次世代高効率太陽電池の研究開発動向*

-50%超の変換効率を目指して

中 野 義 昭* 渡 辺 健太郎* 杉 山 正 和**

R&DTrends of Next Generation High-efficiency Photovoltaic Cells
-Toward Conversion Efficiency Beyond 50%

By Yoshiaki Nakano, Kentaroh Watanabe, and Masakazu Sugiyama

This paper presents a review of R&D of novel next-generation, high-efficiency photovoltaic solar cells based on III-V compound semiconductors, particularly tandem multi-junction cells, intermediate band cells, hot-carrier cells, and multiple exciton generation cells. These cells are predicted to have the potential to yield conversion efficiencies of over 50%, and research toward their realization has been accelerated worldwide after the east Japan earthquake disaster. It is expected that gigawatt-scale solar power generation plants will be constructed mainly in the low latitude desert areas by making use of these high-efficiency solar cells and sunlight concentrator optics.

1. はじめに

太陽電池普及のための低コスト化が追及される一方で、変換効率 40%を超えるような集光システムによる大規模太陽光発電が、エネルギー問題を抜本的に解決する次世代技術として注目を集めている。この新しいシステムにおいて光電変換を担うのが III-V 族化合物半導体のエピタキシャル結晶を用いたタンデム型太陽電池である。

GaAs や InP に代表される化合物半導体は直接遷移型のもが多く、 $10^4\sim 10^5\text{cm}^{-1}$ 程度の大きな光吸収係数を持つために、太陽電池動作に必要な層の厚みの数ミクロン程度の薄膜化が可能である。さらにこれらの材料系では、半導体結晶のエピタキシャル成長技術が発達しており、異種材料の成長（ヘテロ成長）に対する知見が多く蓄積されている。複数の III-V 族化合物半導体材料の積層構造からなるタンデム型太陽電池は、現在最も変換効率の高い太陽電池として知られており、主に人工衛星などの宇宙用として開発が進められてきた。さらに、コスト削減のための集光システムへの適応性が高いことから、地上での大規模太陽光発電システムへの応用が期待されており、より高効率なシステムを目指した研究開発がおこなわれている。500-1000 倍の

集光下で動作するために、太陽電池セルに必要なエピタキシャル結晶のコストはさほど問題にはならず、むしろ 1%単位の変換効率向上が発電コストの削減に大きく寄与する。本稿では、III-V 族タンデム太陽電池の効率向上に向けた課題を概観し、さらなる効率向上を目指した技術開発の動向を紹介する。

2. III-V 化合物半導体を用いた タンデム型太陽電池

地表に照射される太陽光は図 1 に示されるように、可視光線を含む広範なエネルギー分布を持っている。これらの広い波長にわたる光子を可能な限り多く吸収し、光子が持つエネルギーを低損失で電圧に変換するためには、異なるバンドギャップを持つ材料から構成される PN 接合を積層するタンデム型太陽電池が有望である。中でも、図 2 に示される InGaP/(In)GaAs/Ge の 3 つのサブセル (PN 接合) からなる 3 接合構造は、それぞれの層において格子ミスマッチが小さく、高品質な結晶が得られることから広く利用されている^[2]。また、図 1 においてこれらのサブセル材料が持つバンドギャップに対応するカットオフ波長が示されている。それぞれのサブセルの間には高ドープ縮退半導体を用いたトンネル接合が挿入されており、隣接する p 層および n 層で生成された正孔と電子がトンネル現象により、再結合する。これにより、InGaP, GaAs, Ge から

*原稿受付 平成 24 年 5 月 14 日。

*東京大学 先端科学技術研究センター (目黒区駒場 4-6-1)。

**東京大学 工学系研究科 (文京区本郷 7-3-1)。

なるサブセルは直列に接続された状態となり、トータルで流れる電流はそれぞれのサブセルのうち最小のものに制限されるが、電圧は3つのセルの合計となる。このタンデム型太陽電池はバンドギャップよりも小さいエネルギーの光子が透過することによる損失（レッドロス）と、バンドギャップよりも過剰に大きいエネルギーの光子によって生成したキャリアが熱的に平衡状態になる過程で失われるエネルギー（ブルーロス）の両方を低減することで単接合材料の場合における理論限界を超えて高効率を達成することができる。図3では、理論的な変換効率の上限をPN接合層の数に対して示している。現在、3接合で非集光下の動作における世界記録として、36.9%の変換効率が達成されており、さらに4接合・5接合の多接合化により変換効率の向上が期待されている^[13]。

図1 AMO および AM1.5G, AM1.5D の条件として定義された太陽光の標準スペクトル^[1]
(上と下の図は同じ太陽光のスペクトルに対して、上が輻射エネルギー、下が光子フラックスに対してプロットしたものをあらかわす)

図2 格子整合タンデム型 InGaP/(In)GaAs/Ge 3接合太陽電池の構造^[2]

図3 AM1.5G の太陽光入射条件におけるPN接合層数と理論変換効率^[3]

タンデム型太陽電池については、さらなる高効率化へ向けた研究開発がさかんに進められている。現状では3接合構造を、理論限界である51.5%へ近づけるべく、主に結晶品質の改善や構造の最適化に重点を置いた研究がなされている。InGaP/(In)GaAs/Geの構造では、積層構造により直列に流れる電流が一定となるため、最も起電流の小さい(In)GaAsミドルセルによって全体の短絡電流密度 J_{sc} が制限されている。これは、図1の光子エネルギーに対して示されているように、各材料のバンドギャップによって吸収できる量に制限があるためであり、より高効率なタンデムセルを目指すためには、ミドルセルにGaAsよりも狭バンドギャップの材料を用いる必要がある。図4に示すように、一般に用いられるIII-V族の狭バンドギャップ材料はGeよりも格子定数が大きいいため、エピタキシャル成長の最中に格子緩和を起こし、キャリア輸送特性の劣化の原因となる転位密度が増大する。このような材料のエピタキシャル成長における制約を打破するためには大きく分けて3つのアプローチがある。

- (1) Ge上に格子整合する新しい狭バンドギャップ材料を探索する。
- (2) 格子不整合狭バンドギャップ材料の成長の前に格子緩和層を導入し、エピタキシャル層の品質を向上する(メタモルフィック成長)。
- (3) エピタキシャル層の積層ではなく、ウエハ接合などの機械的積層技術によってタンデム構造を実現する。

図4 代表的な半導体材料の組成と格子定数に対応するバンドギャップエネルギー^[4]

(1)のGe上に格子整合するバルク材料として有力なものに、InGaAsに微量の窒素を添加したInGaAsNがある。この材料は微量に添加した窒素の組成に応じて、GaAs・Geに近い格子定数を持ちながら1eV前後のバンドギャップエネルギーを実現することができる。しかし、窒素の凝集に起因する移動度の低下や再結合中心の増加といった結晶品質上の問題を持っており、キャリア輸送効率の向上のためにさらなる結晶成長技術の

進展が望まれている。東京大学やFraunhofer ISE(独), NREL(米)などの研究グループでは、分子線エピタキシー(MBE)法や有機金属気相エピタキシー(MOVPE)法といったInGaAs結晶成長過程において、原子状水素を導入する、あるいは微量にアンチモン(Sb)を導入することで窒素原子の凝集を防ぎ、結晶品質を改善する研究を進めている^[5-7]。Solar Junction社は2011年に、ミドルセルにこの材料を用いた3接合タンデム型太陽電池で、集光時の変換効率43.5%という世界記録を達成している(図5)^[8]。

また、厳密な意味での格子整合とは異なるが、量子構造を導入することで、実効的なバンドギャップエネルギーを制御しつつ高品質なエピタキシャル膜を成長する手法も開発されつつある。われわれは、GaAs基板上にInGaAs/GaAsPの多重量子井戸構造を導入し、Ge基板上における3接合セルのミドルセルに最適な1.2eVのバンドギャップエネルギーを持つ構造の開発を進めている。厚さ10nm以下の極薄膜であれば、ある程度の格子不整合材料でも成長を行うことができる点を利用し、GaAsよりも格子定数の大きいInGaAs量子井戸に対して、GaAsよりも格子定数の小さいInGaP障壁層を交互に積層することで成長基板に対する応力を補償し、低欠陥密度を維持しつつ光吸収層を形成する技術を、MOVPE成長中における基板曲率のその場観察を用いて開発している^[9]。

図5 InGaAsの窒素添加による格子定数変化に対応するバンドギャップエネルギー図(上)およびSolar Junction社の開発したGaAs基板上InGaP/GaAs/GaInAs(Sb)3接合タンデムセルの構造(下)

(2)のメタモルフィック成長では、集光時の変換効率が40%を超えるような高品質なセルが実現されている。この場合に重要となるのは、格子不整合により成長が

困難となるヘテロ界面に緩衝層を導入し、太陽電池として動作する層の結晶品質を改善する点にある。Fraunhofer ISEのグループは、Geボトムセル上に徐々に組成比が変化するようなバッファ層を成長することで、高品質な低バンドギャップのミドル・トップセルを実現した。バッファ層を介してミドルセルおよびトップセルにGeに対する格子ミスマッチが1.1%となる $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}$ 、 $\text{Ga}_{0.35}\text{In}_{0.65}\text{P}$ (図6)を成長することによって、集光度454倍において変換効率の最大値41.1%を達成している(図7)^[10]。Spire Semiconductor社はGaAs基板上に格子整合InGaPトップ層とGaAsミドル層を成長し、同じGaAs基板の反対の面上にバッファ層を導入した、Ge基板を用いない系でのメタモルフィック成長(Bi-facial成長)により、 $\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ ボトム層を持つ3接合タンデム構造を実現した。この手法では、成長技術が難しいメタモルフィック層をボトム層のみに限定し、トップ層とミドル層では格子整合を維持した高い品質を得ることによって、406倍の集光下で42.3%の変換効率を得た(図8)^[11]。シャープはInverted Metamorphic(IMM)という手法で非集光時の世界最高効率36.9%を達成している(図9)^[12,13]。この方法では、MOVPE法によってGaAs基板上に格子整合する $\text{Ga}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$ トップ層およびGaAsミドル層を順に成長したのち、メタモルフィック成長によって $\text{In}_{0.28}\text{Ga}_{0.72}\text{As}$ ボトム層を成長し、サポート基板上にボトム層を貼付けたのちにGaAs基板を除去する手法である。この方法においてもトップ層とミドル層では格子整合を保っているために高い品質が維持され、メタモルフィック成長ボトム層の品質が重要となる。シャープでは独自のバッファ層成長技術によってボトム層の結晶品質を改善し、ボトム層における開放電圧の低下を抑制している。また、このIMMにおいては、将来的にエピタキシャルリフトオフ(ELO)技術を用いてエピタキシャル成長したセル層のみを剥離し、GaAs成長基板を再利用することで、省資源化・低コスト化を図ることが可能である。

このような観点から、ELOを用いた薄膜III-Vセルの開発は高品質なエピタキシャル結晶成長と同様に盛んに開発が進められており、Alta Device社はELOを用いた極薄GaAs単接合セルに微細加工技術を適用した光閉じ込め構造を導入することにより、2011年に非集光下での変換効率28.2%という単一材料を用いた太陽電池セルでは最も高い値を達成している^[14]。また、Semprius社はセルサイズ600 μm 角の微小な多接合セルをELOにより剥離し、ボールレンズを2次光学素子として集光光学系にカップリングする製造技術の開発を進めており、集光モジュール製造の高速オートメーション化を進めている^[15]。

図6 メタモルフィック成長 $\text{Ga}_{0.83}\text{In}_{0.17}\text{A}/\text{Ga}_{0.35}\text{In}_{0.65}\text{P}/\text{Ge}$ 3 接合セルの断面反射電子顕微鏡 (REM) 像 (左) およびバッファ層近傍における透過電子顕微鏡 (TEM) 像 (右) ^[10]

図7 メタモルフィック成長 $\text{Ga}_{0.83}\text{In}_{0.17}\text{A}/\text{Ga}_{0.35}\text{In}_{0.65}\text{P}/\text{Ge}$ 3 接合セルの各サブセルにおける外部量子効率スペクトル (上) および集光度に対する開放電圧 (V_{oc}), Fill Factor, 効率 (下) ^[10]

図8 Bi-facial 成長 $\text{InGaP}/\text{GaAs}/\text{InGaAs}$ 3 接合セルの構造 (上) および外部量子効率スペクトル (下) ^[11]

図9 IMM 成長 $\text{InGaP}/\text{GaAs}/\text{InGaAs}$ 3 接合セルの構造 (上) および電流-電圧特性・外部量子効率スペクトル (下) ^[12]

(3)については、平坦な基板同士を直接あるいは緩衝層を挟んで接触させ、表面活性化処理や加熱処理等を用いて物理的に結合させる、いわゆるウエハ接合という技術を用いた開発がすすめられている。カリフォルニア工科大学のグループでは、ウエハ接合技術を用いて、Ge または GaAs 基板上に成長した AlInGaP/Al(In)GaAs/(In)GaAs の 3 接合セルと、InP 基板上に成長した InGaPAs/InGa(P)As の 2 接合セルを直接ボンディングし、最終的に 5 接合のタンデムセルの実現に成功している^[16]。この方法では、必要となる材料のバンドギャップエネルギーに対して、エピタキシャル成長に必要な格子整合の制限を受けない。しかし実際に接合技術を用いて実現された 5 接合セルの変換効率は、AM0 (エアマスゼロ・大気圏外における条件) の光照射下で 31.8%にとどまっており、接合界面におけるキャリア輸送特性に改善の余地を残している。

図 10 基板接合技術によって形成された AlGaIn(P)/AlGa(In)As/Ga(In)As-GaInPAs/GaIn(P)As 5 接合セルの構造および AM0 照射下における電流-電圧特性、外部量子効率^[16]

現在最も成功しているアプローチは(2)であるが、理想的には(1)の手法が最も高品質なエピタキシャル結晶が得られると予想される。また、(3)における機械的なサブセル層の接合と ELO 技術の組み合わせによって、高い変換効率が薄膜状の構造で達成された場合、コスト面での優位性が期待できる。従来、多接合太陽電池は、人工衛星の搭載機器を駆動するための電源として宇宙環境での使用を主な目的として発展してきた^[17]。人工衛星の搭載機器は重量がコストに大きく寄与するため、電源の高効率化・薄膜軽量化は大きな意味を持っており、その動作は AM0 で最適化されている。

このような高い効率を持ったタンデム型太陽電池を低コスト発電システムに応用すべく、冒頭に述べたような集光型太陽光発電のシステム開発もすすめられている。間接遷移型のシリコン(Si)系太陽電池と比べてフォノンとの相互作用が比較的小さい直接遷移型の III-V 族化合物半導体は、耐熱性が高く、集光素子との組み合わせに適している。さらに効率の観点から見ても、非集光(AM1.5G ~1000W/m²)の段階から、絶対効率で 7-12%程度の向上が期待できる。単純な面積当たりのセル製造コストでは Si 太陽電池の 100 倍程度となるが、集光型の場合、実効的に太陽光を受ける面積の大部分はレンズ等の光学素子が担うことになる。現状では 500 倍程度から 1000 倍の集光度の実現へ向けた開発が主流となっており、安価な集光光学素子と組み合わせることによって発電単価を大幅に引き下げることが可能である。

3. III-V 族化合物半導体を用いた新原理太陽電池

III-V 族化合物半導体にとって特徴的なエピタキシーという結晶成長法では、原子層レベルに近い極端な薄膜構造の制御や、量子ドットの自己組織化という微細構造を形成することが可能である。このような特徴を生かし、本来の半導体を持つ光電気反応の限界を打ち破るような太陽電池の原理が提唱され、研究がすすめられている。

3.1 中間バンド型太陽電池 「量子ドット太陽電池」と俗称される中間バンド型太陽電池は、初めマドリッド工科大学のグループによって提唱された^[18, 19]。図 11 のように半導体の禁制帯中に量子ドット等で人為的に中間バンドを形成することで、従来の価電子帯-伝導帯間の遷移に加え、価電子帯-中間バンド間、中間バンド-伝導帯間の遷移による光吸収・キャリア励起が生じるようにしている。すなわち、タンデム型太陽電池のような異種材料の積層とトンネル接合による直列接続と

いう構造をとらずに複数の吸収波長帯をもつことができる。中間バンドを形成するような材料、または構造はいくつかの候補があるが、代表的なのが量子ドットの自己組織化を用いる手法である。典型的な例として、MBE 結晶成長において GaAs 基板上に特定の条件で InAs を成長すると、大きな格子定数差がもたらす強い歪みの影響によって、通常の Frank-van der Merwe (F-M) 型の成長モードから、Stranski-Krastanov (S-K) 型と呼ばれる成長モードに変化する。この成長モードでは、成長初期の 2 次元的な層成長から歪みのエネルギーが蓄積されることによって 3 次元的に微小な島(ドット)が多数形成される。さらに、量子ドットが形成された層の上から F-M 型の成長モードで GaAs を成長することで、量子ドットの凹凸を反映しない平坦な面が形成され、量子ドットはこの中間層(埋め込み層)に埋もれるようになる。量子ドットと中間層を繰り返し積層すると、積層方向への量子ドット同士が空間的に非常に近接するため、隣接する量子ドットが形成するエネルギー準位の波動関数の重なりが大きくなり、疑似的にバンドを形成する。これによって図 11 に示されるようなエネルギー構造を実現することができる。

図 11 中間バンド太陽電池の構造図と対応するエネルギーバンドダイアグラム^[19]

東京大学のグループでは、中間層に GaNAs を用いて InAs 量子ドットとは逆方向の歪みを発生させることで、積層中の歪みを 1 層ごとに補償し、50 層以上の量子ドット層を積層することに成功している(図 12)^[20]。また、このグループでは、量子ドット構造を含む太陽電池に赤外線と可視光線を同時に照射した際の測定結果が、可視光線のみときより大きな信号が得られたことから、量子ドットが中間バンドとしての動作することを検証した^[21]。現状では、量子ドットを用いた中間バンド太陽電池の変換効率は最大で 25%程度(30 倍集光下)と、タンデム型太陽電池よりは低い効率にとどまっているが、原理的には同等以上の高効率が見込まれる^[22-24]。

図 12 量子ドット太陽電池の構造図(上)および量子ドット積層部の断面 TEM 像(下)^[20]

3.2 ホットキャリア型太陽電池 バンドギャップエネルギーよりも高いエネルギーの光子が入射した直後のキャリアは、光子のエネルギーに応じてバンド端よりも高エネルギー側に分布を持っている。通常の太陽電池の場合、キャリアが持つエネルギーは材料にもよるが、非常に短時間($\ll 1$ ns)で熱的にバンド端まで緩和し、取り出せるエネルギーはバンドギャップの大きさで制限される。キャリアの熱的な緩和が生じる前に高エネルギーな状態のキャリアを電気信号として取り出すことができれば、より高いエネルギー変換効率が期待できるはずである。

この熱緩和が生じる前の状態を「ホットキャリア」と呼び、ホットキャリアを直接変換できるホットキャリア型太陽電池が NREL 等の研究グループから提唱され、理論的には非集光下で 65%、最大集光倍率の下で 85%超の変換効率が可能であることが示されている^[24]。基本的なホットキャリア型太陽電池では、入射光を吸収してキャリアを発生する受光層を、特定のエネルギーを持ったキャリアのみを選択的に取り出すことのできる電極層(エネルギー選択電極)で挟んだ構造となる(図 13)。生成されたホットキャリアは、高エネルギー状態が失われる前にエネルギー選択電極によって取り出され、それ以外のキャリアはキャリア同士の散乱によって再度エネルギー分布を形成する。そこで再びエネルギー選択電極で取得可能なキャリアのみを取り出す、という過程の繰り返しがホットキャリア太陽電池の動作原理である。

図13 ホットキャリア太陽電池の構造^[26]

ホットキャリア太陽電池の効率向上のために求められるのは、ホットキャリアの緩和時間を増大するような構造と、理想的なエネルギー選択電極の実現である。ホットキャリアのエネルギー緩和は過剰なエネルギーを熱に変換するプロセスであり、主にフォノンとの相互作用によって生じるため、量子井戸や量子ドットのようなナノ構造中ではエネルギー準位の離散化の結果、フォノンボトルネック現象と呼ばれる緩和の遅延効果が予測されている^[25]。エネルギー選択電極については、狭エネルギー幅を持つ半導体や希土類元素が作る準位、量子ナノ構造による共鳴トンネル効果を利用する可能性が検討されている^[26]。これらの要素技術の開発は基礎研究の段階にあり、ホットキャリア太陽電池に対する動作実証の研究が盛んにおこなわれている。

3.3 多重励起子生成太陽電池 量子ドットのような空間的に非常に小さい構造を持つ系では他にも有用な物理現象が現れる。量子ドットが形成する閉じ込め準位に対して高いエネルギーを持った光子が高いエネルギー準位のキャリアを形成した場合、そのキャリアが基底準位まで緩和するエネルギー差によってもう1対の電子-正孔対を生成する過程が存在する。これを逆オーージェ過程あるいは衝突電離と呼び、1個の光子によって複数の電子-正孔対が生じる現象を多重励起子生成 (Multi-Exciton Generation, MEG) という。本来は熱(フォノン)の生成によって失われるエネルギーをキャリアの生成にすることができるという利点をもち、NREL のグループによって提唱され、基本的な研究がすすめられている^[27]。

量子ドット中では、キャリアのみでなく、フォノンのエネルギー準位も離散化しているため、キャリアの緩和によってフォノンを生成するためには遷移エネルギーがフォノンの励起エネルギーの整数倍と等しくなくてはならないので、逆オーージェ過程の生じる確率が増大する(図14)。NREL やコロラド大学等の研究グループにおいて、III-V 族化合物半導体を用いた量子ドッ

ト構造、シリコンナノ粒子、PbSe や PbS のような II-VI 族半導体のナノ粒子に対して MEG 効果の検証実験が行われ、バンドギャップの整数倍のエネルギーを持った入射光子の数に対して 300%を超える量子効率を得られることが報告されている。

図14 量子閉じ込め準位内で生じる多重励起子生成過程の模式図^[27]

4. むすび

本稿では、次世代高効率太陽電池として研究が進められている III-V 族化合物半導体をベースとした新たな太陽電池、特にタンデム型太陽電池、中間バンド型太陽電池、ホットキャリア型太陽電池、多重励起子生成太陽電池に関し、現状と動向を概観した。これらはいずれも、潜在能力としては 50%を超える変換効率が予測されており、東日本大震災以降、その実現に向けて日米欧を中心に研究開発がさらに加速している。将来的には、これら高効率な太陽電池を利用したギガワットクラスの集光型大規模太陽光発電所が、原発を代替するエネルギー源として、低緯度砂漠地帯を中心に建設されるものと期待される。

参考文献

- [1] ASTM E-490-00, ASTM G-159
- [2] Yamaguchi, et al., "Multi-Junction III-V solar cells: current status and future potential", Solar Energy, 79, p78, (2005)
- [3] A. Barnett, et al., "50% efficient solar cell architectures and designs", 4th World Photovoltaic Specialists Conference, Hawaii, USA, 2006.
- [4] J. M. Roman, "State-of-the-art of III-V Solar Cell Fabrication Technologies, Device Designs and Applications", Advanced Photovoltaic Cell Design, 2004.
- [5] N. Miyashita, et al., "Antimony enhanced homogeneous nitrogen incorporation into GaInNAs

films grown by atomic hydrogen-assisted molecular beam epitaxy", Proc. of IEEE PVSC35, p002084 (2010)

[6] D. B. Jackrel, et al., "Dilute nitride GaInNAs and GaInNAsSb solar cells by molecular beam epitaxy", J. Appl. Phys., 101, p114916 (2007)

[7] K. Volz, et al., "Development And Optimization of a 1 eV (GaIn)(NAs) solar cell", Proc. of IEEE PVSC34, p001015, (2009)

[8] M. Wiemer, et al., "43.5% Efficient Lattice Matched Solar Cells", Proc. of SPIE, 8108, p810804-1-5, (2011)

[9] M. Sugiyama, et al., "In situ curvature monitoring for metal-organic vapor phase epitaxy of strain-balanced stacks of InGaAs/GaAsP multiple quantum wells", J. Crystal Growth, 315, p1, (2010)

[10] W. Guter, et al., "Current-matched triple-junction solar cell reaching 41.1% conversion efficiency under concentrated sunlight", Appl. Phys. Lett., 94, p223504, (2009)

[11] S. Wojtczuk, et al., "42% 500X Bi-Facial Growth Concentrator Cells", Proc. of CPV7, p9, (2011)

[12] T. Takamoto, et al., "World's highest efficiency triple-junction solar cells fabricated by inverted layers transfer process", Proc. of IEEE PVSC35, p00416, (2010)

[13] シャープ株式会社 プレスリリース

[14] Alta devices, Proc. of IEEE PVSC37, in press.

[15] Semprius, Proc. of PVSC37, in press.

[16] D. C. Law, et al., "Semiconductor-Bonded III-V multijunction space solar cells", Proc. of IEEE PVSC34, p002237, (2009)

[17] T. Takamoto, et al., "Future development of InGaP/(In)GaAs based multijunction solar cells", Proc. of IEEE PVSC, p519, (2005)

[18] A. Luque, and A. Martí, "Increasing the Efficiency of Ideal Solar Cells by Photon Induced Transitions at Intermediate Levels", Phys. Rev. Lett. 78, p5014, (1997)

[19] A. Martí, et al., "Evaluation of the efficiency potential of intermediate band solar cells based on thin-film chalcopyrite materials", J. Appl. Phys. 103, p073706, (2008)

[20] Y. Okada, et al., "Characteristics of InAs/GaNAs strain-compensated quantum dot solar cell", J. Appl. Phys., 106, p024306, (2009)

[21] Y. Okada, et al., "Increase in photocurrent by optical transitions via intermediate quantum states in direct-doped InAs/GaNAs strain-compensated quantum dot solar cell", J. Appl. Phys., 109, p024301, (2011)

[22] V. M. Lantratov, et al., "AlGaAs/GaAs photovoltaic cells with InGaAs quantum dots", Adv. Sci. Tech. 74, pp231-236, (2010)

[23] W. Shockley, and H. J. Queisser, "Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells", J. Appl. Phys., 32, p510, (1961)

[24] R. T. Ross, and A. J. Nozik, "Efficiency of hot-carrier solar energy converters", J. Appl. Phys., 53, p3813, (1982)

[25] S. Yagi, and Y. Okada, "Fabrication of resonant tunneling structures for selective energy contact of hot carrier solar cell based on III-V semiconductors", Proc. of IEEE PVSC35, p001213, (2010)

[26] Y. Rosenwaks, et al., "Hot-carrier cooling in GaAs: Quantum wells versus bulk", Phys. Rev. B, 48, p675, (1993)

[27] A. J. Nozik, et al., "Semiconductor Quantum Dot and Quantum Dot array and applications Multiple Exciton Generation to Third-Generation Photovoltaic Solar Cells", Chem. Rev., 110, p6873, (2010)

著者紹介

中野 義昭

- ・1959 年生.
- ・所属：東京大学先端科学技術研究センター
- ・最終学歴：東京大学大学院工学系研究科博士課程修了
- ・専門分野：光電子デバイス工学
- ・その他：NEDO 革新的太陽光発電技術開発事業プロジェクトリーダー

渡辺 健太郎

- ・1977 年生.
- ・所属：東京大学先端科学技術研究センター
- ・最終学歴：東京大学大学院理学系研究科博士課程修了
- ・専門分野：半導体光デバイス

杉山 正和

- ・1972 年生.
- ・所属：東京大学工学系研究科
- ・最終学歴：東京大学大学院工学系研究科博士課程修了
- ・専門分野：半導体プロセス工学