化合物多接合太陽電池の高効率化と応用

High Efficiency Technology and Application of Multi-Junction Compound Semiconductor Solar Cells

鷲尾 英俊* 十楚 博行*

Hidetoshi Washio Hiroyuki Juso

化合物太陽電池とは、現在の主流であるシリコンを材料として用いた太陽電池と異なり、インジウムやガリウムなど、2種類以上の元素からなる化合物半導体を材料とした光吸収層を持つ変換効率の高い太陽電池で、主に人工衛星に使用されています。当社は2000年から、光吸収層を3層に積み重ねて高効率化を実現する「化合物3接合型太陽電池」の研究開発を進めています。近年の高効率化技術とその応用について報告します。

Compound semiconductor solar cells have the light absorption layers composed of two or more elements such as Gallium and Indium. This type of solar cells show a higher conversion efficiency comparing to the conventional crystal silicon solar cells, and are mainly used for the power source of a satellite.

Sharp has been developed "triple-junction compound semiconductor solar cell" having three light absorption layers since 2000. Progress of high efficiency technologies and applications of multi-junction compound semiconductor solar cells in recent years are described in this report.

1. 多接合型太陽電池

結晶シリコン型太陽電池等の単体 の材料で構成される太陽電池は、幅 広い波長分布を有する太陽光エネル ギーを高効率で電気エネルギーに変 換するには限界がある。この課題を 解決するために複数の材料を積層し た多接合型太陽電池の開発が実施さ れている。このような多接合型太陽 電池のなかでも、構成材料の組成比 を制御することによりさまざまなバ ンドギャップエネルギーの半導体を 任意に構成でき,かつ,高品質の単 結晶膜の形成が可能なⅢ-V族の化 合物半導体は太陽電池の高効率化に 有利である。計算で求めた化合物多 接合型太陽電池の変換効率の理論値 は、2種類の材料を重ねた2接合で 42%, 3接合で47%, 6接合で61%で ある。さらに、レンズなどを使って 太陽光を1000倍に集光すると、そ れぞれ50%,56%,72%まで高まる。 接合数増で変換効率は向上するが.

技術開発の困難さ、多層化による製 造コスト増等の課題から現在は当社 を含む各社の開発は3~4接合が中 心である。高効率化が期待できる化 合物多接合型太陽電池だが、高価な 単結晶基板上に30~40層の単結晶 薄膜をMOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition/有機金 属気相成長)法等を用いて形成し製 造することから,一般的な結晶シリ コン型太陽電池等と比較して高価で あることが課題である。このため現 時点では、実用化されているのは人 工衛星などの宇宙用途が中心であ る。一方で高効率のメリットを生か しながら、高コストのデメリットを 解消するためにセル面積を小さくす ることが可能な集光型太陽電池(レ ンズやミラーで太陽光を集め焦点を 結ぶ場所に太陽電池を配置し発電を 行うシステム)への適用も徐々に増 加しはじめている。

2. 高効率化への取組

2.1 非集光型太陽電池

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、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 In_{0.49}Ga_{0.51}P/In_{0.01}Ga_{0.99}As/Ge構造 の3接合型太陽電池である。図1- ①に示すように, 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 (Lattice-Match (LM) 構造)の太陽電池で ある。3つの太陽電池セルが直列に 接続されているため、電圧はトップ とミドル,ボトムの3つのセルの電 圧の和になるが、電流は最も小さい セルに制限される。したがって高効 率化のために、トップとミドルで発 生する電流を整合させる工夫がなさ れているが, Geボトムセルについて は発生する電流の一部しか利用でき

ていない。それでも変換効率は量産 レベルで宇宙光 (AM0スペクトル) で約29%,地上光 (AM1.5Gスペク トル)で約31%であり,結晶シリコン 型太陽電池の研究開発レベルの最高 値である25.6% (地上光 AM1.5G スペクトル)をも上回っている。

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な



図1 格子定数と電気特性イメージ

Fig. 1 Lattice constant and electrical specification image.



い。つまり,格子整合型3接合構造 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な い。そこで、ボトムセルの材料とし て電流値をトップセル及びミドルセ ルとバランスするバンドギャップの 大きい材料を用いることで電流を下 げることなく, 電圧を上げることに より変換効率を向上させるアプロー チが考えられる。このアプローチと して当社では図1-②に示すように ボトムセルを従来のGe (0.67 eV) からInGaAs (1.0eV) に変更した 構造での開発を行っている。この場 合はボトムセル (InGaAs 1.0eV) の格子定数がGaAs基板もしくはGe 基板と約2%異なるため基板上に直 接高品質なボトムセルを成長するこ とができないために、ボトムセル⇒ ミドルセル⇒トップセルの順で成長 するとミドルセルおよびトップセル の結晶品質が低下する。そこで通常 とは逆の順序で、トップセルから順 に成長し最後にボトムセルを成長す 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 るようにした。また、ミドルセルと ボトムセルの間には格子定数を段階 的に変化させるためのバッファー層 を形成している。図2に示すこのよ うな構造は逆積み変成系との意味 で、Invert-Metamorphic (IMM) 構 造と呼ばれる。通常の構造では太陽 電池としての受光面は成長後の最上

表1 当社開発の化合物太陽電池の変換効率の推移

 Table 1
 History of conversion efficiency of compound semiconductor solar cell developed by Sharp.

測定日	セル面積 (cm2)	Isc (mA)	Jsc (mA)	Voc (V)	FF (%)	Eff (%)	改善点		
2009.9.2	0.880	12.27	13.94	3.012	85.3	35.8	_		
2011.9.2	0.891	12.52	14.05	3.006	87.5	36.9	FF向上 トンネル抵抗低減		
2012.2.3	1.046	15.23	14.56	3.015	85.5	37.5	Jsc向上 反射防止膜最適化		
2012.9.18	1.047	15.25	14.57	3.014	86.0	37.7	Jsc向上 InGaPトップセル窓層組成最適化		
2013.2.20	1.047	14.94	14.27	3.065	86.7	37.9	Voc向上 InGaAsボトムセル高Eg化		



Fig. 3 Measurement result at public institution (AIST:National Institute of Advanced Industrial Science and Technology).





面となるが.本構造では基板と接す る面が受光面となるので、セル化を 行うときに何らかの支持基板上に太 陽電池部を転写する必要がある。当 社は本構造で2009年9月に35.8% の変換効率を達成し、その後、表1 および図3に示すように改良を加え て2013年3月に37.9%の変換効率 を達成した(いずれも発表時は非 集光型の太陽電池の中で変換効率 が世界最高。2014年5月時点では米 国 spectrolab 社が5 接合型で38.8% を発表。3接合型では当社の記録が 依然世界最高値)。変換効率向上の 主な改善点はセル内部の直列抵抗の 低減, セル表面の反射率低減, ボト ム (InGaAs) セルの高品質化によ るVocの向上などである。

2.2 集光型太陽電池

前項で説明したセル構造を使用 し,集光下で発電すると2012年5月 に43.5%,2013年6月には**図4**に示 すように44.4%を達成した(いず れも発表時は世界最高効率。2014年 5月時点では4接合型で44.7%を独 国Fraunhofer ISEを中心としたグ ループが発表)。集光型と非集光型 で大きく異なる点は発電時に発生す る電流密度が数百倍になる点であ る。電流密度が増加するとセル内の 直列抵抗の影響(電圧降下)による 曲線因子の低下が大きくなることか らセル内部の直列抵抗をいかに低減 するかが課題となる。具体的には各 セルを接続しているトンネル層,セ ル表面の窓層,表面電極とのコンタ クト抵抗,表面電極の配線抵抗など である。

3. 応用

3.1 既存型宇宙用太陽電池

前述のように,現在人工衛星の電 源として実用化されている太陽電池 は図1-①に示すような格子整合型 3接合構造を持ち,図5に示すよう な外観の太陽電池である。このセル は名刺大の大きさで,4インチウエ ハから2枚が製造でき,厚さは約 150µmである。衛星パドルに陰が 生じた際には個々の太陽電池セルに 逆バイアス電圧が印加されるが,太



図5 宇宙用太陽電池セルの外観 Fig. 5 Appearance of space solar cell.

陽電池が破壊しないようにバイパス ダイオードを接続している。また, セルの表面側には宇宙放射線や紫外 線,電離気体などから太陽電池を保 護する目的でカバーガラスを接着 し,セルの裏面側は衛星パドルの筐 体に使用されているアルミハニカム パネルに接着している。セル同士は インターコネクターを介して直列も しくは並列に接続している。図6に は太陽電池パドルの外観とその断面 構造図を示す。

世界の商用人工衛星は大型化& 大電力化へ推移しているが,打上コ ストを下げるため,発電効率が良く, 軽量で,収納性の良い太陽電池セル とパドルが求められている。

3.2 次世代宇宙用太陽電池

前述のIMM構造を持つ薄型太陽 電池は,既存型太陽電池と比較して, Ge基板が存在しないため軽量,かつ,発電効率が高いため,将来の宇 宙用太陽電池として有望である事から,現在宇宙航空研究開発機構 (JAXA)とともに共同開発作業を 進めている。図2にIMM構造を持 つ薄型太陽電池の構造,図7に外観, 表2には既存型と薄膜型セルも既存型 セルと同様の形状であるが,セル厚



図6 宇宙用太陽電池パドルの外観と断面構造図 Fig. 6 Appearance of space solar puddle and cross-sectional view.



図7 宇宙用薄膜型太陽電池セルの外観 Fig. 7 Appearance of thin film space solar cell.

さは既存型セルの1/7以下である。 前述の通り,薄膜型太陽電池はボト ムセルを改良しているため,既存型 太陽電池よりもVoc値が向上してお り,変換効率として30%を超える 太陽電池が作製できている。また, 宇宙環境では太陽電池セルに宇宙放 射線が照射されるが,静止軌道上で 放射線が10年程度照射されても, 照射後の特性値は薄型化合物セルの 方が既存型セルを上回る事が確認で きた。

図8には薄膜型太陽電池を用い 作製した太陽電池パドルの外観とそ の断面構造図を示す。図6に示す既 存型パドルと異なる箇所は、セルの 裏面をアルミハニカムパネルよりも 軽量なCFRPシートに接着している 事である。既存型セルはフレキシブ ル性が無いため、フレキシブル性の 有るCFRPシートに接着するとセル が割れてしまうが、薄膜型太陽電池 にはフレキシブル性が有ることか ら、軽量なCFRPシートの採用が実 現した。

表3には既存型太陽電池と薄膜型 太陽電池を利用したパドルの出力重 量比を示す。衛星軌道上での薄膜型 太陽電池パドルの出力重量比7.14g/ Wは既存型太陽電池パドル1.72g/ Wの約4倍である。

薄膜型太陽電池セルは既存型セル と構造が大きく異なるため、セルレ ベルでは**表4**に示すような耐宇宙環 境試験を実施している。各試験後の セル特性値の変動は許容範囲内で あった事から、これらの試験結果に より、静止軌道10年相当の信頼性 が実証できた。

また, JAXAや国内主要衛星メー カーでは, 打上時や衛星放出時, パ ドル展開時などを模擬した, 引張り, 曲げ, 振動, 衝撃, 音響, 耐放電, 熱真空などの各種試験がパドルレベ ルで実施され, 耐宇宙環境下でも使 用可能との判断がなされた。

図9には薄膜型太陽電池パドルを 搭載した人工衛星SPRINT-A(ひさき)を示す。この衛星は惑星観測専 用の宇宙望遠鏡を搭載して,2013年 9月14日に鹿児島県内之浦宇宙空間 観測所よりイプシロンロケットによ り打上げられた。衛星本体一部であ る実験用モジュール(NESSIE)に は、当社製の薄膜型太陽電池パドル が搭載され、現在宇宙空間で発電等 の実証試験を実施中である。

図10には薄膜型太陽電池パドル の他の形態として,表面側のカバー ガラスと裏面側のCFRPシートを, どちらもフィルム材料に置き換えた フィルムタイプ型パドルがある。前 述の通り宇宙には宇宙放射線や紫外 線が存在するため,それらに耐えう るフィルム材料の探索が課題となる が,表裏面をフィルムにすることで 更なる軽量化と収納性の向上が見込 めるとともに,パドル内に割れる部 材が存在しないため,将来的には宇 宙ステーションや有人宇宙船などと のドッキング用衛星などに採用され る可能性が高いと考えられる。

表2 宇宙用太陽電池セルと宇宙用薄膜型太陽電池セルの特性 Table 2 Characteristics of space solar cell and thin film space solar cell.

· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·							(AMU元下, 2cmx2cmでルの測定値)							
	初期出力値				放射線照射後出力値				出力保存率					
	Voc	Isc	Pmax	FF	η	Voc	Isc	Pmax	FF	η	Voc	Isc	Pmax	F.F.
	mv	MA	<u>mvv</u>		70	mv	mA	mvv		70	70	70	70	70
既存化合物セル	2673.0	70.4	156.9	0.834	28.7	2392.3	68.1	137.3	0.842	25.1	89.5	96.8	87.5	101.0
薄膜型化合物セル	2999.0	67.1	172.0	0.854	30.5	2681.1	66.7	149.8	0.836	26.6	89.4	99.4	87.1	97.9

3.3 集光システム

化合物多接合型は高価なため前述 したように現在では実用化が宇宙用 途に限定されている。当面は高価な 状態が続くと予想される。このため、 太陽電池セルの使用量を削減できる 集光システムとの組み合わせが重要 になると考える。

現状の化合物多接合型太陽電池の 生産コストを想定した場合, 実用化 のためには集光倍率500~1000倍が 必要になる。集光方式はレンズやミ ラーなどがあり、システムサイズも 3k~60kWとさまざまで各社が開 発を進めている。集光システムは日 射時間が年間2000時間以上で、水 蒸気などで光が散乱されることなく 地上に届く直達光が豊富な地域で有 効なので、今後太陽電池の市場とし て大きく期待できる南米やアフリ カ,中近東などにフィットする商品 と期待される。

4. 今後

4.1 低コスト化

前述したIMM構造の化合物太陽 電池は基板上に成長したエピタキ シャル層のみが太陽電池として機能 するので、成長に使用した基板は不 要となる。そこで太陽電池層を 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 削減できる。太陽電池層は10 μ m 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 が可能となる。

4.2 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、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る。

5.まとめ

化合物多接合太陽電池は結晶シリ コン型太陽電池よりも変換効率が高 いため、宇宙用や集光用などで実用 化が進み、更なる特性向上のため、 世界の各研究機関や製造メーカーに て研究開発が進められている。低コ スト化の研究開発も進めば、利用さ れる範囲も拡大するものと予測して いる。

本研究の一部は、新エネルギー・ 産業技術開発機構(NEDO)および 宇宙航空研究開発機構(IAXA)か ら委託され実施したものである。







図8 宇宙用薄膜ガラス型太陽電池パドルの外観と断面構造図 Fig. 8 Appearance of thin film space solar puddle [grass type] and cross-sectional view.

表3 宇宙用太陽電池パドルと宇宙用薄膜型太陽電池パドル の重量

Table 3 Power ratio by weight of space solar puddle and thin film space solar puddle.

		<u>(AM0光下での測定値)</u>
セルタイプ	既存型3接合セル	薄型3接合セル
変換効率(AM0)	28.5%	30.0%
パドルタイプ	アルミハニカム	CFRPシート
出力/重量比	7.14g/W	1.72g/W





宇宙用薄膜フィルム型太陽電池パ 図10 ドルの外観

Fig. 10 Appearance of thin film space solar puddle [film type].

表4 耐宇宙環境試験

Table 4 Reliability tests on new type solar puddle.

試験名称	試験条件				
熱衝撃試験	温度範囲-180~+100℃, 1000サイクル				
耐湿試験	65℃,90%,720時間				
高温真空試験	1.3x10−3Pa以下,140℃,168時間				
放射線照射試験	1MeV電子線 照射量1×10 ¹⁵ e/cm ²				
非動作寿命試験	150℃,1000時間				
耐逆方向試験	150℃,1000時間,−0.5A印加				