

特集

太陽電池実用化の取り組み

セル高効率化技術の開発動向

③化合物半導体系セル

Compound Semiconductor Solar Cells

山口 真 史*

Masafumi Yamaguchi

1. はじめに

太陽電池材料は結晶SiやアモルファスSiの他、GaAsやInPなどのIII-V族化合物半導体、CdTeやCdSなどのII-VI族化合物半導体と広範囲にわたっている。従来、III-V族化合物半導体太陽電池は、高性能だが高いことから実用化は難しいと考えられていた。しかし、GaAsやInPセルは宇宙用として実用化されるに至っている。さらに、低価格化を狙った薄膜太陽電池や超高効率化を狙った多接合構造太陽電池などの新しい技術も開発されつつあり、化合物半導体太陽電池の研究開発も着実に進展している。

表1に、III-V族化合物半導体太陽電池の研究開発

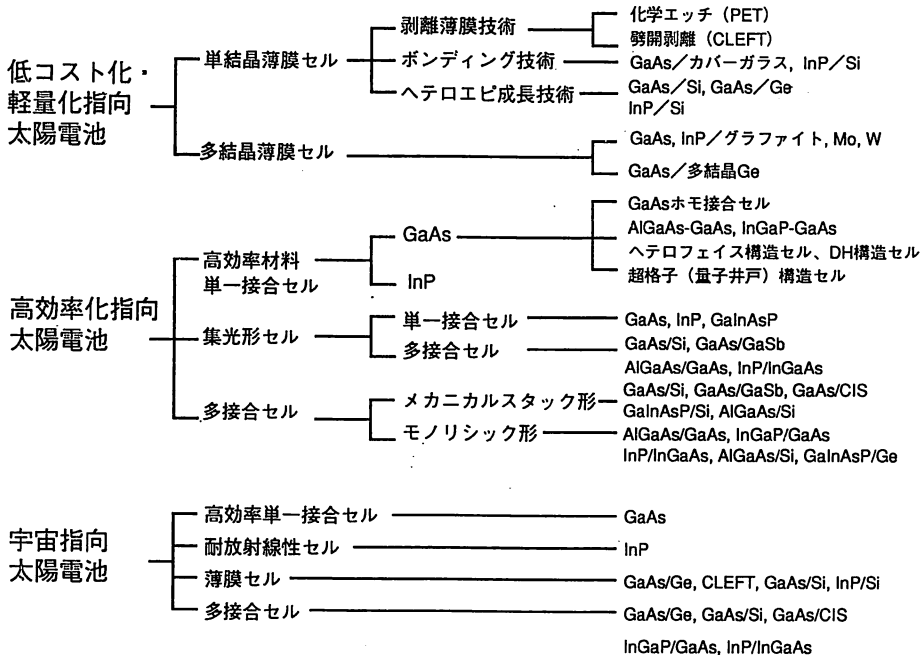
内容¹⁾を示す。化合物半導体太陽電池の研究開発の流れは、下記のように分類される。

- ①民生機器や電力用として、低価格のもの
 - ②高効率化の極限を追求したもの
 - ③宇宙用として、高効率で放射線に対して強いもの
- 本稿では、III-V族化合物半導体太陽電池の高効率化技術を中心に、その開発動向、応用例と今後の課題について述べる。

2. 高効率太陽電池の研究開発動向

III-V族化合物半導体太陽電池の最も優れた点は、GaAsやInPなどの禁止帯幅が太陽光スペクトルに整合した最適な値に近く、光電変換効率が高いことで

表1 III-V族化合物半導体太陽電池の研究開発内容¹⁾



* NTT 光エレクトロニクス研究所主幹研究員
〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方白根162

表2 III-V族化合物半導体太陽電池の損失要因と
高効率化の手法

	損失要因	改善策
真性損	透過損失	タンデム化
	過剰励起損失	
外因性	光の反射損	多層反射防止膜 Textured Surface
	光の透過損	BSR構造, Bragg反射構造
	シャドローイング損	電極形状最適化
損失	バルク再結合損	ドーピング不純物最適化 結晶欠陥, 深い不純物の低減
	表面, 界面, 裏面再結合損	ヘテロフェイス, graded Eg BSF構造, 表面パッシベーション
	直列抵抗損失	電極構造, ドーピングレベル, 層構成
	並列抵抗損失	加工損傷・汚れの除去 端面パッシベーション

ある。太陽電池の損失要因を抑制することによる高効率化の種々のアプローチがあるが、III-V族化合物系セルに限っても、表2に示すように、多くの高効率化の手法がある。III-V族化合物半導体太陽電池の高効率化の手法には、①高効率材料による単一接合セル、②集光形セル、③太陽光スペクトルの広帯域利用形セル（多接合構造セル）、などがある。

2.1 単一接合セル

図-1に、GaAs太陽電池を例に、高効率太陽電池の構造を示す。材料・プロセス技術面では、①キャリア収集、光吸収効率の面からのセル構造の改良、②接合

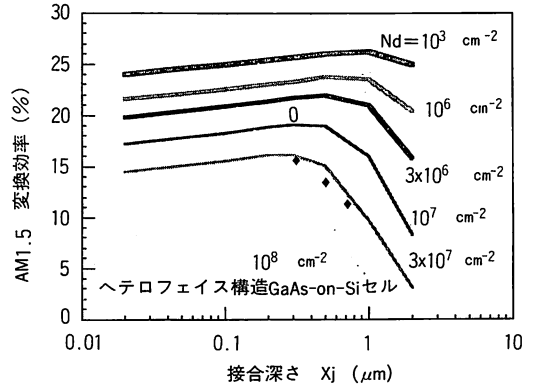


図-2 GaAsヘテロフェイス太陽電池の理論変換効率
(GaAs-on-Siセルを例として)

形成法、③再結合中心として働く不純物・欠陥の除去、などがある。

(1) セル構造の改善による高効率化

理論的に、GaAsやInPなどで高効率期待でき、単一接合による高効率化が検討されている。GaAsの表面再結合速度は、 $10^6 \sim 10^7$ cm/secと大きいのが、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、AlGaAsの窓効果を利用したAlGaAs-GaAsのヘテロフェイスセルがIBMから提案されて²⁾以来、宇宙用太陽電池への適用を狙いとして、Spire, Hughes, Applied Solar Energy Co.

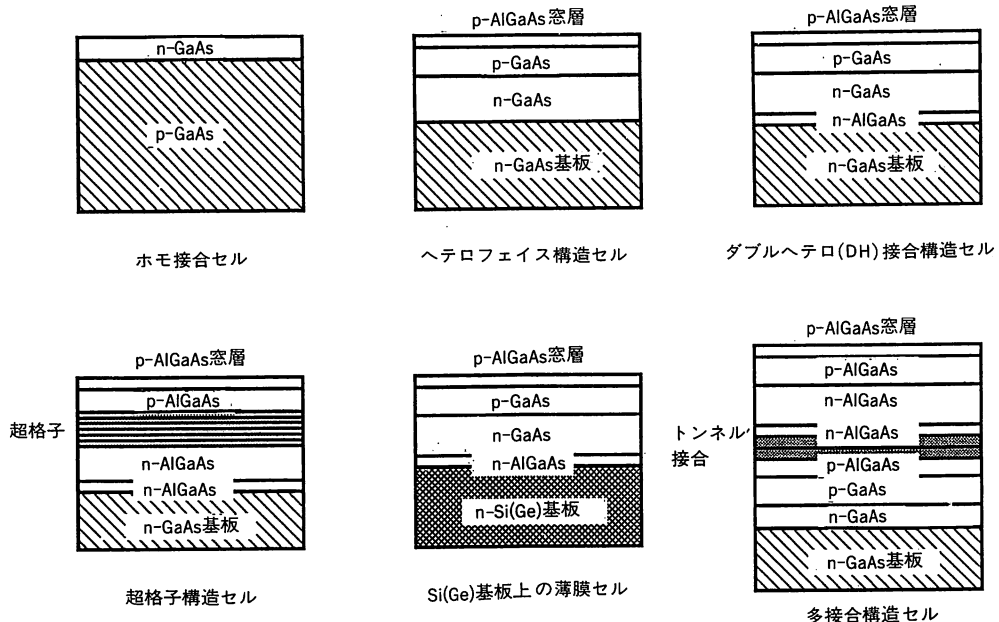
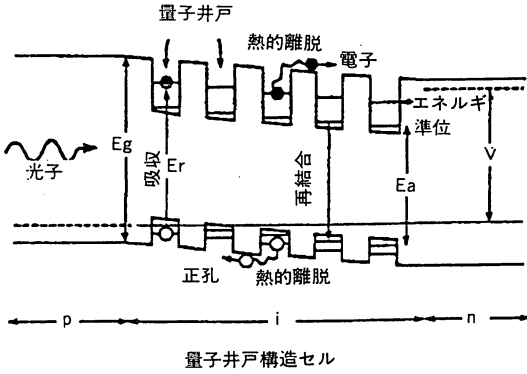
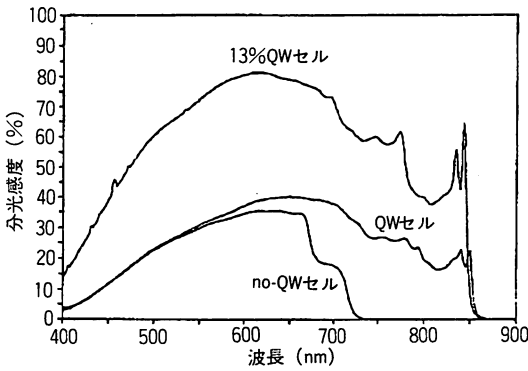


図-1 化合物半導体太陽電池の構成 (GaAsセルを例として)



量子井戸構造セル



QW-セルとno-QWセルの分光感度特性

図-3 量子井戸 (QW) 構造 AlGaAs 太陽電池と分光感度特性

(ASEC) などで精力的な研究開発が進められている。図-2に、GaAs ヘテロフェイス太陽電池の理論変換効率を示す。ホモ接合構造では、20%以上の高効率を得るには、接合深さを 500Å 以下にする必要があるが、

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る。

ここ数年、GaAs 太陽電池の高効率化が着実に進展し、高効率太陽電池は、III-V 族セルが最適との印象を強くしている。NREL, Kopin では、有機金属気相成長 (MOCVD) 法で、GaInP-GaAs, AlGaAs-GaAs のダブル・ヘテロ接合 (DH) 構造により、AM1.5 効率 25.7%、25.1% を達成している³⁾。DH 構造では、ヘテロフェイス構造における窓効果に加えて、裏面電界 (BSF) 効果が期待できる。図-1 に示すように、単一接合セルの構造も、初期のホモ接合から、ヘテロフェイス構造、DH 構造、最近の量子井戸 (QW) 構造セルへと進展している。英国王立科学大学では、50QW から成る i 層を持つ $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ p-i-n 構造太陽電池 (図-3) において、効率 13% (AM1.5) を得ており⁴⁾、QW なしのものに比べて、分光感度の改善が確認されているが、高開放端電圧の実現が課題である。

InP は、表面再結合速度が 10^3 cm/sec 程度と GaAs のそれに比べて低く、簡単な pn 接合セルで高効率化が可能である。著者らは、熱拡散法、液相エピタキシャル成長 (LPE) 法、MOCVD 法により種々の InP 太陽電池構造の作製を検討し、AM1.5 で 22%、AM0 で 18% を達成する⁵⁾ と共に、InP 太陽電池が Si や GaAs 太陽電池よりも耐放射線特性に優れていることを見出している⁶⁾。現状の InP セルは、 n^+p-p^+ や p^+n-n^+ などのシャローエミッター構造が主であるが、課題は開放端電圧の向上で、窓層などの改良の他、プラズマ水素処理効果などの検討がなされている。

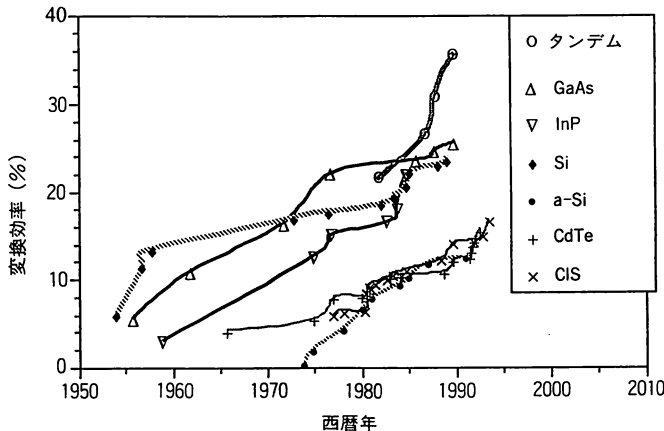


図-4 各種太陽電池の光電変換効率の年次推移

図-4に、各種太陽電池の光電変換効率の年次推移を示す。セル構造の改良、エピタキシャル成長技術などの進歩により、最近のGaAs、InPセルなどⅢ-V族化合物半導体太陽電池の高性能化の進展には目ざましいものがある。

(2) 接合形成法の改善による高効率化

高効率太陽電池作製のための接合形成技術として、エピ成長技術が優れている。エピ成長法による場合、セル構造の工夫ができ、光収集効率が得やすいという他に、太陽電池活性層の結晶性が良いという利点がある。一方、熱拡散法は、InPセル作製等に用いられ、低コスト化技術として位置づけられる。

エピ成長技術も、LPEからMOCVD、分子線エピタキシャル成長(MBE)法へと変遷している。LPE法は、簡単な装置で、高品質のエピ膜が得られ、セルの高効率化が実現できるため、1970年代の研究開発初期および1980年代の実用化初期に用いられてきたが、量産性や大面積化において劣る。MOCVD法は、精密制御性、大面積化、生産性に優れているため、1970年代後半から研究開発用に、1980年代後半から実用セル製造に用いられている。現在、高効率Ⅲ-V族化合物半導体太陽電池のほとんどが、MOCVD法で製作されている。また、宇宙用GaAsセルの量産システムとして、三菱、ASEC等では、4~5cmウエハを40~48枚処理できるMOCVD装置も導入されている。さらに、MBE法は、前述のQW構造や多接合構造など、化合物組成や不純物分布の精密制御が必要な太陽電池構造製作に有効であり、最近検討され始めている。

(3) 材料の改善による高効率化

図-5に示すように、太陽電池の効率は、半導体層の

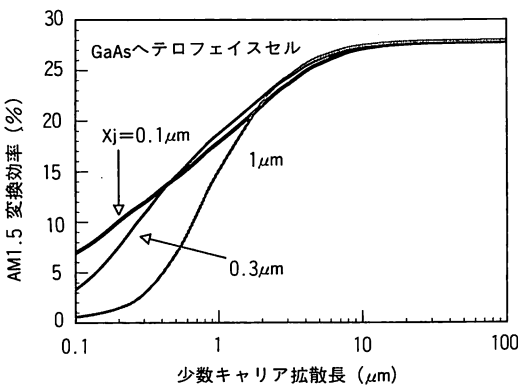


図-5 GaAs太陽電池の効率の少数キャリア拡散長依存性

少数キャリア寿命 τ (拡散長 L)に依存するので、高効率化には τ の向上が必要である。Ⅲ-V族化合物半導体の τ は、 $5 \times 10^9 / N$ (N :ドーピング密度)が上限ではあるが、最近では、フォトン・リサイクリング効果で、 τ は、放射再結合 τ を超える可能性が出てきており、AlGaAs/GaAs-DH構造において、 τ として、 $1 \mu\text{s}$ 以上が得られている。InPについても、 $0.3 \sim 2 \mu\text{s}$ のデータが得られている。 τ や少数キャリア拡散長は、不純物の他、転位や各種格子欠陥、結晶粒界、表面などに影響されるので、セルの高効率化のためには、これらの抑制が必要である。

MOCVD法のAlGaAsの τ は、成長温度 T_g に依存し、高 τ のためには、 720°C 以上の高温が必要である。窓材料としても、従来、AlGaAsが用いられて来たが、酸素関与欠陥の発生が課題で、高 T_g とクリーンシステムが必要である。GaAsに格子常数がより整合し、酸素等の取り込みの問題もないInGaPが注目されている。前述したように、InGaP-GaAsヘテロフェイスセルで高効率化が達成され、InGaPの特長が発揮されている。

2.2. 集光形セル

化合物半導体太陽電池の場合、低コスト化には集光動作も有効であるため、集光形太陽電池の検討も進められている。化合物半導体セルは、高効率であると共に、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。現在、GaAsヘテロフェイスセルを用いて、AM1.5の205倍集光で効率29.2%⁷⁾がVarianから報告されている。

2.3 多接合セル

単一接合セルでは、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、波長感度帯域を拡大する必要があり、フィルター・ミラーにより太陽光スペクトルを分割し複数のセルで受光する波長分割型と太陽電池自身がフィルターとして動作する多層の接合を積層した多接合形が検討されている。現在では多接合形の検討が盛んである。図-6に示すように、タンデム構造セルでは、理論的に38~42%の高効率⁸⁾が期待できるし、本構造を構成できるのも化合物半導体の特長の一つである。

多接合構造太陽電池そのものの提案は古く、1955年のJackson、1960年のWolfに遡る。多接合形セルの構成例として、①トンネル接合により複数のセルを接続するモノリシック・カスケード型、②金属電極で

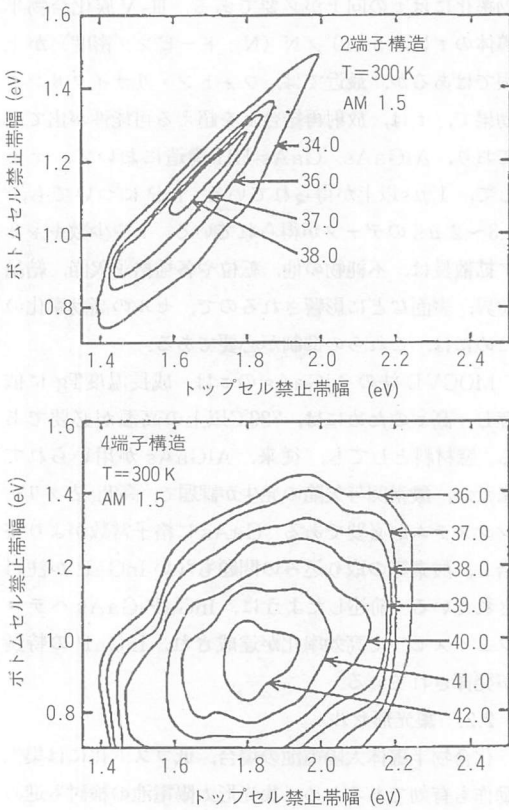


図-6 タンデムセルの理論効率

複数のセルを接続するメタル・インターコネクト型、
③複数のセルを機械的に張り合わせたメカニカル・スタック型の提案がある。モノリシック型は、複数のセルを接続するトンネル接合において、低抵抗接続ができないなどの問題があり、これまでメカニカル型が主

に検討されてきた。最近、Boeing が GaAs/GaSb のタンデム構造セルの集光動作で効率35.8%を得ており⁹⁾、タンデムセルの可能性を示した点で注目される。

高集光動作でなくても、AlGaAs/GaAs のメタル・インターコネクト型のタンデムセルで効率27.6% (AM1.5) が得られている¹⁰⁾。また、モノリシック型でも、最近低抵抗のトンネル接合の形成に成功し、GaInP/GaAs のタンデムセルで効率27.3%¹¹⁾が得られるに至っている。また、集光動作では、InP/InGaAs モノリシック・カスケードセルで効率31.8% (AM 1.5の50倍集光) が達成されている¹²⁾。

タンデムセル実現に向け、要素技術の研究開発もなされている。トップセルとして、GaInAsP (1.65~1.75eV) /Si メカニカル・スタックセル実現に向けた GaAs 基板上に格子整合した $Ga_{0.68}In_{0.32}As_{0.34}P_{0.66}$ n-on-p セルで、効率21.6% (AM0, active area) が得られている¹³⁾。InGaP₂/GaAs のモノリシック・カスケードセル実現に向けた GaAs 基板上のヘテロフェイス構造 GaInP₂n-on-p 単一接合セルで、AM 0 効率15.3%が実現している¹⁴⁾。

日本でも、通産省の新サンシャイン計画の超高効率プロジェクトで、AlGaAs/Si (Ge) や InGaP /Si タンデムセルの研究開発が進められている。

3. 低コスト化・軽量化指向太陽電池の研究開発動向

化合物半導体は、直接遷移型のエネルギー帯構造であるので、光吸収係数が大きいことは、薄膜太陽電池としての有用性を示している。III-V 族化合物セルでも、高効率の特長をいかしつつ低価格化、軽量化をはかる必要があるため、薄膜化が進行するものと考えら

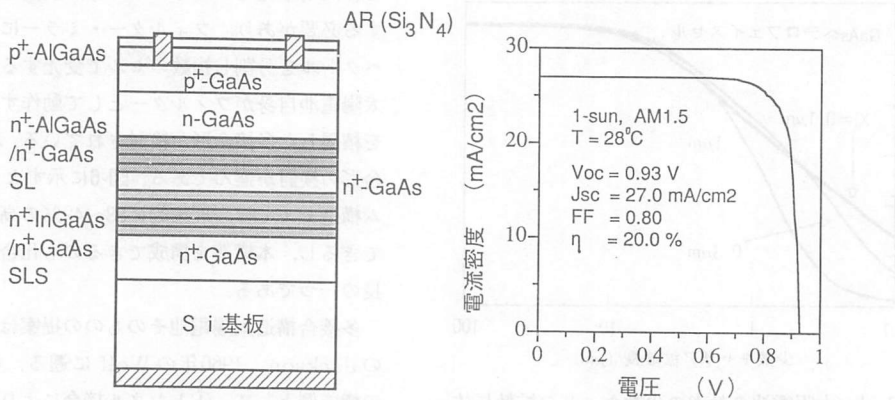


図-7 GaAs-on-Si 太陽電池の構造と特性

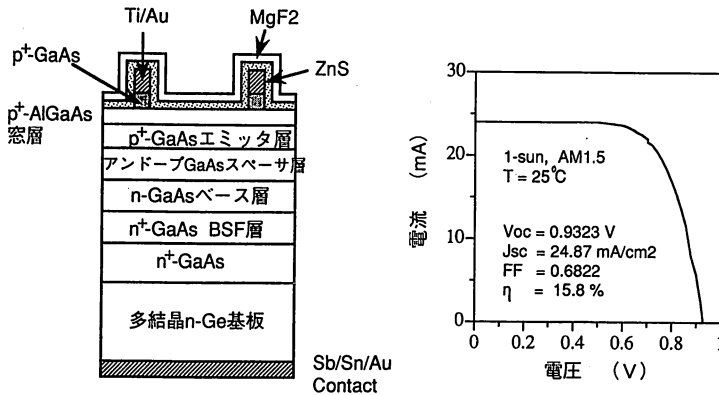


図-8 多結晶 Ge 基板上的 GaAs 太陽電池の構造と特性

れる。当面の研究開発ターゲットは、Si や Ge 基板上的 GaAs や InP 薄膜太陽電池である。

3.1 単結晶薄膜セル

Si 基板上への III-V 族化合物のヘテロエピタキシャル成長技術は、単に薄膜形太陽電池のみならず、各種光デバイス、電子デバイス、これらの複合デバイス等への波及効果があり、最近国内外で研究が活発化している。III-V on Si 構造における第一の課題は、Si 基板と III-V 族化合物との格子定数の不整合 (GaAs on Si の場合の不整合率は約 4%) に伴うヘテロ界面での高密度の不整合転位および熱膨張係数差に起因する熱応力誘起転位の発生とヘテロエピ膜中への転位の伝播にある。第二の課題は、両者の熱膨張係数の差に基づくヘテロエピ膜内でのクラックの発生であり、残留応力の低減をはかる必要がある。著者ら¹⁵⁾は、MOCVD 法による GaAs on Si セルで効率 20% (AM1.5) を達成している (図-7)。熱サイクルアニールや歪超格子層導入より、転位密度を 10^6 cm^{-2} 台に低減できたことが高効率化につながっている。

欧米では、Ge 基板上的 GaAs セルの研究開発が盛んである。Ge は GaAs との格子定数、熱膨張係数の整合が良く、結晶成長が容易なことによる。GaAs-on-Ge セルでは、ASEC の AM0 効率 20% の現状である¹⁶⁾。

この他、単結晶薄膜を剥離して得る方法として、機械的に剥離する CLEFT (Cleavage of Lateral Epitaxial Films for Transfer) などの方法が MIT によって提案され、GaAs セルにおいて、効率 22.2% (AM1.5) が得られている。また、GaAs セルや InP セルと Si セルとの静電ボンディングや共晶合金ボンディングも検討されている。EEV では、GaAs に熱

膨張係数がマッチしたカバーガラス上に静電ボンディングにより接着した GaAs セルで、効率 15.7% (AM0) を実現している¹⁷⁾。Tampere 大学では、Au を用いた Si 基板と InP セルとの共晶ボンディング (400~450°C) の後、選択エッチングにより InP 基板を除去し、InP-on-Si セル (4 cm²) を作製し、active-area 効率 16.5% (AM1.5) を実現している¹⁸⁾。

3.2 多結晶薄膜セル

多結晶薄膜セルも、低価格の太陽電池として可能性を有する。多結晶薄膜太陽電池の効率は、基板結晶の粒径に依存する。従来、Mo、W やグラファイト上の多結晶 GaAs や InP セルの作製が試みられて来たが、多結晶層の粒径は高々 10 μm 程度で、効率 10% を超えるのは難しかった。最近、光学グレードの多結晶 Ge 基板上的 MOCVD 法によるヘテロフェイス p-on-n 1 cm² セル (図-8) で、AM1.5 効率 15.8% が達成されている¹⁹⁾。多結晶 Ge 基板の粒径が 1 cm 以上の仕様で、価格も単結晶 Ge の 1/10、将来的には 24 インチ径のキャスト Ge も育成できるとの事で、注目に値する。現状では、FF が低く、低抵抗 Ge 基板の使用により改善可能である。

4. 化合物半導体太陽電池の適用領域と応用例

4.1 宇宙用太陽電池

III-V 族化合物半導体太陽電池の用途として最有力なのが宇宙用である。化合物半導体の多くは、バンド構造が直接遷移型のため、間接遷移型の Si よりも、太陽電池特性の放射線劣化が起りにくいからである。化合物セルでは、Si に比べて、約 2 桁多い欠陥導入により、ようやく同等の放射線劣化を示すことになる。

米国の宇宙用太陽電池使用量は、年 100~120kW で

推移しており、実用化されている宇宙用 Si 太陽電池の AM0 効率は13~15%である。GaAs 太陽電池の平均効率は18.5%で、セルコストは高くとも、アレイコストでは拮抗しており、アレイ重量の軽減や衛星断面積の低減のメリットがあるとの分析結果もある²⁰⁾。ASEC は、GaAs セル 100万個以上の製造実績があり、全世界の90%以上のシェアを有する。4 × 2 cm² の MOCVD 成長 GaAs-on-Ge セルも、2000セル/週以上の生産能力があり、平均効率は18.7%である。日本でも、三菱製 LPE 成長 GaAs セル(2 × 2 cm² 実用セルの平均 AM0 効率は17.5%) が、通信衛星“CS-3 (さくら3)”用電源として実用化された²¹⁾。

InP は、GaAs よりさらに優れた放射線耐性がある。InP 中では、主要な照射欠陥が室温でも動き、さらに、光照射により、照射欠陥のアニーリングが促進され、100Kの低温度でも放射線劣化が回復するため、InP 太陽電池は優れた耐放射線損傷特性を示す。このような高効率で耐放射線特性に優れた InP 太陽電池は、放射線環境の厳しい軌道を航行する衛星への適性があり、世界に先駆けて、科学衛星“羽衣”用電源として実用化されている²²⁾。日本鉱業では、2 インチウエハが50枚処理できる拡散法による InP 太陽電池の量産システムが開発されている(2 × 1 cm² 実用セルの平均 AM0 効率は16.5%)。

今後、宇宙用薄膜太陽電池技術が進展すると考えられる。前述した各種太陽電池技術が宇宙用として、まず花開き、次いで地上用へと適用範囲が拡大することを期待している。欧米でも、GaAs や InP セルに加えて、a-Si、CuInSe₂、CdTe 薄膜セルや多接合セルなどの宇宙用新型太陽電池の宇宙実証試験が計画されており、貴重なデータ取得が期待される。

4.2 地上電力応用

三菱、住友電工が関西電力と協力して、GaAs セルを用いた 1 kW 規模の集光式太陽光発電システムの実用化試験が行われた。米国でも、GaAs 集光形セルを使った50kW の発電システムの建設例がある。

4.3 民生用への応用

AlGaAs-GaAs ヘテロフェイスセルは、動作電圧が高く、しかも変換効率が高いことから、腕時計用として実用化されている。

5. 今後の課題

GaAs や InP 太陽電池は、宇宙用太陽電池として適用されよう。さらに、適用領域を広げるには、III-

V/Si (Ge) 構造の薄膜太陽電池が当面の研究開発ターゲットである。高効率化の極限追求もなされるべきである。二接合セルで、理論的には効率36~39%が予想される。Si と化合物の薄膜タンデムセルなどは、高効率・低コストの太陽電池としての可能性を秘めていると考えられる。集光動作も、低コスト化、高効率化に有効であり、今後の研究開発が期待される。

化合物半導体太陽電池は、Si 太陽電池に比べて多くの技術課題があるが、Si 技術との融合をはかりつつ、宇宙用ばかりでなく地上用としても実用太陽電池として大いに発展することを期待したい。

参考文献

- 1) 上村税男, 山口真史: エレクトロニクス (1984年8月号) 73.
- 2) J. M. Woodall et al. : Appl. Phys. Lett. 21, 379(1972).
- 3) S. R. Kurtz et al. : Proc. 21st IEEE PVSC, Orlando, (IEEE, New York, 1990) 138.
- 4) K.W.J. Barnham et al. : Proc. 11th European PV Solar Energy Conf., Montreux, (1992).
- 5) M. Yamaguchi et al. : Proc. PVSEC-2, Beijing, (Chinese Inst. of Electron., Beijing, 1986) 573.
- 6) M. Yamaguchi et al. : J. Appl. Phys. 55, (1984) 1429.
- 7) N.R. Kaminar et al. : Proc. 20th IEEE PVSC, Las Vegas, (IEEE, New York, 1988) 766.
- 8) C. Amano, M. Yamaguchi and K. Hane : Tech. Digest of PVSEC-5, Kyoto, (Jpn. Soc. of Appl. Phys., Tokyo, 1990).
- 9) L.M. Fraas et al. : Proc. 21st IEEE PVSC, Orlando, (IEEE, New York, 1990) 190.
- 10) B.C. Chung et al. : Appl. Phys. Lett. 55, (1989) 1741.
- 11) J.M. Olson et al. : Proc. 21st IEEE PVSC, Orlando, (IEEE, New York, 1990) 27.
- 12) M.W. Wanlass et al. : Proc. 22nd IEEE PVSC, Las Vegas, (IEEE, New York, 1991) 38.
- 13) P.R. Sharps et al. : Presented at the 23rd IEEE PVSC, Louisville, 1993.
- 14) R.K. Chiang et al. : Presented at the 23rd IEEE PVSC, Louisville, 1993.
- 15) Y. Kadota et al. : Proc. PVSEC-4, Sydney, (1989)873.
- 16) C. Cheng et al. : Proc. 22nd IEEE PVSC, Las Vegas, (IEEE, New York, 1991) 393.
- 17) C. Hardingham et al. : Presented at the 23rd IEEE PV SC, Louisville, 1993.
- 18) J. Lammasniemi et al. : Presented at the 23rd IEEE PVSC, Louisville, 1993.
- 19) R. Venkatasubramanian et al. : Presented at the 23rd IEEE PVSC, Louisville, 1993.
- 20) L.W. Slifer, Jr. ; Presented at the 23rd IEEE PVSC, Louisville, 1993.
- 21) H. Takata et al. : Proc. 21st IEEE PVSC, Orlando, (IEEE, New York, 1990) 1219.
- 22) M. Yamaguchi et al. : Proc. 21st IEEE PVSC, Orlando, (IEEE, New York, 1990) 1198.