

化合物半導体太陽電池

山 口 真 史

Compound Semiconductor Solar Cells

Masafumi YAMAGUCHI

Compound semiconductor multi-junction (tandem) solar cells have the potential for achieving conversion efficiency of over 40% and are promising for space and terrestrial applications. In fact, the commercial satellites with 2-junction InGaP/GaAs-on-Ge solar cell arrays were launched in 1997. In this paper, present status of high-efficiency compound semiconductor solar cells is reviewed and key issues for realizing high-efficiency are also shown. Future prospects for realizing high-efficiency and low-cost multi-junction solar cells are also presented.

Key words: solar cells, compound semiconductors, high-efficiency, radiation-resistance

元素周期表Ⅲ族元素（ガリウム Ga，インジウム In）と V 族元素（リン P，ヒ素 As）から構成される半導体，たとえば，ヒ化ガリウム (GaAs)，リン化インジウム (InP) などのⅢ-V 族化合物半導体で構成される太陽電池がある。GaAs や InP 太陽電池は，高効率で放射線耐性にすぐれていることから，宇宙用太陽電池として実用化されている。宇宙用太陽電池は，地上用太陽電池と異なり，高真空下で放射線に曝され，熱サイクルを受け，厳しい環境で動作することが求められる。特に，バンアレン放射線帯の高エネルギーの電子線や陽子線により，半導体内に格子欠陥が発生する結果，太陽電池の出力低下を招くわけで，宇宙用太陽電池には，太陽電池アレイの小面積化・軽量化の点からの高効率化の要求と同時に耐放射線性が要求される。米国の人工衛星バンガード 1 号以来，単結晶シリコン (Si) セル（以下，太陽電池をセルと略す）が使用されてきたが，高効率，耐放射線損傷特性にすぐれた GaAs セルが 1985 年ころから実用化され，次いで Ge 基板上の GaAs セルが主流となり，1997 年には，Ge 基板上の InGaP/GaAs 2 接合セルが実用化されるに至っている。

従来，Ⅲ-V 族化合物半導体太陽電池は，高性能だが価格

が高いことから地上での電力用太陽電池としての実用化は難しいと考えられていたが，現在研究開発が進められているⅢ-V 族化合物半導体で構成される多接合セルを用いた集光型太陽電池は，第 I 世代の結晶 Si 太陽電池，第 II 世代の薄膜太陽電池に続く，第 III 世代太陽電池として注目される。太陽光発電は急速な進展をみせているが，今後さらなる太陽光発電システムの導入普及のためには，Si 結晶材料の安定供給や高効率・低コスト太陽電池の実現が重要である。こうした課題を解決する手段として，太陽電池材料の技術開発や薄膜太陽電池とともに，超高効率集光型太陽電池の適用が考えられる。

1. 化合物半導体の太陽電池用材料としての特徴

化合物半導体太陽電池は，その基礎物性により，Si 太陽電池と比較して，以下の特徴を有している。

- ① 高効率が期待できる：太陽電池の光電変換の理論効率は，半導体の禁止帯幅に依存する。太陽光スペクトルとの整合の点から，1.4~1.5 eV（電子ボルト）程度の禁止帯幅を有する半導体が，高効率太陽電池材料として適している。禁止帯幅 1.1 eV の Si に比べて，

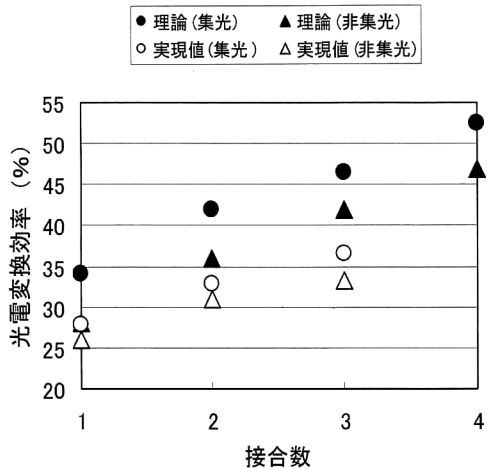


図1 非集光および集光型太陽電池の変換効率の接合数依存性。図には、理論変換効率および実現している効率を示す。

1.42 eV の GaAs や 1.35 eV の InP などの化合物半導体材料で高効率が可能である。単接合（半導体接合が1つ）のセルで変換効率 26~28% の実現が期待できる。

- ② 光の吸収係数が高く、薄膜化に適している：Si は、間接遷移型のエネルギー帯構造のため、光吸収係数が小さく、太陽光を十分に吸収するためには、100 μm 以上の厚さが必要であるのに対して、化合物半導体の多くは直接遷移型で、光吸収係数が大きいため、数 μm 程度の厚さがあれば、十分高い効率が期待できる。太陽電池を薄くできることは、材料、製造時の電力の節約を可能とする。
- ③ 耐放射線損傷特性を有している：一般に、動作領域が浅いことと直接遷移型であるため少数キャリア拡散長が短く、耐放射線性が期待できる。これにより、化合物半導体太陽電池、特に、III-V 族化合物半導体太陽電池は、宇宙用太陽電池として期待される。
- ④ 温度特性にすぐれ、集光動作（レンズ等により太陽光を集め、太陽電池材料を少なく済ませる技術）に適している：Si よりも禁止帯幅の大きい化合物半導体では、高温動作時でも、暗電流の変化が小さく、太陽電池効率の減少が小さい。したがって、集光動作時における温度上昇の影響は少なく、1000 倍以上の高集光動作も可能である。
- ⑤ 波長感度の広帯域化による高効率化が期待できる：各種半導体の組み合わせにより波長感度の広帯域化が可能で、さらなる高効率化が期待できる。禁止帯幅の異なる複数の太陽電池層を積層した多接合（タンデム）構造により、例えば 2 接合、3 接合セルの非集光動作で、おのおの 36%、42% の高効率が可能である。図

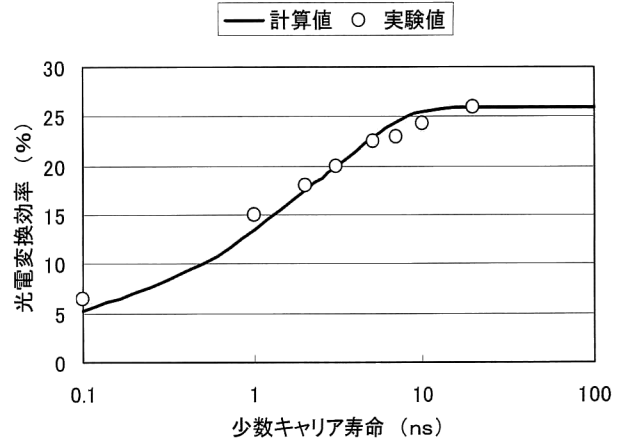


図2 GaAs 単接合太陽電池の変換効率の少数キャリア寿命依存性に関する計算結果と実験結果。

1には、非集光および集光型太陽電池の変換効率の接合数依存性を示す。図には、理論変換効率および実現している効率を示す。

2. 化合物半導体太陽電池の高効率化の研究開発状況

2.1 単接合太陽電池の接合構成と製造法の進展

GaAs や InP の禁止帯幅 (E_g) はそれぞれ 1.42 eV、1.35 eV で、高効率に最適な $E_g=1.4\sim 1.5$ eV に近いことから、高効率の特徴を有し、放射線耐性も結晶 Si よりすぐれていることから、宇宙用太陽電池には大部分 III-V 族化合物半導体セルが用いられている。化合物半導体太陽電池の高効率化には、種々のアプローチがある。図 2 に示すように、化合物半導体結晶の品質を向上させ、高い少数キャリア寿命を得ることが基本ではあるが、素子構造についても、半導体表面の表面再結合を解決するために、ホモ接合からヘテロフェイス構造を経てダブルヘテロ (DH) 接合構造と多くの試みがなされている。

GaAs 太陽電池は、古く 1956 年に最初の作製が試みられた。GaAs の表面再結合速度は $10^6\sim 10^7$ cm/s と大きく、熱拡散による深い p-n 接合のため、得られる変換効率は 6.5% と低かった。結晶表面でのキャリア再結合による効率低下を避ける構造として、ヒ化アルミニウム・ガリウム (AlGaAs) の窓層効果を利用した AlGaAs-GaAs のヘテロフェイスセルが、1970~1972 年に Ioffe Physics Institute や IBM から提案されて以来、宇宙用太陽電池への適用をねらいとして精力的な研究開発が進められた。ホモ p-n 接合構造では、20% 以上の高効率を得るには接合深さを 50 nm 以下に浅くする必要があるが、ヘテロフェイス構造では、広い禁止帯幅の窓層の挿入により、接合深さ設定の自由度が増し高効率化が実現できている。その後、マサチュ

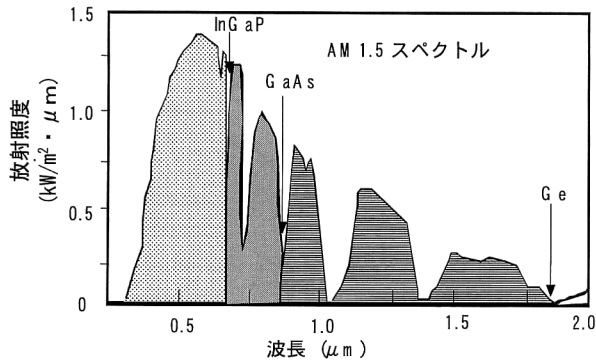


図3 太陽光スペクトルと多接合構造太陽電池材料による波長感度帯域の拡大のイメージ。

ーセツ工科大学 (MIT) によって、p-n 接合の両側を禁止帯幅の広い材料でサンドイッチした DH 接合構造などが提案され、単一接合セルの高効率化がはかられている。DH 接合構造では、ヘテロフェイス構造の窓層効果に加えて、裏面電界 (BSF) 効果が期待できる。研究段階では、住友電工により GaAs 基板上の GaAs の DH 接合構造セル (面積 25 cm²) で変換効率 26.0% が得られている²⁾。現在は、軽量で安価なゲルマニウム (Ge) 基板上の GaAs セルが宇宙用として実用化されている。

太陽電池製作には、従来、液相エピタキシャル (LPE) 成長法が用いられてきたが、多層成長が可能で面積化、量産化が期待できる有機金属気相成長 (MOCVD) 法が主流となった。

2.2 多接合構造太陽電池による高効率化

単接合セルでは、光電変換効率 26~28% が限度である。さらに高効率化をはかるためには、太陽光スペクトルを有効に活用する必要がある。図 3 には、太陽光スペクトルと多接合構造太陽電池材料による波長感度帯域の拡大のイメージを示す。太陽光スペクトルは、波長 0.3 μm から 2 μm まで及ぶ。GaAs 単一接合セルでは波長 0.4 μm から 0.85 μm までしか利用できないが、3 接合セルを例にすると、図 3 に示すように、いちばん上層の InGaP トップセルは波長

0.3 μm から 0.65 μm をカバーし、中間の GaAs ミドルセルは波長 0.65 μm から 0.85 μm を、いちばん下層の Ge ボトムセルは波長 0.85 μm から 1.8 μm をカバーし、広帯域化をはかっている。3 接合セルでは、42% の高効率³⁾が期待でき、本構造を構成できるのも化合物半導体の特徴のひとつである。

多接合構造太陽電池の研究開発初期は、MIT, RTI (Research Triangle Institute), NTT や NREL (National Renewable Energy Laboratory) の貢献が大きかった。特に、モノリシック型多接合セルの実現は、NREL によるヒ化アルミニウム・ガリウム (AlGaAs) に代わる高品質 InGaP トップセル材料の提案⁴⁾と、NTT による複数のセルの接続にすぐれたトンネル接合の提案⁵⁾によるところが大きい。ジャパンエナジー、住友電工と豊田工大の共同研究の成果として、InGaP/GaAs//InGaAs の 3 接合セルで、33.3% の世界最高効率⁶⁾が得られている。図 4 には、世界最高効率の InGaP/GaAs//InGaAs メカニカルスタック 3 接合セルの構造と電流-電圧特性を示す。

また、多接合セルのトップセル材料 InGaP やボトムセル材料 InGaAsP の放射線劣化が、太陽光照射や順方向バイアスの少数キャリア注入により回復することが見いだされている⁷⁾。InGaP/GaAs/Ge 2, 3 接合セルは、すでに宇宙用太陽電池として実用化されており、GaAs-on-Ge セルと InGaP/GaAs/Ge 2, 3 接合セルを含めた III-V 族化合物系宇宙用太陽電池の生産量は、年 1 MW 程度である。

3. 化合物半導体太陽電池の低コスト化のアプローチ (集光型太陽電池技術とその現状)

レンズや反射鏡を用いた太陽光の集光技術は、太陽電池の変換効率向上に加え、太陽電池材料使用量の飛躍的削減が可能で、省資源化、低コスト化が期待できる。特に大面積基板が得られにくく高価である III-V 族化合物半導体を用いた超高効率太陽電池においてきわめて有用であり、低コスト化の実現は、集光動作なしにはありえないとって

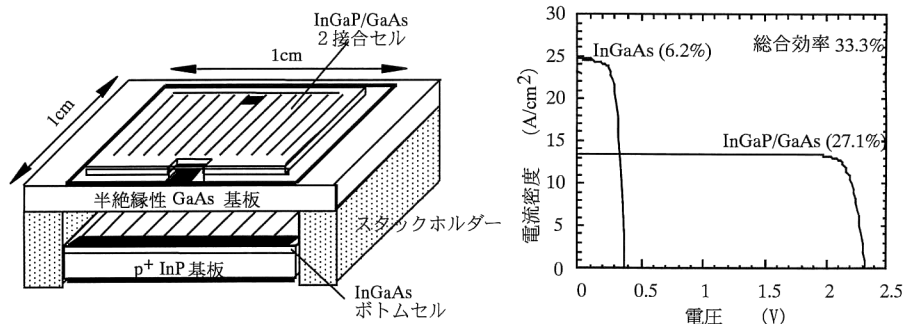


図 4 世界最高効率の InGaP/GaAs//InGaAs メカニカルスタック 3 接合セルの構造と電流-電圧特性。

も過言ではない。また、III-V族化合物半導体セルは、高効率であるとともに、集光動作時の温度上昇による効率低下がSiセルより少なく、約1000倍の高集光動作も期待できる。もちろん、結晶Si太陽電池においても、原料入手難の解消ばかりでなく、低コスト化にも有効である。図5は、集光型太陽電池を用いた集光式太陽光発電システムのコスト試算結果の一例⁹⁾を示す。100~500倍集光により、低コスト化が期待でき、集光システムは魅力ある太陽光発電システムであると考えられる。

集光動作の場合、2端子(モノリシック型)2接合セルの最適な禁止帯幅の組み合わせは、非集光(1-sun, 通常, 地上用の光強度100 mW/cm², 宇宙用で135 mW/cm²に相当)の場合より低エネルギー側にずれる。500倍集光(500-sunsともいう)で、1.54 eV(トップセル)/0.94 eV(ボトムセル)および1.42 eV(トップセル)/0.72 eV(ボトムセル)で、おのおの効率42%, 41%が期待できる。この結果を受けて、NRELでは、InP/GaInAsモノリシック2接合太陽電池の50倍集光で効率31.8%を得ている。高倍率集光に適用するには、トンネル接合特性の改良, 直列抵抗の低減が必要である。また、最近の成果として、シャープ、大同特殊鋼、大同メタルの日本のプロジェクトでは、InGaP/InGaAs/Ge3接合セルの100倍集光で変換効率36%以上を実現し⁹⁾、今後が期待される。

4. 今後の展望

多接合構造太陽電池の高効率化は着実に進展している。Ge基板上のInGaP/GaAs2接合セルやInGaP/GaAs/Ge3接合セルは、宇宙用太陽電池としての量産化が進展しており、事実、すでに2接合セルを搭載した最初の衛星が打ち上げられている。今後も、III-V族太陽電池は、宇宙用太陽電池として実用されてゆこう。

図1に示したように、さらなる高効率化も進められよう。次世代超高効率太陽電池として、3, 4接合構造太陽電池の集光動作が考えられる。3接合構造太陽電池としては、理想的には禁止帯幅1.93 eV/1.42 eV/1.05 eV材料の組み合わせがよいが、格子整合を考慮するとInGaP/InGaAs/Ge構成が現実的である。4接合構造太陽電池としては、2 eV/1.42 eV/1.05 eV/0.7 eVの組み合わせで高効率が期待でき、(Al)InGaP/GaAs/1.0 eV/Geなどの構成が考えられる。禁止帯幅1.0~1.05 eVの材料として、新材料の開発が必要である。NRELによる3, 4接合構造太陽電池の変換効率に関する数値解析¹⁰⁾によれば、3接合セルの理論変換効率は、AM 1.5 D(AMはエアマスといい、直達日射が通過する大気量のことで、AM 1.5は地上基準太陽光を示す)

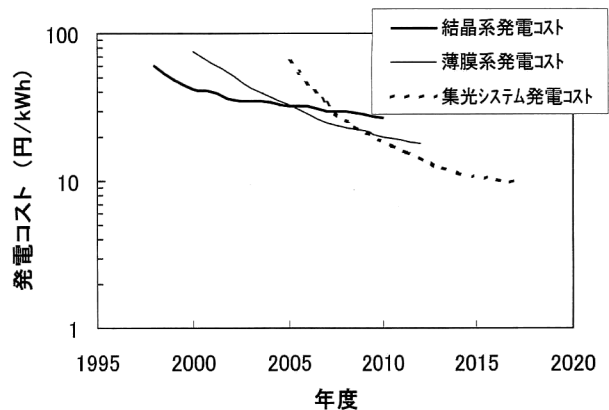


図5 結晶Si, 薄膜および集光型太陽電池を用いた太陽光発電システムの電力コストの年次推移に関する試算結果。

の500倍集光, AM 0(大気圏外の宇宙基準太陽光を示す)の1-sunで、おのおの46.5%, 38.5%である。また、4接合セルの理論変換効率は、AM 1.5 Dの500倍集光, AM 0の1-sunでおのおの52.5%, 40.5%である。すなわち、多接合セルの集光動作により変換効率47%程度の超高効率化が期待できる。高効率太陽電池実現のための禁止帯幅1.0~1.05 eVの材料として、GaAsやGe基板に格子整合したGaInNAs, BInGaAsや格子不整合系InGaAs(P)などの検討が必要である。さらなる高効率化のためには、成長条件, プロセス条件, 材料物性やデバイス構造の詳細な解析が重要である。Ge基板上の3~4接合セルの実現, Si基板上のヘテロエピタキシャル成長におけるブレイクスルー技術の創出が望まれる。

図5に示したように、集光型太陽電池を用いた集光式太陽光発電システムは低コスト化が期待でき、第I世代の結晶Si太陽電池, 第II世代の薄膜太陽電池に加え、第III世代の太陽光発電システムとして、集光型太陽電池を期待したい。

文 献

- 1) M. Yamaguchi: "III-V compound multi-junction solar cells: Present and future," Sol. Energy Mater. Sol. Cells, **75** (2003) 261-269.
- 2) A. Moto, S. Tanaka, T. Tanabe and S. Takagishi: "GaInP/GaAs and mechanically stacked GaInAs solar cells grown by MOCVD using TBAs and TBP as V-precursors," Sol. Energy Mater. Sol. Cells, **66** (2001) 585-592.
- 3) J. C. Fan, B.-Y. Tsaun and B. J. Palm: "Optimal design of high-efficiency tandem cells," Proceedings of the 16th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (IEEE, New York, 1982) pp. 692-702.
- 4) J. M. Olson, S. R. Kurtz, A. E. Kibbler and P. Faine: "A 27.3-percent efficient GaInP/GaAs tandem solar-cell," Appl. Phys. Lett., **56** (1990) 623-625.
- 5) C. Amano, H. Sugiura, A. Yamamoto and M. Yamaguchi:

- “20.2% efficiency AlGaAs/GaAs tandem solar cells grown by MBE,” *Appl. Phys. Lett.*, **51** (1987) 1998-2002.
- 6) T. Takamoto, E. Ikeda, T. Agui, H. Kurita, T. Tanabe, S. Tanaka, H. Matsubara, T. Mine, S. Takagishi and M. Yamaguchi: “InGaP/GaAs and InGaAs mechanically-stacked triple-junction solar cells,” *Proceedings of the 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference* (IEEE, New York, 1997) pp. 1031-1034.
- 7) M. Yamaguchi, T. Okuda, S. J. Taylor, T. Takamoto, E. Ikeda and H. Kurita: “Superior radiation-resistant properties of InGaP/GaAs tandem solar cells,” *Appl. Phys. Lett.*, **70** (1997) 1566-1568.
- 8) T. Takamoto, T. Agui, K. Kamimura, M. Kaneiwa, M. Imazumi, S. Matsuda and M. Yamaguchi: “Multijunction solar cell technologies—High efficiency, radiation-resistance, and concentrator applications,” *Proceedings of the 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-3)* (2003) (to be published).
- 9) K. Araki, M. Yamaguchi, T. Takamoto, E. Ikeda, T. Agui, H. Kurita, K. Takahashi and T. Unno: “Characteristics of GaAs-based concentrator cells,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **66** (2001) 559-565.
- 10) S. R. Kurtz, D. Myers and J. M. Olson: “Projected performance of three- and four-junction devices using GaAs and GaInP,” *Proceedings of the 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference* (IEEE, New York, 1997) pp. 875-878.

(2003年7月31日受理)