

化合物フレキシブル太陽電池の開発

Development of III-V Compound Flexible Solar Cells

高本 達也*¹
Tatsuya Takamoto

安居院 高明*¹
Takaaki Agui

鷲尾 英俊*¹
Hidetoshi Washio

高橋 直*¹
Naoki Takahashi

中村 一世*¹
Kazuyo Nakamura

安沢 修*²
Osamu Anzawa

兼岩 実*¹
Minoru Kaneiwa

要 旨

紙のように軽くてフレキシブルな高効率Ⅲ-V族化合物太陽電池の開発に世界で初めて成功した。GaAs基板上に成長したInGaP/GaAs₂接合太陽電池のエピタキシャル層を基板から分離して作製したものである。太陽電池層は高品質の単結晶であるため変換効率は高く、25% (AM0) を達成している。5 μm以下に薄くなった単結晶薄膜はヘキ開し難いため割れ難く自由に曲げることができる。また、超軽量で、1g当たりの出力は5W/gを超え、従来の15倍にもなる。さらに、セル層直下の金属箔の光反射効果によって、セルの厚さを半分程度まで薄くでき、宇宙空間での耐放射線性が向上することが確認されている。

Highly efficient III-V compounds solar cells, which are light and flexible like paper, have been attained for the first time. After a set of layers of an InGaP/GaAs dual junction solar cell is epitaxially grown on a GaAs substrate, those layers are removed from the substrate. This removed thin cell remains good single crystal structure and also shows high conversion efficiency of 25%(AM0). Those single crystal layers with a total thickness less than 5μm is hardly cleaved and not easily broken. This fact enable the cell to be bent flexibly. Output power per weight of the cell is over 5W/g which is about 15 times larger than that of the conventional space cell.

Furthermore thickness of the cell can be reduced to the halves by an effect of back metal reflection and an improvement on radiation resistance for space use is confirmed.

まえがき

様々な光エネルギー ($h\nu$) を有する太陽光に対して、太陽電池のエネルギー変換効率を向上させる最も有効な手段は、禁制帯幅 (E_g) の異なる複数の太陽電池を重ね合わせる方法であり、エネルギーの高い光を広い E_g から成る太陽電池で吸収し、それを透過するエネルギーの低い光をより狭い E_g を有する太陽電池で吸収することにより ($h\nu - E_g$) の損失を最小限にできる。 E_g の異なる複数の太陽電池を重ねた多接合型構造を実現するために、Ⅲ-V族化合物半導体材料が用いられる。Ⅲ-V族化合物は、エピタキシャル成長技術により、高品質の単結晶が得られ、組成比を制御することで様々な E_g が得られ、かつ、トンネル接合を形成することで太陽電池をモノリシックに接続できるといった利点を持つ。

トンネル接合を用いた多接合型のⅢ-V族太陽電池の研究は1980年代より盛んになり、様々なタイプの太陽電池が開発されたが、1995年以降はGeを基板に用いたInGaP/(In) GaAs/Ge 3接合構造が主流になっている。このタイプの太陽電池の変換効率は、宇宙光 (AM0) に対して29.5~30%、地上光 (AM1.5G) に対して31.5~32%、地上光を500倍に集光した光に対して38%程度まで向上している^{1) 2)}。応用分野として、宇宙用では、単結晶Siセルに比べ、高効率および耐放射線性で優位になってきている。地上用では、高効率の太陽電池を用いることでシステムの低コスト化が期待されている。大幅な低コスト化 (現状の1/50程度) が実現されれば、小面積で高出力が要求される電子機器や移動体等の民生品への応用が見えてくる。

*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2開発部

*2 ソーラーシステム事業本部 ソーラーシステム事業部 企画部

1. 太陽電池の構造と特長

化合物フレキシブル太陽電池の断面構造を図1に示し、4cm×7cmサイズのフレキシブルセルの外観写真を図2に示す。太陽電池層は、PN接合を有するGaAsボトムセルの上にN型AlInGaP/P型AlGaAsから成るトンネル接合にてPN接合を有するInGaPトップセルが接続された2接合構造である。InGaP/GaAs太陽電池層はGaAs基板上にMOCVD成長法により成長された後、基板から切り離され、金属箔上に転写された。太陽電池層の厚さは約5μm以下、金属箔の厚さは10μm以下である。この化合物フレキシブル太陽電池は以下のような特長を有する。

(1) 高効率

GaAs基板上に成長された単結晶薄膜の品質が、基板から分離後でも維持されているため、従来通りの高

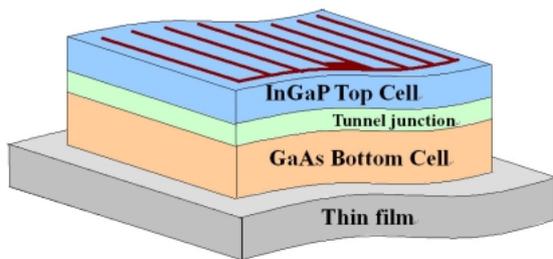


図1 化合物フレキシブル太陽電池の構造
Fig.1 Structure of the III-V compound flexible solar cell.

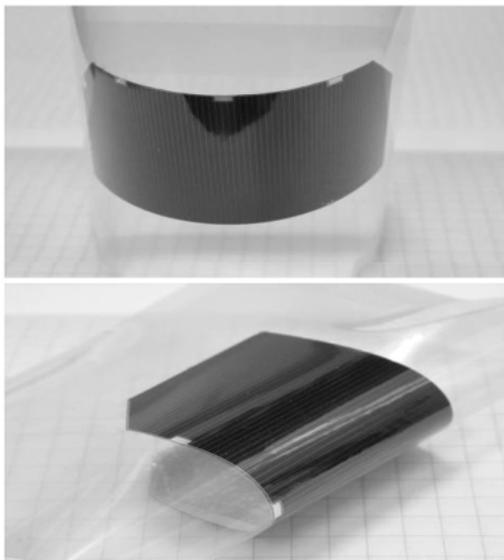


図2 化合物フレキシブル太陽電池 (4cm×7cm サイズ) の外観写真
Fig. 2 Photograph of the III-V compound flexible solar cell with 4cm x 7cm in size.

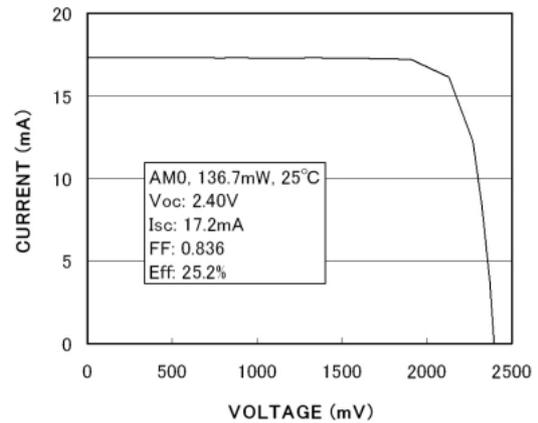


図3 InGaP/GaAs 2接合フレキシブル太陽電池のIVカーブ
Fig. 3 IV curve of the III-V compound solar cell.

効率太陽電池の作製が可能である。図3に示すように、1cm角サイズの小面積ではあるが、25% (AM0, 自社測定) という高い効率を実現している。

(2) 軽量

基板が存在せず、軽量の金属箔上に数μmのエピタキシャル層が形成されているだけなので軽量である。従来の宇宙用InGaP/(In)GaAs/Ge 3接合型太陽電池(効率28.5%, 約4cm×約7cm; 27.5cm²)の重量は2.3gで、宇宙光(136.7mW/cm²)下において1g当りで発生できる出力は約0.4W/gであるのに対して、InGaP/GaAs 2接合型フレキシブル太陽電池の重量は同サイズで0.16gであるため、接合数の減少により変換効率が25%程度まで低下しても、1g当りの発生出力は約5.8W/gまで向上する。

(3) フレキシブル

図2に示すようにフレキシブル性は高く、最小曲率半径は5mm以下である。通常のⅢ-V族化合物単結晶はへき開し易く割れやすい材料であるが、極端に薄くすることでへき開し難く割れにくくなっている。

(4) 裏面金属による光反射効果

通常の2接合太陽電池では、ボトムセルの厚さが薄い場合、ボトムセルを通過する光は下の半導体基板内で吸収され熱に変わる。一方、フレキシブル太陽電池では、ボトムセルの直下に光反射率の高い金属が存在し、裏面金属で反射された光を再度ボトムセル内で吸収することができるため、ボトムセルの厚さを少なくとも半分程度まで薄くすることができる。セルの厚さを薄くした場合の裏面反射効果については2項で後述する。

(5) 耐放射線性の向上

裏面金属による光反射効果によりセルの厚さを薄くすることができれば、宇宙空間での放射線照射による特性劣化が低減される。電子線や陽子線照射によって

半導体内に発生する原子変位は主に少数キャリア拡散長を低下させるが、セルが薄くて、セル裏面とPN接合までの距離が放射線照射後の少数キャリア拡散長よりも十分に短ければ、放射線照射による特性の変化は少なくなる、といった理由からである。セルの厚さを薄くしたフレキシブル太陽電池の耐放射線性については3項で後述する。

2. 裏面金属による光反射効果

GaAs 単一接合のフレキシブル太陽電池を作製し、GaAs 基板上的 GaAs 単一接合セルとの特性比較を行い、ベース層の厚さを変化させた場合の短絡電流値の変化を調べた。図4はベース層厚さを0.5から3.5 μm まで変化させたGaAsフレキシブルセルおよびGaAs基板上セルの短絡電流値の変化を示す。太陽光を十分に吸収する3~3.5 μm のベース層で短絡電流値は飽和し、それより薄い厚さでは、吸収する光量が減少し短絡電流値は低下していることが見て取れる。フレキシブルセルとGaAs基板上セルとを比較すると、フレキシブルセルではベース層の薄型化による電流値の低下が少なく、1 μm の厚さでもわずか5%程度の低下にとどまっている。図5は、ベース層の厚さが1 μm のフレキシブルセルおよびGaAs基板上セルの分光感度特性を示す。フレキシブルセルには吸収端波長付近でフリンジおよび量子効率の向上が観察される。これは、ベース層直下の金属の光反射により、光路長が増加しているためである。

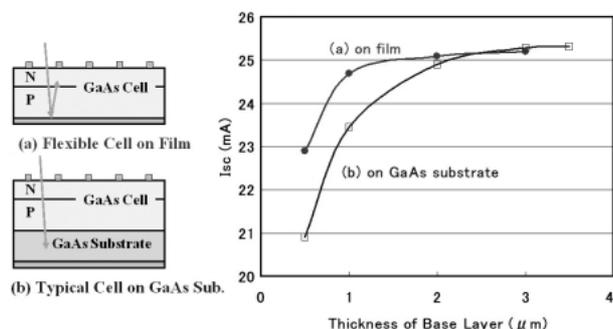


図4 ベース層厚さを変えた場合の、金属泊上GaAsフレキシブルセルおよびGaAs基板上セルの短絡電流値の変化

Fig. 4 Change in short-circuit current of the GaAs cells with various thickness of the base layer, for the cells on film and GaAs substrate.

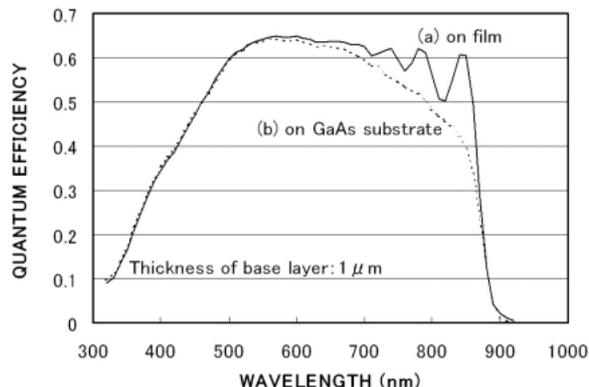


図5 ベース層の厚さが1 μm のGaAsフレキシブルセルおよびGaAs基板上セルの分光感度特性の比較

Fig. 5 Spectral response of the GaAs flexible cell compared to GaAs cell on GaAs substrate, in the case of 1 μm base layer thickness.

3. 耐放射線性

ベース層の厚さを1~3 μm まで変化させたGaAs単一接合のフレキシブル太陽電池を作製し、1MeV電子線照射後の特性劣化について評価した。図6は電子線照射量に対する短絡電流値および開放電圧の変化を示す。電子線照射前の短絡電流値は、ベース層が厚いほど大きくなっているが、 $1 \times 10^{15}\text{cm}^{-2}$ 照射後では、ベース層が薄いほど大きくなっている。静止衛星の寿命中に照射される放射線量は、1MeV電子線で換算すると $1 \times 10^{15}\text{cm}^{-2}$ になるため、ベース層の厚さが1 μm のセルが最も耐放射線性に優れているといえる。開放電圧の劣化はベース層の厚さが厚いほど大きい。照射前の開放電圧はベース層が薄いほど大きく、 $1 \times 10^{15}\text{cm}^{-2}$ 照射後においてもこの関係は変わらない。

InGaP/GaAs₂接合太陽電池では、InGaPトップセルの耐放射線性はGaAsボトムセルに比べて格段に高く、GaAsボトムセルの耐放射線性向上が課題になっていた。フレキシブルセルでは、GaAsボトムセルのベース層の厚さを1 μm 程度まで薄くでき、その結果、ボトムセルの耐放射線性を向上させることができるため、宇宙用太陽電池として有望である。

むすび

GaAs基板上にInGaP/GaAs₂接合太陽電池のエピタキシャル層を成長し、その後、エピタキシャル層を基板から分離する技術を用い、紙のように軽くてフレキシブルな高効率III-V族化合物太陽電池を世界で始めて開発した。超軽量で高効率化合物フレキシブル太陽

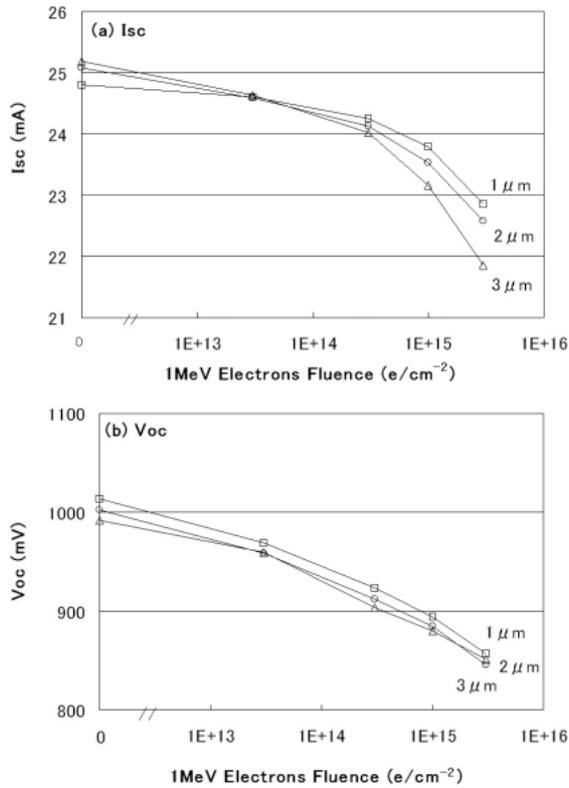


図6 GaAsフレキシブルセルの短絡電流 (a) および開放電圧 (b) の1MeV電子線照射後の変化

Fig. 6 Change in short-circuit current (a) and open-circuit voltage (b) of the GaAs flexible cells after irradiation of 1MeV electrons.

電池の1g当たりの出力は5W/g (従来の約15倍) を超え, 宇宙用太陽電池や飛行船等への応用が期待される。

謝辞

本開発を遂行するにあたり, ご指導ご鞭撻を頂いた関係各位に深く感謝致します。

参考文献

- 1) T. Takamoto, T. Agui, K. Kamimura, M. Kaneiwa, M. Imaizumi, S. Matsuda and M. Yamaguchi, Proceeding of the 3rd World Conference on Photovoltaic Conversion, 3PL-C2-01 (2003).
- 2) M. Yamaguchi, T. Takamoto, et al., "Japanese Activities of R&D on III-V Concentrator Solar Cells and Modules," proc 19th EC PV Solar Energy Conf. Paris, (June 2004).

(2004年9月27日受理)