

化合物太陽電池

高本 達也

ソーラーシステム開発本部 次世代要素技術開発センター

Ⅲ-V族化合物半導体の組成比を制御してバンドギャップの異なる複数の太陽電池層を重ねた多接合太陽電池では、50%（集光時）を超える変換効率が期待されています。InGaP トップセル、InGaAs ミドルセルおよびGe ボトムセルの3つの太陽電池を重ねた3接合型太陽電池は、既に宇宙用で実用化され、地上での集光システム用に開発が進められています。今回、3接合型を更に改良し、格子不整合材料であるInGaAs ボトムセルを用いた構造で35.8%（非集光）の世界最高効率を達成しましたので、その技術について解説します。

1 多接合型太陽電池

1つの半導体材料から成る太陽電池では、幅広いエネルギー分布を有する太陽光を高効率でエネルギー変換することに限界があり、これを克服する方法として、バンドギャップエネルギーの異なる材料からなる複数の太陽電池を積み重ねた、いわゆる、多接合太陽電池を構成する方法があります。多接合太陽電池を構成する材料として、組成比の制御により様々な組合せのバンドギャップエネルギーの半導体を任意に形成でき、さらに、高品質の単結晶薄膜が作製できるⅢ-V族化合物半導体材料が有効です。

図1は、多接合太陽電池の変換効率と重ね合わせる太陽電池の数（接合数）との関係を示します。非集光および1000倍集光時の変換効率の理論値はそれぞれ、 $E_g=1.4\text{eV}$ の単接合セルで31%および37%、 $E_g=1.56\text{eV}/0.94\text{eV}$ の2接合型で42%および50%、 $E_g=1.78\text{eV}/1.18\text{eV}/0.94\text{eV}$ の3接合型で47%および56%であり、36接合にて61%および72%と計算されています。一方、実際の太陽電池の非集光での最高効率として、GaAs単接合で25.7%、InGaP/GaAs 2接合で30.3%、InGaP/GaAs/InGaAs 3接合

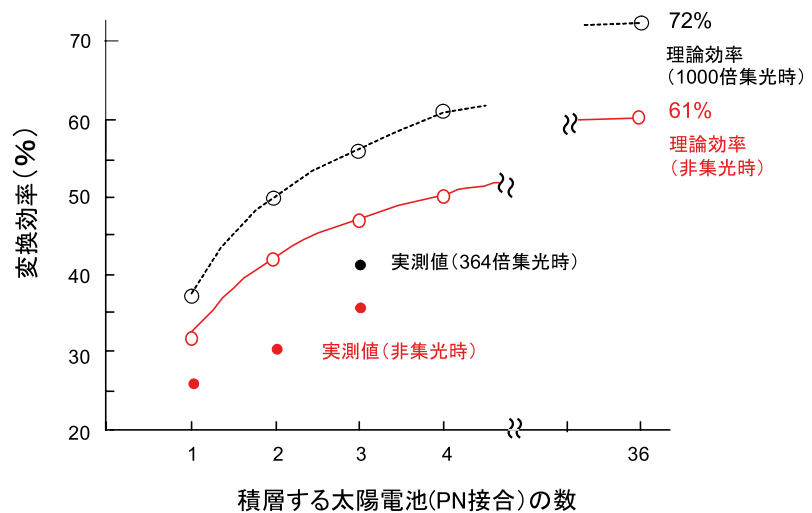


図1 多接合太陽電池の変換効率と重ね合わせる太陽電池の数との関係 (理論効率と過去最高の実測値との比較)

で35.8%が実現されています。また、集光時の最高効率として、InGaP/(In) GaAs/Ge 3接合型で41.6% (350倍集光時) が達成されています。最高効率は、全て化合物太陽電池で達成されていますが、理論値と差は大きく、少数キャリアの表面及び結晶中での再結合損失が0でないことが主な原因です。化合物の特長を活かし、表面はヘテロ構造をとっていますが、表面再結合速度は数100cm/sと、酸化膜を形成したシリコン表面の最良の状態と比べ2桁大きな値となっています。また、バンド間再結合（発光再結合）が結晶中の再結合損失の主要因となっており、この損

失を低減するためには、発光再吸収（フォトンリサイクリング）等の革新的技術の開発が望まれます。

2 格子整合型3接合太陽電池

現在、既に人工衛星の電源として実用化されているⅢ-V族多接合型太陽電池は、図2に示すようなGe基板上にエピタキシャル成長した単結晶薄膜からなる $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}/\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{As}/\text{Ge}$ 構造の3接合型太陽電池です。InGaP (1.88eV) トップセルおよびInGaAs (1.40eV) ミドルセルの格子間隔がGe (0.67eV) ボトムセル（基板）の格子間隔とほぼ一致した格子整合型の太陽電池です。

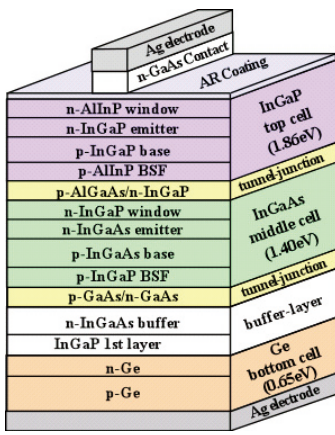


図2 $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}/\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{As}/\text{Ge}$ 3接合型太陽電池の構造

変換効率は宇宙光(AM0スペクトル)に対して約29%で、宇宙用シリコン太陽電池の約17%を大きく上回っています。高効率であることからパネルの枚数を削減でき、姿勢制御や打上に要する総コストが低減できるため、全世界の宇宙用太陽電池の中で、約97%以上はこのような化合物3接合太陽電池が使用されています。

また、同様の化合物3接合にて集光型太陽電池の開発が進められています。レンズやミラーによって太陽光を500倍以上の光強度に集光し、小面積の太陽電池に照射して発電するシステムにより、太陽電池に要するコストを大幅に削減することができます。また、光照射強度の増加による開放電圧の増加により、太陽電池の変換効率が向上することも1つの利点になっています。非集光時

- ・セル面積：27.56cm²
- ・セル枚数：2176枚
- ・セル総面積：6m²
- ・セル効率：30%
- ・出力：1.8kW



図3 宇宙用太陽電池 (>1.8kW) を搭載した東海大学ソーラーカー (グローバルグリーンチャレンジ2010で優勝)

表1 宇宙用太陽電池と集光用太陽電池の概要比較

項目	宇宙用太陽電池	集光用太陽電池
変換効率	29% (AM0スペクトル宇宙光下)	31.5% (非集光) 40% (1000倍集光時)
セルサイズ	40mm × 70mm	7mm角、4.5mm角等
4"ウエハ内での配置		
トップセル厚	0.4 μm	0.8 μm
グリッド幅	6 μm	6 μm
グリッド高さ	6 μm	6 μm
グリッドピッチ	1mm	0.12mm
表面シート抵抗	600 Ω/□	300 Ω/□
トンネル接合ピーク電流	>0.1 A/cm ²	>100 A/cm ²

30%程度の効率が1000倍集光時に40%まで向上します。

表1は、宇宙用太陽電池と集光用太陽電池の構造、特性の比較等を示します。宇宙用太陽電池は紫外光を多く含む宇宙光に対して高効率になるように、また、宇宙空間で照射される放射線に対して劣化が小さくなるように、トップセルが薄くなっています。集光用太陽電池では、大電流発生によるエネルギー損失(I²R)を抑制するために、直列抵抗の低減が最も重要であり、電極設計最適化やトンネル接合ピーク電流の向上が図られています。

InGaP/(In)GaAs/Ge3接合型宇宙用太陽電池をソーラーカー用に東海大学に提供しました(図3)。フ

イルムでラミネートしたモジュールで、変換効率30%超(AM1.5スペクトル地上光下)を実現しました。豪州を縦断するグローバルグリーンチャレンジ(2009年10月末開催)にて優勝いたしました。車体の重量は約160kg、太陽電池のみの走行で95km/h、バッテリー併用で最高150km/hが可能とされています。

3 格子不整合型3接合太陽電池

上述の格子整合系3接合構造では、ボトムセルのバンドギャップが小さ過ぎることから、ボトムセルで発生する光電流がトップセルおよびミドルセルで発生する光電流より1.8倍程度も大きく、3接合セルの短絡電流値はトップセルおよびミドルセルの発生電流で制限されており、ボトムセルで発生した余分な電流は電力として取り出すことができません。つまり、格子整合型3接合構造(図4中の①)では、電流バランスの観点からバンドギャップの組合せは最適ではありません。トップ、ミドル及びボトムの3つのセルがトンネル接合によって直列に接続されたモノリシック構造では、3つのセルで発生する電流が等しくなるように電流バラ

ンスを図ることが高効率化のために重要です。3接合構造において電流バランスを達成して、より一層の高効率化を図るためには、トップセル及びミドルセルのEgを低下させた構造(図4中の②)、もしくは、ボトムセルのEgを増加させた構造(図4中重の③)が有望であると考えられます。図4に、代表的な3接合太陽電池のバンドギャップ(Eg)の組み合わせと格子定数の変化を示します。また、トップ、ミドル、およびボトムセルの電流および電圧についても示しています。②の構造では、短絡電流の向上による変換効率の向上が期待されますが、InGaPトップセルとInGaAsミドルセルがGeボトムセルに対して1.2%の格子不整合を有します。③の構造では、開放電圧の向上による効率向上が期待されますが、InGaAsボトムセルがトップセルおよびミドルセルに対して2%程度の格子不整合となります。いずれの場合も、現在主流の格子整合型(①)構造セルと比較して、バンドギャップ組合せの最適化により3-5%(絶対値)の変換効率の向上が期待されますが、格子不整合セルの結晶品質向上が重要な課題となります。

(1) 順積み格子不整合型

図4の②の構造の順積み格子不整合

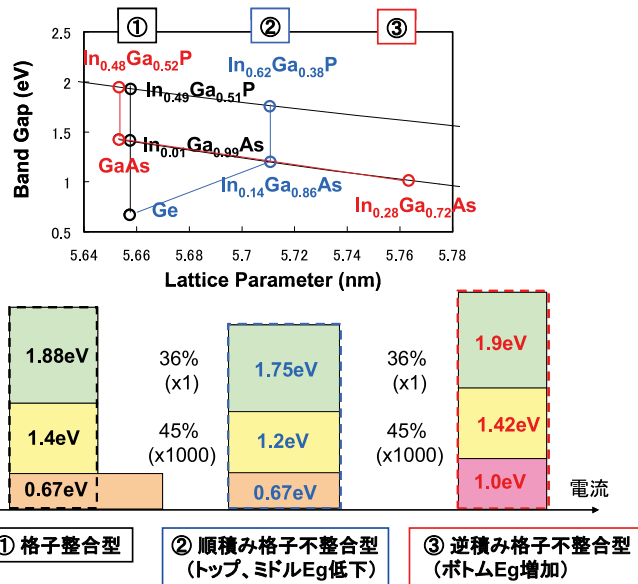


図4 代表的な3接合太陽電池のバンドギャップ(Eg)の組み合わせと格子定数の変化。(下図は、トップ、ミドル、およびボトムセルの電流および電圧を示す)

合型3接合セルでは、Ge(ボトムセル)基板上に格子不整合のIn_{0.17}Ga_{0.83}AsミドルセルおよびIn_{0.65}Ga_{0.35}Pトップセルがエピタキシャル成長されます。トップおよびミドルセルでは、格子不整合によるミスフィット転位の発生は避けられません。ミスフィット転位はダイオードの逆方向飽和電流を増加させ、開放電圧を僅かに(<50mV程度)低下させますが、量子効率への影響つまり短絡電流の低下は殆ど無いことが確認されています。よって、格子不整合系の太陽電池では、ミスフィット転位以

外の転位の伝播を防止することが重要であり、基板(兼ボトムセル)とミドルセルの間の格子定数を増加させるためのバッファ層の中で貫通転位を閉じ込めることが重要になります。ドイツのFraunhofer-ISEでは、順積み格子不整合型3接合セルで41.1%(454sun)の変換効率達成しています。

(2) 逆積み格子不整合型

図4の③の構造の逆積み格子不整合型3接合セルを実現するために、図5に示すような逆方向エピタキ

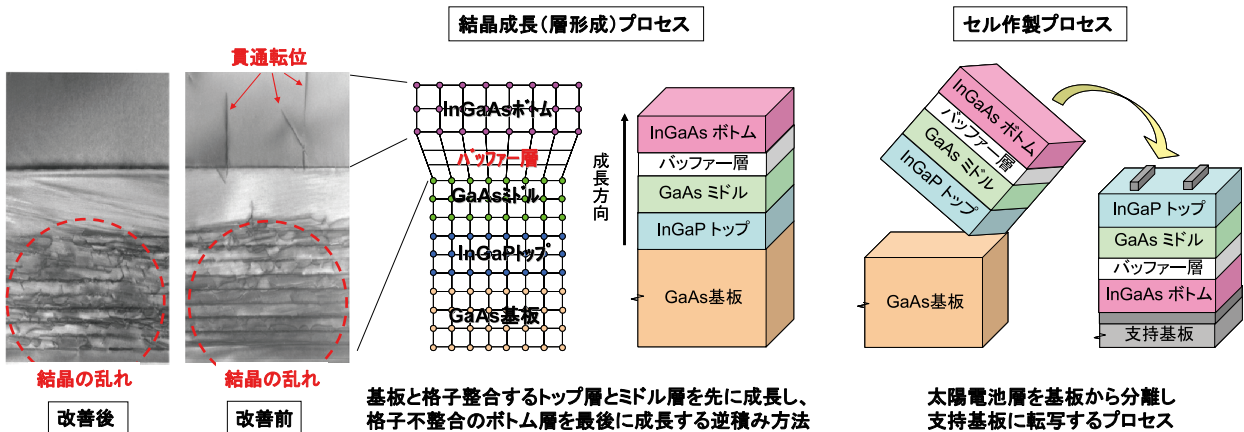


図5 逆積み格子不整合型3接合太陽電池の作製プロセス (バッファ層の改善による貫通転位の伝播抑制、逆積み成長法、太陽電池層の転写)

シャル成長プロセスとエピタキシャル成長層の転写プロセスを考案しました。GaAs基板上に、通常とは逆の順序で、格子不整合のボトムセルを最後に成長することで、格子整合系のトップおよびミドルセルの高品質結晶を維持することができます。太陽光はトップセルから入射するため、太陽電池層のボトムセル側に支持基板を貼り合せた後、GaAs基板を分離（現状ではGaAs基板を除去）します。

InGaAsボトムセルの最適なバンドギャップは0.97~1.0eVであり、基板との格子不整合度は約2%と大きくなります。ボトムセルでのミスフィット転位の発生は避けられませんが、格子定数を変化させるバッファ層の中で貫通転位を閉じ込め、ボトムセルに転位が伝播しな

いようにすることが課題となります。バッファ層からボトムセル層（Eg=0.97eV）の断面のTEM観察像（図5左）に示すように、バッファ層の改善前では、ボトムセルの中に伝播した貫通転位が見られますが、改善後は、バッファ層の中で多数の転位が効果的に閉じ込められ、ボトムセルの中に貫通転位の存在は認められません。バッファ層の改善前後で、ボトムセルで発生する電圧は0.52Vから0.57Vに向上しました。

図6に0.97eV-InGaAsのボトムセル用いて逆積み構造で作製したInGaP/GaAs/InGaAs3接合太陽電池のIVカーブ（産業技術総合研究所で測定）および分光感度特性を示します。0.97eVのボトムセルの感度波長は十分に広くトップセルおよびミドルセルと同等の光電流が得ら

れています。また、ボトムセルの電圧は0.57eV程度と高く、3接合セルの開放電圧は3Vを超える高い値となり、変換効率35.8%（非集光の世界最高記録）、が得られました。

4 逆積み格子不整合型3接合太陽電池の将来性

今回、世界最高効率を達成した逆積み格子不整合型3接合太陽電池は、将来、以下に示すような特長が期待されています。

(1) 集光による高効率化

従来構造において、非集光で31%の効率が、1000倍集光時に40%を超える効率まで向上した実績から、非集光で35.8%のセルで、集光時45%を超える効率実現の可能性が見えてきました。

(2) 新規用途対応

太陽電池層の転写プロセスにおいて、太陽電池層を放熱基板に転写することで高性能な集光セルが期待され、フレキシブルフィルム等に転写することで、軽量フレキシブルな太陽電池（宇宙用等）が期待されます。

(3) 省資源、低コスト化

太陽電池層をGaAs基板より分離し、支持基板に転写した後、GaAs基板を成長用に再利用することで、基板のコストが削減できます。太陽電池層は10μm以下の極薄層であるため、太陽電池の材料使用量を大幅に削減することが可能となります。

(4) 4接合化による高効率化

バンドギャップが0.65eV以下の材料（格子不整合材料もしくは多結晶材料等）から成る太陽電池を、逆積み方法+転写プロセスによって、3接合に追加することで4接合が可能となり、非集光で40%、集光時50%の高効率化が期待されます。

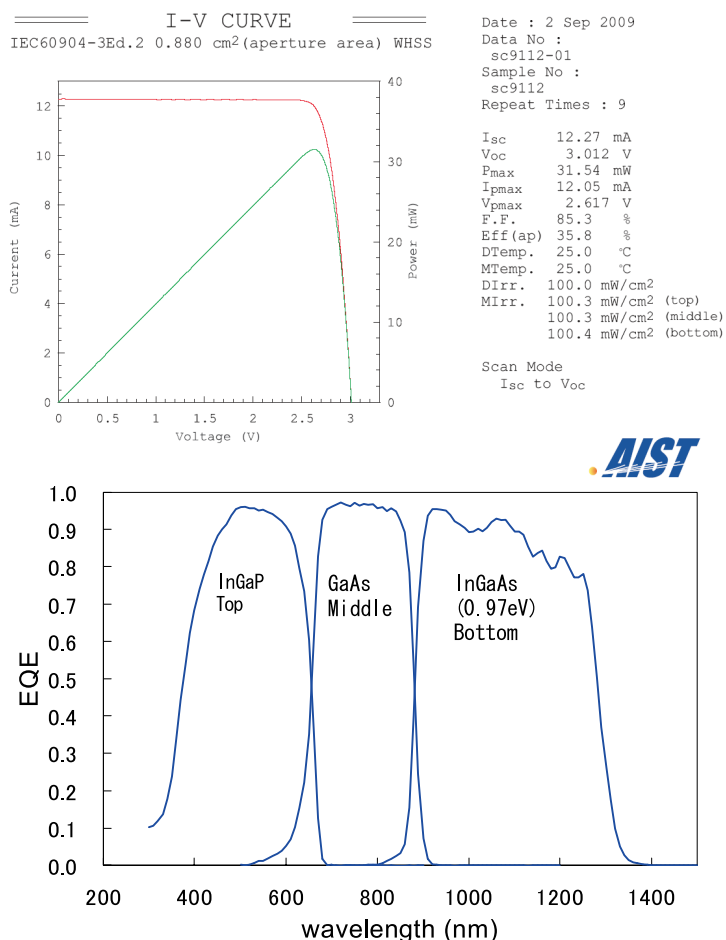


図6 35.8%（非集光での世界最高効率）を達成した逆積み格子不整合型3接合太陽電池のIVカーブ（産業技術総合研究所で測定）および分光感度特性