

学位論文

集光型太陽電池の薄型・軽量化に関する研究

奈良先端科学技術大学院大学  
先端科学技術研究科  
物質創成科学領域  
情報機能素子科学研究室

林 伸彦

## 目次

### 略語の説明

|     |                    |    |
|-----|--------------------|----|
| 1.  | 序論                 |    |
| 1-1 | 本論文の背景             | 1  |
| 1-2 | 本論文の目的と構成          | 11 |
|     | 参考文献               | 18 |
| 2.  | 微小太陽電池素子の開発        |    |
| 2-1 | はじめに               | 21 |
| 2-2 | 微小太陽電池素子の開発        | 22 |
| 2-3 | 微小太陽電池素子の特性評価      | 26 |
| 2-4 | まとめ                | 32 |
|     | 参考文献               | 33 |
| 3.  | 薄型CPVモジュールの特性解析    |    |
| 3-1 | はじめに               | 35 |
| 3-2 | 薄型CPVモジュールの構造と作製方法 | 37 |
| 3-3 | 薄型CPVモジュールの測定方法    | 41 |
| 3-4 | 薄型CPVモジュールの評価と特性解析 | 46 |
| 3-5 | まとめ                | 56 |
|     | 補足                 | 57 |
|     | 参考文献               | 60 |
| 4.  | 薄型CPVモジュールの性能実証    |    |
| 4-1 | はじめに               | 62 |
| 4-2 | 薄型CPVモジュールの構造と作製方法 | 63 |
| 4-3 | 太陽電池特性および光学特性の測定方法 | 68 |
| 4-4 | 薄型CPVモジュールの性能実証    | 69 |
| 4-5 | 薄型CPVモジュールの損失解析    | 75 |
| 4-6 | まとめ                | 79 |
|     | 参考文献               | 80 |

|     |                      |     |
|-----|----------------------|-----|
| 5.  | 薄型・軽量CPVモジュールの実用化    |     |
| 5-1 | はじめに                 | 82  |
| 5-2 | 薄型・軽量CPVモジュールの構造     | 84  |
| 5-3 | 自己整合法を利用した素子実装方法     | 87  |
| 5-4 | 薄型・軽量CPVモジュールの作製方法   | 92  |
| 5-5 | 1次レンズ高さの最適化          | 94  |
| 5-6 | 薄型・軽量CPVモジュールの太陽電池特性 | 99  |
| 5-7 | まとめ                  | 102 |
|     | 参考文献                 | 103 |
| 6.  | 総括                   |     |
| 6-1 | 総括                   | 104 |
| 6-2 | 今後の展望                | 107 |
|     | 参考文献                 | 110 |
|     | 謝辞                   | 111 |
|     | 業績リスト                | 112 |

## 略語の説明

Isc 短絡電流

Voc 開放電圧

FF 曲線因子 (フィルファクター)

$\eta$  変換効率

Pmax 最大出力点

# 第1章 序論

## 1-1 本論文の背景

### 1-1-1 集光型太陽電池とは

集光型太陽電池 (Concentrator Photovoltaics: CPV) は単結晶シリコン太陽電池の2倍近い変換効率を出すことができるため、再生可能エネルギーとして有望である[1]。CPVモジュールでは、人工衛星で使用される高効率な多接合太陽電池素子を使用する。多接合太陽電池素子は高価なため、通常、1辺5~数十mm程度の小面積で使用し、安価なプラスチック製レンズを用いて、広い面積から太陽光を多接合太陽電池素子上に集光させる。また、CPVモジュールは太陽追尾装置に搭載し、太陽が時間とともに黄道上を移動しても、CPVモジュールを太陽の方向に正確に向け続け、太陽電池素子に集光した太陽光を捉え続けながら発電を行うものである。

図1-1に、各種太陽電池の変換効率の推移を示す[1]。多接合太陽電池は、単結晶シリコン太陽電池や単接合GaAs太陽電池と比較して、特に高い変換効率を達成しており、現在の世界最高効率としては、3接合太陽電池素子で44.4% [2]、4接合太陽電池素子で46.0% [3]の変換効率が見られている。なお、上記変換効率は、CPVモジュール搭載時の数値ではなく、太陽電池素子単体に高倍集光の光を均一に照射して測定した時の値である。

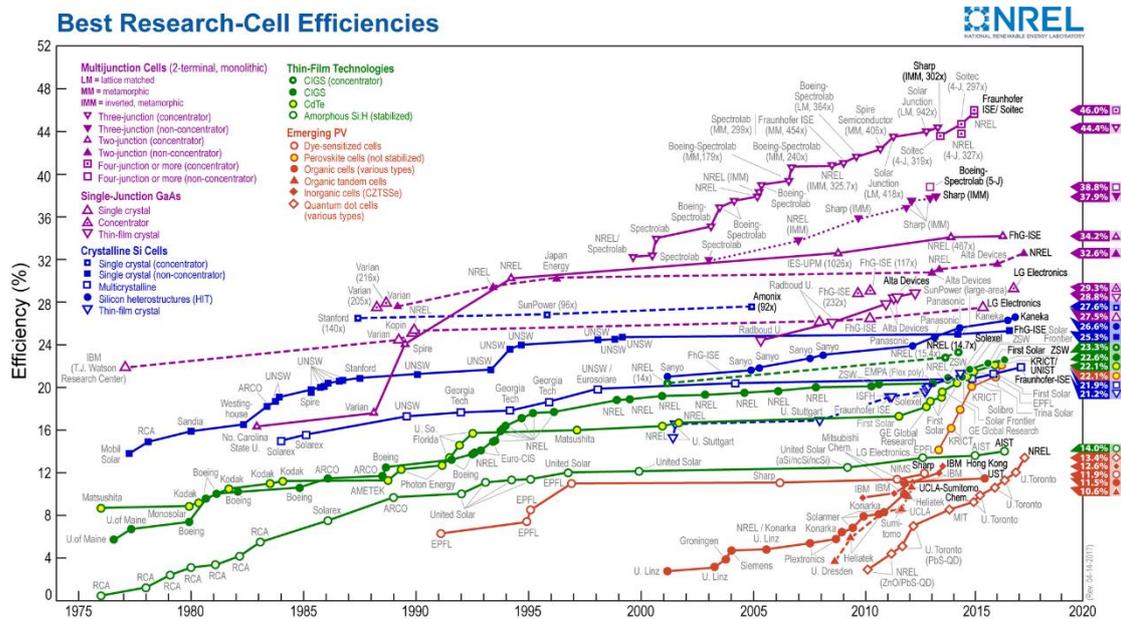


図1-1 各種太陽電池における変換効率の推移[1]

多接合太陽電池は、バンドギャップエネルギーが異なる複数の太陽電池をタンデム状に積層したものであり、太陽光の入射側からバンドギャップが大きい順に積層されている。通常、多接合太陽電池は、構成される元素の混晶比を変更することで、任意のバンドギャップに調整することが可能なIII-V族化合物半導体が使用される。この化合物半導体は、MOCVD法やMBE法を使用して、Ge基板やGaAs基板上に、単結晶薄膜の多層膜としてエピタキシャル成長させたものである。

太陽電池では、入射する光子を、電子と正孔に変換し、太陽電池のバンドギャップエネルギーに匹敵する電圧で電気エネルギーとして取り出す。単接合の太陽電池では、高エネルギーの光子(短波長光)も、低エネルギーの光子(長波長光)も同じ電圧でしかエネルギーを取り出すことができず、短波長光は効率よく電気エネルギーに変換することができない。しかし、多接合太陽電池では、短波長光はバンドギャップの大きい太陽電池層で、長波長光はバンドギャップの小さい太陽電池層で発電を行い、太陽光の光子エネルギーに応じて、異なる太陽電池層で電気エネルギーとして取り出すことができるため、効率的な発電が可能である。

多接合太陽電池は、変換効率改善のため、これまでにいろいろな試みがなされている。ここでは、3接合太陽電池として①格子整合型、②順積み格子不整合型、③逆積み格子不整合型、④GaAs基板使用型の4タイプと4接合太陽電池について説明する。図1-2に、①格子整合型、②順積み格子不整合型、③逆積み格子不整合型の3接合太陽電池の例を示す[4]。

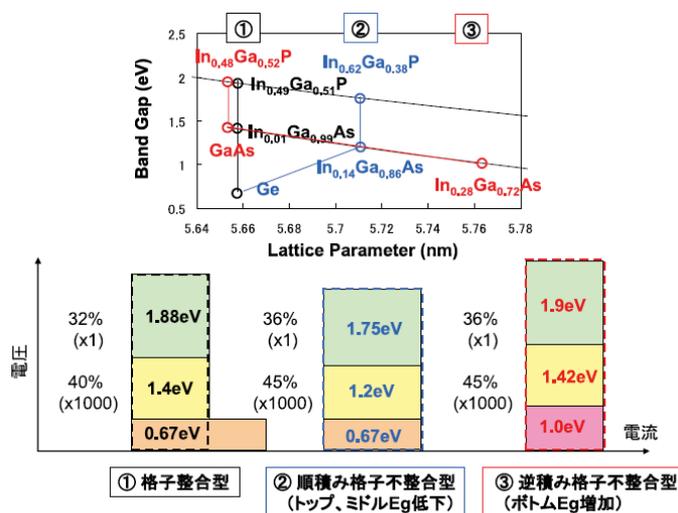


図1-2 Ge基板上に作製される3タイプの3接合太陽電池[4]

格子整合型(①、図1-2)の素子構造の一例を 図1-3(a)に示す。格子整合型(①)は、Ge基板上に、ボトムセルGe ( $E_g=0.67\text{eV}$ )、ミドルセルInGaAs ( $E_g=1.4\text{eV}$ )、

トップセル InGaP ( $E_g=1.88\text{eV}$ ) を順に積層したものである[5]。トップ、ミドル、ボトム、各セルとも、Ge 基板と格子整合した状態でエピタキシャル成長される。したがって、格子欠陥の少ない高品位な結晶が成長でき、特性の良い発電層を作製することが可能である。一方、多接合太陽電池では、各セルが直列に接続されているため、 $I_{sc}$  は最もフォトリソントが小さいセルの電流値に律速される。格子整合型(①)では、図 1-2 に示すように、ボトムセルのフォトリソントが突出して大きく、 $I_{sc}$  はトップまたはミドルセルで制限される。そのため、ボトムセルのエネルギーを十分に活用できず、変換効率が低くなる問題がある。

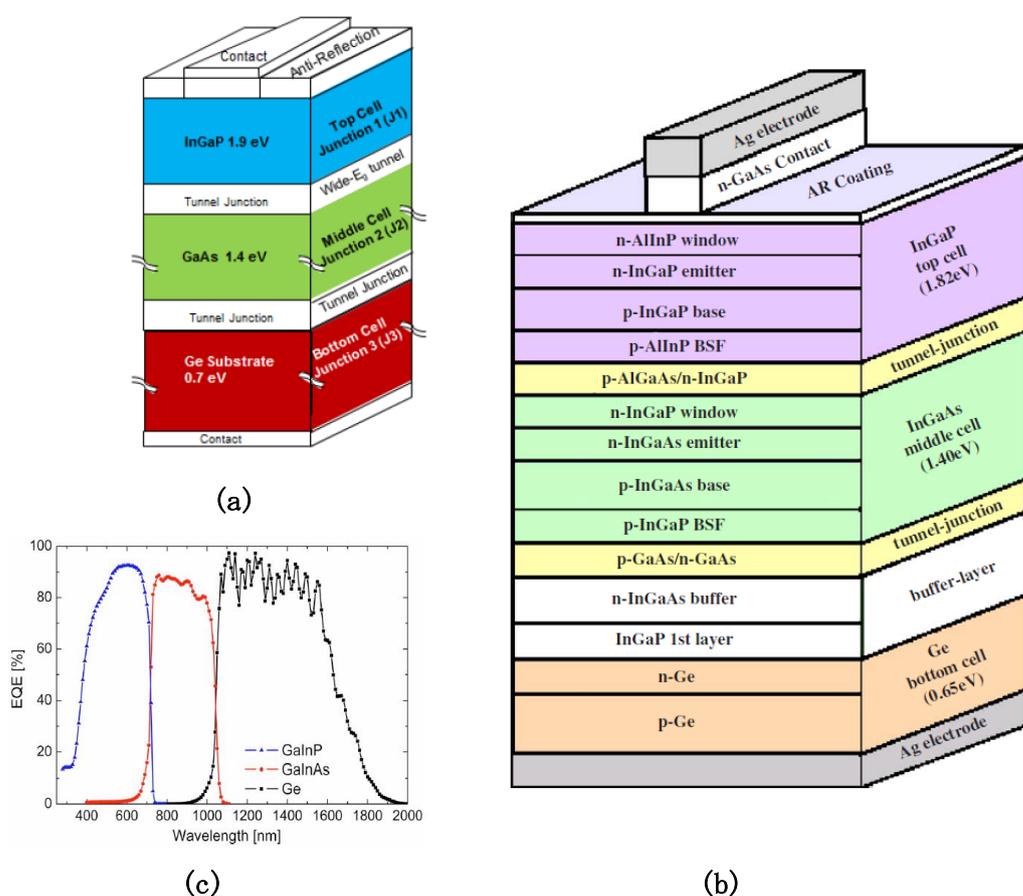


図 1-3 順積み型 3 接合太陽電池の例

(a) 格子整合型 3 接合太陽電池 [9]

(b) 順積み格子不整合型 3 接合太陽電池 [6]

(c) 順積み格子不整合型 3 接合太陽電池の外部量子効率[8]

順積み格子不整合型(②、図 1-2)の素子構造の一例を図 1-3 (b)に示す。順積み格子不整合型(②)は、Ge 基板上に、ボトムセル Ge ( $E_g=0.67\text{eV}$ )、ミドルセル

InGaAs ( $E_g=1.2\text{eV}$ )、トップセル InGaP ( $E_g=1.75\text{eV}$ )を順に積層したものである。3セルのフォトカレントを等しくするため、トップセル、ミドルセルの格子定数を Ge 基板よりも大きくし、トップセル、ミドルセルのバンドギャップを小さくしている。しかし、トップセル、ミドルセルの格子不整合により格子欠陥が増加し、 $V_{oc}$  の低下やシヤント抵抗の増加による特性低下が発生することになるので、図 1-3 (b)のように、格子不整合を緩和するためのバッファ層を、ボトムセルとミドルセルの間の挿入している[6-8]。図 1-3 (c)に外部量子効率を示す。図 1-3 (c)からトップ、ミドル、ボトム各セルのフォトカレントは、AM1.5D (ASTM G173-03 で規定される基準太陽光スペクトル AM1.5G 中の直達光スペクトル) の場合に  $17\text{mA}/\text{cm}^2$  と等しくなることが確認されている。

逆積み格子不整合型(③、図 1-2)は、図 1-4 に示すように、格子整合型(①)、順積み格子不整合型(②)の場合とは逆に、GaAs 基板上にトップセル InGaP ( $E_g=1.88\text{eV}$ )、ミドルセル GaAs ( $E_g=1.42\text{eV}$ )、ボトムセル InGaAs ( $E_g=1.0\text{eV}$ )の順にエピタキシャル成長させる。このエピ基板をボトムセル側から支持基板に張り合わせた後、GaAs 基板を除去することで、逆積み格子不整合型(③)は作製される[2]。逆積み格子不整合型(③)も、3セルのフォトカレントを等しくすることができる。トップセル、ミドルセルは GaAs 基板と格子定数が等しく高品位な結晶成長が可能であるが、ボトムセルは格子定数が大きくなり、格子整合できなくなるため、ミドルセルとボトムセル間にバッファ層が挿入されている。順積み格子不整合型(②)の場合と比較して、格子不整合となるセルがボトムセルのみとなる利点がある一方、基板張り替えという煩雑な工程が必要となる。

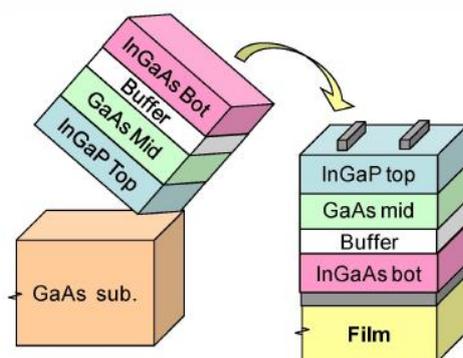


図 1-4 逆積み型 3 接合太陽電池の例[2]

図 1-5 (a)に、GaAs 基板上に、ボトムセル GaInNASb ( $E_g=1.0\text{eV}$ )、ミドルセル GaAs ( $E_g=1.42\text{eV}$ )、トップセル InGaP ( $E_g=1.88\text{eV}$ )を順に積層した GaAs 基板使用型(④)を示す[9, 10]。図 1-4 の逆積み格子不整合型と比較すると、トップ、ミドル、ボトムの各セルのバンドギャップはほぼ同じであるが、ボトムセルには GaAs 基板に格子整

合が可能な GaInNAsSb を採用している。GaInNAsSb は、RF により窒素プラズマを発生させることで、基板の上に窒素を供給できる MBE 法により結晶成長を行うことができ、図 1-5 (b) に示すように In と N の混晶比を制御することで、GaAs 基板と格子定数を合わせることができる[11]。このような結晶成長法を用いることで、3セルのフォトカレントをほぼ等しく設計できるとともに、ボトムセルからトップセルまで格子整合した状態でエピタキシャル成長することができる。そのため、高品位な結晶として成長が行え、良好な太陽電池特性を期待することができる。

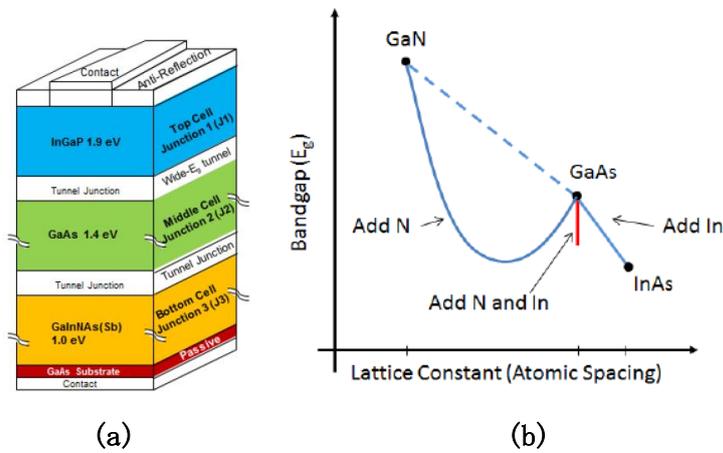


図 1-5 ボトムセルに GaInNAsSb を用いた格子整合型 3 接合太陽電池 [9]  
 (a) ボトムセルに GaInNAsSb を用いた格子整合型 3 接合太陽電池の構造  
 (b) GaInNAsSb の格子定数とバンドギャップの関係

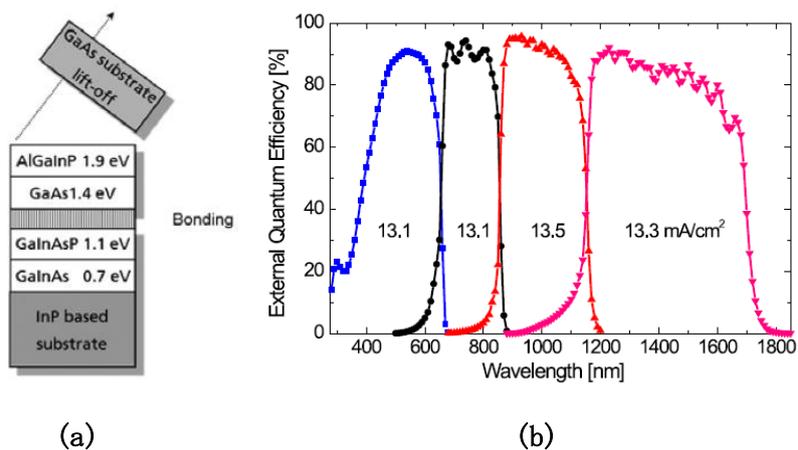


図 1-6 4 接合太陽電池の例 [3, 14]  
 (a) 4 接合太陽電池の構造  
 (b) 4 接合太陽電池の外部量子効率

図1-6に4接合太陽電池を示す。エピタキシャルリフトオフ(ELO)技術[12]とメカニカルスタックによる異種基板接合技術[13]を用いて、2枚の基板上に成長した太陽電池ウェハどうしを張り合わせたものである。図1-6(a)に4接合太陽電池の構造を示す。InP基板上にGaInAs( $E_g=0.7\text{eV}$ )、GaInAsP( $E_g=1.1\text{eV}$ )の順に成長したウェハの表面に、GaAs基板上にInGaP( $E_g=1.9\text{eV}$ )、GaAs( $E_g=1.4\text{eV}$ )の順に成長したウェハをメカニカルスタックした後、GaAs基板をリフトオフした状態を示している。図1-6(b)に、この4接合太陽電池の外部量子効率を示す。各セルのフォトカレントは $13.1\sim 13.5\text{mA/m}^2$ とほぼ等しくなっている。この太陽電池素子において、現在、世界最高の変換効率46.0%が達成されている。

図1-7に、4接合太陽電池素子で使用する波長領域の吸収スペクトルを示す[14]。青色のラインは、CPVモジュール用のレンズとして最もよく使用される、厚みPMMA(Polymethyl methacrylate)の吸収スペクトルを、緑色のラインは、ガラス板上にシリコン樹脂によりフレネルレンズの凹凸形状を形成したSOG(silicone-on-glass)レンズの吸収スペクトルを示している。PMMAの吸収スペクトルでは、4接合太陽電池素子の最下層セル(図1-7のJ1)が吸収する波長帯において、いくつかの大きな吸収端がある。そのため、4接合太陽電池素子に集光レンズとしてPMMAを使用する場合、最下層セルのフォトカレントがPMMAの光吸収により低下し、 $I_{sc}$ が最下層セルで律速される問題がある。そのため、4接合太陽電池素子を用いたCPVモジュールで十分な発電性能を発揮させるためには、SOGなど最下層セルの波長帯における光吸収が少ないレンズを使用することが前提となる。

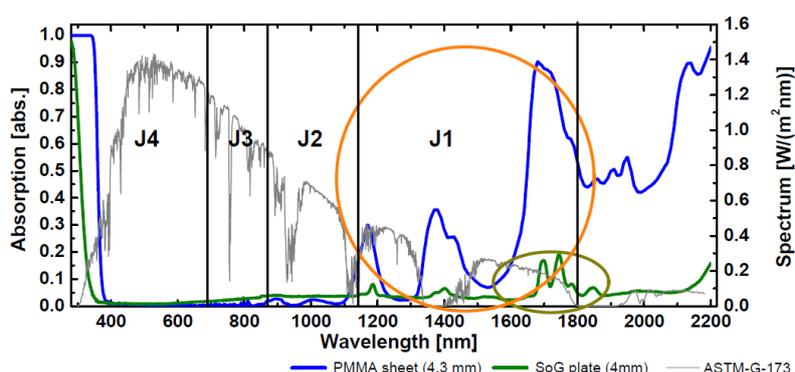


図1-7 4接合太陽電池で使用する波長領域の吸収スペクトル[14]

青線：PMMA(厚み4.3mm)の吸収スペクトル

緑線：SOG(厚み4mm)の吸収スペクトル

黒線：ASTM-G-173で規定されたAM1.5Dの太陽光スペクトル

J1~J4は4接合太陽電池内の4セルの吸収波長を示す。

### 1-1-2 従来の集光型太陽電池の課題

本章の冒頭で述べたように、従来のCPVモジュールは、一辺数mm～数十mmの多接合太陽電池素子に、数十cm角のサイズのレンズにより集光した太陽光を照射し、太陽追尾装着により高精度に太陽を追尾しながら発電を行うものである。ここでは、このような従来のCPVモジュールの課題について述べる。

図1-8に従来のCPVモジュールの構造を示す[15, 16]。CPVモジュールは、一般的に、1次光学系としてフレネルレンズなどの集光用レンズ、2次光学系としてホモジナイザー(太陽電池素子受光面に均一に太陽光を照射することで特性を改善するための光学部品)、多接合太陽電池素子、太陽電池素子で発生した熱を逃がすための放熱板から構成される。図1-9に示す例では、集光用レンズのサイズは約200mm角であり、この集光用レンズの焦点距離となる約300mmの位置に、約10mm角の多接合太陽電池素子が搭載されている。ただし、CPVモジュールの設計によっては、2次光学系がレンズ形状のものや、2次光学系が省略される場合がある。CPVモジュールは、集光レンズの焦点距離以上の厚みが必要となるので、通常の平面パネルタイプの太陽電池と比較すると、CPVモジュールの厚みは非常に大きくなる。

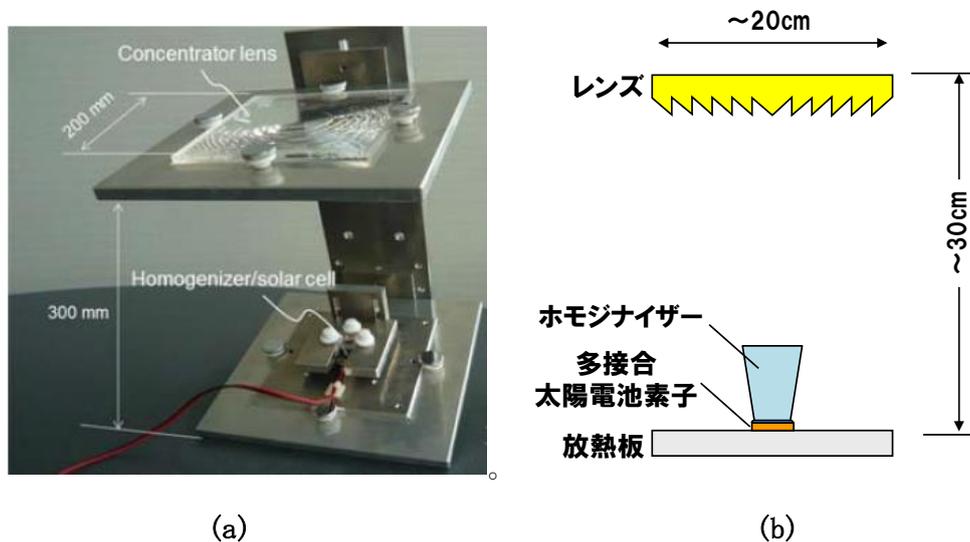


図1-8 従来型CPVモジュールのモデル[15]

(a) 従来CPVモジュールのモデル

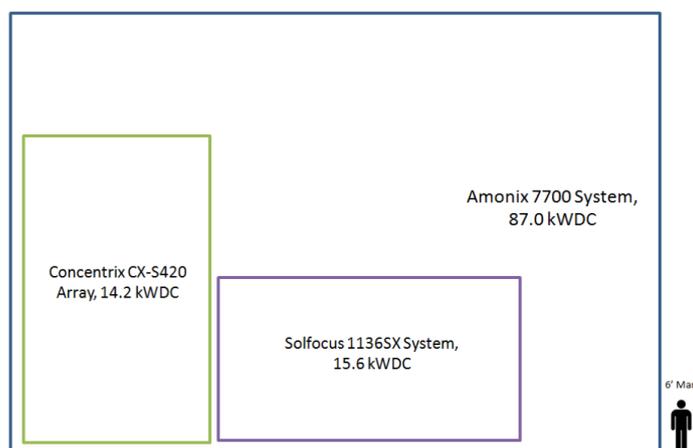
[16]より抜粋(寸法は一般的なCPVモジュールの1例である)

(b) (a)の模式図

図1-9 (a)に太陽追尾装置に搭載されたCPVパネルの外観写真を示す[17]。CPVパネルは、複数のCPVモジュールを縦横に並べたものである。図1-9 (b)に、市販されているCPVパネルのサイズを示す[18]。Concentrix社製パネルでは縦横6m×11m、Solfocus社製パネルでは縦横5.5m×10m、Amonix社製パネルでは縦横15m×22mあり、太陽追尾装着にCPVパネルを搭載したCPVシステム全体は、非常に大きな建造物となる。



(a)



(b)

### 図1-9 CPVパネルの例

(a) 太陽追尾装置に搭載されたCPVパネルの外観写真[17]

(b) 市販されるCPVパネルの大きさ

Amonix 製 7700 の場合、モジュールサイズはメートル換算で 14.9m×21.9m ある [18]。

次に、太陽追尾装置の課題について述べる。CPVモジュールは、太陽追尾装置により太陽電池素子の受光面に正確に太陽光を照射し続ける必要があり、太陽光照射部が受光面から位置ずれすることを極力抑えることが必要となる。太陽追尾装置が正確に太陽を追尾している場合、太陽電池素子には垂直に太陽光が入射する。しかし、追尾ずれにより太陽光の入射角が垂直入射よりずれると、受光面から太陽光照射部が移動し、 $I_{sc}$  の低下を招く。 $I_{sc}$  が垂直入射時の90%になる入射角をアクセプタンスアングルと呼ぶ。通常、CPVモジュールでは、アクセプタンスアングルは、 $0.4\sim 1^\circ$  の範囲のものが多く報告されてる[19, 20]。受光面からの太陽光照射部の位置ずれを発生させる要因には、

(a) 太陽電池素子、集光レンズ系の組立精度。

(b) 太陽追尾装置の太陽追尾間隔

補足：通常、追尾装置では一定時間おきに断続的に太陽追尾させる。追尾が停止している間は、地球の自転により、CPVモジュールに入る太陽光の入射角が $0.25^\circ$  /分で増加する。

(c) 太陽追尾装置の追尾精度

がある。CPVモジュールの性能を十分に発揮させるためには、太陽電池素子、集光レンズ系の組立精度を高めるとともに、太陽追尾装置駆動部の消費電力を考慮し、最適な追尾間隔で太陽追尾装置を運用することが必要となる。さらに、太陽追尾装置には、上記アクセプタンスアングルの範囲内でCPVモジュールの追尾を行っていただくの高い追尾精度が要求される。そのためには、太陽追尾装置の駆動部および制御部に高い精度が要求されるだけでなく、太陽追尾装置の構造自体に高い剛性が必要となる。具体的には、巨大なCPVモジュールの自重や風の影響によって太陽追尾装置の支柱やCPVパネルを支持する構造体にたわみや傾きが生じないように、頑丈な構造にすることが必要となる。さらには、太陽追尾装置の設置時には、地盤の緩みによる傾きを防止するため、しっかりとした基礎工事を行うことが要求される。

以上、述べたように、従来型のCPVモジュールは、シリコン太陽電池のような平面パネルタイプの太陽電池に比べると厚く、パネルサイズが数メートルから数十メートルと巨大で、その分重量がある。さらに、コンマ数度の追尾精度を満たすように、しっかりとした基礎工事を行った上に、たわみが発生しない頑丈な太陽追尾装置を設置する必要がある。このように、CPVモジュールは、単結晶シリコン太陽電池と比較すると2倍近い変換効率が得られる一方で、輸送や設置に多くのコストや労力が必要であり、太陽電池のシステムコストを押し上げる要因となっている。

図1-10にCPVモジュールとシリコン太陽電池の均等化発電原価(Levelized Cost Of Electricity: LCOE)を示す[21]。LCOEは、発電設備の設置、運営、

廃止コストを含む、生涯発電量当たりの全コストである。CPVモジュール、シリコン太陽電池とも、1日当たりの積算日射量が大きくなるほどLCOEは低下するが、CPVモジュールの方がLCOEの低下率は大きい。CPVモジュールと平均的なシリコン太陽電池を比較した場合、積算日射量 $6\text{kWh}/\text{m}^2$ 日以上ではCPVモジュールの方がコスト的に有利であるが、 $6\text{kWh}/\text{m}^2$ 日以下ではシリコン太陽電池の方がコスト的に有利となる。現状では、CPVモジュールは、日射量の多い例えばカリフォルニア(積算日射量約 $6.5\text{kWh}/\text{m}^2$ 日)やアリゾナ(積算日射量約 $7.5\text{kWh}/\text{m}^2$ 日)などの地域でのみ有利であるのが実情である。CPVモジュールを使用することが有利な地域を増やすためには、さらに変換効率を高めていくとともに、BOSコスト(太陽光モジュールを除く周辺機器、工事などのシステム費用)を低減していく必要がある。

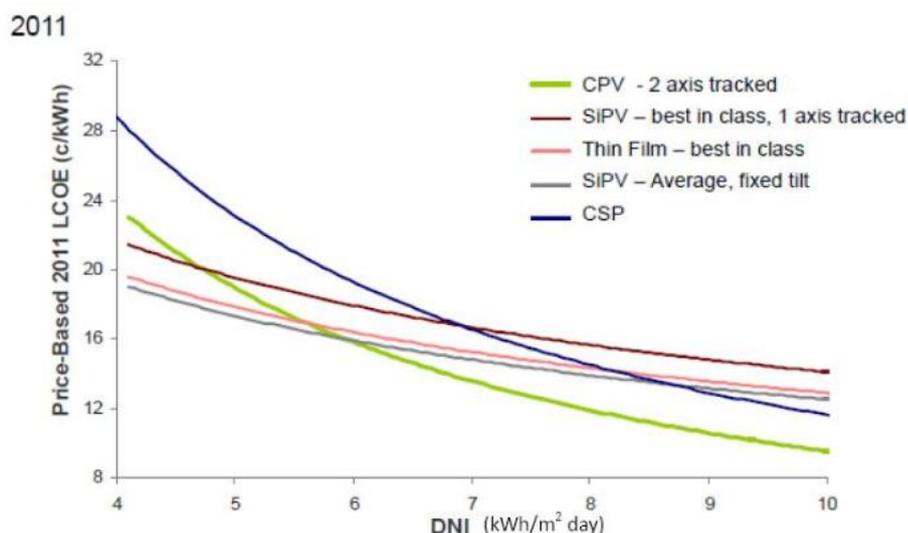


図1-10 CPVモジュールとSi太陽電池のLCOE [21]

## 1-2 本論文の目的と構成

### 1-2-1 本論文の目的

前節で述べたように、従来のCPVモジュールは、高い変換効率が得られる反面、輸送や設置に多くのコストや労力が必要となり、CPVモジュールの普及を妨げる要因になっている。本研究では、CPVモジュールを多様な場所に、容易に輸送・設置できれば、様々な用途に用いることができ、広く世の中に普及できると考え、CPVモジュールの薄型化・軽量化について研究を行った。図1-11に、薄型・軽量CPVモジュールの設置イメージ図を示す。非集光の平面パネルタイプの太陽電池では、民家の屋根など、色々な場所に設置が可能であるのに対して、従来のCPVモジュールでは、しっかりした土木工事が必要なこともあり、設置場所は限られ、メガソーラーなど発電専用の場所が主な設置場所となる。これに対して、薄型・軽量CPVモジュールは軽量であるため、太陽追尾装置も堅固な構造のものは必要なく、基礎工事不要な小型据置タイプのものを使用することができる。その結果、BOSコストの低減が期待できるとともに、ビルの屋上、駅前の空きスペース、農地、インフラの整っていない未開拓地など、多様な場所に設置することが可能となり、CPVモジュールの普及が広がるものと期待できる。

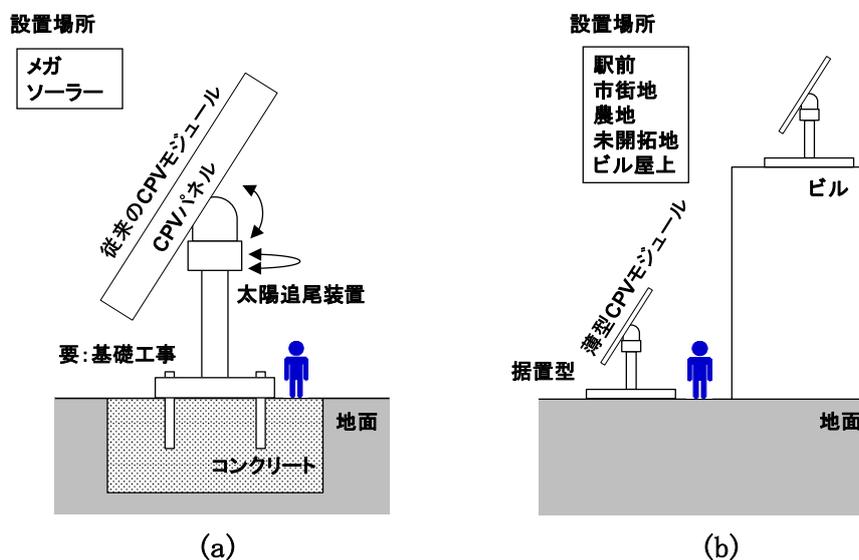


図1-11 CPVモジュールの設置状態

(a) 従来CPVモジュールの設置イメージ図

(b) 薄型・軽量CPVモジュールの設置イメージ図

本研究の薄型・軽量CPVモジュールのコンセプトを図1-12に示す。従来CPVモジュール(図1-12(a))の寸法は、レンズサイズが20cm角程度、焦点距離が30cm程度、太陽電池素子が10mm角程度である。これに対して、薄型・軽量CPVモジュールは、図1-12(b)のように、レンズサイズ、焦点距離、太陽電池素子をそれぞれ約1/10に縮小することにより、薄型化・軽量化を実現させるものである[22]。

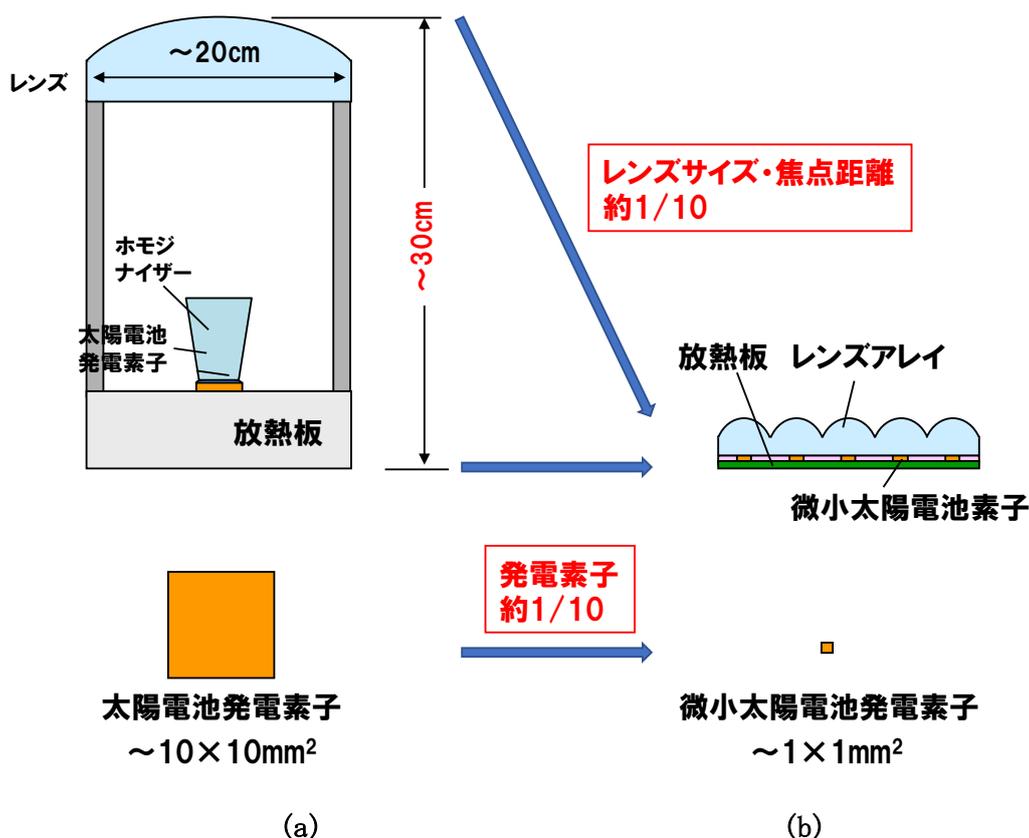


図1-12 薄型CPVモジュールのコンセプト

- (a) 従来のCPVモジュールの例
- (b) 薄型CPVモジュール

以下、薄型のCPVモジュールについて報告された例を示す。

2008年に、Yoonらは、印刷により形成したストライプ状の薄膜シリコン太陽電池(ストライプ幅=26~170 $\mu$ m、397 $\mu$ mピッチ)上に、光硬化性樹脂で作製した「かまぼこ」状のマイクロレンズアレイ(焦点距離2.2mm、397 $\mu$ mピッチ)を張り付けた、1軸追尾型の集光モジュールを報告している(図1-13)[23]。

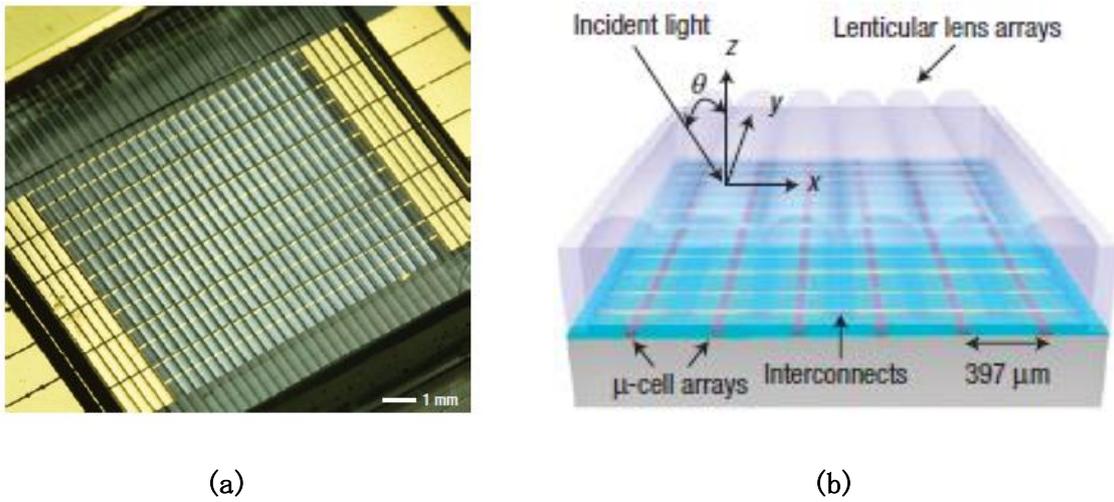


図 1 - 1 3 これまでに報告されている薄型 CPV モジュール [23]

- (a) 薄型 CPV モジュールの外観写真
- (b) 薄型 CPV モジュールの模式図

2009 年に、Karp らは、焦点距離が 11.5mm のレンズアレイとスラブ型光導波路とを組み合わせた CPV モジュールを提案した [24]。レンズアレイに入射した太陽光は、導波路底面の集光位置に斜めに設置した反射面で反射し、光導波路内を導波しながら進み、光導波路端面から出射する。この出射した太陽光を、太陽電池素子で取り込みむようになっている (図 1 - 1 4)。

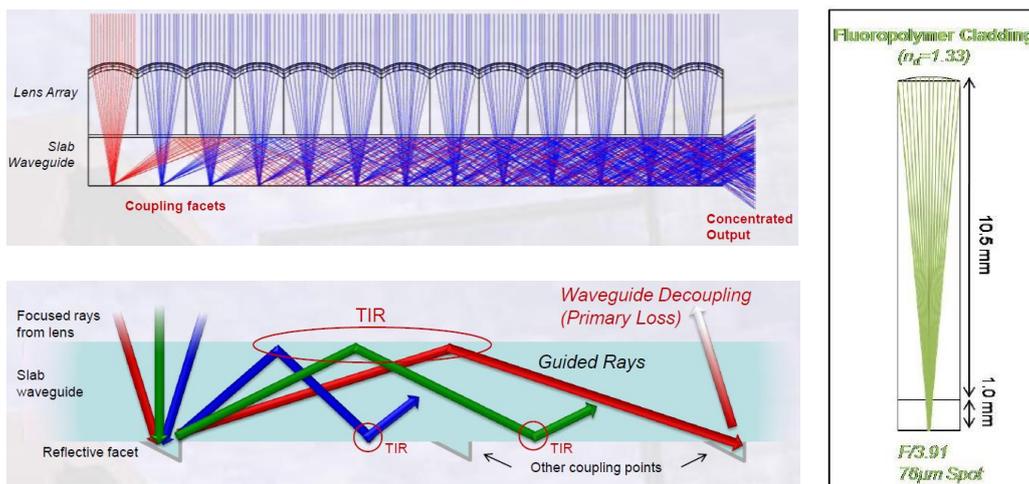


図 1 - 1 4 これまでに報告されている薄型 CPV モジュール [24]

次に、微小太陽電池素子の実装方法について報告例を示す[25]。Fumanらは、面積が $0.5\text{mm}^2$ よりも小さい微小太陽電池素子上にボール状の2次レンズを設けたCPVモジュールを報告している(図1-15(a))。微小太陽電池素子は独自のマイクロ転写印刷プロセスを使用して回路基板上に実装される。マイクロ転写印刷プロセスの概要を図1-15(b)に示す。太陽電池素子には、GaAs基板上に犠牲層、ボトムセル、トップセルの順に形成した二接合太陽電池(GaInP/GaAs)を使用している。まず、この犠牲層をエッチングにより除去し、GaAs基板から微小太陽電池素子部分を剥離する。次に、マス目状に並んだ突起部を有するゴムスタンプをウェハの表面に密着させ、ファンデルワールス力を用いて、上記突起部に微小太陽電池素子を密着させる(図1-15(b)-A)。次に、スタンプを剥がし、CPVモジュールの回路基板上に微小太陽電池素子を転写させる(図1-15(b)-B~D)。図1-15(b)-Eに、微小太陽電池素子ピックアップ後のGaAs基板の光学顕微鏡写真、図1-15(b)-Fに、微小太陽電池素子転写後の回路基板を示す。

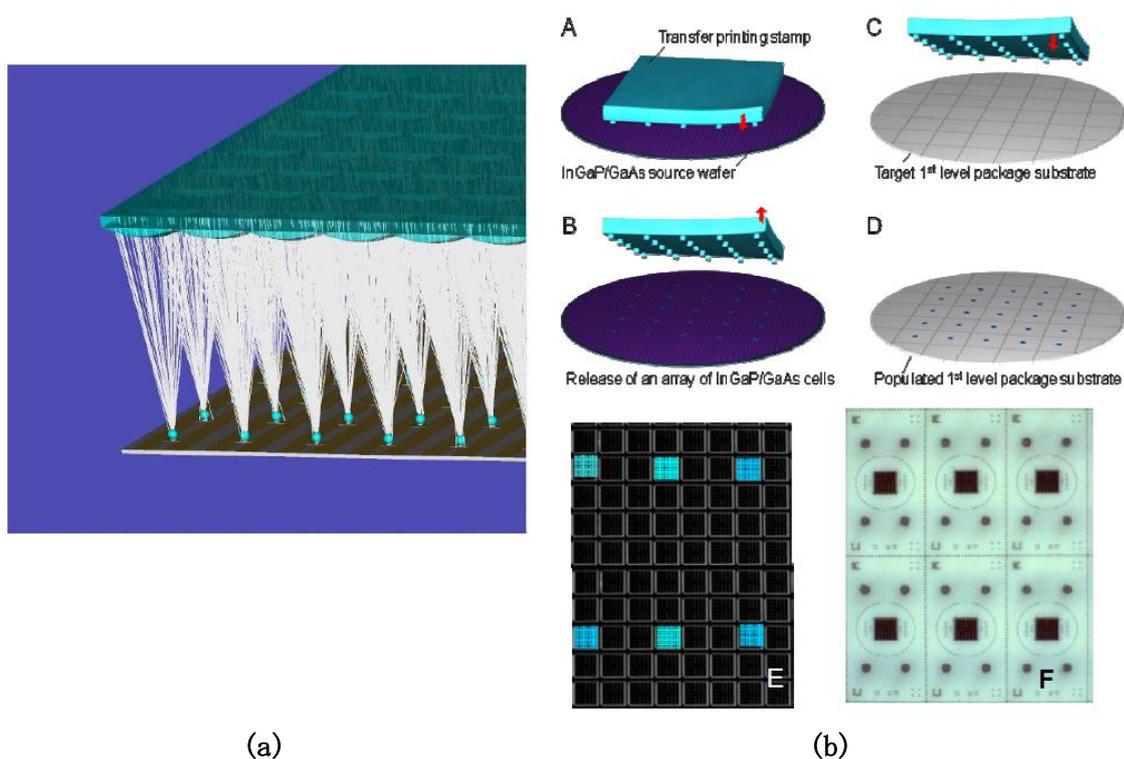


図1-15 微小太陽電池素子の実装方法 [25]

- (a) CPVモジュールの構造
- (b) マイクロ転写印刷プロセスの概要

以上のように、従来例では、マイクロレンズにより太陽光を微小太陽電池素子に集

光させる薄型モジュールの基本構造、微小太陽電池素子の実装方法が提案されている。しかし、本研究開始時、薄型CPVモジュールの実現には、以下の技術的課題があった。

微小太陽電池素子に関して、太陽電池特性を解析した報告例はなく、太陽電池としての挙動が不明であった。太陽電池セルを小型化していく場合、セル周囲で発生するキャリアの再結合の影響が大きくなり、 $V_{oc}$ が低下することは広く知られていた。そのため、微小太陽電池素子は、上記キャリアの再結合による特性低下が懸念された。

また、通常サイズのCPV用太陽電池素子では、集光レンズの色収差、コマ収差によりFFが低下するため、太陽電池素子受光面上にホモジナイザーを設置し、FFの低下を防止する方法が知られていた。しかし、薄型CPVモジュールでは、多数の微小太陽電池素子上にホモジナイザーを精度よく設置することは事実上不可能である。したがって、薄型CPVモジュールでは、ホモジナイザーを用いずにFFを改善する必要があるが、微小太陽電池素子のFFを改善するための方法は不明であり、FFの低減を防止することは、薄型CPVモジュール実現のための大きな課題であった。

以上のように、本研究開始時、微小太陽電池素子を使用した薄型CPVモジュールで、高い性能を得るための知見は何も存在していない状態であった。

さらに、薄型CPVモジュールは、通常のCPVモジュールと異なり、多数の微小素子を集光位置に精度よく実装する必要があるが、他の太陽電池と同様、低コストで実装することが強く要求される。この素子実装上の問題が、薄型CPVモジュールの実現を困難なものとしていた。

以上の技術的課題より、薄型CPVモジュールの研究開発は、従来CPVよりも応用できる分野や用途を拡大できる利点があるにもかかわらず、進展することはなかった。そこで本研究では、特性が未知であった微小太陽電池素子の素子特性を解明することにより、薄型CPVモジュールの発電性能を大幅に引き上げ、世界トップクラスの変換効率が得られることを実証した。さらに、独自の微小素子実装法を開発するとともに、薄型CPVモジュールの実用化のため、モジュールの軽量化、低コスト化を検討した。

本研究では、CPVモジュールの軽量化、低コスト化の観点から、レンズ材料には重いガラスや高価なシリコンは使用せず、PMMAを採用している。したがって、太陽電池素子には、PMMAレンズを使用した場合に最下層セルでフォトリソが不足する4接合素子は使用せず、3接合素子を使用した。

CPVモジュールのレンズサイズ、焦点距離、多接合太陽電池素子をそれぞれ約1/10に縮小する薄型CPVモジュールでは、前述のように、小型で多数の太陽電池素子を実装する必要がある。また、薄型のモジュールを作製するためには、よりコンパクトに太陽電池素子を実装する必要がある。そこで、本研究の微小太陽電池素子では、電極構造に、正電極、負電極を素子の同じ面から取り出す「片面取り出し構造」を採用した。片面取り出し構造は、一度の実装工程で正負電極とも同時に配線するこ

とが可能であり、多数の素子を効率よく実装するのに適している。また、素子の片面のみで実装が可能のため、素子の両側で配線が必要な場合に比べ、コンパクトに実装をすることに適している。片面取り出し構造には、正負両電極を基板表面から取り出すフロントコンタクト型と、基板裏面から取り出すバックコンタクト型がある。本論文中では、第2章はバックコンタクト型、第3章以降はフロントコンタクト型と電極構造を変更している。また、素子と回路基板の接続方法も、半田融着を用いた場合とワイヤーボンドを用いた場合がある。これは、本論文の各章において、微小太陽電池素子について様々な実装方法を検討したためである。

## 1-2-2 本論文の構成

本研究の構成は以下のとおりである。

本章に続く第2章では、微小太陽電池素子の開発について述べる。微小太陽電池素子を回路基板に実装するのに適した片面取り出し構造の電極を採用した、素子面積 $1\text{mm}^2$ 以下の微小3接合太陽電池素子の開発について述べる。太陽電池素子の素子サイズを小さくする場合、素子周囲のキャリア再結合の影響が大きくなるため、素子特性が低下することが懸念されるが、開発した微小太陽電池素子では、素子サイズが小さい場合でも、集光倍率(太陽電池素子受光面の面積に対するレンズ面積の比率)を高くしていくことで、従来サイズの太陽電池と遜色のない高い変換効率が得られることを微小太陽電池素子の特性として初めて明らかにしたので、その内容について示す。

第3章では、微小発電素子を使用した薄型CPVモジュールを試作し、モジュール内のモノモジュール(複数のレンズ、太陽電池素子で構成されるCPVモジュール内の素子1個分)により太陽電池特性の評価・解析を行った。微小太陽電池素子を用いたCPVモジュールに関しては、これまでに特性解析を行った報告例がなく、微小太陽電池素子の変換効率に大きく影響を与える要因が不明であった。そこで、微小太陽電池素子の性能を十分発揮させるため、太陽電池素子の受光面に照射される太陽光の入射角や照射サイズを変更して太陽電池特性の測定・解析を行い、変換効率に大きな影響を及ぼす要因を、微小太陽電池素子の特性として初めて明らかにするとともに、薄型CPVモジュールを実現するためのキーポイントとなる知見を得ることができたので、その内容について示す。

第4章では、第3章での解析結果を踏まえて改良を加えた薄型CPVモジュールを用い、モジュールの性能実証を行った。モジュール内のモノモジュールを使用して、

日射量、太陽光スペクトルが異なる様々な太陽光で測定を行い、その結果として当時の世界トップクラスの変換効率が得られたことを述べる。さらに、高い変換効率が得られる原因について調べ、高効率化の指針を得ることを目的に、薄型モジュールのエネルギー損失について解析を行ったので、その内容について示す。

第5章では、薄型・軽量CPVモジュールの試作および実用化研究を行った。第2章～第4章で得られた知見を用いるとともに、実用化のため、低コスト化、軽量化を考慮したCPVモジュールを試作した。また、薄型CPVモジュールでは、多数の微小太陽電池素子を精度よく所定の位置に並べる必要がある。これまでに、接着剤の表面張力を用いたFSA法[26]により自己整合的に微小発電素子を配置する方法が報告されているが、本章では、現在広く普及している表面実装技術(surface-mounting technology: SMT)[27]と、熔融半田の表面張力を利用した自己整合法の組み合わせにより、低コスト化、量産化に適した実装技術を開発した。これにより、薄型CPVモジュールを実現するための製造上の技術課題を解決する方法を示すことができたので、その内容について述べる。また、上記実装方法を用いて試作した薄型・軽量CPVモジュールにおいて、すべての太陽電池素子に集光位置のずれがなく、30%以上のモジュール効率が得られることを示す。

第6章では、第1章～第5章までの総括と、薄型・軽量CPVモジュールの今後の展望について述べる。

## 参考文献

- [1] National Renewable Energy Laboratory - National Center for Photovoltaics, "Research Cell Efficiency Records", <https://www.energy.gov/eere/solar/downloads/research-cell-efficiency-records>, 2015
- [2] T. Takamoto, H. Washio, and H. Juso., "Application of InGaP/GaAs/InGaAs triple junction solar cells to space use and concentrator photovoltaic," 40th *Photovoltaic Specialist Conference*, pp. 0001-0005, 2014.
- [3] F. Dimroth et. Al., "Four-Junction Wafer-Bonded Concentrator Solar Cells," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 6, pp.343-349, 2016.
- [4] 高本達也、"化合物太陽電池"、シャープ技報、第 100 号・2010 年 2 月、pp. 28-31
- [5] J. D. Aiken, "InGaP/GaAs/Ge multi-junction solar cell efficiency improvements using epitaxial germanium," *Photovoltaic Specialists Conference*, pp.994-997, 2000.
- [6] K. Nishioka et. Al., "Evaluation of InGaP/InGaAs/Ge triple-junction solar cell and optimization of solar cell's structure focusing on series resistance for high-efficiency concentrator photovoltaic systems," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 90, pp. 1308–1321, 2006.
- [7] J. F. Geisz, D. J. Friedman, J. S. Ward, A. Duda, W. J. Olavarria, T. E. Moriarty, J. T. Kiehl, M. J. Romero, A. G. Norman, and K. M. Jones, "40.8% efficient inverted triple-junction solar cell with two independently metamorphic junctions," *Applied Physics Letters*, vol. 93, e123505, 2008.
- [8] W. Guter et. Al., "Current-matched triple-junction solar cell reaching 41.1% conversion efficiency under concentrated sunlight," *Applied Physics Letters*, vol. 94, e223504, 2009.
- [9] M. Wiemer, V. Sabnis and H. Yuen, "43.5% Efficient Lattice Matched Solar Cells," *High and Low Concentrator Systems for Solar Electric Applications VI, Proc. of. SPIE*, vol. 8108, e810804, 2011.
- [10] V. Sabnis, H. Yuen, and M. Wiemer, "High-efficiency multijunction solar cells employing dilute nitrides," *AIP Conference Proceedings.*, vol. 1477, pp. 14-19, 2012.
- [11] M. Kondow et al. "Gas-source MBE of GaInNAs for long-wavelength laser diodes," *Journal of crystal growth*, vol. 188, pp. 255-259, 1998.
- [12] J. J. Schermer et al. "Epitaxial Lift-Off for large area thin film III/V devices," *Physica Status Solidi (a)*, vol.202, pp. 501-508, 2005.

- [13] H. Mizuno, K. Makita, and K. Matsubara, "Electrical and optical interconnection for mechanically stacked multi-junction solar cells mediated by metal nanoparticle arrays," *Applied Physics Letters*, vol.101, e191111, 2012.
- [14] S. V. Riesen, "Martin New module design with 4-junction solar cells for high efficiencies," *AIP Conference Proceedings*, vol.1679, e100006, 2015.
- [15] T. Nakagawa et al., "High-efficiency Thin and Compact Concentrator Photovoltaics with Micro-solar Cells Directly Attached to Lens Array," *Optics for Solar Energy. Optical Society of America*, RF4B.5, 2014.
- [16] K. Araki et al., "Development of concentrator modules with dome-shaped Fresnel lenses and triple-junction concentrator cells," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol.13, pp. 513-527, 2005.
- [17] D. Faiman, D. Raviv, and R. Rosenstreich, "Using solar energy to arrest the increasing rate of fossil-fuel consumption: The southwestern states of the USA as case studies," *Energy Policy*, vol.35, pp. 567-576, 2007.
- [18] A. Plesniak, and V. Garboushian, "A profile of the Amonix 7700 CPV solar power system," *High and Low Concentrator Systems for Solar Electric Applications VI, Proc. of SPIE*, vol.8108, e810803, 2011.
- [19] M. Victoria, C. Domínguez, I. Antón and G. Sala, "Comparative analysis of different secondary optical elements for aspheric primary lenses," *Optics Express*, vol.17, pp. 6487-6492, 2009.
- [20] N. Ahmad, Y. Ota, K. Araki, K. H. Lee, M. Yamaguchi and K. Nishioka, "111 sun concentrator photovoltaic module with wide acceptance angle that can efficiently operate using 30-min intermittent tracking system," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol.56, e092301, 2017.
- [21] Eduardo Collado, "Sector PV en España, papel que juega la CPV en este context," *3rd Concentrated Photovoltaic summit EuropeSeville*, November 18th, 2010.
- [22] C. Domínguez, N. Jost, S. Askins, M. Victoria and I. Antón, "A review of the promises and challenges of micro-concentrator photovoltaics", *AIP Conference Proceedings*, vol.1881, e080003, 2017.
- [23] J. Yoon, A.J. Baca, S. Park, P. Elvikis, J.B. Geddes, L. Li, R.H. Kim, J. Xiao, S. Wang, T. Kim, M.J. Motala, B.Y. Ahn, E.B. Duoss, J.A. Lewis, R.G. Nuzzo, P.M. Ferreira, Y. Huang, A. Rockett and J.A. Rogers, "Ultrathin silicon solar microcells for semitransparent, mechanically flexible and microconcentrator module designs," *Nat. Mater.*, vol.7, pp. 907-915, 2008.

- [24] J. H. Karp and J. E. Ford, "Planar micro-optic solar concentration using multiple imaging lenses into a common slab waveguide," *High and Low Concentrator Systems for Solar Electric Applications IV*, vol. 7407, pp. 74070D, 2009.
- [25] B. Furman, E. Menard, A. Gray, M. Meitl, S. Bonafede, D. Kneeburg, R. Bukovnik, W. Wagner, J. Gabriel, S. Seel and S. Burroughs, "A high concentration photovoltaic module utilizing micro-transfer printing and surface mount technology," *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, pp. 475-480, 2010.
- [26] H. Arase, A. Matsushita, A. Itou, T. Asano, N. Hayashi, D. Inoue, R. Futakuchi, K. Inoue, T. Nakagawa, M. Yamamoto, E. Fujii, Y. Anda, H. Ishida, T. Ueda, O. Fidaner, M. Wiemer and D. Ueda, "A novel thin concentrator photovoltaic with microsolar cells directly attached to a lens array," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 4, pp.709-712, 2014.
- [27] D. Y. Lee, K.N. Jang and H. Cho, "A visual servoing method for high-precision chip mounting technology," *Optomechatronic Systems IV, Proc. of. SPIE*, vol. 5264, pp. 295-306, 2003.

## 第2章 微小太陽電池素子の開発

### 2-1 はじめに

本章では、薄型CPVモジュールの実現に必要な微小太陽電池素子の開発について述べる。

本研究の薄型CPVモジュールを実現するためには、CPVモジュールのレンズサイズ、焦点距離、多接合太陽電池素子を、それぞれ、従来CPVモジュールの約1/10に縮小することが必要となり、素子面積 $1\text{mm}^2$ 以下の微小太陽電池素子が必要となる。しかし、一般的に、太陽電池セルを小型化していく場合、セル周囲で発生するキャリアの再結合の影響が大きくなり、 $V_{oc}$ が低下することは広く知られていた。そのため、微小太陽電池素子は、上記キャリアの再結合による特性低下が懸念されていた。そこで、本章では、素子サイズが太陽電池特性に与える影響について調べ、微小太陽電池素子が従来サイズの太陽電池素子と遜色のない発電性能が得られる条件について明らかにする。

また、薄型化CPVモジュールでは、太陽電池素子は、回路基板上に効率的かつコンパクトに実装できるように、片面取り出し構造の電極構造とすることが望ましい。そこで本章では、バックコンタクト型の片面取り出し構造を有する微小太陽電池素子を開発した。

微小太陽電池素子には、3接合太陽電池 InGaP/GaAs/GaInNAsSb[1]を採用した。この3接合太陽電池は、第1章で述べたように、GaAs基板上に格子整合させながらトップ、ミドル、ボトム、の3つのセルをエピタキシャル成長させることができるとともに、トップ、ミドル、ボトム、各セルのフォトカレントをほぼ等しくできる利点を有している。そのため、この3接合太陽電池で微小太陽電池素子を作製することにより、高い変換効率を得ることが期待できる。この3接合太陽電池の市販素子(素子サイズ $5.5\text{mm}\times 5.5\text{mm}$ )では、国立再生可能エネルギー研究所(米国NREL)において、変換効率44.0%(スペクトル:AM1.5D、集光倍率:946倍、温度: $25^\circ\text{C}$ )が得られることが実証されている[2]。

太陽電池素子を微小化することで、素子で発生した熱を周囲に放熱しやすくできるため、素子の温度上昇による効率低下が少なくなる。そのため、モジュールの性能向上が期待できる。また、太陽電池素子の熱を放熱しやすいので、放熱板を小型化、簡素化し、モジュールコストを削減できる利点も有している。

以上、本章では、微小太陽電池素子の作製方法、素子特性について述べるとともに、素子サイズが素子特性に与える影響を明らかにし、微小太陽電池素子でも高い変換効率を得られることを示す。

## 2-2 微小太陽電池素子の開発

### 2-2-1 微小太陽電池素子の構造

図2-1に、本章で開発した微小太陽電池素子の構造を示す。半絶縁性 GaAs 基板の上に、トップセル InGaP(1.88eV)、ミドルセル、GaAs(1.42eV)、ボトムセル GaInNAsSb(1eV) からなる太陽電池層が形成されている。半絶縁性 GaAs 基板と太陽電池層の間には、厚み  $3\mu\text{m}$  の Si ドープ GaAs (キャリア濃度  $5\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ ) から成る下部導電層 (LCL層) を挿入されている。トップセルーミドルセル間、ミドルセルーボトムセル間、ボトムセルーLCL層間には、p++ / n++トンネル接合が挿入されている。電極構造には、バックコンタクト型の片面取り出し構造を採用している。そのため、半絶縁性 GaAs 基板に Via ホールを形成し、Via ホールを通じて正電極、負電極を基板裏面に取り出せる構造となっている[3]。

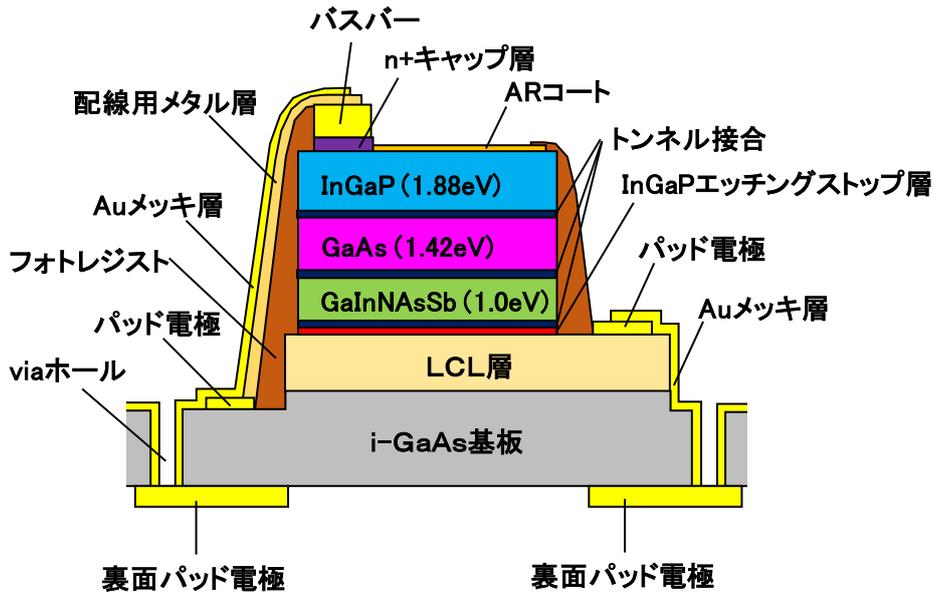


図2-1 バックコンタクト型微小太陽電池素子断面の模式図

### 2-2-2 微小太陽電池素子の作製プロセス

次に、微小太陽電池素子の作製プロセスについて述べる。

結晶成長は、高品位な GaInNAsSb 結晶を成長できる分子線エピタキシー法(MBE法)によって行い[4]、GaAs 基板の上にトップ、ミドル、ボトムセルから成る太陽電池層をエピタキシャル成長させた。

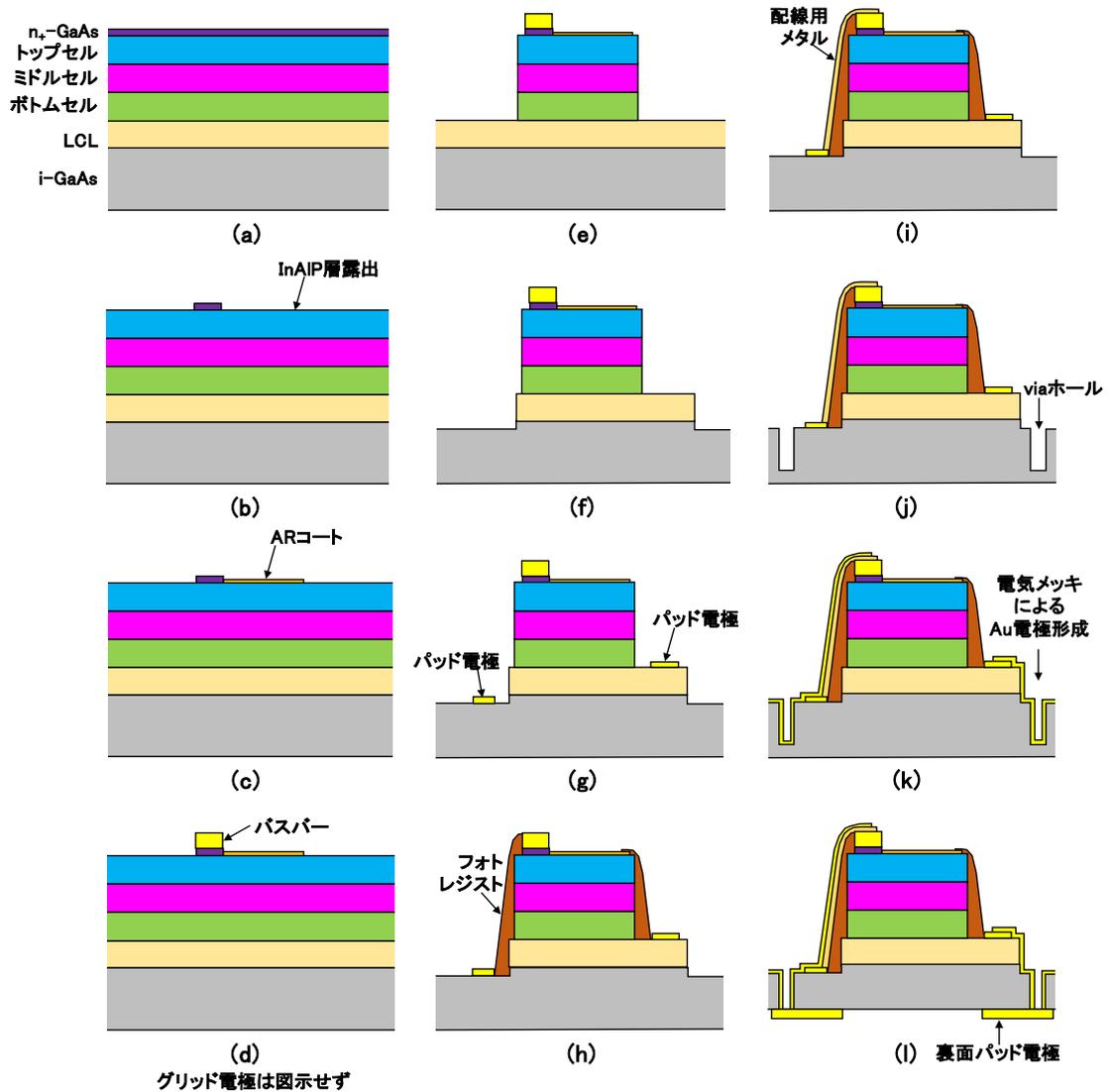


図 2 - 2 微小太陽電池素子の作製プロセス

結晶成長後の微小太陽電池素子作製工程を示す（図 2 - 2 参照）。

(微小太陽電池素子の作製工程)

- (1) 組成選択エッチャント  $\text{NH}_4\text{OH} + \text{H}_2\text{O}_2$  により、エピタキシャル成長層の最上層である  $n(+)$ -GaAs 層 (厚み 200nm) の受光面となる領域をエッチング除去し [5]、トップセル内の最上層である InAlP フロントサーフェスフィールド層 [6, 7] を露出させる (図 2 - 2 - (b))。

- (2) 太陽電池素子の発電波長である波長 400~1350nm において低反射となるよう設計した AR 層 (TiO<sub>2</sub>: 約 50nm、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 約 100nm) を露出したフロントサーフェスフィールド層上に形成する (図 2-2-(c))。
- (3) 3 μm 厚の Ag から成るバスバーとグリッド電極を基板表面上に形成する (図 2-2-(d))。
- (4) LCL 層が露出するまでエッチングを行い、メサ構造を形成する (図 2-2-(e))。
- (5) 素子分離のため、半絶縁性基板が露出するまで、LCL 層をエッチングする (図 2-2-(f))。
- (6) 厚み 300nm の Au から成るコンタクト用パッド電極を、LCL 層上および GaAs 基板上に形成する (図 2-2-(g))。
- (7) 絶縁層として、フォトリソグラフィにより 9.3 μm の厚みのフォトレジスト (Megaposit SPR 220-7) をメサ構造の周囲に形成後、300℃でベーキングを行い、フォトレジストを硬化させる (図 2-2-(h))。
- (8) フォトレジスト上に、メサ構造上部のバスバーから GaAs 基板上のコンタクト用パッド電極にかけて配線用メタル層を形成する (図 2-2-(i))。
- (9) 半絶縁性 GaAs 基板表面に、塩素系ガス [8] を使用した ICP (Inductively Coupled Plasma) ドライエッチング装置 (Panasonic Factory Solutions, E650) [9] により、2 個の via ホール (直径 70 μm、深さ 140 μm) を形成する (図 2-2-(j))。
- (10) 電気メッキにより、via ホール内、配線用メタル、コンタクト用パッド電極上に Au 電極を形成する (図 2-2-(k))。
- (11) ラッピングによりウェハ裏面をウェハ厚が 100 μm になるまで薄くし、via ホールをウェハ裏面側と貫通させる。次に、金メッキにより、ウェハ裏面にバックコンタクト用パッド電極を形成する (図 2-2-(l))。

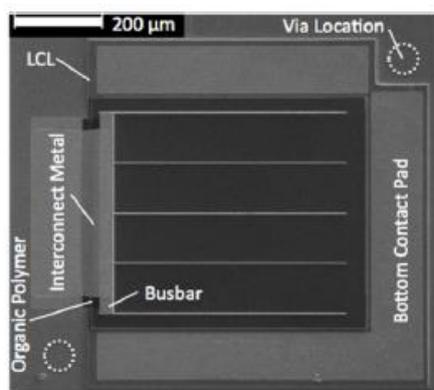


図 2-3 バックコンタクト型微小太陽電池素子表面の電子顕微鏡写真  
写真は via ホール形成前のウェハ表面状態を示している。

図 2-3 に、via ホール形成前の太陽電池素子表面の電子顕微鏡写真を示す。太陽電池素子の外形は 0.95mm×0.95mm、受光面のサイズは 550 μm×550 μm である。

また、図 2-4 にメサ構造側面の電子顕微鏡写真を示す。メサエッチ時に、メサ構造内の各層で側面方向のエッチレートに差があるため、メサ構造側面に凹凸が発生する。しかし、メサ構造側面にフォトリソを形成することで、メサ構造側面上にスムーズな表面が形成される。そのため、メサ構造上部のバスバーから GaAs 基板上的コンタクト用パッド電極を接続するための配線用メタル層を形成する際に、配線用メタル層が断線することを防止できる。

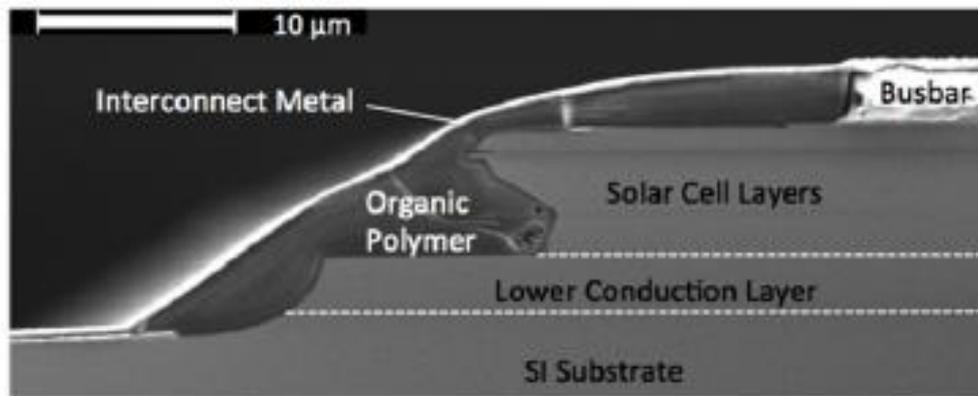


図 2-4 メサ構造側面の断面構造

## 2-3 微小太陽電池素子の特性評価

### 2-3-1 素子サイズの太陽電池特性への影響

試作した微小太陽電池素子を使用して、素子サイズが太陽電池特性に与える影響について解析を行った。

エッチングにより露出したメサ構造側面周辺では、キャリアの再結合が発生するため、 $V_{oc}$  が低下する原因となる。特に、微小太陽電池素子の場合、従来サイズの太陽電池素子と比較して、受光面の周囲長(P)と面積(A)の比(P/A)が大きくなるので、メサ構造の周囲付近で発生する表面再結合は、太陽電池特性に大きな影響を与える[10]。受光面はメサ構造よりやや小さいが(図2-1)、ここでは便宜上、受光面とメサ部は同一と近似し、メサ構造の周囲長をセル周囲長、受光面の面積をセル面積と呼ぶ。微小試作した太陽電池素子について、セル周囲の表面再結合の挙動を調べるため、フラッシュテスト[11]を使用し、集光倍率を変えて微小太陽電池素子の特性を測定した(AM1.5D スペクトル、素子温度 25°C)。測定は、素子分離前のウェハ状態で行った。受光面は樹脂、ガラス等でカバーしておらず、受光面前側には遮光マスクは設置しなかった。図2-5に、微小太陽電池素子の P/A 比と  $V_{oc}$  の関係について測定結果を示す。集光倍率が一定の場合では、 $V_{oc}$  は P/A 比の増加とともに低下する。特に、集光倍率が小さい場合は、 $V_{oc}$  は急激に低下することがわかる。

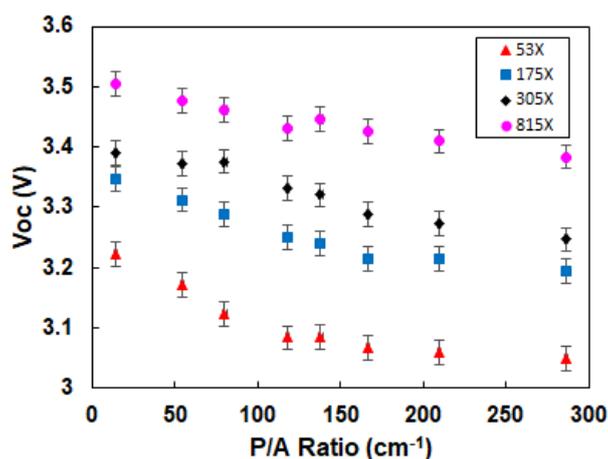


図2-5 微小太陽電池素子の P/A と  $V_{oc}$  の関係

測定時のスペクトルには AM1.5D を用いた。1 SUN 時の照射光のエネルギーは  $0.1W/cm^2$  とする。P/A の増加とともに、周囲の表面再結合が増加し、 $V_{oc}$  が低下する。

図2-6に、セルサイズ  $550\ \mu\text{m} \times 550\ \mu\text{m}$  の微小太陽電池素子と、比較用のセルサイズ  $5500\ \mu\text{m} \times 5500\ \mu\text{m}$  の標準的な太陽電池素子について、集光倍率と  $\eta$ 、 $V_{oc}$  の関係を示す。この2種の太陽電池素子は、ともに同じウェハから作製されたものであり、測定は、同じ測定条件で連続的に行った。微小太陽電池素子では、標準的な太陽電池素子よりも、 $\eta$ 、 $V_{oc}$  とともに小さい。しかし、集光倍率の増加とともに、微小太陽電池素子と標準的な太陽電池素子の特性の差は小さくなっていくことがわかる。例えば、1SUN の場合、微小素子と標準素子との変換効率差は 2.3% であるのに対して、800SUN の場合では、変換効率差は 0.4% に縮小されている。このように、微小太陽電池素子は集光倍率を高めることで、通常サイズの太陽電池素子と遜色のない発電性能が得られることを明らかにすることができた。これは、集光倍率が高くなることにより、メサ周辺部でのキャリアの再結合速度に対して、素子内部でのフォトキャリア発生速度が大幅に増加し、メサ周辺部のキャリア再結合の影響が相対的に低下していくためと考えられる。また、500SUN では、41.3% の変換効率が得られている。

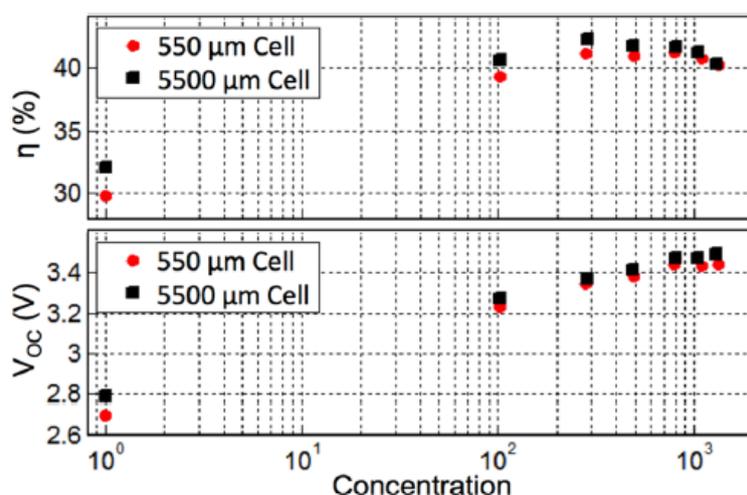


図2-6 太陽電池素子の集光倍率と変換効率および  $V_{oc}$  の関係

●はセルサイズ  $550\ \mu\text{m} \times 550\ \mu\text{m}$  の微小太陽電池素子を、■はセルサイズ  $5500\ \mu\text{m} \times 5500\ \mu\text{m}$  の標準素子を示す。測定時のスペクトルには AM1.5D を用いた。1 SUN 時の照射光のエネルギーは  $0.1\text{W}/\text{cm}^2$  とする。微小太陽電池素子の性能は、1 SUN 時は通常素子と比較して劣るが、高集光倍率時ではほぼ同等の性能を示す。

### 2-3-2 微小太陽電池素子を用いた薄型 CPV モジュールの発電テスト

微小太陽電池素子を CPV モジュールに用いた場合の性能を確認するため、図2-

7 (a)に示すテスト用の薄型C P Vモジュールを試作し、屋外においてI - V特性の評価を行い、薄型C P Vモジュールの初期性能を調べた。なお、微小太陽電池素子を用いたC P Vモジュールの性能向上を目的とした、太陽電池特性の評価・解析は第3章以降で行う。テスト用C P Vモジュールは、凸レンズで構成された5×5 レンズアレイ、微小太陽電池素子(セルサイズ 550 $\mu$ m 角)、放熱板を兼ねたアルミ製回路基板から構成されている。回路基板は、厚みが 1.5mm のアルミ板上にアルミからなる絶縁層を形成し、この絶縁層上に配線パターンを形成したものである。回路基板は、25 個の太陽電池素子をそれぞれ個別に測定できるように配線されている。凸レンズアレイは上下2層で形成されている。レンズアレイ上部はP MMAの射出成型で作製しており、レンズアレイ下部は高密度の太陽光が通過する部分であるため、耐光性のあるB K 7ガラスで作製されている。また、凸レンズ表面にはA Rコートを行っている。レンズ1 個のサイズは10mm×10mm であり、モジュールの厚みは2cm である。

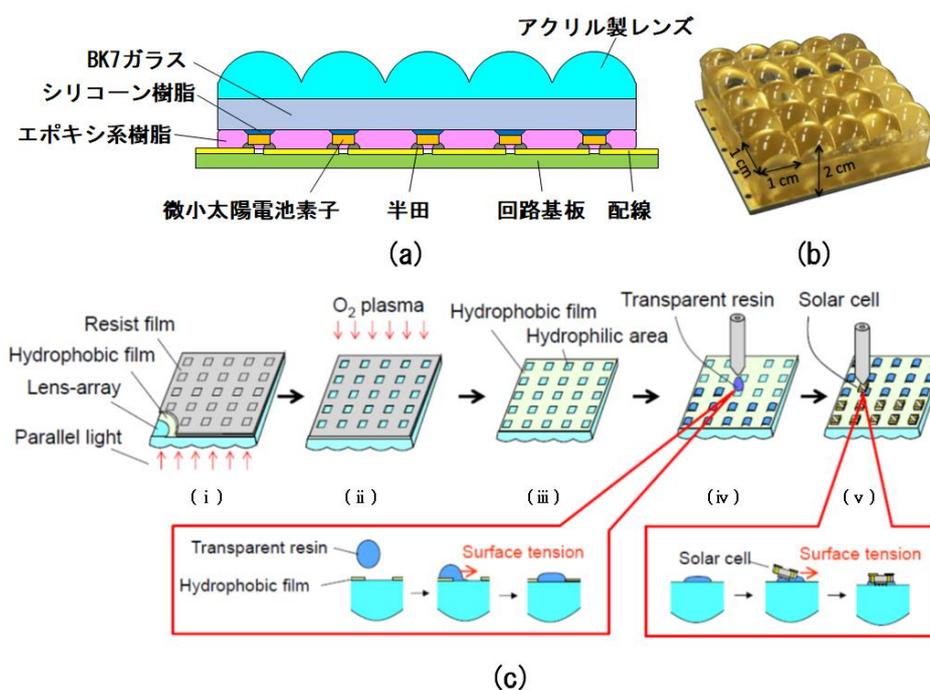


図 2 - 7 微小太陽電池素子の実装テスト用モジュール

- (a) 実装テスト用モジュールの構造
- (b) 実装テスト用モジュールの組立図
- (c) 微小太陽電池素子の実装方法[12]

テスト用C P Vモジュールは以下の方法で作製した。

(テスト用CPVモジュールの作製工程)

- (1) 凸レンズ底面の集光位置に微小太陽電池素子を実装する(実装方法の詳細は後に示す)。
- (2) 次にレンズアレイ上の微小太陽電池素子に回路基板を張り合わせ、半田により融着する(図2-7(b))。
- (3) 凸レンズと回路基板の間にエポキシ樹脂を充填する。

微小太陽電池素子をレンズアレイ裏面の集光位置に正確に接着する方法には、接着剤として使用するシリコン樹脂の表面張力により、微小素子を自己整合的に実装位置に配列させる方法[12]を利用した(図2-7(c))。

(自己整合法による素子実装工程)

- (1) レンズアレイ裏面に撥水膜を塗布後、その上にポジ型フォトレジストを塗布する。次にレンズ面からUV光を平行光として照射する。このUV光照射によってレンズ底面の焦点位置、すなわち太陽電池素子の設置位置のフォトレジストが感光される(図2-7-(i))。
- (2) 感光した素子設置位置のレジスト膜を現像により除去した後、レジスト除去部に酸素プラズマを照射する。このプラズマ処理により、素子設置位置のみ撥水膜が除去され、親水性化される(図2-7-(ii))。
- (3) レジストストリッパーによりフォトレジストを除去する(図2-7-(iii))。
- (4) ディスペンサ装置を使用して、親水性化した素子設置位置にシリコン樹脂を滴下する(シリコンは周囲の撥水領域には流れ出さず、親水領域に留まる)(図2-7-(iv))。
- (5) ディスペンサ装置の素子実装機構を用いて、シリコン樹脂上に微小太陽電池素子をマウントする(シリコン樹脂の表面張力により、回路基板と微小太陽電池素子の間のシリコン樹脂の表面積が最小となるようにシリコン樹脂が変形するため、微小太陽電池素子の設置位置がずれていた場合も、親水領域の中央に微小太陽電池素子を移動させることができる)(図2-7-(v))。

以上のような自己整合的に素子を配置する方法は、多数の微小太陽電池素子を精度よく実装する必要がある薄型CPVモジュールに適した実装方法であるが、フォトリソグラフィなど太陽電池を製造する上でコストが高い製造方法を使用しており、さらに低コストな実装方法を検討する必要がある。これについては、第5章で詳しく検討する。

図2-8に、光線追跡法により計算した、微小太陽電池素子のトップ、ミドル、ボトム、各セルに照射される太陽光の平均光強度分布を示す。各セルに照射される太陽光の集光サイズは、レンズの色収差の影響により、トップ、ミドル、ボトムの順に大きくなっている。集光領域のサイズ（半値全幅）は、トップセルで $106\mu\text{m}$ 、ボトムセルで $320\mu\text{m}$ である。集光領域が最も大きいボトムセルでは、すそ野まで含めた集光サイズを $400\mu\text{m}$ となるよう設計を行っており、 $550\mu\text{m}$ 角の受光面内に $\pm 75\mu\text{m}$ の集光マージンを確保しながら集光領域が収まるように設計している。この設計では、波長 $400\text{nm}$ の太陽光が受光面で焦点を結ぶ状態となるため、トップセルの集光領域は最も狭くなり、スポット状となっている。微小太陽電池素子において、トップ、ミドル、ボトムの各セルの集光サイズをどのように設計すべきかは、第3章で議論する。

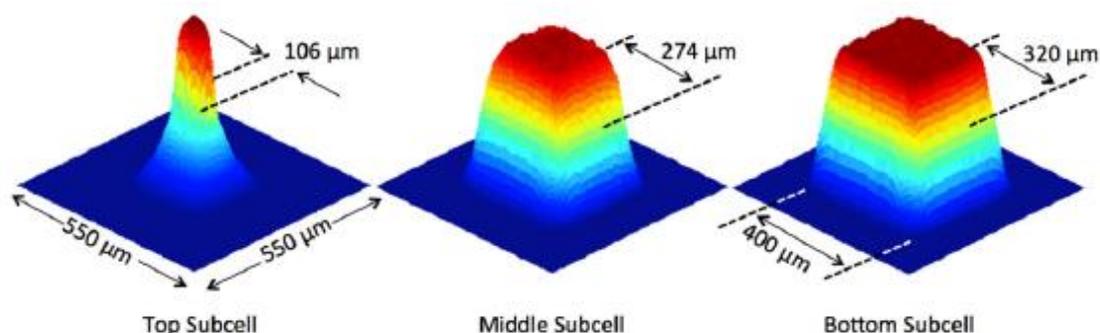


図2-8 実装テスト用モジュールの微小太陽電池素子における、トップ、ミドル、ボトム、各セルの平均光強度分布

計算は光線追跡法（ZEMAX）により行った。計算領域は、セルサイズである $550\mu\text{m}\times 550\mu\text{m}$ とした。縦軸は相対値である。色収差によりトップセルの光強度分布は狭いスポット状になっている。

また、熱伝導解析を行った結果、AM1.5Dの太陽光が入射した場合、太陽電池素子の温度上昇は、アルミ製回路基板裏面より約 $2^{\circ}\text{C}$ であり、非常に小さいことがわかった。その理由としては、従来のCPVモジュールと比較してレンズ面積が $100\text{mm}^2$ と小さく、流入する熱量自体が少ないこと、太陽電池素子自体も小さく、周囲に熱を逃がしやすいこと、太陽電池素子はアルミ製回路基板に実装されており、放熱しやすい構造となっていることが挙げられる。

図2-9に、屋外で測定した、テスト用CPVモジュール中のモノモジュール（複数のレンズ、太陽電池素子で構成されるCPVモジュール内の素子1個分）のI-V特性を示す。集光倍率は330倍である。測定は、京都府相楽郡において、直達日射量 $735\text{W}/\text{m}^2$ 、モジュール温度 $30.5^{\circ}\text{C}$ 、風速 $1.2\text{m}/\text{s}$ の条件で行った。 $I_{sc}$ 、 $V_{oc}$ 、FF、 $\eta$

は、それぞれ、10.0mA、3.23V、0.789、34.7%であった。集光倍率330倍において、35%近い高い変換効率が得られており、微小太陽電池素子を使用して十分な発電性能が得られることを実証することができた。

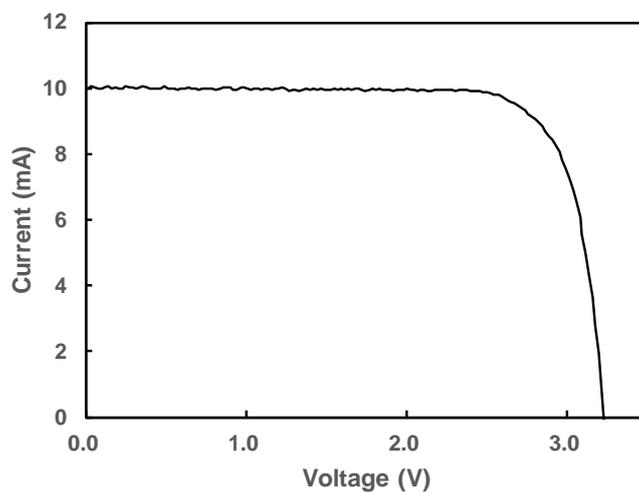


図2-9 微小太陽電池素子を用いて試作した薄型CPVモジュールの太陽電池特性

## 2-4 まとめ

CPVモジュールの薄型化を実現するため、素子面積 $1\text{mm}^2$ 以下の太陽電池素子を開発した。微小太陽電池素子には、GaAs基板上に格子整合しながら成長が可能であり、トップ、ミドル、ボトム、各セルのフォトリソをほぼ等しくできるInGaP/GaAs/GaInNAsSbからなる3接合太陽電池層を採用した。また、電極には、多数の微小太陽電池素子を効率よく、コンパクトに実装できる片面取り出し構造を採用した。

フラッシュテスト（集光倍率500倍、AM1.5Dスペクトル、素子温度 $25^\circ\text{C}$ ）において、微小太陽電池素子を評価した結果、以下のことが明らかになった。低集光倍率の条件では、微小太陽電池素子の太陽電池特性はセル周囲の再結合の影響を受けやすく、集光倍率1倍の場合、微小素子（ $550\ \mu\text{m} \times 550\ \mu\text{m}$ ）の変換効率は、標準素子（ $5.5\text{mm} \times 5.5\text{mm}$ ）よりも約2.3%低くなることがわかった。一方、CPVモジュールで通常使用される数百倍の高集光倍率の条件では、セル周囲の再結合の影響は少なくなり、集光倍率800倍での効率低下は0.4%に抑えられることがわかった。集光倍率500倍では41.3%と良好な変換効率を得ることができた。さらに、厚み2cmの薄型モジュールを試作し、屋外測定を行った結果、モノモジュールとして34.7%の変換効率を得ることができた。

以上のように、微小太陽電池素子は集光倍率が高い状態で使用することで、セル周囲の表面再結合の影響を小さくでき、薄型CPVモジュール用の太陽電池素子として十分性能が発揮できることを、微小太陽電池素子の特性として初めて明らかにすることができた。

## 参考文献

- [1] D. Derkacs, R. Jones-Albertus, F. Suarez, and O. Fidaner, "Lattice-matched multijunction solar cells employing a 1 eV GaInNAsSb bottom cell," *J. Photon. Energy*, vol.2, e021805, 2012.
- [2] R. Jones-Albertus, E. Becker, R. Bergner, T. Bilir, D. Derkacs, O. Fidaner, D. Jory, T. Liu, E. Lucow, P. Misra, E. Pickett, F. Suarez, A. Sukiasyan, T. Sun, L. Zhang, V. Sabnis, M. Wiemer, and H. Yuen, "Using Dilute Nitrides to Achieve Record Solar Cell Efficiencies," *Mater. Res. Soc. Proc.* Vol.1538, pp161-166, 2013.
- [3] L. G. Hipwood, and P. N. Wood., "Dry etching of through substrate via holes for GaAs MMIC's," *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics Processing and Phenomena*, vol.3, pp. 395-397, 1985.
- [4] D. B. Jackrel, S. R. Bank, H. B. Yuen, M. A. Wistey, J. S. Harris, A. J. Ptak, S. W. Johnston, D. J. Friedman, and Sarah R. Kurtz, "Dilute nitride GaInNAs and GaInNAsSb solar cells by molecular beam epitaxy," *Journal of Applied Physics*, vol.101, e114916, 2007.
- [5] A. Duda, S. Ward, and M. Young, "Inverted metamorphic multijunction (IMM) cell processing instructions," *National Renewable Energy Laboratory Technical Report*, No. NREL/TP-5200-54049, 2012.
- [6] R. R. King, R. A. Sinton, and R. M. Swanson, "Front and back surface fields for point-contact solar cells," *Photovoltaic Specialists Conference*, Conference Record of the Twentieth IEEE, pp. 538-544, 1988.
- [7] T. Takamoto, E. Ikeda, H. Kurita and M. Ohmori, "Over 30% efficient InGaP/GaAs tandem solar cells," *Applied Physics Letters*, vol.70, pp. 381-383, 1997.
- [8] S. J. Pearton, F. Ren, A. Katz, J. R. Lothian, T. R. Fullowan, and B. Tseng, "Dry processed, through - wafer via holes for GaAs power devices," *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, vol.11, pp. 152-158, 1993.
- [9] E. R. Parker, B. J. Thibeault, M. F. Aimi, M. P. Rao, and N. C. MacDonald, "Inductively coupled plasma etching of bulk titanium for MEMS applications," *Journal of the Electrochemical Society*, vol.152, pp. C675-C683, 2005.
- [10] T. B. Stellwag, P. E. Dodd, M. S. Lundstrom, R. F. Pieret, M. R. Melloch, E. Yablonovitch, and T. J. Gmitter, "Effects of perimeter recombination on GaAs-based solar cells," *Conference Record of the Twenty First IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, FL, 21-25, pp. 442-447, 1990.

- [11] J. Summhammer, "Short flash and constant load PV-module tester," *Industrial Electronics Society IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE.*, pp. 8108-8112, 2013.
- [12] T. Nakagawa, N. Hayashi, D. Inoue, M. Matsumoto, A. Matsushita, H. Higuchi, T. Nagata, M. Ishino, K. Inoue, R. Futakuchi, M. Yamamoto, Y. Aya, O. Fidaner, F. Suarez, and M. Wiemer, "High-efficiency Thin and Compact Concentrator Photovoltaics with Micro-solar Cells Directly Attached to Lens Array," *Optics for Solar Energy. Optical Society of America*, RF4B.5, 2014.

### 第3章 薄型CPVモジュールの特性解析

#### 3-1 はじめに

微小太陽電池素子は、素子特性についてこれまでに報告例がなく、どのような要因が変換効率に影響を与えるか不明であった。そこで、本章では、微小太陽電池素子の発電性能を十分発揮させるための知見を得るため、微小太陽電池素子を用いて試作した薄型CPVモジュールについて、太陽電池特性の評価・解析を行い、太陽電池特性に影響を与える要因を調べた。

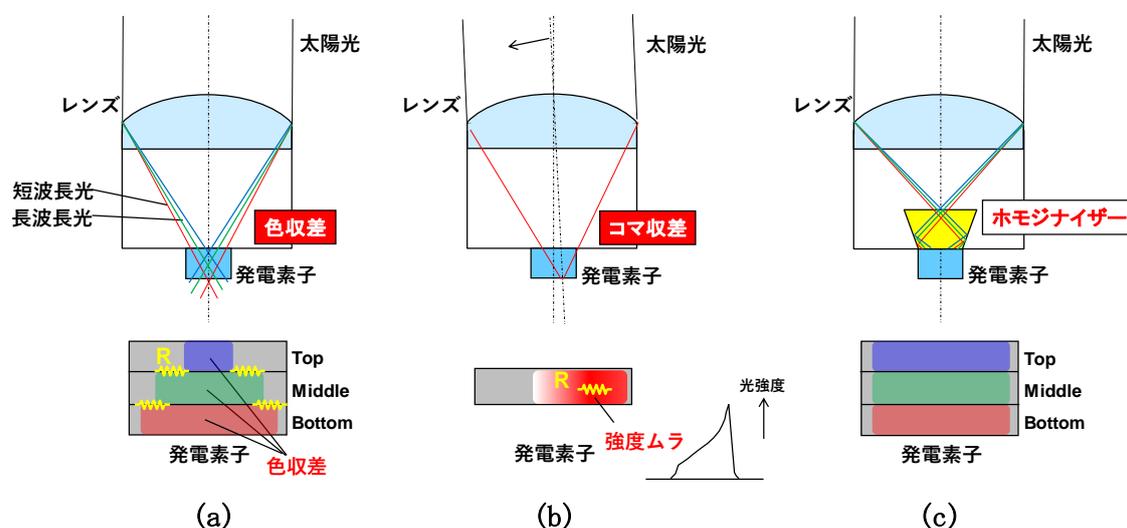


図3-1 レンズの色収差、コマ収差による特性への影響

- (a) レンズの色収差によって、トップ、ミドル、ボトムセルの集光サイズに差が生じ、太陽電池素子内の抵抗が増加した場合の模式図
- (b) レンズのコマ収差によって、集光領域内の強度分布に強度ムラが生じることにより、太陽電池素子内の抵抗が増加した場合の模式図(簡略化のため、単接合太陽電池として示す)
- (c) 2次光学系として、ホモジナイザーを使用することにより、トップ、ミドル、ボトム、各セルの集光サイズ、強度ムラを防止した場合の模式図

まずは、通常サイズの多接合太陽電池素子において、変換効率が抑制される要因について述べる。CPVモジュールにおいて、多接合太陽電池素子の受光面に不均一に入射する太陽光が太陽電池特性に及ぼす影響について、これまでに多くの研究が行われている。例えば、Garcíaらは、集光レンズの色収差によりトップ、ミドル、ボトム、各セルの集光領域に差が生じることで、FFが低下することを報告している[1]。また、

P. Espinet-González らは、太陽電池素子に太陽光が斜め入射することでコマ収差が発生し、トップ、ミドル、ボトム各セルで、集光領域の光強度分布が不均一になり、FF が低下することを報告している[2]。このように、通常サイズの多接合太陽電池素子を用いたCPVモジュールでは、図3-1(a)(b)に示すように、色収差やコマ収差により、トップ、ミドル、ボトム、各セルの集光領域のサイズ、光強度分布に不均一が発生する。このような集光領域の不均一により、受光面に対して横方向に電流の流れが発生し、その電流パス分の抵抗が増加することによりFF、変換効率が低下する。

色収差によるFF低下を防止する方法としては、図3-1(c)に示すように、太陽電池素子上にホモジナイザーを設置する方法が知られている[3]。ホモジナイザーに入射した太陽光は、ホモジナイザー側面で全反射を繰り返すことで光強度分布が均一化し、トップ、ミドル、ボトム、各セルに均一で照射サイズが等しい太陽光を照射することが可能となる。

また、Cotal と Sherif [4]、Victoria ら[5]は、二次光学系を使用しないCPVモジュールにおいて、レンズと太陽電池素子間の距離を変え、受光面に集光された太陽光の照射サイズが太陽電池特性に与える影響を調べており、レンズと太陽電池素子間の距離を変えることによって生じる集光領域の光強度分布や波長分布の不均一が太陽電池特性に大きな影響を与えることを示した。

上記のように、通常サイズの太陽電池素子を使用した場合に、太陽電池素子への太陽光の不均一照射が太陽電池特性に与える影響について、これまでに数多くの報告が行われてきた。しかし、 $1\text{mm}^2$ 以下の大きさの微小太陽電池素子について、集光領域の光強度分布や波長分布の不均一が太陽電池特性にどのような影響を与えるか報告した例はなかった。本研究の薄型CPVモジュールではホモジナイザーは使用しておらず、微小太陽電池素子は色収差、コマ収差による不均一な太陽光にさらされる。したがって、微小太陽電池素子を使用したCPVモジュールにおいて変換効率を向上させるためには、微小太陽電池素子に対する不均一照射の影響を調べるのが極めて重要となる。

そこで本章では、レンズと微小太陽電池素子間の距離や太陽光の入射角を変えることで、太陽電池素子に照射される太陽光の集光サイズや光強度分布を変えて太陽電池特性の評価を行い、薄型CPVモジュールの太陽電池特性に影響を与える要因について解析を行った。その結果として、微小太陽電池素子を用いた2次光学系を設けない薄型CPVモジュールでは、通常のCPVモジュールとは別の要因により変換効率が影響を受けることを明らかにする。さらに、微小太陽電池素子を用いた薄型CPVモジュールにおいて、変換効率を向上させるための指針を示す。

## 3-2 薄型CPVモジュールの構造と作製方法

### 3-2-1 薄型CPVモジュールの構造

まず、本章で特性解析を行なうために試作した薄型CPVモジュールの構造について述べる。図3-2に試作した薄型CPVモジュールの外観写真を示す。モジュールの左右側面から突き出た金属線は、太陽電池特性を測定するためのリード線である。リード線を除くモジュールの外形は50mm×50mm×19mmである。

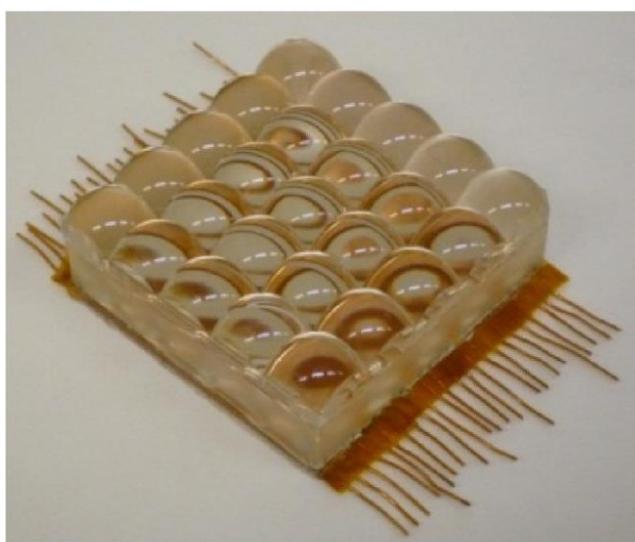


図3-2 薄型CPVモジュールの外観写真

モジュールの外寸は50mm×50mmである。モジュール側面から太陽電池特性測定用のリード線が突き出ている。

図3-3に薄型CPVモジュールの断面図を示す。CPVモジュールは銅から成る放熱板、5×5の凸レンズアレイ、微小太陽電池素子で構成されており、微小太陽電池素子をレンズアレイの底面に張り付けた構造になっている。レンズアレイ内のレンズ1個のサイズは10mm角である。凸レンズアレイは2層構造で、上部は8.4mm厚のPMMAで作製しており、微小太陽電池素子を取り付けている下部は、集光された高密度な太陽光が通過する部分となるため、耐光性を考慮して10mm厚のBK7ガラスで作製している。また、凸レンズの表面にはARコートを行っている。ガラス板の裏面には、銀ペーストで印刷した配線パターンが形成されており、太陽電池素子はこのガラス板裏面の配線パターンに接続されている。

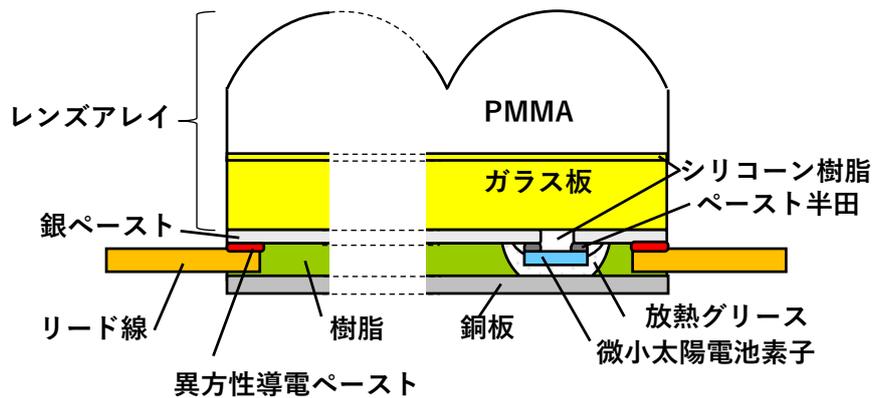


図 3-3 薄型 CPV モジュールの断面図

図 3-4 に、微小太陽電池素子の光学顕微鏡写真を示す。太陽電池素子は、0.55mm 角の受光面、パッド電極 (+)、パッド電極 (-) から構成されている。受光面のサイズは第 2 章で試作した素子と同じであるが、今回はガラス板裏面の配線パターンに正電極、負電極とも接続するため、パッド電極 (+)、パッド電極 (-) は、第 2 章の太陽電池素子とは異なり、太陽電池素子の表面に形成している。また、ガラス側の配線パターンと半田により確実に接続を行うため、パッド電極 (+)、パッド電極 (-) は大きくしている。したがって、太陽電池素子の外寸は、0.97mm×1.47mm となっているが、受光面のサイズは前章と同じであり、太陽電池特性に変化はない。

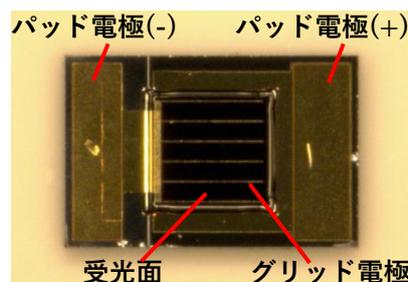


図 3-4 微小太陽電池素子の光学顕微鏡写真

受光面のサイズは 0.55mm×0.55mm、素子サイズは 0.97mm×1.47mm である。

図 3-5 に、ガラス板に実装された微小太陽電池素子の断面図を示す。太陽電池素子には、第 2 章と同じ i-GaAs 基板上にボトムセル (GaInNAsSb)、ミドルセル (GaAs)、トップセル (InGaP) をエピタキシャル成長したウェハを使用した。本章では、パッド電極 (+)、パッド電極 (-) を基板表面に形成しているため、パッド電極 (+) はエッチングに

より露出した下部コンタクト層上に形成し、パッド電極(-)は、エッチングにより露出した i-GaAs 基板からグリッド電極の領域に渡って形成した絶縁膜上に形成している。下部コンタクト層、ボトムセル、ミドルセル、トップセルの間にはトンネル接合が挿入されている。

グリッド電極の幅は4  $\mu\text{m}$  である。グリッド電極が太陽電池特性に与える影響[6]を調べるため、太陽電池素子は、グリッド電極の本数、ピッチの異なる複数のタイプを準備した。

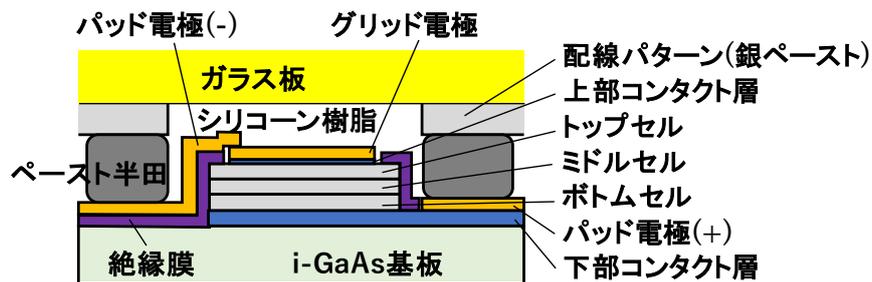


図3-5 ガラス基板に実装された太陽電池素子とその周辺部の断面構造  
トップセル、ミドルセル、ボトムセル、下部導電層の間に挿入されているトンネル接合は図示省略

### 3-2-2 薄型CPVモジュールの作製方法

薄型CPVモジュールは、以下の方法で作製した(図3-6)。

(薄型CPVモジュールの作製工程)

- (1) スクリーン印刷を使用して、ガラス板上に銀ペーストにより配線パターンを形成する。配線パターンは25対の取り出し電極から成り、それぞれ25個の太陽電池素子の正電極、負電極と接続され、個々の太陽電池素子を独立に測定できるように設計した。
- (2) 配線パターンの両端に、異方性導電ペーストを使用して、太陽電池特性評価用のリード線を接続する。
- (3) ガラス板の配線パターン上に太陽電池素子接続用のペースト半田を塗布し、ペースト半田上に太陽電池素子をマウントした後、ガラス板を加熱し、太陽電池素子

をガラス板上の配線パターンに融着させる。太陽電池素子には、バイパスダイオードを接続していない。

- (4) ガラス板と太陽電池素子の隙間にシリコン樹脂を充填する。
- (5) 太陽電池素子を囲うように放熱グリースを塗布したのち、太陽電池素子上に放熱用の銅板を載せる。
- (6)、太陽電池素子をガラス板と銅板で挟んだ状態で、ガラス板と銅板の間にはエポキシ系樹脂を充填する。
- (7) 最後に、ガラス板上にアクリル製レンズアレイを載せ、シリコン樹脂で接着する。最後に、ガラス板上にアクリル製レンズアレイを載せ、ゲル状シリコン樹脂で接着する。接着にゲル状シリコンを用いることで、集光型太陽電池の国際安全規格 IEC62108 の温度サイクル試験(-40℃~85℃、1000 サイクル)において、ガラスとアクリルの膨張係数差によりガラス板が割れることを防止している。

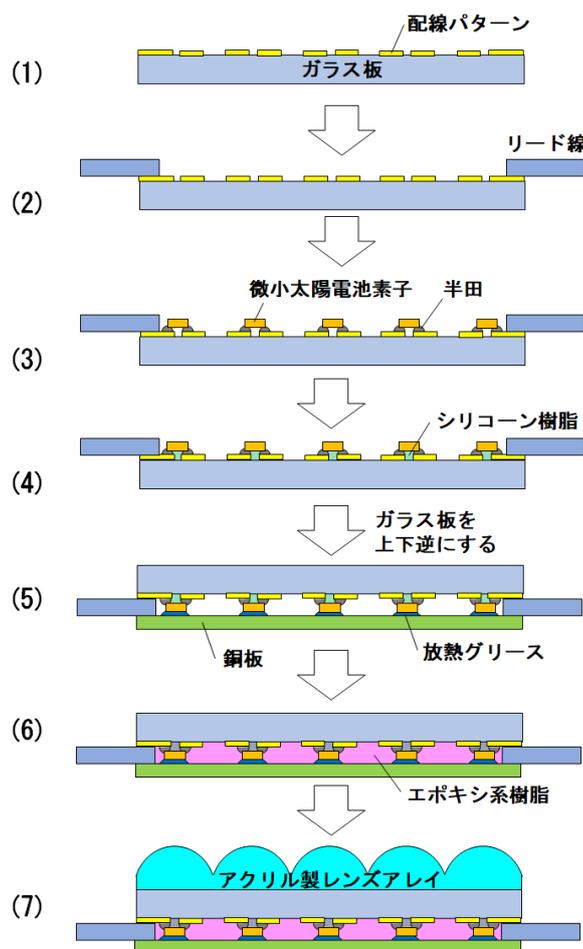


図3-6 薄型CPVモジュールの作製方法

### 3-3 薄型CPVモジュールの測定方法

#### 3-3-1 3接合太陽電池素子内の太陽光分布

薄型CPVモジュールにおいて、レンズと微小太陽電池素子間の距離が変わると、太陽電池素子に照射される太陽光の状態がどのように変化するかを示す。図3-7に、CPVモジュールのガラス板の厚みを変化させた場合の、モジュール内の入射太陽光線と、3接合太陽電池素子内の集光領域の状態を示す。

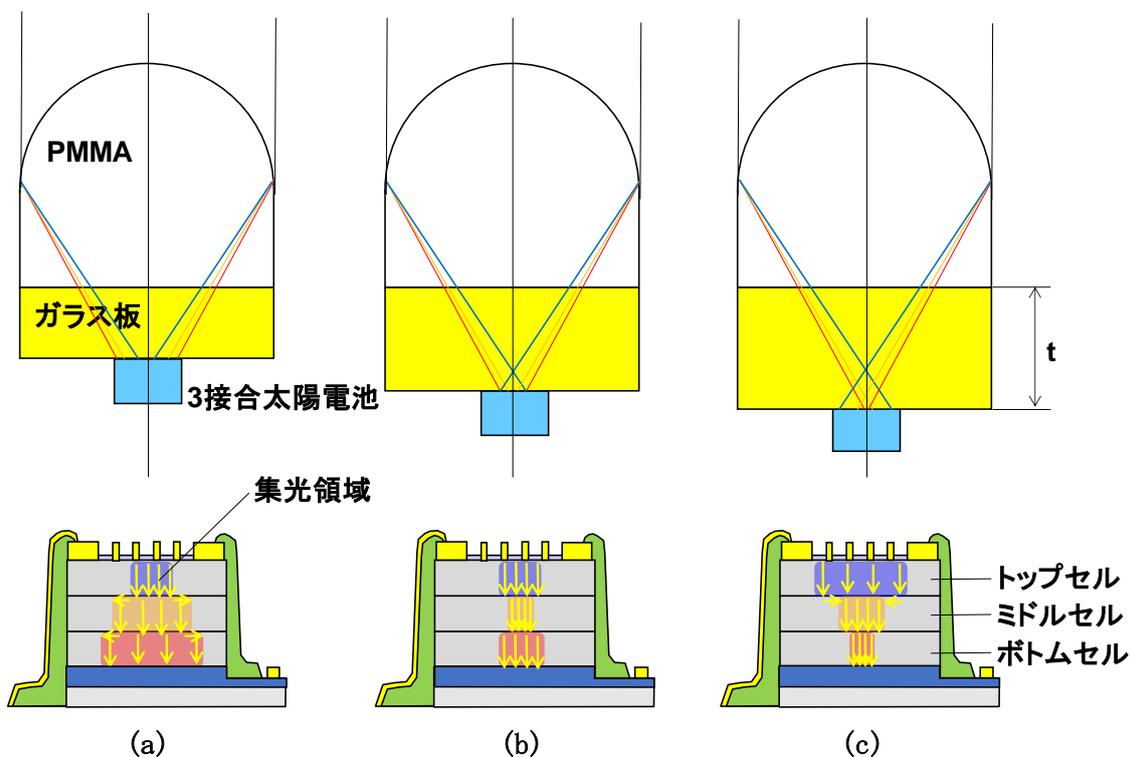


図3-7 異なる厚みのガラス基板で作製した薄型CPVモジュールの断面模式図

上の図では、青、黄、赤色のラインはそれぞれ665nm、885nm、1300nmを示す。

下の図では、青、黄、赤色の領域はそれぞれ400-665、665-885、885-1300nmの波長を示す。図中の矢印はフォトカレントの流れを示す。

使用する微小太陽電池素子は、トップセルでは400-665nm、ミドルセルでは665-885nm、ボトムセルでは885-1300nmの波長の太陽光を吸収し、発電するように設計されている。図3-7の太陽光線は、波長665nm、885nm、1300nmの場合を示している。色収差によって、波長により焦点位置が変わるため、ガラス板の厚みが変わると、太陽電池素子に

照射される太陽光の状態が変化する。図3-7(a)では、トップセルの集光領域が最も小さく、ボトムセルの集光領域が最も大きくなり、図3-7(c)では、トップセルの集光領域が最も大きく、ボトムセルの集光領域が最も小さくなる。このように、ガラス板の厚みの異なるCPVモジュールを作製することで、トップ、ミドル、ボトム、各セルの集光領域のサイズを変えて、太陽電池特性を評価できる。そこで、本章では、ガラス板の厚み $t$ が10.0、10.2、10.4、10.6mmの薄型CPVモジュールを試作し、太陽光の不均一照射による太陽電池特性への影響を調べた。

### 3-3-2 測定方法

薄型CPVモジュールの測定方法を示す。測定はすべて屋外の太陽光照射下で行った。測定場所は、京都府相楽郡と石垣島の2か所である。測定時、温度による太陽電池特性への影響を避けるため、CPVモジュールは、温度制御ユニットに放熱グリースを介して取り付け、25°C一定に制御した。この温度制御ユニットは、放熱用の200×200×3mmのアルミ板、40×40×5mmのペルチェ素子、50×50×10mmのアルミブロックの順に積層したものである。温度制御用の熱電対は、CPVモジュール直下のアルミブロックの中心に取り付け、この熱電対温度をモジュール温度と定義した。また、上記温度制御ユニットは太陽追尾装置に搭載し、太陽を追尾しながら測定が行えるようにした(図3-8)。

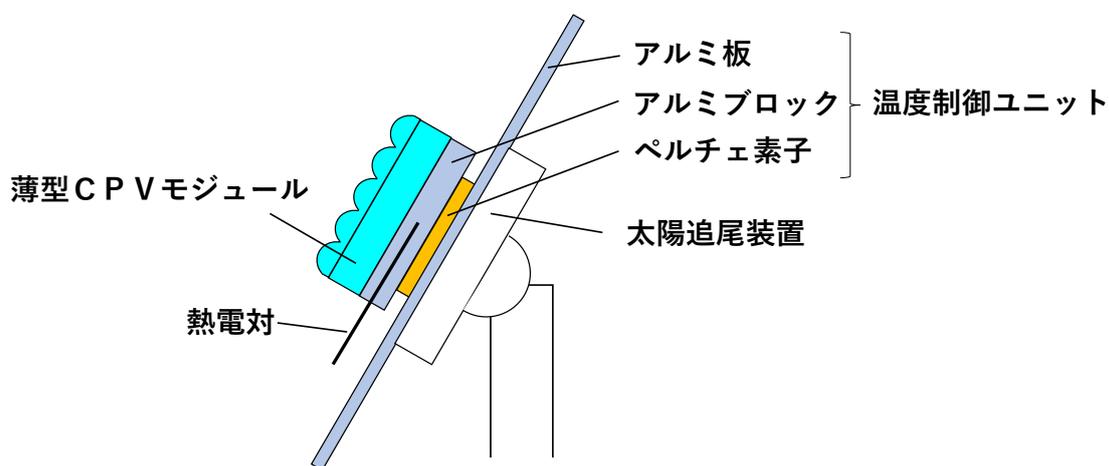


図3-8 測定時における薄型CPVモジュールの設置状態

測定はすべてCPVモジュール内のモノモジュール(複数のレンズ、太陽電池素子で構成されるCPVモジュール内の素子1個分)で行った。I-V特性の測定には、I-Vカーブトレーサー(英弘精機MP-160)を使用した。直達日射量(Direct normal

irradiance : DNI) の測定には、直達日射計 (英弘精機 MS-56) を使用した。太陽光スペクトルの測定には、分光放射計 (オプトリサーチ MSR-7000N、相馬光学 S-2440) を使用した。京都府相楽郡では MSR-7000N を、石垣島では S-2440 を使用した。分光放射計のセンサー部分には、直達光のみ通過するように、内径 68mm、長さ 450mm の筒を取り付けて測定した。

太陽電池特性の入射角依存性は、以下の方法で測定した。図 3-9 に測定方法を示す。

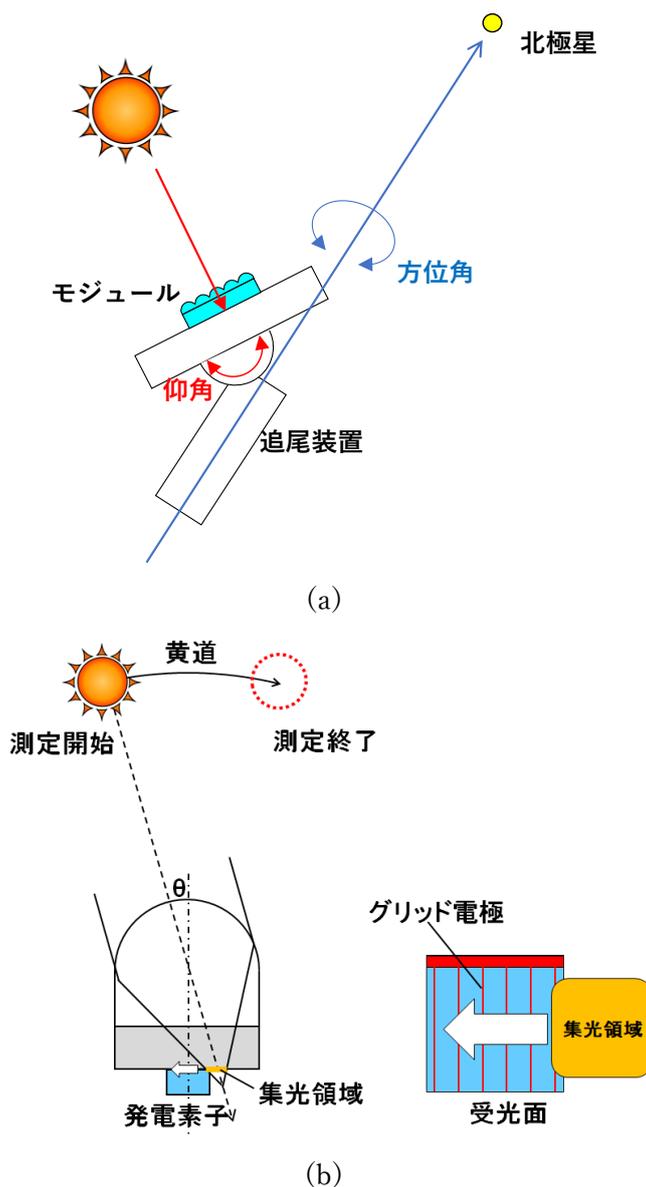


図 3-9 角度依存性の測定方法

(a) 追尾装置の設置状態

(b) 太陽光の入射角と受光面に照射される集光領域の位置との関係

まず、CPVモジュールを取り付けた追尾装置を、方位角の回転軸が地球の地軸と一致するように設置した。その後、太陽電池素子の受光面に太陽光が入射するように仰角、方位角を調整し、仰角を固定した(図3-9(a))。このような設置にすることで、方位角を回転させても、CPVモジュールは常に黄道上に正確に向いた状態にすることができる。測定は、この状態で、測定中に受光面上を太陽光の集光領域が横切るように方位角を調整後、方位角を固定して行った(図3-9(b))。この状態で追尾装置を放置すると、地球の自転とともに太陽が黄道上を移動し、太陽光の入射角が変化する。それとともに、太陽光の集光領域が太陽電池素子の受光面を横切って移動するので、太陽電池特性の入射角依存性を測定することができる。また、太陽光が斜め入射することで、コマ収差によって太陽電池特性にどのような影響が及ぼされるか解析することができる。太陽電池特性は一定時間ごとに測定した。Iscは2秒毎、I-V特性は20~30秒毎に測定を行った。

本章では、太陽光で測定を行っているため、季節・時刻により大気の状態や太陽高度が変化し、それにより太陽光スペクトルや直達日射量が変化する。太陽光スペクトルが変化すると、トップ、ミドル、ボトム、各セルのフォトカレントが変化し、太陽電池特性に影響を及ぼす。特に、Iscは、トップ、ミドル、ボトム、各セルの中で最もフォトカレントが小さいセルの電流値で律速され、どのセルで電流が律速されるかが、太陽電池特性の挙動を大きく変える要因となる。したがって、測定はすべてトップ律速(Iscがトップセルのフォトカレントで律速される状態)の条件で行い、測定結果の比較検討を行った。

さらに、太陽光スペクトルによる太陽電池特性の影響を考慮するため、Spectral matching Ratio(SMR)を測定時の太陽光スペクトルの指標として用いた[7]。今回、測定したCPVモジュールは、季節や太陽高度により、トップ律速かボトム律速のいずれかとなるため、SMRは、トップセルとボトムセルのフォトカレントを用いて、次式として定義する(本章末尾の補足(1)参照)。

SMR

$$= \frac{I_{top,measure}/I_{bottom,measure}}{I_{top,AM1.5D}/I_{bottom,AM1.5D}}$$

- 1)

$I_{top,measure}$ 、 $I_{bottom,measure}$ は、それぞれ、測定時の太陽光スペクトルでのトップセルとボトムセルのフォトカレントを示している。同様に、 $I_{top,AM1.5D}$ 、 $I_{bottom,AM1.5D}$ は、それぞれ、AM1.5D(ASTM G173-03で規定される基準太陽光スペクトルAM1.5G中の直達光スペクトル)の太陽光スペクトルでのトップセルとボトムセルのフォトカレントを示している。

フォトカレントは、次式を用いて計算した。

$$I_{i,j} = e \int P_j(\lambda) Q_i(\lambda) d\lambda$$

(3)

- 2)

$i$ はトップセル、ミドルセル、ボトムセルを示す添え字、 $j$ は太陽光スペクトルが、測定時か、AM1.5Dを区別するための添え字を示している。 $P_j(\lambda)$ は太陽光スペクトルであるが、ここでは、波長  $\lambda$  毎の入射太陽光のフォトン数として表している。 $Q_i(\lambda)$ はセル  $i$ の波長  $\lambda$ における外部量子効率、 $e$ は電気素量である。SMRは、太陽光スペクトルがAM1.5Dの場合に1となる。太陽光スペクトルがAM1.5Dよりも短波長光が強い場合、SMRは1以上、長波長光が強い場合は1以下となる太陽光スペクトルの指標として使用される。

### 3-4 薄型CPVモジュールの評価と特性解析

#### 3-4-1 Isc および FF の入射角依存性

図3-10に、厚み  $t=10.0\text{mm}$ 、 $10.2\text{mm}$ 、 $10.4\text{mm}$ 、 $10.6\text{mm}$  のガラス板で作製した薄型CPVモジュールの、 $I_{sc}$  の入射角依存性を示す。それぞれのモジュールのグラフ形状を比較するため、 $I_{sc}$  は最大値で規格化している。入射角  $\theta$  は、集光領域がグリッド電極を垂直に横切る方向で変化させた。このグラフでは、 $I_{sc}$  がほぼ1となる領域では、集光領域は受光面内にあるが、 $I_{sc}$  が1から0に減少していく領域では、集光領域が受光面からはみ出していくことにより、 $I_{sc}$  が低下していくことを示している。

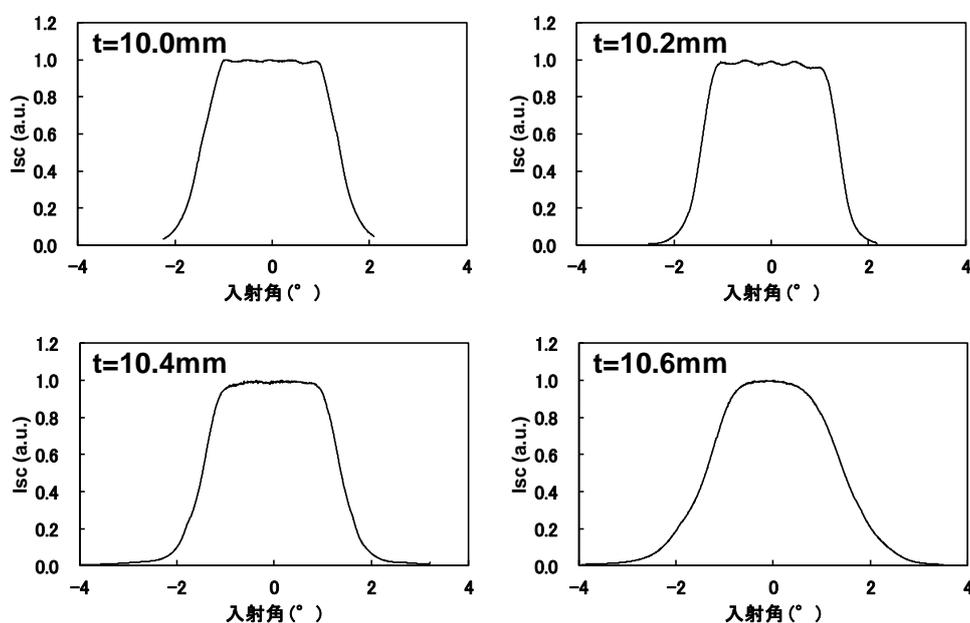


図3-10 ガラス板厚み  $t=10.0$ 、 $10.2$ 、 $10.4$ 、 $10.6\text{mm}$  で作製したCPVモジュールの入射角  $\theta$  と  $I_{sc}$  の関係

入射角は、集光領域がグリッド電極を横切る方向で変化させた。使用した太陽電池素子のグリッド電極数は、 $t=10.0$ 、 $10.2$ 、 $10.4\text{mm}$  の場合は6本、 $t=10.6\text{mm}$  の場合は7本である。測定はモノモジュールで行った。測定場所は京都府相楽郡である。測定時の直達日射量、SMRと測定日は以下の通りである。

$t=10.0\text{mm}$ のモジュール： $841\text{W/m}^2$ 、1.05、2013年9月20日

$t=10.2\text{mm}$ のモジュール： $873\text{W/m}^2$ 、1.04、2013年10月28日

$t=10.4\text{mm}$ のモジュール： $894\text{W/m}^2$ 、0.91、2014年1月7日

$t=10.6\text{mm}$ のモジュール： $841\text{W/m}^2$ 、0.90、2013年9月20日

t=10.0mm、10.2mm の場合、Isc は約  $0.45^\circ$  の周期で変動しており、この  $\theta$  の周期はグリッド電極のピッチに対応している。t=10.2mm の場合、Isc の周期変動の振幅は、t=10.0mm の場合よりも大きくなっている。一方、t=10.4mm、10.6mm の場合は、Isc の周期変動は観察されない。また、集光領域がグリッド電極に沿って平行に動くように、 $\theta$  が変化する場合には、どのモジュールでも Isc の周期変動は見られない（図示省略）。上記の挙動から、t=10.0mm、10.2mm の場合の周期変動は、グリッド電極が集光領域の影になることにより引き起こされることを示している。

t=10.0mm、10.2mm、10.4 mm の場合、受光面のグリッド電極は 6 本、t=10.6mm の場合は 7 本であるが、グリッド電極の本数の違いは図 3-10 の結果には有意な影響は与えないと考えられる（詳細は本章の補足(2)に示す）。

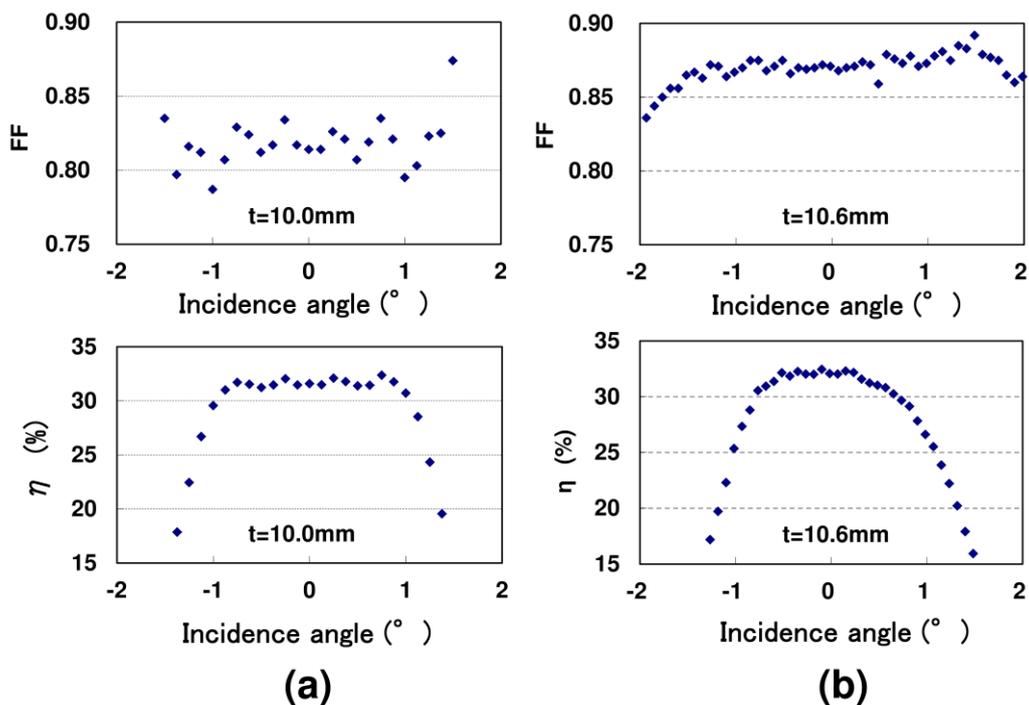


図 3-11 t=10.0mm、10.6mm で作製した薄型 CPV モジュールの入射角と FF および  $\eta$  の関係

グリッド電極数は、t=10.0mm の場合は 6 本、t=10.6mm の場合は 7 本である。測定はモノモジュールで行った。測定場所は京都府相楽郡である。測定時の直達日射量、SMR と測定日は以下の通りである。

t=10.0mm のモジュール :  $811\text{W/m}^2$ 、1.04、2013 年 9 月 20 日

t=10.6mm のモジュール :  $870\text{W/m}^2$ 、0.86、2014 年 1 月 24 日

図3-11に、 $t=10.0\text{mm}$ 、 $10.6\text{mm}$  の場合の、FF と  $\eta$  の入射角依存性を示す。 $\theta$  はグリッド電極を横切る方向で変化させた。 $t=10.0\text{mm}$  の場合、FF および  $\eta$  は周期的に変動するが、 $t=10.6\text{mm}$  の場合は、FF および  $\eta$  は周期変動しないことがわかる。また、 $t=10.0\text{mm}$  の場合、FF および  $\eta$  の変動サイクルは  $I_{sc}$  の変動サイクルと一致する。ただし、FF と  $\eta$  が極小値になる入射角では、 $I_{sc}$  は極大値となり、FF と  $\eta$  の挙動は、 $I_{sc}$  と逆となる。

次に、ガラス板の厚みによって、微小太陽電池素子に照射される集光領域のサイズがどの程度変化するか考える。光線追跡法による光学シミュレーションソフト (ZEMAX) を用い、 $t=9.9\sim 10.8\text{mm}$  の範囲で、トップセルおよびボトムセルの集光サイズを計算した。計算に用いた光線の平行度 (視野角) は、太陽光と同じ  $\pm 0.25^\circ$  とした。また、計算に用いた光のスペクトルは、AM1.5D スペクトルと同じ値を使用した。集光サイズは、光学シミュレーションで計算した集光領域の光子分布をもとに計算した (計算方法の詳細は本章末尾の補足 (3) を参照)。

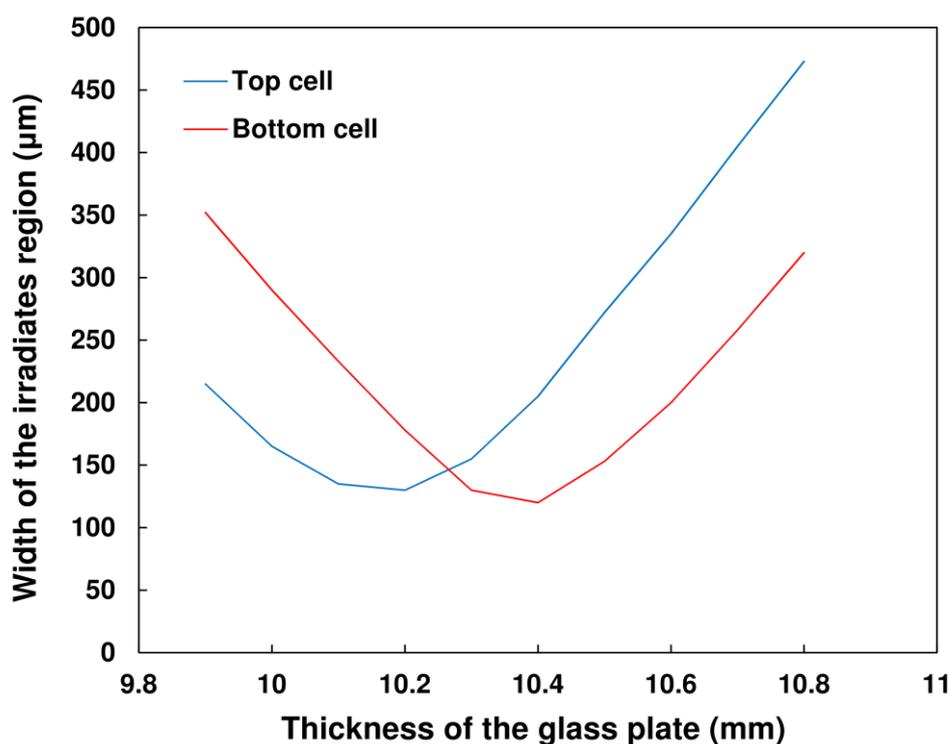


図3-12 ガラス基板の厚みと集光サイズの関係

青色と赤色のラインは、それぞれ、光学シミュレーションで計算した、トップセル、ボトムセルの集光サイズを示している。

図3-12にガラス板の厚み  $t$  と光学シミュレーションにより計算したトップセルとボトムセルの集光サイズの関係を示す。トップセルとボトムセルの集光サイズは

$t=10.27\text{mm}$  で一致する。 $t<10.27\text{mm}$  ではボトムセルの集光サイズがトップセルよりも大きくなり、 $t>10.27\text{mm}$  ではトップセルの集光サイズがボトムセルよりも大きくなること  
 がわかる。レンズ／受光面の面積比で定義される集光倍率は 330 倍であるが、実効的な  
 集光倍率(レンズ／集光領域の面積比)はガラス板の厚み  $t$  により変化し、最大値は  
 $t=10.27\text{mm}$  の場合で 5000 倍となっている。

図 3-13 に、波長 400nm、500nm、600nm、1300nm の場合の、 $t$  および  $\theta$  を変えて計  
 算した集光領域の光強度分布を示す。図 3-10 と図 3-11 の太陽電池素子の挙動は、  
 この計算結果から解析することができる。

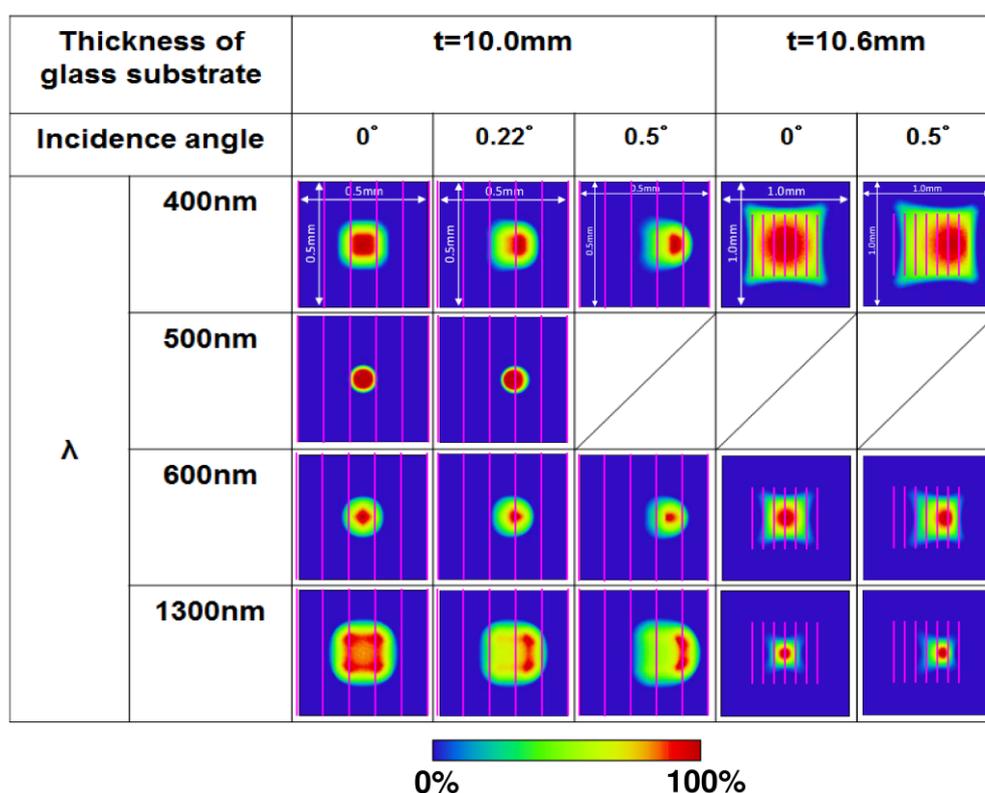


図 3-13 光学シミュレーションで計算した集光領域の光強度分布  
 紫のラインはグリッド電極の位置を示している。t=10.0mm の場合、光強度分布  
 図の 1 辺は 0.5mm、t=10.6mm の場合、光強度分布図の 1 辺は 1.0mm である。

図 3-10 において、 $t=10.0\text{mm}$ 、 $10.2\text{mm}$  の場合、入射角による  $I_{sc}$  の周期変動は、グ  
 リッド電極がトップセルの集光領域の影になること引き起こされている。図 3-10 と  
 図 3-13 に示すように、 $t=10.0\text{mm}$  の場合、トップセルの集光領域の中心が 2 つのグ  
 リッド電極の間にある  $\theta=0^\circ$  において、 $I_{sc}$  は極大値となる。また、トップセルの集  
 光領域の中心がグリッド電極上にある  $\theta=0.22^\circ$  において、 $I_{sc}$  は極小値になる。この

$I_{sc}$  の周期変動はトップセルの集光領域のサイズに依存しており、 $t=10.4\text{mm}$ 、 $10.6\text{mm}$  の場合、トップセルの集光領域は  $t=10.0\text{mm}$ 、 $10.2\text{mm}$  の場合よりも大きくなり、グリッド電極の影による  $I_{sc}$  の変動は見られない。

また、 $t=10.0\text{mm}$  の場合、トップセルの集光領域の中心が2つのグリッド電極の間となる  $\theta=0^\circ$  において、FF と  $\eta$  は極小値となっている。これは、この位置の場合、トップセルのエミッタ層で発生したフォトキャリアにとっては、集光領域の中心からグリッド電極までの距離が最も遠くなり、トップセルのエミッタ層の抵抗損失が最大となるためであると推測される (図3-11(a)、図3-13)。また、トップセルの集光領域の中心がグリッド電極上となる  $\theta=0.22^\circ$  では、FF と  $\eta$  は極大値となる。これは、この位置の場合、トップセルのエミッタ層で発生したフォトキャリアにとって、集光領域の中央周辺からグリッド電極までの距離が最小となり、トップセルのエミッタ層の抵抗損失が最小となるためと推測される (図3-11(a)、図3-13)。

一方、 $t=10.6\text{mm}$  の場合、FF と  $\eta$  はほぼ一定で、周期的な挙動は示さない (図3-11(b))。これは、トップセルの集光領域が  $t=10.0\text{mm}$ 、 $10.2\text{mm}$  の場合よりも大きくなっており (図3-12、図3-13)、トップセルのエミッタ層におけるフォトキャリアの抵抗損失が、トップセルの集光領域とグリッド電極の位置関係に影響しないためと考えられる。

図3-13において、 $t=10.6\text{mm}$  の波長  $400\text{nm}$  の集光領域が受光面よりも大きくなっていることがわかる。これは、 $t=10.6\text{mm}$  の場合は、入射角にかかわらず、トップセルの集光領域の一部が受光面よりはみ出してしまふことを意味している。図3-10のグラフにおいて、 $t=10.6\text{mm}$  のカーブが  $\theta=0^\circ$  近辺で丸みを帯びているのは、トップセルの集光領域が受光面よりもやや大きくなっていることが原因であると考えられる。

光学シミュレーションより求めた  $t=10.2\text{mm}$  のトップセルの集光領域は、図3-12に示すように4種類のガラス板の中で最小である。また、実験結果では、図3-10から、 $t=10.2\text{mm}$  の  $I_{sc}$  の周期変動は、4種類のガラス板の中で最も大きく、 $t=10.2\text{mm}$  のトップセルの集光領域が最も小さくなっていることを示唆している。このように、光学シミュレーションによる計算結果は実験結果とよく一致している。

次に、トップセルの条件で測定した図3-10、図3-11において、太陽光スペクトルの違いがどの程度  $I_{sc}$ 、FF、 $\eta$  の挙動に影響しているか考える。ボトムセルの集光領域がトップ、ミドル、ボトムセル中で最も大きくなる場合、図3-10において  $I_{sc}$  が1付近でほぼ一定となる入射角の範囲は、スペクトル変化の影響を受ける (詳細は本章の補足(4)に示す)。また、トップセルの集光領域がトップ、ミドル、ボトムセルの中で最も大きくなる場合、 $I_{sc}$  が1付近で一定となる入射角の範囲は、スペクトル変化に影響しない (詳細は本章の補足(4)に示す)。一方、図3-10、図3-11における  $I_{sc}$ 、FF、 $\eta$  の周期変動は、前述のどちらの場合も太陽光スペクトルの影響を受けない。これは、 $I_{sc}$ 、FF、 $\eta$  の挙動が、受光面でのトップセルの集光領域とグリッド電極との位置

関係にのみに起因しているからである。したがって、 $I_{sc}$ 、 $FF$ 、 $\eta$ の周期変動の挙動については、測定時の太陽光スペクトルの違いを考慮することなく、測定したモジュール間で比較・解析できることを示している。

次に、モジュール特性に対する不均一照射の影響について解析する。図3-13に示すように、太陽光が斜め入射した場合 ( $\theta \neq 0^\circ$ の場合)、 $\theta = 0^\circ$ の場合と比較して、集光領域の光強度分布が明らかに不均一になっていることがわかる。 $\theta = 0^\circ$ では、どの波長でも光強度分布はよく似ており、ガラス板の厚みによらず、集光領域の中央で光強度が最大値となっている。一方、 $\theta \neq 0^\circ$ の場合では、光強度が最も大きくなる位置が、集光領域の中央から端に移動するとともに、波長とガラス板の厚みに依存している。しかしながら、 $FF$ と $\eta$ に周期変動がある場合も、周期変動がない場合も、 $FF$ と $\eta$ (周期変動がある場合は、 $FF$ と $\eta$ の振幅中央値)は $\theta$ に依存せず(図3-11)、 $\theta$ の増加による $FF$ 、変換効率の低下は起きていない。

上記の結果は、本章で試作・評価した2次光学系を用いない薄型CPVモジュールは、従来のCPVモジュールのような色収差、コマ収差の影響を受けないということを示すものである。従来のCPVモジュールと比較して、本章のCPVモジュールにおいて色収差、コマ収差の影響が小さいのは、本章のCPVモジュールで使用している太陽電池素子が小さいことに起因している。色収差、コマ収差により集光領域に不均一に太陽光が照射されると、トップ、ミドル、ボトム、各セルで横方向の電流が発生し、各セル間における抵抗損失の増加を引き起こす。しかし、素子サイズが小さくなるほど横方向電流が流れる距離が小さくなるので、素子サイズが小さい太陽電池素子ほど、抵抗損失の増価は抑えられることになる。以上の理由により、微小太陽電池素子を用いた本章のCPVモジュールでは、色収差、コマ収差の影響を受けにくい。このことは、微小太陽電池素子を用いたCPVモジュールでは、ホモジナイザーを使用しない光学系を用いたシンプルかつコンパクトなモジュール構造でも、トップセルの集光領域を拡大することで、良好な太陽電池特性が得られることを示している。

#### 3-4-2 $FF$ のレンズ—素子間距離依存性

図3-14に $t=10.2\text{mm}$ 、 $10.6\text{mm}$ の場合の $I_{sc}$ と $FF$ の関係を示す。カレントマッチ状態での3接合太陽電池素子の $FF$ は、カレントミスマッチ状態の場合よりも小さくなることが知られている[8]。したがって、 $FF$ に対する太陽光スペクトルの影響を排除するため、 $t=10.2\text{mm}$ の場合は $SMR=0.80\sim 0.95$ 、 $t=10.6\text{mm}$ の場合は $SMR=0.85\sim 0.95$ と、 $SMR$ の範囲を絞って、データをプロットした。 $t=10.2\text{mm}$ の場合、トップセルの集光サイズは最小となり(図3-12)、集光領域とグリッド電極との位置関係により $FF$ が変化すると予測されたため、入射角を $-0.3\sim 0.3^\circ$ の範囲で多数のデータを測定し、 $FF$ の

集光領域とグリッド電極との位置関係が異なる複数のデータをプロットした。

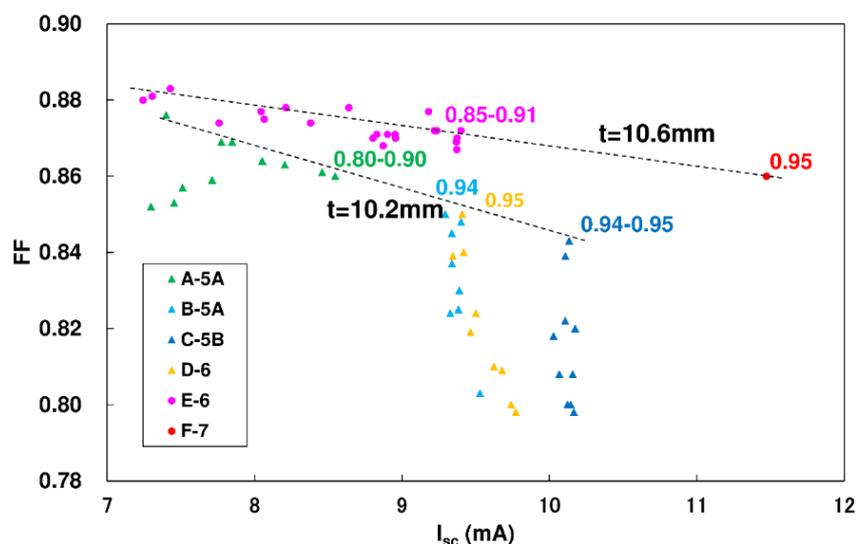


図3-14  $I_{sc}$  と FF の関係

それぞれのドットは同一サンプルを示している。ドット名の最初のアルファベットはサンプル名であり、A-Dは  $t=10.2\text{mm}$ 、E-Fは  $t=10.6\text{mm}$  の場合を示している。ハイフン以下の数字はグリッド電極数であり、5Aは電極ピッチが  $127\mu\text{m}$ 、5Bは電極ピッチが  $102\mu\text{m}$  の場合を示している。グリッド電極数6の場合の電極ピッチは  $102\mu\text{m}$ 、グリッド電極数7の場合の電極ピッチは  $85\mu\text{m}$  である。ドット横の数値は、サンプルA-FのSMRを示す。測定はモノモジュールで行った。測定場所は京都府相楽郡である。測定日は以下の通りである。

$t=10.2\text{mm}$ のモジュール：2013年10月21日、2013年11月8日、2013年11月14日

$t=10.6\text{mm}$ のモジュール：2013年12月3日、2014年1月10日

$t=10.2\text{mm}$ のモジュールでは、受光面内で集光領域の場所を変えて測定するため、入射角を $\pm 0.3^\circ$ の範囲で変化させ測定した。

$t=10.2\text{mm}$ の場合、FFは大きくばらついている。これは、入射角を $-0.3\sim 0.3^\circ$ の範囲で変化させたため、トップセルの集光領域とグリッド電極の位置関係が変化したためである。FFの上限値(破線に最も近い、FF値が大きいドット)は直線上に乗っており、上限のドットでは、トップセルの集光領域の中心はグリッド電極上にある。 $t=10.6\text{mm}$ の場合、全てのドットはほぼ直線上にある。 $t=10.2\text{mm}$ の上限値となる場合、 $t=10.6\text{mm}$ の場合ともに、FF値がほぼ直線状となるという結果は、プロットしたデータの範囲内において、FFへの太陽光スペクトルの影響が小さいことを示している。

t=10.2mm の場合、t=10.6mm の場合とも、 $I_{sc}$  の増加とともに FF は減少している。これは、 $I_{sc}$  の増加とともにトップセルのエミッタ層からグリッド電極に流れる横方向電流による抵抗損失が増加するためである。また、t=10.6mm の場合、t=10.2mm の場合よりも FF が大きく、 $I_{sc}$  に対する FF の低下率が低くなっている。これは、t=10.6mm の場合のトップセルの集光サイズが t=10.2mm の場合よりも大きくなることで、トップセルのエミッタ層での電流密度が小さくなり、エミッタ層で発生したフォトキャリアがグリッド電極に到達するまでの領域の抵抗損失が小さくなっているためである。上記の結果は、本章の CPV モジュールでは、トップセルの集光領域を拡大することによって、トップセルの電流密度を下げ、太陽電池特性を改善できることを示している。

上記のように、トップセルのエミッタ層での抵抗損失が FF に影響を与えているということは、グリッド電極のピッチについても FF に影響を与えていると考えてよい。そこで、電極ピッチが FF に与える影響について考察した。図 3-14 では、電極ピッチが  $85\mu\text{m}$ 、 $102\mu\text{m}$ 、 $127\mu\text{m}$  の太陽電池素子の測定値がプロットされている。異なる電極ピッチのデータをプロットしているにもかかわらず、t=10.2mm の上限値および t=10.6mm とともに、FF 値がほぼ直線状となるという結果は、トップセルの集光サイズと比較して、電極ピッチが FF に与える影響が小さいことを示している。これについては、以下のように説明できる。図 3-12 の集光サイズを元に計算した t=10.6mm と t=10.2mm の集光面積比は 6.5 倍あり、t=10.6mm と t=10.2mm でトップセルのエミッタ層の電流密度(集光領域平均値)に 6.5 倍の違いが生じる。それに対して、電極ピッチについては、 $85\mu\text{m}$ ~ $102\mu\text{m}$  間、 $102\mu\text{m}$ ~ $127\mu\text{m}$  間とともに 2 割程度のピッチ比しかなく、エミッタ層で発生したフォトキャリアがグリッド電極に到達するまでの実効的な距離が約 2 割しか変わらないためと考えられる。

### 3-4-3 カレントマッチに近い条件下での I-V 特性

これまでの実験結果から、t=10.6mm において太陽電池特性が改善されることがわかったので、カレントマッチに近い条件[9]で t=10.6mm の薄型 CPV モジュールの太陽電池特性を評価することにした。

測定当時、季節は冬であった。冬季は、太陽高度が低く、太陽光が大気中を通過する距離が長くなり、短波側の太陽光中の気体分子や微粒子によって散乱しやすい。そのため、トップセルの吸収波長の太陽光強度が弱く、強いトップ律速となる。そのため、冬季は、1年の中で最も  $I_{sc}$  が抑えられ、高い効率が得られない時期である。そこで、測定場所を京都府相楽郡から緯度が約  $10^\circ$  低く、より高い  $I_{sc}$  が得られる石垣島に変更し、太陽電池特性の評価を行った。

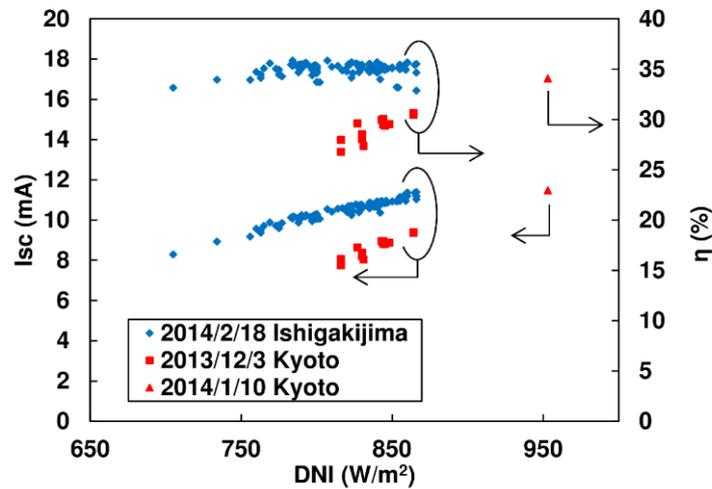


図 3-15 直達日射量と FF および  $\eta$  の関係

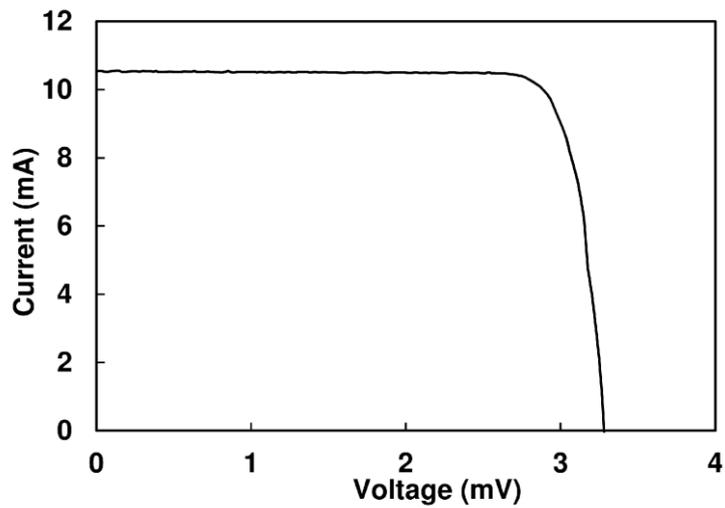
測定はモノモジュールで行った。グリッド電極数は7本の太陽電池素子を使用した。測定日は以下の通りである。

石垣島での測定：2014年2月18日

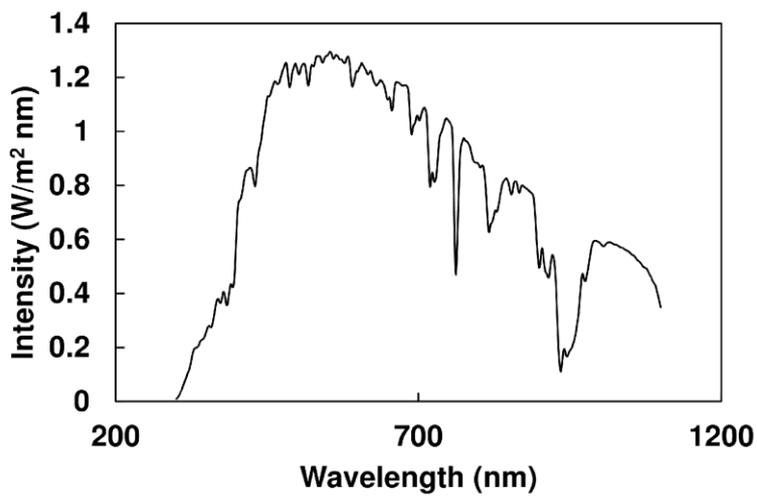
京都府相楽郡での測定：2013年12月3日、2014年1月10日

図 3-15 に、京都府相楽郡と石垣島で測定した、 $t=10.6\text{mm}$  の CPV モジュールにおける直達日射量と  $I_{sc}$  および  $\eta$  の関係を示す。石垣島で測定した  $I_{sc}$  および  $\eta$  は、京都府相楽郡で測定した場合と比べて高い。これは、トップセルで吸収される短波長側の太陽光が強い石垣島の方が、トップセルのフォトカレントが大きくなり、カレントマッチに近い状態(トップ、ミドル、ボトム、各セルのフォトカレントがより等しい状態)となっていることを示している。最も高い変換効率が記録された時の  $I-V$  特性を図 3-16 (a) に、太陽光スペクトルを図 3-16 (b) に示す。直達日射量  $807\text{W/m}^2$ 、AM1.28、モジュール温度  $25^\circ\text{C}$  の条件において、変換効率 35.9% と高い変換効率を得ることができた。

以上の結果は、微小太陽電池素子を用いた薄型 CPV モジュールにおいて、トップセルの集光領域拡大により、変換効率の向上が可能であることを示している。ただし、図 3-13 の  $t=10.6\text{mm}$  の場合、波長  $400\text{nm}$  の集光領域は受光面からはみ出してきており、その分、 $I_{sc}$  が低下しているものと考えられる。さらにトップセルの集光領域拡大による変換効率向上を調べるためには、受光面のサイズ自体も拡大させる必要がある。ただし、受光面を拡大させる場合、太陽電池素子のコストを考慮すると、太陽電池素子の外寸は拡大させず、パッド電極などの形状を工夫し、受光面のみ拡大させることが望ましい。それに関しては、第 4 章で検討を行う。また、受光面に対して、トップセルの集光領域をどの程度拡大する場合に最も高い性能が得られるか把握する必要があるが、その詳細については、第 5 章において検討を行う。



(a)



(b)

図 3-16 変換効率 35.9%が得られた時の I-V特性と太陽光スペクトル

(a) I-V特性、測定はモノモジュールで行った(太陽電池素子のグリッド電極数は7本)。測定日は014年2月18日(石垣島)である。

(b) 太陽光スペクトル、測定は相馬光学製分校放射計 S-2440 を使用した(測定波長範囲: 300-1100nm)。

### 3-5 まとめ

本章では、微小太陽電池素子を使用した薄型CPVモジュールを試作し、太陽電池特性の評価・解析を行った。従来サイズの太陽電池素子を用いたCPVモジュールでは、レンズの色収差、コマ収差で発生するトップ、ミドル、ボトム、各セル間における集光領域の不均一によりFFが低下することが知られている。これに対して、微小太陽電池素子の太陽電池特性は、これまでに報告例がなく、微小太陽電池素子を用いたCPVモジュールでは、太陽電池特性を低下させる要因が不明であった。そこで、微小太陽電池素子の発電性能を十分に発揮させるため、CPVモジュールのレンズ～太陽電池素子間距離や太陽光の入射角を変えることにより、太陽電池素子に照射される太陽光の光強度分布を変化させ、太陽電池特性への影響を調べた。

その結果、微小太陽電池素子を用いた薄型CPVモジュールでは、従来のCPVモジュールで知られている、トップ、ミドル、ボトム、各セルへの太陽光の不均一照射は変換効率低下の主な要因ではなく、トップセルのエミッタ層において光照射により発生したフォトキャリアがグリッド電極にまで到達するまでの領域の抵抗損失が、FFに最も影響を与えていることが明らかになった。また、微小太陽電池素子を用いたCPVモジュールにおいて、FFを改善し、高い変換効率を得るためには、トップセルの集光サイズを拡大し、トップセルのエミッタ層の電流密度を低減することが、最も有効であることを、微小太陽電池素子の特性として初めて明らかにした。以上のように、本章では、薄型CPVモジュールを実現するためのキーポイントとなる知見を得ることができた。

そして、ガラス板の厚みを調整し、トップセルの集光サイズを拡大させた薄型CPVモジュールにおいて、モノモジュールで35.9%の変換効率を得られることを確認することができた。

さらにトップセルの集光領域拡大による変換効率向上を調べるためには、受光面のサイズ自体も拡大させる必要がある。ただし、受光面を拡大させる場合、太陽電池素子のコストを考慮すると、太陽電池素子の外寸は拡大させず、パッド電極などの形状を工夫し、受光面のみ拡大させることが望ましい。それに関しては、第4章で検討を行う。

## 補足

### 補足(1)

レンズ材料として使用されるPMMAは、ボトムセルの発電波長である1160nm付近に吸収端があり[10]、波長1160nm付近の太陽光はレンズ厚が厚くなるほど吸収が大きくなる。従来のCPVモジュールでは、一般的にフレネルレンズが使用されることが多いが、フレネルレンズは本章のCPVモジュールで使用する凸レンズよりも薄く、波長1160nm付近の光吸収は少ない。また、通常使用されることが多い、ボトムセルにGe( $E_g=0.67\text{eV}$ )を用いた3接合太陽電池素子では、ボトムセルのフォトカレントがトップセル、ミドルセルよりも大きくなるため、通常のCPVモジュールは、トップ律速もしくはミドル律速となりやすい。したがって、通常のCPVモジュールでは、SMRはトップセルとミドルセルのフォトカレント比として定義される。

一方、本章のCPVモジュールで使用する凸レンズはフレネルレンズより厚いので、波長1160nm付近の光吸収は通常のCPVモジュールよりも大きい。さらに、本章で使用する太陽電池素子は、ボトムセルがGaInNAsSb( $E_g=1.0\text{eV}$ )であり、ボトムセルがGeの場合よりもボトムセルのフォトカレントは小さくなる[11]。したがって、本章のCPVモジュールでは、ボトムセルのフォトカレントはミドルセルのフォトカレントよりも小さい。したがって、本章のCPVモジュールは、ミドル律速にはならず、トップ律速もしくはボトム律速で動作する。

以上の理由により、本章では、SMRをトップセルとボトムセルのフォトカレントの比として定義した。

### 補足(2)

グリッド電極の本数は、 $t=10.0\text{mm}$ 、 $10.2\text{mm}$ 、 $10.4\text{mm}$ の場合は6本で、 $t=10.6\text{mm}$ の場合は7本と1本多い。しかし、 $t=10.6\text{mm}$ の場合のグリッド電極の本数が、 $t=10.0\text{mm}$ 、 $10.2\text{mm}$ 、 $10.4\text{mm}$ の場合と同じであっても、 $I_{sc}$ は周期的な変動はしないと考えられる。図3-10では、集光領域が広がるほど $I_{sc}$ の周期変動の振幅は小さくなるが、 $t=10.4\text{mm}$ で、すでに $I_{sc}$ の周期変動は見られない。 $t=10.6\text{mm}$ の集光領域は $t=10.4\text{mm}$ の場合よりも大きく、 $t=10.6\text{mm}$ のグリッド電極の本数が $t=10.4\text{mm}$ と同じであっても、周期変動は観察されず、 $t=10.6\text{mm}$ の場合のグリッド電極の本数の違いは、図3-10の結果に影響しないと考えてよい。

### 補足(3)

集光サイズは、光学シミュレーションから求めた集光領域のフォトン分布から計算した。例えば、トップセルの集光領域の場合で示すと、トップセルでの吸収波長である400~665nmの範囲で、波長毎に集光領域のフォトン分布を計算し、AM1.5Dのスペク

トルの波長毎の光子数に基づいて、上記光子分布に波長毎の重み付けを行うことにより、トップセルの実効的な光子分布を計算した。集光サイズは、この実効的な光子分布のピーク値の13.5%(1/e<sup>2</sup>)となる幅として計算した。

補足(4)

トップ律速の場合について、図3-10の結果に対する太陽光スペクトルの影響について考察する。

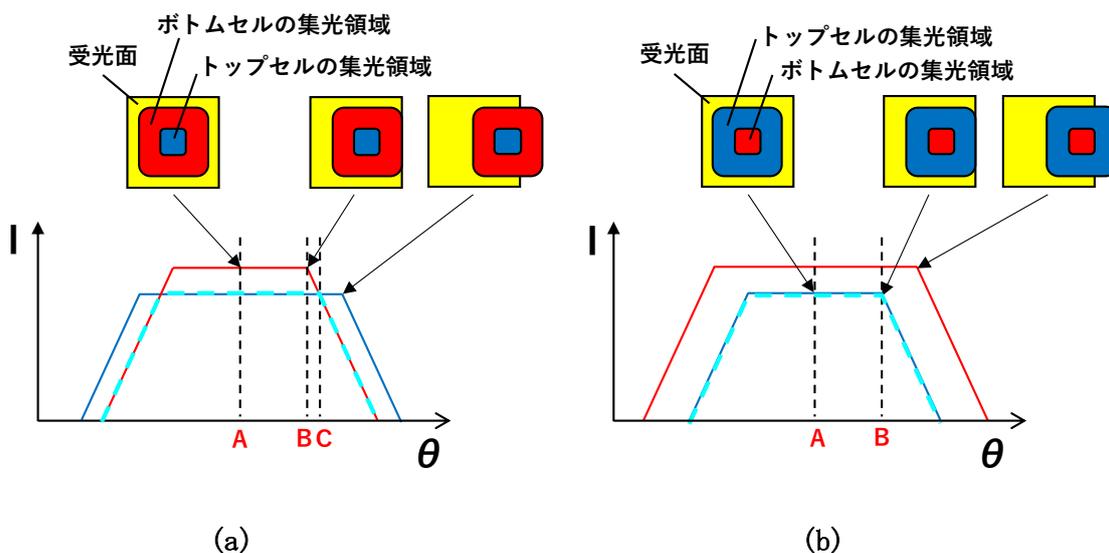


図3-補 太陽光入射角とトップセル、ボトムセルのフォトカレント (トップ律速の場合)

(a) 集光領域がトップセルよりもボトムセルの方が大きい場合

(b) 集光領域がボトムよりもトップセルセルの方が大きい場合

青線：トップセルのフォトカレントを示す

赤線：ボトムセルのフォトカレントを示す

水色の破線： $I_{sc}$ を示す

図3-補(a)に示すように、ボトムセルの集光領域が最も大きくなる場合、入射角 $\theta = 0^\circ$ では、トップ、ミドル、ボトム、各セルの集光領域は受光面内にあり、 $I_{sc}$ はトップセルのフォトカレントによって律速されている(図3-補(a)-A)。ボトムセルの集光領域は入射角が増加するにしたがって、受光面の周辺部に移動し、トップセル、ミドルセルよりも前に、まずボトムセルの集光領域の一部が受光面よりはみ出し始める(図3-補(a)-B)。こうして、ボトムセルのフォトカレントがまず低下し始めるが、ボトムセルのフォトカレントがトップセルのフォトカレントよりも大きい間は、 $I_{sc}$ は変化しない。

さらに入射角が大きくなり、ボトムセルのフォトカレントがトップセルのフォトカレントより小さくなるのにもない、 $I_{sc}$  が低下し始める(図 3-補(a)-C)。 $I_{sc}$  が低下し始める入射角は、トップセルとボトムセルのフォトカレントのバランスによって変化するので、太陽光スペクトルによって、 $I_{sc}$  が低下し始める入射角は変わる。よって、ボトムセルの集光領域がトップセル、ミドルセルよりも大きくなる場合、 $I_{sc}$  が低下し始める入射角は太陽光スペクトルの影響を受ける。

一方、図 3-補(b)に示すようなトップセルの集光領域が最も大きくなる場合、入射角  $\theta=0^\circ$  において、トップ、ミドル、ボトム、各セルの集光領域は受光面内にあり、 $I_{sc}$  はトップセルのフォトカレントによって律速される(図 3-補(b)-A)。入射角の増加により、トップセルの集光領域がまず受光面からはみ出し始める。この時、トップセルのフォトカレントが低下し始めるが、トップ律速であるため、 $I_{sc}$  も同時に低下し始める(図 3-補(b)-B)。したがって、 $I_{sc}$  が低下し始める入射角は太陽光スペクトルの影響を受けない。トップセルの集光領域がミドルセル、ボトムセルよりも大きくなる場合は、 $I_{sc}$  が低下し始める入射角は太陽光スペクトルの影響を受けない。

## 参考文献

- [1] I. García, C. Algora, I. Rey-Stolle, and B. Galiana, "Study of non-uniform light profiles I. García, P. Espinet-González, I. Rey-Stolle, E. Barrigón and C. Algora, "Extended triple-junction solar cell 3D distributed model: application to chromatic aberration-related losses," *AIP Conference Proceedings*, vol.1407, pp. 13-16, 2011.
- [2] P. Espinet-González, R. Mohedano, I. García, P. Zamora, I. Rey-Stolle, P. Benitez, C. Algora, A. Cvetkovic, M. Hernández, J. Chaves, J.C. Miñano, and Y. Li, "Triple-junction Solar Cell Performance Under Fresnel-based Concentrators Taking Into Account Chromatic Aberration And Off-axis Operation," *AIP Conference Proceedings*, vol.1477, pp. 81-84, 2012.
- [3] K. Araki, M. Kondo, H. Uozumi, Y. Kemmoku, N. J. Ekins-Daukes, M. Yamaguchi, "Packaging III-V tandem solar cells for practical terrestrial applications achievable to 27% of module efficiency by conventional machine assemble technology," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90,18-19, pp. 3320-3326, 2006.
- [4] H. Cotal and R. Sherif, "The Effects of Chromatic Aberration on the Performance of GaInP/GaAs/Ge Concentrator Solar Cells from Fresnel Optics," *Proc. 31st IEEE Photovoltaic Specialists Conf.*, pp. 747-750, 2005.
- [5] M. Victoria, R. Herrero, C. Domínguez, I. Antón, S. Askins and, G. Sala, "Characterization of the spatial distribution of irradiance and spectrum in concentrating photovoltaic systems and their effect on multi-junction solar cells," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol.21, pp. 308-318, 2011.
- [6] Hong, Hwen-Fen, Tsung-Shiew Huang, and Yen-Yen Chen, "Influence of metal grid spacing on the conversion efficiency of concentration solar cell at different illumination levels," *Materials Science and Engineering B*, vol.188, pp. 43-47, 2014.
- [7] B. Garcia-Domingo, J. V. Muñoz, J. Aguilera and M Fuentes, "Analysis and characterization of an outdoor CPV system comparative with other PV technologies," *AIP Conference Proceedings*. vol.1477, pp. 176-180, 2012.
- [8] M. Meusel, R. Adelhelm, F. Dimroth, A. W. Bett and W. Warta, "Spectral mismatch correction and spectrometric characterization of monolithic III-V multi-junction solar cells," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol.10, pp. 243-255, 2002.
- [9] S. Reynolds and S. Vladimir, "Modelling performance of two-and four-terminal thin-film silicon tandem solar cells under varying spectral conditions," *Energy procedia*, vol.84, pp. 251-260, 2015.

- [10] P. Benítez, J. C. Miñano, P. Zamora, R. Mohedano, A. Cvetkovic, M. Buljan, J. Chaves and M. Hernández, "High performance Fresnel-based photovoltaic concentrator," *Optics express*, vol.18, pp. A25-A40, 2010.
- [11] V. Sabnis, Y. Homan and Mike Wiemer, "High-efficiency multijunction solar cells employing dilute nitrides," *AIP Conference Proceedings*, vol.1477, pp. 14-19, 2012.

## 第4章 薄型CPVモジュールの性能実証

### 4-1 はじめに

本章では、第3章での解析結果を踏まえて改良を加えた薄型CPVモジュールを用い、モジュールの性能実証を行った。

第3章では、微小太陽電池素子を用いた薄型CPVモジュールについて、太陽電池特性の解析を行い、トップセルの集光領域を拡大し、トップセルの電流密度を下げることで、変換効率が向上できることを示した。

しかし、第3章で最も高い変換効率が得られたモジュールでは、トップセルの集光領域の一部が受光面からはみ出し、これ以上トップセルの集光領域を拡大することは不可能であった。さらに、トップセルの集光領域拡大による変換効率向上を調べるためには、トップセルの集光領域とともに、受光面のサイズも拡大させる必要がある。そこで、本章では、太陽電池素子のパッド電極の形状、配置に工夫を行い、太陽電池素子の外寸を $1\text{mm}\times 1\text{mm}$ 以下に抑えながら、受光面を拡大した太陽電池素子を作製した。

この太陽電池素子の受光面を拡大した薄型CPVモジュールにおいて、トップセルの受光面を拡大することで、どこまでの変換効率が得られるかを調べるため、様々な直達日射量と太陽光スペクトルで測定を行い、カレントマッチ前後の状態における変換効率を評価した。

本章では、以上の取組により、微小太陽電池素子を用いた薄型CPVモジュールで非常に高い変換効率が得られることを実証した。さらに、高効率化の指針を得ること目的に、薄型CPVモジュールのエネルギー損失について解析し、高い変換効率が得られる原因を明らかにしたので、内容について述べる。

## 4-2 薄型CPVモジュールの構造と作製方法

### 4-2-1 薄型CPVモジュールの構造

まず、本章で試作した薄型CPVモジュールの構造について述べる。図4-1に、本章の薄型CPVモジュールの外観写真を、図4-2に断面構造図を示す。



図4-1 薄型CPVモジュールの外観写真

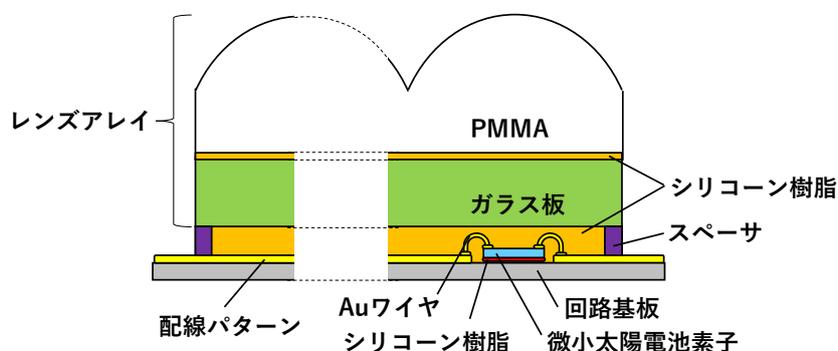


図4-2 薄型CPVモジュールの断面構造図

CPVモジュールのサイズは $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 19\text{mm}$ である。CPVモジュールは、凸レンズアレイ、微小太陽電池素子を取り付けた回路基板、凸レンズアレイと回路基板のすき間に充填されたシリコーン樹脂層から構成されている。凸レンズアレイは、第2～3章と同じく、2層構造であり、上部は8.5mm厚のPMMAで作製しており、下部は、集光されて高密度な太陽光が通過する部分となるため、耐光性を考慮して10mm厚のBK7ガラスで作製している。第2～3章と同じく、レンズアレイは25個のレンズから構成されており、レンズアレイ内のレンズ1個のサイズは $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ である。凸レ

レンズの表面にはARコートを行っている。回路基板は、厚みが1.5mmのアルミ板であり、放熱板を兼ねている。アルミ板表面には、アルミナからなる絶縁層が形成され、この絶縁層上に配線パターンが形成されている。25個の太陽電池素子は、直列または並列では接続せず、それぞれ個別に測定できるように配線している。

太陽電池素子の光学顕微鏡写真を図4-3に示す。太陽電池素子の外寸は、 $0.97\text{mm} \times 0.97\text{mm} \times 0.2\text{mm}$ である。本章の太陽電池素子は、素子の外寸は1mm角以下としながら、受光面を大きくとれるように工夫を行っている。また、太陽電池素子と回路基板との接続をワイヤーボンドにより行うため、太陽電池素子のコーナー部分に、ワイヤーボンドが可能な最小面積でパッド電極を形成した。パッド電極の形状は、(+)側は三角形、(-)側は台形とした。八角形をした受光面の面積は $0.672\text{mm}^2$ である(受光面をパッド電極を含めた矩形と考えると、受光面のサイズは $0.85\text{mm} \times 0.85\text{mm}$ である)。

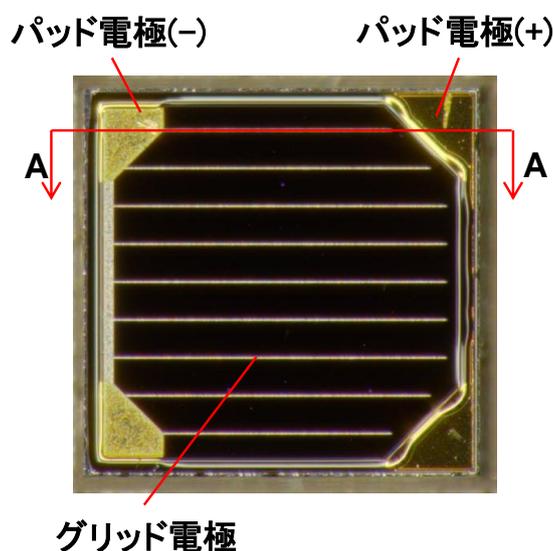


図4-3 太陽電池素子の光学顕微鏡写真

八角形をした受光面の面積は $0.762\text{mm}^2$ 、素子サイズは $0.97\text{mm} \times 0.97\text{mm}$ である。

太陽電池素子の断面図を図4-4に示す。太陽電池素子は、第2～3章で使用した太陽電池素子と同じく、半絶縁性GaAs基板上に下部コンタクト層、ボトムセル(GaInNAsSb)、ミドルセル(GaAs)、トップセル(InGaP)、上部コンタクト層がエピタキシャル成長された基板を使用した。太陽電池素子表面のグリッド電極の幅は $4\mu\text{m}$ 、ピッチは $94\mu\text{m}$ である。本章の太陽電池素子は、第3章の太陽電池素子とパッド電極の位置、形状は大きく異なるが、第3章と同じく、パッド電極(+)、パッド電極(-)とも

に太陽電池素子の表面側から取り出せる構造となっている。

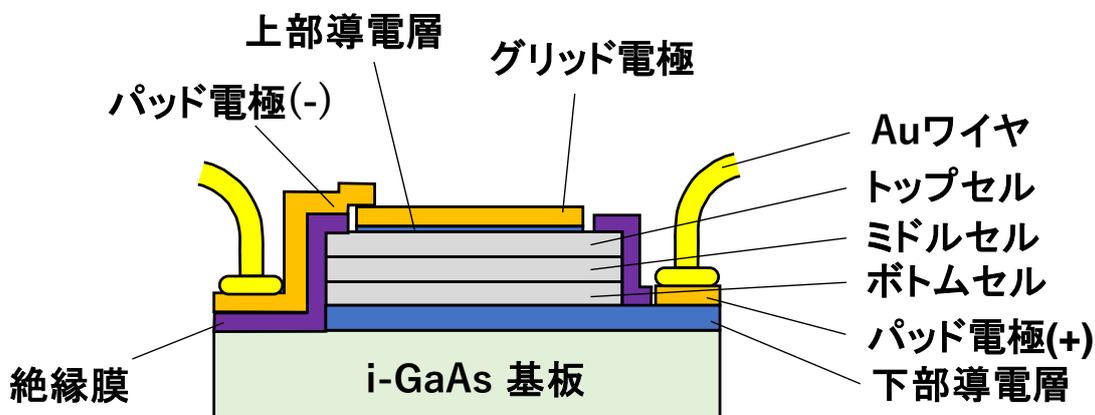


図4-4 太陽電池素子の断面構造図（図4-3のA-A断面）

トップセル、ミドルセル、ボトムセル、下部導電層の間に挿入されているトンネル接合は図示省略

#### 4-2-2 薄型CPVモジュールの作製方法

薄型CPVモジュールは、以下の方法で作製した(図4-5)。

(薄型CPVモジュールの作製工程)

- (1) 回路基板上の素子設置位置にシリコン樹脂を塗布し、その上に太陽電池素子を設置する。
- (2) オープン中で回路基板を加熱し、シリコン樹脂を硬化させ、回路基板上に太陽電池素子を接着する。
- (3) ワイヤボンダーを使用し、太陽電池素子と回路基板の配線パターンを、Auワイヤにより正電極、負電極ともに接続する。
- (4) 回路基板上にスペーサとして0.5mm厚の構造用両面テープを張り付けるとともに、この両面テープにより凸レンズと回路基板を接着する。
- (5) 最後に、回路基板と凸レンズの隙間に充填剤としてシリコン樹脂を流し込み、常温放置によりシリコン樹脂を硬化させる。

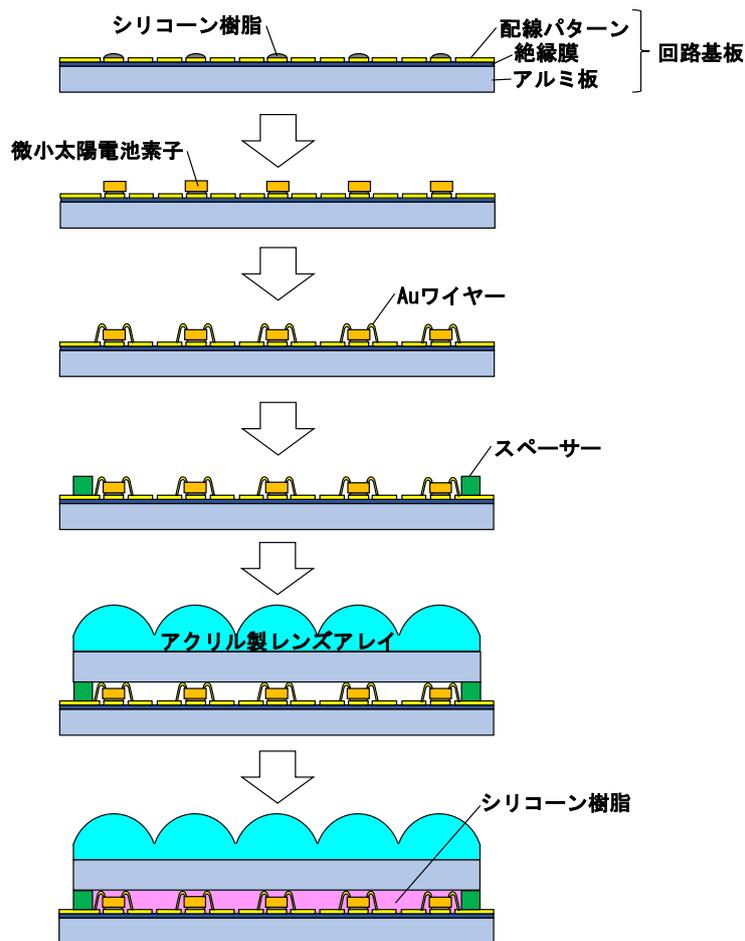


図4-5 薄型CPVモジュールの作製方法

#### 4-2-3 モジュールの光学設計

本章の薄型CPVモジュールでは、第3章からさらに高い変換効率を得るため、太陽電池素子受光面、トップセルの集光領域ともに拡大させた光学設計とした。図4-6に、本章のCPVモジュールの太陽電池素子における、トップ、ミドル、ボトム、各セルの集光領域の状態を示す。図4-6(a)は、各セルの集光領域の大きさを示す模式図である。トップ、ミドル、ボトム、各セルでは、それぞれ、波長400~665nm、665~885nm、885~1350nmの太陽光が吸収される。図4-6(b)に、光線追跡法(ZEMAX)により計算した受光面の光強度分布を示す。表示領域は縦横1mmである。周期的に並ぶ赤いラインはグリッドラインを表している。本章の薄型CPVモジュールでは、波長400nmの集光領域が受光面からはみ出すことなく全体に広がるようにするため、ガラス板の厚みを10.25mmに調整した。その結果、ボトムセル、ミドルセル、トップセルの順に集光領域

が大きくなる設計となっている。レンズの頂点部から太陽電池素子表面までの距離は、19.05mmである。集光倍率（レンズ面積/受光面の面積比）は、受光面の面積を八角形の $0.762\text{mm}^2$ として計算した場合、150倍である。

本章のCPVモジュールは、第3章のCPVモジュールから太陽電池素子の電極構造、受光面の形状などを変更しているが、凸レンズの底面に太陽電池素子を貼り付けたモジュールの基本構造に変化はなく、第3章のCPVモジュールに対して、受光面とトップセルの集光領域を拡大した効果を比較することができる。

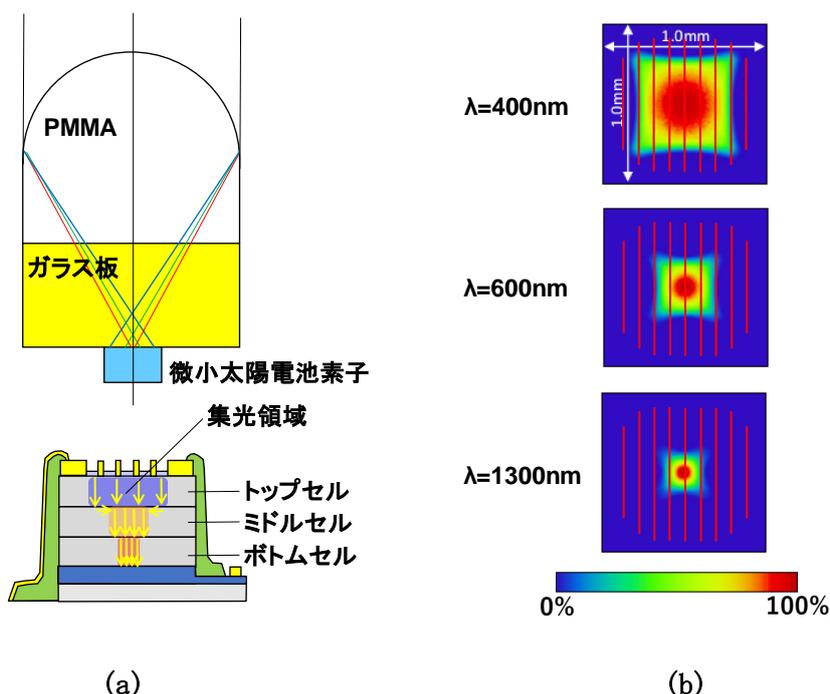


図4-6 太陽電池素子に照射される太陽光分布

- (a) CPVモジュールと太陽電池素子内における波長毎の太陽光分布 (模式図)  
 上の図の青色、黄色、赤色の線は、それぞれ、波長 400nm、665nm、885nm の太陽光線を示す。下の図の青色、黄色、赤色の領域は、それぞれ、波長 400nm ~ 665nm、665nm ~ 885nm、885nm ~ 1350nm に対応する集光領域を示す。矢印はフォトカレントの流れを示す。
- (b) 光線追跡法の光学シミュレーションソフトウェア (ZEMAX) によって計算した太陽電池素子の受光面における光強度分布  
 このシミュレーションでは、太陽光と同じく、光線の平行度(視野角)を $\pm 0.25^\circ$ として計算を行った。赤い線はグリッド電極の位置を示す。強度分布図は $1.0\text{mm} \times 1.0\text{mm}$ の領域を示す。

## 4-3 太陽電池特性および光学特性の測定方法

### 4-3-1 太陽電池特性の測定方法

次にCPVモジュールの測定方法について述べる。測定は、京都府相楽郡の太陽光照射のもとで行った。第3章と同様に、太陽電池特性が温度変化の影響を受けることを避けるため、図3-8に示す太陽追尾装置に取り付けた温度制御ユニットにCPVモジュールを設置し、モジュール温度25°Cで測定を行った。CPVモジュールには、バイパスダイオードは接続しなかった。

CPVモジュールのI-V特性は、I-Vカーブトレーサー(英弘精機 MP-160)を用いて測定した。直達日射量は直達日射計(英弘精機 MS-56)を用いて測定した。太陽光スペクトルは分光放射計(オプトリサーチ MSR-7000N)を用いて測定した。分光放射計のセンサー部には、直達光のみを通過させるための筒を設置し、測定を行った。筒の内径は68mm、長さは450mmである。

測定には、CPVモジュール内のモノモジュール(複数のレンズ、太陽電池素子で構成されるCPVモジュール内の素子1個分)を使用した。1日の間に、時間の経過とともに直達日射量、太陽光スペクトルが変化するのを利用し、同じ測定日の間に、1~10分程度の間隔で連続的に測定を行い、太陽電池特性の日射量依存性を評価した。

### 4-3-2 光学特性の測定

レンズの透過率は、分光感度評価装置(分光計器 CEP-25RR)の分光器を使用して測定した。分光器から出射した波長300~1400nmの光を、レンズ入射面に照射し、レンズ出射面に設置した積分球の入射ポートに入射させた(図4-7)。積分球の出射ポートに設置したフォトダイオードにより、透過光を検出した。太陽電池素子表面のARコート膜はエリプソメーター(Woollam VASE)を使用して測定した。

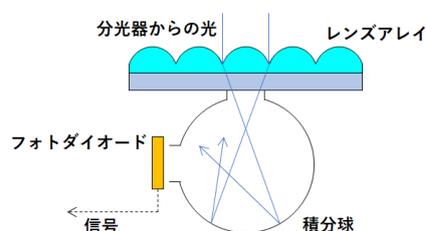


図4-7 レンズ透過率の測定方法

#### 4-4 薄型CPVモジュールの性能実証

同じ条件で作製した2個のモジュールA、Bについて、太陽電池特性の直達日射量(Direct Normal Irradiance: DNI)依存性の評価・解析を行った。なお、モジュールAとBのデータは、別の日に測定したものである。

図4-8(a)に $I_{sc}$ のDNI依存性を示す。モジュールA、Bの $I_{sc}$ はDNIとともに直線状に増加している。モジュールA、Bのデータは、ともに傾きの異なる2つの直線上にある。図4-8(b)にFFのDNI依存性を示す。図4-8(b)のグラフについても、モジュールA、Bのデータは、ともに傾きの異なる2つの直線上にある。また、 $I_{sc}$ のDNI依存性のグラフとFFのDNI依存性のグラフにおいて、2個の直線の変曲点のDNI値はほぼ等しい。図4-9(a)に $\eta$ のDNI依存性を示す。 $\eta$ は、 $I_{sc}$ のDNI依存性およびFFのDNI依存性のグラフにおける変曲点のDNI値周辺で最大値が得られている。また、図4-9(b)に $V_{oc}$ のDNI依存性を示すが、 $V_{oc}$ はDNIに対する依存性は見られない。 $V_{oc}$ の分布は、モジュールA、Bで異なっているが、その分布の違いは、モジュールA、Bで使用する太陽電池素子の特性のロット内ばらつきの範囲内である。

日中、太陽高度が低く、太陽光が大気層を通過する距離が長くなるほど、大気中での微粒子等による散乱が多くなるため、DNIは小さくなる。また、トップセルで吸収される400~665nmの太陽光は、ミドル、ボトムセルで吸収される665~1350nmの太陽光よりも大気中の塵などにより散乱しやすい[1]。したがって、太陽高度により太陽光が大気層を通過する距離が変化することで、太陽光中に占めるトップセルで吸収される太陽光の強度は変化する。トップセルで吸収される太陽光は、ミドル、ボトムセルで吸収される太陽光よりも、太陽高度が高く、DNIが増加する場合に強くなり、太陽高度が低く、DNIが減少する場合に弱くなりやすい。したがって、トップセルで吸収される太陽光は、ミドル、ボトムセルで吸収される太陽光よりもDNIによる増減が大きい。

図4-8(a)の $I_{sc}$ のDNI依存性のグラフは、DNIが変曲点より小さい領域では、DNIが変曲点より大きい領域よりも、グラフの傾きが急になっている。DNIが変曲点以下の領域では、トップセルで吸収される太陽光が弱く、CPVモジュールはトップセルの状態であり、DNI増加にともなう $I_{sc}$ の増加は、トップセルのフォトカレントの増加によるものと考えられる。変曲点で、トップセルのフォトカレントがミドルまたはボトムセルのフォトカレントを上回り、DNIが変曲点より大きい領域では、CPVモジュールはミドルまたはボトムセルの状態でいる。ただし、PMMAレンズには、ボトムセルの吸収波長帯にある1160nmの辺りに吸収帯があり、凸レンズアレイのPMMA部分の厚みが8.5mmある本章のCPVモジュールでは、ボトムセルの電流値は、ミドルセルの電流値よりも小さくなることが判明している。したがって、DNI増加にともなう $I_{sc}$ の増加は、ボトムセルのフォトカレントの増加によるものであり、DNIが

変曲点よりも大きい領域では、CPVモジュールはボトム律速になっていると考えられる(第3章の補足(1)参照)。

変曲点近辺では、トップ、ミドル、ボトム、各セルのフォトカレントがほぼ等しくなるカレントマッチ状態になっていると考えられる。FFは、カレントマッチ状態にならない場合よりも、カレントマッチ状態にある場合の方が小さくなることが知られている[2]。図4-8(a)、図4-8(b)においても、Iscの変曲点近辺でFFが最小値となっていることがわかる。

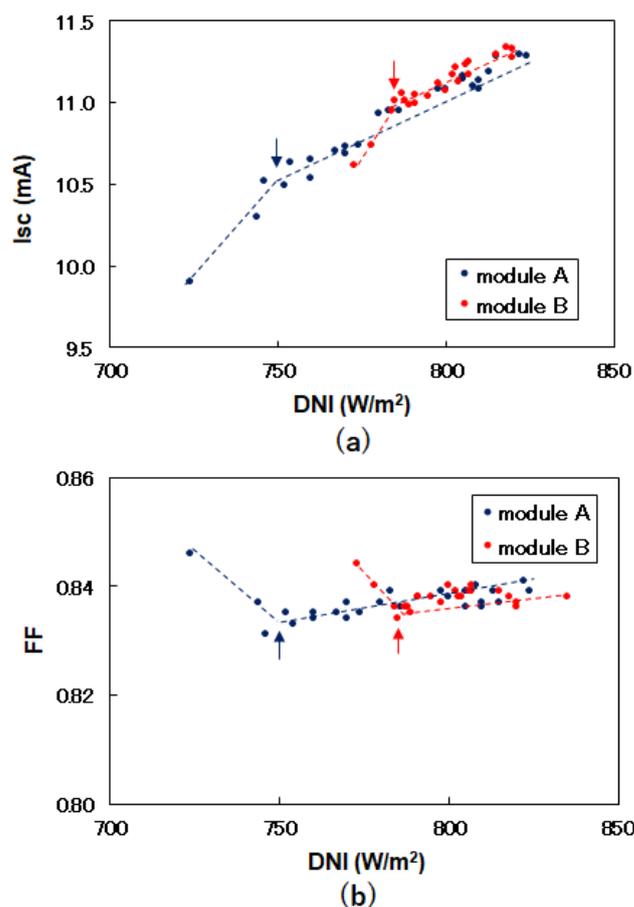


図4-8 CPVモジュールの直達日射量(DNI)とIscおよびFFの関係

(a) DNIとIscの関係

(b) DNIとFFの関係

青色の点は2014年7月30日に測定を行ったモジュールAの測定結果を示す。

赤色の点は2014年7月31日に測定を行ったモジュールBの測定結果を示す。

矢印は変曲点を示す。

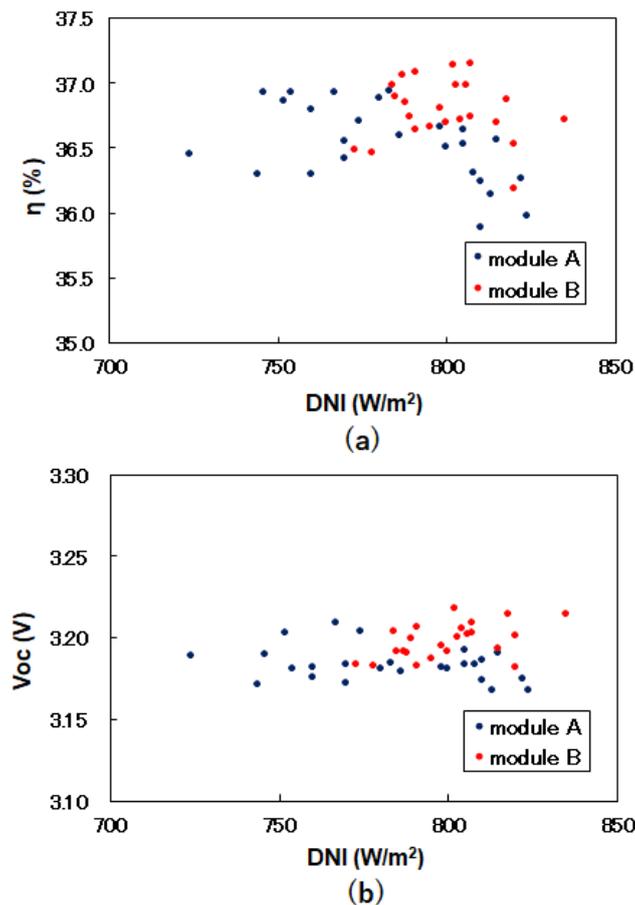


図4-9 CPVモジュールの直達日射量 (DNI) と  $\eta$  および  $V_{oc}$  の関係

(a) DNI と  $\eta$  の関係

(b) DNI と  $V_{oc}$  の関係

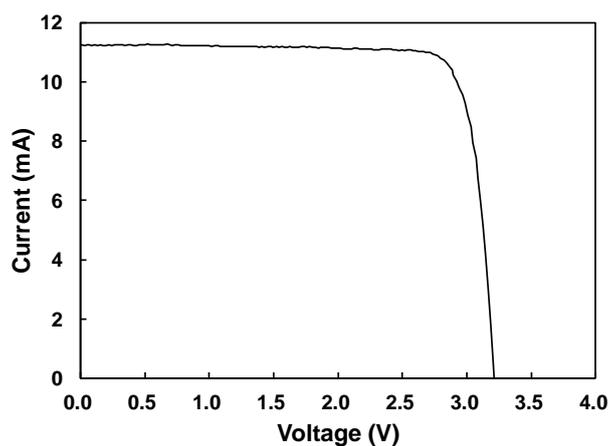
青色の点は2014年7月30日に測定を行ったモジュールAの測定結果を示す。

赤色の点は2014年7月31日に測定を行ったモジュールBの測定結果を示す。

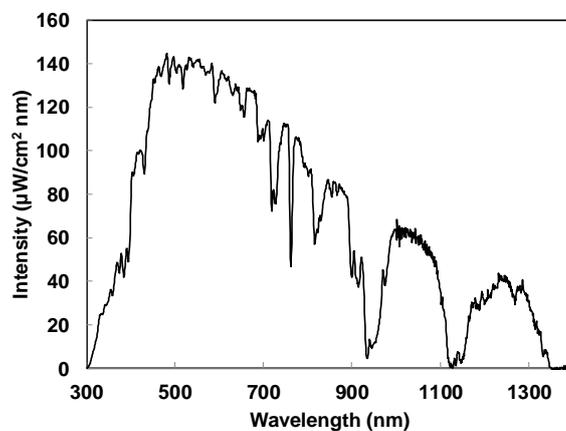
太陽光スペクトルの観点から測定結果を解析するため、モジュールA、BそれぞれのSMRを計算した(SMRについては第3章3-3-2を参照)。第3章のCPVモジュールと同じく、本章のCPVモジュールも測定時にトップ律速またはボトム律速になるため、SMRはトップセルとボトムセルのフォトカレント比として計算した。変曲点のSMRに着目すると、モジュールA、BのSMRは、それぞれ、1.14、1.19と近い値となった。この結果は、モジュールA、Bにおいて、それぞれの変曲点でトップセルとボトムセルのフォトカレントの比がほぼ等しくなっていることを示唆している。

また、モジュールA、Bの変曲点のSMRをトップセルとミドルセルのフォトカレントの比で計算した数値は、それぞれ、1.02、1.00とほぼ同じ値となった。このことは、

モジュールAおよびBのトップ、ミドル、ボトム、各セルにおける光子比がほぼ同じであり、モジュールA、Bを測定した日のそれぞれの変曲点において、太陽光スペクトルの相対的な強度分布がほぼ等しくなっていることを示している。モジュールA、Bの変曲点におけるDNI値は、図4-8、9のように差があるが、同じDNI、太陽光スペクトルで測定すれば、モジュールA、Bの変曲点におけるDNI値は一致するはずである。



(a)



(b)

図4-10 モジュールB測定時のI-V特性と太陽光スペクトル

(a) I-V特性

(b) 太陽光スペクトル

測定は、モノモジュールで行った。

測定日時は2014年7月31日 13:42、測定場所は京都府相楽郡である。



後、CPVシステム全体の低コスト化を進めていく過程で、トップセルの照射サイズ、太陽電池素子の受光面サイズ、太陽追尾装置の追尾条件を調整し、集光倍率およびアクセプタンスアングルの最適化を行っていく必要がある。

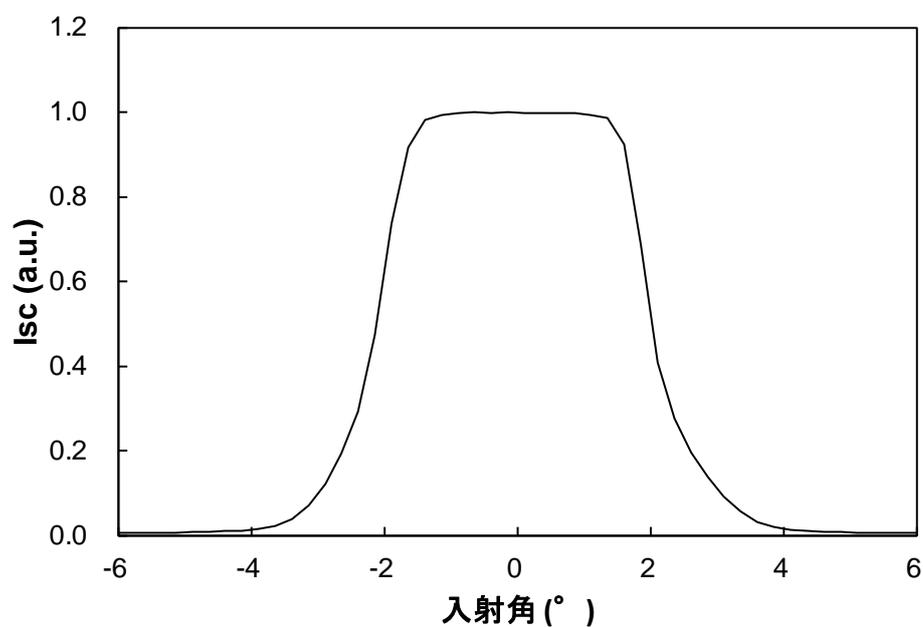


図4-12 薄型CPVモジュールのIscに対する角度依存性

測定は、モノモジュールで行った。モジュールはペルチェ素子によって温度コントロールし、25℃一定で測定した。測定日時は2014年9月8日 15:39、測定場所は京都府相楽郡である。

#### 4-5 薄型CPVモジュールの損失解析

前節で、本章の微小太陽電池素子を用いた薄型CPVモジュールで非常に高い変換効率が得られることを実証した。本節では、この高い変換効率が得られる原因について調べ、高効率化の指針を得ることを目的に、モジュールの損失解析を行った。

CPVモジュールの太陽電池特性は、モジュールに組み込む前の太陽電池素子の特性よりも低下する。この太陽電池特性の低下は、レンズなどの光学部材による光学損失(入射太陽光の反射、吸収、散乱など)、太陽電池素子や回路基板などの直列抵抗の増加、太陽光スペクトルの変化に伴うカレントミスマッチ、太陽電池素子受光面への太陽光の不均一照射、太陽電池素子の温度上昇による電圧低下などにより発生する。本章の微小太陽電池素子を用いた薄型CPVモジュールの太陽電池特性を劣化させる要因を明らかにするため、本章のCPVモジュールとモジュール実装前の太陽電池素子との太陽電池特性の差を調べた。

実装前の太陽電池素子を、トップ、ミドル、ボトム、各セルのフォトカレントが、AM1.5D( ASTM G173-03 で規定される基準太陽光スペクトル AM1.5G 中の直達光スペクトル)のスペクトルで測定した場合と等しくなるように調整した光源を用い、フラッシュテストによって太陽電池特性の評価を行った。その結果、実装前の太陽電池素子では、 $I_{sc}=11\text{mA}$  において変換効率は 42.4%であった。一方、CPVモジュールでは、トップセルとボトムセルのフォトカレントの比が AM1.5D のスペクトルに非常に近い  $SMR=1.01$  の場合の屋外測定において、変換効率は 35.5% ( $I_{sc}=10.3\text{mA}$ ) であった。モジュール化による損失を  $1 - \eta_{module} / \eta_{cell}$  と定義すると、モジュール化による損失は 16.3%であった。ここで、 $\eta_{module}$  はモジュールの変換効率、 $\eta_{cell}$  は太陽電池素子の変換効率である。

モジュール化による損失の要因を調べるため、CPVモジュールの光学損失の解析を行った。本章のCPVモジュールは、太陽電池素子に太陽光が入射するまでに、主に、レンズ表面での反射、レンズ内での光吸収、太陽電池素子受光面に形成したARコート膜での反射による損失を受ける。レンズの光学損失  $L_A$ 、受光面のARコート膜での光学損失  $L_B$  は、それぞれ、式(5-1)、および式(5-2)で表すことができる。

$$L_{A(k)} = \int_{n_1}^{n_2} P(\lambda)(1 - T_A(\lambda))d\lambda / \int_{n_1}^{n_2} P(\lambda)d\lambda, \quad (5-1)$$

$$L_{B(k)} = \int_{n_1}^{n_2} P(\lambda)(1 - T_B(\lambda))d\lambda / \int_{n_1}^{n_2} P(\lambda)d\lambda, \quad (5-2)$$

ここで、 $P(\lambda)$ 、 $T_A(\lambda)$ 、 $T_B(\lambda)$ は、それぞれ、波長 $\lambda$ における、入射する太陽光の光子数、レンズの透過率、太陽電池素子ARコート膜の透過率を表している。 $k$ は、モジュール内での光学損失を計算する際の波長範囲を示す添字で、 $n_1$ 、 $n_2$ はこの波長範囲の最小波長と最大波長である。 $k$ は、それぞれ、トップセル、ミドルセル、ボトムセル、およびこれら3セル全体の波長帯に対応する、“*top*”、“*middle*”、“*bottom*”、“*all*”を表している。

モジュールのトータル光学損失は、式(5-3)により表すことができる。

$$L(k) = L_{A(k)} + L_{B(k)} - L_{A(k)}L_{B(k)} \quad (5-3)$$

図4-13は、測定により求めた実際のレンズと太陽電池素子の  $T_A(\lambda)$  および  $T_B(\lambda)$  の値である。 $T_A(\lambda)$ 、 $T_B(\lambda)$ 、AM1.5Dの太陽光スペクトル  $P(\lambda)$  を用い、式(5-1)～式(5-3)より  $L_{A(k)}$  および  $L_{B(k)}$  を計算した。計算結果を表4-1に示す。ただし、この計算では、グリッド電極が受光面の影となることにより発生するシャドーロス(約2%)は、光学損失に含んでいない。

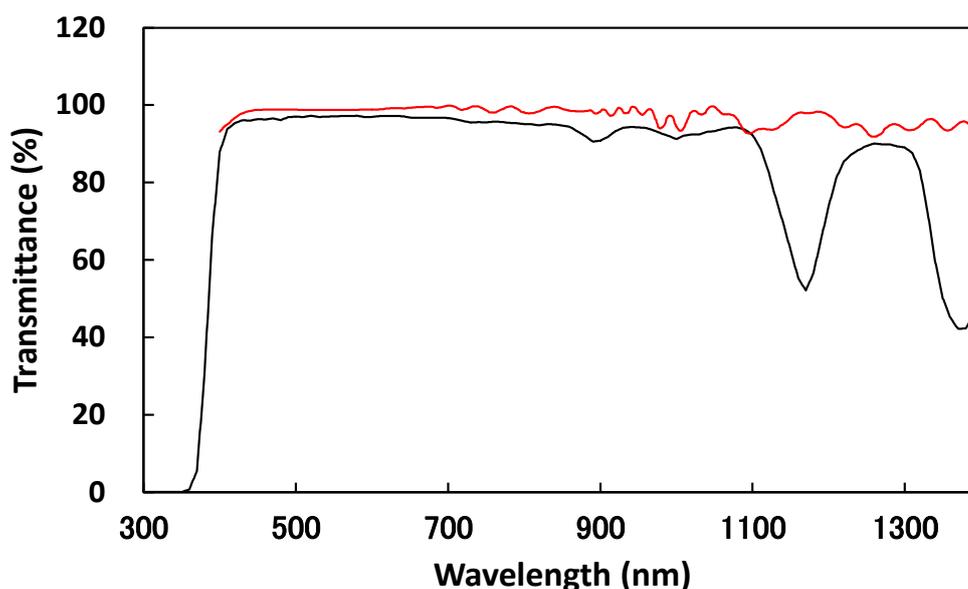


図4-13 レンズ表面と太陽電池素子受光面に形成したARコート膜の透過率

黒色のラインはレンズアレイの透過率  $T_A$  を示す。

赤色のラインはARコート膜の透過率  $T_B$  を示す。

表 4-1 レンズおよび太陽電池素子 AR コート膜の透過率から求めた光学損失

| $k$           | $L_{A(k)}$<br>(%) | $L_{B(k)}$<br>(%) | $L_{(k)}$<br>(%) |
|---------------|-------------------|-------------------|------------------|
| <i>Top</i>    | 3.3               | 1.3               | 4.6              |
| <i>Middle</i> | 4.7               | 1.0               | 5.6              |
| <i>Bottom</i> | 13.2              | 3.8               | 16.5             |
| <i>All</i>    | 7.6               | 2.2               | 9.6              |

光学損失は AM1.5D のスペクトルを使用して計算したものである。

光学損失  $L_{(top)}$ 、 $L_{(middle)}$ 、 $L_{(bottom)}$  は、それぞれ 4.6%、5.6%、16.5%であった。光学損失  $L_{(bottom)}$  は、 $L_{(top)}$ 、 $L_{(middle)}$  より大きい。これは、レンズ材料である PMMA において、ボトムセルの吸収波長に当たる波長 1160nm 付近に吸収帯が存在するためである。一方、トップセルおよびミドルセルの吸収波長 400~885nm では、波長 885nm 付近に小さな吸収がある以外に吸収はない。

2次光学系(レンズまたはホモジナイザ)を持つ CPV モジュールの光学損失を計算した報告例[7-11]では、1次レンズの光学損失は 10~13%、1次レンズと2次光学系のトータルの光学損失は 14~20%である。本章モジュールと上記報告例の光学損失を比較すると、本章モジュールのレンズの光学損失  $L_{A(all)}=7.6\%$  は、上記報告例よりも小さい値である。また、本章モジュールのトータルの光学損失  $L_{(all)}=9.6\%$  も、上記報告例のトータルの光学損失 14~20%(この損失には本章モジュールでの  $L_{B(all)}$  を含んでいない)よりも十分小さい値となっている。

光学損失は屈折率の異なる光学材料間の界面で発生する。本章の薄型 CPV モジュールは、図 4-2 で示したように、PMMA/接着剤/ガラス板あるいはガラス板/接着剤/太陽電池素子の界面が存在し、接着剤/太陽電池素子を除く、これらの界面の屈折率差は 0.11 以内に収まっている。一方、2次光学系を有する CPV モジュールでは、CPV モジュール内でレンズ/空気あるいは2次光学系/空気の界面があり、界面での屈折率差は 0.4~0.5 程度ある。本章の薄型 CPV モジュールの光学損失が2次光学系を有する CPV モジュールよりも小さいのは、本章の薄型 CPV モジュールのモジュール内の屈折率差が2次光学系を持つ CPV モジュールよりも小さくできるためである。

本章の薄型 CPV モジュールは光学損失が小さいので、光学損失以外のモジュール化損失についても小さくすることができれば、さらに高い変換効率を出すことが期待できる。そこで、光学損失以外のモジュール化損失について考察する。本章の薄型 CPV モジュールの光学損失以外のモジュール化損失は、モジュール化損失 16.3%からレンズの光学損失  $L_{A(all)}7.6$  を引いた値 8.7%の損失である。これは、本章の薄型 CPV モジュールにおいて、光学損失以外の損失要因があることを意味している。この損失の主な要因

は、トップセルに照射される太陽光が均一ではないためだと考えられる。フラッシュテストにより太陽電池素子を測定する場合は、素子上に均一な光が照射されるが、本章の薄型CPVモジュールを太陽光により測定を行う場合は、ホモジナイザのような集光領域の光強度分布を均一化する2次光学系がないので、受光面上に照射される太陽光は均一にならない。そのため、本章の薄型CPVモジュールの変換効率は、フラッシュテストで評価した太陽電池素子の変換効率よりも低下する。本章のモジュールにおける効率の低下は、一般的なCPVモジュールで発生する色収差による不均一照射(トップ、ミドル、ボトム)の各セルで照射サイズに差が生じること)によるのではなく、トップセルへの太陽光の不均一照射によって生じる、トップセルのエミッタ層での局所的な電流密度の増加が原因である。

第3章では、トップセルの集光領域を拡大することで、トップセルでの抵抗損失を低減することができることを明らかにした。光学損失以外のモジュール化損失が8.7%存在することは、トップセルの集光領域を拡大したとしても、トップセルの集光領域の光強度が均一でないため、トップセルの抵抗損失を十分に低減できていないことを示している。この抵抗損失8.7%は、FFの低下に影響を与えていると考えられる。ただし、図4-8(b)に示した本章の薄型CPVモジュールのFFの数値0.83~0.85は、2次光学系を持つ従来CPVモジュールで報告されている値とほぼ同程度である[4, 12-14]。CPVモジュールでは、集光倍率が大きくなるほど、抵抗損失が大きくなり、FFは低下する[15]。本章の薄型CPVモジュールでは、FF改善のため太陽電池素子の受光面を拡大しており、集光倍率は150倍と通常のCPVモジュールよりも低く設定している。本章の薄型CPVモジュールのFFが、集光領域の光強度分布が不均一にもかかわらず、2次光学系を持つ従来のCPVモジュールで報告されている値とほぼ同程度となったのは、集光倍率が低いためだと考えられる。FFをさらに向上させていくためには、グリッド電極の形状やピッチの最適化を行っていく必要がある。

本章では、集光倍率150倍の薄型CPVモジュールで高い変換効率が得られることを実証した。今後、薄型CPVモジュールの実用化を進めるためには、モジュールコストも考慮し、より高い集光倍率に移行していくことが不可欠となる。また、第2章~本章の薄型CPVモジュールは、レンズ表面から太陽電池素子までの間に空洞がなく、光学損失を非常に小さくできる一方で、太陽光が通過する領域がすべてPMMAやガラスなどの透明部材となっており、重量の増加や材料費増大の原因ともなっている。第5章では、薄型CPVモジュールの重量や材料費の課題を含め、薄型・軽量CPVモジュールの実用化について検討を行う。

#### 4-6 まとめ

本章では、微小太陽電池素子を用いた薄型CPVモジュールにおいて、どこまでの変換効率が得られるか明らかにするため、第3章で評価したCPVモジュールよりも太陽電池素子の受光面、トップセルの集光領域ともに拡大した薄型CPVモジュールを試作し、FF、変換効率の向上を試みた。様々な直達日射量と太陽光スペクトルにより、薄型CPVモジュールの性能実証を行い、カレントマッチする条件において、37.1%と高い変換効率が得られることを明らかにした。

また、薄型CPVモジュールで高い変換効率が得られる要因を明らかにするため、モジュール化損失の解析を行った。その結果、本章のCPVモジュールは、従来のCPVモジュールとは異なり、凸レンズ表面から太陽電池素子までの間に光学部材と空気との界面がなく、界面反射による光学損失を小さくできることが、高い効率が得られる要因であることがわかった。ただし、本章のCPVモジュールでは、光学損失を除くモジュール化損失が8.7%あることも明らかとなった。この損失の主な要因は、トップセルに照射される太陽光の強度分布が均一ではなく、トップセルのエミッタ層において、局所的に電流密度が増加しているためと考えられる。今後、グリッド電極の設計最適化などにより、トップセルのエミッタ層からグリッド電極に至る領域の抵抗を低減し、FFの改善を行っていく必要がある。

本章では、集光倍率150倍の薄型CPVモジュールにおいて、高い変換効率を実証したが、今後、薄型CPVモジュールの実用化を進めるためには、モジュールコストも考慮し、より高い集光倍率に移行していくこと不可欠となる。また、第2章～本章の薄型CPVモジュールは、レンズ表面から太陽電池素子までの間に空洞がなく、光学損失を非常に小さくできる一方で、太陽光が通過する領域がすべてPMMAやガラスなどの透明部材となっており、重量の増加や材料費増大の原因ともなっている。第5章では、薄型CPVモジュールの重量や材料費の課題を含め、薄型・軽量CPVモジュールの実用化について検討を行う。

## 参考文献

- [1] D. R. Myers, K. Emery, and C. Gueymard, "Terrestrial solar spectral modeling tools and applications for photovoltaic devices," *29th Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 1683-1686, 2002.
- [2] W. E. McMahon, K. E. Emery, D. J. Friedman, L. Ottoson, M. S. Young, J. S. Ward, C. M. Kramer, A. Duda and S. Kurtz, "Fill factor as a probe of current-matching for GaInP<sub>2</sub>/GaAs tandem cells in a concentrator system during outdoor operation," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol.16, pp. 213–224, 2008.
- [3] G. K. Sharma, M. K. Bhardwaj and D. Upadhyay, "Highly Efficient Renewable Integrated Hybrid Energy System (Solar, Wind, PV, Hydrogen, Fuel Cell)," *International Journal of Advances in Electrical and Electronics Engineering*, pp. 112-122, 2012
- [4] M. Hernández, J. Vilaplana, R. Mohedano, P. Benítez, P. Zamora, J. C. Miñano, A. Cvetkovic, W. Shatford and S. Sorgato, "Maximizing the efficiency of a 4-cell FK module," *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1616, pp. 191-195, 2014
- [5] X. Sheng, C. A. Bower, S. Bonafede, J. W. Wilson, B. Fisher, M. Meitl, H. Yuen, S. Wang, L. Shen, A. R. Banks, C. J. Corcoran, R. G. Nuzzo, S. Burroughs and J. A. Rogers, "Printing-based assembly of quadruple-junction four-terminal microscale solar cells and their use in high-efficiency modules," *Nature materials*, vol.13, pp. 593-598, 2014
- [6] M. Steiner, A. Bösch, A. Dilger, F. Dimroth, T. Dörsam, M. Müller, T. Hornung, G. Siefert, M. Wiesenfarth and A. W. Bett, "FLATCON® CPV module with 36.7% efficiency equipped with four - junction solar cells," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol.23, pp. 1323-1329, 2015.
- [7] W. Jang, S. J. Kim, D. Lee, K. Lee, Y. Kim, A. Park, Y. Park, and J. H. Lee, "Design of partitioned linear Fresnel lens for medium-concentrated PV and its performance," *AIP Conference Proceedings*, vol.1616, pp. 67–71, 2014.
- [8] P. Zamora, R. Mohedano, P. Benítez, J. C. Miñano, A. Cvetkovic, M. Buljan, and J. Chaves, "A highperformance photovoltaic concentrator," *SPIE Newsroom*, 2010, doi: 10.1117/2.1201008.003105.
- [9] E. Brinksmeier, A. Gessenharter, D. Pérez, J. Blen, P. Benítez, V. Díaz, and J. Alonso, "Design and manufacture of aspheric lenses for novel high efficient photovoltaic concentrator modules," *3rd International Workshop on CPV Session II*, pp.20-22, 2010.

- [10] M. Victoria, C. Domínguez, I. Antón, and G. Sala, "Comparative analysis of different secondary optical elements for aspheric primary lenses," *Opt. Express*, vol.17, pp. 6487–6492, 2009.
- [11] L. Fu, R. Leutz, and H. Philipp Annen, "Evaluation and comparison of different designs and materials for Fresnel lens-based solar concentrators," *Proc. of SPIE*, vol.8124, e81240E, 2011.
- [12] P. Zamora, P. Benítez, R. Mohedano, A. Cvetković, J. Vilaplana, Y. Li, M. Hernández, J. Chaves, and J. C. Miñano, "Experimental characterization of Fresnel-Köhler concentrators," *J. Photon. Energy.*, vol.2, e021806, 2012.
- [13] L. Pozzetti, M. Musio, D. Vincenzi, C. Musio, S. Baricordi, and A. Damiano, "A novel cassegrain-type concentrator photovoltaic module: design, prototyping and characterization," *27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition.*, pp. 239–243, 2012.
- [14] G. Peharz, J. P. Ferrer Rodríguez, G. Siefer, and A. W. Bett, "Investigations on the temperature dependence of CPV modules equipped with triple-junction solar cells," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol.19, pp. 54–60, 2011.
- [15] J. F. Geisz et al., "40.8% efficient inverted triple-junction solar cell with two independently metamorphic junctions," *Applied Physics Letters*, vol.93, e123505, 2008

## 第5章 薄型・軽量CPVモジュールの実用化

### 5-1 はじめに

第2章～第4章において、微小太陽電池素子を用いた薄型CPVモジュールは、従来のCPVモジュールと比較して、光学損失を小さくでき、トップセルの集光領域を拡大することにより高い変換効率が得られることを、モノモジュール（複数のレンズ、太陽電池素子で構成されるCPVモジュール内の素子1個分）を用いた評価によって実証してきた。光学損失を小さくできる主な要因は、レンズ表面から太陽電池素子までの間に空洞がなく、反射による損失を小さくできることにある。ただし、太陽光が通過する領域がすべてPMMAやガラスなどの透明部材となっているため、重量の増加や材料費増大の原因ともなっていた。

NEDOの太陽光発電ロードマップ(PV2030+)におけるコスト目標(図5-1)は、2020年に14円/kWh、2030年に7円/kWhと定められている[1]。第2章～第4章では、高い変換効率を目指し、薄型CPVモジュールの特性解析と性能実証を行ってきたが、本章では、次のステップとして、薄型CPVモジュールの低コスト化、軽量化を重視した実用化検討を行った。

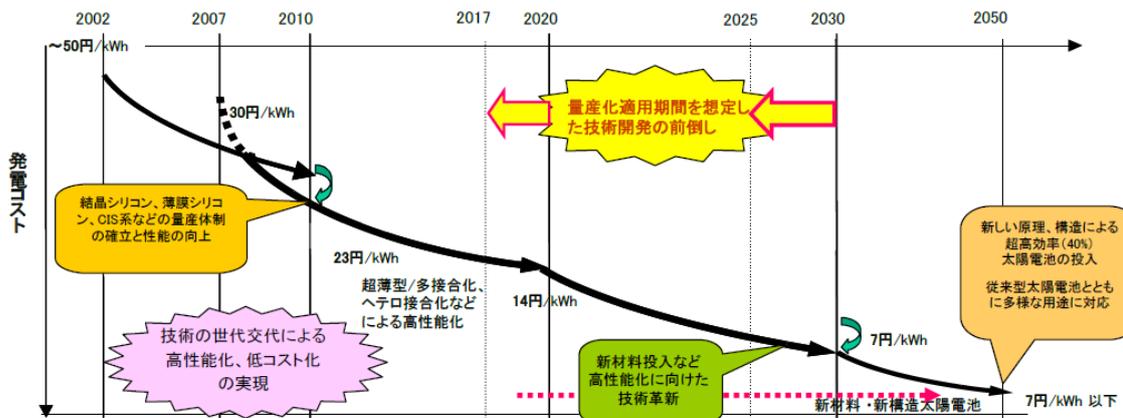


図5-1 太陽光発電ロードマップ(PV2030+) [1]

PV2030+はNEDOにより2009年に策定された。

まず、第2章～第4章までと本章と変更点を述べる。本章のモジュールでは、低コスト化のため、レンズサイズを拡大し、集光倍率を高めることにした。しかし、前章までの光学系に空洞がないモジュールでは、レンズサイズを拡大すると、モジュール重量と部材費が増加してしまう。そこで、モジュールの低コスト化と軽量化のため、ある程度の光学損失を許容し、CPVモジュール内に1次レンズと2次レンズを設け、1次レン

ズと2次レンズの間に空洞を設けた。この空洞を設けることによる光学損失の増大は、レンズ表面にARコートを行うことによって補うこととした。また、低コスト化、軽量化のため、多くの部材をプラスチック化することを試みた。ただし、第2章～第4章までの、レンズ寸法、焦点距離、太陽電池素子を従来のCPVモジュールの約1/10とする薄型CPVモジュールの基本構造はそのまま踏襲した。また、トップセルの集光領域を拡大することにより、FFを向上させる光学設計についてもそのまま踏襲した。

薄型CPVモジュールでは、レンズ寸法、太陽電池素子を従来のCPVモジュールの約1/10とするため、従来のCPVモジュールと比較すると、同じ面積あたり、より多数の太陽電池素子が必要となり(図1-12参照)、多数の微小素子を集光位置に精度よく実装する必要がある。さらに、太陽電池は、低コストで製造することが強く要求される。そのため、この多数の微小素子実装が薄型CPVモジュールを実現する上での課題となっていた。第2章では、接着剤として使用するシリコーン樹脂の表面張力を利用した自己整合法(FSA法)[2-5]により微小太陽電池素子が精度良くレンズの焦点位置に実装できることを実証した(図2-7(c)参照)。ただし、この方法ではフォトリソグラフィーなど製造コストが高い工程が必要であった。そこで本章では、現在広く普及している表面実装技術(surface-mounting technology : SMT)と、溶融半田の表面張力を利用した自己整合法を組み合わせ、低コスト・量産化に適した太陽電池素子の実装法を開発した。

第2章～第4章までは、素子およびモジュールの解析・基本性能の実証を目的としていたので、複数の素子による特性ばらつきの影響を排除するため、太陽電池特性の評価はすべてモノモジュールで行ってきた。本章では、CPVモジュールの実用化を検討するため、モジュール内のすべての太陽電池素子は直列、並列で接続し、CPVモジュール全体で太陽電池特性の評価を行った。

以上、本章では、第2章～第4章の成果を踏まえ、薄型・軽量CPVモジュールの低コスト化、実用化について検討を行ったので、その内容について述べる。

## 5-2 薄型・軽量CPVモジュールの構造

図5-2(a)に、本章で作製した薄型・軽量CPVモジュールの模式図を示す。CPVモジュールは、1次レンズアレイ、2次レンズアレイ、太陽電池素子を実装した透明回路基板、アルミ製放熱板から構成されている。モジュールの軽量化と部材費削減のため、1次レンズアレイと2次レンズアレイの間には空洞が設けられている。

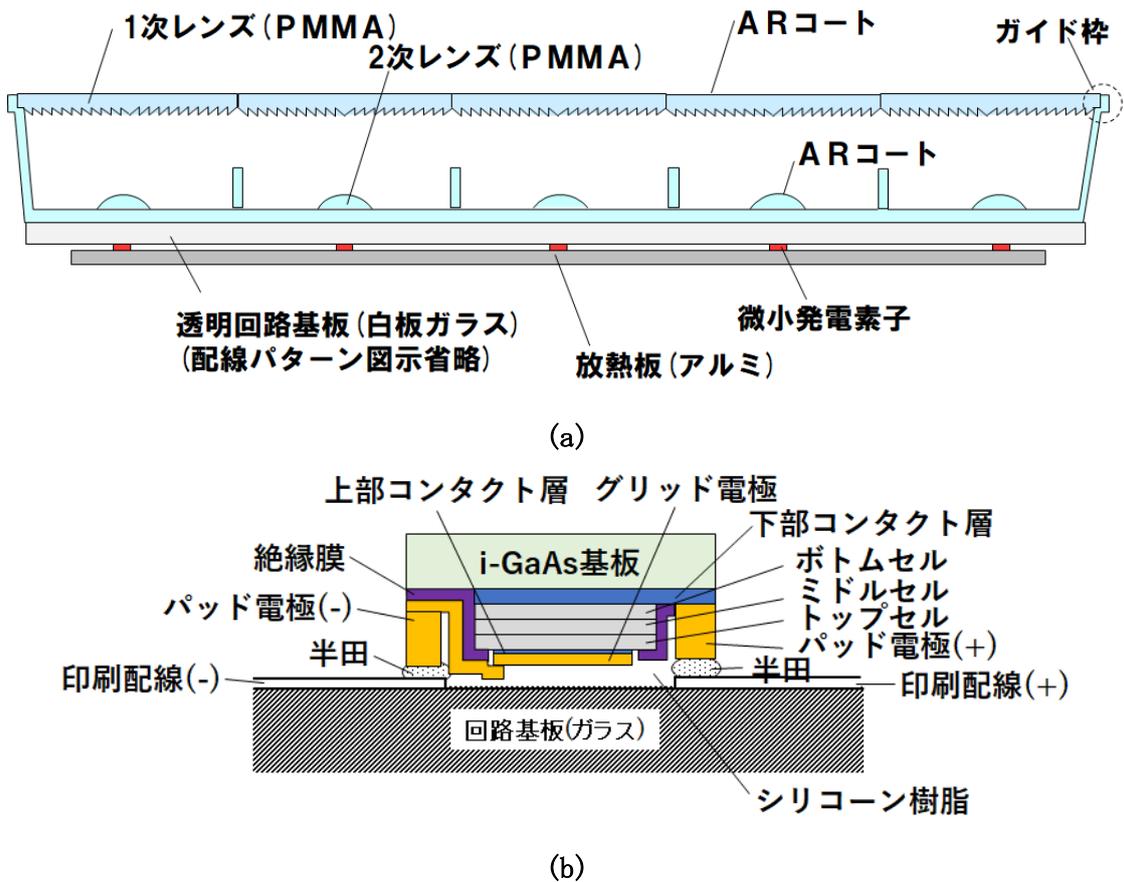


図5-2 薄型・軽量CPVモジュールの構造

(a) 薄型・軽量CPVモジュールの断面模式図

(b) 透明回路基板上に実装した太陽電池素子の断面図

1次レンズは22輪帯のフレネルレンズ、2次レンズは凸レンズであり、ともにPMM Aの射出成型により作製されている。射出成型は、温度および湿度を精密に制御した環境で行っており、1次レンズアレイ、2次レンズアレイともに数 $\mu\text{m}$ の寸法精度で作製されている。また、2次レンズアレイは箱型の形状をしており、1次レンズアレイは、2次レンズアレイの上部に設けたガイド枠に、嵌合によって取り付けられている。この

嵌合によって、1次レンズアレイと2次レンズアレイの光軸は、アライメントを行うことなく、数 $\mu\text{m}$ の精度で合わせることができ、低コストで簡単な組立ができるようになっている。

透明回路基板は、集光した高密度の太陽光が通過する部分である。したがって、耐光性を考慮して、厚みが3mmのガラス板により作製されている。また、レンズと空気との界面反射による光学損失を抑えるため、1次レンズアレイの平坦面と2次レンズの表面にARコートが形成されている。

図5-2(b)に、透明回路基板上に実装した太陽電池素子の断面図を示す。太陽電池素子のパッド電極は、透明回路基板の印刷配線に半田により接続されている。太陽電池素子と透明回路基板のすき間は、反射による光学損失を低減するため、透明充填剤としてシリコン樹脂が充填されている。

集光倍率は、コスト削減のため、第4章よりも大きく設定した。太陽電池素子は、第4章と同じ素子(図4-3参照)を使用したため、受光面のサイズには変化はないが、1次レンズのサイズを、第4章の10mm角から22mm角に広げることにより、集光倍率を増加させている。集光倍率(レンズ面積/受光面の面積比)は、受光面の面積を八角形の $0.762\text{mm}^2$ として計算すると720倍となっている。

本章のCPVモジュールで2次レンズを設けた理由は、集光倍率を大きくするために、1次レンズのサイズを第2章~第4章のCPVモジュールよりも拡大したことにより、1次レンズだけでは、トップ、ミドル、ボトム、各セルの集光領域が太陽電池素子の受光面に入りきらなくなったためである。そこで、2次レンズを追加することで、トップ、ミドル、ボトム、各セルの集光領域が受光面内に入るように光学設計を行った。

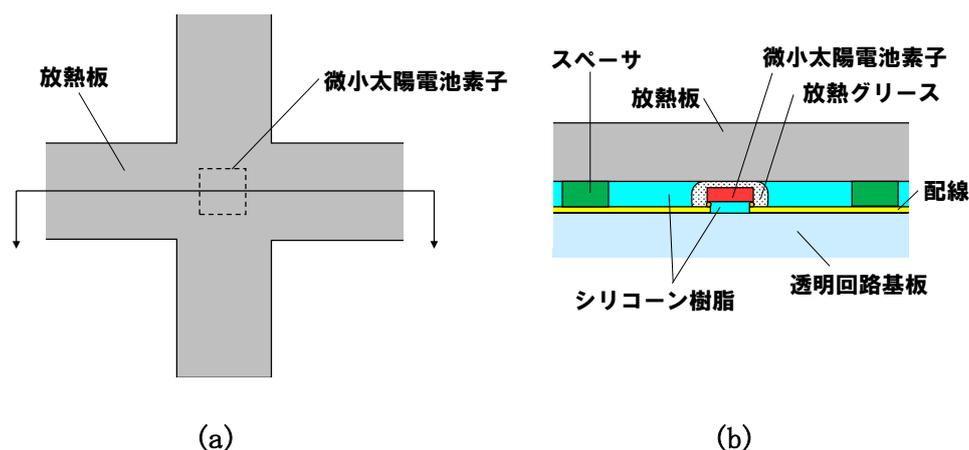


図5-3 放熱板と太陽電池素子の位置関係

- (a) 放熱板の形状(モジュール裏面から見た太陽電池素子周辺の拡大図)
- (b) 太陽電池素子周辺の断面模式図

放熱板には、軽量化を考慮し、格子状に加工したアルミ板を使用した。図5-3に示すように、太陽電池素子は、この格子状放熱板の交点部分に取り付けられている。放熱板の幅は2mm、厚みは1.5mmである。屋外でのモジュール発電時の放熱板温度は、モジュール底面全体を1.5mm厚のアルミ板で覆った場合とほぼ同じであり、アルミ板と比較して放熱能力には大きな差はないことを確認している。本モジュールの放熱板の最高温度は、測定を行った大阪府門真市において、1年間通して測定したピーク値として65°Cであった。本モジュールの熱伝導解析の結果、放熱板からの太陽電池素子の温度上昇は11°Cであり、本モジュールにおける太陽電池素子の最高温度は76°C程度となると考えられる。

### 5-3 自己整合法を利用した素子実装方法

薄型・軽量CPVモジュールの実用化を進めるためには、多数の微小太陽電池素子を回路基板上に精度良く実装することが必要である。また、その実装設備は、低コストで量産に適したものであることが必要である。そこで、すでに広く普及している表面実装技術(SMT)と、熔融半田の表面張力を利用した自己整合法を組み合わせ、微小太陽電池素子の実装を試みた。

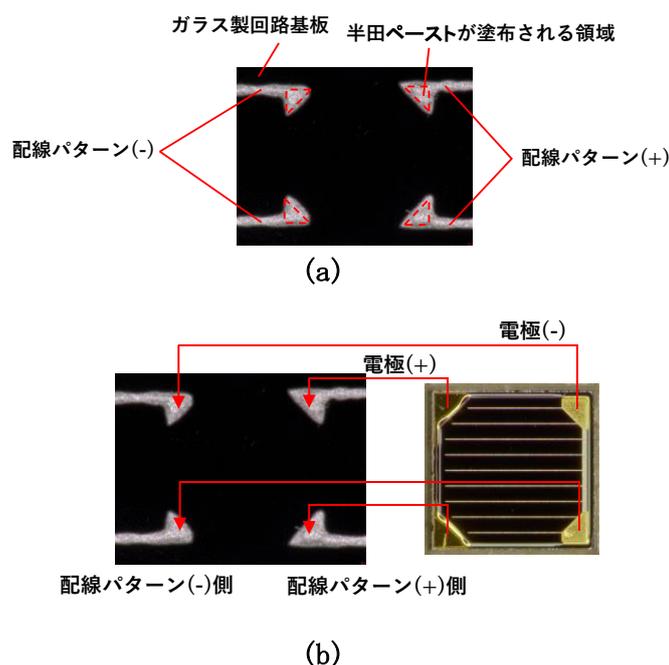


図5-4 透明回路基板上に印刷した配線パターンの光学顕微鏡写真

(a) ガラス製透明回路基板上の印刷パターン(太陽電池素子実装部)

配線パターンは銀ペーストのスクリーン印刷により形成した。赤色の破線で描いた三角形の領域は、以降の工程において、太陽電池素子を半田融着するために、半田ペーストを塗布するための場所を示す。

(b) 太陽電池素子実装時の太陽電池素子と回路基板との位置関係

太陽電池素子の電極を形成した面が回路基板と向き合うように実装する。太陽電池素子のパッド電極は、(+側)と(-側)を区別するため、(+側)は三角形、(-側)は台形としている。

最初に、本実装法に使用した透明回路基板について説明する。図5-4(a)に、透明回路基板上に印刷した配線パターンを示す。配線パターンは、銀ペーストのスクリーン印刷によって形成されている。配線パターンには、太陽電池素子を実装するために三角

形のパターンが形成されている。上記三角パターン上に塗布する半田ペーストを介して、太陽電池素子のパッド電極(+)、パッド電極(-)が、配線パターンの(+ )側、(- )側と、それぞれ、半田融着により接続される(図5-4(b))。

次に、透明回路基板の作製から太陽電池素子実装までの工程を示す。

(透明回路基板の作製から太陽電池素子実装までの工程)

- (1) ガラス基板上に、銀ペーストのスクリーン印刷を用い、配線パターンを形成する。
- (2) スクリーン印刷によって、Sn-Ag(3%)-Cu(0.5%)から成る半田ペースト層を図5-4(a)の赤い破線で示した領域に塗布する。
- (3) チップマウンターを使用して、透明回路基板上の赤い破線部と太陽電池素子のパッド電極どうしが合致するように、0.33秒/チップのスピードで太陽電池素子を実装する。
- (4) リフロー炉内で熱処理を行い、透明回路基板の配線パターン上に太陽電池素子を融着させる。この過程で、太陽電池素子は半田の表面張力により回路基板上の所定の位置に自己整合する。
- (5) 最後に、透明回路基板上に残っているフラックスを洗浄装置内で除去する。

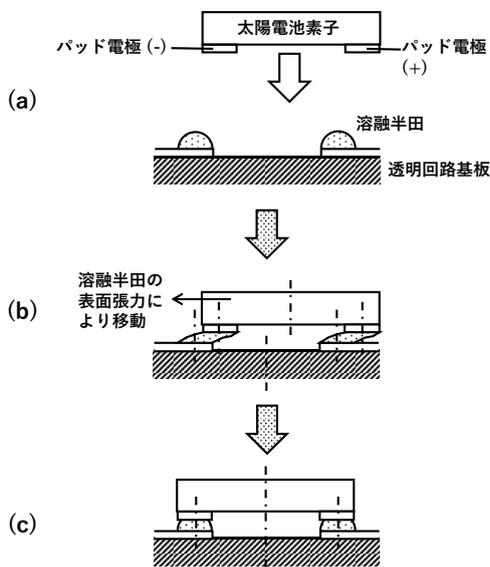


図5-5 溶融半田の表面張力を利用した太陽電池素子実装方法のメカニズム

今回の実装試験には一般的な実装装置を用いており、実装精度は自己整合法を用いない通常の実装方法で $\pm 30 \mu\text{m}$ である。透明回路基板の銀ペーストおよび半田の印刷精度は、実測値で約 $\pm 10 \mu\text{m}$ である。

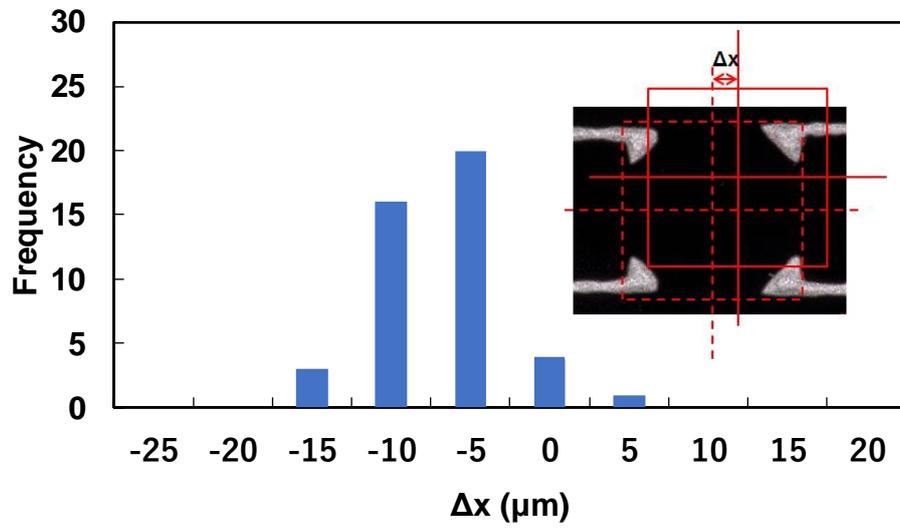
次に、透明回路基板上に塗布した溶融半田の表面張力を利用し、自己整合的に微小太陽電池素子を透明回路基板上に実装するための原理について述べる。図5-5に実装方法の原理を示す。

チップマウンターが、正しい実装位置からずれた位置に、太陽電池素子を置いた場合(図5-5(a))、太陽電池素子と透明回路基板の間に挟まれた状態になっている溶融半田(半田ペーストが溶融したもの)は、溶融半田自らの表面張力によって、溶融半田の表面積が最も小さくなるように形状を変形させ、太陽電池素子の位置を移動させる(図5-5(b))。その際、移動後の太陽電池素子の位置は、図5-4に示した破線三角形4箇所にある溶融半田の表面張力のバランスによって決まることになる。4箇所の溶融半田の量にばらつきがない場合、太陽電池素子4箇所のパッド電極の中心位置は、透明回路基板上の4箇所の溶融半田の中心位置に重なり合うようになり、結果的に、太陽電池素子は正しい設置位置に移動する(図5-5(c))。上記のメカニズムによって、チップマウンターにより太陽電池素子を回路基板上に設置する際に、素子の位置ずれがあった場合でも、容易に位置ずれを修正することが可能となる。

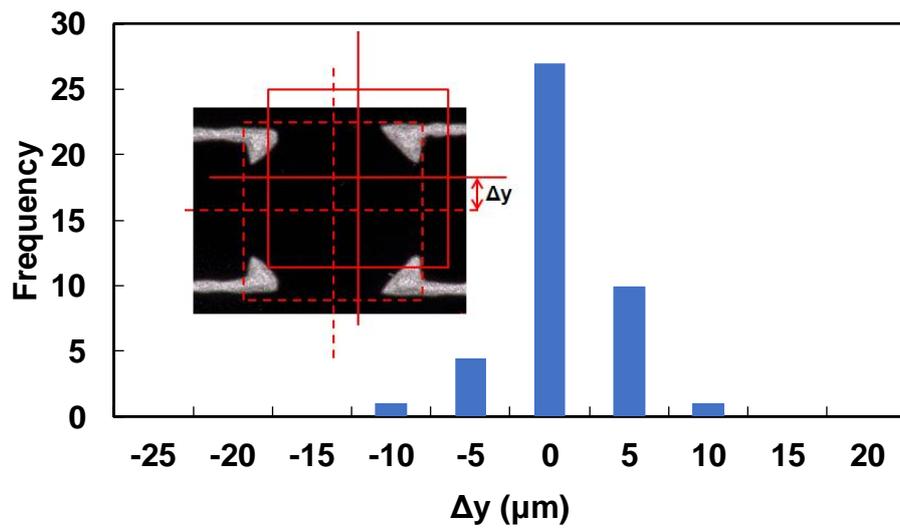
上記の方法によって透明回路基板上に実装した微小太陽電池素子について、光学顕微鏡により位置ずれ量を評価した。図5-6に、x軸方向およびy軸方向に対する位置ずれ量のヒストグラムを示す。ここで、印刷配線の(-)側から(+)側に向かう方向をx軸方向とする。x軸の法線方向をy軸とする。太陽電池素子は、x軸方向およびy軸方向に対して、 $\pm 10\mu\text{m}$ の位置精度で、正しい素子位置に実装できることがわかった。

この実装試験では、透明回路基板上の正しい実装位置から、意図的に $100\mu\text{m}$ 離れた場所に、太陽電池素子を設置した場合でも、太陽電池素子が正しい実装位置に移動できることを確認することができた。したがって、この溶融半田の表面張力を利用した実装方法を使用することで、一般的に広く用いられるチップマウンター(実装精度約 $30\mu\text{m}$ )を使用しても、実装精度 $\pm 10\mu\text{m}$ で太陽電池素子を実装することが可能となる。印刷配線の寸法ばらつきは $\pm 10\mu\text{m}$ 程度であったが、透明回路基板上の印刷プロセスを含む太陽電池素子の位置ずれ量も、 $\pm 10\mu\text{m}$ と同程度に収まっており、太陽電池素子の位置ずれは印刷配線の寸法ばらつきにはほぼ影響しないことがわかった。半田ペーストが塗布される4か所の三角形の印刷配線が寸法ずれを起こす場合、4か所とも同じ傾向で寸法ずれを起こすため(寸法ずれが大きくなる方向にずれた場合、4か所とも同程度に寸法が大きくなる)、太陽電池素子は4か所の三角形の中心位置に実装できる。

ところで、図5-6(a)のx軸方向のヒストグラムでは、太陽電池素子の位置ずれ量は、4つの三角形の中心位置より $5\sim 10\mu\text{m}$ ほどマイナス側にずれている。これは、図5-4(b)に示すように、太陽電池素子は、パッド電極(+)とパッド電極(-)を形状で区別できるようにするため、パッド電極(+)は三角形、パッド電極(-)は台形状になっており、太陽電池素子実装時に、パッド電極(+)側とパッド電極(-)側で溶融半田の表面積に差が生じたためであると考えられる。



(a)



(b)

図 5-6 微小太陽電池素子の位置ずれ量のヒストグラム

(a) x 軸方向(図の横方向)に対する位置ずれを示す

(b) y 軸方向(図の横方向)に対する位置ずれを示す

また、回路基板上の配線パターンを図5-7のように変更した場合、微小太陽電池素子の実装精度は $\pm 30 \mu\text{m}$ に低下した。実装精度が低下した原因は、以下のように考えることができる。図5-4の回路基板上の配線パターンでは、実装時に溶融した半田は三角の配線パターン内に留まるのに対し、図5-7の配線パターンでは、リフロー中に溶融半田は半田ペーストを塗布した場所(破線の三角形内)に留まらずに濡れ広がり、4箇所(+)の半田の表面積に差が生じるためと考えられる。実装精度を高めるためには、塗布した半田が溶融時に濡れ広がらないような配線パターンの形状にすることがポイントとなる。

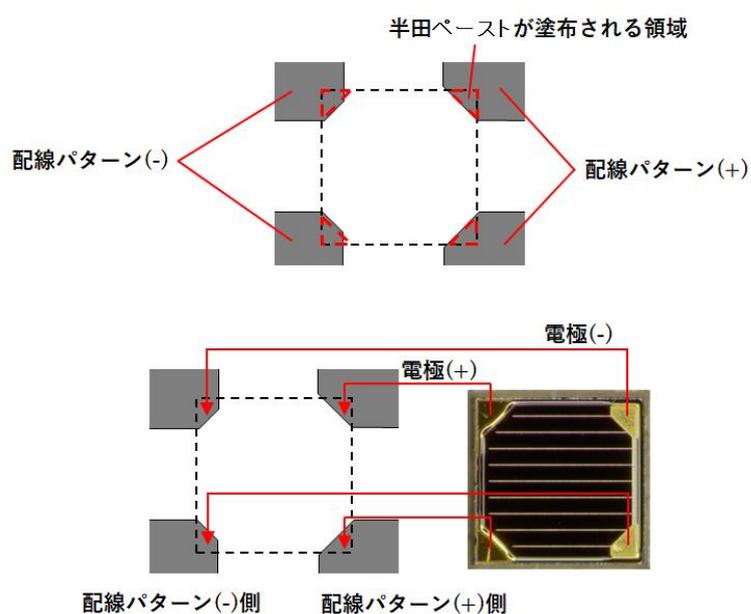


図5-7 実装精度が $\pm 30 \mu\text{m}$ に低下する配線パターンの一例

## 5-4 薄型・軽量CPVモジュールの作製方法

薄型・軽量CPVモジュールの組立工程について説明する(図5-8(a))。

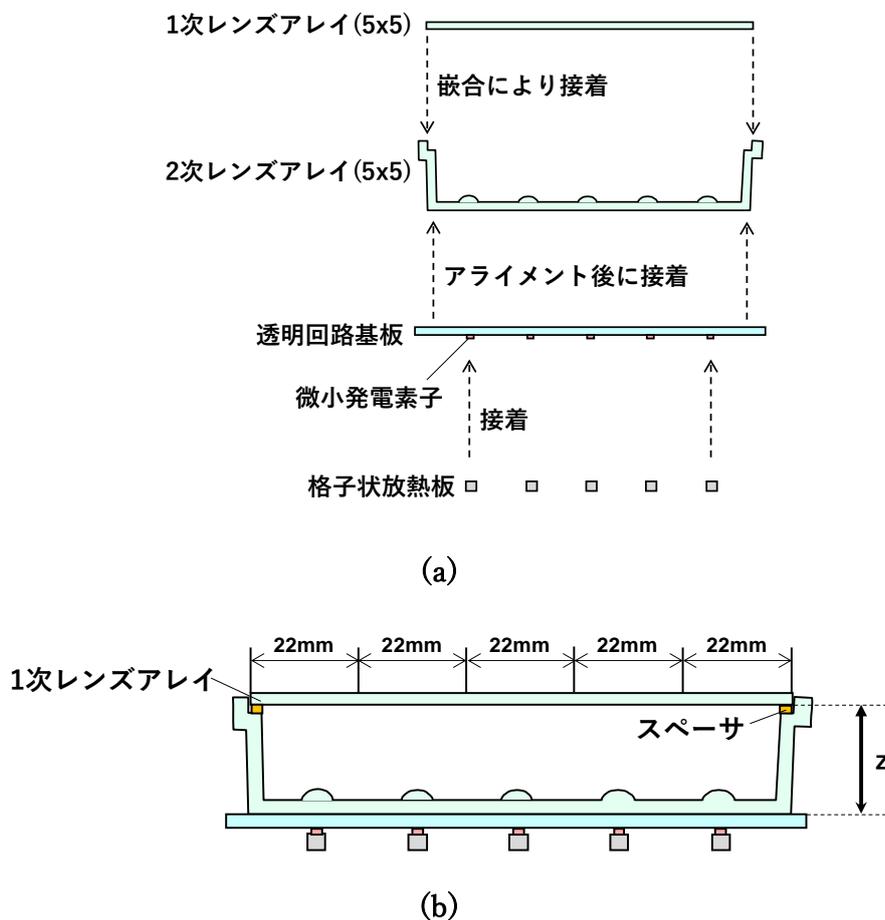


図5-8 薄型・軽量CPVモジュールの組立工程

(a) 薄型・軽量CPVモジュールの組立工程

(b) スペーサによる1次レンズアレイの高さ調整方法

(薄型・軽量CPVモジュールの組立工程)

- (1) 箱状の2次レンズアレイのガイド枠に1次レンズアレイを嵌め合わせ、可視光硬化の光硬化性接着剤により接着する。
- (2) 5-3で述べた工程により、透明回路基板上に印刷パターンを形成後、太陽電池素子を透明回路基板上に実装する。
- (3) シリコン樹脂を透明回路基板と実装した太陽電池素子の隙間に充填する。

- (4) 1次レンズ、2次レンズ、太陽電池素子の光軸が一致するように、透明回路基板と2次レンズアレイのアライメントを行った後、シリコン樹脂を用いて接着し、固定する。
- (5) 格子状のアルミ製放熱板を太陽電池素子上に取り付ける。放熱板の取り付け時、太陽電池素子上に放熱グリースを塗布し、アルミ製放熱板の格子の交点部分と太陽電池素子が一致するように、シリコン樹脂により透明回路基板とアルミ製放熱板を張り合わせる。太陽電池素子は放熱グリースを介して放熱板と接している。放熱板に外力がかかっても、太陽電池素子を保護できるように、透明回路基板と放熱板の間にスペーサを挿入する（図5-3(b)）。

本章のCPVモジュールでは、トップセルの集光サイズを微調整できるようにするため、1次レンズの高さを調整できるようにした。図5-8(b)にレンズ高さの調整方法を示す。1次レンズアレイと2次レンズアレイ間にスペーサを挟むことにより、1次レンズの位置を光軸方向に調整することができる。

図5-9(a)に、組立後の薄型・軽量CPVモジュールの外観写真を示す。モジュールの厚みは30mmである。第4章のCPVモジュールは、レンズ面積当たりのモジュール重量は $4.0\text{g}/\text{cm}^2$ であったが、本章のモジュールでは $2.0\text{g}/\text{cm}^2$ と、モジュール重量を半分に削減することができた。図5-9(b)に、透明回路基板上の太陽電池素子25個の接続状態を示す。25個の太陽電池素子は5直列-5並列に接続されている。また、太陽電池素子の保護用のバイパスダイオードや逆流防止用ダイオードは接続しなかった。

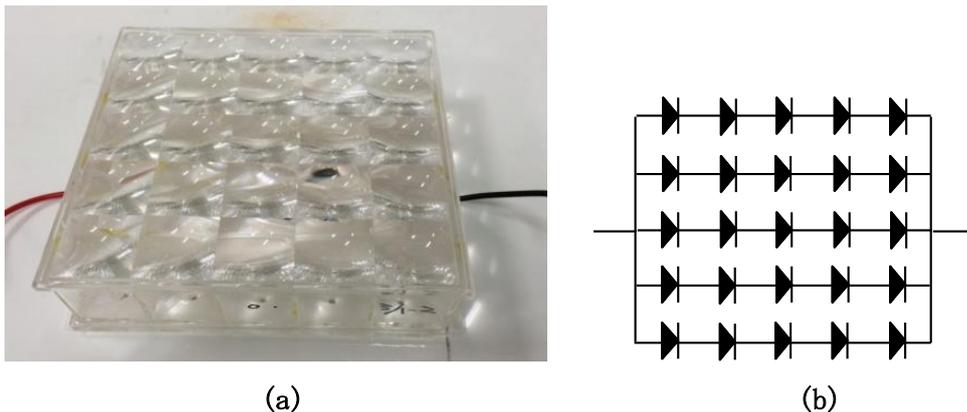


図5-9 薄型・軽量CPVモジュールの外観写真と素子配線図

(a) 薄型・軽量CPVモジュールの外観写真

(b) CPVモジュール内の太陽電池素子の配線状態

## 5-5 1次レンズ高さの最適化

第3章～第4章において、微小太陽電池素子を用いたCPVモジュールでは、トップセルの集光領域拡大により、高い変換効率が得られることが判明した。ここでは、受光面に対して、トップセルの集光領域をどの程度拡大する場合に最も高い性能が得られるか、その詳細を調べた。そのため、1次レンズ高さ $z$ を変えてトップセルの集光サイズを調整し、 $z$ 値と太陽電池特性の関係を評価した。また、その結果から、最も高い変換効率が得られる $z$ 値の最適値を求めた。ここで、 $z$ は、1次レンズの底面から透明回路基板の表面までの距離とする。

$z$ 値と太陽電池特性の関係を調べるために、テスト用のモノジュールを作製した。モノジュールの模式図を図5-10に示す。モノジュールは、1次レンズ、2次レンズ、ガラス板、太陽電池素子1個のみ実装したテスト基板から構成されている。1次レンズ、2次レンズは、1次レンズアレイ、2次レンズアレイから、レンズ1個分を切り出したものである。1次レンズは、XYZステージに固定し、 $x$ 軸、 $y$ 軸、 $z$ 軸を精密に調整ができるようになっている。テスト基板は、厚み1.5mmのアルミ板上にアルミナから成る絶縁膜を形成し、絶縁膜上に配線パターンを形成したものである。

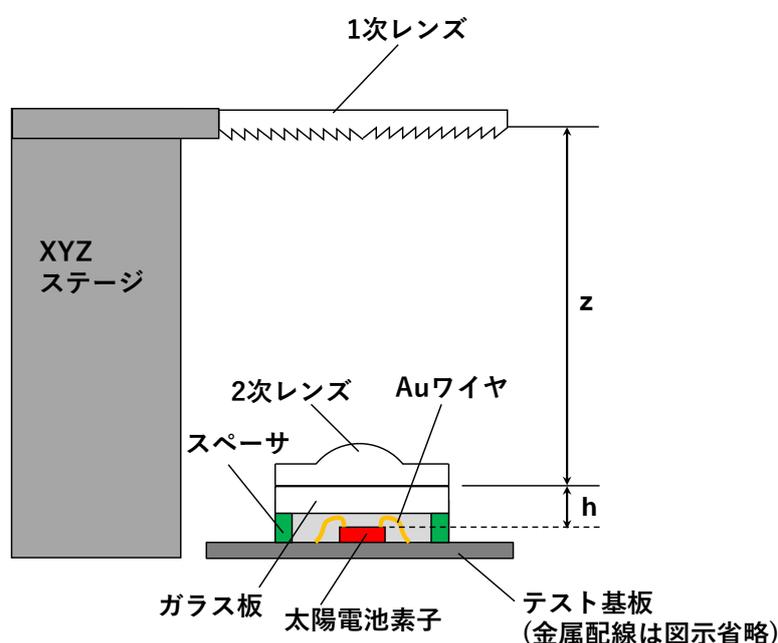


図5-10 1次レンズ高さ最適化のために作製したモノジュールの模式図

テスト用モノジュールは以下の工程で作製した。テスト基板上にシリコン接着剤により微小太陽電池素子を接着し、ワイヤーボンドにより太陽電池素子とテスト基板

を接続した。次に、テスト基板上に 0.5mm 厚のスペーサを取り付け、その上にガラス板を取り付けた。このガラス基板の厚みは、ガラス板の表面から太陽電池素子表面までの距離  $h$  が、図 5-2 (a) の CPV モジュールと等しくなるように調整したものである。次に、このテスト基板とガラス板の間にシリコン樹脂を充填した。最後に、2 次レンズが太陽電池素子の直上になるように、シリコン樹脂を用いて 2 次レンズとガラス板接着した。

次に、測定方法について述べる。まず、XYZ ステージの  $x$  軸、 $y$  軸を動かし、太陽電池素子の受光面の中心位置に、集光された照射光が来るように、1 次レンズの位置を調整した。その後、XYZ ステージの  $z$  軸を調整することにより  $z$  値を 0.1mm ずつ変更し、太陽電池特性を測定した。この測定には、ソーラーシミュレータ (山下電装 YSS-230 SRBCA-VS) を使用した。この装置は、キセノンランプを光源とした集光型太陽電池評価用のソーラーシミュレータであり、太陽光と同様に平行光を照射することができる (この装置の平行度 (視野角) は  $\pm 0.4^\circ$  であり、太陽光の  $\pm 0.25^\circ$  よりやや大きい)。照射光のスペクトルについては、トップセル、ミドルセル、ボトムセルの発電波長である、400nm ~ 665nm、665nm ~ 885nm、885 ~ 1350nm の波長領域に存在する光子数の比率が、AM1.5D のスペクトルと等しくなるように調整を行った。また、放射照度は、直達日射量  $765\text{W}/\text{m}^2$  の太陽光と等しくなるように調整した。I-V 特性の測定には、カーブトレーサー (アドバンテスト R6243) を使用した。測定は、 $25^\circ\text{C}$  に温度調整したアルミ板にテスト基板を取り付けて行った。また、1 次レンズおよび 2 次レンズには、AR コートは行わなかった。

太陽電池特性 ( $I_{sc}$ 、 $V_{oc}$ 、FF、 $P_{max}$ ) の  $z$  値依存性を図 5-11 に示す。 $P_{max}$  の最大値は、 $z=28.3\sim 28.5\text{mm}$  の時に得られた。したがって、 $z$  値の最適値は  $z=28.4\text{mm}$  と決定した。この時の  $I_{sc}$  は  $34.9\text{mA}$  であった。一方、 $I_{sc}$  の最大値は、 $z=28.0\sim 28.3\text{mm}$  の時に得られており、 $P_{max}$  の最大値となる  $z=28.3\sim 28.5\text{mm}$  とは一致しなかった。 $P_{max}$  が最大値となる時の  $I_{sc}$  は、 $I_{sc}$  の最大値より 1% 小さい。

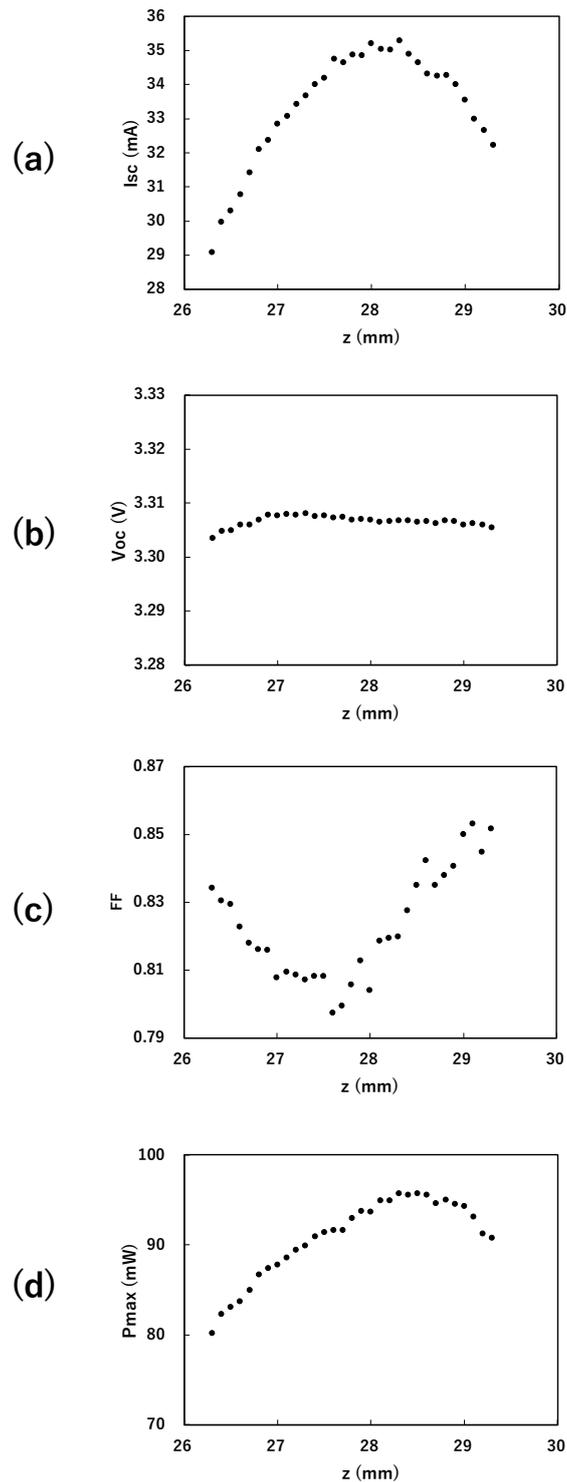


図5-11  $I_{sc}$ 、 $V_{oc}$ 、FF、 $P_{max}$  の  $z$  値依存性

(a)、(b)、(c)、(d)は、それぞれ、 $I_{sc}$ 、 $V_{oc}$ 、FF、 $P_{max}$  の  $z$  値依存性を示す。  
測定はモノモジュールのテスト基板を 25°C のアルミ板に密着させて行った。

$z=28.3\sim 28.5\text{mm}$  において、 $P_{\text{max}}$  が最大値となる理由を考察する。

まず、 $I_{\text{sc}}$  について考察する。本章の CPV モジュールはホモジナイザーを使用していないので、レンズの色収差のため、照射光の波長によって焦点位置が変化する。そのため、各波長の焦点位置と太陽電池素子の受光面の位置関係によって、太陽電池素子に照射される集光領域のサイズが変化する。図 5-12 に、焦点位置付近の照射光と受光面の位置関係を示す。

受光面が  $Z_2$  にある場合、 $I_{\text{sc}}$  は最大値となる ( $z=28.0\sim 28.3\text{mm}$ )。この場合、トップセルの波長帯の焦点位置は受光面よりも上に、ボトムセルの波長帯の焦点位置は受光面よりも下に位置している。光線追跡によるシミュレーション (ZEMAX) の結果により、発電に寄与するすべての波長で、集光領域が受光面からはみ出さない状態となっていることを確認している。受光面が  $Z_1$  よりもレンズ寄りの位置にある場合 (図 5-12 において受光面が  $Z_1$  よりも上にある場合)、ボトムセルの集光領域が受光面からはみ出すため、 $I_{\text{sc}}$  は減少する。

同様に、受光面が  $Z_3$  よりもレンズより遠ざかる位置にある場合 (図 5-12 において受光面が  $Z_3$  よりも下にある場合)、トップセルの集光領域が受光面からはみ出すため、 $I_{\text{sc}}$  は減少する。前述の通り、 $P_{\text{max}}$  が最大値となる場合 ( $z=28.3\sim 28.5\text{mm}$ )、 $I_{\text{sc}}$  は最大値よりも 1% 低下する。この時、トップセルの集光領域の一部が受光面よりはみ出しはじめた状態にあり、受光面の位置は、 $Z_3$  よりレンズからやや遠ざかった位置  $Z_3'$  にある。(補足：3 接合太陽電池素子では、トップ、ミドル、ボトム、各セルのフォトカレントが極力等しくなるように設計されているが、実際の発電時には、その時の太陽光スペクトルにより、各セルのフォトカレントは様々に変化する。しかし、本考察では、考察を容易にするため、トップ、ミドル、ボトム、各セルのフォトカレントは同じになると仮定している)。

次に、FF について考察する。第 3 章において、素子サイズが 1mm 角以下の微小太陽電池素子を使用する薄型 CPV モジュールでは、従来の CPV モジュールで報告される、レンズの色収差、コマ収差による FF の低下は発生せず、トップセルの集光領域のサイズが FF の挙動に最も影響を与えていることを示した。このトップセルの集光領域のサイズに着目すると、受光面が図 5-12 の  $Z_4$  の位置 ( $z=27.6\sim 28.0\text{mm}$ ) にある場合に、トップセルの集光サイズは最小となり、FF は最小値となる。受光面が  $Z_4$  からレンズに近づく場合も遠ざかる場合も ( $z$  値が  $27.6\sim 28.0\text{mm}$  よりも大きくなる場合も小さくなる場合も)、トップセルの集光領域は拡大していくため、FF は増加する。

$P_{\text{max}}$  は  $I_{\text{sc}} \times V_{\text{oc}} \times \text{FF}$  で表すことができるが、図 5-11 (b) に示すように、 $V_{\text{oc}}$  は  $z$  値によってほとんど変化しないので、事実上、 $P_{\text{max}}$  は  $I_{\text{sc}}$  と FF の積の挙動として考察することができる。受光面が  $Z_3$  よりもレンズより遠ざかる位置にある場合 (図 5-12 において受光面が  $Z_3$  よりも下にある場合)、 $I_{\text{sc}}$  は緩やかに減少率が増加しながら減少し、FF はほぼリニアに増加する領域にある。受光面が  $Z_3'$  にある場合 ( $I_{\text{sc}}$  が最大値よ

りも1%小さくなる  $z=28.3\sim 28.5\text{mm}$ )において  $P_{\text{max}}$  が最大値となる理由は、受光面が  $Z_3'$  の位置にある場合に  $I_{\text{sc}}$  と  $\text{FF}$  の積が最大となるためと説明できる。以上のように、微小太陽電池素子を用いたCPVモジュールでは、トップセルの集光サイズが、受光面からややはみ出す状態の場合に、最も高い変換効率が得られることがわかる。

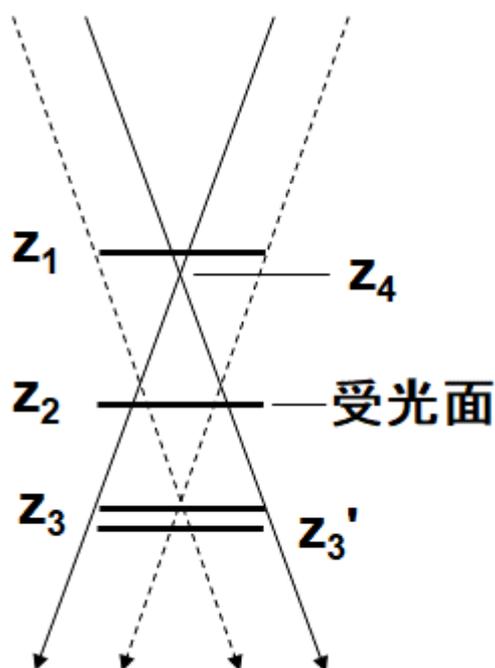


図5-12 焦点位置付近の照射光と太陽電池素子受光面の位置関係を示す模式図

実線の矢印はトップセルで吸収される波長帯の太陽光を、破線の矢印はボトムセルで吸収される波長帯の太陽光を示す。図の上側がレンズ側である。 $Z_2$  は  $I_{\text{sc}}$  が最大値となる受光面位置 ( $z=28.0\sim 28.3\text{mm}$ ) を示す。 $Z_1$  は、受光面がレンズ側に移動する場合に、ボトムセルの集光領域が受光面よりはみ出し始める受光面位置、 $Z_3$  は、受光面がレンズと反対側に移動する場合に、トップセルの集光領域が受光面よりはみ出し始める受光面位置を示す。 $Z_3'$  は  $P_{\text{max}}$  が最大値となる受光面位置 ( $z=28.3\sim 28.5\text{mm}$ ) を示す。 $Z_4$  はトップセルの集光領域のサイズが最小となる受光面位置 ( $z=27.6\sim 28.0\text{mm}$ ) を示す。

## 5-6 薄型・軽量CPVモジュールの太陽電池特性

図5-13に、 $P_{max}$ が最大値となる $z=28.4\text{mm}$ に調整した薄型・軽量CPVモジュールのソーラーシミュレータおよび屋外で測定した太陽電池特性を示す。

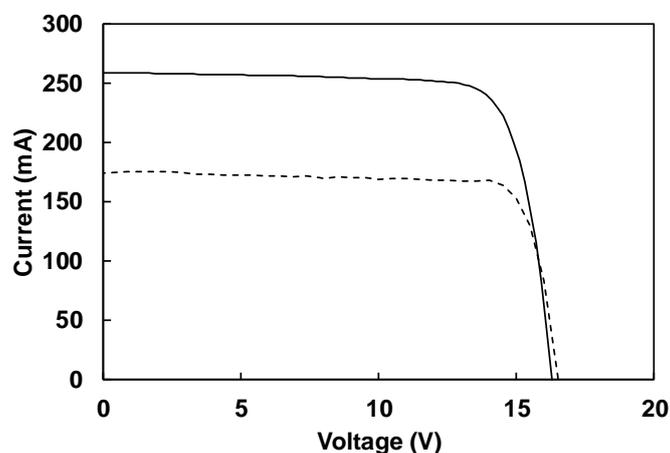


図5-13 薄型・軽量CPVモジュールのI-V特性

実線は屋外測定の実験データである。屋外測定で使用するCPVモジュールでは、1次レンズアレイの平坦面、2次レンズアレイ表面にARコートを行った。測定日は2016年3月17日 11:19、測定場所は大阪府門真市である。破線はソーラーシミュレータで測定したデータを示している。ソーラーシミュレータで測定したCPVモジュールでは、図5-11の測定結果と比較するため、ARコートを行っていない。

まず、作製したCPVモジュールが、本章で示したモジュール組立方法および素子実装方法で設計通りに作製できているかを調べるため、ソーラーシミュレータを用いて太陽電池特性の評価・解析を行った。

図5-13の破線に、ソーラーシミュレータで測定した時のI-V特性を示す。ソーラーシミュレータの照度は、図5-11の測定時と同様 $765\text{W}/\text{m}^2$ に調整した。I-V特性の測定には、カーブトレーサー（アドバンテスト R6243）を使用した。モジュールは $25^\circ\text{C}$ に調整したアルミ板に取り付け、測定を行った。また、図5-11の結果と比較するため、図5-10のテスト用モノモジュールと同じく、使用したCPVモジュールにはARコートを行わなかった。

ソーラーシミュレータでの測定結果を示す。ソーラーシミュレータでの $I_{sc}$ は $175\text{mA}$ であった。このモジュールでは、図5-9(b)に示したように、5個の太陽電池素子を直列で配線した直列部が5か所あり、さらにこの5個の直列部が並列に接続された配線となっている。図5-11の結果から考察すると、試作したCPVモジュール内の25

個の太陽電池素子に位置ずれなく、太陽電池素子受光面に太陽光が照射されているとすれば、いずれの直列部でも、図5-11において $P_{max}$ で最大値が得られた時の34.9mAの $I_{sc}$ が流れるはずである。したがって、直列部5か所を並列に接続したモジュール全体では、34.9mAの5倍である174.5mAの $I_{sc}$ が流れるはずである。もし、25個の太陽電池素子中の1素子でも、集光領域の位置ずれが発生したとすると、 $I_{sc}$ は174.5mAよりも小さくなるはずである。しかし、図5-13に示すように、実際のCPVモジュールの $I_{sc}$ は175mAであり、上述の174.5mAと誤差範囲内で一致している。この結果は、試作したCPVモジュール内の25個の太陽電池素子すべてに、集光領域の位置ずれがなく、正確な実装位置に太陽電池素子が配置されていることを示している。

次に、本章のCPVモジュールの実用レベルにおける性能評価を行うため、屋外での太陽電池特性の評価を行った。図5-13の実線に、大阪府門真市において屋外測定を行った時の太陽電池特性を示す。1次レンズアレイの平坦面と2次レンズアレイ表面には、ARコートを行った。I-V特性の測定には、カーブトレーサー(英弘精機 MP-160)を使用した。直達日射量の測定には、直達日射計(英弘精機 MS-56)を使用した。太陽光スペクトルの測定には、分光放射計(オプトリサーチ MSR-7000N)を使用した。屋外測定時に、太陽追尾装置にCPVモジュールを取り付けた状態を図5-14に示す。CPVモジュールは、300mm×240mm×3mmのアルミ板に放熱グリースを介して取り付けた。アルミ板裏面のCPVモジュール中央部直下に熱電対を取り付け、この熱電対の測定値をモジュール温度とした。CPVモジュールの $\eta$ 、 $I_{sc}$ 、 $V_{oc}$ 、FFは、それぞれ、30.4%、259mA、16.3V、0.79であった。また、この時の直達日射量、モジュール温度、SMRは、それぞれ、911W/m<sup>2</sup>、28.8°C、1.01であった。

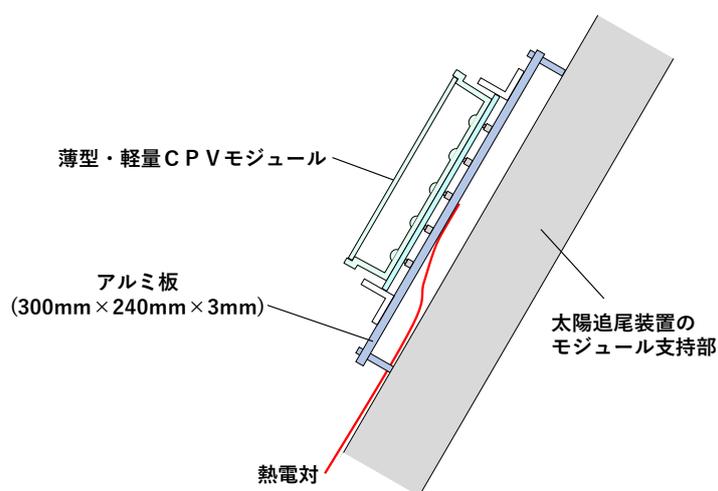


図5-14 屋外測定時のモジュール取付方法

上記の結果から、熔融半田の表面張力を利用した自己整合法と SMT を組み合わせた実装法により作製した薄型・軽量 CPV モジュールにおいて、モジュール内の太陽電池素子 25 個全てで受光面からの光のはみ出しがないことが確認され、上記実装法により高精度に素子実装が行えることを実証することができた。また、屋外測定において 30% 以上のモジュール効率が得られることを実証することができた。

本章の CPV モジュールでは、透明回路基板に重量のあるガラスを使用した。CPV モジュールの軽量化のためには、さらに部材の軽量化を進める必要がある。また、PMMA レンズの残留応力低減(複屈折による集光特性低下を防止)、低コストな AR コート技術の開発により、光学損失低減を進めていく必要がある。本章の CPV モジュールでは、低コスト化のため、前章よりも集光倍率を高めたが、さらなる実用化を進めるためには、モジュールコストと性能のバランスを考慮し、集光倍率の最適化、および集光倍率に適したグリッド電極ピッチの最適化[6]を進めていく必要がある。また、第 2 章～第 4 章での性能重視のモジュールと本章でのコスト重視のモジュールの“接点”となる、両方の特長を生かした薄型・軽量 CPV モジュール構造を検討していく必要がある。

## 5-7 まとめ

本章では、第2章～第4章で得られた知見をもとに、薄型・軽量CPVモジュールの実用化検討を行った。本章の薄型・軽量CPVモジュールでは、低コスト化のため集光倍率を高めるとともに、部材費削減による低コスト化、モジュールの軽量化を行った。そのため、ある程度の光学損失を許容し、1次レンズアレイと2次レンズアレイの間に空洞のあるモジュール構造を採用した。

本章のCPVモジュールでは、PMMAの射出成型により1次レンズアレイと箱型の2次レンズアレイを作製し、嵌合によって1次レンズアレイと箱型の2次レンズアレイを位置調整なしに取り付けるなど、光学系部材のプラスチック化と組み立ての簡易化を行った。また、薄型CPVモジュールでは、多数の微小太陽電池素子を精度よく実装する必要がある。そこで、低コスト化・量産化に適した表面実装技術(SMT)に、熔融半田の表面張力を利用した自己整合法を導入し、CPVモジュールの透明回路基板上に微小太陽電池素子を実装する方法を開発した。この方法により、 $0.97 \times 0.97 \times 0.2\text{mm}$ の大きさの太陽電池素子を $\pm 10\ \mu\text{m}$ の精度で透明回路基板に実装できることがわかった。

上記実装法で試作した薄型・軽量CPVモジュールにおいて、CPVモジュール内の25個すべての太陽電池素子で、受光面からの光のはみ出しがないことが、太陽電池特性の解析により確認され、上記実装法により高精度に素子実装が行えることを実証した。以上のように本章では、薄型CPVモジュールを実現するための製造上の技術課題を解決する方法を示すことができた。

また、このモジュールの屋外測定により、5直列-5並列に接続した太陽電池素子25個全体として、30%以上のモジュール効率が得られることを実証することができた。

本章のCPVモジュールでは、透明回路基板に重量のあるガラスを使用した。CPVモジュールの軽量化のためには、さらに部材の軽量化を進める必要がある。また、本章のCPVモジュールでは、屋外測定時において30%以上の変換効率が得られているが、第2章～第4章のCPVモジュールと比較すると、低コスト化を重視したことにより発電性能は低下している。今後、第2章～第4章での性能重視のモジュールと本章でのコスト重視のモジュールの“接点”となる、両方の長を生かした薄型・軽量CPVモジュールを検討していく必要がある。

なお、本章の成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務の結果、得られたものです。

## 参考文献

- [1] 「太陽光発電ロードマップ(PV2030+)」公開 ご説明資料, NEDO 新エネルギー技術開発部, <http://www.nedo.go.jp/content/100080329.pdf>, 2009.
- [2] H Arase, A. Matsushita, A. Itou, T. Asano, N. Hayashi, D. Inoue, R. Futakuchi, K. Inoue, T. Nakagawa, M. Yamamoto, E. Fujii, Y. Anda, H. Ishida, T. Ueda, O. Fidaner, M. Wiemer, and D. Ueda, "A novel thin concentrator photovoltaic with microsolar cells directly attached to a lens array," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 4, pp. 709–712, 2014.
- [3] T. Nakagawa, H. Torii, T. Kawashima, and T. Saitoh, "Controlled deposition of silicon nanowires on chemically patterned substrate by capillary force using a blade-coating method," *J. Phys. Chem. C*, vol. 112, pp. 5390-5396, 2008.
- [4] H. Arase and T. Nakagawa, "Interfacial-energy-controlled deposition technique of microstructures using blade-coatings," *J. Phys. Chem. B*, vol. 113, pp. 15278-15283, 2009.
- [5] H. Arase and T. Nakagawa, "Fluidic self-assembly of microstructures using a blade-coating technique: influence of volume of water droplets on probability of microstructure placement," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 51, e036501, 2012.
- [6] P. Sharma, A. W. Walker, J. F. Wheeldon, K. Hinzer and H. Schriemer, "Enhanced efficiencies for high-concentration, multijunction PV systems by optimizing grid spacing under nonuniform illumination," *International Journal of Photoenergy*, vol. 2014, e582083, 2014.

## 第6章 総括

### 6-1 総括

CPVモジュールは、単結晶シリコン太陽電池と比較して、2倍近い変換効率が得られる一方で、大型かつ重量のある発電パネルを太陽追尾装置に搭載して発電を行う必要があった。したがって、輸送や大規模な基礎工事を含む設置工事に多くのコストと労力を必要とし、CPVモジュールの普及を阻む要因となっていた。そこで、本研究では、CPVモジュールを多様な場所に、容易に運搬・設置が可能なものとし、応用できる分野や用途を拡大していくため、CPVモジュールの薄型・軽量化の研究を行った。薄型CPVモジュールは、レンズ、焦点距離、太陽電池素子の寸法を、従来のCPVモジュールの約1/10に縮小することで実現できる。しかし、本研究開始時、薄型CPVモジュールの実現には、以下の技術的課題があった。

微小太陽電池素子に関して、太陽電池特性を解析した報告例はなく、太陽電池としての挙動が不明であった。太陽電池セルを小型化していく場合、セル周囲で発生するキャリアの再結合の影響が大きくなり、 $V_{oc}$ が低下することは広く知られていた。そのため、微小太陽電池素子は、上記キャリアの再結合による特性低下が懸念された。

また、通常サイズのCPV用太陽電池素子では、集光レンズの色収差、コマ収差によりサブセル間の集光領域の集光サイズ、光強度分布の不均一が発生することでFFが低下する。そのため、太陽電池素子受光面上にホモジナイザーを設置し、FFの低下を防止する方法が知られていた。しかし、薄型CPVモジュールでは、多数の微小太陽電池素子上にホモジナイザーを精度よく設置することは事実上不可能である。したがって、薄型CPVモジュールでは、ホモジナイザーを用いずにFFを改善する必要があるが、微小太陽電池素子のFFを改善するための方法は不明であり、FFの低減を防止することは、薄型CPVモジュール実現のための大きな課題であった。

以上のように、本研究開始時、微小太陽電池素子を使用した薄型CPVモジュールで、高い性能を得るための知見は何も存在していない状態であった。

さらに、薄型CPVモジュールは、通常のCPVモジュールと異なり、多数の微小素子を集光位置に精度よく実装する必要がある。さらに、太陽電池は、低コストで製造することが強く要求される。そのため、この多数の微小素子実装が薄型CPVモジュールの実現を困難なものとしていた。

以上の技術的課題より、薄型CPVモジュールの研究開発は、従来CPVよりも応用できる分野や用途を拡大できる利点があるにもかかわらず、進展することはなかった。そこで本研究では、特性が未知であった微小太陽電池素子の素子特性を解明することにより、薄型CPVモジュールの発電性能を大幅に引き上げ、世界トップクラスの変換効率が得られることを実証した。さらに、独自の微小素子実装法を開発するとともに、薄

型CPVモジュールの実用化のため、モジュールの軽量化、低コスト化を検討した。以下、各章の概要をまとめる。

第2章では、多接合太陽電池素子の寸法を従来の約1/10とするため、微小太陽電池素子( $<1\text{mm}^2$ )の開発を行った。電極構造には、微小太陽電池素子を回路基板にコンパクトに実装するのに適した、片面取り出し構造を採用した。微小太陽電池素子では、メサ周辺部のキャリア再結合の影響を受けやすいが、集光倍率を高くすることで、従来サイズの太陽電池素子とほぼ同等の変換効率が得られることを、微小太陽電池素子の特性として初めて明らかにすることができた。

第3章では、凸レンズの底面に微小太陽電池素子を取り付けた構造の薄型CPVモジュールを試作し、モノモジュールによる太陽電池特性の評価を行った。微小太陽電池素子を用いたCPVモジュールでは、従来サイズの太陽電池素子を用いたCPVモジュールのような、レンズの色収差、コマ収差よるトップ、ミドル、ボトム、各セルの集光領域のサイズ、光強度分布に不均一が生じることによるFFの低下は見られず、トップセルのエミッタ層内において光照射により発生したフォトキャリアがグリッド電極に到達するまでの領域の抵抗損失がFFに大きく影響していることを、微小太陽電池素子の特性として初めて明らかにした。また、トップセルの集光領域を拡大させることにより、トップセルのエミッタ層の電流密度を低減することで、FFを向上させることができ、高い変換効率が得られることを明らかにすることができた。以上のように本章では、薄型CPVモジュールを実現するためのキーポイントとなる知見を明らかにすることができた。

第4章では、微小太陽電池素子を用いた薄型CPVモジュールにおいて、トップセルの集光領域を拡大することで、屋外において、どこまで高い発電性能が得られるかを調べるため、太陽電池素子の受光面とトップセルの集光領域を第2～3章よりも拡大したモジュールを試作した。このモノモジュールを使用して、屋外の様々な日射量、太陽光スペクトルの条件で測定を行い、カレントマッチした条件において、当時の世界トップクラスである37.1%の変換効率(モジュール温度 $25^\circ\text{C}$ )が得られることが判明し、本研究の微小太陽電池素子を用いた薄型CPVモジュールにおいて、高い変換効率が得られることを実証することができた。さらに、薄型CPVモジュール内のエネルギー損失について解析を行った。その結果、高い変換効率が得られる原因が、モジュール内の光学系に空洞がなく、反射率の高いレンズと空気間の界面が存在しないため、モジュール内の光学損失を極めて小さくできることにあることを明らかにした。

第5章では、薄型CPVモジュールの実用化研究を行い、部材費削減による低コスト化に重点を移すとともに、薄型CPVモジュールの軽量化を行った。そこで、第4章までのCPVモジュールとは別に、低コスト化のため、ある程度の光学損失を許容し、1次レンズアレイと2次レンズアレイの間に空洞のある薄型・軽量CPVモジュールを試

作した。また、実用化の一環として、低コストな製造方法の検討を行った。薄型CPVモジュールでは、多数の微小太陽電池素子を精度よく実装する必要がある。そこで、低コスト化・量産化に適した表面実装技術(SMT)に、熔融半田の表面張力を利用した自己整合法を導入し、CPVモジュールの透明回路基板上に微小太陽電池素子を実装する方法を開発した。この方法により、 $0.97 \times 0.97 \times 0.2\text{mm}$ の大きさの太陽電池素子を $\pm 10\ \mu\text{m}$ の精度で透明回路基板に実装できることを確認することができ、薄型CPVモジュールを実現するための製造上の技術課題を解決する方法を示すことができた。また、上記の実装方法により薄型・軽量CPVモジュールを試作し、CPVモジュール内の25個すべての太陽電池素子で、受光面に位置ずれなく太陽光が照射されていること、屋外測定における太陽電池素子25個全体の特性として30%以上のモジュール効率が得られることを実証することができた。

以上のように本研究では、特性が未知であった微小太陽電池素子の素子特性を解明し、集光倍率を高くすることで、従来サイズの太陽電池と遜色のない特性が得られることを明らかにした。さらに、微小太陽電池素子では、通常サイズの太陽電池素子で知られている色収差、コマ収差によるFFの低下は起こらず、トップセルの集光領域拡大により高い発電性能を引き出すことができることを、初めて明らかにした。また、これらの知見をもとに試作した薄型CPVモジュールにより世界トップレベルの変換効率が得られることを実証した。さらに、熔融半田の表面張力を利用した独自の実装法を量産に適した表面実装装置に導入し、薄型・軽量CPVモジュール実現のための製造上の課題である、多数素子の高精度実装法を開発した。上記の取組により、本研究では、薄型・軽量CPVモジュールが非常に高い発電性能が得られることを実証するとともに、今後の開発により、CPVモジュールが多様な場所に容易に輸送・設置でき、様々な用途に使用することが可能であることを示すことができたと考える。

## 6-2 今後の展望

### 6-2-1 モジュール構造

本研究で試作したCPVモジュールでは、第4章までのモジュールは性能重視、第5章のモジュールはコスト重視のモジュールと考えることができる。今後、第4章と第5章のモジュールの“接点”となる、両方の特長を生かした薄型・軽量CPVモジュールを検討していく必要がある。

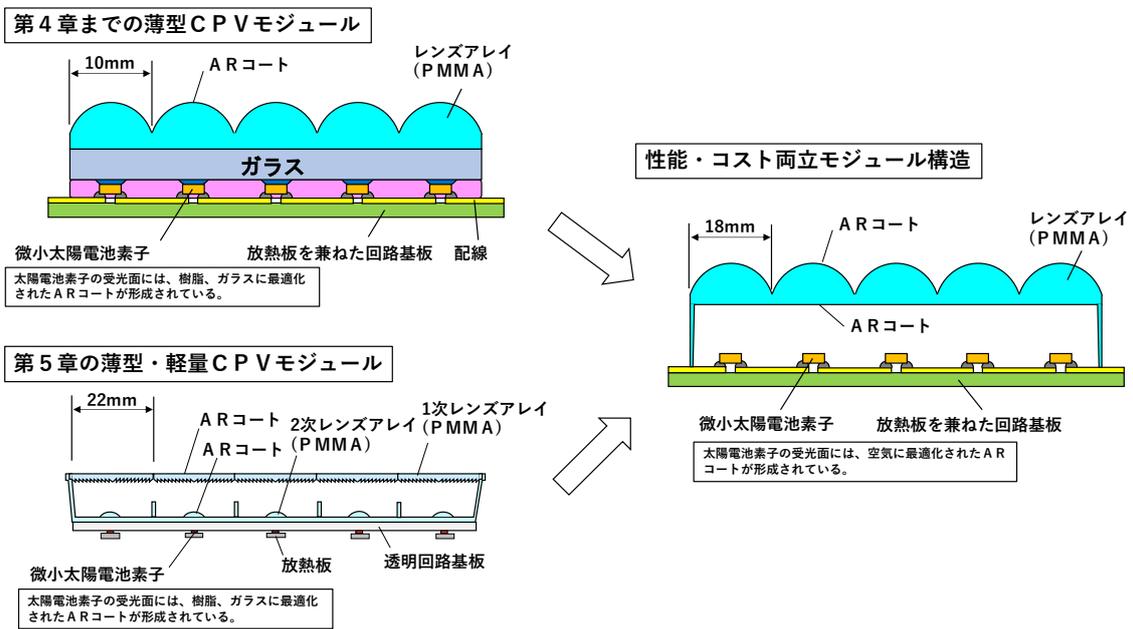


図6-1 性能とコストの両立が可能なモジュールの検討

図6-1に、両方の特長を生かしたCPVモジュール案を示す。性能・コスト両立モジュールでは、凸レンズと太陽電池素子との間に空洞を設け、軽量化と低コスト化に考慮している。レンズには光学損失の大きいフレネルレンズは使用せず、凸レンズを採用し、レンズサイズを第5章の1次レンズよりもやや小さくすることで、2次レンズなしでも素子受光面に、はみ出すことなく太陽光が入射できるようにしている。また、太陽電池素子の受光面には、空気に最適化したARコートを採用する。そのため、受光面AR層の光学損失は、第4章までのモジュール、第5章のモジュールと大きな差は生じない。したがって、凸レンズ裏面と太陽電池素子との間に空洞を設けても、光学損失の増加は、実質的に第4章までのモジュールと比較して、凸レンズ裏面と空気との界面での損失だけに留められる。この凸レンズ裏面と空気との界面も、ARコートを行うことで光

学損失の増加を最小に抑えることが可能である。表6-1に、第4章、第5章、性能とコストが両立可能な薄型・軽量CPVモジュールの構造をまとめる。

表6-1 CPVモジュールの比較

|       | 第4章のモジュール                 | 第5章のモジュール   | 性能・コスト両立モジュール                    |
|-------|---------------------------|---|----------------------------------|
| 空洞    | なし                        | あり  | あり                               |
| 主な界面  | 空気～レンズ表面<br>シリコーン樹脂～素子受光面 | 空気～1次レンズ表面<br>1次レンズ裏面～空気<br>空気～2次レンズ表面<br>シリコーン樹脂～素子受光面 | 空気～レンズ表面<br>レンズ裏面～空気<br>空気～素子受光面 |
| 素子受光面 | ARは樹脂・ガラスに最適化             | ARは樹脂・ガラスに最適化   | ARは空気に最適化                        |
| 1次レンズ | 凸レンズ(光学損失小)               | フレネルレンズ(光学損失大)  | 凸レンズ(光学損失小)                      |
| 2次レンズ | なし                        | 凸レンズ  | なし                               |
| 集光倍率  | 150倍                      | 720倍  | 430倍                             |
| 効率    | ◎                         | ×   | ○                                |
| コスト   | ×                         | ◎   | ◎                                |
| 重量    | △                         | ◎   | ○                                |

主な界面には、ガラス、樹脂、接着剤などの屈折率が1.5に近い材料間の界面はカウントしていない。性能・コスト両立モジュールで使用する太陽電池素子は、第4章、第5章の太陽電池素子と同じとする。

図6-1、表6-1の性能・コスト両立モジュール案は、本研究の第2章～第5章で得られた知見から導き出されたものであり、今後、本研究の知見を活かすことで、性能とコストを両立させた薄型・軽量CPVモジュールの開発が可能であると考えられる。

#### 6-2-2 モジュールの長期信頼性

本研究では、微小太陽電池素子、モジュールの特性面について多くを述べてきたが、今後、長期信頼性を考慮した薄型・軽量CPVモジュールの開発を行っていく必要がある。第3～5章の薄型CPVモジュールでは、ガラスとPMMAをゲル状シリコーンで張り合わせることで、集光型太陽電池の国際安全規格 IEC62108 の温度サイクル試験(-40℃～85℃、1000 サイクル)において、ガラスとアクリルの膨張係数差によるガラス板の割れを防止する対策を行っている。これと同様に、太陽電池素子と回路基板との半田接続部分に関しても、天候の変化により太陽電池素子温度の上昇、降下を長期にわたり繰り返すことになるため、半田接続部分の断線、太陽電池素子内でのクラック発生などによって太陽電池特性が劣化することが予想され、今後、十分な信頼性確保を行っていく必要がある。また、薄型・軽量CPVモジュールを通過する波長400nm近辺の太陽光と大気中の酸素、水分から発生する酸素ラジカルが関与することで、PMMAを劣化させる。したがって、長期使用を考慮し、PMMAの耐光性についても十分な検討を行っていく必要がある。

### 6-2-3 今後の電力需要拡大と電気自動車の普及に向けて

国際エネルギー機関(IEA)が2015年に発表したWorld Energy Outlook 2015によると、世界の2040年の電力需要は、中国は約2倍、インドは約4倍、非OECDは約2倍増加すると予測されている。それに伴って、世界の発電設備容量は、現在の59億kWから2040年には106億kWに増加していくと予測されている[1]。今後、さらにCPVの高効率化、低コスト化を進め、シリコン太陽電池よりもコスト的に有利な太陽電池としていくことができれば、クリーンで高効率な電源として、CPVを普及していく機会となる。

また、今後、電気自動車(Electric Vehicle)の普及が進んでいくと予想されている。EVの普及が進むと、EVの所有が集中する地域などで、電線や変圧器の過負荷や、電圧降下が起こる可能性がある[2]。このような場合に、薄型・軽量CPVモジュールは、コンパクトで多様な場所に容易に運搬・設置できるため、電力が不足している地域に容易に設置することが可能であり、薄型・軽量CPVモジュールの普及を進める大きな機会となっていく。

今後、性能とコストを両立させた薄型・軽量CPVモジュールにおいて、さらなる変換効率の向上と長期信頼性の確立を進め、薄型・軽量CPVモジュールを普及させることで、応用できる分野や用途を広げ、人類社会のエネルギー問題の解決に貢献することができると考える。

## 参考文献

- [1] “World Energy Outlook 2015”, International Energy Agency,  
<https://webstore.iea.org/download/summary/224?fileName=Japanese-WEO-2015-ES.pdf>, 2015.
- [2] E V 普及の動向と展望 気候変動対策の観点から, 自然エネルギー財団,  
[https://www.renewable-ei.org/activities/reports/img/pdf/20180627/REI\\_EVreport\\_20180627.pdf](https://www.renewable-ei.org/activities/reports/img/pdf/20180627/REI_EVreport_20180627.pdf), 2018

## 謝辞

奈良先端科学技術大学院大学に、社会人学生として入学する機会を与えていただくとともに、本論文をまとめるにあたり、本研究の全般にわたり多大なご指導、ならびに、御助言を賜りました奈良先端大学浦岡行治教授に心から深く感謝いたします。

また、本論文をまとめるにあたり、有益な御討議と御指示を賜りました中村雅一教授、細糸信好准教授、石河泰明准教授に心から感謝いたします。

本研究は、パナソニック(株)元先端技術研究所ならびにコネクテッドソリューションズ社生産技術センターにおいて行ったものであり、本研究の機会を与えて頂きました元三洋電機(株)ソーラーエナジー研究所所長田中誠博士、元パナソニック先端技術所所長上田大助特任教授(現京都工芸繊維大学)に心から感謝いたします。

集光型太陽電池の研究開発に関して、直接の上司として、終始懇切なご指導とご助言をいただき、学位取得について数多くのご助言をいただいた、藤井映志客員教授(現パナソニック、現奈良先端科学技術大学院大学)に心から感謝いたします。

集光型太陽電池の開発に数多くのご指導、ご助言をいただくとともに、論文投稿から本研究をまとめるにあたり、終始、多くのご指導、ご助言、御激励をいただきました元パナソニック中川徹博士に、熱く感謝いたします。

論文投稿にあたり、特に英文のご指導、ご助言を数多くいただいたパナソニック(株)水野文二博士に厚く御礼申し上げます。

本研究を進めるにあたり、直接の上司として、ご指導ご鞭撻をいただきましたパナソニック(株)高瀬道彦氏には多くのご理解とご配慮をいただきました。厚く御礼申し上げます。

後期博士課程入学に際して、多くのご助言、ご配慮をいただくとともに、浦岡教授のもとで本研究をまとめる機会を与えていただいた足立秀明客員教授(現パナソニック、現奈良先端科学技術大学院大学)に心から感謝いたします。

また、集光型太陽電池の開発を共に行ってきたパナソニックの方々には、非常に多くのご指導、ご協力を頂きました。心から感謝いたします。

最後に、本研究を進めるにあたり、常日頃より励まし支えてくれた家族に感謝いたします。

## 業績リスト

### 学位論文の主たる部分を公表した論文

1. N. Hayashi, A. Matsushita, D. Inoue, M. Matsumoto, T. Nagata, H. Higuchi, Y. Aya, and T. Nakagawa, "Nonuniformity Sunlight-Irradiation Effect on Photovoltaic Performance of Concentrating Photovoltaic Using Microsolar Cells Without Secondary Optics," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 6, pp. 350–357, 2016.
2. N. Hayashi, D. Inoue, M. Matsumoto, A. Matsushita, H. Higuchi, Y. Aya, and T. Nakagawa, "High-efficiency thin and compact concentrator photovoltaics with micro-solar cells directly attached to a lens array," *Optics express*, vol.23 pp. A594-A603, 2015.
3. N. Hayashi, M. Terauchi, Y. Aya, S. Kanayama, H. Nishitani, T. Nakagawa, and & M. Takase, "Thin concentrator photovoltaic module with micro-solar cells which are mounted by self-align method using surface tension of melted solder," *AIP Conference Proceedings*, vol.1881, pp.80005, 2017; doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.5001443>
4. O. Fidaner, F. A. Suarez, M. Wiemer, V. A. Sabnis, T. Asano, A. Itou, D. Inoue, N. Hayashi, H. Arase, A. Matsushita and T. Nakagawa, "High efficiency micro solar cells integrated with lens array," *Appl. Phys. Lett.*, vol.104, pp.103902, 2014.

### 参考論文

1. H. Arase, A. Matsushita, A. Itou, T. Asano, N. Hayashi, D. Inoue, R. Futakuchi, K. Inoue, T. Nakagawa, M. Yamamoto, E. Fujii, Y. Anda, H. Ishida, T. Ueda, O. Fidaner, M. Wiemer and D. Ueda, "A novel thin concentrator photovoltaic with microsolar cells directly attached to a lens array," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol.4, pp. 709-712, 2014.
2. A. Itou, T. Asano, D. Inoue, H. Arase, A. Matsushita, N. Hayashi, R. Futakuchi, K. Inoue, M. Yamamoto, E. Fujii, T. Nakagawa, Y. Anda, H. Ishida, T. Ueda, O. Fidaner, M. Wiemer and D. Ueda, "High-efficiency thin and compact concentrator photovoltaics using micro-solar cells with via-holes sandwiched between thin lens-array and circuit board," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.53, 04ER01, 2014.
3. T. Kunisato, Y. Nomura, H. Ohbo, T. Kano, N. Hayashi, M. Hata, T. Yamaguchi, M. Shono, M. Sawada, A. Ibaraki, "Novel growth technique for the reducing dislocation density in GaN on sapphire substrate," *physica status solidi (c)*, vol.7, pp. 2063-2066, 2003
4. R. Hiroshima, Y. Nomura, K. Furusawa, S. Okamoto, N. Hayashi, M. Shono, and M. Sawada, "High-power and highly reliable 780 nm band AlGaAs laser diodes with rectangular ridge structure," *Electronics Letters*, vol.37, pp. 30-31, 2001.

### 学会発表(査読あり)

1. Michihiko Takase, Masaharu Terauchi, Nobuhiko Hayashi, Hikaru Nishitani, Takuji Inohara, Youichirou Aya, Shutetsu Kanayama, and Bunji Mizuno, "A Plastic Integrated Micro CPV Module: PIC with Induction Heating Technology," *Grand Renewable Energy 2018 International Conference and Exhibition*, 2018
2. Michihiko Takase, Shutetsu Kanayama, Masaharu Terauchi, Nobuhiko Hayashi, Youichirou Aya, and Bunji Mizuno, "A Thin and Light Plastic Integrated CPV Module with Low Temperature mounting process using Induction Heating Technology," *World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7)*, 2018
3. Michihiko Takase, Masaharu Terauchi, Nobuhiko Hayashi, Hikaru Nishitani, Takuji Inohara, Youichirou Aya, Shutetsu Kanayama, and Bunji Mizuno, "Light Plastic Integrated Micro CPV Module: PIC," *The 14th International Conference on Concentrator Photovoltaics*, 2018
4. Michihiko Takase, Masaharu Terauchi, Nobuhiko Hayashi, Hikaru Nishitani, Takuji Inohara, Youichirou Aya, Shutetsu Kanayama and Bunji Mizuno, "Light Plastic Integrated Micro CPV Module: PIC with Three-Junction PV cells," *18th International Workshop on Junction Technology*, S06-03, 2018.
5. Michihiko Takase, Youichirou Aya, Nobuhiko Hayashi, Shutetsu Kanayama, Hikaru Nishitani and Bunji Mizuno, "NOVEL MICRO CPV MODULE INTEGRATED WITH PLASTIC LENS, CIRCUIT BOARD AND III-V COMPOUND SEMICONDUCTOR UTILIZING INJECTION MOLDING AND SURFACE MOUNTING," *27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference*, 6Tu09.1, 2017
6. Youichirou Aya, Nobuhiko Hayashi, Shutetsu Kanayama, Hikaru Nishitani, Toru Nakagawa, and Michihiko Takase, "PIC: New Concept of CPV Module Offering High Performance at Low Cost," *The 13th International Conference on Concentrator Photovoltaics*, 2017
7. A. Matsushita, T. Asano, H. Arase, A. Ito, N. Hayashi, D. Inoue, R. Futakuchi, K. Inoue, M. Yamamoto, E. Fujii, T. Nakagawa, O. Fidaner, M. Wiemer, and D. Ueda, "HIGH-EFFICIENCY THIN AND COMPACT CONCENTRATOR PHOTOVOLTAICS WITH MICRO-SOLAR CELLS DIRECTLY ATTACHED TO LENS ARRAY WITHOUT SECONDARY OPTICS," *Proceedings of 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, pp. 291–221, 2013.
8. M. Yamamoto, R. Futakuchi, K. Inoue, A. Matsushita, H. Arase, A. Ito, T. Asano, N. Hayashi, D. Inoue, T. Nakagawa, E. Fujii, D. Ueda, T. Matsushita, M. Iwasaki, and K. Taira, "SENSORLESS SELF-LEARNING SOLAR TRACKING CPV SYSTEM WITH INTEGRATED POWER SOURCE AND WIND-RESISTANT PANEL STRUCTURE," *Proceedings of 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, pp. 216–218, 2013.
9. T. Nakagawa, N. Hayashi, D. Inoue, M. Matsumoto, A. Matsushita, H. Higuchi, T. Nagata, M. Ishino, K. Inoue, R. Futakuchi, M. Yamamoto, Y. Aya, O. Fidaner, F. Suarez, and M. Wiemer, "High-

efficiency Thin and Compact Concentrator Photovoltaics with Micro-solar Cells Directly Attached to Lens Array.”, *Optics for Solar Energy. Optical Society of America*, RF4B.5, 2014.

10. M. Yamamoto, R. Futakuchi, K. Inoue, H. Arase, A. Matsushita, A. Ito, T. Asano, N. Hayashi, D. Inoue, T. Nakagawa, E. Fujii, and D. Ueda, “A biomimetic strategy for designing easily-installable CPV tracking system with high wind resistivity”, *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2013 .
11. T. Kunisato, T. Kano, H. Ohbo, N. Hayashi, Y. Nomura, T. Yamaguchi, M. Hata, M. Shono, M. Sawada, and A. Ibaraki, “GaN-based laser diodes with low-threshold current fabricated directly on masked sapphire substrate”, *Conference on Lasers and Electro-Optics. Optical Society of America*, p. CMQ4, 2003..

学会発表(査読なし)

1. 林 伸彦、西谷 輝、綾洋一郎、寺内正治、猪原卓二、金山秀哲、水野文二、高瀬道彦、「超薄型集光型太陽電池用レンズアレイの光学系開発」、第 43 回光学シンポジウム (2018)
2. Youichirou Aya, Nobuhiko Hayashi, Shutetsu Kanayama, Hikaru Nishitani, Toru Nakagawa, and Michihiko Takase, “New Concept of Thinner CPV Module with High Performance at Low Cost” , 第 64 回 応用物理学会春季学術講演会 シンポジウム, (2017)
3. 林 伸彦、松下明生、井上大二郎、松本光弘、永田貴之、樋口 洋、綾洋一郎、中川徹、第 75 回応用物理学会秋期学術講演会、「薄型レンズアレイ一体集光型太陽電池の発電特性解析」、18a-A28-1、14-221(2014)
4. 中井正也、松本光晴、林 伸彦、蔵本慶一、野村康彦、第 56 回応用物理学関係連合講演会、「酸素プラズマ照射によるシクロオレフィン/アクリレート界面の接合強度向上」、31a-ZT-6(2009)
5. 松本光晴、林 伸彦、中井正也、蔵本慶一、第 55 回応用物理学関係連合講演会、「ゾルゲル法で合成した高屈折率シリカ系有機・無機ハイブリッド材料の屈折率安定化」、27a-Y-1(2008)
6. 林 伸彦、松本光晴、蔵本慶一、脇坂健一郎、庄野昌幸、第 53 回応用物理学関係連合講演会、「ゾルゲル法で合成したシリカ系有機・無機ハイブリッド材料の高屈折率化」、25p-Q-14 (2006)
7. 蔵本慶一、林 伸彦、松本光晴、平野 均、庄野昌幸、第 52 回応用物理学関係連合講演会、「ゾルゲル法で合成したシリカ系有機・無機ハイブリッド材料の低吸水性」、31p-YB-11 (2005)
8. 蔵本慶一、林 伸彦、松本光晴、平野 均、庄野昌幸、第 65 回応用物理学会学術講演会、「ゾルゲル法で合成したシリカ系有機・無機ハイブリッド材料の光学特性制御」、3a-ZW-4 (2004)

9. 蔵本慶一、中川洋平、松本光晴、林 伸彦、平野 均、庄野昌幸、第 51 回応用物理学関係連合講演会、「ゾルゲル法で合成したシリカ系有機・無機ハイブリッド材料の低光損失化」、30p-ZD-13(2004)
10. 林 伸彦、井手大輔、古沢浩太郎、澤田 稔、茨木 晃、第 57 回応用物理学学会学術講演会 No. 3 「実屈折率導波型 830nmGaAlAs 高出力レーザ」、7a-KH-7、P921(1996)
11. 林 伸彦、後藤壮謙、井手大輔、茨木 晃、吉年慶一、新名達彦、電子情報通信学会 レーザ量子エレクトロニクス研究会 「可飽和吸収層を有する低雑音・高出力半導体レーザ」、LQE、Vo195、No. 80、p7(1995)
12. 林 伸彦他、第 12 回半導体レーザシンポジウム 「可飽和吸収層を有する低雑音・高出力赤外半導体レーザ」(1995)
13. 林 伸彦、阿部 寿、野中英幸、戸田忠夫、吉年慶一、山口隆夫、第 51 回応用物理学学会学術講演会 No. 3 「端面近傍に電流非注入領域を設けたブロードエリアレーザの信頼性」、28p-R-4、p963(1990)
14. 林 伸彦他、レーザー学会第 168 回研究会 「超高出力半導体レーザの熱解析」(1990)
15. 林 伸彦、阿部 寿、野中英幸、戸田忠夫、山口隆夫、第 37 回応用物理学関係連合講演会 「光出力 3W GRIN-SCH 構造 AlGaAs ブロードエリアレーザ」、28a-SA-1、p904(1990)
16. 林 伸彦、野中英幸、阿部 寿、戸田忠夫、山口隆夫、新名達彦、第 49 回応用物理学学会学術講演会 「MOCVD 法による端面 LOC 構造レーザ」、5a-ZC-8、p856(1988)
17. 後藤壮謙、林 伸彦、井手大輔、古沢浩太郎、茨木 晃、吉年慶一、新名達彦、第 43 回応用物理学関係連合講演会 No. 3 「可飽和吸収層を有する GaAlAs レーザの自励発振周波数制御」、26a-C-2、p1021(1996)
18. 国里竜也、後藤壮謙、井手大輔、松本光晴、古沢浩太郎、松川健一、林 伸彦、茨木 晃、吉年慶一、新名達彦、第 42 回応用物理学関係連合講演会 No. 3 「可飽和吸収層を有する高出力 GaAlAs レーザの雑音特性」、28p-ZG-6、p1058(1995)
19. 井手大輔、林 伸彦、後藤壮謙、古沢浩太郎、茨木 晃、吉年慶一、新名達彦、第 56 回応用物理学学会学術講演会 No. 3 「可飽和吸収層を有する高温自励発振 GaAlAs レーザ」、26p-ZA-3、P901(1995)
20. 後藤壮謙、林 伸彦、三宅輝明、古沢浩太郎、松本光晴、松川健一、茨木 晃、吉年慶一、山口隆夫、新名達彦、第 41 回応用物理学関係連合講演会 「可飽和吸収層を有する低雑音・高出力 GaAlAs レーザ」、28p-K-9、p990(1994)
21. 松本光晴、林 伸彦、三宅輝明、古沢浩太郎、後藤壮謙、松川健一、国里竜也、茨木 晃、吉年慶一、山口隆夫、新名達彦、第 55 回応用物理学学会学術講演会 「可飽和吸収層を有する低雑音・高出力 GaAlAs レーザ(II)」、20a-S-6、p933(1994)
22. 戸田忠夫、野中英幸、阿部 寿、林 伸彦、山口隆夫、三洋技報 「超高出力半導

体レーザー」、Vol. 23、No. 1、p25(1991)

国内特許・実用新案(登録)

1. 林 伸彦、戸田 忠夫、野中 英幸、阿部 寿、「半導体レーザー装置」、実登第 2554025 号
2. 林 伸彦、「エッチング方法」、特許第 2627292 号
3. 林 伸彦、「半導体レーザーアレイ」、特許第 2798720 号
4. 林 伸彦、「ブロードエリアレーザー」、特許第 2846668 号
5. 林 伸彦、「半導体レーザー」、特許第 2804544 号
6. 林 伸彦、「ブロードエリアレーザー」、特許第 2815936 号
7. 林 伸彦、「半導体レーザー及びその製造方法」、特許第 3234323 号
8. 林 伸彦、茨木 晃、「半導体レーザー素子」、特許第 3443241 号
9. 林 伸彦、井手 大輔、茨木 晃、「半導体レーザー素子及びその設計方法」、特許第 3754169 号
10. 林 伸彦、太田 潔、「半導体レーザー素子およびその製造方法」、特許第 3796060 号
11. 林 伸彦、「半導体発光素子およびその製造方法」、特許第 4104234 号
12. 林 伸彦、大保 広樹、「窒化物系半導体素子及びその製造方法」、特許第 3573990 号
13. 林 伸彦、後藤 壮謙、「半導体レーザー素子の製造方法」、特許第 3459588 号
14. 林 伸彦、狩野 隆司、「発光素子及びその製造方法」、特許第 3796065 号
15. 林 伸彦、狩野 隆司、「発光素子及びその製造方法」、特許第 3519990 号
16. 林 伸彦、狩野 隆司、「半導体素子、半導体発光素子および半導体素子の製造方法」、特許第 3316479 号
17. 林 伸彦、狩野 隆司、「窒化物系半導体層の形成方法」、特許第 3349506 号
18. 林 伸彦、狩野 隆司、「半導体レーザー素子およびその製造方法」、特許第 3806671 号
19. 林 伸彦、太田 潔、狩野 隆司、野村 康彦、「半導体レーザー」、特許第 3439168 号
20. 林 伸彦、後藤 壮謙、狩野 隆司、「窒化物系半導体レーザー素子」、特許第 4889142 号
21. 林 伸彦、國里 竜也、大保 広樹、山口 勤、「窒化物系半導体素子および窒化物系半導体の形成方法」、特許第 3454791 号
22. 林 伸彦、後藤 壮謙、狩野 隆司、野村 康彦、「窒化物系半導体発光素子」、特許第 3813472 号
23. 林 伸彦、畑 雅幸、「照明装置」、特許第 4236544 号
24. 林 伸彦、畑 雅幸、「照明装置」、特許第 4651701 号

25. 林 伸彦、畑 雅幸、「照明装置」、特許第 4651702 号
26. 林 伸彦、畑 雅幸、「照明装置」、特許第 5450707 号
27. 林 伸彦、蔵本 慶一、中川 洋平、松本 光晴、平野 均、「光導波路」、特許第 4308050 号
28. 林 伸彦、蔵本 慶一、中川 洋平、松本 光晴、平野 均、「光導波路」、特許第 5049859 号
29. 林 伸彦、松本 光晴、蔵本 慶一、平野 均、富永 浩司、「光学モジュールの製造方法」、特許第 4439313 号
30. 林 伸彦、「集光型光電変換装置」、特許第 5849191 号
31. 野中 英幸、戸田 忠夫、阿部 寿、林 伸彦、「半導体レーザ」、特許第 2889626 号
32. 野中 英幸、戸田 忠夫、阿部 寿、林 伸彦、「ブロードエリアレーザ」、特許第 2889628 号
33. 阿部 寿、戸田 忠夫、野中 英幸、林 伸彦、「半導体レーザ」、特許第 2777447 号
34. 阿部 寿、戸田 忠夫、野中 英幸、林 伸彦、「半導体レーザ」、特許第 2846712 号
35. 古沢 浩太郎、茨木 晃、林 伸彦、松川 健一、三宅 輝明、後藤 壮謙、「半導体レーザの製造方法」、特許第 3234310 号
36. 吉年 慶一、茨木 晃、林 伸彦、古沢 浩太郎、田尻 敦志、石川 徹、松川 健一、三宅 輝明、後藤 壮謙、「半導体レーザ素子」、特許第 3238974 号
37. 松川 健一、茨木 晃、林 伸彦、「半導体レーザの製造方法」、特許第 2966686 号
38. 松川 健一、茨木 晃、後藤 壮謙、林 伸彦、「半導体レーザ素子」、特許第 3203128 号
39. 後藤 壮謙、林 伸彦、三宅 輝明、松本 光晴、松川 健一、井手 大輔、古沢 浩太郎、茨木 晃、吉年 慶一、國里 竜也、「半導体レーザ素子の設計方法」、特許第 3322512 号
40. 松本 光晴、林 伸彦、後藤 壮謙、國里 竜也、茨木 晃、「半導体レーザ装置」、特許第 3268958 号
41. 田尻 敦志、林 伸彦、「半導体レーザ装置の製造方法」、特許第 3369813 号
42. 竹内 邦生、林 伸彦、野村 康彦、富永 浩司、「n型窒化物半導体の電極及び前記電極を有する半導体素子並びにその製造方法」、特許第 3462720 号
43. 大保 広樹、林 伸彦、「窒化物系半導体発光素子の製造方法」、特許第 3668031 号
44. 吉江 睦之、林 伸彦、「半導体発光素子の製造方法」、特許第 4357022 号
45. 吉江 睦之、後藤 壮謙、林 伸彦、「半導体発光素子」、特許第 3754226 号
46. 畑 雅幸、林 伸彦、「窒化物系発光素子」、特許第 3439161 号

47. 後藤 壮謙、狩野 隆司、林 伸彦、松下 保彦、「半導体レーザー素子および半導体レーザー装置」、特許第 4623779 号
48. 狩野 隆司、林 伸彦、松下 保彦、「窒化物系半導体層の形成方法」、特許第 3696003 号
49. 野村 康彦、林 伸彦、庄野 昌幸、「半導体発光素子」、特許第 3459599 号
50. 吉江 睦之、林 伸彦、「半導体素子」、特許第 4007737 号
51. 後藤 壮謙、林 伸彦、「半導体レーザー素子およびその製造方法」、特許第 3459607 号
52. 後藤 壮謙、林 伸彦、「窒化物系半導体レーザー素子および窒化物半導体レーザー装置の製造方法」、特許第 3650000 号
53. 野村 康彦、林 伸彦、畑 雅幸、庄野 昌幸、「半導体発光素子」、特許第 3723434 号
54. 畑 雅幸、狩野 隆司、林 伸彦、「窒化物系半導体素子、窒化物系半導体の形成方法および窒化物系半導体素子の製造方法」、特許第 3427047 号
55. 國里 竜也、大保 広樹、林 伸彦、狩野 隆司、「窒化物系半導体素子および窒化物系半導体の形成方法」、特許第 3863720 号
56. 國里 竜也、大保 広樹、林 伸彦、狩野 隆司、「窒化物系半導体素子および窒化物系半導体の形成方法」、特許第 4416761 号
57. 國里 竜也、大保 広樹、林 伸彦、狩野 隆司、「窒化物系半導体素子および窒化物系半導体の形成方法」、特許第 4381397 号
58. 山口 勤、林 伸彦、「窒化物系半導体素子および窒化物系半導体の形成方法」、特許第 3668131 号
59. 山口 勤、林 伸彦、太田 潔、「半導体発光素子およびその製造方法」、特許第 3605040 号
60. 太田 潔、林 伸彦、「半導体素子およびその製造方法」、特許第 3490977 号
61. 畑 雅幸、國里 竜也、林 伸彦、「窒化物系半導体素子および窒化物系半導体の形成方法」、特許第 3679720 号
62. 畑 雅幸、林 伸彦、「窒化物系半導体層素子および窒化物系半導体の形成方法」、特許第 4817522 号
63. 國里 竜也、大保 広樹、狩野 隆司、林 伸彦、「半導体素子および半導体層の形成方法」、特許第 3574093 号
64. 畑 雅幸、國里 竜也、大保 広樹、狩野 隆司、林 伸彦、「半導体素子および半導体層の形成方法」、特許第 3789781 号
65. 畑 雅幸、國里 竜也、大保 広樹、狩野 隆司、林 伸彦、「半導体素子および半導体層の形成方法」、特許第 3913758 号
66. 畑 雅幸、林 伸彦、富永 浩司、野村 康彦、國里 竜也、大保 広樹、「窒化物

- 系半導体チップおよび窒化物系半導体基板」、特許第 4104305 号
67. 蔵本 慶一、伊豆 博昭、松本 光晴、中川 洋平、平野 均、林 伸彦、「光導波路」、特許第 4004480 号
  68. 中川 洋平、林 伸彦、蔵本 慶一、松本 光晴、平野 均、「光導波路及びその製造方法」、特許第 4067504 号
  69. 松本 光晴、蔵本 慶一、中川 洋平、伊豆 博昭、平野 均、林 伸彦、「屈折率分布レンズおよびそれを用いた複合光学素子」、特許第 4260061 号
  70. 森 和思、亀山 真吾、林 伸彦、平野 均、「光学素子の製造方法、光学素子形成用ウェハおよび光学素子」、特許第 4443352 号
  71. 蔵本 慶一、平野 均、林 伸彦、松本 光晴、「有機金属ポリマー材料」、特許第 4912146 号
  72. 松本 光晴、蔵本 慶一、林 伸彦、平野 均、「光学素子の製造方法」、特許第 4849900 号
  73. 梅本 卓史、林 伸彦、「固体電解コンデンサ」、特許第 5274340 号

国内特許・実用新案(公開) 登録された特許は除く

1. 林 伸彦、「気相成長装置」、実開平 1-13722
2. 林 伸彦、「半導体レーザ」、特開昭 63-232482
3. 林 伸彦、「半導体レーザ」、特開平 1-24484
4. 林 伸彦、戸田忠生、「高出力半導体レーザ」、特開平 1-318271
5. 林 伸彦、戸田忠生、「半導体レーザアレイ」、特開平 2-224287
6. 林 伸彦、「ブロードエリアレーザ」、特開平 3-108390
7. 林 伸彦、戸田忠生、野中 英幸、阿部 寿、「半導体レーザの温度調整方法」、特開平 3-268374
8. 林 伸彦、戸田忠生、野中 英幸、阿部 寿、「半導体レーザ」、特開平 4-145681
9. 林 伸彦、阿部 寿、「半導体レーザの製造方法」、特開平 4-364085
10. 林 伸彦、阿部 寿、「波長検出装置」、特開平 5-149793
11. 林 伸彦、松川 健一、「リッジ埋込み型半導体レーザ及びその製造方法」、特開平 6-302907
12. 林 伸彦、茨木 晃、田尻 敦志、松本 光晴、三宅 輝明、「半導体レーザ装置」、特開平 8-46288
13. 林 伸彦、「半導体レーザ装置およびその製造方法」、特開平 9-92927
14. 林 伸彦、森 和思、茨木 晃、「半導体レーザアレイの製造方法」、特開平 9-92929
15. 林 伸彦、太田 潔、「半導体素子、半導体発光素子およびその製造方法」、特開 2000-91696
16. 林 伸彦、太田 潔、狩野 隆司、松本 光晴、「半導体層の形成方法ならびに半導

- 体素子の製造方法」、特開 2000-101194
17. 林 伸彦、「半導体発光素子およびその製造方法」、特開 2000-114666
  18. 林 伸彦、狩野 隆司、「発光素子」、特開 2000-196200
  19. 林 伸彦、狩野 隆司、「半導体レーザ」、特開 2000-216490
  20. 林 伸彦、後藤 壮謙、松本 光晴、「発光装置、発光素子、半導体装置及び半導体素子」、特開 2001-7434
  21. 林 伸彦、山口 勤、「窒化物系半導体レーザ素子の製造方法」、特開 2002-16312
  22. 林 伸彦、狩野 隆司、大保 広樹、國里 竜也、「窒化物系半導体用基板および窒化物系半導体装置ならびにその製造方法」、特開 2002-83753
  23. 林 伸彦、松本 光晴、蔵本 慶一、平野 均、「光分岐デバイス及び光カプラモジュール」、特開 2006-99009
  24. 林 伸彦、松本 光晴、蔵本 慶一、中井 正也、「有機無機複合体形成用材料、有機無機複合体、その製造方法及び光学素子」、特開 2007-191687
  25. 林 伸彦、松本 光晴、中井 正也、蔵本 慶一、「有機無機複合体形成用材料及び有機無機複合体並びにそれを用いた光学素子」、特開 2008-81726
  26. 林 伸彦、松本 光晴、中井 正也、蔵本 慶一、「光学系、光学装置、光ピックアップおよび光ディスク装置」、特開 2009-157993
  27. 林 伸彦、森 和思、水原 秀樹、大山 達史、蔵本 慶一、清水 竜、「光ピックアップ、光学的記録再生装置および電子機器」、特開 2009-223979
  28. 林 伸彦、梅本 卓史、野々上 寛、「固体電解コンデンサ」、特開 2010-87241
  29. 林 伸彦、梅本 卓史、「固体電解コンデンサ及びその製造方法」、特開 2010-153690
  30. 林 伸彦、野々上 寛、「固体電解コンデンサ」、特開 2010-225696
  31. 林 伸彦、「半導体発光装置、半導体発光装置の製造方法および光装置」、特開 2011-159928
  32. 林 伸彦、「半導体レーザ装置および光装置」、特開 2011-243642
  33. 林 伸彦、畑 雅幸、「半導体レーザ装置および光装置」、特開 2011-243600
  34. 林 伸彦、吉川 秀樹、蔵本 慶一、後藤 壮謙、岡山 芳央、徳永 誠一、「半導体レーザ装置および光装置」、特開 2012-38819
  35. 林 伸彦、吉川 秀樹、蔵本 慶一、「半導体レーザ装置及び光装置」、特開 2012-60039
  36. 林 伸彦、畑 雅幸、「照明装置」、特開 2011-60772
  37. 林 伸彦、吉川 秀樹、蔵本 慶一、野村 康彦、後藤 壮謙、岡山 芳央、徳永 誠一、「半導体レーザ装置、半導体レーザ装置の製造方法および光装置」、特開 2012-54527
  38. 林 伸彦、「光起電力モジュール」、W02013/065105
  39. 林 伸彦、船岡 健夫、「太陽電池モジュール」、特開 2017-17060

40. 野中 英幸、戸田 忠夫、阿部 寿、林 伸彦、「集積型半導体レーザ」、実開平 3-120061
41. 阿部 寿、戸田 忠夫、野中 英幸、林 伸彦、「半導体レーザ装置」、実開平 4-28465
42. 阿部 寿、戸田 忠夫、野中 英幸、林 伸彦、「半導体レーザ装置」、実開平 4-105570
43. 野中 英幸、戸田 忠夫、阿部 寿、林 伸彦、「半導体レーザ装置」、特開平 4-88689
44. 野中 英幸、戸田 忠夫、阿部 寿、林 伸彦、「半導体レーザ」、特開平 4-137784
45. 阿部 寿、戸田 忠夫、野中 英幸、林 伸彦、「半導体レーザ装置」、特開平 4-363080
46. 戸田 忠夫、野中 英幸、阿部 寿、林 伸彦、「非線形光学素子」、特開平 4-317032
47. 野中 英幸、戸田 忠夫、阿部 寿、林 伸彦、「第 2 高調波発生装置」、特開平 5-40286
48. 阿部 寿、林 伸彦、「半導体レーザ装置」、特開平 5-145180
49. 松川 健一、林 伸彦、「半導体レーザ及びその製造方法」、特開平 6-164062
50. 井手 大輔、林 伸彦、田尻 敦志、別所 靖之、「半導体レーザ装置」、特開平 6-302004
51. 三宅 輝明、茨木 晃、林 伸彦、田尻 敦志、古沢 浩太郎、松本 光晴、松川 健一、後藤 壮謙、井手 大輔、「自励発振型半導体レーザ素子」、特開平 7-22695
52. 井手 大輔、松川 健一、後藤 壮謙、林 伸彦、茨木 晃、「半導体レーザ装置」、特開平 8-316568
53. 井上 泰明、後藤 壮謙、田尻 敦志、林 伸彦、茨木 晃、「半導体レーザの駆動回路」、特開平 9-23032
54. 後藤 壮謙、林 伸彦、井手 大輔、古沢 浩太郎、茨木 晃、吉年 慶一、「半導体レーザ素子とこれを用いた半導体レーザ装置」、特開平 9-260774
55. 松本 光晴、林 伸彦、「半導体レーザー」、特開 2000-77776
56. 狩野 隆司、林 伸彦、「半導体発光素子」、特開 2000-196194
57. 松本 光晴、林 伸彦、「半導体発光素子およびその製造方法」、特開 2000-216494
58. 狩野 隆司、林 伸彦、「半導体レーザ素子およびその製造方法」、特開 2000-216497
59. 後藤 壮謙、林 伸彦、「半導体レーザ素子およびその製造方法」、特開 2000-244062
60. 畑 雅幸、林 伸彦、「発光素子」、特開 2000-277868
61. 國里 竜也、林 伸彦、「半導体素子および半導体ウエハならびにその製造方法」、特開 2001-93834
62. 松本 光晴、林 伸彦、「半導体レーザ装置」、特開 2001-94190

63. 大保 広樹、林 伸彦、「半導体発光素子およびその製造方法」、特開 2001-94212
64. 太田 潔、林 伸彦、「半導体素子およびその製造方法」、特開 2000-252230
65. 松本 光晴、林 伸彦、「半導体レーザ装置」、特開 2001-168448
66. 後藤 壮謙、林 伸彦、「窒化物半導体レーザ素子」、特開 2000-286504
67. 野村 康彦、後藤 壮謙、古沢 浩太郎、林 伸彦、田尻 敦志、井上 泰明、庄野 昌幸、「半導体レーザ素子、投受光ユニットおよび光ピックアップ装置」、特開 2000-340894
68. 野村 康彦、林 伸彦、「窒化物系半導体レーザ素子」、特開 2001-274520
69. 狩野 隆司、大保 広樹、林 伸彦、「窒化物系半導体層の形成方法および窒化物系半導体素子の製造方法」、特開 2002-75880
70. 國里 竜也、林 伸彦、大保 広樹、畑 雅幸、山口 勤、「窒化物系半導体素子および窒化物系半導体の形成方法」、特開 2002-261392
71. 吉江 睦之、松本 光晴、後藤 壮謙、林 伸彦、「窒化物系半導体の製造方法」、特開 2002-261076
72. 戸田 忠夫、山口 勤、畑 雅幸、野村 康彦、庄野 昌幸、菱田 有二、吉年 慶一、井上 大二郎、狩野 隆司、林 伸彦、「窒化物系半導体レーザ素子」、W02003/075425
73. 竹内 邦生、林 伸彦、亀山 真吾、富永 浩司、「半導体素子およびその製造方法」、特開 2005-260020
74. 蔵本 慶一、中川 洋平、松本 光晴、伊豆 博昭、平野 均、林 伸彦、「光デバイス」、特開 2005-10758
75. 畑 雅幸、林 伸彦、「半導体レーザ素子」、特開 2006-19456
76. 蔵本 慶一、中川 洋平、松本 光晴、林 伸彦、平野 均、「有機金属ポリマー材料及びその製造方法」、特開 2005-298796
77. 狩野 隆司、林 伸彦、松下 保彦、「窒化物系半導体層の形成方法、窒化物系半導体素子の製造方法および窒化物系半導体素子」、特開 2005-229134
78. 蔵本 慶一、林 伸彦、平野 均、松本 光晴、中井 正也、「積層光学素子」、W02006/121102
79. 松本 光晴、蔵本 慶一、林 伸彦、「光学材料及び光学素子」、特開 2007-122016
80. 太田 潔、林 伸彦、「半導体素子およびその製造方法」、特開 2006-303542
81. 松本 光晴、蔵本 慶一、林 伸彦、中井 正也、「硬化型有機金属組成物及び有機金属ポリマー材料並びに光学部品」、特開 2007-291321
82. 蔵本 慶一、中川 洋平、松本 光晴、伊豆 博昭、平野 均、林 伸彦、「光デバイスの製造方法」、特開 2007-47819
83. 83. 中井 正也、松本 光晴、林 伸彦、蔵本 慶一、「カメラ用光学部品及びその製造方法」、特開 2008-233848

84. 松本 光晴、蔵本 慶一、林 伸彦、中井 正也、「プロジェクト及びプロジェクト用光学モジュール」、特開 2009-86148
85. 松本 光晴、蔵本 慶一、中井 正也、林 伸彦、「光学ポリマー材料及び光学部品」、特開 2008-266578
86. 大山 達史、森 和思、清水 竜、水原 秀樹、蔵本 慶一、林 伸彦、「光学装置」、特開 2009-217066
87. 中井 正也、松本 光晴、林 伸彦、蔵本 慶一、「光制御装置」、特開 2010-38974
88. 吉川 秀樹、林 伸彦、「半導体レーザ装置および光装置」、特開 2011-249714
89. 吉川 秀樹、林 伸彦、「半導体レーザ装置および光装置」、特開 2012-15223
90. 戸田 忠夫、山口 勤、畑 雅幸、野村 康彦、庄野 昌幸、菱田 有二、吉年 慶一、井上 大二郎、狩野 隆司、林 伸彦、「半導体発光装置、半導体発光装置の製造方法および光装置」、W02011/096512
91. 市橋 宏基、中川 徹、林 伸彦、「集光型太陽電池」、特開 2015-15336
92. 中川 徹、高瀬 道彦、寺内 正治、金山 秀哲、綾 洋一郎、林 伸彦、桐田 紀雄、「太陽電池モジュール」、特開 2017-17061
93. 市橋 宏基、中川 徹、林 伸彦、桐田 紀雄、「太陽電池」、特開 2016-181678
94. 市橋 宏基、中川 徹、林 伸彦、桐田 紀雄、「太陽電池」、特開 2016-181679

米国特許(登録)

1. Nobuhiko Hayashi, Takenori Goto, Takashi Kano, Yasuhiko Nomura, "Nitride based semiconductor light emitting device and nitride based semiconductor laser device"、特許番号 6914922
2. Nobuhiko Hayashi, Takashi Kano, "Semiconductor device and method of fabricating the same and method of forming nitride based semiconductor layer"、特許番号 6872982
3. Nobuhiko Hayashi, Tatsuya Kunisato, Hiroki Ohbo, Tsutomu Yamaguchi, "Nitride-based semiconductor element"、特許番号 6713845
4. Nobuhiko Hayashi, Tatsuya Kunisato, Hiroki Ohbo, Tsutomu Yamaguchi, "Nitride-based semiconductor element"、特許番号 7109530
5. Nobuhiko Hayashi, Takashi Kano, "Semiconductor device and method of fabricating the same and method of forming nitride based semiconductor layer"、特許番号 7388234
6. Nobuhiko Hayashi, Mitsuaki Matsumoto, Keiichi Kuramoto, Hitoshi Hirano, "Optical branch device and optical coupler module"、特許番号 7116868
7. Nobuhiko Hayashi, Tatsuya Kunisato, Hiroki Ohbo, Tsutomu Yamaguchi, "Method of forming a nitride-based semiconductor"、特許番号 7279344

8. Nobuhiko Hayashi, Mitsuaki Matsumoto, Keiichi Kuramoto, Masaya Nakai, "Organic-inorganic composite forming material, organic-inorganic composite, production method thereof and optical element"、特許番号 7582358
9. Nobuhiko Hayashi, Keiichi Kuramoto, Youhei Nakagawa, Mitsuaki Matsumoto, Hitoshi Hirano, "Optical waveguide"、特許番号 7483616
10. Nobuhiko Hayashi, Takashi Kano, "Nitride based semiconductor device with film for preventing short circuiting"、特許番号 7768030
11. Nobuhiko Hayashi, Takashi Umemoto, Hiroshi Nonoue, "Solid electrolytic capacitor and a method for manufacturing same"、特許番号 8169774
12. Nobuhiko Hayashi, Takashi Kano, "Semiconductor device with SiO<sub>2</sub> film formed on side surface of nitride based semiconductor layer"、特許番号 7977701
13. Nobuhiko Hayashi, "Concentrating photoelectric conversion device"、特許番号 9584063
14. Nobuhiko Hayashi, Daisuke Ide, Akira Ibaraki, "Semiconductor laser device and method of designing the same"、特許番号 5960019
15. Nobuhiko Hayashi, Takashi Kano, "Method of forming nitride based semiconductor layer"、特許番号 6319742
16. Nobuhiko Hayashi, Takenori Goto, "Semiconductor laser device and method of fabricating the same"、特許番号 7120181
17. Takashi Kano, Hiroki Ohbo, Nobuhiko Hayashi, "Method of forming nitride-based semiconductor layer, and method of manufacturing nitride-based semiconductor device"、特許番号 6821807
18. Masayuki Hata, Tatsuya Kunisato, Nobuhiko Hayashi, "Nitride-based semiconductor element and method of forming nitride-based semiconductor"、特許番号 6994751
19. Tatsuya Kunisato, Nobuhiko Hayashi, Hiroki Ohbo, Masayuki Hata, Tsutomu Yamaguchi, "Nitride-based semiconductor element and method of forming nitride-based semiconductor"、特許番号 6759139
20. Hiroki Ohbo, Nobuhiko Hayashi, "Method of fabricating semiconductor device"、特許番号 6756245
21. Masayuki Hata, Nobuhiko Hayashi, Koji Tominaga, Yasuhiko Nomura, Tatsuya Kunisato, Hiroki Ohbo, "Nitride-based semiconductor element"、特許番号 6734503
22. Keiichi Kuramoto, Hiroaki Izu, Mitsuaki Matsumoto, Youhei Nakagawa, Hitoshi Hirano, Nobuhiko Hayashi, "Optical waveguide"、特許番号 7561774
23. Keiichi Kuramoto, Youhei Nakagawa, Mitsuaki Matsumoto, Hiroaki Izu, Hitoshi

- Hirano, Nobuhiko Hayashi, "Optical device and method for manufacturing the same"、特許番号 7181121
24. Mitsuaki Matsumoto, Keiichi Kuramoto, Youhei Nakagawa, Hiroaki Izu, Hitoshi Hirano, Nobuhiko Hayashi, "Gradient-index lens and composite optical element utilizing the same"、特許番号 7054070
25. Keiichi Kuramoto, Youhei Nakagawa, Mitsuaki Matsumoto, Nobuhiko Hayashi, Hitoshi Hirano, "Organometallic polymer material and process for preparing the same"、特許番号 7396873
26. Youhei Nakagawa, Nobuhiko Hayashi, Keiichi Kuramoto, Mitsuaki Matsumoto, Hitoshi Hirano, "Optical waveguide and the method of fabricating the same"、特許番号 7521725
27. Masayuki Hata, Tatsuya Kunisato, Nobuhiko Hayashi, "Nitride-based semiconductor element and method of forming nitride-based semiconductor"、特許番号 7355208
28. Mitsuaki Matsumoto, Keiichi Kuramoto, Nobuhiko Hayashi, Hitoshi Hirano, "Optical element, optical system and methods of manufacturing the same as well as optical equipment"、特許番号 7529044
29. Masaya Nakai, Mitsuaki Matsumoto, Nobuhiko Hayashi, Keiichi Kuramoto, "Optical part for camera and method of fabricating the same"、特許番号 7599133
30. Masayuki Hata, Tatsuya Kunisato, Nobuhiko Hayashi, "Nitride-based semiconductor element and method of forming nitride-based semiconductor"、特許番号 7829900
31. Keiichi Kuramoto, Hitoshi Hirano, Nobuhiko Hayashi, Mitsuaki Matsumoto, "Organometallic polymer material"、特許番号 7457507
32. Keiichi Kuramoto, Nobuhiko Hayashi, Hitoshi Hirano, Mitsuaki Matsumoto, Masaya Nakai, "Laminated optical element"、特許番号 7887910
33. Takashi Umemoto, Nobuhiko Hayashi, "Solid electrolytic capacitor with improved stress resistance in the vicinity of the anode lead and the anode terminal"、特許番号 8437117
34. Hiroki Ohbo, Nobuhiko Hayashi, "Semiconductor device and method of fabricating the same"、特許番号 6534800
35. Keiichi Yodoshi, Akira Ibaraki, Masayuki Shono, Shoji Honda, Takatoshi Ikegami, Nobuhiko Hayashi, Koutarou Furusawa, Atushi Tajiri, Toru Ishikawa, Kenichi Matsukawa, Teruaki Miyake, Takenori Goto, Mitsuaki Matsumoto, Daisuke Ide, Yasuyuki Bessho, "Semiconductor laser with a self-sustained

- pulsation”、特許番号 5416790
36. Keiichi Yodoshi, Akira Ibaraki, Masayuki Shono, Shoji Honda, Takatoshi Ikegami, Nobuhiko Hayashi, Koutarou Furusawa, Atushi Tajiri, Toru Ishikawa, Kenichi Matsukawa, Teruaki Miyake, Takenori Goto, Mitsuaki Matsumoto, Daisuke Ide, Yasuyuki Bessho, “Method of making a semiconductor laser with a self-sustained pulsation”、特許番号 5506170
  37. Keiichi Yodoshi, Akira Ibaraki, Masayuki Shono, Shoji Honda, Takatoshi Ikegami, Nobuhiko Hayashi, Koutarou Furusawa, Atushi Tajiri, Toru Ishikawa, Kenichi Matsukawa, Teruaki Miyake, Takenori Goto, Mitsuaki Matsumoto, Daisuke Ide, Yasuyuki Bessho, “Semiconductor laser with a self sustained pulsation”、特許番号 5610096
  38. Kiyoshi Oota, Nobuhiko Hayashi, “III-V nitride based semiconductor light emitting device”、特許番号 6577006
  39. Kunio Takeuchi, Nobuhiko Hayashi, Yasuhiko Nomura, Kouji Tominaga, “Electrode of n-type nitride semiconductor, semiconductor device having the electrode, and method of fabricating the same”、特許番号 6130446
  40. Takenori Goto, Nobuhiko Hayashi, “Nitride semiconductor laser device”、特許番号 6522676
  41. Takenori Goto, Nobuhiko Hayashi, “Semiconductor laser device and method of fabricating the same”、特許番号 6904071
  42. Takenori Goto, Nobuhiko Hayashi, Teruaki Miyake, Mitsuaki Matsumoto, Kenichi Matsukawa, Daisuke Ide, Koutarou Furusawa, Akira Ibaraki, Keiichi Yodoshi, Tatsuya Kunisato, “Semiconductor laser device and method of designing the same”、特許番号 5608752
  43. Tomoyuki Yoshie, Takenori Goto, Nobuhiko Hayashi, “Semiconductor light emitting device”、特許番号 6580736
  44. Yasuhiko Nomura, Nobuhiko Hayashi, Masayuki Hata, Masayuki Shono, “Semiconductor light emitting device”、特許番号 6891871
  45. Yasuhiko Nomura, Nobuhiko Hayashi, Masayuki Shono, “Semiconductor light emitting device”、特許番号 6956884

米国特許(公開) 登録された特許は除く

1. Nobuhiko Hayashi, Keiichi Kuramoto, Youhei Nakagawa, Mitsuaki Matsumoto, Hitoshi Hirano, 「Optical waveguide」、2005/0207723
2. Nobuhiko Hayashi, Mitsuaki Matsumoto, Masaya Nakai, Keiichi Kuramoto, 「ORGANIC-INORGANIC COMPOSITE FORMING MATERIAL, ORGANIC-INORGANIC COMPOSITE

- AND OPTICAL ELEMENT USING THE SAME」、2008/0161444
3. Nobuhiko Hayashi、 「SEMICONDUCTOR LASER APPARATUS AND OPTICAL APPARATUS」、  
2011/0280270
  4. Nobuhiko Hayashi, Hideki Yoshikawa, Keiichi Kuramoto, Yasuhiko Nomura,  
Takenori Goto, Yoshio Okayama, Seiichi Tokunaga、 「SEMICONDUCTOR LASER  
APPARATUS, METHOD OF MANUFACTURING SEMICONDUCTOR LASER APPARATUS AND OPTICAL  
APPARATUS」、 2011/0280266
  5. Nobuhiko Hayashi, Hideki Yoshikawa, Keiichi Kuramoto、 「SEMICONDUCTOR LASER  
APPARATUS AND OPTICAL APPARATUS」、 2012/0033696
  6. Nobuhiko Hayashi, Hideki Yoshikawa, Keiichi Kuramoto, Takenori Goto, Yoshio  
Okayama, Seiichi Tokunaga、 「SEMICONDUCTOR LASER APPARATUS AND OPTICAL  
APPARATUS」、 2012/0033695
  7. Nobuhiko Hayashi, Masayuki Hata、 「SEMICONDUCTOR LIGHT-EMITTING DEVICE,  
METHOD FOR MANUFACTURING SEMICONDUCTOR LIGHT-EMITTING DEVICE, AND OPTICAL  
DEVICE」、 2012/0299052
  8. Tatsuya Kunisato, Hiroki Ohbo, Nobuhiko Hayashi, Takashi Kano、 「Nitride-  
based semiconductor element and method of preparing nitride-based  
semiconductor」、 2002/0038870
  9. Tadao Toda, Tsutomu Yamaguchi, Masayuki Hata, Yasuhiko Nomura, Shouno  
Masayuki, Yuuji Hishida, Keiichi Yodoshi, Daijiro Inoue, Takashi Kano,  
Nobuhiko Hayashi 、 「Nitride semiconductor laser element」、 2006/0011946
  10. Mitsuaki Matsumoto, Keiichi Kuramoto, Nobuhiko Hayashi、 「Optical material  
and optical element」、 2007/0078254
  11. Mitsuaki Matsumoto, Keiichi Kuramoto, Nobuhiko Hayashi, Masaya Nakai、  
「Curable organometallic composition, organometallic polymer material and  
optical component」、 2007/0225466
  12. Keiichi Kuramoto, Mitsuaki Matsumoto, Masaya Nakai, Nobuhiko Hayashi、  
「OPTICAL POLYMER MATERIAL AND OPTICAL COMPONENT」、 2008/0233417
  13. Tatsuya Kunisato, Hiroki Ohbo, Nobuhiko Hayashi, Takashi Kano、 「Nitride-  
based semiconductor element and method of preparing nitride-based  
semiconductor」、 2008/0248603
  14. Hideki Yoshikawa, Nobuhiko Hayashi、 「SEMICONDUCTOR LASER APPARATUS AND  
OPTICAL APPARATUS」、 2011/0280267
  15. Kouki Ichihashi, Tohru Nakagawa, Nobuhiko Hayashi, Norio KIRITA 、  
「PHOTOVOLTAIC CELL」、 2016/0284911
  16. Kouki Ichihashi, Tohru Nakagawa, Nobuhiko Hayashi, Norio KIRITA 、

「PHOTOVOLTAIC CELL」、2016/0284912

17. Tohru Nakagawa, Michihiko Takase, Masaharu Terauchi, Shutetsu Kanayama, Youichirou Aya, Nobuhiko Hayashi, Norio Kirita, 「SOLAR CELL MODULE」、2016/0380141

欧州特許(登録)

1. Nobuhiko Hayashi, Daisuke Ide, Akira Ibaraki, "Semiconductor laser device and method of designing the same"、EP0798832
2. Takenori Goto, Nobuhiko Hayashi, "Semiconductor laser device and method of fabricating the same"、EP1039600
3. Yasuhiko Nomura, Nobuhiko Hayashi, Masayuki Shono、"Semiconductor light emitting device"、EP1094529
4. Kunio Takeuchi, Nobuhiko Hayashi, Yasuhiko Nomura, Kouji Tominaga, "Electrode of n-type nitride semiconductor, semiconductor device having the electrode, and method of fabricating the same"、EP0892443

中国特許(登録)

1. Nobuhiko Hayashi, Daisuke Ide, Akira Ibaraki, "Semiconductor laser device and method of designing same"、公告番号 1096729
2. Nobuhiko Hayashi, Daisuke Ide, Akira Ibaraki, "Semiconductor laser device and designing method thereof"、公告番号 1255913
3. Nobuhiko Hayashi, Mitsuaki Matsumoto, Keiichi Kuramoto, Hitoshi Hirano, "Optical branch device and optical coupler module"、公告番号 100462754
4. Hiroki Ohbo, Nobuhiko Hayashi, "Semiconductor element and manufacture thereof"、公告番号 1175533
5. Keiichi Kuramoto, Hiroaki Izu, Mitsuaki Matsumoto, Youhei Nakagawa, Hitoshi Hirano, Nobuhiko Hayashi, "Fiber waveguide"、公告番号 100343707
6. Keiichi Kuramoto, Youhei Nakagawa, Mitsuaki Matsumoto, Hiroaki Izu, Hitoshi Hirano, Nobuhiko Hayashi, "Optical device and method for manufacturing the same"、公告番号 100470275
7. Keiichi Kuramoto, Youhei Nakagawa, Mitsuaki Matsumoto, Nobuhiko Hayashi, Hitoshi Hirano, "Organometallic polymer material and process for preparing the same"、公告番号 1616523
8. Youhei Nakagawa, Nobuhiko Hayashi, Keiichi Kuramoto, Mitsuaki Matsumoto, Hitoshi Hirano, "Optical waveguide and the method of fabricating the same"、公告番号 100437172

9. Keiichi Kuramoto, Hitoshi Hirano, Nobuhiko Hayashi, Mitsuaki Matsumoto, "Organic metal polymer material"、公告番号 1950414
10. Keiichi Kuramoto, Mitsuaki Matsumoto, Hitoshi Hirano, Nobuhiko Hayashi, "Optical element, optical system, manufacture method thereof, and optical device"、公告番号 100580483
11. Keiichi Kuramoto, Nobuhiko Hayashi, Hitoshi Hirano, Mitsuaki Matsumoto, Masaya Nakai, "Multilayer optical device"、公告番号 100495077
12. Takashi Umemoto, Nobuhiko Hayashi, "Solid electrolytic capacitor"、公告番号 101853740

中国特許(公開) 登録された特許は除く

1. Nobuhiko Hayashi, Mitsuaki Matsumoto, Keiichi Kuramoto, Masaya Nakai, 「Organic-inorganic composite forming material, organic-inorganic composite, production method thereof and optical element」、1986642
2. Nobuhiko Hayashi, Mitsuaki Matsumoto, Masaya Nakai, Keiichi Kuramoto, 「Material for forming organic inorganic compound, organic inorganic compound and optical element using the same」、101134818
3. Nobuhiko Hayashi, Masayuki Hata, 「Semiconductor light-emitting device, method for manufacturing semiconductor light-emitting device, and optical device」、102782967
4. Nobuhiko Hayashi, 「Semiconductor laser apparatus and optical apparatus」、102244366
5. Nobuhiko Hayashi, Hideki Yoshikawa, Keiichi Kuramoto, Yasuhiko Nomura, Takenori Goto, Yoshio Okayama, Seiichi Tokunaga, 「Semiconductor laser apparatus, method of manufacturing semiconductor laser apparatus and optical apparatus」、102244364
6. Nobuhiko Hayashi, Hideki Yoshikawa, Keiichi Kuramoto, 「Semiconductor laser apparatus and optical apparatus」、102377106
7. Nobuhiko Hayashi, Hideki Yoshikawa, Keiichi Kuramoto, Takenori Goto, Yoshio Okayama, Seiichi Tokunaga, 「Semiconductor laser apparatus and optical apparatus」、102377105
8. Mitsuaki Matsumoto, Keiichi Kuramoto, Youhei Nakagawa, Hiroaki Izu, Hitoshi Hirano, Nobuhiko Hayashi, 「Gradient-index lens and composite optical element utilizing the same」、1573378
9. Mitsuaki Matsumoto, Keiichi Kuramoto, Nobuhiko Hayashi, 「Optical material and optical element」、1940598

10. Mitsuaki Matsumoto, Keiichi Kuramoto, Nobuhiko Hayashi, Masaya Nakai,  
「Curable organometallic composition, organometallic polymer material and  
optical component」、101045788
11. Keiichi Kuramoto, Mitsuaki Matsumoto, Masaya Nakai, Nobuhiko Hayashi,  
「Optical polymer material and optical component」、101270175
12. Hideki Yoshikawa, Nobuhiko Hayashi, 「Semiconductor laser apparatus and  
optical apparatus」、102255237