を構成する In が成長する CuGaSe₂の Ga によって置換されてしまうためである。逆に CuGaSe₂上に CuInSe₂を成長させる場合は比較的急峻なヘテロ接合の形成が可能であるがやはり成長には注意を要する。図 4.2 は CuGaSe₂/CuInSe₂/CuGaSe₂二重ヘテロ構造における X 線回折パターンで 3つの層はそれぞれ 500 nm ずつ成長したものである。図には GaAs を含め CuInSe₂(008)、CuGaSe₂(008)の回折角

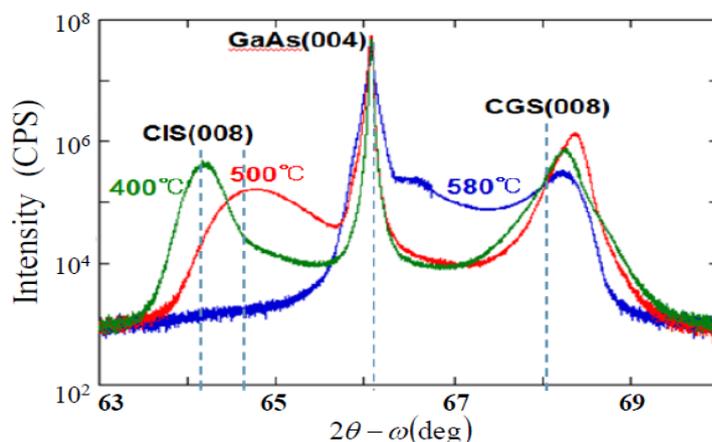


図 4.2 GaAs(001)基板の CuGaSe₂/CuInSe₂/CuGaSe₂の X 線スペクトル

を破線で示してある。第 1 層目の CuGaSe₂成長温度は 580°Cで一定とし、第 2 層、第 3 層の CuInSe₂、CuGaSe₂の成長温度を 400、500 および 580°Cと変化させた。図のように 580°C 成長では CuInSe₂の角度にピークは見られず、かわりに 66.5° にピークが見られる。これは 2 層目の CuInSe₂が 3 層目の CuGaSe₂と融合し、中間組成の混晶を形成していることを示している。500°Cでは CuInSe₂のピークは 64.5° 付近に移動し、2 層目の CuInSe₂は同様に混

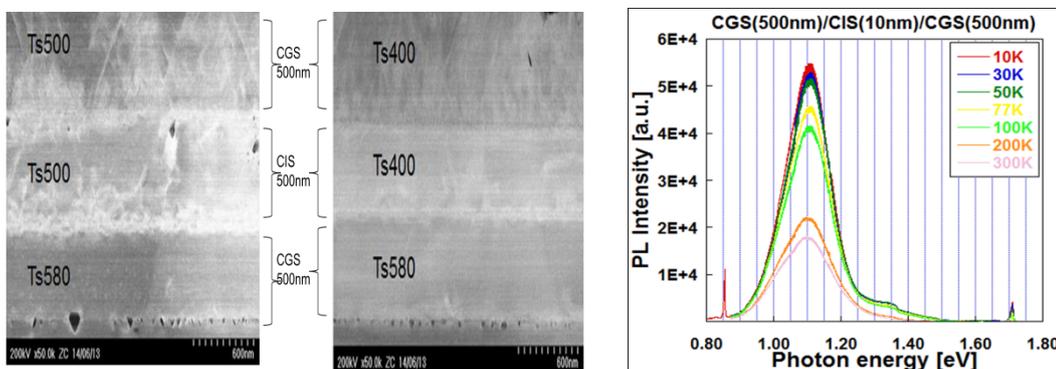


図 4.3 400°Cと 500°Cで成長した構造の断面 TEM 写真 図 4.4 10 nm 単一量子井戸の PL

晶化していることがわかる。400°CではCuInSe₂のピークは強く現れており、初めて二重ヘテロ構造が形成されていることがわかる。図 4.3 は 400°Cと 500°Cで成長した構造の断面写真である。500°C成長では相互拡散により界面が乱れているが、400°C成長では平坦な界面が得られている。さらに温度の微調整、各分子線強度の厳密な制御の結果、きわめて急峻なヘテロ接合の成長が可能となった。この結果原子レベルで平坦な界面を持つCuGaSe₂/CuInSe₂系量子井戸および超格子構造を実現した。図 4.4 に試作された井戸幅 10 nm の単一量子井戸のフォトルミネッセンス (PL) を示す。さらに実際にCuInSe₂/CuGaSe₂超格子を製作して変調ドーピングを試みた。しかし現在までのところ高抵抗状態は実現できるものの、未だ n 型伝導の実現には至っていない。PL スペクトルで特徴的なことは、温度の変化に伴う発光エネルギーの変化が少ないことである。これはこの系の特徴であると考えられ、新しい応用面を開く可能性がある。

このほかCuInSe₂/CuGaSe₂超格子に関してはGaAs基板上の歪補償超格子の設計を行った。GaAs基板とCuInSe₂およびCuGaSe₂との格子不整合はそれぞれ-2.3%(圧縮)および+0.7%(引っ張り)である。このため臨界膜厚(~10 nm)以下の厚さのCuInSe₂およびCuGaSe₂を交互に積層し、歪を補償した超格子構造を成長することができる。これにより欠陥の形成を抑制し高品質の超格子を成長することが可能である。具体的にはCuInSe₂(1 nm)/CuGaSe₂(3 nm)超格子構造により無歪化が可能である。この構造では1.4 eV付近に吸収端が得られ、かつ励起子束縛エネルギーが約15 meVと高いことから、強い励起子吸収が得られる。計算では吸収効率はCIGSバルクに比較して約20%高い。

(2) 成果の位置づけと類似研究との比較

CuInSe₂/CuGaSe₂などカルコパイライト系結晶では、蒸着法や低真空プロセスによる多結晶薄膜で比較的高い太陽電池効率が得られるため、単結晶薄膜を用いたに高品質化に関わる研究はあまり行われていない。しかしこの材料系では未だ p 型結晶は得られておらず、太陽電池の構成にはCdS/ZnOなど格子不整合の大きいヘテロ接合が用いられている。pnホモ接合や格子不整合の小さいカルコパイライト系の材料を用いたpn接合が実現できれば効率や寿命に大きく貢献できるものと考えられる。このような観点で研究を進めてきた。n型化についてはもう一步というところまで到達したと思うが、まだ果たせていない。

しかしこの研究の過程でこれまで全く考えられてこなかったカルコパイライト結晶を用いた超格子や量子井戸などのヘテロ接合製作技術を確認することができた。n型結晶が未完成である点を除けば、ヘテロ接合技術は通常のIII-V化合物半導体と同等のレベルに到達している。太陽電池以外の半導体デバイスへの応用についても可能性が広がった。

3.5 直接遷移/間接遷移ハイブリッド太陽電池の研究(早稲田大学 堀越グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

太陽電池の効率向上には、光の吸収効率の向上による短絡電流の増加が必要である。薄膜太陽電池は薄い活性層で十分に光を吸収する必要があることから吸収係数の大きい材料、すなわち直接遷移型の半導体を用いる。さらに我々は、超格子構造における閉じ込め効果、励起子増感効果により吸収効率が向上することを明らかにした。しかしながら、吸収率の高い材料・構造は、同時に生成されたキャリアの再結合による損失が大きく電流の低下を招く可能性がある。この問題を解決するために、超格子太陽電池に X 点における電子伝導を導入した新たな太陽電池構造を提案した。この構造は我々のオリジナルなアイデアに基づく今までにない新たな太陽電池構造であり、直接遷移型の光吸収特性と間接遷移型の伝導特性を併せ持った構造である。この構造のエッセンスは、光の吸収とキャリアの伝導を k 空間中で分離することにより、直接遷移型の高い光吸収効率と間接遷移型の発光再結合の抑制を同時に実現することにある。

直接/間接ハイブリッド構造は、(Al,Ga)As系、((Al,Ga),In)P系、(Al,Ga,In)Sb系、(Al,Ga)(As,Sb)系をはじめ様々な材料系で実現可能である。しかしながら、この構造はΓ点とX点の間のわずかなエネルギー差が素子の特性に本質的な影響を与える。したがって、高い構造精度が実現できるとともに、歪の影響を抑えることのできる格子整合系に着目し、GaAsに格子整合する

GaAs/AlAs 超格子および InGaP/InAlP 超格子に対する理論解析を行った。

GaAs/AlAs 超格子

GaAs/AlAs 混晶は、Al 組成の増加とともにバンドギャップが増加し、Al 組成 45%を境に直接遷移から X 点に極小値をもつ間接遷移へ移行し光吸収効率が大幅に低下する。しかしながら、伝導帯と価電子帯の真空準位に対するエネルギー変化を考えると、Al 組成の増加とともに価電子帯の頂上が低くなり、伝導帯の Γ 点の底が高くなるのに対し、伝導帯の X 点の底は低くなる。したがって、AlAs/GaAs 超格子においては、 Γ 点では GaAs 層がエネルギーの低い井戸となるのに対し、X 点では逆に AlAs 層が井戸となる。GaAs の Γ 点の有効質量が 0.067 であるのに対し、AlAs の X 点の縦方向の有効質量は 0.97 と非常に大きいことから、GaAs および AlAs 層の厚さを適当に選ぶことにより、 Γ 点の量子化準位を X 点よりも高くすることが可能である。実際、AlAs 層の厚さを 2 nm に固定し GaAs 層の厚さを変化させて、 Γ 点および X 点の基底準位のエネルギーを計算すると、図 5.1 に示されるように、GaAs 層の厚さを 2 nm まで薄くすると Γ 点と X 点のエネルギーが逆転し、X 点が伝導帯の底になる。

(AlAs 2 nm)/(GaAs 2 nm)単位構造 10 周期分からなる超格子構造におけるサブバンドを計算すると、 Γ 点の準位が 1.73 eV であるのに対し、X 点は 1.68 eV と Γ 点に比べ 50 meV 低い。このように Γ 点と X 点のエネルギーが逆転した構造では、光吸収によるキャリアの生成とキャリアの伝導による電流の取り出しを k 空間中で分離することができる。

図 5.2 に示すように、光吸収により Γ 点に生成された電子は光学フォノンを放出して速やかにエネルギーの最も低い X 点の底に緩和する。 Γ 点と X 点

エネルギー差は室温に比べ十分大きいことから、X 点に緩和した電子が再び Γ 点に励起されることはなく、X 点の伝導を通じて電極へ取り出される。電子伝導に X 点を用いることにより、発光再結合によるキャリアの消滅は著しく低下し、短絡電流の減少が大幅に抑制される。X 点の準位は Al 組成 80%の AlGaAs に、一方重い正孔の準位は -0.11 eV で Al 組成 20%の AlGaAs にマッチし、実効的なバンドギャップは 1.84 eV となり Al 組成 30%の AlGaAs に対応する。

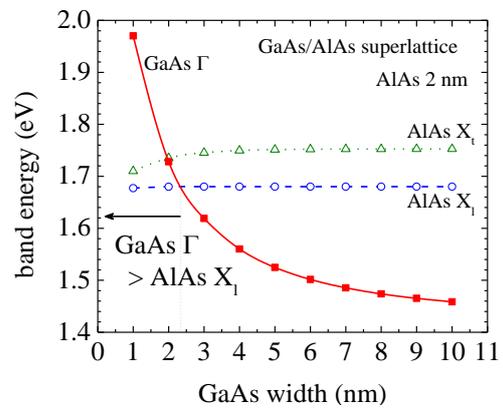


図 5.1 GaAs/AlAs 超格子の量子化準位

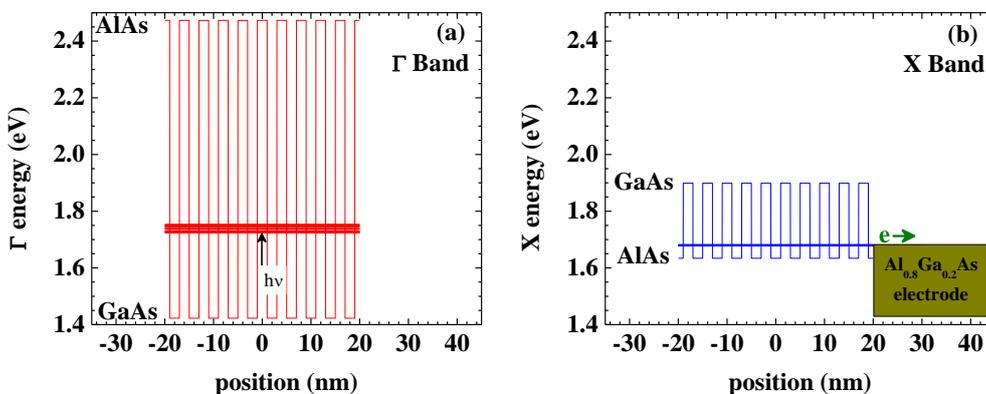


図 5.2 GaAs/AlAs 超格子の(a) Γ 点および(b) X 点におけるポテンシャルとエネルギー準位

GaInP/AlInP 超格子

$(\text{Al}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P})_z(\text{Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P})_{1-z}$ ($\approx (\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z})_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$)は GaAs に格子整合し、Al 組成 $z = 50\%$ を境に直接遷移から間接遷移へ変化する。AlAs/GaAs 系と同様に、Al 組成の増加とともに価電子帯の頂上が低く、伝導帯の Γ 点の底が高くなるのに対し、X 点の底は低くなる。従って AlInP/GaInP 超格子においては、 Γ 点では GaInP 層がエネルギーの低い井戸となるのに対し、X 点では逆に AlInP 層が井戸となる。AlInP 層の厚さを 2 nm に固定し、GaInP 層の厚さを変化させると、図 5.3 に示すように、GaInP 層 2 nm 以下では Γ 点の量子化準位が X 点よりも高くなる。 $(\text{Al}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P} \text{ 2 nm}) / (\text{Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P} \text{ 2 nm})$ 単位構造 10 周期

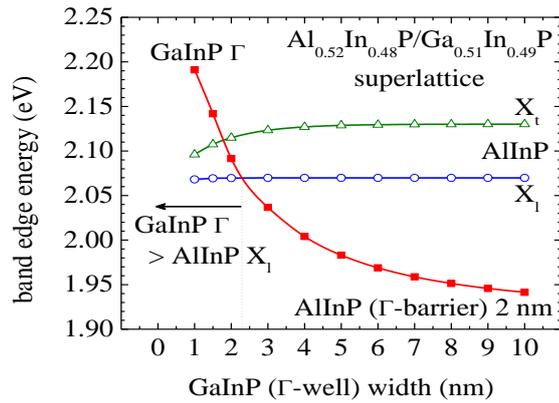


図 5.3 GaInP/AlInP 超格子の量子化準位

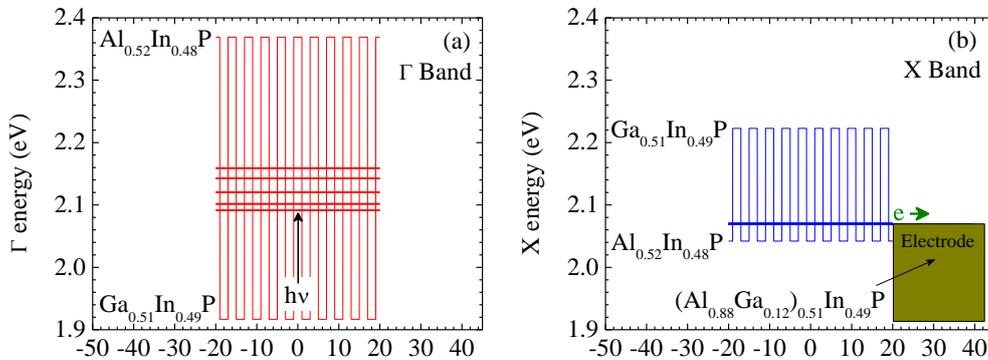


図 5.4 GaInP/AlInP 超格子の(a) Γ 点および(b) X 点におけるポテンシャルとエネルギー準位

分らなる超格子構造におけるサブバンド準位は、図 5.4 に示すように、 Γ 点の 2.09 eV に対し、X 点は 2.07 eV と Γ 点に比べ 20 meV 低く、 $(\text{Al}_{0.88}\text{Ga}_{0.12})_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$ にマッチする。一方重い正孔の準位は -0.07 eV で、 $(\text{Al}_{0.29}\text{Ga}_{0.71})_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$ にマッチし、実効的なバンドギャップは 2.16 eV となる。

これらの解析結果は、直接/間接ハイブリッド構造が GaAs/AlAs および GaInP/AlInP 超格子を用いて実現可能であることを示しており、発光再結合の抑制による短絡電流の増大に有効であることを示している。さらに、これらの超格子系は GaAs あるいは Ge 基板に格子整合することから多接合型太陽電池への応用が可能であり、薄膜太陽電池の高効率化に広く資すると期待される。

(2) 成果の位置づけと類似研究との比較

本研究は、我々のオリジナルなアイデアに基づく今までにない新たな太陽電池構造の提案とその解析である。直接/間接ハイブリッド構造は、直接遷移型の光吸収特性と間接遷移型の伝導特性、すなわち両者の長所を併せ持った構造である。この構造のエッセンスは、光の吸収とキャリアの伝導を k 空間中で分離することにより、直接遷移型の高い光吸収効率と間接遷移型の発光再結合の抑制を同時に実現することにある。この構造を用いることにより、キャリアの発光再結合による電流損失を低下させることが可能であり化合物太陽電池のさらなる高効率化へのブレークスルーになることが期待される。理論的には、直接/間接ハイブリッド構造の形成が十分可能であることが明らかになっており、今後の実験検証が期待される。

3. 6 ZnO/CdZnO、Si/SiO₂ 超格子の研究(早稲田大学 堀越グループ)

(1)研究実施内容及び成果

本研究は励起子遷移による光吸収が顕著に起こる可能性が期待できる系として提案したものである。このうち ZnO については励起子束縛エネルギーが 60 meV ときわめて高く、ZnO 薄膜と金属のショットキー接合でも励起子による光電流はバンド間遷移光電流に比べて圧倒的に高く、有望な性格を見せた。しかしバンドギャップエネルギーが紫外域にあり、トップセルとして用いても関与できる光子密度は小さく、このため CdZnO との超格子構造が選ばれた。CdZnO は相分離系であるため成長には困難が予想されたが、CdO 分率の小さい領域では超格子の製作が可能であった。同時に導電性薄膜としての ZnO にも注目し、この場合均一性と低抵抗性がキーポイントとなるが、一般に結晶上やガラス基板上で ZnO 薄膜を成長させると、Si などの結晶状では直線的な、ガラス上では不規則なクラックが表面に現れる。これは導電性膜としては大きな問題であった。この現象は基板材料と ZnO の熱膨張率の差に起因するものである。われわれはこの問題を、ZnO よりも大きい熱膨張率を持つ MgO 極薄膜を中間層に用いることによりこの問題を解決した。具体的には 3 インチ Si またはガラス基板上で、クラックフリーな ZnO 薄膜の成長に成功した。

次に Si/SiO₂ 超格子の研究について記述する。Si は間接遷移半導体であるため、吸収端近傍では吸収係数はきわめて小さい。このため厚膜が必要である。励起子効果によって吸収係数が増加すれば Si 太陽電池の薄膜化が可能である。Si 太陽電池は太陽電池の中で最も重要な存在であり、このため Si 太陽電池の薄膜化が実現すれば経済的な価値は大きい。

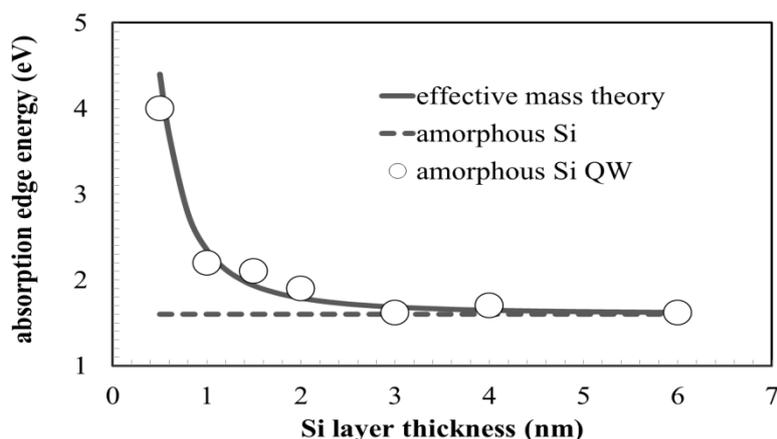


図 6.1 スパッタリング法で成長した Si/SiO₂ 超格子の吸収端 Si 厚さ依存性

Si/SiO₂ 超格子の成長の研究はマグネトロン・スパッタリングおよび MBE 法を用いて行った。前者では図 6.1 に示すように超格子の Si 井戸層の厚さの減少に伴う量子効果が明確に示されたが、ここではより高品質の超格子が得られた MBE 方の結果を中心に述べる。欠陥の少ない構造を作るため、MBE では電子ビーム加熱やレーザーアブレーションのように分子線に過剰なエネルギーを与える手段を用いず、通常の抵抗加熱を採用した。このため Si と SiO₂ の蒸発には 1900°C の高温まで昇温可能な加熱セルを用いた。MBE 装置はこのような高温セルを用いてもチャンバー内の背圧が増加しないように設計した。Si の蒸発は超高純度 Si をタングステン坩堝を用いて、SiO₂ の蒸発は光ファイバー製造の中間生成物であるスートを白金坩堝を用いて行った。成長速度はそれぞれ 0.6 ML/s、1 nm/s であった。成長に伴う RHEED パターンの変化を図 6.2 に示す。図 6.2(a) は Si(001)基板上に障壁層である SiO₂ を 2nm 成長した表面の RHEED パターンである。Si 表面の(2×1)パターンは消失し、完全なアモルファス膜が成長していることがわかる。図 6.2(b)はその上に Si を 1 nm 成長した表面のパターンである。アモルファスパターンにリング状のパターンが重畳し、Si 微結晶が成長している様子が伺える。このようなパターン変化の繰り返しは数 10 層の超格子成長の終了まで続き、同質の層が積層していることがわかった。断面 TEM 観察の結果 Si/SiO₂ 超格子構造は設計の周期で形成され

ていたが、組成分析の結果 SiO_2 層は実際には酸素が大幅に不足した SiO に近い SiO_x 構造であることが判明した。実際の太陽電池でこの構造をそのまま用いる可能性もあるが、熱処理によって Si/SiO_2 超格子が実現できるかどうかの検討を行った。

図 6.3(a)は成長した Si/SiO_2 超格子、および 1000 度における熱処理後の断面 TEM 像である。図 6 の TEM 像で明るく見えるストライプは SiO_2 層、暗いストライプは Si 層である。熱処理前の SiO_2 層の厚さは相対的に厚いのに対し、熱処理後は薄くなっていることがわかる。一方熱処理後は Si の厚さが増加していることがわかる。これは熱処理によって層分離が進んだためと考えられる。 SiO_x 単層を用いた実験では、熱処理によって SiO_x は絶縁性も誘電特性も純粋な SiO_2 単にに近いものになっていることが確認された。さらに高分解能 TEM および電子線回折実験により、 Si 層は Si 微結晶とアモルファスの集合体で形成されていることがわかった。観察された強い PL はこのような微結晶に由来するものと考えられる。

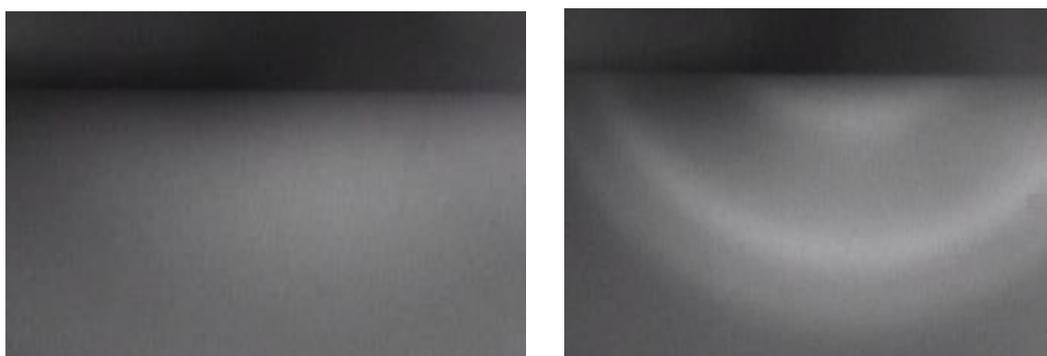


図 6.2(a) SiO_2 成長 (2 nm) 成長後のパターン

図 6.2(b) Si 成長 (1 nm) 成長後のパターン

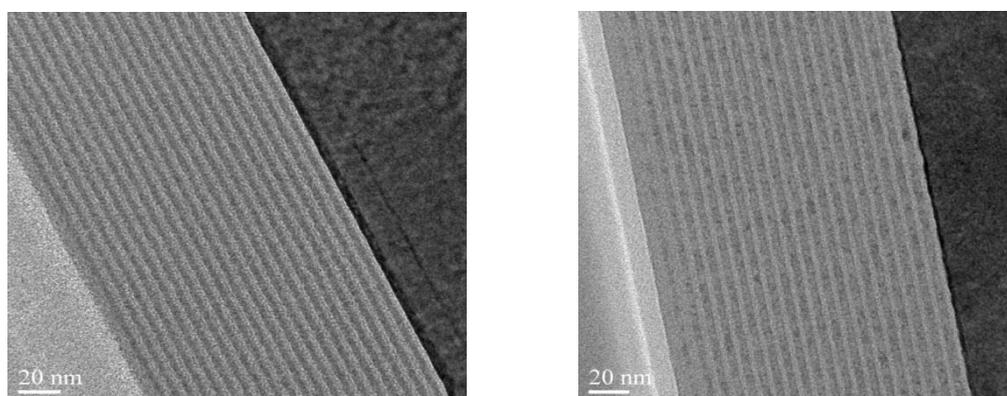


図 6.3(a) As-grown Si/SiO_2 超格子の TEM 像 図 6.3(b) 熱処理後の Si/SiO_2 超格子の TEM 像

(2) 成果の位置づけと類似研究との比較

Si/SiO_2 超格子の MBE 法による製作は初めての試みであった。今回の結果では SiO_2 は大幅に酸素むしろ SiO に近い形であることが判明し、完全な SiO_2 を得るには成長後の熱処理が必要であることが明らかになった。しかしながらこのようにして形成された超格子は電氣的、光学的に優れた特性を示しており、従来のスパッタリングによる超格子の特性を凌駕するものである。したがって今後 Si 系太陽電池の発展に寄与する可能性は高いと考えられる。

3.7 太陽電池の基本特性の評価(早稲田大学 堀越グループ)

(1)研究実施内容及び成果

本研究は、太陽電池の電流・電圧特性における再結合電流の評価に関するものである。薄膜太陽電池の効率向上には光吸収効率の向上が不可欠であり、吸収係数の大きい直接遷移型の半導体が用いられる。しかしながら、吸収効率の高い材料は同時に発光再結合による損失が大きい。したがって、再結合電流が太陽電池特性に与える影響の評価は重要である。我々は、再結合電流の簡便な評価手法として、特性値として広く用いられる短絡電流、開放電圧および形状因子から外部量子効率および拡散、再結合電流を求める手法を開発した。この手法は 3 つの入力パラメータのみから再結合電流成分を決定することが可能であり、極めて簡便かつ汎用性の高い評価手法である。

太陽電池の I-V 特性は生成電流と注入電流からなり、注入電流は更に拡散電流成分と再結合電流成分の和で与えられる。したがって抵抗成分を無視できる場合、太陽電池の電流密度は

$$J = t_s J_{Sun} - J_1 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) - J_2 \left(e^{\frac{qV}{2kT}} - 1 \right)$$

と表される。ここで t_s は外部量子効率であり短絡電流と $J_{sc} = t_s J_{Sun}$ の関係にある。また J_1, J_2 はそれぞれ拡散および再結合の飽和電流密度である。バンドギャップを決めれば J_{Sun} は決まるので、未知のパラメータは t_s, J_1, J_2 の三つである。 t_s は J_{sc} のみに依存するので、実質的には実験で得られた形状因子 (FF)、開放電圧 (V_{oc}) を再現するように J_1 および J_2 を決定する。この手法の大きな利点は、I-V 特性の詳細を知ること無しに、一般的に特性値として与えられる FF, V_{oc} 二つの値のみから拡散電流と再結合電流のバイアス依存性を評価できる点にあり、簡便かつ汎用性の高い手法である。実際に製作した、GaAs バルク、AlGaAs/GaAs 超格子活性層からなる PIN 接合太陽電池の特性値を用いて評価した。バルクでは $t_s = 84\%$ 、 $J_1 = 2.1 \times 10^{-16} \text{ mA/cm}^2$ 、 $J_2 = 5.6 \times 10^{-8} \text{ mA/cm}^2$ 、超格子では $t_s = 83\%$ 、 $J_1 = 3.5 \times 10^{-18} \text{ mA/cm}^2$ 、 $J_2 = 1.4 \times 10^{-8} \text{ mA/cm}^2$ とすると、図 7.1 に示す様に J-V 特性全体を良く再現する。バルク、超格子いずれの場合にも、再結合成分 J_2 は拡散成分 J_1 に比べはるかに大きい。最大出力点においても再結合電流が支配的であり、拡散電流の割合は、バルクで 7.8%、超格子では 1.8% である。この結果は、効率向上には再結合電流の抑制による形状因子の改善が必要であり、結晶品質の向上による非発光再結合の抑制とともに発光再結合の抑制が有効であることを示している。

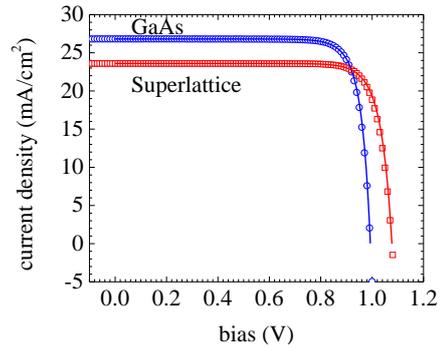


図 7.1 J-V 特性のフィッティング

(2)成果の位置づけと類似研究との比較

本研究の成果は、太陽電池の効率に大きな影響を与える再結合電流を極めて簡便に評価できる点にある。評価に必要な入力パラメータは短絡電流、開放電圧および形状因子の 3 つのみであり、I-V 特性の測定のみから評価が可能であり、材料固有のパラメータ、デバイス構造に依存するパラメータを必要としない。再結合電流の評価は、デバイスシミュレータを用いて行うことが可能であるが、一般にシミュレータを用いた解析には多くの未知のパラメータを推測により指定する必要が生じる。本手法は測定から直接求まる特性値を用いて再結合電流の評価が可能である点が、特徴であり、汎用性、実用性の高い手法である。

3.8 加圧 MOVPE 法を用いた InN および InGaN 成長(東北大学 松岡グループ)

(1)研究実施内容及び成果

窒化物半導体を用いて太陽電池構造を作製する場合、InGaN および InN が光吸収層となる。これらの材料は、InN の気相-固相間の窒素平衡蒸気圧が他の材料と比べ極めて高いことから

窒素の脱離が生じやすく、従来の減圧雰囲気下での結晶成長では高品質化が難しい。本研究では、窒素原料の供給圧力をより高くし、窒素の脱離を防ぐことで InN および InGaN の高品質化を図るため加圧 MOVPE 成長 (PR-MOVPE) 装置を開発した。さらに、表面からの窒素の再蒸発を防ぐために従来の III 族極性面から窒素極性面に変更した。異なる極性を有する GaN 上に同じ成長条件で InN を加圧成長し、表面モフォロジーを比較した結果を図 8.1 に示す。InN の結晶成長においては、表面は{1101}面や(0001)面など、窒素面で構成されやすく、III 族極性面上に成長した InN は InN はピラミッド状の形状を有し(図 8.1(a))、N 極性面上に成長した InN は表面平坦性に優れていることが分かった(図 8.1(b))。さらに、図 8.2 に示すとおり加圧雰囲気下で成長した InN の表面モフォロジーを比較すると、成長圧力が高いほど表面モフォロジーが平坦になることが分かり、加圧成長が In 組成の高い InN や InGaN の結晶成長に有望であることを示した。

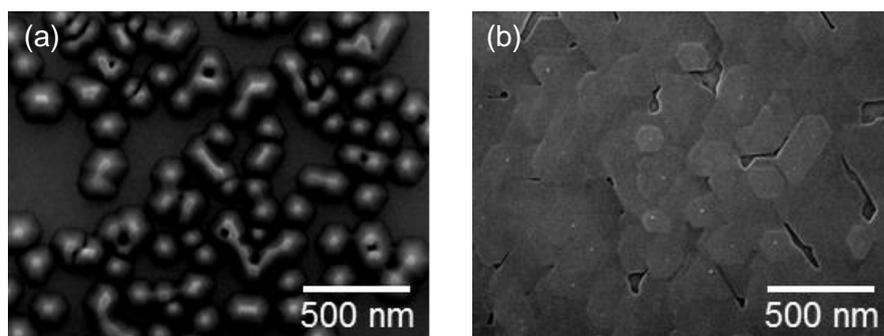


図 8.1 (a)N 極性および(b)Ga 極性 GaN 上に成長した InN の表面モフォロジー比較

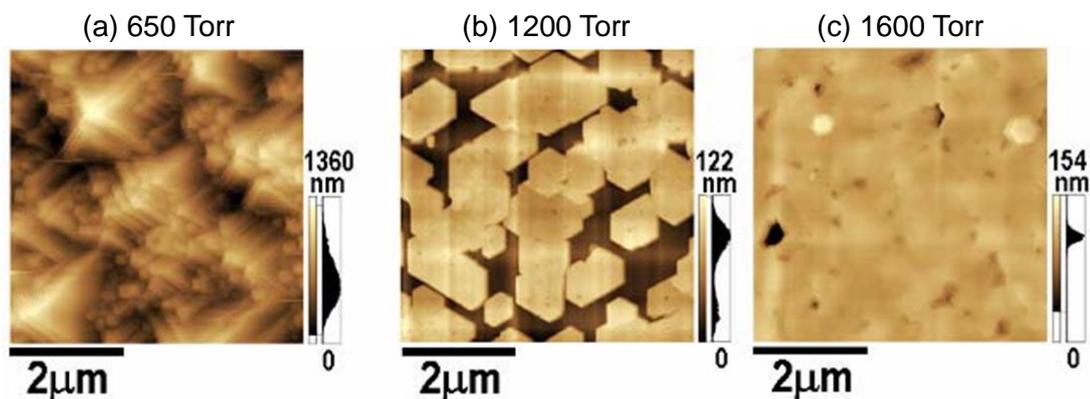


図 8.2 N 極性 InN の表面モフォロジーの成長圧力依存性

次に、作製した InN の結晶相純度を X 線回折測定およびラマン散乱測定で評価したところ、加圧雰囲気下で結晶成長するとウルツ鉱型結晶 (WZ) とジंकブレンド型結晶 (ZB) が混在することが確認された。相純度を高めるために、相図を作成した。PR-MOVPE 法を用い、結晶相純度の成長温度依存性および III 族原料であるトリメチルインジウム (TMI) の供給量依存性を検討した。InN の X 線回折の極点図における X 線回折強度比を相純度と定義して、図 8.3 に示す。成長温度 550°C 以下では、ZB が混入しているのに対して、成長温度 575°C 以上では WZ が支配的となる。このことから、WZ を得るためには、高温成長が必須であることが分かる。成長圧力 2400 Torr における相図を図 8.4 に示す。TMI 供給量が少ないほど、相純度が高くなることが分かる。また、成長温度の依存性については、成長圧力 1600 Torr と同様の傾向を示した。以上より、相純度の高い InN を実現するための指針を見出すことができた。

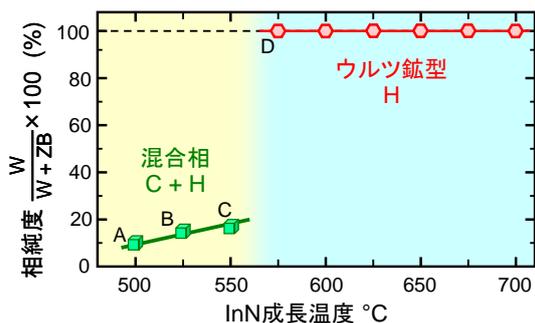


図 8.3 1600 Torr 成長 InN 相純度の成長温度の依存性

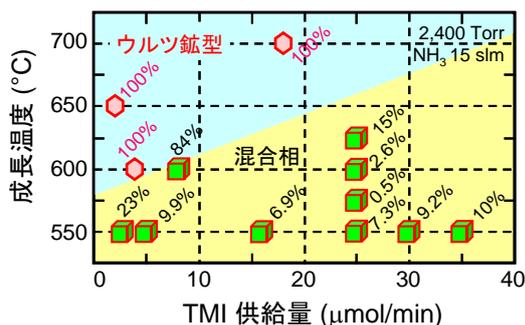


図 8.4 2400 Torr 成長 InN 相純度の成長温度と TMI 供給量の依存性

(2) 成果の位置づけと類似研究との比較

PR-MOVPE の開発および InN 成長は初めての試みであった。今回の結果より、N 極性面を用いることで従来の III 族極性上に作製した結晶を凌駕する結晶品質が得られる可能性が大いに示され、さらに加圧成長雰囲気においても平坦性に優れた結晶が得られることが分かった。したがって窒化物半導体の太陽電池応用に向けて窒素極性面と加圧成長は有用な結晶成長技術となりうる。

3. 9 AlGaInN/GaN 系太陽電池(東北大学 松岡グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

GaN/In_xGa_{1-x}N 系太陽電池は、混晶比 x を変化させることにより太陽エネルギーの大部分を吸収できる能力を持つ。しかし、In_xGa_{1-x}N は非混和性領域が広く、均質な膜を得ることが難しい。さらに、巨大な自発分極・圧電分極を素子内に生じる材料系であり、従来の Ga 極性面上に作製した太陽電池では光生成キャリアの引き出しを妨げる方向に分極電界が印加されるため、効率の良い太陽電池の実現が難しい。そこで松岡グループでは、従来の Ga 極性面と逆方向にあたり、分極電界を用いて光生成キャリアを効率よく取り出すことが可能な N 極性面を成長面方位として採用した。図 9.1 は Ga 極性面と N 極性面の結晶構造と太陽電池の pin 構造におけるバンド構造を比較したもので、一般に用いられる基板側 n 型の構造では N 極性面への成長が励起キャリアの取り出しに有利なことがわかる。一方広い In_xGa_{1-x}N 混晶組成の結晶を作製するために、加圧成長可能な MOVPE 装置を独自に開発し、通常の減圧 MOVPE 装置と比較して高い窒素原料供給量下

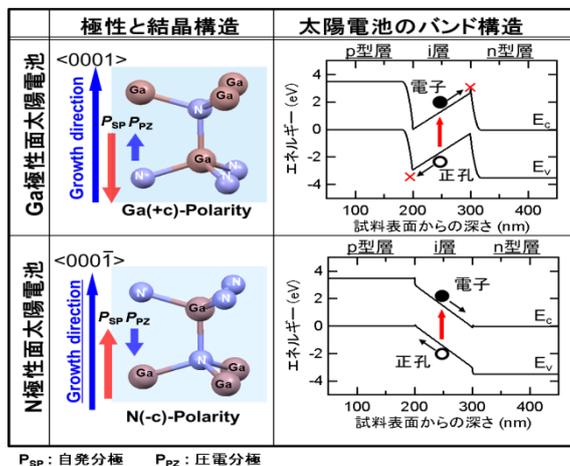


図 9.1. Ga 極性面と N 極性面の結晶構造と太陽電池の pin 構造の比較

で InN を成長し、成長温度を高くすることで表面平坦性に優れた高品質 InN の作製に成功した。さらに、N 極性面上に作製した $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 混晶は従来の Ga 極性面上と比べ InN の再蒸発が少なく、高い InN モル分率を有する $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ が得られることが分かった。次に GaN/ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 超格子構造を作製した。In を結晶内に取り込むためには過飽和度の高い雰囲気での結晶成長を行う必要があるが、In を取り込む代わりに準安定層である閃亜鉛鉱構造が混在してしまうことが分かった。この問題に対し、GaN/ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 超格子を作製する際に $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 成長時のみ過飽和度の高い雰囲気とし、GaN 成長時は過飽和度の低い雰囲気とすることで、高 InN モル分率を維持しつつ準安定層の混在を抑制することに成功した。成長条件の最適化の結果、InN モル分率として 0.34 の $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ の成長に成功し、これまでにない混和領域の拡大を実現した。Ga 極性面および N 極性面上に多重量子井戸を持つ太陽電池構造を作製した。その特性を図 9.2 に示す。両者の発電特性を比較すると、Ga 極性面は逆バイアス電圧印加時においてのみ光生成キャリアが取り出せているのに対し、N 極性面上のデバイスでは光電流がバイアス電圧に殆ど依存していないことから、分極電界により光生成キャリアの引き出し効率が増加しており、N 極性面太陽電池が高効率化に有効であることを示した。

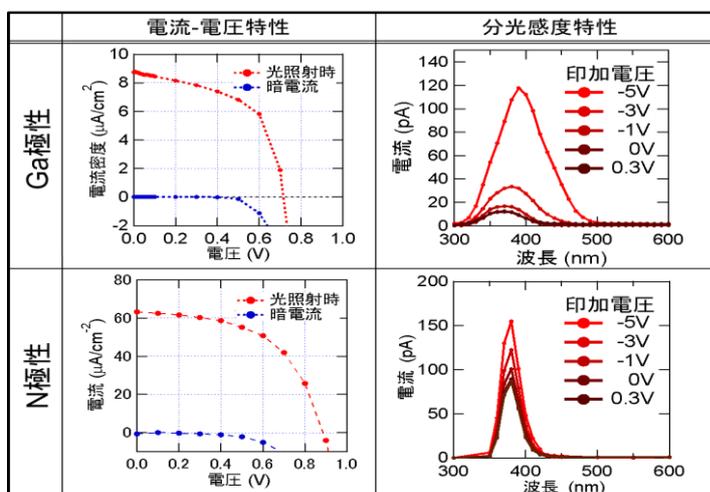


図 9.2 Ga 極性面および N 極性面上太陽電池の特性比較

§ 4 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌 1件、国際(欧文)誌 40件)

1. Y. H. Liu, T. Kimura, T. Shimada, M. Hirata, M. Wakaba, M. Nakao, S. Y. Ji, and T. Matsuoka
"MOVPE Growth of InN: A Comparison between a Horizontal and a Vertical Reactor"
Phys. Status Solidi C, 6(S2), S381-S384 (2009)
10.1002/pssc.200880914
2. T. Takeuchi, J. Nishinaga, A. Kawaharazuka, Y. Horikoshi
"Atomic contribution to valence band density of states in gallium oxide and silicon oxide nano layered films"
Defect and Diffusion Forum, 297-301, 849-852 (2010)
10.4028/www.scientific.net/DDF.297-301.849
3. J. Nishinaga, T. Hayashi, K. Hishida, and Y. Horikoshi
"Electrical properties of C₆₀ delta-doped "GaAs and AlGaAs layers grown by MBE"
Phys. Status Solidi C 7, 2486-2489 (2010)
10.1002/pssc.200983852
4. 西永慈郎, 堀越佳治
"GaAs 基板上フラーレン C₆₀ の結晶成長と C₆₀ doped GaAs の電気的特性"
表面科学 31, 632-636 (2010)
5. Jiro. Nishinaga, Atsushi Kawaharazuka, Koji Onomitsu, Klaus H. Ploog, and Yoshiji Horikoshi
"Effect of excitons in AlGaAs / GaAs superlattice solar cells"
Jpn. J. Appl. Phys. 50, 052302 (2011)
10.1143/JJAP.50.052302
6. Jiro Nishinaga and Yoshiji Horikoshi
"Growth and characterization of C₆₀/GaAs interfaces and C₆₀ doped GaAs"
J. Cryst. Growth 323, 135-139 (2011)
10.1016 /j.jcrysgro.2010.11.068
7. Atsushi Kawaharazuka, Koji Onomitsu, Jiro Nishinaga, and Yoshiji Horikoshi
"Effect of excitons on the absorption in the solar-cell with AlGaAs/GaAs superlattice grown by molecular beam epitaxy"
J. Cryst. Growth 323, 504-507 (2011)
10.1016/j.jcrysgro.2010.12.051
8. Marlene Zander, Jiro Nishinaga, Kazuki Iga, and Yoshiji Horikoshi
"Area selective epitaxy of InAs on GaAs(001) and GaAs(111)A by migration enhanced epitaxy"
J. Cryst. Growth 323, 9-12 (2011)
10.1016/j.jcrysgro.2011.09.029
9. Miki Fujita, Atsushi Kawaharazuka, Jiro Nishinaga, Klaus H. Ploog, and Yoshiji Horikoshi
"Growth of CuGaSe₂ Layers on Closely Lattice-Matched GaAs Substrates by Migration-Enhanced Epitaxy"
Jpn. J. Appl. Phys. 50, 125502 (2011)
10.1143/JJAP.50.125502
10. T. Matsuoka, Y. H. Liu, T. Kimura, Y. T. Zhang, K. Prasertsuk, and R. Katayama
"Paving the Way to High-quality Indium Nitride -The Effects of Pressurized Reactor"
Proc. SPIE 7945, 794519 (2011)
10.1117/12.869771
11. T. Hanada, T. Shimada, S. Y. Ji, K. Hobo, Y. H. Liu, and T. Matsuoka
"Strain Relaxation Mechanism of InGaN Thin Film Grown on m-GaN"
Phys. Status Solidi C 8(2), 444-446 (2011)
10.1002/pssc.201000565
12. Y. T. Zhang, Y. H. Liu, T. Kimura, M. Hirata, K. Prasertsuk, R. Katayama, and T. Matsuoka
"Effect of Growth Temperature on Structure Properties of InN Grown by Pressurized-Reactor Metalorganic Vapor Phase Epitaxy"
Phys. Status Solidi C 8(2), 482-484 (2011)

- 10.1002/pssc.201000464
13. Jiro Nishinaga, Atsushi Kawaharazuka, Koji Onomitsu, Klaus H. Ploog, and Yoshiji Horikoshi
 "Excitonic absorption on AlGaAs/GaAs superlattice solar cells"
 Phys. Status Solidi C 9(2), 330-333 (2012)
 10.1002/pssc.201100276
 14. M. Zander, J. Nishinaga, K. Iga, and Y. Horikoshi
 "Structural properties of InAs-based nanostructures grown on GaAs(001) and GaAs(111)A by area selective epitaxy"
 Phys. Status Solidi C 9(2) 218-221 (2012)
 10.1002/pssc.201100274
 15. M. Fujita, T. Sato, T. Kitada, A. Kawaharazuka and Y. Horikoshi
 "Successful growth of Cu₂Se-free CuGaSe₂ by Migration-Enhanced Epitaxy"
 J. Vacum. Sci. Tech. B. 30, 02B126 (2012)
 10.1116/1.3690456
 16. K. Shojiki, T. Hanada, T. Shimada, Y. H. Liu, R. Katayama, and T. Matsuoka
 "Tilted Domain and Indium Content of MOVPE-Grown InGaN layer on m-plane GaN Substrate"
 Jpn. J. Appl. Phys. 51, 04DH01 (2012)
 10.1143/JJAP.51.04DH01
 17. T. Iwabuchi, Y. H. Liu, T. Kimura, Y. T. Zhang, K. Prasertsuk, H. Watanebe, N. Usami, R. Katayama, and T. Matsuoka
 "Effect of Phase Purity on Dislocation Density of Pressurized-Reactor Metalorganic Vapor Phase Epitaxy Grown InN"
 Jpn. J. Appl. Phys. 51, 04DH02 (2012)
 10.1143/JJAP.51.04DH02
 18. T. Kimura, K. Prasertsuk, Y. Zhang, Y. Liu, R. Katayama, and T. Matsuoka
 "Phase Diagram on Phase Purity of InN Grown Pressurized-Reactor MOVPE"
 Phys. Status Solidi C, 9(3-4), 654-657 (2012)
 10.1002/pssc.201100390
 19. J. H. Choi, S. Kumar, S. Y. Ji, K. Shojiki, T. Hanada, R. Katayama, and T. Matsuoka
 "Effect of Nitridation on Indium-composition of InGaN Films"
 Key Eng. Mater. 508, 193-198 (2012)
 10.4028/www.scientific.net/KEM.508.193
 20. K. Prasertsuk, Y. H. Liu, T. Kimura, Y. T. Zhang, T. Iwabuchi, R. Katayama, and T. Matsuoka
 "Relationship between Residual Carrier Density and Phase Purity in InN Grown by Pressurized-Reactor MOVPE"
 Phys. Status Solidi C 9(3-4), 681-684 (2012)
 10.1002/pssc.201100404
 21. J. G. Kim, Y. Kamei, A. Kimura, N. Hasuike, H. Harima, K. Kisoda, Y. H. Liu, and T. Matsuoka
 "Raman-scattering Characterization of InN Films Grown by Pressurized Metalorganic Vapor Phase Epitaxy"
 Phys. Status Solidi B 249, 779-783 (2012).
 10.1002/pssb.201147452
 22. Miki Fujita, Atsushi Kawaharazuka, and Yoshiji Horikoshi,
 "Characteristics of CuGaSe₂ layers grown on GaAs substrates"
 J. Cryst. Growth 378, 154-157 (2013)
 10.1016/j.jcrysgro.2012.12.171
 23. Jiro Nishinaga and Yoshiji Horikoshi
 "Crystalline and electrical characteristics of C60 uniformly doped GaAs layers"
 J. Cryst. Growth 378, 81-84 (2013)
 10.1016/j.jcrysgro.2012.12.044
 24. Marlene Zander, Jiro Nishinaga, and Yoshiji Horikoshi
 "Selective area growth of InAs nanostructures on faceted GaAs microstructure by migration enhanced epitaxy"
 J. Cryst. Growth 378, 480-484 (2013)

- 10.1016/j.jcrysgro.2012.12.089
25. J. Nishinaga, A. Kawaharazuka, K. Onomitsu, and Y. Horikoshi
 “High Absorption Efficiency Superlattice Solar Cells by Excitons”
Jpn. J. Appl. Phys. 52, 112302 (2013)
 10.7567/JJAP.52.112302
 26. M. Zander, J. Nishinaga, H. Gotoh, and Y. Horikoshi
 “Controlled nucleation and optical properties of InAs quantum dots grown on faceted GaAs microstructures”
Phys. Status Solidi C 10, 1500-1504 (2013)
 10.1002/pssc.201300274
 27. S. Thiru, M. Fujita, A. Kawaharazuka, and Y. Horikoshi
 “Photoluminescence study of Si doped and undoped Chalcopyrite CuGaSe₂”
Appl. Phys. A 113, 257-261 (2013)
 10.1007/s00339-013-7951-5
 28. J. H. Choi, K. Shojiki, T. Tanikawa, T. Hanada, R. Katayama, and T. Matsuoka
 “Investigation of Indium incorporation into InGaN by Nitridation of Sapphire Substrate in MOVPE”
Phys. Status Solidi C 10, 417-420 (2013)
 10.1002/pssc.201200667
 29. Y. T. Zhang, T. Kimura, K. Prasertusk, T. Iwabuchi, S. Kumar, Y. H. Liu, R. Katayama, and T. Matsuoka
 “Optical Properties of InN films Grown by Pressurized-reactor Metalorganic Vapor Phase Epitaxy”
Thin Solid Films 536, 152-155 (2013)
 10.1016/j.tsf.2013.04.004
 30. T. Takeuchi, M. Kondo, M. Fujuta, A. Kawaharazuka, and Y. Horikoshi
 “Optical Properties of Amorphous and Nanostructure Si/SiO₂ Quantum Wells”
J. Nano. Res. 26, 59-62 (2014)
 10.4028/www.scientific.net/JNanoR.26.59
 31. T. Tanikawa, K. Shojiki, T. Kimura, S. Kuboya, T. Hanada, R. Katayama, and T. Matsuoka
 "Enhancement of Surface Migration by Mg doping in the Metalorganic Vapor Phase Epitaxy of (000-1) GaN/Sapphire"
Jpn. J. Appl. Phys. 53, pp. 05FL05 (2014)
 10.7567/JJAP.53.05FL05
 32. J. H. Choi, K. Shojiki, T. Tanikawa, T. Hanada, R. Katayama, and T. Matsuoka
 "Effect of Sapphire Nitridation and Group-III Source Flow Rate Ratio on In-Incorporation Into InGaN Grown by Metalorganic Vapor Phase Epitaxy"
J. Nanoscience and Nanotechnology 14, 6112-6115 (2014)
 10.1166/jnn.2014.8306
 33. K. Shojiki, J.H. Choi, H. Shindo, T. Kimura, T. Tanikawa, T. Hanada, R. Katayama, and T. Matsuoka
 "Effect of c-plane Sapphire Substrate Miscut-angle on Indium Content of MOVPE-grown N-polar InGaN"
Jpn. J. Appl. Phys. 53, 05FL07 (2014)
 10.7567/JJAP.53.05FL07
 34. T. Aisaka, T. Tanikawa, T. Kimura, K. Shojiki, T. Hanada, R. Katayama, and T. Matsuoka
 "Improvement of Surface Morphology of Nitrogen-polar GaN by Introducing Indium Surfactant during MOVPE Growth"
Jpn. J. Appl. Phys. 53, 085501 (2014)
 10.7567/JJAP.53.085501
 35. Sathiabama Thiru, Masaki Asakawa, Kazuki Honda, Atsushi Kawaharazuka, Atsushi Tackeuchi, Toshiki Makimoto and Yoshiji Horikoshi
 Investigation of CuGaSe₂/CuInSe₂ double heterojunction interfaces grown by molecular beam epitaxy
AIP Advances 5, 027120-1 (2015)

36. Sathibama Thiru, Masaki Asakawa, Kazuki Honda, Atsushi Kawaharazuka, Atsushi Tackeuchi, Toshiki Makimoto and Yoshiji Horikoshi
Study of single crystal CuInSe₂ thin films and CuGaSe₂/CuInSe₂ single quantum well grown by molecular beam epitaxy
Journal of Crystal Growth, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2015.02.059> (Accepted)
37. Sathibama Thiru, Miki Fujita, Atsushi Kawaharazuka and Yoshiji Horikoshi
Electrical and Photoluminescence study of Undoped CuGaSe₂ Single crystal thin film
The Malaysia-Japan Model on Technology Partnership: International Proceedings 2013 of Malaysia-Japan Academic Scholar Conference, Springer, 2013, Part IV, 265p
38. Jiro Nishinaga, Atsushi Kawaharazuka and Yoshiji Horikoshi
High absorption efficiency of AlGaAs/GaAs superlattice solar cells
To be published in Jpn. J. Appl. Phys. 54 (2015), accepted 9 Feb. 2015.
39. Hiroyuki Urabe, Makoto Kuramoto, Tomohiro Nakano, Atsushi Kawaharazuka, Toshiki Makimoto, Yoshiji Horikoshi
Effects of surface barrier layer in AlGaAs/GaAs solar cells
To be published in J. Crystal Growth 22742.
40. Makoto Kuramoto, Hiroyuki Urabe, Tomohiro Nakano, Atsushi Kawaharazuka, Jiro Nishinaga, Toshiki Makimoto and Yoshiji Horikoshi
To be published in J. Crystal Growth 22770.
41. Takashi Matsuoka
Overview of Nitride Semiconductors
Int. J. Optomechatronics, 9, 1 (2015).

(2)その他の著作物(総説、書籍など)

1. J. Nishinaga and Y. Horikoshi
“Growth and characterization of fullerene/GaAs interfaces and C₆₀ doped GaAs layers”
Crystal Growth: Theory, Mechanism, and Morphology, Chap. 7, Nova Science Publishers, 2012
2. 河原塚篤、堀越佳治
“AlGaAs/GaAs 超格子構造太陽電池の開発”
高効率太陽電池、第一章六節、株式会社 NTS、2012 年
3. Yoshiji Horikoshi
“Migration-enhanced epitaxy for low-dimensional structures”
Molecular Beam Epitaxy, pp. 113-120, Elsevier, Dec. 2012
4. J. Nishinaga,
“Growth and characterization of fullerene/GaAs interfaces and C₆₀ doped GaAs and AlGaAs layers”

(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 6 件、国際会議 23 件)

〈国内〉

1. 松岡隆志
"デバイス側からみたナイトライド用基板結晶"
結晶成長学会 バルク結晶分科会, 2 (東北大学, 2010 年 6 月 18 日)
2. 松岡隆志, 木村 健司, 劉 玉懷, 張 源涛, 片山竜二
"InN 成長における加圧型有機金属気相成長法の可能性"
東北大学多元物質科学研究所 窒化物ナノ・エレクトロニクス材料研究センター講演会
"GaN 系プラネットコンシャスデバイス・材料の現状", V-2 (東北大学, 2010 年 11 月 4-5 日).
3. 松岡隆志, 劉 玉懷, 木村 健司, 片山竜二,
"窒化物半導体研究のトレンド:InN"
第 120 回東北大学金属材料研究所講演会、一般講演3 (2010 年 11 月 24-25 日).
4. 松岡隆志, 劉玉懷, 木村健司, 片山竜二

"ワイドバンドギャップ半導体単結晶薄膜の加圧成長と成長制御技術"
応用物理学学会結晶工学分科会, 7 (学習院大学, 2011.4.21).

5. 河原塚篤
“超格子エキシトン太陽電池”
日本結晶成長学会ナノ構造・エピタキシャル成長分科会シンポジウム、高効率ナノエピタキシャル太陽電池の最先端、東京大学生産技術研究所、2012年4月26日～27日
6. 松岡隆志, 木村健司, 片山竜二
“窒化インジウム ～発光素子から太陽電池まで～”
日本学術振興会 素材プロセッシング第69委員会 第2分科会(新素材関連技術)第66回研究会, 東京大学大山上会館、2012年7月31日

〈国際〉

1. Y. Horikoshi
“Nanotechnology and its application to future semiconductor devices”
International Symposium on Next-Generation Electronics (ISNE), Kaohsiung, Taiwan, Nov. 18 - 19, 2010
2. J. Nishinaga
“Growth and characterization of C₆₀/GaAs interfaces and C₆₀ doped GaAs”
16th International Conference on Molecular Beam Epitaxy, Berlin, Germany, August 22 - 27, 2010
3. Y. H. Liu, T. Kimura, Y. T. Zhang, M. Hirata, K. Prasertusk, R. Katayama, and T. Matsuoka
"Extended Growth Windows for Single Crystalline InN Grown by Pressurized-Reactor Metalorganic Vapor Phase Epitaxy"
The 37th International Symposium on Compound Semiconductors, FrD1-2 (Takamatsu, Japan, May 31 - June 4, 2010)
4. T. Matsuoka and Y. H. Liu
"Nitride Semiconductors: Planet Conscious Materials"
Intern. Conf. Emerging Technology in Renewable Energy (ICETRE-2010), (Chennai, India, Aug. 18-21, 2010)
5. T. Matsuoka, Y. Liu, T. Kimura, Y. Zhang, K. Prasertsuk1, and R. Katayama
"Paving the way to high-quality InN- effects of pressurized reactor in MOVPE-"
International Conference on Nano and Information Technology of Semiconductors, (Dongguk University in Seoul, Korea, Dec. 9-10, 2010)
6. T. Matsuoka
"Progress and Current Status in Nitride Semiconductors from GaN to InN"
Wide Bandgap Semiconductor Nanostructures, (Crystal Growth Centre of Anna University in Chennai, INDIA, Jan. 10-11, 2011)
7. J. Nishinaga
“Electrical properties of C₆₀ δ-doped GaAs, AlGaAs layers”
Villa Conference on Interactions among Nanostructures, Las Vegas, USA, April 21-25, 2011
8. T. Matsuoka, Y. H. Liu, T. Kimura, and R. Katayama
"Possibility of Pressurized-Reactor MOVPE for Nitride Semiconductor"
5th Intern. Conf. LED and Solid State Lighting (Conference Center, COEX, Seoul, Korea, June 30-July 1, 2011)
9. J. Nishinaga
“Crystal Growth of fullerene/GaAs interfaces and their applications”
2012 Energy Materials Nanotechnology Meeting, Orlando, USA, April 16-20, 2012
10. T. Matsuoka,
"Nitride Semiconductos for Energy Saving and Generation"
2012 Intern. Symp. Cryst. Growth, A13 (Seoul, Korea, Nov. 14-17, 2012).
11. J. Nishinaga
“Crystal growth and structural characteristics of fullerene / GaAs interfaces”
Collaborative Conference on Crystal Growth (3CG), Orlando, USA, December 11-14, 2012
12. T. Matsuoka

- "Growth of Indium-Incorporated Nitride Semiconductors in Metalorganic Vapor Phase Epitaxy" Intern. Workshop on "Crystal Growth and Characterization of Advanced Materials and Devices", (Chennai, India, Dec. 16-19, 2012)
13. J. Nishinaga
"Electronic band structures of fullerene / GaAs heterointerfaces and their applications"
2013 Energy Materials Nanotechnology Meeting, Houston, USA, January 7-10, 2013
 14. T. Matsuoka, T. Kimura, T. Iwabuchi, K. Shojiki, T. Tanikawa, and R. Katayama, "Effect of N-polar Growth in In-incorporation into Nitride Semiconductors", 2nd IMR & KMU Joint Workshop, GaN-1 (Seoul, Korea, Feb. 18, 2013).
 15. J. Nishinaga
"Electrical properties of fullerene doped GaAs pin diodes grown by MBE"
Collaborative Conference on Crystal Growth (3CG), Cancun, Mexico, Jun. 10-13, 2013
 16. T. Matsuoka, T. Tanikawa, T. Iwabuchi, and K. Shojiki, "Lattice-matching Substrates to InGaAlN and its Epitaxial Growth", 2nd International Symposium on Single Crystals and Wafers, C-12 (Wonju, Korea, June 25-28, 2013)
 17. *Y. Horikoshi, J. Nishinaga, A. Kawaharazuka, K. H. Ploog, K. Onomitsu, and M. Fujita
"Effect of excitonic absorption on the efficiency of AlGaAs/GaAs solar cells"
2013 JSAP-MRS Joint Symposia, Kyoto, Japan, Sep. 16-20, 2013
 18. T. Matsuoka
"Overview of Nitride Semiconductors"
13 International Symposium on Optomechatronic Technologies, Special Session 6, 1 (Jeju, Korea, Oct. 28-30, 2013)
 19. T. Matsuoka
"Recent Trends in Wide-Gap LEDs and LDs from Epitaxial Growth to Devices Structures"
Thailand National Science and Technology Development Agency (NSTDA) (Bangkok, Thailand, March 11 2014)
 20. T. Matsuoka
"Recent Progress of Nitride Semiconductors from Optical Devices to Electronic devices"
Thailand Microelectronics Center (TMEC) (Bangkok, Thailand, March 12, 2014)
 21. T. Matsuoka
"Recent Trends in Nitride Semiconductors for Optoelectronic Applications"
International Workshop on Electronic Materials Technology (Chennai, India, March 13-15, 2014)
 22. T. Matsuoka, T. Tanikawa, T. Kimura, K. Shojiki, T. Iwabuchi, and R. Katayama
"Crystallographic Polarity in Nitride Semiconductors and its Device Applications"
Research Institute of Electronic Communication Research Laboratory of Electronics (RIEC-RLE) Meeting in Boston, (Sendai, Japan, July 1-2, 2014)
 23. T. Matsuoka
"Recent Progress in Nitride Semiconductors from Epitaxial Growth to Device Applications"
Chitose International Forum 15, (Chitose, Japan, Oct. 2-3, 2014)

② 口頭発表 (国内会議 65 件、国際会議 26 件)

〈国内〉

1. 河原塚篤、堀越佳治
"RF-MBE 法による MgO(111)基板上への InN 成長"
第 57 回応用物理学関係連合講演会(17a-Tc-4)、東海大学 2010 年 3 月 17 日
2. 林剛史、西永慈郎、堀越佳治
"C60-Ge 複合体薄膜を用いた有機薄膜太陽電池"
第 57 回応用物理学関係連合講演会(19a-ZL-3)、東海大学 2010 年 3 月 19 日
3. C. H. Hsiao, T. Takeuchi, Y. Horikoshi, M. Yoshikawa, B. Thanawat, and S. J. Chang
"Cu-doped ZnO films deposited by RF magnetron sputtering on ITO glass"
第 57 回応用物理学関係連合講演会(17a-TQ-7)、東海大学 2010 年 3 月 17 日.
4. 小松崎優治、京極智輝、佐波謙一、小野満恒二、山口浩司、堀越佳治

- “In-Plane Gateデバイスを用いた論理回路の製作と動作”
第58回応用物理学関係連合講演会、神奈川工科大学、3月24日-27日、2010
5. 河原塚篤、小野満恒二、堀越佳治
“X電子伝導を用いたAlAs/GaAs超格子構造太陽電池の提案”
第58回応用物理学関係連合講演会、神奈川工科大学、3月24日-27日、2010
 6. 藤田実樹、佐藤友博、北田 剛、堀越佳治
“RHEEDによるCuGaSe₂MBE成長の最適化”
第58回応用物理学関係連合講演会、神奈川工科大学、3月24日-27日、2010
 7. 西永慈郎、河原塚篤、小野満恒二、クラウド プローク、堀越佳治
“AlGaAs/GaAs超格子太陽電池における励起子吸収”
第58回応用物理学関係連合講演会、神奈川工科大学、3月24日-27日、2010
 8. 西永慈郎、堀越佳治
“C₆₀, Si codoped GaAsの光電流スペクトル”
第58回応用物理学関係連合講演会、神奈川工科大学、3月24日-27日、2010
 9. マレーネ ツァンダー、西永慈郎、堀越佳治
“選択成長したInAs微細構造とGaAs(001)、(111)A基板の界面特性”
第58回応用物理学関係連合講演会、神奈川工科大学、3月24日-27日、2010
 10. 西永慈郎、堀越佳治
“C₆₀ δ-doped GaAs, AlGaAsのトラップ準位”
応用物理学会結晶工学分科会主催年末講演会、学習院大学、12月17日、2010
 11. 小松崎優治、京極智輝、小野満恒二、堀越佳治
“In-Plane Gateデバイスにおける電気特性の構造依存性”
第71回応用物理学会学術講演会、長崎大学、9月14日-17日、2010
 12. 河原塚篤、小野満恒二、西永慈郎、堀越佳治
“AlGaAs/GaAs超格子構造太陽電池における励起子吸収の効果”
第71回応用物理学会学術講演会、長崎大学、9月14日-17日、2010
 13. 藤田実樹、佐藤友博、北田 剛、堀越佳治
“CuGaSe₂のMBE成長の初期過程”
第71回応用物理学会学術講演会、長崎大学、9月14日-17日、2010
 14. 萩原裕和、堀越佳治
“MBE法を用いたAl₂O₃基板上ZnO whisker のVLS成長”
第71回応用物理学会学術講演会、長崎大学、9月14日-17日、2010
 15. 吉川正晃、タナワット プンプラサット、竹内登志男、堀越佳治
“RFマグネトロンスパッタ法で作製したZnO薄膜の真空熱処理効果”
第71回応用物理学会学術講演会、長崎大学、9月14日-17日、2010
 16. タナワット プンプラサット、吉川正晃、竹内登志男、堀越佳治
“RFマグネトロンスパッタ法で作製したCuドーピングZnO薄膜の特性”
第71回応用物理学会学術講演会、長崎大学、9月14日-17日、2010
 17. 西永慈郎、堀越佳治
“C₆₀ doped GaAs, AlGaAsのトラップ準位”
第71回応用物理学会学術講演会、長崎大学、9月14日-17日、2010
 18. 西永慈郎、菱田清、小野満恒二、堀越佳治
“太陽電池における励起子吸収について”
第71回応用物理学会学術講演会、長崎大学、9月14日-17日、2010
 19. 伊賀一貴、西永慈郎、マレーネ ツァンダー、堀越佳治
“GaAs(111)A基板上InAs薄膜成長のヒロック形成抑制”
第71回応用物理学会学術講演会、長崎大学、9月14日-17日、2010
 20. マレーネ・ツァンダー、西永慈郎、堀越佳治
“Migration-enhanced epitaxy によるGaAs(001) 上のInAs 選択成長”

- 第71回応用物理学会学術講演会、長崎大学、9月14日-17日、2010
21. 西永慈郎、堀越佳治
“Electrical properties of C₆₀ delta-doped GaAs layers grown by MBE”
第29回電子材料シンポジウム、修善寺、7月14日-16日、2010
 22. Y. H. Liu, T. Kimura, Y. T. Zhang, M. Hirata, T. Iwabuchi, K. Prasertsuk, T. Hanada, R. Katayama, and T. Matsuoka
“加圧MOVPE成長InNのバンドギャプエネルギーの温度依存性”
第71回応用物理学会学術講演会、14p-NJ-18 (長崎大学、2010年9月14-17日)
 23. 木村健司、劉玉懷、張源涛、K. Prasertsuk、金延坤、蓮池紀之、播磨弘、片山竜二、松岡隆志
“加圧 MOVPE 成長 InN の相純度の成長温度依存性”
第 71 回応用物理学会学術講演会講演会、14p-NJ-17 (長崎大学、2010 年 9 月 14-17 日)
 24. 松岡隆志、播磨弘、宮澤信太郎
“温度安定性に優れた光通信用InN半導体レーザの研究”～最近の進捗～”
JST-CREST「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」第3回公開シンポジウム (日本科学未来館、2010年11月26日)
 25. 劉玉懷、木村健司、張源涛、K. Prasertsuk、岩渕拓也、花田貴、片山竜二、松岡隆志
“窒化インジウム薄膜高品質化への道”
JST-CREST「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」第3回公開シンポジウム (日本科学未来館、2010.11.26)
 26. 藤田実樹、佐藤友博、北田剛、堀越佳治
“GaAs基板上にMEE成長したCuGaSe₂の電気的特性”
第59回応用物理学関係連合講演会、17pC1-8、早稲田大学、3月15日-3月18日、2012
 27. 河原塚篤、藤田実樹、堀越佳治
“CuInSe₂/CuGaSe₂超格子の吸収効率”
第59回応用物理学関係連合講演会、17pC1-3、早稲田大学、3月15日-3月18日、2012
 28. 佐藤友博、藤田実樹、北田剛、堀越佳治
“MEE 法による GaAs 基板上 CuGaSe₂ 薄膜の界面特性”
第72回応用物理学会学術講演会、30aH-7、山形大学、8月29日-9月2日、2011
 29. 河原塚篤、西永慈郎、堀越佳治
“AlGaAs/GaAs 超格子太陽電池の吸収効率の評価”
第72回応用物理学会学術講演会、31pH-12、山形大学、8月29日-9月2日、2011
 30. 西永慈郎、河原塚篤、小野満恒二、クラウド・ブローク、堀越佳治
“励起子吸収を利用した AlGaAs / GaAs 超格子太陽電池”
第72回応用物理学会学術講演会、31pH-11、山形大学、8月29日-9月2日、2011
 31. 正直花奈子、花田貴、島田貴章、劉玉懷、片山竜二、松岡隆志
“m 面 GaN 基板上 InGaN 薄膜 In 濃度の基板傾斜角依存性”
第4回窒化物半導体の高品質結晶成長とその素子応用 (東北大学、2011.1.17-18)
 32. J. H. Choi, R. Katayama, T. Hanada, Y. H. Liu, and T. Matsuoka
“Comparisons of Optical Properties between Polar and Non-polar InGaN/GaN Multiple-quantum-well Light-emitting-diodes”
第4回窒化物半導体の高品質結晶成長とその素子応用 (東北大学、2011.1.17-18)
 33. 金延坤、亀井靖人、木村篤人、蓮池紀幸、木曾田賢治、播磨弘、劉玉懷、松岡隆志
“ラマン散乱による PR-MOVPE 成長 InN 膜質評価(II)”
第58回応用物理学関係連合講演会 25a-BY-8 (神奈川、2011.3.24-27)
 34. 岩渕拓也、劉玉懷、木村健司、張源涛、K. Prasertsuk、片山竜二、松岡隆志
“加圧型 MOVPE 法による InN の転位密度における相純度の影響”
第121回東北大学金属材料研究所講演会 P-77 (2011.5.24-25)
 35. 正直花奈子、花田貴、島田貴章、劉玉懷、片山竜二、松岡隆志

- “m 面 GaN 基板上 InGaN 薄膜の In 濃度の基板傾斜角依存性”
第 121 回東北大学金属材料研究所講演会 P-82 (2011.5.24-25)
36. 花田貴, 劉玉懷, 張源涛, 木村健司, K. Prasertsuk, 片山竜二, 松岡隆志
“InN の X 線回折強度の温度因子の測定とバンドギャップ温度依存性に関する考察”
第 5 回窒化物半導体の高品質結晶成長とその素子応用 (東北大学, 2011.8.8-9)
37. 正直花奈子, 花田貴, 島田貴章, 劉玉懷, 片山竜二, 松岡隆志
“MOVPE 成長 InGaN/m-GaN におけるチルトドメインと In 濃度”
第 72 回応用物理学学会学術講演会講演会 31p-ZE-14 (山形大学, 2011.8.29 -9.2)
38. 岩渕拓也, 平田雅貴, 木村健司, 劉玉懷, 張源涛, プラスラットスック キャッティウツト, 片山竜二, 松岡隆志
“加圧型 MOVPE 成長 InN の転位密度と相純度の成長圧力依存性”
第 72 回応用物理学学会学術講演会講演会 30a-ZE-10 (山形大学, 2011.8.29 -9.2)
39. 岩渕拓也, 松村博史, 木村健司, 張源涛, キャッティウツト プラスラットスック, 劉玉懷, 片山竜二, 松岡隆志
“加圧型 MOVPE 成長 InN 薄膜における準安定相混在の EBSD による評価”
第 59 回応用物理学学会関係連合講演会予稿集, 17a-B10-8 (早稲田大学, 2012.3.15-18)
40. 河原塚篤, 小野満恒二, 堀越佳治
“X 電子伝導を用いた $\text{Al}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}/\text{Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$ 超格子太陽電池”
第 73 回応用物理学学会学術講演会, 愛媛・松山大学, 9 月 11 日-9 月 14 日, 2012
41. Sathibama Thiru, 佐藤友博, 藤田実樹, 堀越佳治
“MEE 成長による CuGaSe_2 のドーピング特性”
第 73 回応用物理学学会学術講演会, 愛媛・松山大学, 9 月 11 日-9 月 14 日, 2012
42. マレーネ・ツァンダー, 西永慈郎, 後藤秀樹, 堀越佳治
“GaAs 微細構造上に選択成長した InAs ナノ構造の特性”
第 73 回応用物理学学会学術講演会, 愛媛大学, 9 月 11 日-14 日, 2012
43. 西永慈郎, 堀越佳治
“フラーレン添加 GaAs 薄膜の結晶学的特性”
第 43 回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム, 東北大学, 9 月 5-7 日, 2012
44. Sathibama Thiru, 佐藤友博, 佐藤知嵩, 豊田康揮, 藤田実樹, 堀越佳治
“GaAs(001)上に成長した CuGaSe_2 単結晶薄膜のフォトルミネセンス”
第 60 回応用物理学関係連合講演会, 神奈川工科大学, 3 月 27 日-30 日, 2013
45. 河原塚篤, 堀越佳治
“X 電子伝導を用いた AlGaInSb 混晶太陽電池”
第 60 回応用物理学関係連合講演会, 神奈川工科大学, 3 月 27 日-30 日, 2013
46. 西永慈郎, 堀越佳治
“フラーレン添加 GaAs pin ダイオードの電気的特性”
第 60 回応用物理学関係連合講演会, 神奈川工科大学, 3 月 27 日-30 日, 2013
47. 花田貴, 崔正焄, 正直花奈子, 今井康彦, 木村 滋, 島田貴章, 片山竜二, 松岡隆志
“マイクロファセットができた m 面 InGaN 薄膜の In 濃度分布観察”
プレ IWN2012, FR-22, 東京大学, 4 月 4 日-8 日, 2012
48. 松岡隆志
“Current Status of InN Growth by Pressurized-Reactor MOVPE”
第 73 回応用物理学学会学術講演会, 愛媛大学, 9 月 11 日-14 日, 2012
49. 小林健悟, 吉田智洋, 尾辻泰一, 片山竜二, 松岡隆志, 末光哲也
“AlGaIn/GaN MIS ゲート HEMT 形成における H_2 アニールの効果”
第 73 回応用物理学学会学術講演会, 愛媛大学, 9 月 11 日-14 日, 2012
50. 花田貴, 正直花奈子, 島田貴章, 崔正焄, 今井康彦, 木村 滋, 坂田修身, 劉玉懷, 片山竜二, 松岡隆志
“マイクロビーム X 線回折による m 面 InGaIn/GaN のミスフィット転位密度分布の観察”

- 第 73 回応用物理学会学術講演会、愛媛大学、9 月 11 日-14 日、2012
51. 谷川智之、片山竜二、松岡隆志、
“(0001)および(000-1)面 GaN 上へ MOVPE 成長した InGaN の結晶品質比較”
第 73 回応用物理学会学術講演会、愛媛大学、9 月 11 日-14 日、2012
 52. 逢坂崇、正直花奈子、岩渕拓也、木村健司、谷川智之、花田貴、片山竜二、松岡隆志
“MOVPE 成長(000-1) GaN のステップフロー成長の促進”
第 67 回応用物理学会東北支部学術講演会、東北大学、12 月 6 日-7 日、2012
 53. 正直花奈子、崔正焄、進藤裕文、木村健司、谷川智之、花田貴、片山竜二、松岡隆志
“MOVPE 成長 N 極性 InGaN における In 組成の c 面サファイア基板微傾斜角依存性”
第 67 回応用物理学会東北支部学術講演会、東北大学、12 月 6 日-7 日、2012
 54. 吉野川伸雄、岩渕拓也、正直花奈子、木村健司、谷川智之、片山竜二、松岡隆志
“サファイア基板上 GaN 薄膜の有機金属気相成長初期過程における表面モフォロジーの格子極性依存性”
第 67 回応用物理学会東北支部学術講演会、東北大学、12 月 6 日-7 日、2012
 55. 谷川智之、正直花奈子、崔正焄、片山竜二、松岡隆志
“(0001)面、(000-1)面 GaN 上へ MOVPE 成長した InGaN の表面モフォロジーと In 取り込み”
第 67 回応用物理学会東北支部学術講演会、東北大学、12 月 6 日-7 日、2012
 56. 正直花奈子、崔正焄、進藤裕文、木村健司、谷川智之、花田貴、片山竜二、松岡隆志
“MOVPE 成長 N 極性 InGaN における In 組成の c 面サファイア基板微傾斜角依存性”
第 60 回応用物理学関係連合講演会、神奈川工科大学、3 月 27 日-30 日、2013
 57. 逢坂崇、谷川智之、正直花奈子、木村健司、岩渕拓也、花田貴、片山竜二、松岡隆志
“In サーファクタントによる(0001)GaIn の MOVPE 成長におけるステップフロー成長の促進”
第 60 回応用物理学関係連合講演会、神奈川工科大学、3 月 27 日-30 日、2013
 58. Sathibama Thiru、佐藤知嵩、豊田康揮、藤田実樹、堀越佳治
“GaAs(001)上に成長した CuGaSe₂:Zn 単結晶薄膜のフォトルミネセンス”
第 74 回応用物理学会秋季学術講演会、同志社大学、9 月 16 日-20 日、2013
 59. 河原塚篤、西永慈郎、堀越佳治
“太陽電池の特性値を用いた再結合電流の評価”
第 61 回応用物理学会春季学術講演会、青山学院大学、3 月 17 日-20 日、2014
 60. Sathibama Thiru、佐藤知嵩、豊田康揮、河原塚篤、堀越佳治
“GaAs(001)上に成長した CuGaSe₂ 薄膜の RHEED 観察と光学特性”
第 61 回応用物理学会春季学術講演会、青山学院大学、3 月 17 日-20 日、2014
 61. 正直花奈子、崔正焄、岩渕拓也、宇佐美徳隆、谷川智之、窪谷茂幸、花田貴、片山竜二、松岡隆志
“MOVPE 成長 - c 面 InGaIn/GaN 多重量子井戸構造における準安定相混在の抑制”
第 61 回応用物理学会春季学術講演会、青山学院大学、3 月 17 日-20 日、2014
 62. 岩渕拓也、窪谷茂幸、谷川智之、花田貴、片山竜二、湊明朗、福田承生、松岡隆志
“ScAlMgO₄ 基板上における GaN の MOVPE 成長”
第 61 回応用物理学会春季学術講演会、青山学院大学、3 月 17 日-20 日、2014
 63. 花田貴、岩渕拓也、窪谷茂幸、谷川智之、片山竜二、湊明朗、福田承生、松岡隆志
“c 面 ScAlMgO₄ 基板上に MOVPE 成長した GaN の異常分散 X 線回折による極性判定”
第 61 回応用物理学会春季学術講演会、青山学院大学、3 月 17 日-20 日、2014
 64. 花田貴、稲葉克彦、正直花奈子、崔正焄、窪谷茂幸、谷川智之、片山竜二、松岡隆志
“c 面 Al₂O₃ 基板上に MOVPE 成長した GaN の異常分散 X 線回折による極性判定”
第 61 回応用物理学会春季学術講演会、青山学院大学、3 月 17 日-20 日、2014
 65. 河原塚篤、堀越佳治
GaAs(111)B 面上の Ga の挙動
第 75 回応用物理学会秋季学術講演会、北海道大学、9 月 17 日-20 日、2014 年

〈国際〉

1. Y. H. Liu, S. Y. Ji, K. Hobo, T. Kimura, M. Hirata, Y. T. Zhang, T. Shimada, and T. Matsuoka
"Effects of Substrate Misorientation on InGaN Grown on M-plane GaN"
Intern. Conf. Nitride Semicond. (ICNS-8), II6, (Jeju, Korea, Oct. 18-23, 2009)
2. Y. H. Liu, Y. T. Zhang, T. Kimura, S. Y. Ji, and T. Matsuoka,
"The Mechanism of InN Growth by MOVPE"
2009 Asian Core Workshop on Wide Bandgap Semiconds. in Korea, SI-1, (Gyeongju, Korea, Oct. 23-24, 2009)
3. C. H. Hsiao, T. Takeuchi, Y. Horikoshi, M. Yoshikawa, B. Thanawat, and S. J. Chang
"Cu-doped ZnO films deposited by RF magnetron sputtering on ITO glass"
37th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS 2010), Kagawa, May 31-June 4, 2010
4. K. Shojiki, T. Hanada, T. Shimada, Y. H. Liu, R. Katayama, and T. Matsuoka
"Tilted Domain and Indium Content of MOVPE-grown InGaN Layer on m-plane GaN Substrate"
2011 Intern. Conf. Solid State Devices and Mat. (SSDM 2011), M-1-2 (Nagoya, Japan, Sept. 28-30, 2011)
5. T. Iwabuchi, Y. H. Liu, T. Kimura, Y. T. Zhang, K. Prasertsuk, R. Katayama, and T. Matsuoka
"Effect of Phase Purity on Dislocation Density of PR-MOVPE-Grown InN"
2011 Intern. Conf. Solid State Devices and Mat. (SSDM 2011), M-1-3 (Nagoya, Japan, Sept. 28-30, 2011)
6. T. Iwabuchi, Y. H. Liu, T. Kimura, Y. T. Zhang, K. Prasertsuk, R. Katayama, and T. Matsuoka
"Effect of Phase Purity on Dislocation Density of PR-MOVPE-Grown InN"
1st IMR & KMU Joint Workshop, (Busan, Korea, Feb. 20, 2012).
7. K. Shojiki, T. Hanada, T. Shimada, Y. H. Liu, R. Katayama, and T. Matsuoka
"Tilted Domain and Indium Content of MOVPE-grown InGaN Layer on m-plane GaN Substrate"
1st IMR & KMU Joint Workshop (Busan, Korea, Feb. 20, 2012)
8. T. Matsuoka, T. Kimura, K. Prasertsuk, Y. T. Zhang, T. Iwabuchi, and R. Katayama
"Recent progress in InN research"
1st IMR & KMU Joint Workshop, (Busan, Korea, Feb. 20, 2012)
9. A. Kawaharazuka, K. Onomitsu, and Y. Horikoshi
"GaAs/AlAs Superlattice Solar-Cell with X-Electron Conduction"
39th International Symposium on Compound Semiconductors, Santa Barbara, CA, USA, August 27-30, 2012
10. A. Kawaharazuka, M. Fujita, and Y. Horikoshi,
"Absorption efficiency of CuGaSe₂/CuInSe₂ superlattice"
The 17th international conference on molecular beam epitaxy, Nara, Japan, 23-28 Sept., 2012
11. M. Zander, J. Nishinaga, and Y. Horikoshi
"Selective area growth of InAs nanostructures on faceted GaAs microstructures by migration enhanced epitaxy"
The 17th international conference on molecular beam epitaxy, Nara, Japan, 23-28 Sept., 2012
12. J. H. Choi, K. Shojiki, T. Tanikawa, T. Hanada, R. Katayama, and T. Matsuoka
"Effect of Sapphire Nitridation and Group-III Source Flow Rate Ratio on In-incorporation into InGaN Grown by MOVPE"
2012 International Conference on Nano Science and Nano Technology (ICNST 2012), S01_1038 (Korea, Nov. 8-9, 2012)
13. T. Tanikawa, T. Aisaka, T. Kimura, T. Iwabuchi, K. Shojiki, R. Katayama, T. Hanada, and T. Matsuoka
"Improvement of surface morphology in (000-1) GaN/Sapphire grown by MOVPE with indium surfactant"
Conference on LED and its industrial application '13 (LEDIA '13), LED4-2 (Yokohama, Japan, April 23-25 2013)
14. J. Nishinaga, A. Kawaharazuka, K. Onomitsu, K. Ploog, and Y. Horikoshi

- “Excitonic absorption on AlGaAs/GaAs superlattice solar cells”
40th International Symposium on Compound Semiconductors, Kobe, Japan, May 19-23, 2013
15. T. Aisaka, T. Tanikawa, T. Kimura, T. Iwabuchi, K. Shojiki, R. Katayama, T. Hanada, and T. Matsuoka
"Improvement of Surface Morphology in (000-1) GaN/Sapphire Grown by MOVPE with Indium Surfactant"
Intern. Symp. Comp. Semcond. (ISCS2013), MoB3-6 (Kobe, Japan, May 19-23 2013)
 16. T. Tanikawa, T. Aisaka, S. Kuboya, T. Hanada, R. Katayama, and T. Matsuoka
"Influence of Mg-Doping on the Surface Morphology of (000-1) GaN/Sapphire Grown by Metalorganic Vapor Phase Epitaxy"
10th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-10), AP2.66 (Washington DC, USA, August. 25-30, 2013)
 17. T. Kimura, K. Prasertsuk, Y. Zhang, T. Iwabuchi, Y. Liu, R. Katayama, and T. Matsuoka
"Effect of Reactor Pressure on Rate-determining Process in InN Growth"
2013 JSAP-MRS Joint Symposia, 18p-M6-5 (Kyoto, Japan, Sept. 16-20, 2013)
 18. M. Fujita, T. Kitada, M. Kondoh, A. Kawarazuka, Y. Horikoshi
“Si/SiO_x Superlattice Growth by Molecular Beam Epitaxy”
30th North American Molecular Beam Epitaxy Conference, Banff, Canada, Oct. 5-11, 2013
 19. J. Yoo, J. Chang, J. Lee, S. Choi, S. Lee, H. Lee, S. Kim, and T. Matsuoka
"Reduction of Impurity Out-diffusion during HVPE Growth of GaN on ZnO by using ZnAl₂O₄ Interlayer"
The 5th International Symposium on Advanced Ceramics (ISAC-5), D10-13 (Wuhan, China, Dec. 10-13, 2013)
 20. V. Suresh Kumar, S.Y. Ji, J.G. Kim, H. Harima, J.H. Choi, Y.T. Zhang, R. Katayama, and T. Matsuoka
"Raman scattering studies and UV optical absorption spectrum of MOVPE grown InGa_N epilayers"
International Union of Materials Research Societies - International Conference in Asia - 2013 (IUMRS-ICA-2013), ABS-924-ICA (Bangalore, India, Dec. 16-20, 2013)
 21. K. Shojiki, J. H. Choi, T. Iwabuchi, N. Usami, T. Tanikawa, S. Kuboya, T. Hanada, R. Katayama, and T. Matsuoka
"Suppression of Metastable-Phase Inclusion in MOVPE-Grown N-Polar (000-1) InGa_N/Ga_N Multiple Quantum Wells"
Conference on LED and Its Industrial Application (LEDIA '14), LED4-15 (Yokohama, Japan, April 22-24, 2014)
 22. T. Tanikawa, J. H. Choi, K. Shojiki, S. Kuboya, R. Katayama, and T. Matsuoka
"Realization of p-Type Conduction in Mg-Doped N-Polar (000-1) Ga_N Grown by Metalorganic Vapor Phase Epitaxy"
Conference on LED and Its Industrial Application (LEDIA '14), LED4-10 (Yokohama, Japan, April 22-24, 2014)
 23. S. Thiru, A. Kawarazuka, and Y. Horikoshi
“Optical and Electrical properties of CuInSe₂/(CuGaSe₂:Ge) Superlattice grown on GaAs(001)”
The 41st International Symposium on Compound Semiconductor, Montpellier, France (May 2014)
 24. K. Shojiki, J.H. Choi, T. Tanikawa, S. Kuboya, T. Hanada, R. Katayama, and T. Matsuoka
"Emission Wavelength Extension of Light Emitting Diode Using MOVPE-Grown N-Polar (000-1) InGa_N"
International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN2014), MoOO5 (Wroclaw, Poland, August 24-29, 2014)
 25. T. Iwabuchi, S. Kuboya, T. Tanikawa, R. Katayama, T. Hanada, A. Minato, T. Fukuda, and T. Matsuoka
"MOVPE Growth of GaN on ScAlMgO₄ Substrate"
International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN2014), ThGO4 (Wroclaw, Poland, August 24-29, 2014)

26. H. Urabe, M. Kuramoto, T. Nakano, A. Kawaharazuka, T. Makimoto, and Y. Horikoshi
“Effects of surface barrier layer in AlGaAs/GaAs solar cells”
18th International Conference on Molecular Beam Epitaxy, Flagstaff, Arizona, Sep. 7-12, 2014

ポスター発表 (国内会議 24 件、国際会議 63 件)

〈国内〉

1. 藤田実樹、近藤稔、北田剛、河原塚篤、堀越佳治
“MBE 法を用いた Si/SiO₂ 超格子構造の作製”
第 73 回応用物理学学会学術講演会、愛媛・松山大学、9 月 11 日-9 月 14 日、2012
2. 西永慈郎、堀越佳治
“フラーレン添加 GaAs 薄膜の光学的特性”
第 73 回応用物理学学会学術講演会、愛媛・松山大学、9 月 11 日-14 日、2012
3. 西永慈郎、堀越佳治
“フラーレン・GaAs ヘテロ構造の結晶成長と物性評価”
第 1 回結晶工学未来塾、学習院大学、11 月 8 日、2012
4. 藤田実樹、北田剛、近藤稔、河原塚篤、堀越佳治
“MBE 法により成長した SiO_x 膜の電気的特性”
第 60 回応用物理学関係連合講演会、神奈川工科大学、3 月 27 日-30 日、2013
5. 竹内登志男、河原塚篤、藤田実樹、井上智晴、堀越佳治
“Magnetron sputter 法で作製した Si/SiO₂ 薄膜の基礎特性”
第 60 回応用物理学関係連合講演会、神奈川工科大学、3 月 27 日-30 日、2013
6. 吉野川伸雄、岩渕拓也、正直花奈子、木村健司、谷川智之、片山竜二、松岡隆志
“サファイア基板上 GaN 薄膜の MOVPE 成長挙動の格子極性依存性”
第 60 回応用物理学春季学術講演会、神奈川工科大学、3 月 27 日-30 日、2013
7. 花田貴、島田貴章、田尻寛男、坂田修身、劉玉懷、松岡隆志
“X 線異常分散を用いた m 面 GaN の面内極性判定”
第 60 回応用物理学春季学術講演会、神奈川工科大学、3 月 27 日-30 日、2013
8. J. Nishinaga and Y. Horikoshi
“Crystalline and electrical characteristics of C60 doped GaAs layers”
第 32 回電子材料シンポジウム、滋賀、7 月 10 日-12 日、2013
9. K. Shojiki, T. Hanada, J. H. Choi, Y. Imai, S. Kimura, T. Shimada, T. Tanikawa, R. Katayama, and T. Matsuoka
“Observation of Phase Separation on m-plane InGaN Films with Micro-vicinal surface by Micro-beam XRD”
第 32 回電子材料シンポジウム、滋賀、7 月 10 日-12 日、2013
10. T. Aisaka, T. Tanikawa, T. Kimura, T. Iwabuchi, K. Shojiki, R. Katayama, T. Hanada, and T. Matsuoka
“Effect of indium surfactant on MOVPE growth of N-polar GaN”
第 32 回電子材料シンポジウム、滋賀、7 月 10 日-12 日、2013
11. N. Yoshinogawa, T. Iwabuchi, K. Shojiki, T. Kimura, T. Tanikawa, R. Katayama, and T. Matsuoka
“Crystallographic Polarity Dependence of Surface Morphology Evolution during MOVPE Growth of GaN/Sapphire”
第 32 回電子材料シンポジウム、滋賀、7 月 10 日-12 日、2013
12. 正直花奈子、花田貴、崔正焄、島田貴章、今井康彦、木村滋、谷川智、片山竜二、松岡隆志
“ヒロック形成にともなう m 面 InGaN 薄膜の In 組成分布観察”
第 74 回応用物理学秋季学術講演会、同志社大学、9 月 16 日-20 日、2013
13. 西永慈郎、河原塚篤、小野満恒二、K.H. Ploog、堀越佳治
“AlGaAs/GaAs 超格子太陽電池における励起子吸収”

- 第74回応用物理学会秋季学術講演会、同志社大学、9月16日-20日、2013
14. 西永慈郎、堀越佳治
“フラーレン添加 GaAs ダイオードの接合容量について”
第74回応用物理学会秋季学術講演会、同志社大学、9月16日-20日、2013
 15. 倉本真、中野朋洋、浦部宏之、堀越佳治、河原塚篤、西永慈郎
“AlGaAs/GaAs 超格子太陽電池における励起子閉じ込め効果”
第61回応用物理学会春季学術講演会、青山学院大学、3月17日-20日、2014
 16. 西永慈郎、河原塚篤、堀越佳治
“高温時における AlGaAs/GaAs 超格子太陽電池の I-V 特性”
第61回応用物理学会春季学術講演会、青山学院大学、3月17日-20日、2014
 17. 西永慈郎、堀越佳治
“C60 doped GaAs ダイオードの容量電圧特性”
第61回応用物理学会春季学術講演会、青山学院大学、3月17日-20日、2014
 18. 近藤稔、竹内登志男、河原塚篤、堀越佳治
“アモルファス Si/SiO₂ 薄膜の熱アニール効果”
第61回応用物理学会春季学術講演会、青山学院大学、3月17日-20日、2014
 19. 浦部宏之、倉本真、中野朋洋、河原塚篤、牧本俊樹、堀越佳治
“AlGaAs/GaAs 太陽電池における表面再結合制御”
第75回応用物理学会秋季学術講演会、北海道大学、9月17-20日、2014
 20. 倉本真、浦部宏之、中野朋洋、河原塚篤、西永慈郎、牧本俊樹、堀越佳治
“Al_xGa_{1-x}As/GaAs 超格子太陽電池における障壁層厚さの効果”
第75回応用物理学会秋季学術講演会、北海道大学、9月17-20日、2014
 21. 中野朋洋、浦部宏之、倉本真、河原塚篤、西永慈郎、小野満恒二、牧本俊樹、堀越佳治
“AlGaAs/GaAs 超格子 pin 接合における発光特性の検討”
第75回応用物理学会秋季学術講演会、北海道大学、9月17-20日、2014
 22. 谷口龍希、サティアバマ ティル、堀越佳治、牧本俊樹
“MEE 法を用いた GaAs (001)基板上への CIS-CGS 低温成長”
第75回応用物理学会秋季学術講演会、北海道大学、9月17-20日、2014
 23. 正直花奈子、崔正焄、谷川智之、窪谷茂幸、花田貴、片山竜二、松岡隆志
“サファイア基板上 MOVPE 成長 N 極性面(000-1)InGaN を用いた赤・緑・青色発光ダイオードの作製”
第75回応用物理学会秋季学術講演会、北海道大学、9月17-20日、2014
 24. 谷川智之、片山竜二、正直花奈子、窪谷茂幸、松岡隆志、本田善央、天野浩
“変調分光法による InGaN/GaN LED の内部電界の観測”
第75回応用物理学会秋季学術講演会、北海道大学、9月17-20日、2014

〈国際〉

1. Y. H. Liu, Y. T. Zhang, T. Kimura, S. Y. Ji, and T. Matsuoka
"Growth of InN by Pressurized Reactor MOVPE: Morphology Evolution"
Intern. Conf. Nitride Semicond. (ICNS-8), ThP23, (Jeju, Korea, Oct. 18-23, 2009)
2. S. Y. Ji, K. Hobo, Y. H. Liu, Y. T. Zhang, V. Suresh Kumar, and T. Matsuoka
"MOVPE Growth of GaN on Novel Substrate ZnO"
Intern. Conf. Nitride Semicond. (ICNS-8), MP33, (Jeju, Korea, Oct. 18-23, 2009)
3. T. Kimura and T. Matsuoka
"Band Gap of Miscible InGaAlBN as a Novel Materials for Optical Communications System"
2009 Asian Core Workshop on Wide Bandgap Semiconds. in Korea, SIV-2, (Gyeongju, Korea, Oct. 23-24, 2009)
4. S. Y. Ji, Y. H. Liu, V. Suresh Kumar, Y. T. Zhang, T. Kimura, and T. Matsuoka
"MOVPE Growth of InGaAlN Layer for High Brightness LEDs"
2009 Asian Core Workshop on Wide Bandgap Semiconds. in Korea, SIV-1, (Gyeongju, Korea,

- Oct. 23-24, 2009)
5. M. Hirata, Y. H. Liu, Y. T. Zhang, T. Kimura, K. Prasertsuk, R. Katayama, and T. Matsuoka
"Evaluation of Carrier Density of Pressurized-MOVPE Grown InN by using FTIR Spectroscopy"
2009 Asian Core Workshop on Wide Bandgap Semiconductors in Korea, SIII-4, (Gyeongju, Korea, Oct. 23-24, 2009)
 6. Y. H. Liu, T. Kimura, Y. T. Zhang, M. Hirata, K. Prasertusk, R. Katayama, and T. Matsuoka
"Growth of InN by Pressurized-Reactor Metalorganic Vapor Phase Epitaxy (1) ~ The Growth Mechanisms ~"
6th International Symposium on Medical, Bio- and Nano-Electronics, Sendai, February 24-25, 2010
 7. T. Kimura, Y. H. Liu, Y. T. Zhang, M. Hirata, K. Prasertusk, R. Katayama, and T. Matsuoka
"Growth of InN by Pressurized-Reactor Metalorganic Vapor Phase Epitaxy (2) ~ Towards the Dense Films under High-Temperature Growth ~"
6th International Symposium on Medical, Bio- and Nano-Electronics, Sendai, February 24-25, 2010
 8. Y. T. Zhang, Y. H. Liu, T. Kimura, M. Hirata, K. Prasertusk, R. Katayama, and T. Matsuoka
"Growth of InN by Pressurized-Reactor Metalorganic Vapor Phase Epitaxy (3) ~ Temperature Dependence on Structure Properties ~"
6th International Symposium on Medical, Bio- and Nano-Electronics, Sendai, February 24-25, 2010
 9. M. Hirata, Y. H. Liu, Y. T. Zhang, T. Kimura, K. Prasertusk, R. Katayama, and T. Matsuoka
"Growth of InN by Pressurized-Reactor Metalorganic Vapor Phase Epitaxy (4) ~ Optical and Electrical Properties ~"
6th International Symposium on Medical, Bio- and Nano-Electronics, Sendai, February 24-25, 2010
 10. S. Y. Ji, V. Suresh Kumar, Y. H. Liu, Y. T. Zhang, T. Kimura, K. Hobo, and T. Matsuoka
"Progresses in GaN Growth on ZnO Substrate"
5th Intern. Symp. Medical, Bio- and Nano-Electronics, Sendai, Feb. 24-25, 2010
 11. V. Suresh Kumar, S. Y. Ji, K. Hobo, Y. H. Liu, H. Shindo, and T. Matsuoka
"Influence of V/III ratio on surface morphologies and optical properties of MOVPE-grown InGaN epitaxial layers"
5th Intern. Symp. Medical, Bio- and Nano-Electronics, Sendai, Feb. 24-25, 2010
 12. Y. Komatsuzaki, K. Higashi, T. Kyougoku, K. Onomitsu, and Y. Horikoshi
"Negative differential resistance characteristics of nanoscale in-plane gate devices"
37th International Symposium on Compound Semiconductor, Kagawa, Japan, May 31 - June 4, 2010.
 13. C.H. Hsiao, T. Takeuchi, Y. Horikoshi, S.J. Chang, M. Yoshikawa, B. Thanawat, S.H.Chih, B.W. Lan, and T.P. Chen
"Growth and characterization of Cu-doped ZnO films deposited by RF magnetron sputtering method on glass substrate"
37th International Symposium on Compound Semiconductor, Kagawa, Japan, May 31 - June 4, 2010
 14. Y. T. Zhang, Y. H. Liu, T. Kimura, M. Hirata, K. Prasertsuk, R. Katayama, and T. Matsuoka
"Effect of Growth Temperature on Structure Properties of InN Grown by Pressurized-Reactor Metalorganic Vapor Phase Epitaxy"
Intern. Symp. Comp. Semiconds. (ISCS2010), FrP68 (Takamatsu, Jun. 1-4, 2010)
 15. T. Kimura, Y. H. Liu, M. Hirata, Y. T. Zhang, K. Prasertsuk, R. Katayama, and T. Matsuoka
"Electrical Properties of InN Films Grown by Pressurized-Reactor Metalorganic Vapor Phase Epitaxy"
Intern. Symp. Comp. Semiconds. (ISCS2010), FrP69 (Takamatsu, Jun. 1-4, 2010)
 16. T. Hanada, T. Shimada, S. Y. Ji, K. Hobo, Y. H. Liu and T. Matsuoka
"Strain Relaxation Mechanism of InGaN Thin Film Grown on m-GaN"
Intern. Symp. Comp. Semiconds. (ISCS2010), FrP71, (Takamatsu, Jun. 1-4, 2010)
 17. T. Takeuchi, M. Yoshikawa, B. Tanawat, J. Nishinaga, A. Kawaharazuka, and Y. Horikoshi
"Vacuum annealing effects to mosaicity of zinc oxide films deposited by radio frequency

- magnetron sputtering method”
4th International Meeting on Developments in Materials, Processes and Applications of Emerging Technologies, Braga, Portugal, 28-30 July, 2010
18. T. Takeuchi, B. Tanawat, M. Yoshikawa, J. Nishinaga, A. Kawaharazuka, and Y. Horikoshi
“Photoluminescence analysis of Cu-doped zinc oxide films deposited by radio frequency magnetron sputtering method”
4th International Meeting on Developments in Materials, Processes and Applications of Emerging Technologies, Braga, Portugal, 28-30 July, 2010
 19. M. Zander, J. Nishinaga, Y. Horikoshi
“Area-selective epitaxy of InAs by migration enhanced epitaxy (MEE)”
16th International Conference on Molecular Beam Epitaxy, Berlin, Germany, August 22 – 27, 2010
 20. A. Kawaharazuka, K. Onomitsu, J. Nishinaga, and Y. Horikoshi
“Effect of excitons on the absorption in solar-cell with AlGaAs/GaAs superlattice grown by molecular beam epitaxy”
16th International Conference on Molecular Beam Epitaxy, Berlin, Germany, August 22 – 27, 2010
 21. Y. H. Liu, T. Kimura, Y. Zhang, K. Prasertsuk, T. Hanada, R. Katayama, and T. Matsuoka,
"Temperature Dependence of Bandgap Energy of InN Grown by Pressurized Reactor MOVPE",
6th International Workshop on Nitride semiconductors (IWN2010), CP1.28 (Tampa, USA, Sept.17-25, 2010)
 22. T. Kimura, Y. Liu, Y. Zhang, K. Prasertsuk, J. G. Kim, N. Hasuike, H. Harima, R. Katayama, and T. Matsuoka
"Growth Temperature Dependence of Phase Purity in InN Grown by Pressurized MOVPE"
6th International Workshop on Nitride semiconductors (IWN2010), AP1.49 (Tampa, USA, Sept.17-25, 2010)
 23. Y. T. Zhang, Y. H. Liu, T. Kimura, M. Hirata, K. Prasertusk, R. Katayama, and T. Matsuoka
"Step-Flow Growth of InN by Pressurized-Reactor Metalorganic Vapor Phase Epitaxy", 6th International Workshop on Nitride semiconductors (IWN2010), AP1.21(Tampa, USA, Sept.17-25, 2010)
 24. J. H. Choi, Y. H. Liu, R. Katayama, T. Hanada, and T. Matsuoka
"Comparison of optical properties between polar and non-polar InGaN/GaN multi-quantum-well light-emitting-diodes"
Kinken-Wakate 2010, 7th materials Science School for Young Scientists "Challenge of radiation for advanced materials science", (Sendai, Dec. 2-3, 2010)
 25. T. Kimura, Y. H. Liu, R. Katayama, Y. T. Zhang, K. prasertusk, J. G. Kim, N. Hasuike, H. Harima, R. Katayama, and T. Matsuoka
"Growth temperature dependence of phase purity in InN grown by pressurized MOVPE"
Kinken-Wakate 2010, 7th materials Science School for Young Scientists "Challenge of radiation for advanced materials science", (Sendai, Dec. 2-3, 2010)
 26. J. Nishinaga, A. Kawaharazuka, K. Onomitsu, K. H. Ploog, and Y. Horikoshi
“Excitonic absorption on AlGaAs/GaAs superlattice solar cells”
38th International Symposium on Compound Semiconductor, Berlin, Germany, May 22-26, 2011
 27. M. Zander, J. Nishinaga, K. Iga, and Y. Horikoshi
”Structural properties of InAs-based nanostructures on GaAs(001) and GaAs(111)A grown by area selective epitaxy”
38th International Symposium on Compound Semiconductor, Berlin, Germany, May 22-26, 2011
 28. T. Kimura, K. Prasertsuk, Y. T. Zhang, Y. H. Liu, R. Katayama, and T. Matsuoka
"Phase Diagram on Phase Purity of InN grown Pressurized-Reactor MOVPE"
9th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-9), PD3.17 (Glasgow, UK, July 10-15, 2011)
 29. T. Hanada, Y. H. Liu, Y. T. Zhang, H. Tajiri, O. Sakata, T. Kimura, K. Prasertsuk, R. Katayama, and T. Matsuoka

- "Temperature-Dependent Static Correlation Functions of Vibrational Atomic Displacements for InN Film Measured by X-ray Diffraction"
9th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-9), PD3.31 (Glasgow, UK, July 10-15, 2011)
30. K. Prasertsuk, Y. H. Liu, T. Kimura, Y. T. Zhang, T. Iwabuchi, R. Katayama, and T. Matsuoka
"Relationship between Residual Carrier Density and Phase Purity in InN Grown by Pressurized-Reactor MOVPE"
9th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-9), PD3.36 (Glasgow, UK, July 10-15, 2011)
 31. J. Nishinaga and Y. Horikoshi
"Electrical properties of C₆₀ and Si codoped GaAs layers"
28th North American Molecular Beam Epitaxy, San Diego, USA, August 14-17, 2011
 32. M. Fujita, T. Sato, T. Kitada, and Y. Horikoshi
"Successful growth of Cu₂Se-free CuGaSe₂ by Migration-Enhanced Epitaxy"
28th North American Molecular Beam Epitaxy, San Diego, USA, August 14-17, 2011
 33. A. Kawaharazuka, J. Nishinaga, Y. Horikoshi
"Excitonic Effect on the Semiconductor Solar-Cells with AlGaAs/GaAs Superlattices"
21st International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-21), Fukuoka, Japan, November 28-December 2, 2011
 34. K. Shojiki, H. Shindo, S. Y. Ji, V. S. Kumar, J. H. Choi, Y. H. Liu, T. Hanada, R. Katayama, and T. Matsuoka
"Influence of Sapphire Substrate Miscut Angle on Indium Content of MOVPE-grown InGaN Films"
4th Intern. Symp. Growth of III- nitrides (ISGN-4), St. Petersburg, Russia, 17 July, 2012
 35. T. Iwabuchi, H. Matsumura, K. Prasertsuk, T. Kimura, Y. Zhang, Y. Liu, R. Katayama, and T. Matsuoka
"Evaluation of Metastable-Phase Inclusion in PR-MOVPE- Grown InN Films by EBSD"
4th Intern. Symp. Growth of III- nitrides (ISGN-4), St. Petersburg, Russia, 17 July, 2012
 36. J. H. Choi, S. Kumar, K. Shojiki, T. Hanada, R. Katayama, and T. Matsuoka
"Enhancement of In-incorporation into InGaN by Nitridation of Sapphire Substrate in MOVPE"
4th Intern. Symp. Growth of III- nitrides (ISGN-4), St. Petersburg, Russia, 17 July, 2012
 37. M. Fujita, A. Kawaharazuka, and Y. Horikoshi
"Characteristics of CuGaSe₂ layers grown on GaAs substrates"
The 17th international conference on molecular beam epitaxy, Nara, Japan, 23-28 Sept. 2012
 38. J. Nishinaga and Y. Horikoshi
"Electrical characteristics of C₆₀ doped GaAs layers grown by MEE"
The 17th international conference on molecular beam epitaxy, Nara, Japan, 23-28 Sept. 2012
 39. T. Tanikawa, R. Katayama, and T. Matsuoka
"Comparison of Crystalline Quality in InGaN Grown on (0001) and (000-1) GaN/Sapphire by Metalorganic Vapor Phase Epitaxy"
Intern. Workshop Nitride Semicond. (IWN 2012), Sapporo, Japan, Oct. 14-19, 2012
 40. J. Choi, K. Shojiki, T. Shimada, T. Tanikawa, T. Hanada, R. Katayama, T. Matsuoka, Y. Imai, and S. Kimura
"Study of In-composition of InGaN Islands on m-plane GaN Substrate using High-resolution Microbeam XRD"
Intern. Workshop Nitride Semicond. (IWN 2012), Sapporo, Japan, Oct. 14-19, 2012
 41. T. Hanada, K. Shojiki, T. Shimada, J. H. Choi, Y. Imai, S. Kimura, O. Sakata, Y. H. Liu, R. Katayama, and T. Matsuoka
"Observation of Local Misfit-dislocation Density of Partly Relaxed InGaN Film Grown on m-GaN using Microbeam X-ray Diffraction"
Intern. Workshop Nitride Semicond. (IWN 2012), Sapporo, Japan, Oct. 14-19, 2012
 42. T. Aisaka, T. Iwabuchi, T. Kimura, T. Tanikawa, T. Hanada, R. Katayama, and T. Matsuoka
"Enhancement of Step Flow in MOVPE-grown (000-1) GaN"

- Material Science Week 2012 (MSW2012), Sendai, Japan, Nov. 25-Dec. 1, 2012
43. T. Tanikawa, K. Shojiki, J. H. Choi, T. Hanada, R. Katayama, and T. Matsuoka
 "Comparison of indium incorporation in InGaN on (000-1) and (0001) GaN/Sapphire grown by MOVPE"
 Material Science Week 2012 (MSW2012), Sendai, Japan, Nov. 25-Dec. 1, 2012
 44. T. Hanada, K. Shojiki, J. H. Choi, T. Shimada, Y. Imai, S. Kimura, R. Katayama, and T. Matsuoka
 "Anisotropic Distribution of Indium in m-plane InGaN Film Observed by Microbeam X-ray Diffraction"
 Material Science Week 2012 (MSW2012), Sendai, Japan, Nov. 25-Dec. 1, 2012
 45. N. Yoshinogawa, T. Iwabuchi, K. Shojiki, T. Kimura, T. Tanikawa¹, R. Katayama, and T. Matsuoka
 "Crystallographic Polarity Dependence of Surface Morphology Evolution during Metalorganic Vapor Phase Epitaxy of GaN/Sapphire"
 Material Science Week 2012 (MSW2012), (Sendai, Japan, Nov. 25-Dec. 1, 2012)
 46. K. Shojiki, J. H. Choi, H. Shindo, T. Kimura, T. Tanikawa, T. Hanada, R. Katayama, and T. Matsuoka
 "Influence of Substrate Miscut-angle on In-content of InGaN on (0001) Sapphire Grown by MOVPE"
 Material Science Week 2012 (MSW2012), Sendai, Japan, Nov. 25-Dec. 1, 2012
 47. T. Tanikawa, K. Shojiki, J. H. Choi, R. Katayama, and T. Matsuoka
 "Comparison of growth behavior in thick InGaN on (0001) and (000-1) GaN/Sapphire by metalorganic vapor phase epitaxy"
 5th Intern. Symp. Advanced Plasma Science and its Application for Nitrides and Nanomaterials 2012 (ISPlasma2013), Nagoya, Japan, Jan. 28-Feb. 1, 2013
 48. S. Thiru, M. Fujita, A. Kawaharazuka, K. Onomitsu, and Y. Horikoshi
 "Photoluminescence of single crystal thin film chalcopyrite CuGaSe₂ grown on GaAs(001)"
 40th International Symposium on Compound Semiconductors, Kobe, Japan, May 19-23, 2013
 49. M. Zander, J. Nishinaga, H. Gotoh, and Y. Horikoshi
 "Single dot emission from site-controlled InAs quantum dots grown on faceted GaAs microstructures"
 40th International Symposium on Compound Semiconductors, Kobe, Japan, May 19-23, 2013
 50. K. Shojiki, J. H. Choi, T. Iwabuchi, N. Usami, T. Tanikawa, S. Kuboya, T. Hanada, R. Katayama, T. Matsuoka
 "Evaluation and Solution of Metastable-Phase Inclusion in MOVPE-grown -c-plane InGaN/GaN Multiple Quantum Wells"
 10th International Conference on Nitride Semiconductors(ICNS-10), AP1.41 (Washington DC, USA, August. 25-30, 2013)
 51. T. Aisaka, T. Tanikawa, T. Kimura, K. Shojiki, T. Hanada, R. Katayama, and T. Matsuoka
 "Improvement of Surface Morphology of N-polar GaN by Introducing Indium Surfactant during MOVPE Growth"
 2013 JSAP-MRS Joint Symposia, 16p-PM1-15 (Kyoto, Japan, Sept. 16-20, 2013)
 52. T. Hanada, H. Tajiri, O. Sakata, and T. Matsuoka
 "In situ X-ray Diffraction during Reactive Deposition Epitaxy of FeSi₂ on Si(001)"
 2013 JSAP-MRS Joint Symposia, 17p-PM2-3 (Kyoto, Japan, Sept. 16-20, 2013)
 53. K. Shojiki, J. H. Choi, H. Shindo, T. Kimura, T. Tanikawa, T. Hanada, R. Katayama, and T. Matsuoka
 "Effect of c-plane Sapphire Substrate Miscut-angle on Indium Content of MOVPE-grown N-polar InGaN"
 2013 JSAP-MRS Joint Symposia, 16p-PM1-14 (Kyoto, Japan, Sept. 16-20, 2013)
 54. J. Nishinaga and Y. Horikoshi
 "Crystalline and electrical properties of fullerene doped GaAs pin diodes"
 Solid State Devices and Materials (SSDM 2013), Fukuoka, Japan, Sep. 24-27, 2013
 55. J. Nishinaga, A. Kawaharazuka, and Y. Horikoshi
 "Excitonic absorption on AlGaAs/GaAs superlattice solar cells"

- 30th North American Molecular Beam Epitaxy Conference, Banff, Canada, Oct. 5-11, 2013
56. K. Shojiki, J. H. Choi, T. Iwabuchi, N. Usami, T. Tanikawa, S. Kuboya, T. Hanada, R. Katayama, and T. Matsuoka
"Investigation and Suppression of Metastable-phase Inclusion in MOVPE-grown c -plane InGa_N/Ga_N Multiple Quantum Wells", KINKEN-WAKATE 2013 10th Materials Science School for Young Scientists, No. 14 (Sendai Japan, Nov. 21-22, 2013)
 57. J. Nishinaga, A. Kawaharazuka, and Y. Horikoshi
"Excitonic absorption on AlGaAs/GaAs superlattice solar cells"
2013 MRS Fall Meeting, Boston, Massachusetts, USA, Dec. 1-6, 2013
 58. N. Yoshinogawa, T. Iwabuchi, K. Shojiki, T. Kimura, T. Tanikawa, R. Katayama, and T. Matsuoka
"Crystallographic Polarity Dependence of Surface Morphology Evolution during MOVPE Growth of GaN/Sapphire"
8th Intern. Symp. Medical, Bio- and Nano-Electronics, P07 (Sendai, Japan, March 5-7, 2014)
 59. T. Aisaka, T. Tanikawa, T. Kimura, K. Shojiki, T. Iwabuchi, T. Hanada, R. Katayama, and T. Matsuoka
"Effect of indium surfactant on MOVPE growth of N-polar GaN"
8th Intern. Symp. Medical, Bio- and Nano-Electronics, P06 (Sendai, Japan, March 5-7, 2014)
 60. Y. Kangawa, T. Hamada, T. Kimura, R. Katayama, T. Matsuoka, and K. Kakimoto, "Structural Phase Diagram of InN by Pressurized-Reactor MOVPE: A Theoretical Study", 5th Intern. Conf. White LEDs and Solid State Lighting (WLED-5), PS1-4 (Jeju, Korea, June 1-5, 2014).
 61. A. Kawaharazuka, J. Nishinaga, and Y. Horikoshi
"Recombination Current in AlGaAs/GaAs Superlattice Solar-cells Grown by Molecular Beam Epitaxy"
18th International Conference on Molecular Beam Epitaxy, Flagstaff, Arizona, Sep. 7-12, 2014
 62. S. Thiru, A. Kawaharazuka, and Y. Horikoshi
"RHEED Observation and X-ray Diffraction of CuInSe₂/(CuGaSe₂:Ge) Hetero-structure grown on GaAs(001)"
18th International Conference on Molecular Beam Epitaxy, Flagstaff, Arizona, Sep. 7-12, 2014
 63. M. Kuramoto, H. Urabe, T. Nakano, A. Kawaharazuka, J. Nishinaga, T. Makimoto, and Y. Horikoshi
"Optical Properties of Al_xGa_{1-x}As/GaAs Superlattice Solar Cells"
18th International Conference on Molecular Beam Epitaxy, Flagstaff, Arizona, Sep. 7-12, 2014

(4)知財出願

① 国内出願 (5 件)

1. CGS/CIS 超格子太陽電池, 小野満恒二、山口浩司、河原塚篤、藤田実樹、西永滋郎、堀越佳治, 日本電信電話(株)、(学)早稲田大学, 2013 年 03 月 25 日, 特願 2013-061464
2. 太陽電池, 小野満恒二、山口浩司、河原塚篤、藤田実樹、西永滋郎、堀越佳治, 日本電信電話(株)、(学)早稲田大学, 2013 年 03 月 18 日, 特願 2013-054639
3. 太陽電池, 堀越佳治、河原塚篤、小野満恒二、山口浩司, 日本電信電話(株)、(学)早稲田大学, 2012 年 07 月 27 日, 特願 2012-166626
4. 太陽電池, 松岡隆志、片山竜二、谷川智之、2013 年 7 月 3 日, 特願 2013-139463
5. 窒化物薄膜の製造方法, 松岡隆志、劉玉懷、保浦健二、2009 年 10 月 16 日, 特願 2009-239363

② 外出願 (0 件)

③ その他の知的財産権 特になし

(5)受賞・報道等

①受賞(顕著な受賞の前に*を付記してください)

1. 西永慈郎、応用物理学会講演奨励賞、2011年3月15日
2. *西永慈郎、Young Investigator MBE Award、The 17th International Conference on Molecular Beam Epitaxy、2012年9月
3. 西永慈郎、発表奨励賞、応用物理学会結晶工学分科会主催第1回結晶工学未来塾、2012年11月
4. *松岡隆志、応用物理学会フェロー、2014年9月17日。
5. 谷川智之、第6回窒化物半導体結晶成長講演会 研究奨励賞、日本結晶成長学会、2014年7月26日。
6. 正直花奈子(博士1年)、崔正焄(博士3年)、谷川智之、窪谷茂幸、花田貴、片山竜二、松岡隆志、ナノ構造・エピタキシャル成長分科会 2014 春季講演会、2014年7月26日。
7. 谷川智之、正直花奈子(博士1年)、逢坂崇(修士1年)、木村健司、窪谷茂幸、片山竜二、松岡隆志、第126回金属材料研究所講演会 優秀ポスター賞「サイファイア基板上(000-1)GaN の有機金属気相成長における Mg による表面マイグレーションの促進」2013年11月28日。
8. 正直花奈子(博士1年)、崔正焄(博士3年)、花田貴、谷川智之、片山竜二、松岡隆志、第74回応用物理学会秋季講演会 Poster Award 2013年9月17日。
9. 谷川智之、第17回(2012年度)応用物理学会東北支部講演奨励賞、「(0001)面、(000-1)面 GaN 上へ MOVPE 成長した InGaN の表面モフォロジーと In 取り込み」2012年12月6日。

③ スコミ(新聞・TV等)報道

③その他

(6)成果展開事例

①実用化に向けての展開

②社会還元的な展開活動

§ 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

年月日	名称	場所	参加人数	概要
2010. 10.1-2011 . 3.20	Materials, Challenge for Energy	早稲田大学	20	CREST で招聘した Ploog 教授に週 1 回の割合でエネ ルギー関係の講義を行っ た。 講師:K.Ploog, 堀越
2010. 7.27-8.17	主催 第 3 回みやぎ県民大 学 地球にやさしいエネ ルギーとエコ材料 ～ 太陽電池から水素ま で～	東北大学 金属材料研究所	49	・持続可能な社会の実現に 向けたクリーンエネルギー 開発の現状理解 ・物理学の理解とその応用 ・半導体と光との関係の理 解 講師:松岡、折茂、宇佐見 (東北大教員)
2011.8. 23-26	主催 第4回みやぎ県民大 学 地球にやさしいエネ ルギーとエコ材料 ～ 太陽電池から水素ま で～	東北大学 金属材料研究所	31	・持続可能な社会の実現に 向けたクリーンエネルギー 開発の現状理解 ・物理学の理解とその応用 ・半導体と光との関係の理 解 講師:松岡、折茂、宇佐見 (東北大教員)
2012.8.5	早稲田大学模擬講義	早稲田大学	40	エネルギーを考える;再生 可能エネルギー、太陽光エ ネルギーの重要性
2012.8.20 -24	主催 第4回みやぎ県民大 学 地球にやさしいエネ ルギーとエコ材料 ～ 太陽電池から水素ま で～	東北大学 金属材料研究所	17	・持続可能な社会の実現に 向けたクリー ンエネルギー開発の現状理 解 ・物理学の理解とその応用 ・半導体と光との関係の理 解 ・超伝導の原理と省エネ 講師:松岡、宇佐見、小林 (東北大教員)
2012.10. 22-23	主催 Intensive Discussion on Growth of Nitride Semiconductors	東北大学 金属材料研究所	45 人	窒化物半導体の成長につ いて、課題を明らかにし、そ の対策について議論

2013.7.8	WIAS Top runners' Lecture Collection of Science エネルギー問題入門—枯渇性エネルギーと再生可能エネルギー	早稲田大学	40人	再生可能エネルギーの重要性、太陽光発電の現状、技術的課題について、一般向けの講義。 産総研・桜井博士の招待講演
2013.8.19-22	主催 みやぎ県民大学“地球にやさしいエネルギーと環境・省エネルギー技術～太陽電池・半導体・超伝導～”	東北大学 金属材料研究所		・持続可能な社会の実現に向けたクリーンエネルギー開発の現状理解 ・物理学の理解とその応用 ・半導体と光との関係の理解 講師:松岡、折茂、宇佐見 (東北大教員)
2013.10.15	早稲田大学各務記念材料技術研究所オープンセミナー 「高効率太陽光発電研究の最前線」	早稲田大学 材料技術研究所	160人	太陽電池の高効率化研究の現状と将来展望についてシステムを含め議論。 東工大・山田明教授、パナソニック・大鐘章義博士らの招待講演
2014.8.18-21	主催 みやぎ県民大学“地球にやさしいエネルギーと環境・省エネルギー技術～太陽電池・半導体・超伝導～”	東北大学 金属材料研究所		・持続可能な社会の実現に向けたクリーンエネルギー開発の現状理解 ・物理学の理解とその応用 ・半導体と光との関係の理解 講師:松岡 他 (東北大教員)
2014.10.30-31	主催 Intensive Discussion on Growth of Nitride Semiconductors	東北大学 多元物質科学研究所	50人	窒化物半導体の成長について、アプリケーションの観点から議論

§6 最後に

本研究の目的は、励起子吸収が実際に半導体の吸収係数を増加させ、太陽電池の効率を増大させることを実証することである。AlGaAs/GaAs 超格子を用いた実験により、薄膜太陽電池では確かに効率の増大が得られることを示すことができた。さらに 100°Cという高温でもバンド端付近の急峻な励起子吸収は室温の場合と同様に観察され、高温における太陽電池効率の減少を緩和していることが明らかになった。これは予想外の結果であった。このほか直接遷移・間接遷移ハイブリッド太陽電池など新しい提案もでき、当初の目的は十分に達成されたと思う。

カルコパイライト系材料の研究は、CuInSe₂ や CuGaSe₂ などの材料では n 型結晶が得られず、これがこの材料系の太陽電池の効率を制限しているのではないかとの考えのもと、結晶性の優れた材料を作り、n 型結晶の実現を目指した。歴史的にも多くの研究者が挑戦したテーマであり、簡単に成功するものとは思っていなかったが、実際高品質の結晶を取得し、これにさまざまなドーピングを施したが n 型結晶は得られなかった。これは大変残念であった。CuInSe₂ と CuGaSe₂ のバンド構造から、変調ドーピングの可能性を着想し、急峻なヘテロ界面を持つ CuInSe₂/CuGaSe₂ 超格子を用いて変調ドーピングの実験を試みた。しかし、高抵抗の結晶は得られるものの、未だ n 型結晶は実現していない。有望な方向なので今後の進展が期待される。一方、この過程で、これまで実現されたことがなかった急峻な界面を持つ CuInSe₂/CuGaSe₂ ヘテロ接合が得られ、この材料系で量子井戸や超格子の製作を自在に成長できる技術を確認できた。今後、この材料系が太陽電池だけでなく、いろいろなデバイスに応用されるものと期待できる。

窒化物半導体の太陽電池と特徴は、組成を替えることによって太陽光のスペクトルの全範囲をカバーできることにある。Si などの安価な材料と比べて高価な材料であることからその分、高効率化が必須である。現状では、その効率はまだまだ低い。その理由は、従来からある窒化物半導体以外の材料にはない分極電界のためである。通常、窒化物半導体は Ga 極性で成長された結晶が各種素子に用いられている。一般に、N極性成長が難しいためである。さらに素子構造を成長するとき、p型層の形成に用いられる Mg が拡散しやすいために、最初に基板上にn型層を成長し、最後にp型層を積層する。この場合、太陽電池内の接合に発生しているビルトイン電界と分極電界の方向が逆となり、フォトキャリアの引き出し効率が低下してしまいます。これに対して、本研究では、提案者が得意とするN極性成長を用いることによって、n型層から成長して、吸収層内で発生したフォトキャリアを効率良く引き出すことのできる構造を成長することができる。この提案に基づいて、素子作製技術の確立しているLED構造からなる太陽電池を作製した。その結果、N極性太陽電池のフォトキャリアは、Ga極性素子より一桁近く高くなることを示すことができた。この結果は、本研究提案の狙い通りである。太陽電池としての変換効率としては、サファイア基板上に形成したLED構造であり、キセノンランプの光を用いて照射を基板側から行っており、太陽電池構造の基板側に存在する GaN層にほとんどの光が吸収されてしまい、正確な変換効率を求めることはできていない。今後も継続して研究し、変換効率の向上を追求していく。オール窒化物半導体による多接合太陽電池を作製し、現状の化合物半導体の 4 接合で示されている変換効率46%を越えることを目標とした。

本研究では、N極性成長の有効性を太陽電池について検証できたが、この技術を他の素子についても広めていく。例えば、ノーマリーオフおよび低いオン抵抗で動作するHEMTなどである。この研究についても既に研究を開始しており、この半年内には、検証できる予定である。

