

# 集光型化合物太陽電池

Concentrator Compound Solar Cells

高本 達也  
Tatsuya Takamoto

兼岩 実  
Minoru Kaneiwa

## 要 旨

安価なレンズや鏡等で集光した太陽光を小面積の太陽電池でエネルギー変換する集光発電システムでは、太陽電池コストの削減は集光倍率の増加により可能となる。太陽光追尾装置や BOS コスト削減には太陽電池の効率向上による発電量の増加が最も効果的である。そのため、宇宙用太陽電池として商品化され、高い効率と信頼性を示す InGaP/(In)GaAs/Ge<sub>3</sub> 接合太陽電池を用いた集光システムが有望視されている。集光型太陽電池には、高電流密度に対応したデバイス構造や、光強度不均一やスペクトル変化への対応が要求される。

The cost of the cells in concentrator photovoltaic systems, which convert sunlight into energy after concentrating it using inexpensive lenses or mirrors, can be reduced by increasing the concentration ratio. And the costs of the tracker and BOS can be effectively reduced by an increase in photovoltaic power through improving the conversion efficiency.

Therefore, concentrator systems using InGaP/InGaAs/Ge triple-junction cells are getting attention, whereas they have already been put to commercial use in space and have proven their high efficiency and reliability. The concentrator cells require a special device structure for high current density and adaptability to non-uniform irradiation intensity and spectral changes.

## はじめに

集光型太陽電池を用いた集光発電システムでは、安価なレンズや鏡等で太陽光を集光し小面積の太陽電池で発電するため、高価な太陽電池の使用量を大幅に削減でき、さらに、(光電流/暗電流)比の増加により太陽電池の開放電圧が向上し変換効率が向上するといった利点を有する。集光システムは、太陽光を追尾する装置が必要であり、直達光(平行光線)しかレンズにより集光できないといった短所はあるものの、上記変換効率の向上や太陽光追尾による発電量の増加により、発電コスト(円/kWh)の低減が可能となる。

InGaP/(In)GaAs/Ge<sub>3</sub> 接合太陽電池は、高効率と高信頼性から、人工衛星の電源等の宇宙用太陽電池として商品化されているが、高価であることから、地上用発電システムに用いられることはなかった。高倍率集光システムの構想により、システムに占める太陽電池コストの大幅な削減が可能になったこと、追尾装置の発電コストを下げるためには、太陽電池の効率を向上さ

せ発電量を増加させることが不可欠であることから、InGaP/(In)GaAs/Ge<sub>3</sub> 接合太陽電池を用いた集光システムが有望視されている。

集光型太陽電池では、太陽電池受光面の数百倍の面積のレンズにより太陽光が集光されるため、短絡電流密度は非集光時の数百倍に増加する。したがって、太陽電池構造の改良が必要となり、特に、電極構造の改良による直列抵抗の低減が重要となる。また、太陽光をレンズにより集光する場合、レンズの色収差により照射光のスペクトルが大きく変化するため、スペクトル変化に対応した3接合型太陽電池の高効率化が重要な課題となる。

## 1. 集光型太陽電池の基本特性

集光式太陽電池の短絡電流密度、開放電圧および変換効率は、一般に、集光比に対し次式のような関係にある。

$$J_{sc2} = CR \times J_{sc1} \dots \dots \dots (1)$$

\* ソーラーシステム事業本部 ソーラーシステム開発センター 第二開発室

$$V_{OC1} = nkT/q \times \ln (J_{SC1}/J_0+1) \dots\dots\dots (2)$$

$$V_{OC2} = nkT/q \times \ln (J_{SC2}/J_0+1) \dots\dots\dots (3)$$

$$\eta_1 = J_{SC1} \times V_{OC1} \times FF_1 / P_{in1} \dots\dots\dots (4)$$

$$\eta_2 = J_{SC2} \times V_{OC2} \times FF_2 / (P_{in2} \times CR) \dots\dots\dots (5)$$

- CR : 集光比
- n, J<sub>0</sub> : ダイオード因子, 逆方向飽和電流値
- k, T, q : ボルツマン定数, 温度, 電荷
- J<sub>SC1</sub>, J<sub>SC2</sub> : 非集光時および集光時の短絡電流密度
- V<sub>OC1</sub>, V<sub>OC2</sub> : 非集光時および集光時の開放電圧
- FF<sub>1</sub>, FF<sub>2</sub> : 非集光時および集光時の曲線因子
- η<sub>1</sub>, η<sub>2</sub> : 非集光時および集光時の変換効率
- P<sub>in1</sub> : 非集光時の太陽光強度(100mW/cm<sup>2</sup>)

短絡電流密度J<sub>sc</sub>は集光比CRに比例して増加し、開放電圧V<sub>oc</sub>は集光比の対数に比例して増加する。また、曲線因子FFは直列抵抗やスペクトル変化による影響がなければV<sub>oc</sub>の増加に伴って増加する(FF<sub>2</sub>>FF<sub>1</sub>)ため、集光時の変換効率η<sub>2</sub>はV<sub>oc</sub>の増加およびFFの増加により増加することとなる。

図1は、Siセル、GaAsセルおよびInGaP/InGaAs/Ge3接合型セルの変換効率の集光比依存性および直列抵抗による変化を示す。Siセル、GaAsセル、3接合セルの各サブセルについて、暗所の電流電圧特性からダイオードパラメータを抽出し、等価回路から回路計算した結果である。直列抵抗Rsに依存した変換効率の

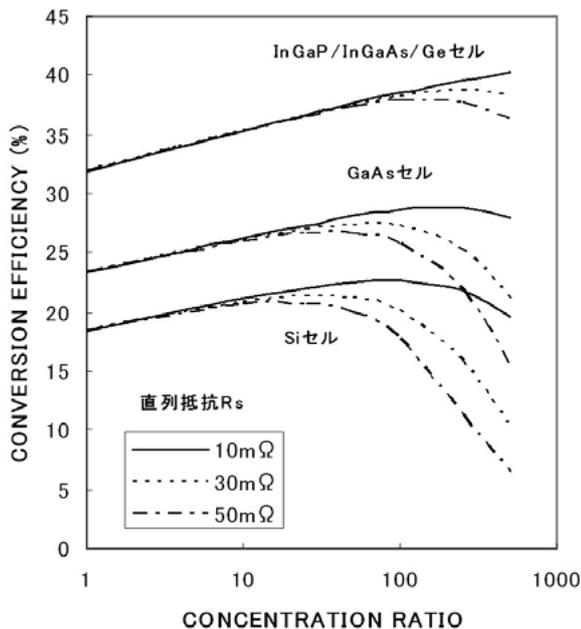


図1 Siセル、GaAsセルおよびInGaP/InGaAs/Ge3接合型セルの変換効率の集光比依存性および直列抵抗による変化

Fig.1 Conversion efficiency of Si, GaAs and InGaP/InGaAs/Ge triple-junction cells with various series resistance as a function of concentration ratio.

低下は、電流の増加によるエネルギー損失(I<sup>2</sup>R)によるFFの低下によるものであり、短絡電流密度の大きいSiセルほど大きくなっている。つまり、太陽光スペクトルを3分割する3接合型セルの短絡電流密度は小さいため、I<sup>2</sup>Rによるエネルギー損失は小さく、より高い集光比まで変換効率は増加することができる。実際のセルの直列抵抗を0にすることは不可能であり、10mΩ程度が現実味のある値であるとしたら、集光による変換効率の増加は、Siセルで4%、GaAsセルで5%、3接合型セルで8%程度となる。このように、短絡電流密度の小さい3接合型セルは高倍集光式太陽電池に最も適しているといえる。

## 2. InGaP/(In)GaAs/Ge3 接合太陽電池の概要

図2にInGaP/InGaAs/Ge3接合型セルの断面構造を示す<sup>1)</sup>。InGaPトップセルは660nm以下、InGaAsミドルセルは660nm～890nm、Geボトムセルは890nm～2000nmの波長領域の光をエネルギー変換する。3つの太陽電池はトンネル接合を介して直列に接続されており、開放電圧は3つのセルの起電圧の和になり、短絡電流は(各セルの接合にリークがなければ)起電流の最小値に制限される。

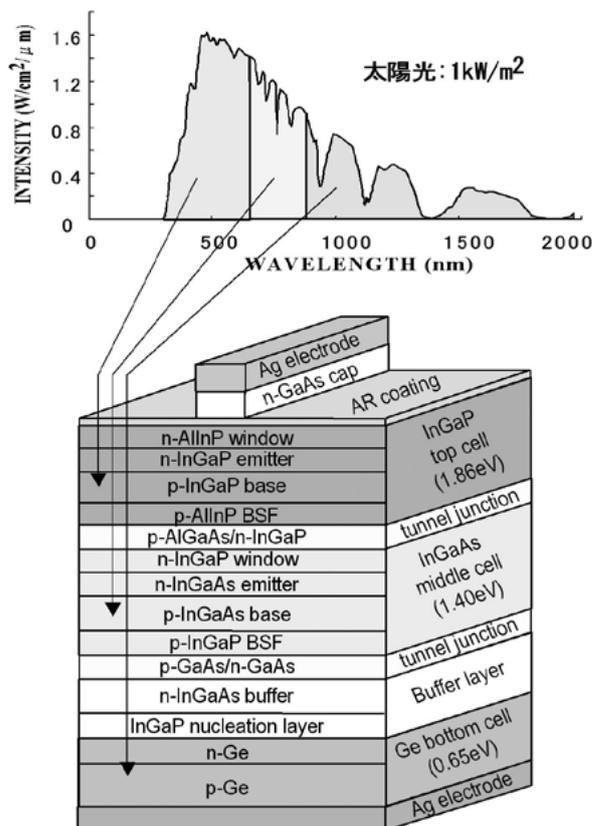


図2 InGaP/InGaAs/Ge3 接合型セルの断面構造およびエネルギー変換する波長域

Fig.2 Schematic of InGaP/InGaAs/Ge triple-junction cell.

### 3. 電極構造の設計

大電流が発生する集光型太陽電池では、直列抵抗の低減が重要な課題である。InGaP/InGaAs/Ge3接合太陽電池における主な直列抵抗成分は、(1)受光面グリッド電極の抵抗（接触抵抗を含む）、(2)受光面グリッド電極間の横方向の抵抗、(3)トンネル接合や各層の縦方向の抵抗、および(4)裏面電極の抵抗である。その内、グリッド電極の接触抵抗は、作製可能なグリッド電極の幅では無視できるほど小さくなる。また、裏面電極は全面に形成され、全面から電流が取り出されるため、裏面電極に関連する抵抗は無視できる。トンネル接合の抵抗はトンネルピーク電流密度と深く関係している。トンネル接合に流れることのできる電流（ピーク電流密度）を短絡電流密度よりも十分に大きくするために、トンネル接合を形成するp層およびn層のキャリア濃度を最大限に増加させている。図2の構造において、トップセルおよびミドルセルを接続するAlGaAs/InGaPトンネル接合のピーク電流密度は110A/cm<sup>2</sup>、ミドルセルおよびボトムセルを接続するGaAs/GaAsトンネル接合のピーク電流密度は500A/cm<sup>2</sup>以上であり、直列抵抗はかなり低い値になっている。

図3は、グリッド電極間隔を変化させた場合の直列抵抗成分および電極によるシャドー損失の変化を示す。グリッド電極の間隔を狭めることで、グリッド電極自体の総抵抗とグリッド電極間の抵抗を低減することができるが、その一方で、光入射を遮る電極の占有面積の増加によりシャドー損失が増加する。トンネル接合およびその他の抵抗はグリッド間隔に依存せず一定である。図3には、くし型および十字型のグリッドパターンによる直列抵抗の違いも示す。くし型ではグリッドによって収集された電流は2方向から取り出されるが、十字型では4方向から取り出されるため、グリッド電極自体の抵抗を半分以下にすることができる。十字型のグリッドパターンにてグリッド電極間隔を120μmに設計することで、直列抵抗は約10mΩまで低減され、シャドー損失を約4.5%程度に抑えることができた。

### 4. スペクトル変化による影響

波長を3分割してエネルギー変換するInGaP/(In)GaAs/Ge3接合型太陽電池では、スペクトルの変化によって出力特性が大きく変化する。集光型太陽電池（セル）にレンズによって集光した光を照射するが、一般的なレンズでは、短波長光ほど短い距離で、長波長光ほど長い距離で焦点を結ぶため、図4に示すように、InGaPトップ、GaAsミドルおよびGeボトムセルそれ

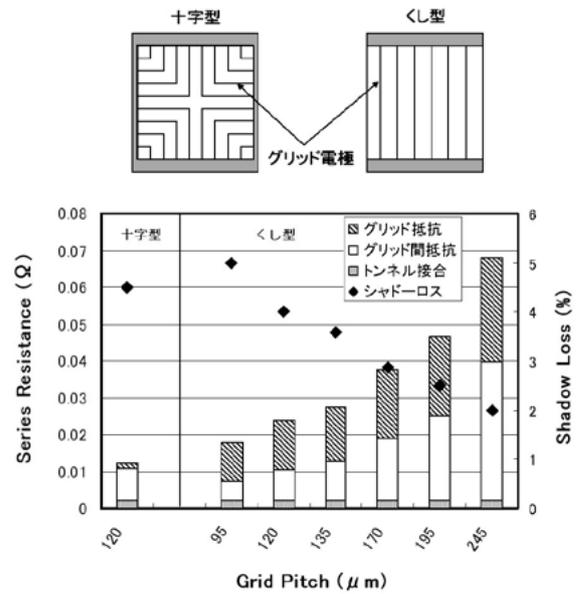


図3 グリッド電極間隔を変化させた場合の直列抵抗成分および電極によるシャドー損失の変化およびくし型および十字型のグリッドパターンによる直列抵抗の違い  
Fig.3 Series resistance of each element in a cell with various grid pitches and shadow loss due to grid area, for different grid patterns.

ぞれで吸収される光の量はレンズとセルの距離によって大きく変化する<sup>[2]</sup>。3接合型太陽電池は、レンズ自体の光学特性やレンズとセルの距離の調整によって独特な特性変化を示す。

集光型太陽電池に照射される光の強度面内分布や分光スペクトルは、セルの受光面積やレンズの光学設計によって変化するが、ZEMAX等の光学設計ソフト

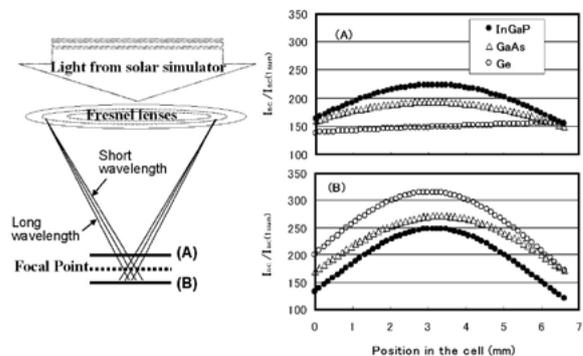


図4 2つの異なるレンズ-セル間距離（AおよびB）におけるInGaPトップ、GaAsミドルおよびGeボトムセルの電流増加率  
Fig.4 Increase in generated current for InGaP top, GaAs middle and Ge bottom cells at different distances between cell and lenses, A and B.

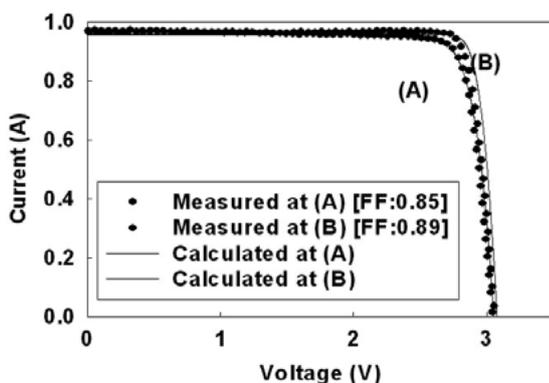
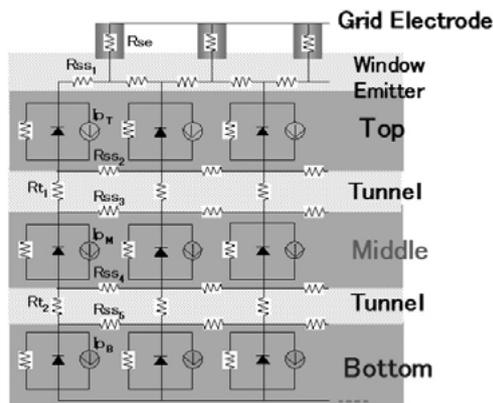


図5 集光セル特性を解析するための2次元分布型の等価回路 (a) およびその等価回路を用いて SPICE 法によって計算した A および B のレンズ-セル間距離における IV カーブの実測値との比較

Fig.5 Two dimensional equivalent circuit for analysis of concentrator operation (a) and IV curves at different distances between cell and lenses, A and B, calculated by SPICE method and comparison with experimental result.

により計算し予測することが可能である。一方、セル特性の変化は図5に示すような2次元分布型の等価回路(グリッド毎に3接合型太陽電池の等価回路が構築され横方向に接続されている)によって計算し予測することができる。図5中のグラフは、図4に示す集光光を入射させた場合のIV特性の実測値と、2次元分布型の等価回路を用いてSPICEにより計算したIV特性の比較を示す。実測値と計算結果とはほぼ一致しており、(A)および(B)のレンズ-セル間距離において、短絡電流値はほぼ同じであるが曲線因子FFが異なる様子がうまく計算されている。(B)の位置では、Geボトムセルで吸収される長波長光の強度が低くGeセルで発生する起電流が小さく、かつ、Geセルのpn接合には逆バイアスに対してリークがあるために、最大電力動作点付近でGeセルのIVカーブの形が現れている。

### 5. 集光特性

集光倍率を変化させInGaP/InGaAs/Ge3接合型太陽電池のIV特性を評価した。ソーラーシミュレーターからのAM1.5G基準光をフレネルレンズにより集光し、受光面7mm角の集光セルに照射した。光照射によるセルの温度上昇を抑制するために、セルの裏面電極は25℃に温調した銅板にハンダによって貼り付けた。開放電圧、曲線因子および変換効率の集光倍率依存性を図6に示す。集光倍率は3接合セルの短絡電流の増加率で定義した。開放電圧は(1)式に基づき集光倍率の対数に比例して増加したが、100倍を超える集光比では、開放電圧の増加が少なくなった。これは、集光光照射時のセル温度上昇による開放電圧の低下(約-60mV/℃)が原因であると考えられ、今後、セル裏面からの放熱促進、測定時の光照射時間の短縮が課題となる。また、曲線因子は100倍を超える集光比より低下した。これは、直列抵抗による影響で、今後、更なる直列抵抗の低減が課題となる。非集光時約30%の変換効率が100~500倍集光時には37%以上に向上することがわかった。

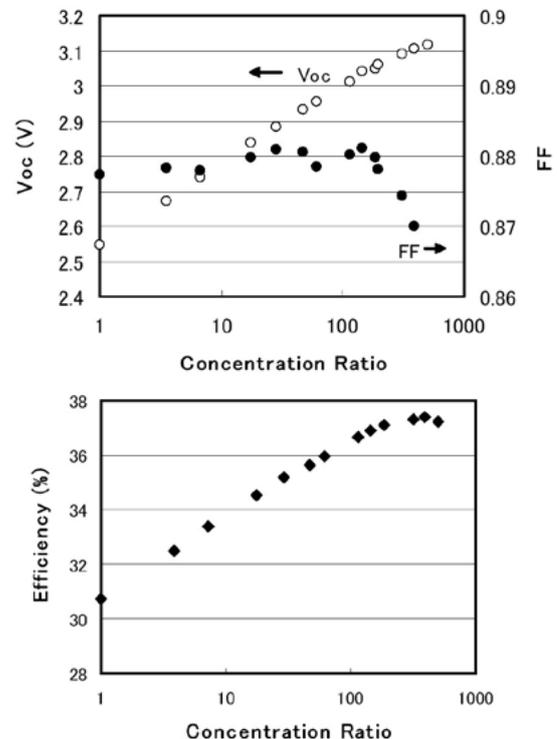


図6 InGaP/InGaAs/Ge3 接合セルの開放電圧、曲線因子および変換効率の集光倍率依存性

Fig.6 Change in open-circuit voltage, fill factor and conversion efficiency of an InGaP/InGaAs/Ge triple-junction cell as a function of concentration ratio.

## むすび

集光発電システムでは、リサイクルが可能なプラスチックや金属が大半を占めていることや、それらの製造エネルギーが比較的小さくエネルギー回収期間が短いといった長所も有する。高効率InGaP/InGaAs/Ge<sub>3</sub>接合太陽電池を用いた集光発電システムは、集光倍率の増加による太陽電池コストの低減、変換効率向上による追尾・BOSコストの低減により、実用化が期待される。年間を通じての発電量を向上させることが最も重要な課題であり、太陽電池の変換効率の向上のほかに、地域や季節によるスペクトル変動に対応した太陽電池構造の最適設計が必要であると考えられる。

## 謝辞

本研究の一部は新エネルギー・産業技術総合開発機構から委託されて実施したものであり、関係各位に感謝致します。

## 参考文献

- [1] T. Takamoto, T. Agui, M. Kaneiwa, K. Kamimura, M. Imaizumi, S. Matsuda and M. Yamaguchi, "MULTIJUNCTION SOLAR CELL TECHNOLOGIES – HIGH EFFICIENCY, RADIATION RESISTANCE, AND CONCENTRATOR APPLICATIONS", Proc. of the 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka, p. 581 (2003).
- [2] K. Nishioka, T. Takamoto, T. Agui, M. Kaneiwa, Y. Uraoka and T. Fuyuki, "Evaluation of InGaP/InGaAs/Ge Triple-Junction Solar Cell under Concentrated Light by Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis", Jpn J. of Appl. Phys., Vol. 43, No. 3, p. 882 (2004).

(2005年9月28日受理)