

修士論文

超高集光太陽光発電への応用に向けた
III-V 族化合物半導体
モノリシック集積直列接続太陽電池の開発

Fabrication of monolithic integrated
series-connected III-V compound solar cells for
ultrahigh concentrator photovoltaics

平成 26 年 2 月

指導教員：中野 義昭 教授

工学系研究科 電気系工学専攻

学生証番号：37-126448

瀬能 未奈都

目次

第1章	序論	1
1.1	はじめに ー太陽光発電の位置づけー	1
1.2	集光型太陽光発電	4
1.2.1	集光型太陽光発電の利点	4
1.2.2	集光型太陽光発電の構成要素と課題	5
1.3	高集光応用に向けた太陽電池セルの先行研究と研究課題	6
1.3.1	電極デザインの最適化による直列抵抗成分の低減	6
1.3.2	モノリシック集積直列接続太陽電池 (Monolithic Interconnected Modules)	7
1.4	本研究の目的とアウトライン	10
第2章	研究の背景理論	12
2.1	太陽光スペクトル	12
2.2	太陽電池の動作原理	13
2.3	詳細釣り合い理論 (Detailed Balance Theory)	16
2.4	集光下における太陽電池特性の変化	17
2.5	直列抵抗成分の算出及び測定	19
2.5.1	直列抵抗成分の構成要素及びその算出	19
2.5.2	太陽電池セルの直列抵抗の測定手法	22
2.5.3	TLM 法による金属-半導体間接触抵抗の測定手法	23
2.6	バイパスダイオードの役割	25
第3章	10 直列接続太陽電池の試作と評価	28
3.1	デザイン	28
3.2	作製プロセス	29
3.2.1	GaAs, InGaP のエッチング	34
3.2.2	絶縁膜形成	37
3.3	バイパスダイオード集積 10 直列接続太陽電池の動作	38
3.3.1	バイパスダイオード集積 10 直列接続 GaAs 太陽電池	38
3.3.2	バイパスダイオード集積 10 直列接続 InGaP/GaAs 太陽電池	40
3.3.3	SI-GaAs 基板のリーク電流	42
3.3.4	遮光層の導入	45
3.4	非分割セルと直列接続セルの比較	48
3.5	第3章のまとめ	49
第4章	集光下での特性評価	50
4.1	基板と電極パターンが集光下の特性に与える影響	50
4.2	GaAs 単接合と InGaP/GaAs ₂ 接合の集光下における特性の比較	52

4.3	10 直列接続太陽電池の集光下における優位性	52
4.4	第 4 章のまとめ	54
第 5 章	直列抵抗成分の測定・評価	56
5.1	超高集光実現のための直列抵抗成分の目標値	56
5.2	暗電流の等価回路モデルを用いた直列抵抗成分の測定	56
5.3	TLM 法による金属-半導体間接触抵抗の測定	57
5.4	直列抵抗成分の算出	58
5.5	第 5 章のまとめ	62
第 6 章	結論	64
参考文献	66
本研究に関する発表	69
謝辞	70

第1章 序論

1.1 はじめに —太陽光発電の位置づけ—

世界の一次エネルギーの消費量は経済成長とともに増大してきており、図 1-1 に示すように、1965 年の 38 億 toe(石油換算トン)から 2012 年には 125 億 toe に達した。エネルギー消費量は今後も増大していくと予想される。エネルギー源別に見てみると、2012 年では石油、石炭、天然ガスといった化石燃料が 87%を占め、次いで水力が 7%、原子力が 4%、再生可能エネルギー(水力を除く)が 2%となっている。このように化石燃料への依存度が高いことの課題としては、今後も化石燃料を確保していくことが困難であることが挙げられる。2011 年の化石燃料の可採年数は石油 54.2 年、石炭 112 年、天然ガス 64 年[1]であり回収率の向上や新たな資源の発見により年々増加してはいるが、需要の増加や新たな油田の発見が少なくなっていることを考えると、化石燃料が長期的に確保できるとは言い難い。また、化石燃料の使用による CO₂ の排出が地球温暖化の一因となることも課題と言える。このような点から、資源枯渇の不安がなく、CO₂ を排出しない再生可能エネルギーの導入が必要となっている。

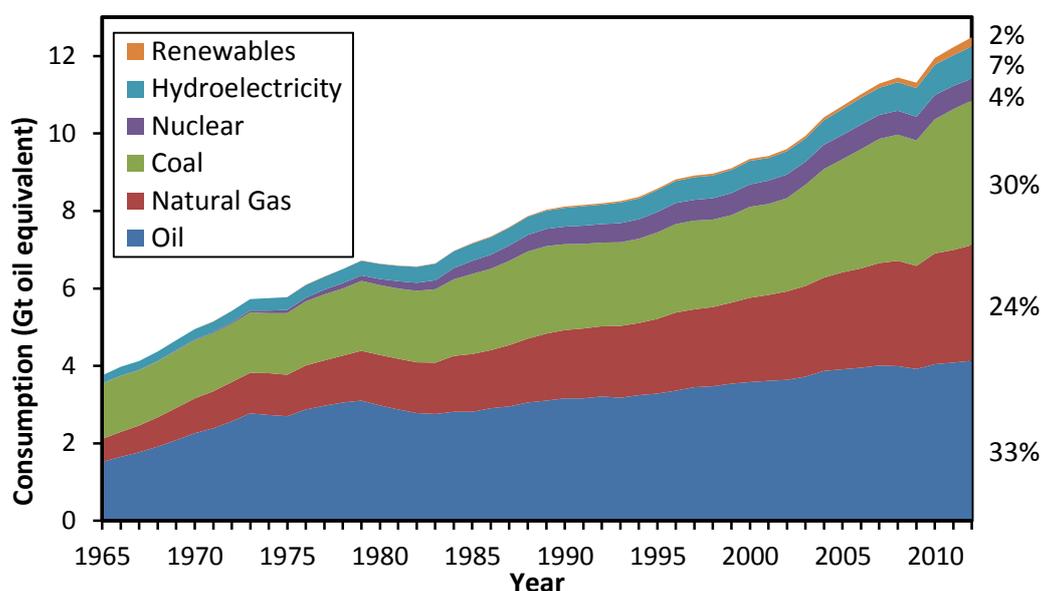


図 1-1 世界のエネルギー消費量の推移([2]をもとに作成)

また、日本国内についてみると 2010 年のエネルギー自給率は原子力を含めて 19.5%、原子力を除くと 4.4%[1]にすぎない。さらに、2011 年 3 月 11 日の東日本大震災による福島第一原子力発電所の事故に伴い、日本国内では再生可能エネルギーの導入がますます重要となってきている。2012 年 7 月 1 日からは再生可能エネルギー(太陽光、風力、水力、地熱、バイオマス)により発電された電気を国が定める一定の期間にわたって、一定の価格で購入することを電気事業者が義務付けた固定価格買取制度が開始された[1]。この制度に伴い表 1-1 に示すように、再生可能エネルギー

発電設備，特に太陽光発電設備の導入が進んだ。また，発電コストについては表 1-1 に示すように火力において，2030 年モデルでは 2010 年モデルよりもコストが高くなっている。これは，CO₂ 対策費用と燃料費の上昇を考慮した結果である。その他の原子力，水力，風力，地熱，バイオマス発電においては 2010 年モデルと 2030 年モデルで発電コストの変化は見られない。しかし，太陽光発電においては昼間しか発電できず，設備利用率が低いため 2010 年モデルでは発電コストが最も高いが，2030 年モデルにおいては，量産による大幅な価格低減が期待されている。これが実現されれば石油火力よりも安い水準が達成される。また，革新的な技術の実現によってさらなる価格低減の可能性もある[3]。そのため，研究の分野においては太陽光発電の技術革新が期待されているといえる。

表 1-1 電源別設備利用率[3]，発電コスト[3]，導入量の比較[4]

エネルギー発電設備	設備利用率 (%)	発電コスト(円/kWh)		導入量(万 kW)		
		2010 モデル	2030 モデル	(うち H24.7~H25.7 分)		
原子力	70	8.9	8.9	-	-	
火力	石炭	80	9.5	10.3	-	-
	LNG	80	10.7	10.9	-	-
	石油	10	36.1	39	-	-
水力	一般	45	10.6	10.6	-	-
	中小規模	60	19.1~22.0	13.1~22.0	960.3 (0.3)	
太陽光	メガソーラー	12	30.1~45.8	12.1~17.7	329.5 (239.5)	
	住宅	12	33.4~38.3	9.9~11.5	622.1 (152.1)	
風力	陸上	20	9.9~17.3	8.8~17.3	266.6 (6.6)	
	洋上	30	-	8.6~23.1		
地熱	80	9.2~11.6	9.2~11.6	50.1 (0.1)		
バイオマス	石炭混焼	80	9.5~9.6	10.6~10.7	240.1 (10.1)	
	木質専焼	80	17.4~32.2	17.4~32.2		

発電コストについてさらに詳細を見てみると，再生可能エネルギーの発電コストを既存の電力のコストと比較する指標として，グリッドパリティがある。日本においては家庭用電力並(23 円/kWh)が第 1 段階グリッドパリティ，業務用電力並(14 円/kWh)が第 2 段階グリッドパリティ，汎用電源並(7 円/kWh)が第 3 段階グリッドパリティとなっている。太陽光発電に関しては，日本の太陽光発電ロードマップ(PV2030+)では 2020 年に 14 円/kWh 程度，2030 年に 7 円/kWh 程度，2050 年には 7 円/kWh を下回る発電コストの達成を目標に掲げている。この目標達成のためには，セル・モジュールの変換効率の向上，モジュール製造の低コスト化，長寿命化が必要となる。モジュール変換効率については，2050 年に 40%の超高効率太陽電池の開発が目標とされている[5]。

ここで，太陽電池セルの最高変換効率の変遷を図 1-2 に示す。2013 年 7 月時点での最高変換効

率はウェハーボンディングにより作製された4接合太陽電池(GaInP/GaAs/GaInAsP/GaInAs)を297倍に集光したセルで、44.7%を達成している[6].

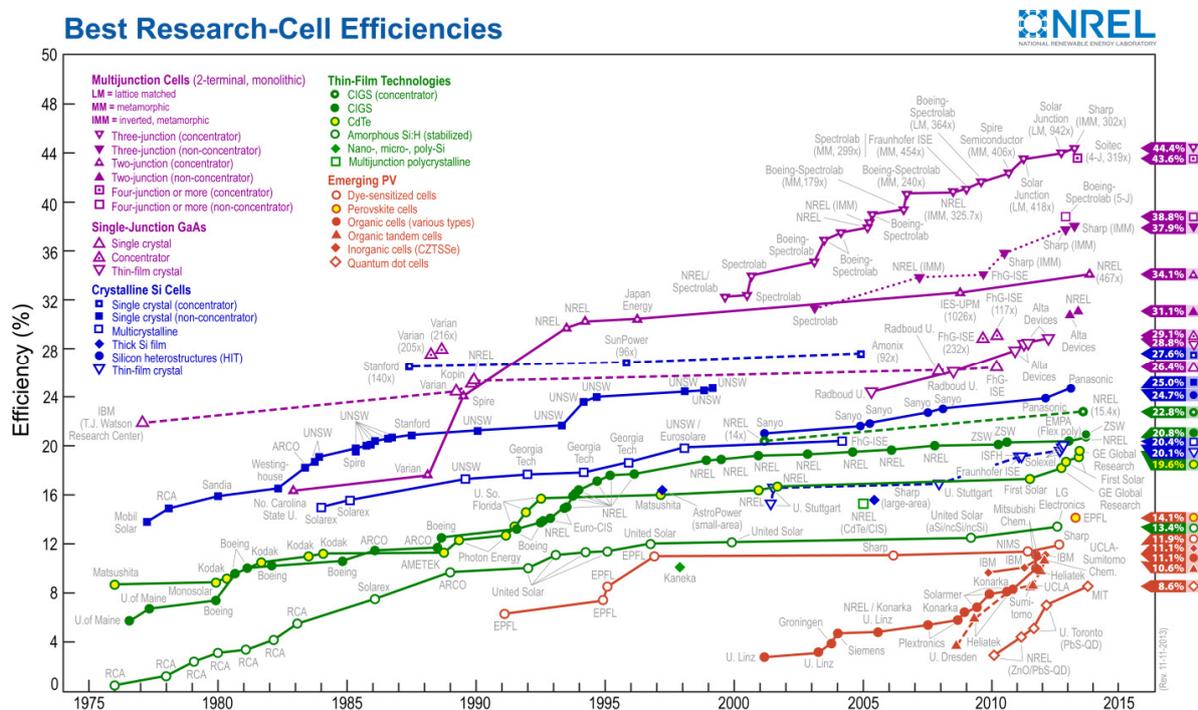


図 1-2 太陽電池セルの最高変換効率の変遷[7]

図 1-2 に示されているように、現在研究の主流となっている太陽電池は大きく分けて4種類ある。それぞれの特徴について次に述べる。

(1) 結晶シリコン系太陽電池

古くから研究が行われてきた材料で現在もっとも市場シェアの高く、太陽電池の1年間の世界市場のうち85~90%を占める太陽電池である。現在販売されている単結晶シリコン太陽電池モジュールの効率は14~20%である[8]が、変換効率、コストともに限界に近づいてきている。

(2) 薄膜太陽電池

シリコン、CdTe、CIGS系を材料に用いている。変換効率は結晶シリコンと同程度にまで近づきつつある。大量生産に向いており、使用する原料が少ないため、コスト低減の余地がある。結晶シリコンに次いで、今後の普及が期待されている。

(3) 有機系太陽電池

製造が容易なため安価で、様々な色を作製することができる。変換効率は他の材料に比べて低く、寿命が短いのが問題点である。

(4) III-V 族化合物系太陽電池

特性の異なる材料を積層した多接合型では、高効率を実現できるため、他種の太陽電池に比べて少ないパネルの枚数で発電量を確保できる。そのため、セルのコストが高価であるが、重量の軽減が重要視される宇宙用として主に使用されている。現在は集光してコストを低減することで地上応用が実現されており、直射日光の多い地域で利用されてきている。

いずれの種類太陽電池においても、高効率化と低コスト化が今後の太陽光発電のさらなる普及には求められている。その中で III-V 族化合物系多接合太陽電池を用いた集光型太陽光発電は今後もさらなる高効率化と低コスト化が見込まれる分野として、研究が進められている。

1.2 集光型太陽光発電

1.2.1 集光型太陽光発電の利点

高効率を達成することのできる III-V 族化合物半導体を用いた多接合型太陽電池は、シリコン系、薄膜系、有機系といった他の種類の太陽電池に比べて高コストである。そのため、地上用として他の太陽電池と同様にソーラーパネルで発電することは困難であり、これまではコストの低さよりも効率の高さが求められる宇宙用の太陽電池として実用化されてきた。この III-V 族化合物半導体多接合太陽電池を地上でも用いることのできるように考えられたのが、集光型太陽光発電という発電方式である。

集光型太陽光発電では、太陽光をフレネルレンズやパラボリックミラーといった安価な光学系を用いて集光することで、発電量を変えずに必要な太陽電池セルの面積を集光度に応じて小さくすることができる。そのため、集光度を高くするほどシステム全体のコストのうち、セルのコストの割合を小さくすることができるため、集光しない場合に比べて、コストパフォーマンスが高い。

ここで、図 1-3 に集光度に応じた集光型太陽光発電システムコストの予測を示す。この予測で考慮したセルは III-V 族化合物半導体 3 接合太陽電池で、セルの発電効率が 40%、光学系の効率が 80%と仮定している。また、モジュール、付属機器、設置工事のコストは King らの試算に基づいた値を用いた[9]。また、比較として日本における 2012 年度非集光の住宅用太陽光発電システム価格の平均値(46 万円/kW)[10]を示す。(ただし、\$1 = ¥100 とする。)この予測からもわかるように、III-V 族化合物半導体多接合型太陽電池を用いた太陽光発電システムのコストを Si を用いた太陽電池よりも低コストとし、さらに、今後第 3 段階グリッドパリティを下回る発電コストを達成するためには、1000 倍以上の集光度が求められる。

また、太陽電池セルは、集光することにより効率が上がるという利点もある。現在の太陽電池セルの最高変換効率は非集光においては 5 接合太陽電池で 38.8%[11]であるのに対して、集光した場合にはウェハーボンディングにより作製された 4 接合太陽電池(GaInP/GaAs//GaInAsP/GaInAs)を 297 倍に集光したセルにおいて、44.7%を達成している[6]。効率が上がる原理については § 2.3 で述べる。以上のように、集光型太陽光発電は高効率、低コストを実現できる発電方式として注目されている。特に、直達日射量の多い地域では面積当たりの発電量が大きく、よりコストパフォーマンスが高くなるため、このような地域を中心に実用化が進められている。

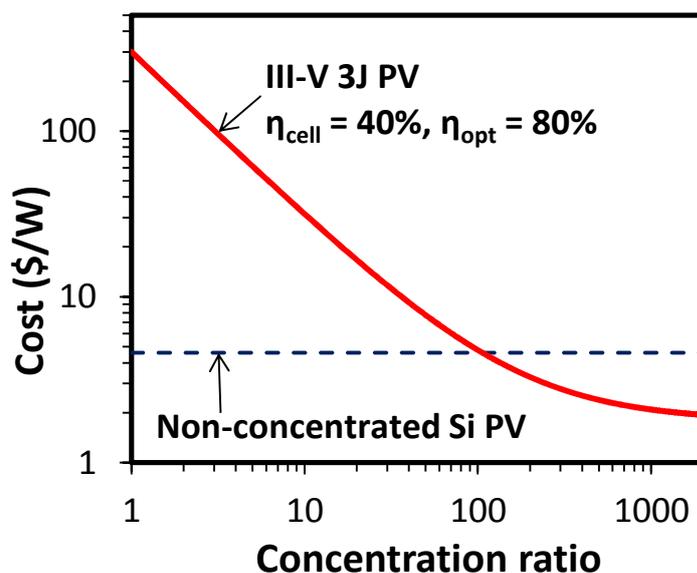


図 1-3 集光度に応じた集光型太陽光発電システムコストの予測([9][10]をもとに作成)

1.2.2 集光型太陽光発電の構成要素と課題

集光型太陽光発電における主な構成要素とそれぞれの研究課題を述べる。

(1) 光学系

太陽光の集光には1次光学系として、ミラーまたはフレネルレンズが用いられる。さらに、1次光学系で集められた光をセル表面でエネルギー強度を均一化するためのホモジナイザーという2次光学系も用いられる。セル表面におけるエネルギー強度の不均一性や、焦点距離の波長依存性が課題となっている[12][13]。

(2) 追尾装置

(1)のような光学系が用いられているため、集光型太陽光発電では、太陽光のうち、太陽からレンズへ直接入射する直達日射光(Direct Normal Irradiance : DNI)のみしか集光されず、大気中で雲などにより散乱された散乱光は集光することができない。そのため、太陽の位置を常にレンズが向くように、追尾装置が用いられる。集光度が高いほど、高い指向精度が要求され、コストが高くなってしまふことが課題となっている[14]。

(3) 冷却システム

非集光の場合に比べて、集光によりセルの温度は高くなる。太陽電池セルは温度が上昇するほど出力が低下するため[15]、それを防ぐために安価で効率の良い冷却システムが必要となる。

(4) BOS (Balance of the System)

集光、非集光によらず、インバータ、配線、据付費、諸経費、利益などをまとめた部分のことを指す。低コスト化、長寿命化が必要とされている。

(5) 太陽電池セル

システム全体の低コスト化のためには、太陽電池セル自体で高い発電効率の実現が必要とされており、研究が進められている。また、高集光においては、セルの直列抵抗成分の影響によりジュール熱損失が生じ、図 1-4 に示すようにある集光度以上になると効率が著しく低下するという問題がある。ジュール熱損失を抑え、高集光に耐えるセルの開発が求められている。

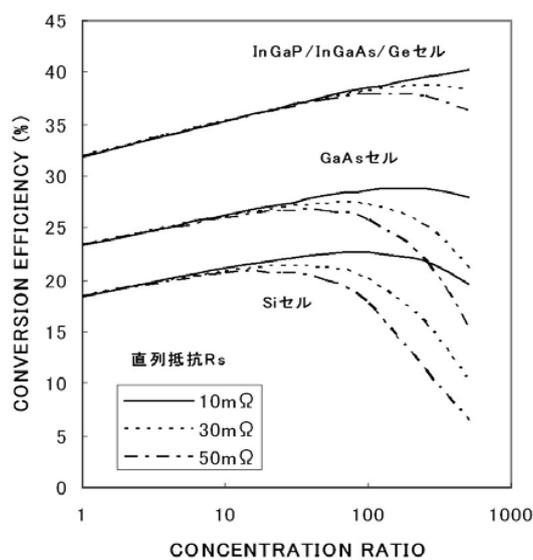


図 1-4 集光下における Si,GaAs,3 接合太陽電池の効率の変化[12]

1.3 高集光応用に向けた太陽電池セルの先行研究と研究課題

§ 1.2.2 で述べたように、集光型太陽光発電における集光度はジュール熱損失 I^2R によって上限が与えられる。そこで、高集光応用に向けた太陽電池セルの研究としては、直列抵抗成分 R を小さく抑える研究と、電流 I を小さく抑える研究の 2 通りが主に行われている。ここで、それぞれの研究の動向について詳しく述べる。

1.3.1 電極デザインの最適化による直列抵抗成分の低減

太陽電池セルの直列抵抗成分 R に関しては、直列抵抗の要因を分析し、それを小さくするために最適な電極やセルのデザインに関する研究が行われている。Moore[16]は表面電極のデザインの違いによる損失の違いについて述べ、図 1-5 に示すくし型よりも十字型が集光下で優位なデザインであると述べている。

また、Algora ら[17]は表面電極だけでなく GaAs 太陽電池全体の直列抵抗成分を計算し、1000 倍集光のために必要なセルサイズ ($0.1 \sim 6 \text{ mm}^2$)、金属-半導体の接触抵抗 ($10^{-4} \Omega$ 以下)、基板ドーピング濃度 ($1 \times 10^{17} \sim 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)、基板厚さ ($250 \sim 500 \mu\text{m}$)、表面電極の厚さ ($0.5 \mu\text{m}$ 以上)について述べている。さらに、Nishioka ら[18]は InGaP/InGaAs/Ge 3 接合太陽電池においてトンネル接合も含めた直列抵抗を評価した。その結果、グリッドピッチの最適化により、 $4 \times 4 \text{ mm}^2$ の太陽電池においては最高効率が 1000 倍集光で 40.5% になるという計算結果が得られている。

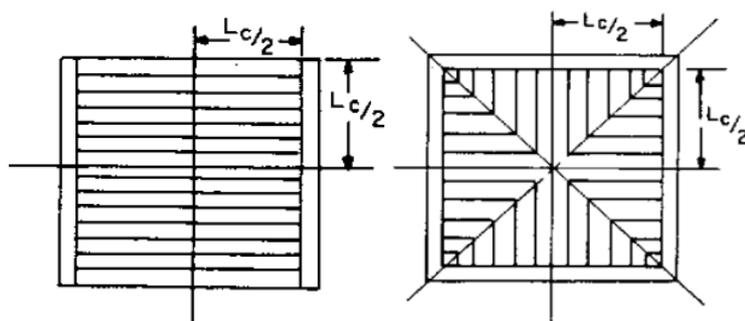


図 1-5 太陽電池の表面電極デザイン(左：くし形，右：十字型)

1.3.2 モノリシック集積直列接続太陽電池 (Monolithic Interconnected Modules)

太陽電池セルの電流 I を抑える研究としては、1970年頃から様々な構造が考えられてきた[19]。その1例として、直列接続構造の太陽電池がある。この構造は太陽電池セルを分割することで、受光面積に比例する電流を小さくし、それらを直列接続することで、大電圧を得る。これにより、面積当たりの発電量を小さくすることなく、高集光倍率においても太陽電池セルで問題となるジュール熱損失 I^2R を抑えることのできる構造となっている。

Siを材料とする太陽電池においては、イオン注入によって図 1-6、図 1-7 のような直列接続構造の太陽電池が作製されている。

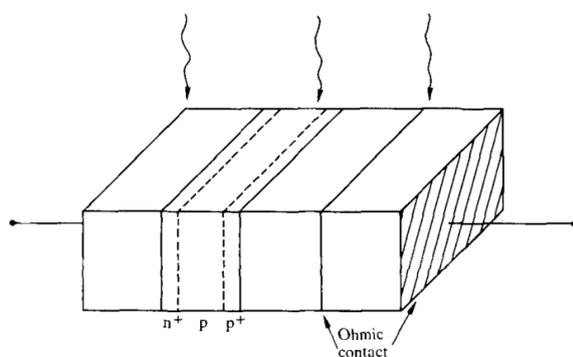


図 1-6 垂直直列接続太陽電池[19]

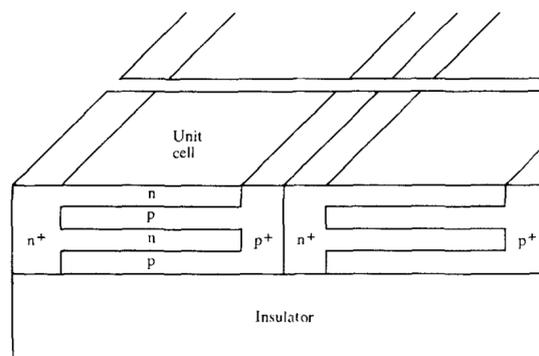


図 1-7 水平直列接続太陽電池[19]

また、半絶縁性(Semi-insulating: SI)基板を利用した GaAs 太陽電池においては、SI-GaAs 基板上に太陽電池構造を成長させ、エッチングにより小面積の太陽電池に分割し、電極によって隣接した太陽電池を接続する。この構造はモノリシック集積直列接続太陽電池(Monolithic Interconnected Modules: MIMs)と呼ばれ、1979年に Borden[20]によって4直列太陽電池が作製され、その特性が測定された。図 1-8 にこの構造の断面図を示す。

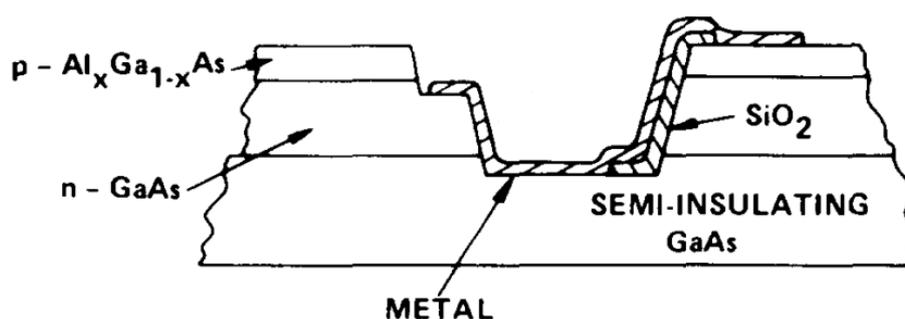


図 1-8 GaAs MIMs の直列接続部の断面図[20]

ここで MIMs における課題とその研究動向について述べる。

(1) 直列接続部における受光面積損失

Borden の作製した MIMs においては、直列接続部による受光面積損失は幅 1 mm の太陽電池のうち、20%の $200\ \mu\text{m}$ [20]となっており、MIMs の実用化に向けてはこの損失のさらなる低減が必要となっている。Helmers ら[21]はサブセル間のエッチングをウェットエッチングから ICP-RIE(Inductive Coupled Plasma-Reactive Ion Etching)によるドライエッチング、絶縁膜をフォトリソグラフィにより形成したポリイミドから PECVD(Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition)を用いて形成した SiN_x に変えることで、直列接続部の幅を $86\ \mu\text{m}$ から $57\ \mu\text{m}$ にまで減少させることに成功した。

(2) 各サブセルにおける光強度不均一性による特性悪化

§ 1.2.2 で述べたように、セル表面での光強度の均一化のためにはホモジナイザーが用いられているが、ホモジナイザーを用いても完全に光強度を均一化することはできておらず、図 1-9 に示すように、陰や追尾誤差がある場合には光強度の不均一性はより顕著になる[22]。

光強度の不均一性により、MIMs においては、場所によって電流の値にばらつきが生じるが、各サブセルが直列接続されているため、モジュールからの起電流は全てのサブセルの中で最少の値に制限され、発電量が減少する。さらに、陰となったセルには直列接続された回路の全電圧が逆バイアスで印加されることにより、セルの破壊が起こることもある。このような現象は MIMs だけではなく、一般的な太陽電池パネルの一部が陰となった場合にも起こる。この悪影響を軽減するためには、一般的にバイパスダイオードが太陽電池モジュールのセルに対して外部から並列に接続する方式をとる。バイパスダイオードが接続されている場合は、陰などの影響により、太陽電池を流れることのできる電流の値が小さいセルにおいては、余剰電流がバイパスダイオードを通して流れるため、発電量の減少が抑えられる。同時に、逆バイアスの印加も防ぎ、セルの破壊を防ぐこともできる。Loeckenhoff ら[23]はこのバイパスダイオードの並列接続構造を図 1-10 のように MIMs の太陽電池層の下へ集積することで実現した。しかし、この太陽電池は層構造が複雑になり、プロセス数も増え、受光面積損失も増えてしまうという問題がある。

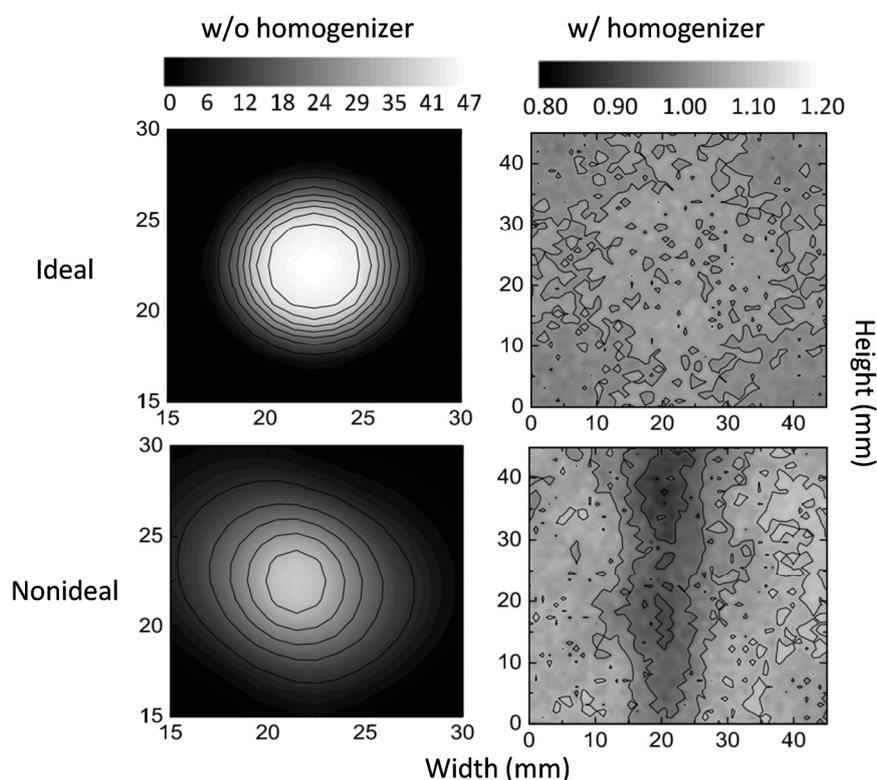


図 1-9 ホモジナイザーによる光強度分布の変化のシミュレーション[22]. ただし、理想的でない場合は、追尾誤差が 0.1° , 保持器等による陰がある場合である.

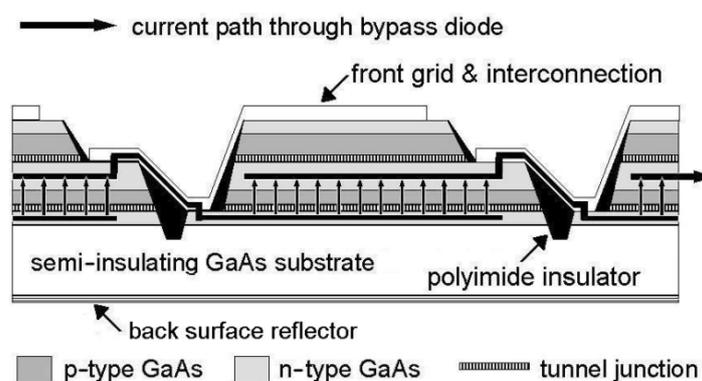


図 1-10 バイパスダイオード集積 MIMs の断面図[23]

(3) 多接合太陽電池への応用

集光型太陽光発電で一般的に用いられる太陽電池セルは、高効率を示す多接合太陽電池であり、GaAs 単接合 MIMs から多接合太陽電池 MIMs への応用が求められている。Helmers ら[24] は、GaInP/GaInAs₂ 接合太陽電池において GaAs-MIMs と同様のプロセスを用いて MIMs を作製し、図 1-11 のように、集光下での最高効率は 500 倍集光で 26.0% という結果を得た。しかし、500 倍以上の集光度においては、効率が下がる結果となっている。

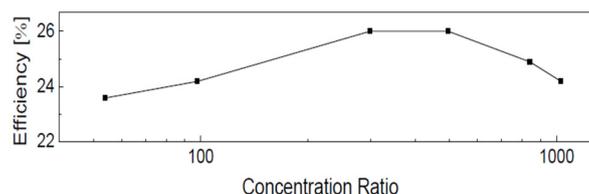


図 1-11 集光下での GaInP/GaInAs-MIMs の効率[24]

1.4 本研究の目的とアウトライン

これまで述べてきたように、高効率多接合太陽電池を用いた集光型太陽光発電においては、1000倍以上の高集光においても効率の低下しない太陽電池セルが求められている。現在までに、電極やセルのデザインの最適化や MIMs の研究が行われてきているが、1000倍以上でも効率の低下しない太陽電池セルの作製に成功した例はほとんどない。また、MIMs に関する研究は、高電圧を必要とする MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)の電源においては行われているが、それらの応用では直列接続部による受光面積損失は問題とならない。一方で、受光面積損失を小さく抑えなければならない太陽光発電の目的の研究例は少なく、セルの材料による比較や、MIMs 構造の有無による比較、直列抵抗成分の比較など詳細な評価はなされていない。

そこで、以上のような研究動向を踏まえて、本研究では、「III-V 族化合物半導体モノリシック直列接続太陽電池の作製、及び、非分割太陽電池との電流電圧特性、直列抵抗成分の比較にもとづき数千倍集光においても効率の低下しない太陽電池のデザイン、プロセスを実現すること」を目的とする。

具体的な研究のアウトラインを次に示す。

1. 10 直列接続太陽電池及びバイパスダイオードのモノリシック集積デバイスの試作及び特性評価
 - デザイン
 - プロセスの確立(ドライエッチング, 2層絶縁膜, 遮光層の導入)
 - バイパスダイオードの動作測定
2. 集光下における特性の比較
 - 基板による比較(半絶縁性 GaAs, N 型 GaAs)
 - 電極による比較(くし型電極, 十字型電極)
 - 直列接続構造の有無による比較(非分割, 直列接続)
 - 材料による比較(GaAs, InGaP/GaAs₂ 接合)
3. 直列抵抗成分の測定・評価
 - 直列抵抗成分の目標値の算出
 - セル全体での直列抵抗成分の測定
 - TLM 法を用いた金属-半導体間接触抵抗の測定
 - 直列抵抗成分の計算結果との比較

本論文では、第2章で研究の背景理論について述べた後で、第3章から第5章で上記のアウト

ラインに沿って実験結果と考察を述べ、第6章でまとめと今後の展望について述べる。

第2章 研究の背景理論

2.1 太陽光スペクトル

太陽電池は太陽の光エネルギーを直接電気エネルギーに変えるデバイスである。図 2-1 に太陽光の分光放射照度[25]と光子フラックスを示す。ここで、光子フラックス $b_s(E)$ -光子エネルギー E のグラフは分光放射照度 $L(\lambda)$ -波長 λ のグラフを次に示す式(2-1)、(2-2)を用いて変換したものである。

まず、波長 λ (m)の光子 1 個あたりのエネルギー E (eV)は、式(2-1)の関係で表される。

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2-1)$$

ただし、 h : プランク定数(4.14×10^{-15} eV·s), ν : 周波数(s^{-1}), c : 光速(3.00×10^8 m/s)である。

また、 $\lambda \sim \lambda + d\lambda$ の範囲の放射エネルギーと、それに対応する $E \sim E + dE$ の範囲の放射エネルギーは等しいので、式(2-2)が成り立つ。

$$L(\lambda)d\lambda = qEb_s(E)dE \quad (2-2)$$

ただし、 q : 電荷素量(1.60×10^{-19} C)である。

ここで、AM (Air Mass)は大気の通過量を示す指標である。図 2-2 に示すように、天頂から太陽方向の角度を θ とすると、AM は式(2-3)のように定義される。

$$AM = \frac{1}{\cos \theta} \quad (2-3)$$

宇宙用の太陽電池の評価基準としては大気圏外の AM0 が用いられる。また、定義に基づくと天頂から地表に入射した光は、AM1 と表される。さらに、国際規格としては、太陽電池評価用の基準太陽光として、 $\theta = 48.2^\circ$ の AM1.5 が定義されている。特に、パネル型の太陽電池では直達光と散乱光を全て合わせた AM1.5G (Global), 集光型の太陽電池では直達光と太陽周辺光のみを表す AM1.5D (Direct)が用いられる。(ただし、太陽周辺光の視半径は 3° である[26].)

太陽電池の効率を求める上の基準となる単位面積当たりの太陽光強度 P_{in} (W/m^2)は式(2-4)を用いて求めることができる。

$$P_{in} = \int_0^\infty L(\lambda)d\lambda = q \int_0^\infty Eb_s(E)dE \quad (2-4)$$

式(2-4)を用いると P_{in} は AM0 では 1.4 kW/m^2 であるのに対して、太陽光は大気圏を通過することでオゾンや水蒸気により光の一部が吸収され、AM1.5G では、 1 kW/m^2 、さらに AM1.5D では 0.9 kW/m^2 程度となる。

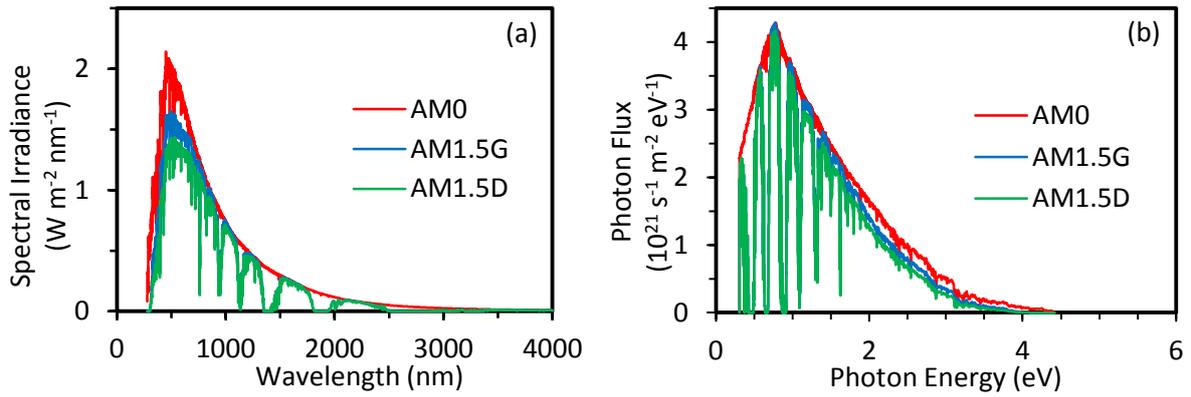


図 2-1 太陽光の(a)分光放射照度と(b)フォトンフラックス([25]をもとに作成)

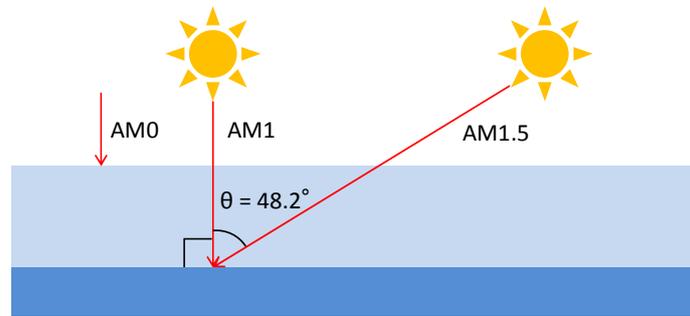


図 2-2 AM (Air Mass : エアマス)の定義

2.2 太陽電池の動作原理

図 2-1 のようなスペクトルを持つ太陽光がバンドギャップを持つ半導体の pn 接合に照射されると、図 2-3 のようにバンドギャップより小さなエネルギーの光子は吸収されずに透過し、バンドギャップより大きなエネルギーを持った光子は吸収されて電子-正孔対を生成し、光電流が流れる。この時、バンドギャップを超えたエネルギーは熱損失となる。

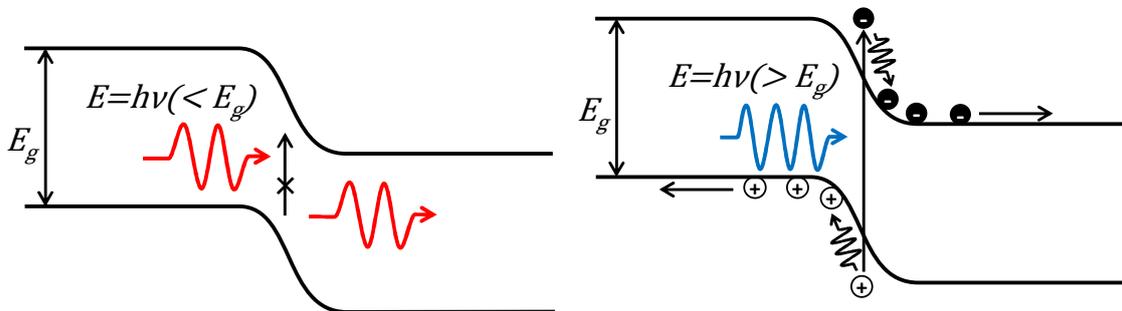


図 2-3 光子のエネルギーと電子-正孔対の生成

生成されたキャリアは、外部回路に回収されるか、回収されずに半導体中で再結合する。生成されたキャリアが回収される効率を $\eta_c(E)$ 、セル表面でのフォトンの反射率を $R(E)$ 、吸光度を $a(E)$ とすると、光電流密度 J_L は式(2-5)で与えられる。

$$J_L = q \int_0^{\infty} \eta_c(E)(1 - R(E))a(E)b_s(E)dE \quad (2-5)$$

式(2-5)中の $\eta_c(E)(1 - R(E))a(E)$ の部分は半導体に照射された光子数に対する、生成された電子数の割合を表しており、外部量子効率(External quantum efficiency)EQEと呼ばれ、太陽電池の特性を示す重要な指標の一つである。

太陽電池に電圧 V が印加されると、光電流とは逆方向に暗電流が流れる。太陽電池はpn接合から成り立っているため、暗電流はダイオードの特性を示す。暗電流密度 J_{dark} と電圧 V の関係は式(2-6)のように表される。

$$J_{dark}(V) = J_0(e^{qV/nkT} - 1) \quad (2-6)$$

ただし、 J_0 :ダイオード飽和電流密度、 n :理想係数、 k :ボルツマン定数($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$)、 T :温度(K)である。

太陽電池の電流-電圧特性は式(2-5)(2-6)で表される光電流と暗電流によって考えることができる。一般に、太陽電池では光電流の向きを正の向きとし、理想的な電流密度 J と電圧 V の関係は式(2-7)のように表される。

$$J(V) = J_L - J_0(e^{qV/nkT} - 1) \quad (2-7)$$

図2-4に暗電流と、光照射時の電流-電圧特性を示す。図2-4に示すように、太陽電池においては、 $V = 0$ の時の電流密度を短絡電流密度 J_{sc} 、 $J = 0$ の時の電圧を開放電圧 V_{oc} とよぶ。理想的な太陽電池においては、式(2-7)より式(2-8)、(2-9)の2式が成り立つ。

$$J_{sc} = J_L \quad (2-8)$$

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{J_{sc}}{J_0} + 1\right) \quad (2-9)$$

また、出力が最大値 P_m をとるときの電流密度を J_m 、電圧を V_m とすると、曲線因子FF(Fill Factor)は式(2-10)のように定義される。

$$FF = \frac{J_m V_m}{J_{sc} V_{oc}} \quad (2-10)$$

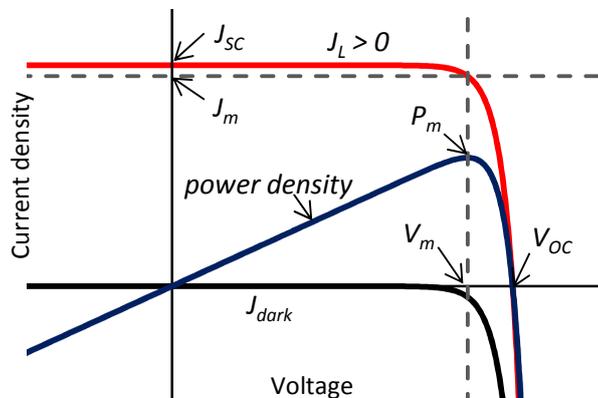


図 2-4 太陽電池の電流-電圧特性

太陽電池の効率 η は式(2-10)のFFを用いて式(2-11)のようにして求められる。

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{J_m V_m}{P_{in}} = \frac{J_{sc} V_{oc} FF}{P_{in}} \quad (2-11)$$

高効率な太陽電池を得るためには、 J_{sc} 、 V_{oc} 、 FF の損失を減らす必要がある。

実際の太陽電池においては、電極やバルクにおける抵抗や、接合領域や端面でのリーク電流が生じる。これらは寄生抵抗成分として、前者は直列抵抗成分 R_s 、後者は並列抵抗成分 R_{sh} として表すことができる。図 2-5 に寄生抵抗成分を含めた太陽電池の等価回路を示す。この時、式(2-7)の電流-電圧特性は式(2-12)のように書き換えることができる。

$$J = J_L - J_0(\exp(q(V + JAR_s)/nkT) - 1) - \frac{V + JAR_s}{R_{sh}} \quad (2-12)$$

ただし、 A ：セル面積である。式(2-7)のような理想的な太陽電池は式(2-12)において $R_s = 0$ 、 $R_{sh} = \infty$ とした場合である。

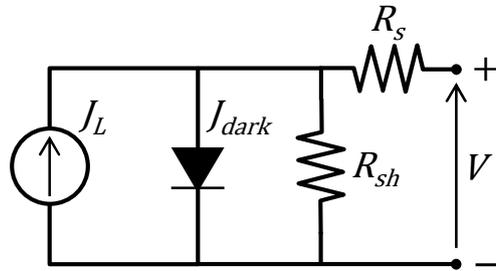


図 2-5 寄生抵抗を含めた太陽電池の等価回路

$R_s = 0$ 、 $R_{sh} = \infty$ の理想的な状態から、 R_s を大きくした場合と、 R_{sh} を小さくした場合の電流-電圧特性の変化を図 2-6 に示す。寄生抵抗成分の影響により、 FF が悪くなると、効率も悪化してしまう。そのため、太陽電池の作製においては R_s を小さく抑え、 R_{sh} を大きく保つ事が必要とされる。

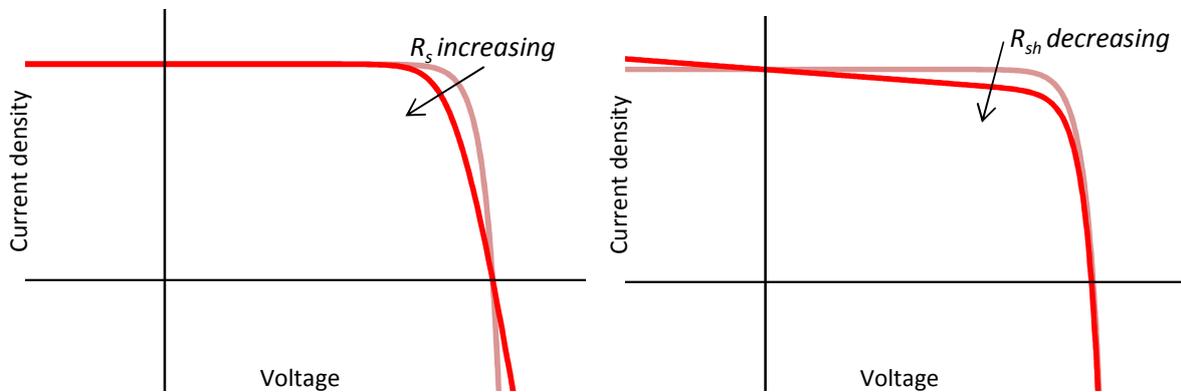


図 2-6 太陽電池の電流-電圧特性の寄生抵抗成分による影響

2.3 詳細釣り合い理論 (Detailed Balance Theory)

1961年, Shockley と Queisser[27]は詳細釣り合い理論(Detailed Balance Theory)を用いて太陽電池の効率の理論限界を示した. 詳細釣り合い理論は, 太陽電池セルが太陽及び環境から吸収するフォトン数と, 太陽電池セルが放出するフォトン数の差が外部回路に電流として取り出されるという考え方である. この理論を模式的に表すと図 2-7 のようになる.

ここで θ は太陽の見込み角を表す. このときセルから見た太陽の立体角は $\pi \sin^2 \theta$ である. 非集光においては $\theta = 0.26^\circ$ である[28]. 非集光における太陽の立体角を F_s , 環境の立体角を $F_a (= \pi)$ とする. 太陽光を X 倍集光した場合, 太陽の立体角は $X F_s$ と表すことができる. X の最大値は,

$$X F_s = F_a \quad (2-13)$$

を満たすときであり, その値は 4.6×10^4 である.

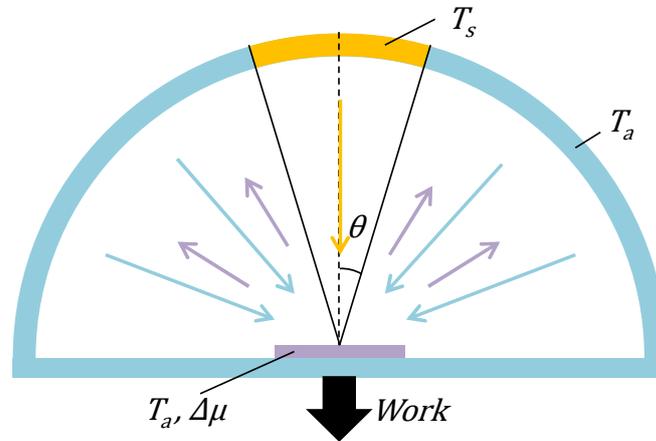


図 2-7 Detailed balance theory の模式図(T_a :セル, 環境の温度, T_s :太陽の温度, $\Delta\mu$:化学ポテンシャル, θ :太陽の見込み角)

この理論を用いた効率の理論限界の導出では, 次の4点を仮定している[28].

1. バンドギャップ以上のエネルギーを持つ光子は全て吸収され, 1 対の電子-正孔対を生じる. バンドギャップよりエネルギーの小さな光子は吸収されない.
2. 生成された電子と正孔は, セル温度 T_a , 擬フェルミレベル $\Delta\mu$ の状態へ熱緩和する.
3. キャリアは無限の移動度を持つ. 印加電圧が V であるとき, 擬フェルミレベルの差はデバイス中で常に $\Delta\mu = qV$ である.
4. 損失の過程は自然放出による放射再結合のみである.

ここで, 温度 T , 化学ポテンシャル $\Delta\mu$ の黒体から放出される単位立体角当たりのエネルギー E のフォトンフラックス $\beta(E, \Delta\mu, T)$ はプランクの公式より式(2-14)のように表すことができる.

$$\beta(E, \Delta\mu, T) = \frac{2}{h^3 c^2} \frac{E^2}{e^{(E-\Delta\mu)/kT} - 1} \quad (2-14)$$

まず, バンドギャップが E_g である太陽電池セルが太陽及び環境から吸収するフォトンそれぞれ式(2-15)(2-16)で表される.

$$\varphi_s = XF_s \int_{E_g}^{\infty} \beta(E, 0, T_s) dE \quad (2-15)$$

$$\varphi_a = (F_a - XF_s) \int_{E_g}^{\infty} \beta(E, 0, T_a) dE \quad (2-16)$$

また、太陽電池が放出する光子は式(2-17)で表される。

$$\varphi_c = F_a \int_{E_g}^{\infty} \beta(E, qV, T_a) dE \quad (2-17)$$

式(2-15)~(2-17)より外部に取り出される電流密度 $J(V)$ は

$$J(V) = q(\varphi_s + \varphi_a - \varphi_c) \quad (2-18)$$

と表すことができる。太陽電池の効率は式(2-11)と同様にして求めることができる。このようにして求めたバンドギャップと効率の関係は、非集光と最大集光倍率において図 2-8 のようになる。この図に示すように、非集光の場合に比べて、集光下では効率が上昇する。これは式(2-18)において、吸収する光子数が増えるのに対し、放出する光子数は変化しないためである。集光下における太陽電池の特性について §2.4 で詳しく述べる。

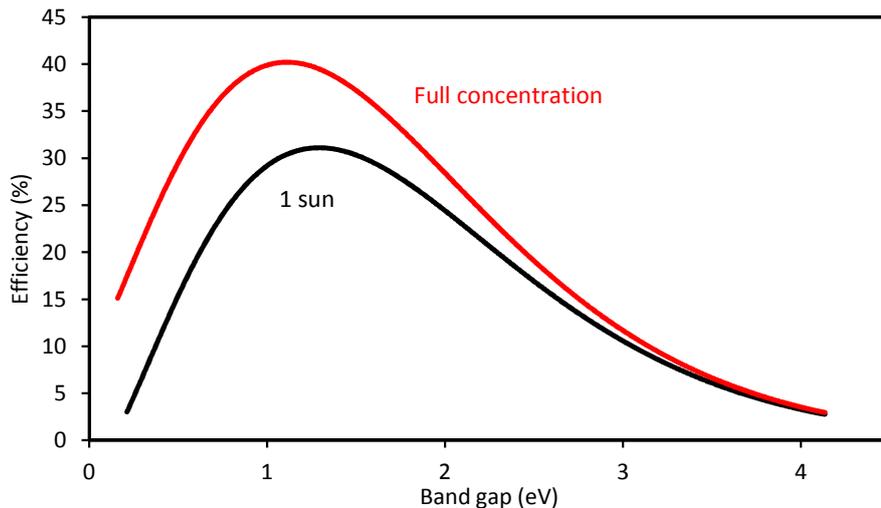


図 2-8 詳細釣り合い理論にもとづいて計算された非集光と最大集光倍率における太陽電池の効率の理論限界($T_s = 6000 K$, $T_a = 300 K$ の場合)

2.4 集光下における太陽電池特性の変化

§2.3 では詳細釣り合い理論にもとづき、集光下において太陽電池の効率が上昇することを述べた。ここでは、集光下における太陽電池の電流-電圧特性についてより詳細に述べる。

まず、 C 倍集光下における電流-電圧特性について考える。(C 倍集光下での開放電圧, 短絡電流密度, 太陽光強度はそれぞれ $V_{oc}(C)$, $J_{sc}(C)$, $P_{in}(C)$ と表す。)式(2-5)において光子フラックス $b_s(E)$ は C 倍になるため、光電流密度 J_L は C 倍となる。電流-電圧特性のグラフは図 2-9 に示すように、 J 軸方向に平行移動して示すことができる。この時、式(2-9)より、開放電圧 V_{oc} は

$$V_{oc}(C) = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{CJ_{sc}(1)}{J_0} + 1 \right) \approx V_{oc}(1) + \frac{nkT}{q} \ln C \quad (2-19)$$

となり, C に対して対数関数的に増加する.

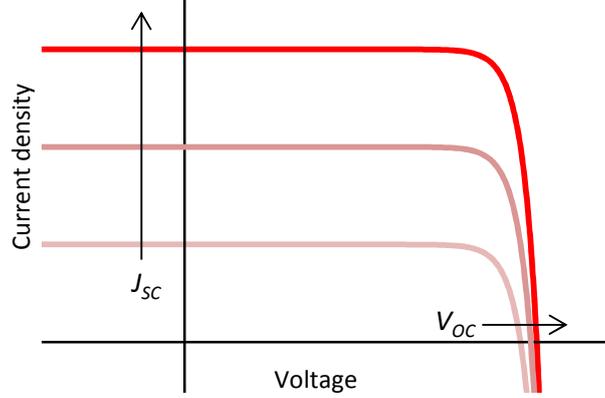


図 2-9 集光下における電流-電圧特性の変化

P_{in} は C に比例するので, FF が集光下においても一定だと仮定すると, 式(2-11)より効率は

$$\eta(C) = \eta(1) \left(1 + \frac{nkT}{qV_{oc}(1)} \ln C \right) \quad (2-20)$$

と表せる. しかし, 実際には直列抵抗 R_s の影響により, ジュール熱損失 $R_s I^2$ が生じる. この影響も考慮した式が式(2-21)である[29].

$$\eta(C)_{R_s} = \eta(1) \left(1 + \frac{nkT}{qV_{oc}(1)} \ln C - \frac{R_s C^2 I_{sc}(1)^2}{C P_{in}(1) A} \right) \quad (2-21)$$

ただし,

$$I_{sc}(C) = J_{sc}(C) A \quad (2-22)$$

である.

図 2-10 に示すように, $R_s = 0$ では集光度を上げると効率が上昇し続けるのに対し, R_s が増加するに従って, 効率はより低い集光度で上限に達し, それ以上の集光度においては効率が著しく低下する. 効率の上限を与える集光度 C_{max} は,

$$C_{max} = \frac{nkT}{qV_{oc}(1)} \cdot \frac{P_{in}(1) A}{R_s I_{sc}(1)^2} \quad (2-23)$$

より求めることができる. 式(2-23)より, C_{max} をより大きくするためには, R_s または $I_{sc}(1)$ を小さくする必要があり, そのため § 1.3 で述べたような, 直列抵抗成分低減のための研究や電流を抑える MIMs の研究が行われている.

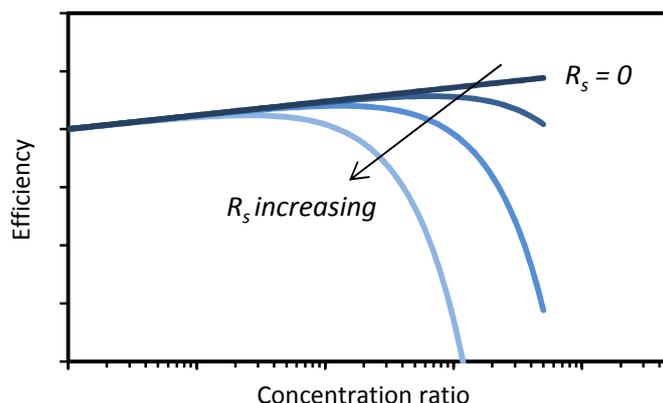


図 2-10 集光下における効率の変化

2.5 直列抵抗成分の算出及び測定

2.5.1 直列抵抗成分の構成要素及びその算出

まず、太陽電池セルの構造を図 2-11 に示す。ここで、窓層は表面再結合を防ぐため、コンタクト層は金属-半導体間の接触抵抗を抑えるために導入されている。太陽電池セル内での直列抵抗成分の構成要素としては図 2-11 に示すように大きく分けて 4 種類ある[16][17].

1. 電極自身の抵抗(r_G)
2. 表面グリッド電極間を横方向に流れる電流に対する抵抗(r_W, r_E)
3. 金属-半導体間の抵抗(r_{FC}, r_{BC})
4. ベース層、基板での抵抗(r_B, r_{Su})

また、多接合太陽電池においてはこれらの抵抗成分に加え、さらにトンネル接合における抵抗 r_T も考慮に入れる必要がある[18].

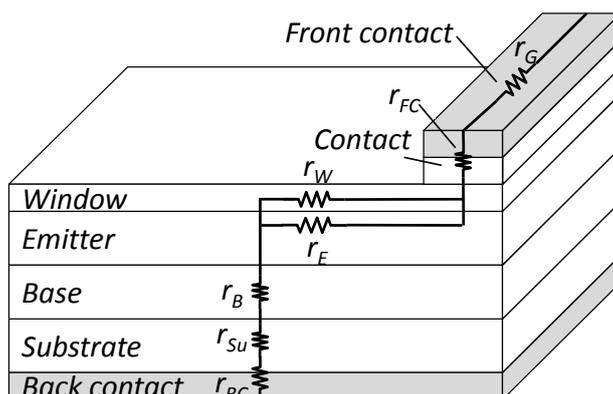


図 2-11 太陽電池セルの構造と直列抵抗成分の構成要素

ここから、各抵抗成分の算出方法について述べる。簡単のため、まずは図 2-12 に示すようなくし型電極について考える。ここで、 L_c : セルの一辺の長さ、 L_{fg} : グリッドピッチ、 W_{fg} : グリッド幅、 t : 電極の厚さであり、 x 軸、 y 軸は図 2-12 に示すようにとる。また、太陽電池の電流密度を J_m 、電圧を V_m とする。

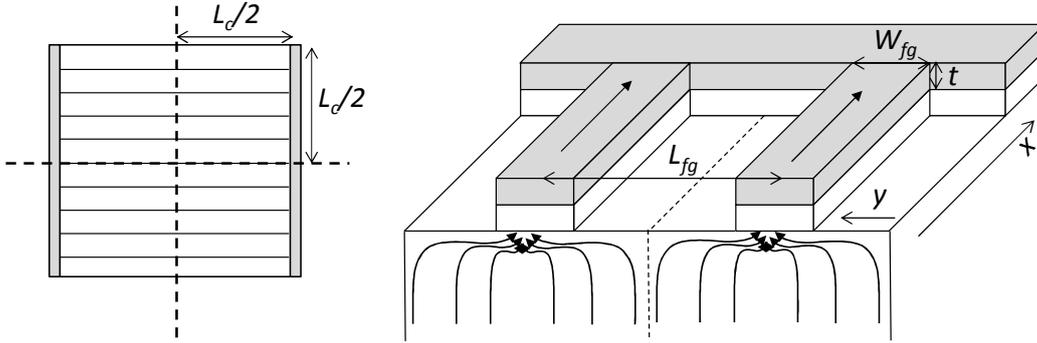


図 2-12 くし型電極の上面図(左)とセル表面における電流の流れ(右)

(1)グリッド抵抗(r_G)

電極において流れる電流 $I(x)$ は,

$$I(x) = J_m L_{fg} x \quad (2-24)$$

と表せる. 電極の抵抗率を ρ_M ($\Omega \cdot \text{cm}$)とすると, 微小長さの電極における抵抗は,

$$dR = \frac{\rho_M}{W_{fg} t} dx \quad (2-25)$$

であるので, 単位セル($L_c/2 \times L_{fg}$ の領域)の電極における損失は,

$$P_{loss} = \int_0^{L_c/2} I^2(x) dR = \frac{J_m^2 L_{fg}^2 \rho_M L_c^3}{24 W_{fg} t} \quad (2-26)$$

と表せる. このとき単位セルへの入力は,

$$P_1 = \frac{J_m V_m L_{fg} L_c}{2} \quad (2-27)$$

である. よって, グリッド抵抗は,

$$r_G = \frac{P_{loss}}{P_1} \cdot \frac{V_m}{J_m} = \frac{L_{fg} \rho_M L_c^2}{12 W_{fg} t} \quad (2-28)$$

と求めることができる.

(2)グリッド間抵抗(r_W, r_E)

グリッド間抵抗もグリッド抵抗と同様にして求めることができる. まず, 電極に向かって横方向に流れる電流 $I(y)$ は,

$$I(y) = \frac{J_m L_c y}{2} \quad (2-29)$$

と表せる. 窓層, エミッター層のシート抵抗をそれぞれ ρ_W, ρ_E (Ω/sq)とすると, 微小長さにおける抵抗は,

$$dR = \frac{2\rho_{W,E}}{L_c} dy \quad (2-30)$$

$$\rho_{W,E} = \frac{1}{q\mu N_{W,E} W_{W,E}} \quad (2-31)$$

である。ただし、 μ :多数キャリアの移動度、 $N_{W,E}$:エミッター層、窓層のドーピング濃度(cm^{-3})、 $W_{W,E}$:エミッター層、窓層の厚さとする。単位セル($L_c/2 \times L_{fg}/2$ の領域)の横方向の抵抗における損失は、

$$P_{loss} = \int_0^{L_{fg}/2} I^2(y) dR = \frac{J_m^2 L_c L_{fg}^3 \rho_{W,E}}{48} \quad (2-32)$$

と表せる。よって、グリッド間抵抗は、

$$r_{W,E} = \frac{P_{loss}}{P_1/2} \cdot \frac{V_m}{J_m} = \frac{L_{fg}^2}{12q\mu N_{W,E} W_{W,E}} \quad (2-33)$$

となる[30].

この2つの抵抗は並列であるので、グリッド間抵抗の合成抵抗 r_V は

$$\frac{1}{r_V} = \frac{1}{r_W} + \frac{1}{r_E} \quad (2-34)$$

によって求められる。

(3)金属-半導体間の抵抗(r_{FC} , r_{BC})

表面、裏面電極における金属-半導体間の接触抵抗をそれぞれ ρ_{FC} , ρ_{BC} ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)とすると、金属-半導体間の抵抗は、セル面積のうち電極で覆われている面積の割合に依存するため、その表面、裏面における割合を $F_{FC,BC}$ とすると、

$$r_{FC,BC} = \frac{\rho_{FC,BC}}{F_{FC,BC}} \quad (2-35)$$

が成り立つ。

(4)ベース層、基板での抵抗(r_B , r_{Su})

ベース層、基板の抵抗率をそれぞれ ρ_B , ρ_{Su} ($\Omega \cdot \text{cm}$)とすると、

$$\rho_{B,Su} = \frac{1}{q\mu N_{B,Su}} \quad (2-36)$$

と表せる。ただし、 $N_{B,Su}$:ベース層、基板のドーピング濃度(cm^{-3})である。よって、

$$r_{B,Su} = \frac{W_{B,Su}}{q\mu N_{B,Su}} \quad (2-37)$$

となる。ただし、 $W_{B,Su}$:ベース層、基板の厚さとする。

以上のような抵抗の求め方を応用することにより、十字型電極などの異なるグリッドパターンの電極においても抵抗を求めることができる。式(2-28), (2-33), (2-35)からわかるように、グリッド抵抗、グリッド間抵抗、接触抵抗はグリッドピッチが狭く、電極幅が大きいほど値を小さくすることができる。一方、この場合、電極によるシャドーロスが大きくなる。そのため、目標とする集光度に応じて抵抗ロス及びシャドーロスの和が最小になるような最適なグリッドピッチ電極幅やセルサイズが存在する。

2.5.2 太陽電池セルの直列抵抗の測定手法

作製した太陽電池における直列抵抗を測定する手法としてはこれまでにさまざまな方法が提案されてきた[31]. 本論文では, 暗電流の電流-電圧特性を太陽電池の等価回路の式でフィッティングする方法を用いる. 寄生抵抗成分を含んだ太陽電池の等価回路の関係式は, 式(2-12)に示した. ここで, 理想係数 n はより詳細に, 少数キャリアの拡散電流を表す $n = 1$ の成分と, 欠陥準位を介した非放射再結合を表す $n = 2$ の成分に分けて考えることができる[32]. 式(2-12)を書きかえると, 式(2-38)のようになる.

$$J = J_L - J_1 \left(\exp\left(\frac{q(V + JAR_s)}{kT}\right) - 1 \right) - J_2 \left(\exp\left(\frac{q(V + JAR_s)}{2kT}\right) - 1 \right) - \frac{V + JAR_s}{R_{sh}} \quad (2-38)$$

ここで, J_1 , J_2 についてより詳細に述べる. 少数キャリアの拡散電流に関する J_1 は電子及び正孔の拡散方程式を解くことで

$$J_1 = qn_i^2 \left(\frac{D_n}{N_d L_n} + \frac{D_p}{N_a L_p} \right) \quad (2-39)$$

と求められる. ただし, n_i : 真性キャリア濃度, $D_{n,p}$: 拡散係数, N_d : ドナー濃度, N_a : アクセプタ濃度, $L_{n,p}$: 拡散長であり, N型, P型領域は拡散長に比べて十分長いものとする[28].

また, J_2 はさらに空乏層での再結合に起因する成分 J_{DR} と, 太陽電池の周囲での再結合に起因する成分 J_{PER} の和として分けて考えることができる. これらの成分はそれぞれ,

$$J_{DR} = \frac{\pi n_i W_{DR}}{2 \sqrt{\tau_n \tau_p}} \frac{kT}{V_{bi} - V} \quad (2-40)$$

$$J_{PER} = qn_i s_0 L_s \frac{L_{PER}}{A} \quad (2-41)$$

と表すことができる[30]. ただし, W_{DR} : 空乏層幅, $\tau_{n,p}$: 少数キャリア寿命, V_{bi} : ビルトイン電圧, s_0 : 空乏層周囲の表面再結合速度, L_s : 表面拡散長, L_{PER} : 太陽電池セルの周囲の長さである.

式(2-38)の関係式をグラフに表すと図2-13のようになる. 低電圧においては非放射再結合の成分が支配的であるのに対し, 電圧が大きくなるにつれて放射再結合の成分が支配的になる. また, 直列抵抗成分が増えると, 電圧が大きい領域において直列抵抗での損失が増えるため, 理想状態よりも流れる電流が小さくなる. 一方, 並列抵抗成分が小さくなると, リーク電流が増えるため, 電圧が0V付近において流れる電流が大きくなる. 以上のことを考慮して太陽電池の暗電流をフィッティングすることで, 直列抵抗成分の値を推測することができる.

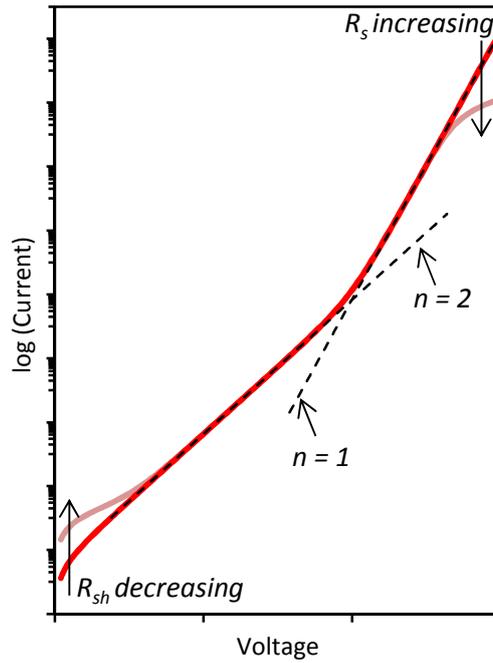


図 2-13 $\log I - V$ 特性の理想係数と寄生抵抗成分による変化

2.5.3 TLM 法による金属-半導体間接触抵抗の測定手法

金属-半導体間の接触抵抗を測定としては Transmission Line Model Measurements (TLM法)と呼ばれる方法が用いられる[33][34]. 図 2-14 に TLM 法の概略図を示す. この図に示すように, 距離 L 離れた, 幅 W , 長さ d の2つの電極間の電流-電圧特性を測定する. 電流-電圧特性の測定結果から, 抵抗 R と距離 L の関係は図 2-15 に示すような直線として書くことができる. ただし, L_T は電極内のうち電流が流れているとみなすことのできる長さのことで伝搬長とよばれる. また, R_{SK} は電極直下の半導体層のシート抵抗, R_{SH} は電極直下以外の半導体のシート抵抗である. 通常の金属と半導体の組み合わせにおいては $R_{SH} = R_{SK}$ とみなすことができるが, 合金化のためにアニーリングのプロセスを必要とするような金属と半導体の組み合わせでは, $R_{SH} \neq R_{SK}$ となることもある. それぞれの場合の接触抵抗の算出方法についてより詳しく説明する.

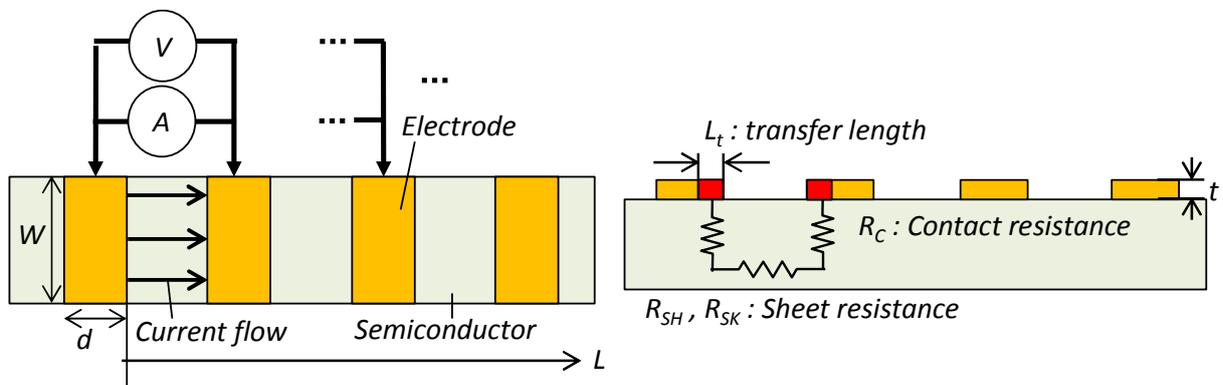


図 2-14 TLM 法による測定の概略図(左: 上面図, 右: 断面図)

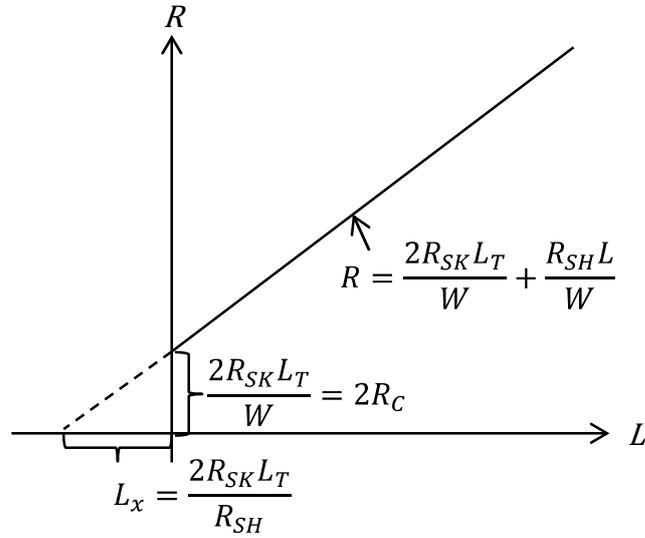


図 2-15 抵抗 R と電極間距離 L の関係

(1) $R_{SH} = R_{SK}$ のとき

図 2-15 の x 切片, y 切片より伝搬長 L_T とコンタクト抵抗 R_C (Ω)を求める. コンタクト抵抗 R_C (Ω)に関する電極は, 図 2-14 の断面図において赤色で示している部分であるので, 求める接触抵抗 ρ_C ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)は,

$$\rho_C = R_C \times L_T \times W \quad (2-42)$$

を用いて求めることができる. また,

$$R_{SK} = R_{SH} = \frac{R_C W}{L_T} \quad (2-43)$$

である.

(2) $R_{SH} \neq R_{SK}$ のとき

R_{SH} と R_{SK} が等しいとみなすことができない場合は, さらにエンド抵抗 R_E を測定する必要がある. エンド抵抗は図 2-16 に示すような等間隔で並んだ電極に対して測定した抵抗 R_1, R_2, R_3 を用いて,

$$R_E = \frac{1}{2}(R_1 + R_2 - R_3) \quad (2-44)$$

を解くことで求められる. このエンド抵抗を用いて, 伝搬長は

$$L_T = d / \cosh^{-1} \left(\frac{R_C}{R_E} \right) \quad (2-45)$$

で求められる. よって求める接触抵抗 ρ_C ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)は,

$$\rho_C = R_E L_T W \sinh \left(\frac{d}{L_T} \right) \quad (2-46)$$

を用いて求めることができる. また,

$$R_{SK} = \frac{\rho_c}{L_T^2} \quad (2-47)$$

$$R_{SH} = \text{直線の傾き} \times W \quad (2-48)$$

である。

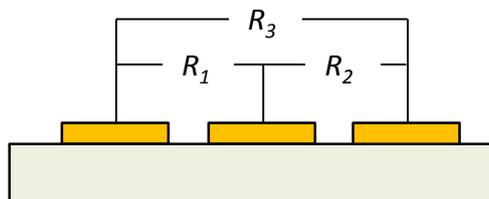


図 2-16 エンド抵抗の導出のための抵抗測定

2.6 バイパスダイオードの役割

太陽電池においては、直列接続されたモジュール中のセルの一部が陰になると、その部分の光電流が減少し、モジュール全体を流れる電流はモジュール中の各セルの電流の最小値に制限されるため、発電量が大幅に低下する。また、陰となったセルが単なるダイオードの逆接続となり抵抗が大きくなる。このセルには直列接続されている回路の全電圧が印加され、高抵抗セルを電流が流れて発熱することにより、セルの破壊が起こる。これを防ぐために太陽電池モジュールにはバイパスダイオードがセルに並列に接続されている。陰となったセルでは電流がバイパスダイオードを通して流れるため、発電量の減少が抑えられ、セルの破壊も防ぐことができる[35]。ここで、バイパスダイオードが接続されている場合の太陽電池モジュールの電流-電圧特性についてより詳細に説明する。

まず、バイパスダイオードが接続されていない場合における陰の影響について述べる。例として10個のセルが直列接続されたモジュールについて考える。図 2-17 左に示すように全てのセルに光があたっている場合には、モジュール全体では開放電圧が1つのセルの場合の10倍、短絡電流は1つのセルと同じだけ流れることができる。一方、図 2-17 右に示すように、9セルでは光があたって発電しているが、1つのセルが陰となり、そのセルにおいて光電流が流れないとき、直列接続では電流*I*は全てのセルで同じである必要があるため、モジュール全体を見ると、電流が流れなくなる。

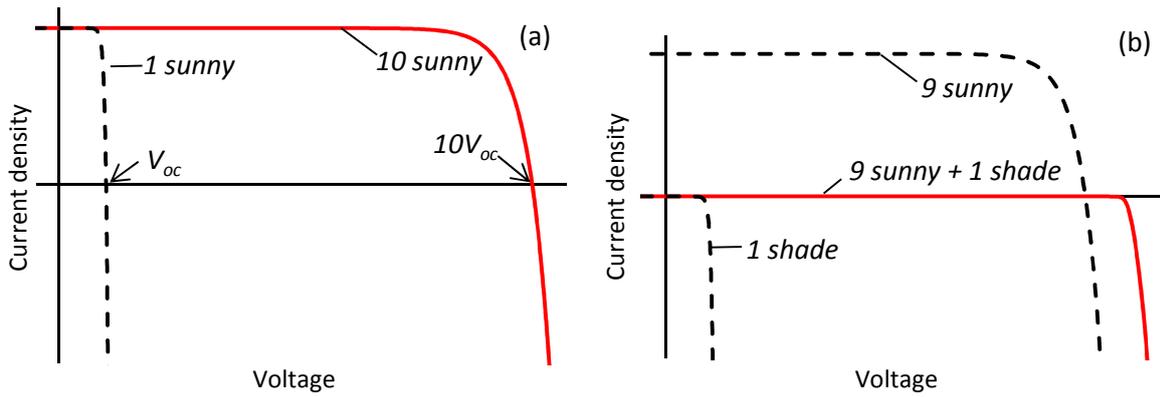


図 2-17 バイパスダイオードのない 10 直列接続太陽電池の電流-電圧特性, (a)10 つのセル全てに光があたっている場合, (b)1 つのセルのみ陰となっている場合)

このようなセル間の電流のばらつきによる悪影響を軽減するためのバイパスダイオードは太陽電池のセルに並列に接続される。その等価回路を図 2-18 に示す。バイパスダイオードは太陽電池の光電流の向きと同じ向きに接続されるため、陰となったセルでは、他のセルを流れる光電流がバイパスダイオードを流れることができる。そのため、発電量の低下と、セルの破壊を防ぐことができる。

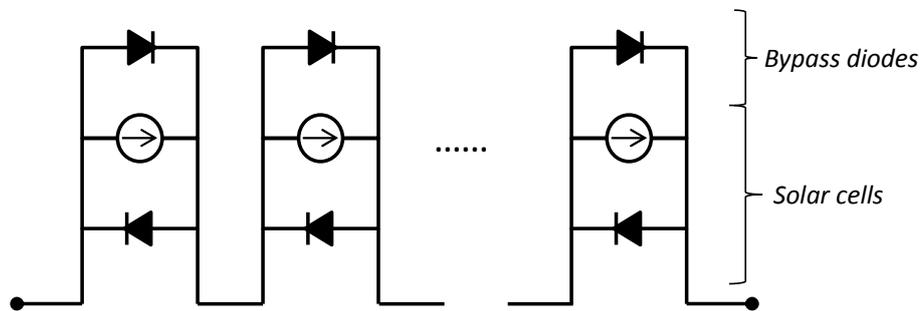


図 2-18 バイパスダイオード接続太陽電池モジュールの等価回路

バイパスダイオードが接続されている場合に、1 つのセルが陰となり、そのセルのバイパスダイオードが動作した場合の電流-電圧特性を図 2-19 左に示す。図 2-17 右と比べると、1 つのセルが陰となってもバイパスダイオードが接続されている場合は発電することができる。ただし、バイパスダイオードが動作しているため、電圧は陰となったセル 1 つ分の開放電圧 V_{oc} に加えて、動作しているバイパスダイオードにかかる電圧 V_b の分が減少することになる。 V_b はバイパスダイオードに用いられる半導体材料のバンドギャップに依存する。図 2-19 右には陰となるセルの数の変化による電流-電圧特性の変化を示した。バイパスダイオードはこのように、一部のセルが完全に陰となった場合だけでなく、直列接続されたセルの特性のばらつきや光強度分布のばらつきによる、電流のばらつきの影響も最小限に抑えることができる。

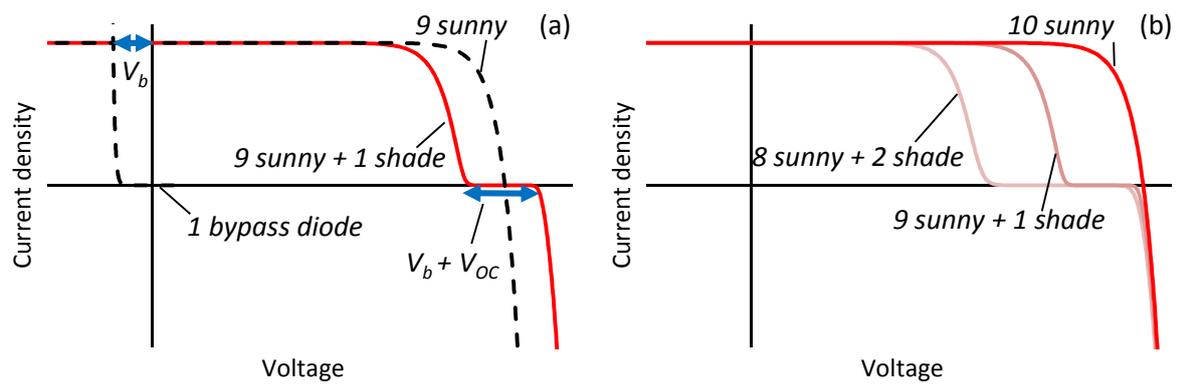


図 2-19 バイパスダイオード接続 10 直列太陽電池で(a)一つのセルが陰となった場合の電流-電圧特性と(b)陰となったセルの数が変化した場合の電流-電圧特性

第3章 10直列接続太陽電池の試作と評価

§ 1.3.2 で、高集光に応用できる太陽電池セルとして MIMs を紹介した。この章では、その MIMs の作製について述べる。まず、本研究で作製するバイパスダイオード集積 10 直列接続太陽電池のデザインについて述べ、次にその作製プロセスについて検討する。さらに、作製した直列接続太陽電池およびバイパスダイオードが正常に動作するかを検証し、最後に、非分割のセルとの特性の比較を行う。

3.1 デザイン

§ 1.4 で述べたように、本研究では数千倍集光においても効率の低下しない MIMs 構造の太陽電池を作製することを目標としている。この節では、そのデザインについてまとめる。

まず、目標とする数千倍集光のために必要な直列数について検討する。図 3-1 に式(2-21)にもとづいて算出した直列数と効率対集光度の関係を示す。ただし、太陽電池のパラメータはエピタキシャル成長させた多接合太陽電池において非集光で世界最高効率を示している InGaP/GaAs/InGaAs 太陽電池の値を用いた[36]。($J_{SC}(1) = 15 \text{ mA/cm}^2$, $V_{SC}(1) = 3 \text{ V}$, $R_S = 0.12 \Omega$, $\eta(1) = 38\%$, セルサイズ : $1 \times 1 \text{ cm}^2$) また、直列接続部は、先行研究における最小の幅から、 $50 \mu\text{m}$ とした[21]。まず、太陽電池セルを n 分割し、それらを直列接続する場合について考えると、式(2-22)より、面積損失を無視すれば短絡電流 $I_{SC}(1)$ は $1/n$ になる。このとき、直列抵抗成分が非分割のセルと分割後の 1 セルで変わらないと仮定すると、直列接続後の全体の直列抵抗成分は n 倍になると考えられる。この時、式(2-23)より効率の上限を与える集光度は n 倍にすることができるといえる。しかし、直列数を増やすと、より大きな集光度に耐えることができる一方で、直列接続部による面積損失が増えるため、図 3-1 のように効率が低くなる。近年の研究における太陽電池の集光度の上限が数百倍程度であることを考慮すると、面積損失による効率低下を抑え、数千倍の集光度を実現するためには 10 直列程度が適していると考えられる。そこで、本研究では、10 直列接続太陽電池を作製する。

セルサイズは現在の市場で主流となっている集光型太陽電池のセルサイズが $5.5 \times 5.5 \text{ mm}^2 \sim 10 \times 10 \text{ mm}^2$ であることから[37][38][39]、 $5 \times 5 \text{ mm}^2$ とした。また、直列接続部の幅は $200 \mu\text{m}$ とし、電極によるシャドールロスも合わせた全体の受光面積損失は 32% となるようなデザインとなっている。直列接続部の幅はプロセスの最適化を行うことでさらに狭くすることも可能であり、そうすることで受光面積損失は小さくでき、効率の低下も抑えられる。今回は、まず、プロセスを確立するために余裕を持った幅とした。さらに、§ 2.6 で述べたように、直列接続太陽電池にはバイパスダイオードが不可欠である。一般的な太陽電池モジュールでは、バイパスダイオードは外部から接続されているが、MIMs においてはそのような方式はコストパフォーマンスの点で適していない。また、MIMs に対しては、構造形成中の同一プロセスにおいてバイパスダイオードをモノリシック集積することが適していると考えられる。そこで、本研究では、太陽電池の層構造を追加することなく、また、直列接続を作製するためのプロセスを変えずにモノ

リシックにバイパスダイオードを集積するデザインとした。図 3-2 にこのバイパスダイオード集積 10 直列接続太陽電池の模式図を示す。

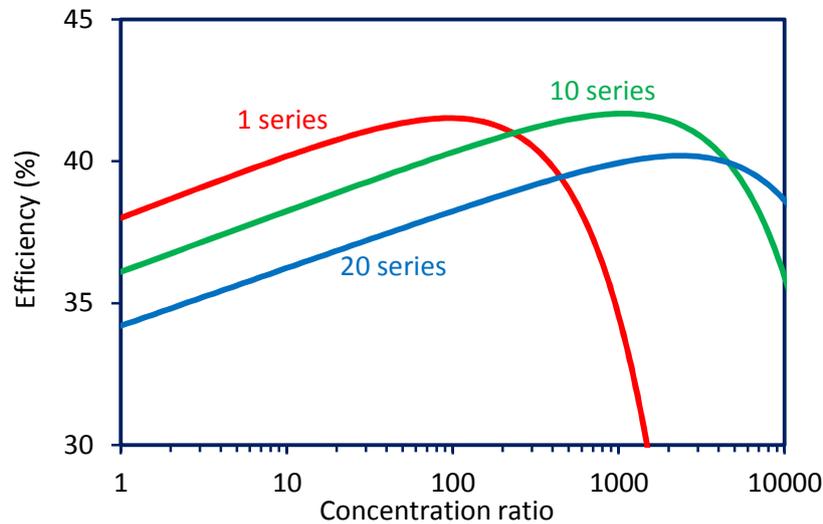


図 3-1 直列数と効率対集光度の関係

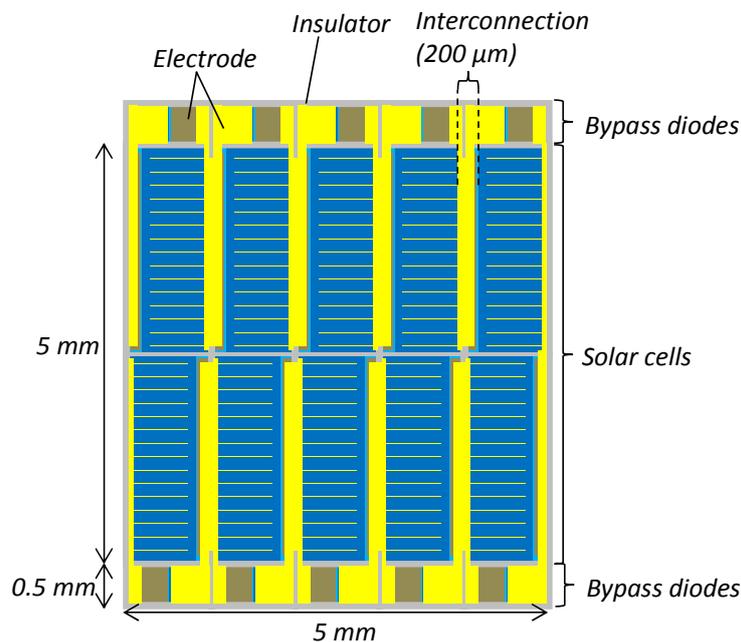


図 3-2 バイパスダイオード集積 10 直列接続太陽電池の模式図

3.2 作製プロセス

§ 3.1 では高集光応用に向けた MIMs 構造を持つ 10 直列接続太陽電池のデザインを示した。この節では直列接続太陽電池に用いるエピウエハの層構造を示した後でその作製プロセスについて詳しく述べる。

本研究では、MOVPE(Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy : 有機金属気相成長法)により半絶縁性

(SI)GaAs 基板上に図 3-3 のように結晶成長させた GaAs 単接合太陽電池と、InGaP/GaAs2 接合太陽電池を用いる。MOVPE は有機金属化合物の気体が反応炉に運ばれ、反応種の基板表面での吸脱着、表面拡散、格子形成によって薄膜結晶を基板の方位に応じて結晶成長させる技術である。

contact p-GaAs	0.2 μm	$1 \times 10^{19} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$	InGaP top cell (n on p)	(1.33 μm)
window $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$	0.03 μm	$5 \times 10^{18} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$	Tunnel junction	(0.065 μm)
emitter p-GaAs	0.1 μm	$2 \times 10^{18} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$	GaAs bottom cell (n on p)	(3.75 μm)
base i-GaAs	0.6 μm		contact p-GaAs	(2.0 μm)
base n-GaAs	3.0 μm	$1 \times 10^{17} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$	Substrate SI GaAs	
contact n-GaAs	1.8 μm	$2 \times 10^{18} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$		
Substrate SI-GaAs				

(a) GaAs

(b) InGaP/GaAs

図 3-3 直列接続太陽電池に用いる(a)GaAs, (b)InGaP/GaAs のエピウエハ層構造の概略

このような層構造の太陽電池を用いて直列接続構造を作製するためのプロセスの概要は次のようになる。

Process 1 素子分離

スパッタリングによって表面に厚さ400 nmの SiO₂を形成し、フォトリソグラフィによって、10 個の太陽電池セル(2.5 × 1 mm²)とそれらに並列な 10 個のバイパスダイオードになる部分(0.5 × 1 mm²)をポジティブレジスト(MICROPOSIT™ S1805)で保護する。その後、BHF(バッファードフッ酸):H₂O = 1:2 の水溶液により、レジストで保護されていない部分の SiO₂をウェットエッチングする。レジストはアセトン、IPA(イソプロパノール)、水で除去する。SiO₂をマスクとして、Cl₂を用いた ICP-RIE によって SiO₂のない部分(幅 10 μm)を SI-GaAs までドライエッチングする。

Process2 N 型コンタクト層露出

Process1 と同様の方法で、太陽電池セルの端、幅170 μm とそれに対して反対側のバイパスダイオード部分、幅500 μm を N 型コンタクト層までドライエッチングする。さらに、Process1, 2 のドライエッチングによる端面のダメージを軽減するために、NH₃: H₂O = 1:50 の水溶液に 10 秒間浸す。

Process3 N 型電極形成

Process2 で露出した N 型コンタクト層以外の部分をフォトリソグラフィによって、ネガティブレジスト(AZ5200NJ または AZ5214)で保護する。AuGe(380 nm), Au(500 nm)を熱蒸着する。アセトン、エタノール、水でレジストを除去し、リフトオフする。電極を合金化シオーミック接触とするため、380 °Cで 5 分間アニーリングする。

Process4 絶縁膜形成

スパッタリングによって表面に厚さ400 nmの SiO₂ 絶縁膜を形成し、さらに、素子分離によってできた溝の部分にフォトリソグラフィによって、幅80 μmのポリイミド(Photoneece™ PW1000) 絶縁膜を形成する。ポリイミドで保護されていない部分の SiO₂ 絶縁膜は BHF によってエッチングする。ポリイミドを170 °Cで30分、320 °Cで60分キュアする。

Process5 P型電極形成

Process3 と同様の方法で、隣接する太陽電池間、バイパスダイオード間に Ag(10 nm), Au(750 nm)を熱蒸着する。ただし、太陽電池部分の電極はグリッド幅10 μm, グリッドピッチ150 μmのくし型電極とする。

Process 6 コンタクト層除去

表面のコンタクト GaAs 層は、表面電極と半導体の間の接触抵抗を小さく抑えるためのものであり、電極直下以外の部分においては、光は吸収損失の原因となるため、除去する必要がある。そのため、窓層の InGaP をエッチストップ層として、NH₃:H₂O₂:H₂O = 1:1:50 の水溶液に1分浸けることで、コンタクト層を除去する。

Process 7 反射防止膜形成

表面での反射損失を軽減するため、スパッタにより、ZnS(50 nm), SiO₂(100 nm)をスパッタリングする。

ここで、本研究で用いた半導体プロセス技術のうち、スパッタリングとフォトリソグラフィについて簡単に述べ、プロセスで用いた条件を示す。

スパッタリング

イオンを固体に照射すると、衝突によって固体がイオンのエネルギーを受け取る。エネルギーを受けとった固体はさらに他の固体原子に衝突を繰り返し、固体表面から固体を形成する原子が放出される。この現象を用いて薄膜が形成される[40]。本研究においては、スパッタリングにより SiO₂ 薄膜を形成した。スパッタリングの標準条件を表 3-1 に示す。

表 3-1 スパッタリングの標準条件

Gas	Pressure	Source power	Temperature	Sputtering rate
Ar(12 sccm)	0.5 Pa	100 W	120 °C	4.5 nm/min

フォトリソグラフィ

リソグラフィはマスクのパターンを半導体ウェハー上の感光性物質(レジスト)転写する技術であり、そのうち紫外線を用いるものをフォトリソグラフィという。レジストにはポジ形とネガ形

がある。ポジ形レジストは露光前では現像液に溶けないが、露光された部分は変質し、溶けるようになる。ポジ形レジストはエッチング加工のマスクとして用いられることが多い。ネガ形レジストはマスクを用いた露光後にポストバークすることにより架橋反応が起こり、紫外線が照射された部分は現像液に不溶となる。その後、ウェハー全体を露光することで、初めマスクがあった部分のみが現像液に溶解する。ネガ形レジストは電極のリフトオフに用いられる[41][42]。今回用いたレジストの標準条件は表 3-2 に示す。

表 3-2 各種レジストのフォトリソグラフィ標準条件

Resist	S1805	AZ5200NJ	AZ5214	PW1000
Usage	Wet etch	Lift-off	Lift-off	Insulator
Spincoat	3000 rpm 60 s	3000 rpm 60 s	3000 rpm 60 s	3000 rpm 30 s
Pre-bake	110 °C 90 s	90 °C 120 s	90 °C 60 s	120 °C 180 s
Exposure	80 mJ/cm ²	20 mJ/cm ²	80 mJ/cm ²	175 mJ/cm ²
Reversal bake	-	120 °C 120 s	120 °C 120 s	-
Flood exposure	-	140 mJ/cm ²	140 mJ/cm ²	-
Development	NMD3, 60 s	NMD3, 120 s	NMD3, 60 s	NMD3, 120 s
Curing	-	-	-	170 °C 30 min 320 °C 60 min
Thickness	700 nm	4500 nm	2000 nm	3000 nm

GaAs を用いた場合は以上のようなプロセスで直列接続構造を作製することができる。このプロセスの概略図(Process1~Process5)を図 3-4 に示す。InGaP/GaAs₂ 接合を用いた場合にも同様のプロセスを用いることができる。ただし、GaAsはp-on-nの構造であるのに対し、InGaP/GaAsはn-on-p構造であるので、Process3とProcess5で用いる電極材料が逆になる。このようなプロセスを用いることにより、バイパスダイオードを各太陽電池セルに並列に、プロセスの数を増やすことなく集積することが可能になる。また、比較用として、非分割の $5.5 \times 5.5 \text{ mm}^2$ のセルを次の3種類作製した。

(a)SI-GaAs 基板上的くし型電極のセル(On SI Linear)

(b)SI-GaAs 基板上的十字型電極のセル(On SI Inverted)

(c)N-GaAs 基板上的十字型電極のセル(On N Inverted)

これらのサンプルの模式図を図 3-5 に示す。層構造は図 3-3 で示した構造と基板のみが異なる。また、SI-GaAs 基板では10直列と同様にN型コンタクト層を露出し、表面にN電極を形成した。N-GaAs 基板では一般的な太陽電池と同様に裏面電極を用いた。

次節からは、Process1, 2で用いるドライエッチングと、Process4の絶縁膜形成についての詳細について述べる。

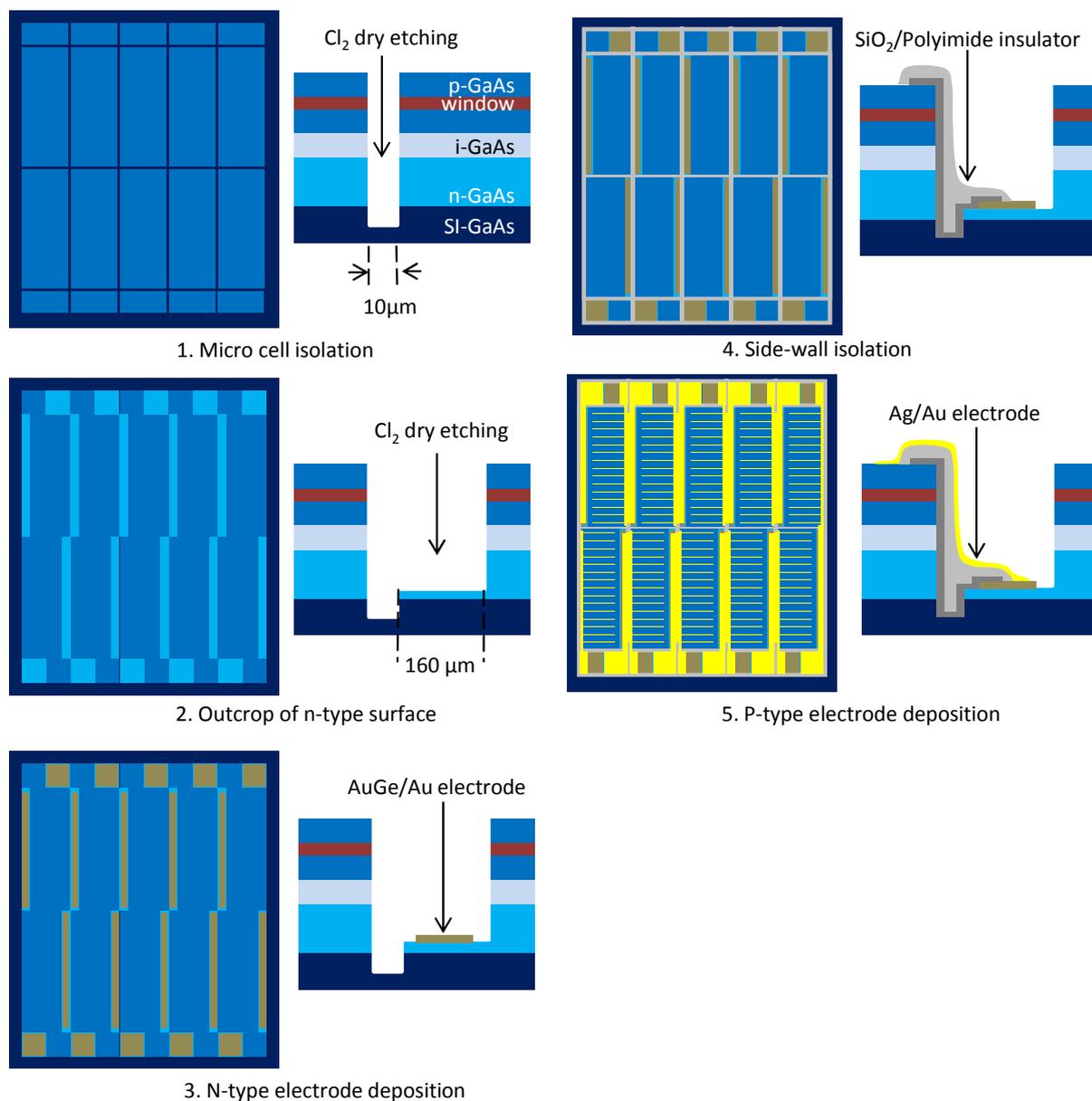


図 3-4 直列接続 GaAs 太陽電池作製プロセスの概要(1)素子分離(2)N 型コンタクト層露出(3)N 型電極形成(4)絶縁膜形成(5)P 型電極形成

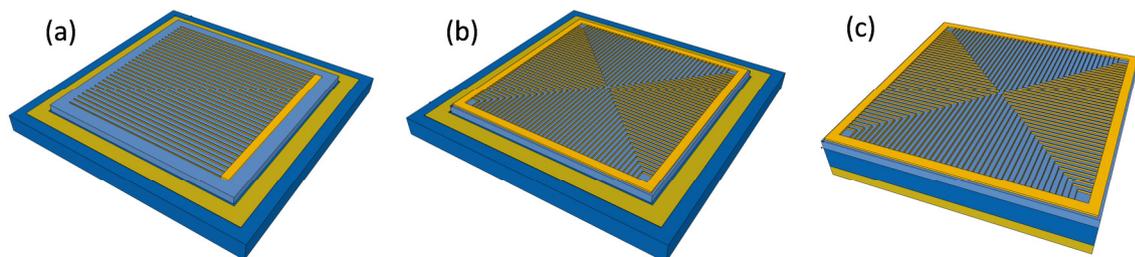


図 3-5 比較用セルの模式図(a)SI-GaAs 基板くし型電極(b)SI-GaAs 基板十字型電極(c)N-GaAs 基板十字型電極

3.2.1 GaAs, InGaP のエッチング

エッチングはリソグラフィ技術により形成したフォトレジストをマスクとしてウェハー表面の原子を除去する加工技術である。エッチングの方法としては、液体を用いるウェットエッチングと、気体を用いるドライエッチングの2種類がある。また、それぞれについて、全方向に同じ速度でエッチングされる等方性エッチングと、決まった方向にだけエッチングされる異方性エッチングがある。本研究においては、まず、層構造が複雑な多接合太陽電池にも応用できるプロセスであることが重要となる。ウェットエッチングでは、多層構造の場合、層ごとに溶液を変える必要がある。しかし、ドライエッチングにおいては Ga, As, In, P, Al は全て Cl₂ を用いてエッチングすることができる。そのため、これらの元素からなる化合物半導体の多接合太陽電池に適したプロセスである、ドライエッチングを用いることとした。さらに、受光面積損失を少なくできるプロセスであることも重要となる。等方性エッチングでは、エッチングの深さによって、マスクの下の横方向のアンダーカットが避けられない。一方、異方性エッチングではほぼ垂直にエッチングすることができる。以上を踏まえて、本研究ではドライエッチングかつ異方性エッチングである、ICP-RIE を用いることとした。ICP-RIE はプラズマを用いてエッチングガスを表面に吸着させ、蒸気圧が高く、気体になりやすい反応生成物を形成する。その生成物が表面から脱離することでエッチング反応が進む。前述したように、Ga, As, In, P, Al は全て Cl₂ を用いてエッチングすることができる。しかし、表 3-3 に示すように、In の塩化物の沸点はそれ以外の塩化物の沸点に比べて極めて高く、反応生成物が形成されても脱離が困難となっている[43]。そのため、In を含む層がある場合には基板を加熱した状態でエッチングを行う必要がある。今回はエッチングにおける圧力と沸点を考慮し、InGaP/GaAs 太陽電池においては基板を220 °Cに加熱した状態でエッチングを行った。

表 3-3 主たる III-V 族元素塩化物における沸点[43]

反応生成物	沸点(°C)	反応生成物	沸点(°C)
GaCl ₂	535	AlCl ₃	183
GaCl ₃	201	PCl ₅	162
InCl	608	PCl ₃	76
InCl ₂	560	AsCl ₃	130
InCl ₃	600		

また、エッチングレートは Cl₂ の流量に依存するため、Cl₂ と Ar の流量の比とエッチング時間を変えて、エッチング深さを段差計で測定することにより、エッチングレートを算出した。Cl₂ と Ar の流量は合わせて10 sccmとなるようにし、その他の条件は、*Gas Pressure* = 1.00 Pa, *Source Power* = 100 W, *Bias Power* = 100 Wで固定した。まず、マスクとして用いた SiO₂ のエッチングレートを図 3-6 に示す。SiO₂ のエッチングは Cl₂ との化学反応に起因するエッチングではなく、SiO₂ に Cl₂ や Ar のガスが衝突することによる物理的なエッチングが支配的である。これは、本実験ではガスの圧力を一定にしているため、どの流量比においても0.7 nm/s程度で一定と

なっていることから明らかである。

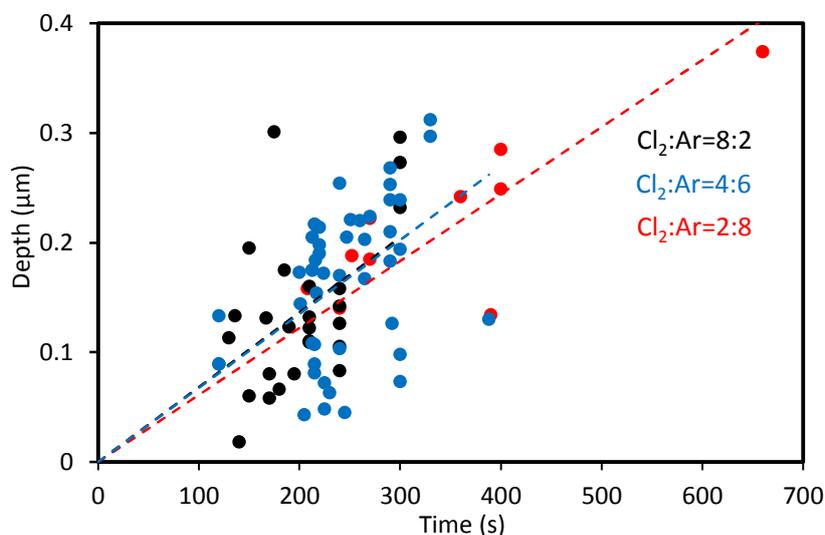


図 3-6 Cl₂を用いたドライエッチングにおける SiO₂のエッチングレート

次に、同様の方法で、GaAs 及び InGaP/GaAs のエッチングレートを測定した。その結果を図 3-7 に示す。エッチングレートは GaAs において、Cl₂:Ar=2:8 で 6.9 nm/s, Cl₂:Ar=4:6 で 19 nm/s であり、InGaP/GaAs においては、Cl₂:Ar=4:6 で 19 nm/s, Cl₂:Ar=8:2 で 32 nm/s という結果となった。この結果から、Cl₂の流量が増えるほどエッチングレートが速くなることが確かめられた。

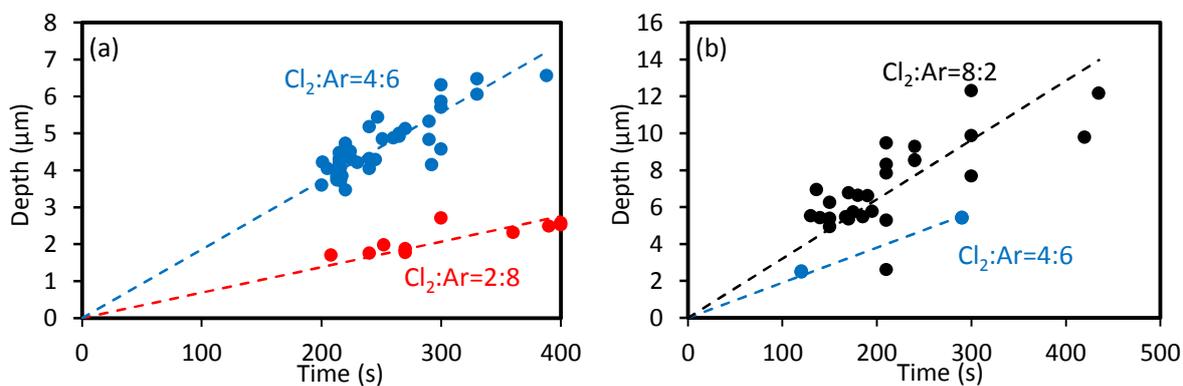


図 3-7 Cl₂を用いたドライエッチングにおける(a)GaAs, (b)InGaP/GaAs のエッチングレート

Process1, 2 における GaAs, InGaP/GaAs のターゲット深さを表 3-4 に示す。SiO₂ マスクはスパッタリングにより形成しており、厚さは 400 nm 程度である。この厚さを決定した理由としては、この厚さよりも厚い膜を形成した場合、フォトリソグラフィのプロセスにおいて SiO₂ 膜が剥離する可能性が高くなり、また、BHF による SiO₂ のウェットエッチングにおいて、レジストの下のアンダーカットが大きくなってしまうためである。そのため、GaAs や InGaP/GaAs のエッチングがターゲット深さに達する前に厚さ 400 nm の SiO₂ マスクがなくなることを防ぐように、エッチン

グ時間は制限され、570 s以下でターゲット深さに到達できるエッチングレートである必要がある。その一方で、エッチングレートが速いと、エッチング深さの制御が難しくなる。その2点を踏まえて、 Cl_2 とArの流量の比はGaAsにおいて $\text{Cl}_2 : \text{Ar} = 4 : 6$ 、InGaP/GaAsにおいて $\text{Cl}_2 : \text{Ar} = 8 : 2$ とした。

表 3-4 GaAs, InGaP/GaAs の Process1, 2におけるターゲット深さ

Sample	GaAs	InGaP/GaAs
Process1 (nm 以上)	5730	7145
Process2 (nm)	4830 ± 900	6145 ± 1000

この条件を用いてドライエッチングをした直列接続部の断面 SEM(Scanning Electron Microscope)写真を図 3-8 に示す。エッチング深さの制御ができていることがこの写真から確認できる。また、Process1 で素子分離された部分は Process2 のコンタクト層露出の際にはフォトリソグラフィによるレジストマスクがないため、スパッタリングされた SiO_2 マスクは除去され、エッチング深さは Process1 と Process2 のエッチング深さを合わせた深さとなるはずである。しかし、実際にはこの SEM 写真からわかるように、素子分離部の深さは Process1 のエッチング深さとほぼ変わらない。これは、Process1 でエッチングされた部分のアスペクト比が大きいため、素子分離部の底面にスパッタされた SiO_2 マスクが BHF を用いたウェットエッチングにより取りきれず、Process2 においてはほとんどエッチングされなかったためと考えられる。このため、Process1 でのエッチング深さは十分に確保する、または、アスペクト比が大きくなる範囲でエッチングを行い、Process2 で SiO_2 マスクが完全に除去できる状態にする必要がある。また、エッチングの側壁は GaAs では丸みを帯びているのに対し、エッチングレートの速い InGaP/GaAs では垂直性に優れている。さらに、GaAs セルでは窓層の InGaP 層以外は材料が GaAs のみであるため、エッチング断面は平滑になっている。しかし、層構造が複雑な InGaP/GaAs では断面が粗くなっており、電流のリークパスが増える可能性がある。現時点ではドライエッチングによる断面のダメージを軽減するためのプロセスとしてアンモニア水へ浸けるというプロセスがあるが、このプロセスをさらに改善することでより平滑な断面が得られると考えられる。

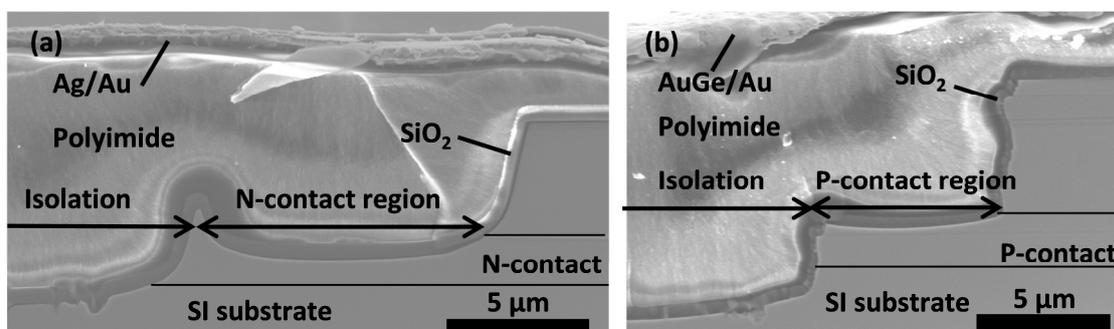


図 3-8 (a)GaAs と(b)InGaP/GaAs における直列接続部のエッチング断面 SEM 写真

3.2.2 絶縁膜形成

直列接続する太陽電池間の短絡を防ぐための絶縁膜としては、EB(Electron Beam)蒸着を用いて斜めから蒸着させるというプロセスを用いた先行研究があるが、その太陽電池においては5直列のセルのうち3セルが短絡する結果となっている[44]. その他の先行研究では、PECVDを用いて、 SiO_2 [20], SiN_x [24], SiN/SiO_2 層[45]を蒸着した例や、ポリイミドをフォトリソグラフィによって形成した例[23][46]などがある. 本研究では、絶縁膜形成の手法として次の3種類の方法を用いた.

1. SiO_2 スパッタリング

絶縁膜を形成する部分以外をフォトリソグラフィによって、ネガティブレジスト(AZ5214)で保護する. SiO_2 (200 nm)をスパッタリングする. アセトン, エタノール, 水でレジストを除去し, リフトオフする.

2. ポリイミド(PW1000)

フォトリソグラフィによって, ポリイミド(PW1000)絶縁膜を形成し, その後, ポリイミドを170°Cで30分, 320°Cで60分, 窒素雰囲気下でキュアする.

3. SiO_2 スパッタリングとポリイミドの2層絶縁膜

スパッタリングによって表面に厚さ400 nmの SiO_2 絶縁膜を形成し, フォトリソグラフィによって, ポリイミド(PW1000)絶縁膜を形成する. ポリイミドで保護されていない部分の SiO_2 絶縁膜は $\text{BHF}:\text{H}_2\text{O}=1:2$ の水溶液によりによってエッチングする. ポリイミドを170°Cで30分, 320°Cで60分, 窒素雰囲気下でキュアする.

これらの3種類の方法を用いて, まずはバイパスダイオードを集積していない5直列接続 GaAs 太陽電池を作製した. 図 3-9 に SiO_2 絶縁膜を用いた太陽電池とポリイミド絶縁膜を用いた太陽電池について直列数を増やしながら測定した AM1.5G における電流-電圧特性の結果を示す. 測定は太陽光を模擬したソーラーシミュレータによって光を照射しながら行った. x1~x5 はそれぞれ1直列~5直列を表している. SiO_2 絶縁膜を用いた場合では, 電流が流れていないことがわかる. これは, スパッタリングによる SiO_2 が直列接続部において, ほぼ一様の膜厚で成膜されており, 平滑性が不十分であることにより, 電極が断線していると考えられる. ポリイミド絶縁膜を用いた場合では, 電流は流れているが, ダイオード特性を示しているのが, 5番目のセルだけという結果となっている. これは, ポリイミドが液体の状態から固体の状態に変化する際に, ひびが入りやすく[47], それにより絶縁性が不十分で短絡してしまったためと考えられる. 5番目のセルは側壁に絶縁膜を介した電極が蒸着されていない唯一のセルであるため, 絶縁膜の影響がなく, ダイオード特性を示したと考えられる.

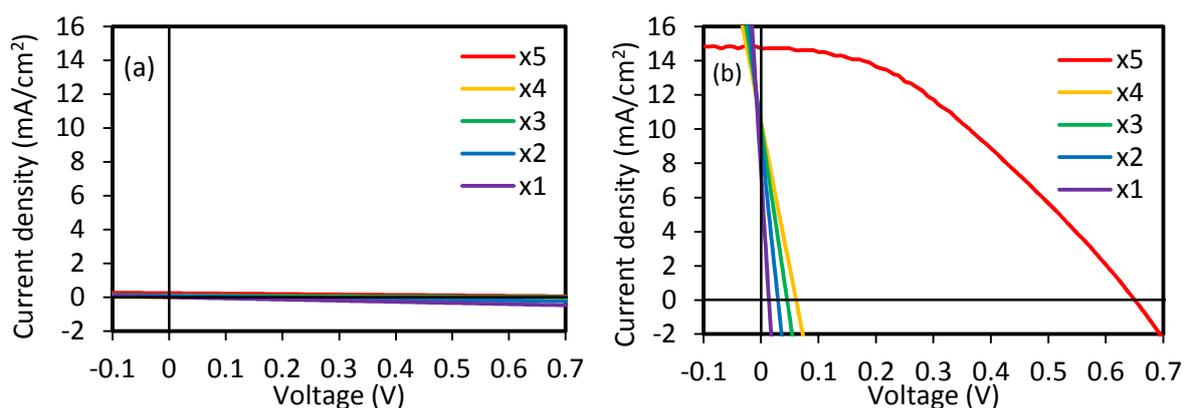


図 3-9 (a)SiO₂絶縁膜と(b)ポリイミド絶縁膜を用いた5直列接続GaAs太陽電池の電流-電圧特性

図 3-10 に SiO₂ とポリイミドの2層絶縁膜を用いた5直列接続GaAs太陽電池の電流-電圧特性を示す。この太陽電池においてはすべてのセルでダイオード特性を示しており、さらに、1つのセルでは V_{oc} が0.95Vであるのに対し、5直列では1つのセルの5倍の4.8Vを示している。この結果から、SiO₂とポリイミドの2層絶縁膜を用いた場合に、直列動作に成功することが確かめられた。これは、2層絶縁膜がSiO₂の絶縁性とポリイミドの平滑性を兼ね備えているためであると考えられる。このため、目標とするバイパスダイオード集積10直列接続太陽電池においても、この2層絶縁膜を用いることとした。

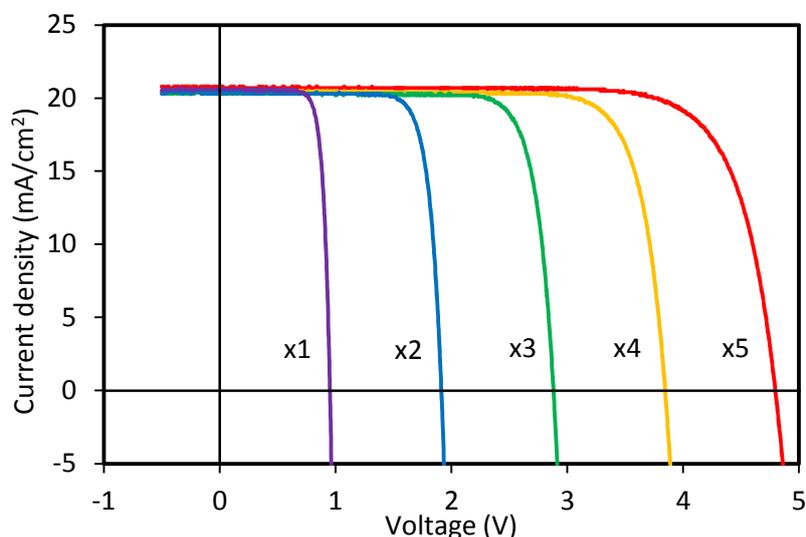


図 3-10 SiO₂とポリイミドの2層絶縁膜を用いた5直列接続GaAs太陽電池の電流-電圧特性

3.3 バイパスダイオード集積10直列接続太陽電池の動作

3.3.1 バイパスダイオード集積10直列接続GaAs太陽電池

§3.2で述べた作製プロセスを用いてバイパスダイオード集積10直列接続GaAs太陽電池(10 series)を作製した。図3-11に実際に作成した10直列接続GaAs太陽電池の上面図を示す。同一基板には比較のため、直列接続されておらず、バイパスダイオードが集積されていないセルも同

様のプロセスで作製した。以下、このセルを Single セルと呼ぶ。

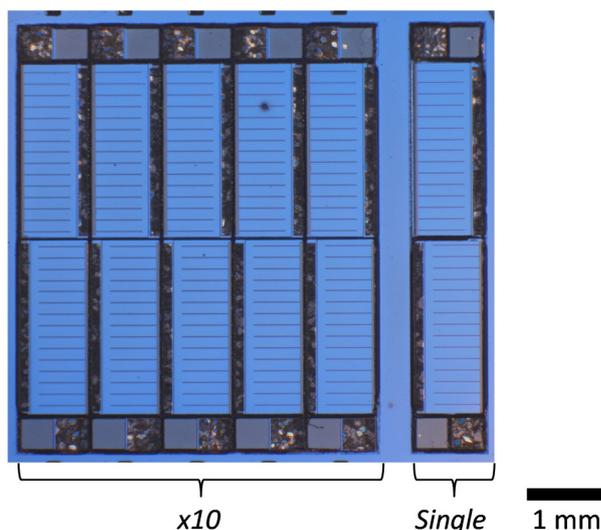


図 3-11 作製した 10 直列接続 GaAs 太陽電池の上面図

まず、図 3-12 に GaAs Single セルの電流-電圧特性と外部量子効率を示す。このプロセスにおいて Single セルが太陽電池として正常に動作することが確認できた。

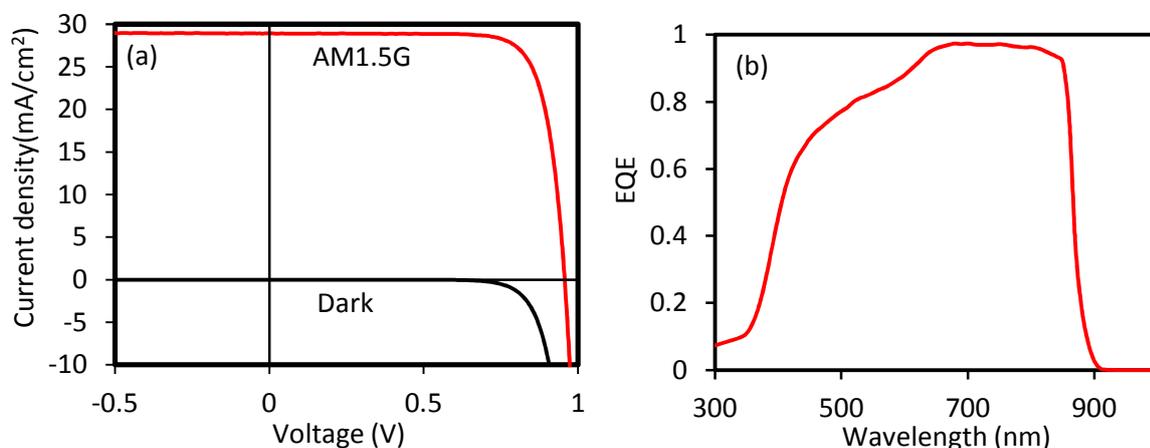


図 3-12 GaAs Single セルの(a)電流-電圧特性及び(b)外部量子効率

次に、図 3-13(a)にこの 10 直列接続 GaAs 太陽電池の電流-電圧特性を示す。また、表 3-5 に Single セルと 10 直列接続 GaAs 太陽電池の性能を示す。ただし、この章で示す効率は受光面積損失は無視した値となっている。Single セルと 10 直列の 1 つのセルでは性能に大きな差は見られない。10 直列の 1 つのセルの V_{oc} が 0.94 V であるのに対し、10 直列ではその 10 倍の 9.4 V を示しており、バイパスダイオードを集積した場合も直列動作に成功した。FF と効率が 1 つのセルに比べて、10 直列で低くなっているのは、直列することで直列抵抗成分が大きくなっている影響であると考えられる。また、バイパスダイオードが正しく動作しているかを確かめるために、10 個のセルのう

ち, 1つのセルまたは2つのセルを黒色のプラスチック板を用いて陰とした場合の電流-電圧特性, 電力-電圧特性を図 3-13(b)に示す. セルの一部を陰とした場合も, §2.6 で示した電流-電圧特性と同様の特性を示し, 他のセルで発電した電流を外部に取り出せることが確認できた. また, 1つのセルが陰となった場合の V_{oc} の減少は, およそ2Vとなっている. これは, 太陽電池, バイパスダイオードともに V_{oc} が1V程度のGaAsからなっているためである.

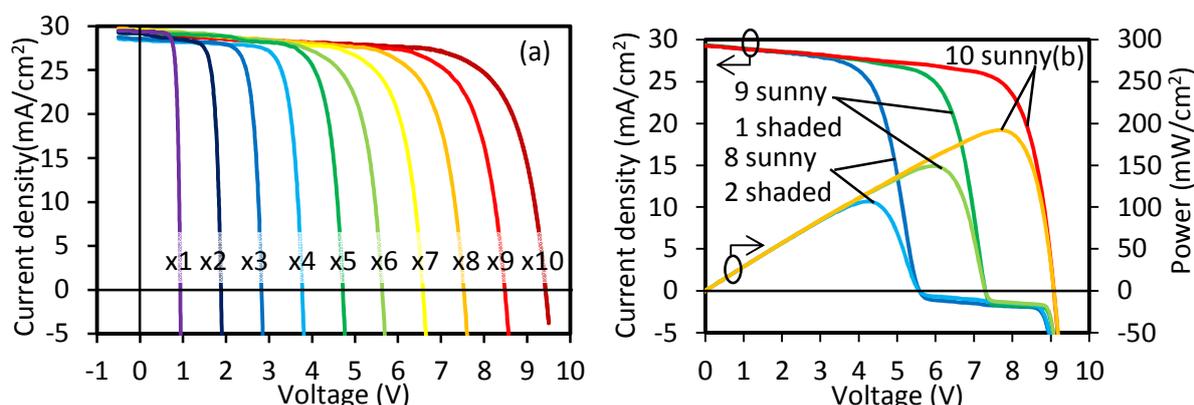


図 3-13 (a) 10 直列接続 GaAs 太陽電池の電流-電圧特性(AM1.5G)と(b)バイパスダイオードの特性評価

表 3-5 GaAs Single セル及び 10 直列接続 GaAs 太陽電池の性能

sample	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	FF	η (%)
Single	28.9	0.96	0.81	21.9
Series x1	29.4	0.94	0.78	21.5
Series x10	29.4	9.4	0.72	19.8

3.3.2 バイパスダイオード集積 10 直列接続 InGaP/GaAs 太陽電池

GaAs 太陽電池の場合と同様に InGaP/GaAs 太陽電池においても 10 直列接続太陽電池を作製した. まず, 10 直列接続太陽電池と同一基板上に同一のプロセスで作製した Single 太陽電池の電流-電圧特性を図 3-14(a), 性能を表 3-6 に示す. また, InGaP トップセルと GaAs ボトムセルの外部量子効率を図 3-14(b)に示す. InGaP トップセルの外部量子効率の測定では, 常にバイアス光として長波の光を照射し, ボトムセルを十分に励起した状態としておく. そして, その時取り出されるキャリアの数と単色光をさらに照射した時に取り出されるキャリアの数の差分から外部量子効率を算出する. また, GaAs ボトムセルの外部量子効率の測定では, 常にバイアス光として白色光を照射し, トップ, ボトムセルを十分に励起した状態とする. この時, ボトムセルには擬フェルミポテンシャルの差が生じるため, その差を打ち消すために順方向に1Vのバイアス電圧を印加した状態で単色光を照射し, 外部量子効率を測定した. Single セルにおいては GaAs を材料とした場合と同じプロセスを用いて太陽電池として動作することがわかった.

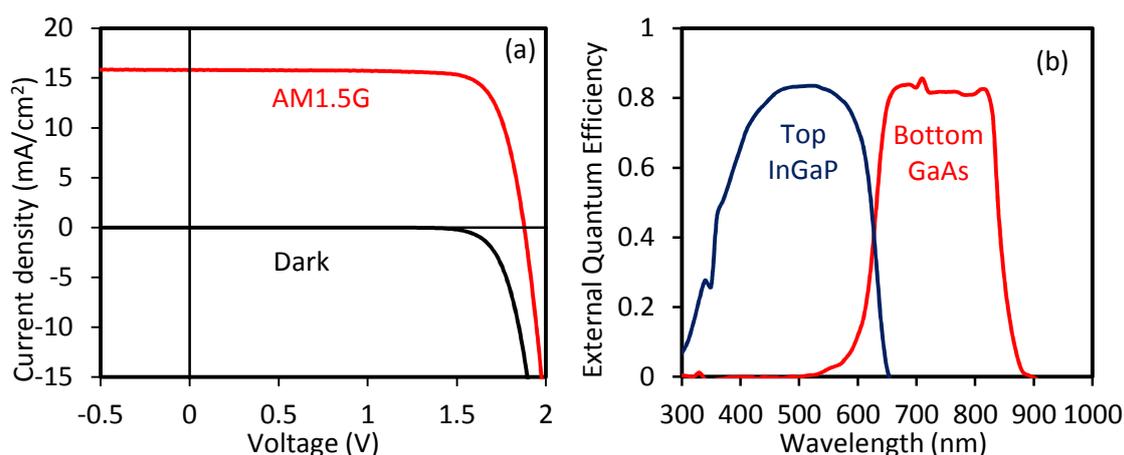


図 3-14 InGaP/GaAs 太陽電池(Single)における(a)暗電流と光照射時の電流-電圧特性と(b)外部量子効率

表 3-6 InGaP/GaAs 太陽電池(Single)の性能

sample	J_{SC} (mA/cm ²)	V_{OC} (V)	FF	η (%)
Single	15.8	1.88	0.80	23.6

次に、同一基板上に作製した 10 直列接続太陽電池の暗電流の特性を図 3-15(a)に示す。このグラフからはバイパスダイオード、太陽電池ともに直列接続に成功していることがわかる。バイパスダイオードは現時点では Process2 で露出された GaAs の P 型コンタクト層と表面の InGaP の N 層で作製しているため、太陽電池と同じく InGaP/GaAs となっており、1つのセルが陰となった場合には V_{OC} の減少はおよそ4Vとなってしまふ。現在のプロセスにバイパスダイオード部分のボトムセルの N 型層を露出させるウェットエッチングプロセスを追加することで、 V_{OC} の減少は単接合 GaAs 太陽電池と同じくおよそ2Vにまで小さくできると考えられる。

また、光照射時における 10 直列接続 InGaP/GaAs 太陽電池の特性は、図 3-15(b)に示すように、著しく悪化している。これは、光照射時には SI-GaAs を通してリーク電流が流れるためであると考えられる。このリーク電流についての考察は § 3.3.3 で述べる。

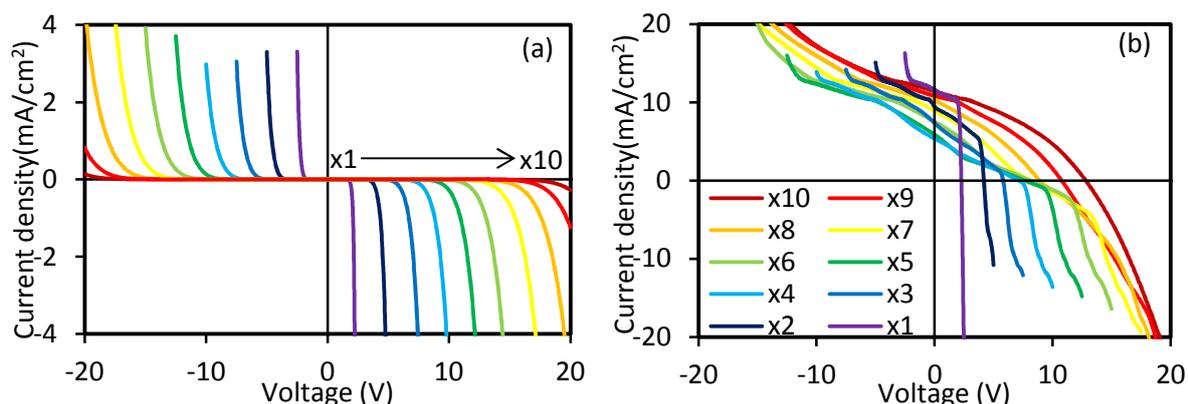


図 3-15 10直列接続 InGaP/GaAs 太陽電池の(a)暗電流と(b)光照射時の電流-電圧特性

3.3.3 SI-GaAs 基板のリーク電流

SI-GaAs 基板の抵抗は図 3-16 に示すように、ダーク状態では $10^{10} \Omega/sq$ 程度であるが、光を照射するとキャリアが生成されるため、 $10^7 \Omega/sq$ 程度にまで減少する[48]。このため、MIMs においては素子分離した部分で図 3-17(a)のように、電極により覆われている場合には光が電極で反射されるため、絶縁性が保たれるが、図 3-17(b)のように SiO₂/ポリイミド絶縁膜のみの部分では光が透過できるため、リーク電流が流れると予測できる。

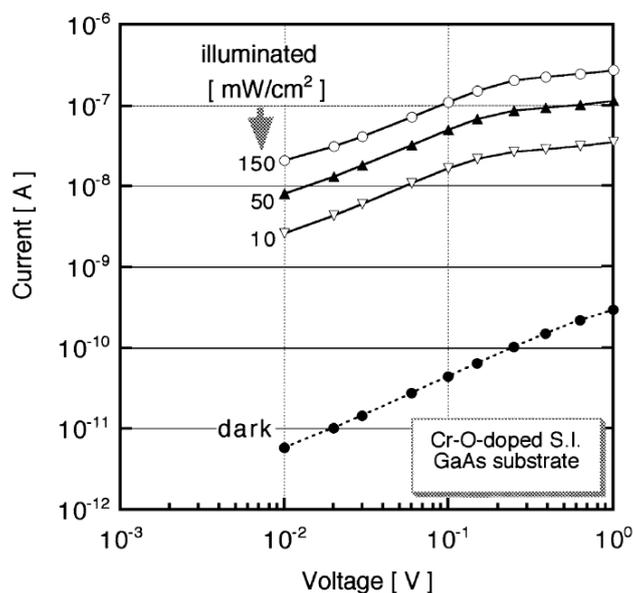


図 3-16 SI-GaAs 基板の電流-電圧特性の光強度による比較[48]

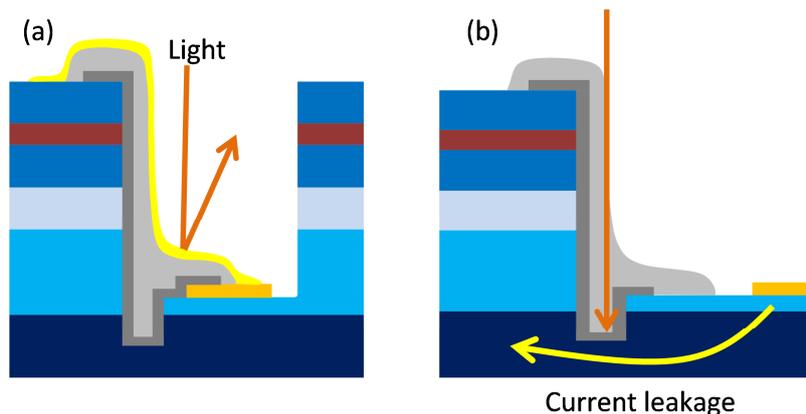


図 3-17 直列接続部の断面図(a)電極によって光が反射され SI-GaAs に届かない場合(b)SI-GaAs に光が届く場合

このリーク電流の影響を確かめるためには、リーク電流が流れる部分に並列抵抗成分を追加した等価回路モデルを考える必要がある[49]. 図 3-18 にリーク電流を考慮した等価回路モデルを示す. 黒色で示した等価回路は各セルにバイパスダイオードが接続された場合の一般的な 10 直列接続太陽電池の等価回路である. ただし, 実際は太陽電池, バイパスダイオードともに 2 接合となっているので 1 つのセルに対して 2 つの太陽電池の直列接続を考えなければいけないが, 簡単のため, 1 つの太陽電池としてまとめて考えた. また, 各太陽電池セルの並列抵抗成分は十分大きく無視できるとした. 図 3-18 右の上面図の丸で囲まれた部分は SiO_2 /ポリイミド絶縁膜のみで電極で覆われていない部分であり, リーク電流を考慮する必要がある. 丸の色と追加した並列抵抗成分の色が対応している.

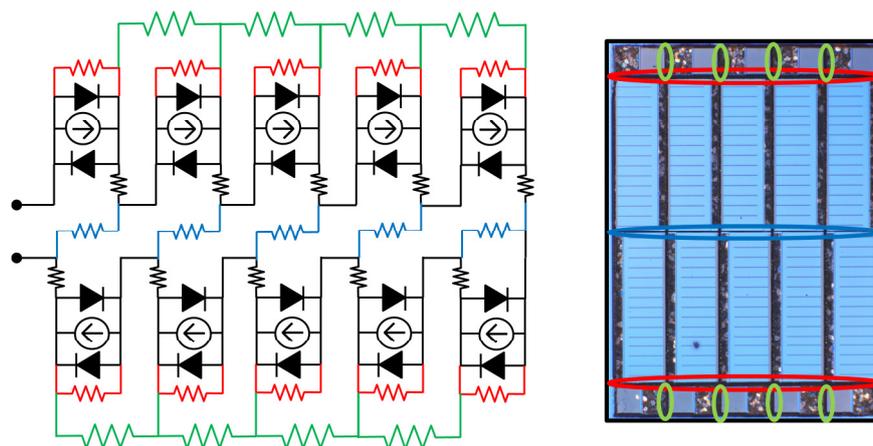


図 3-18 リーク電流を考慮した等価回路モデル(丸の色と追加した並列抵抗成分の色が対応している)

SPICE(Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)を用いたこの等価回路モデルについて暗電流(dark), AM1.5G, 図 3-18 の青色の丸の部分を黒色の板で隠した場合(Middle-shade)の 3 種

類について、測定結果と比較した。図 3-19 にその結果、表 3-7 に用いたパラメータを示す。緑色の丸で囲んだ部分は、青色、赤色の丸で囲んだ部分に比べて一つ当たりの面積が半分となっているため、抵抗値も半分となっている。測定結果を見ると、暗状態で直列動作をしていた太陽電池は光照射時に特性が悪くなっているが、太陽電池の中央部分に光が当たらないようにすることで、並列抵抗成分が大きくなり、 V_{OC} 、 FF の特性が大幅に改善している。この測定結果とシミュレーションの結果はほぼ一致しており、AM1.5G における特性の悪化の原因は SI-GaAs 基板を介したリーク電流であることが確かめられた。

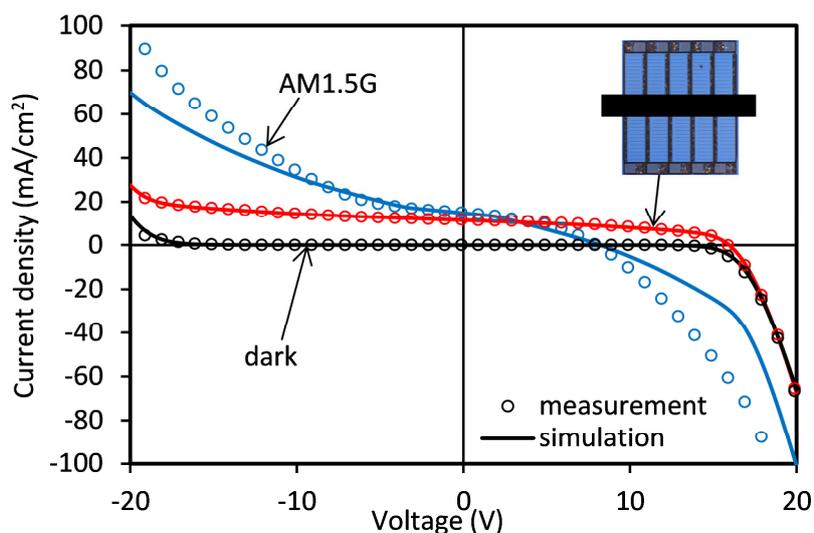


図 3-19 10 直列接続 InGaP/GaAs 太陽電池における電流-電圧特性の測定値とシミュレーション結果に比較

表 3-7 等価回路モデルのシミュレーションに用いたパラメータ

Parameter	dark	AM1.5G	Middle-shadow
I_L (A)	0	Measurement results	Measurement results
I_0 (A)	1.73×10^{-13}	1.73×10^{-13}	1.73×10^{-13}
η_{pv}	3.41	3.41	3.41
η_{bypass}	4	4	4
R_s (Ω)	200	200	200
$R_{sh,red}$ (Ω)	5.0×10^7	5.0×10^4	5.0×10^4
$R_{sh,blue}$ (Ω)	5.0×10^7	5.0×10^4	5.0×10^7
$R_{sh,green}$ (Ω)	2.5×10^7	2.5×10^4	2.5×10^4

10 直列接続 GaAs 太陽電池の場合にリーク電流の影響があまり見られなかった理由には次の 2 点が考えられる。

(1)短絡電流が InGaP/GaAs に比べて大きいために、リーク電流による影響が小さくなっている。

(2)電圧が InGaP/GaAs に比べて小さいために、流れるリーク電流が小さくなっている。

これらの理由を考慮し、10直列接続 GaAs 太陽電池においても SPICE モデルと測定結果の比較を行ったところ SI-GaAs の並列抵抗成分は InGaP/GaAs よりも1桁大きい、 $R_{sh,red} = 5.0 \times 10^5 \Omega$ 、 $R_{sh,blue} = 5.0 \times 10^5 \Omega$ 、 $R_{sh,green} = 2.5 \times 10^5 \Omega$ でほぼ一致した。

3.3.4 遮光層の導入

§3.3.3において、10直列接続 InGaP/GaAs 太陽電池の特性悪化の原因が SI-GaAs に光が照射されることによる、並列抵抗成分の減少であることが確かめられた。この影響を軽減するためには、SI-GaAs に光があたらないようにすることが必要となる。そのための遮光層の導入例としては、MEMS の分野において GaAs の 12×9 直列(108直列)太陽電池の絶縁膜として、ポリイミド/SiO₂/TiAu/SiO₂を用いた例がある。絶縁膜層の中間に光を反射する TiAu の遮光層を導入することにより、図 3-20 のようにポリイミドのみを絶縁膜として用いた場合と比べて、 V_{oc} は75.6Vから84.2V、 FF は0.35から0.57へ改善された[47]。

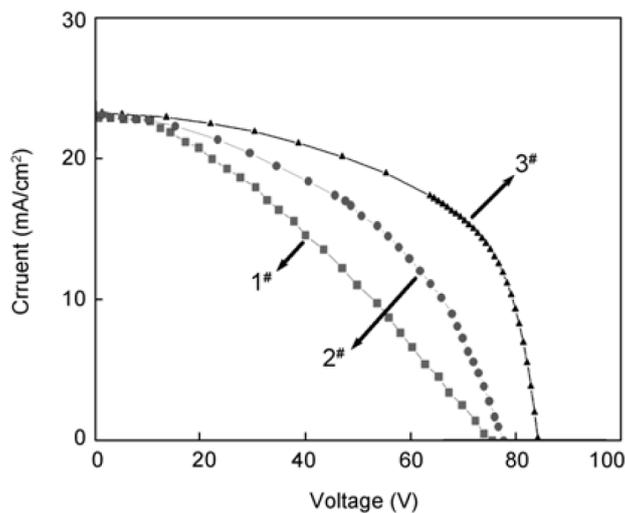


図 3-20 (1[#])ポリイミド、(2[#])ポリイミド/SiO₂、(3[#])ポリイミド/SiO₂/TiAu/SiO₂を絶縁膜として用いた場合の GaAs の 12×9 直列太陽電池の電流-電圧特性[47]

遮光層としては、光を反射する金属または光を吸収する物質を用いることが考えられるが、集光応用を考えた場合に光の吸収する物質はセルが高温となる要因になってしまう。そのため、本研究においてはポリイミド/Ag を遮光層として用いることとした。遮光層を形成する部分は図 3-18 に示したリーク電流の原因となっていると考えられる部分で、図示すると図 3-21 のようになる。遮光層を形成するプロセスは Process7 の反射防止膜形成の前に行った。これは、反射防止膜形成後にプロセスを行うと、反射防止膜が剥離してしまうおそれがあるためである。プロセスの詳細としては、まず、Process4 の絶縁膜形成で用いたフォトマスクを使用し、Process4 と同様の方法でポリイミド絶縁膜(幅100 μm)を形成する。その上に図 3-21 で示した部分以外をフォトリソグラフィによって、ネガティブレジスト(AZ5214)で保護する。Ag(20 nm)を熱蒸着する。アセトン、エタノール、水でレジストを除去し、リフトオフする。Ag の幅は素子分離部の幅10 μmを

十分に覆うことのできる幅として $30\ \mu\text{m}$ とした。

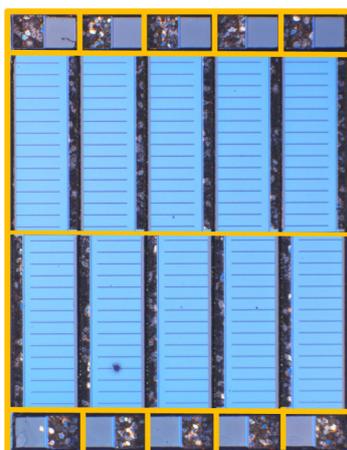


図 3-21 遮光層を形成する部分

このようにして形成した遮光層の有無による電流-電圧特性と性能の比較を図 3-22、表 3-8 に示す。ただし、遮光層のみの影響を比較するため、反射防止膜を形成する前について比較した。遮光層を導入することにより、10直列中の1つのセルについては、リーク電流が抑えられ、特性に大きな改善が見られた。また、10直列全体においては、 V_{oc} が $8.77\ \text{V}$ から $14.8\ \text{V}$ へ大きな改善が見られた。

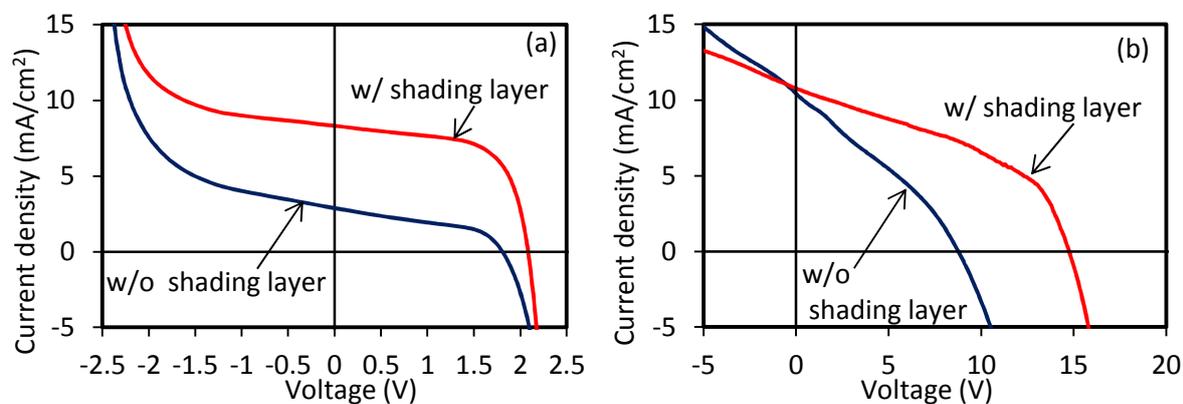


図 3-22 遮光層の有無による(a)1セル、(b)10直列での電流-電圧特性の変化

表 3-8 遮光層の有無による性能の比較

sample	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	FF	η (%)	
Series x1	w/o shading layer	2.89	1.81	0.43	2.26
	w/ shading layer	8.32	2.08	0.63	10.9
Series x10	w/o shading layer	10.4	8.77	0.30	2.74
	w/ shading layer	10.8	14.8	0.41	6.58

さらに、反射防止膜を表面につけることにより、 J_{SC} が増加し、それに伴い V_{OC} 、 FF 、効率も改善される。しかし、全てのセルが図 3-14 で示した Single セルの特性を示し、SI-GaAs 基板の並列抵抗成分が、光があたっていない状態と同じ値($5.0 \times 10^7 \Omega$ または $2.5 \times 10^7 \Omega$)を示すとした場合のシミュレーション結果と測定値を比較すると、図 3-23、表 3-9 からわかるように V_{OC} 、 FF 、 η には改善の余地がある。

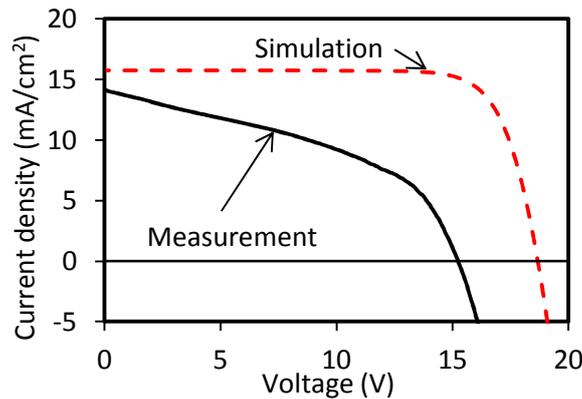


図 3-23 反射防止膜を形成した後の 10 直列接続 InGaP/GaAs 太陽電池の電流-電圧特性の測定結果と、SI-GaAs 基板に光があたらない場合の電流-電圧特性の SPICE モデルの比較

表 3-9 図 3-23 の測定とシミュレーションの性能の比較

	J_{SC} (mA/cm ²)	V_{OC} (V)	FF	η (%)
Measurement	14.1	15.2	0.43	9.33
Simulation	15.8	18.7	0.79	23.2

特性が依然として悪い原因としては、まず 1 点目に 10 直列のうち、2 つのセルが短絡してしまったことが挙げられる。短絡の原因としては、コンタクト層露出のドライエッチングにおいて表面電極が蒸着される部分までエッチングされコンタクト層が露出してしまったことが考えられる。歩留りを向上させることで、 V_{OC} の改善が見込まれる。2 点目に素子分離された部分が遮光層によって完全には覆われていないことがある。これは、遮光層を Process6 の後に導入したため、フォトリソグラフィの際の位置合わせが困難であったためである。フォトリソグラフィのアライメント精度向上のためには、先行研究で絶縁膜としてポリイミド/SiO₂/TiAu/SiO₂ を用いた例[47]があったように、Process3 の絶縁膜形成の段階で遮光層を導入することが考えられる。また、遮光層の Ag の幅を太くすることも考えられる。3 点目に遮光層として用いた Ag の厚さ(20 nm)が十分でなく、透過光を抑えきれなかったこと原因として考えられる。図 3-24 に Ag の膜厚と波長 633 nm の光の透過率 T 、反射率 R の関係を示す。このグラフからわかるように、透過率を十分低減するためには、80 nm 以上の厚さが必要であると言える。このように遮光層を改善することで FF の改善が見込まれ、それに伴って効率も向上すると考えられる。

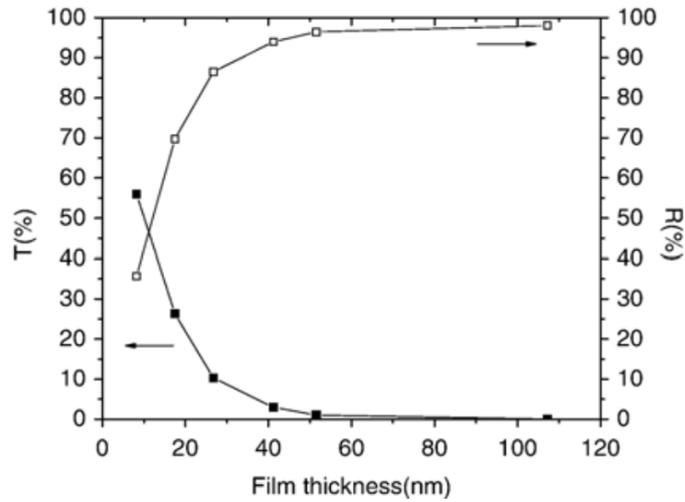


図 3-24 Ag の膜厚に対する波長 633 nm の光の透過率 T ，反射率 R の依存性[50]

3.4 非分割セルと直列接続セルの比較

次に，比較用として作製した SI-GaAs 基板上的のくし型電極のセル ($5.5 \times 5.5 \text{ mm}^2$) と Single セル ($2.5 \times 1 \text{ mm}^2$) の特性を比較し，セルの大きさによって太陽電池の特性がどのように変化するかについて検証した．その結果を図 3-25 と表 3-10 に示す．まず， I_{SC} は目的通り，セルサイズを小さくすることで抑えることができている．比較セルのシャドーロスが 7.9% であるのに対し，Single セルのシャドーロスが 32% と大きいため，電流の減少が大きい，電極で覆われていない部分で換算した電流密度はどちらのセルもほぼ同じ値が得られた． V_{OC} は GaAs, InGaP/GaAs とともに，直列接続のセルで小さくなっている．これは，セルサイズが小さくなると，式 (2-41) の L_{PER}/A が大きくなり，飽和電流が大きくなるためである[51]．この V_{OC} の減少を最小限にするためには，ドライエッチングによるセル側壁のダメージを抑えるようなパッシベーションのプロセスをさらに追加する必要があると考えられる． FF や効率はセルのサイズを小さくした場合でも特性は劣化していない．InGaP/GaAs の比較用セルにおいて特に FF が悪くなっているのは，電極形成時のプロセスが最適化されていなかったためと考えられる．また，GaAs と InGaP/GaAs を比較すると，2 接合の InGaP/GaAs の方が，小電流であり，より高集光に適した構造であるといえる．

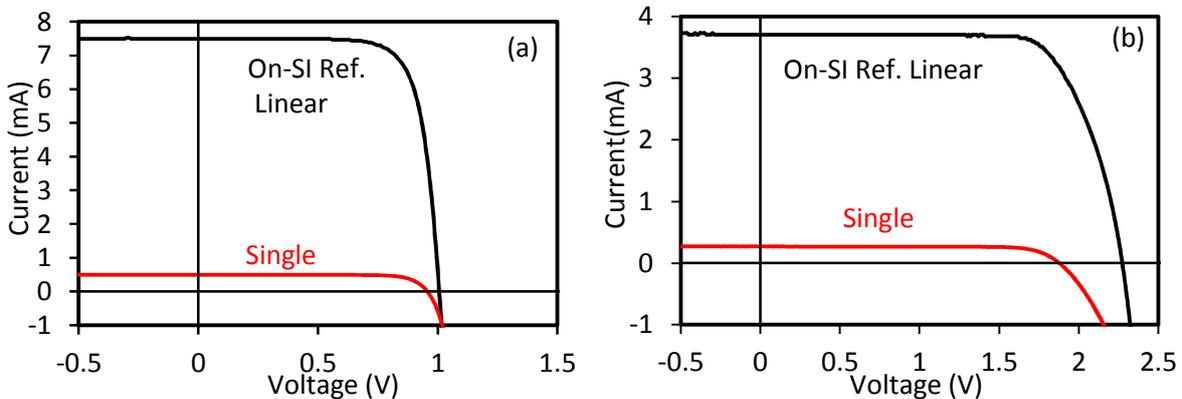


図 3-25 (a)GaAs, (b)InGaP/GaAs のセルサイズによる電流-電圧特性の比較

表 3-10 GaAs, InGaP/GaAs のセルサイズによる性能の比較

sample		Cell size (mm ²)	Shadow loss (%)	J _{SC} (mA/cm ²)	I _{SC} (mA)	V _{OC} (V)	FF	η (%)
GaAs	On-SI Ref. Linear	30.25	7.9	26.9	7.50	1.01	0.76	20.7
	Single	2.5	32	28.9	0.49	0.96	0.79	21.9
InGaP/GaAs	On-SI Ref. Linear	30.25	7.9	13.3	3.71	2.27	0.73	22.2
	Single	2.5	32	15.8	0.27	1.88	0.80	23.6

3.5 第3章のまとめ

第3章においては、ジュール熱損失を小さく抑え、高集光応用に適していると考えられる10直列接続太陽電池を作製し、直列接続動作の評価を行った。SiO₂/ポリイミドの2層絶縁膜を用いることにより、9.4Vの開放電圧を得られるバイパスダイオード集積10直列接続GaAs太陽電池の作製に成功した。また、バイパスダイオードが正常に動作することも確認した。InGaP/GaAs₂接合の10直列接続太陽電池においては、暗電流の特性からは10直列接続に成功していることが確認できた。一方、光照射時には特性の悪化が見られたが、SPICEモデルからSI-GaAs基板へ光が照射されることによるリーク電流が原因となっていることがわかった。そこで、ポリイミド/Agの遮光層を導入することにより、リーク電流を抑えることに成功し、大幅な特性改善が見られた。非分割セルと比較すると、直列接続セルにおいては、面積の分割によって、予測通りに電流を十分に低く抑えることができているが、開放電圧の減少を最小限に抑えることが今後必要といえる。

第4章 集光下での特性評価

作製した 10 直列接続太陽電池が非分割セルに比べてより高集光に耐えうるかを評価するために、集光下における特性を測定した。まず、一般的に用いられている N-GaAs 基板上に形成したセルに対して、SI-GaAs 基板を用いることにより、集光下でどのような影響があるかについて、それぞれの非分割セルの集光下における特性を比較することで、検討する。さらに、くし型と十字型の 2 種類の電極パターンの違いによる影響も評価する。また、太陽電池の構造を GaAs 単接合から InGaP/GaAs₂ 接合にすることで最大効率を与える集光倍率がどれほど大きくすることができるのかについても比較する。最後に、セルの大きさを小さくすることによる特性の変化を調べるために、10 直列接続太陽電池と SI-GaAs 基板のくし型電極の非分割セルの集光下の特性を比較する。

4.1 基板と電極パターンが集光下の特性に与える影響

一般的な太陽電池においては N 型または P 型にドーピングされた導電性の基板を用い、基板の裏面全体に電極が蒸着される。しかし、直列接続太陽電池においては、モノリシックな素子分離を可能にするために、SI-GaAs 基板を用いる必要がある。そのため、基板の裏面に電極を蒸着することができず、表面のエッチングにより露出されたコンタクト層の部分に電極を蒸着している。この構造の違いが集光下でどのような影響を与えるかを調べるために、SI-GaAs 基板十字型電極の非分割セルと N-GaAs 基板十字型電極の非分割セルの集光下での特性を比較した。集光下での特性評価は、ソーラーシミュレータの光をレンズによって集光することにより測定した。セルの温度はペルチェ素子によって一定に保った。また、集光下の効率は受光面積損失も考慮した結果となっている。

図 4-1 に集光度と効率の変化を表す。集光度は電流-電圧特性で得られた J_{SC} と非集光時における短絡電流密度 $J_{SC}(1)$ との比率により求めている。SI-GaAs 基板では、9 倍集光での効率が最も高く、それ以上集光すると効率が著しく低下する結果となった。一方、N-GaAs 基板では効率の著しい低下は見られず、13 倍集光時に最大効率を得た。

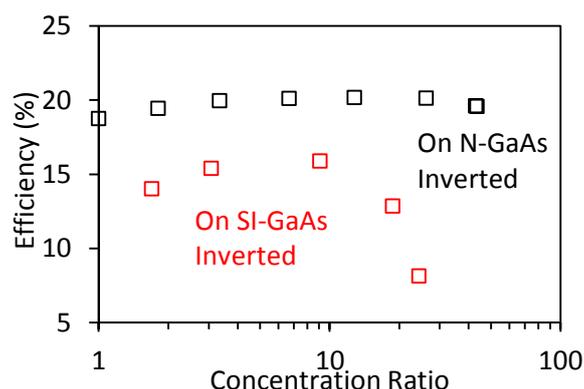


図 4-1 SI-GaAs 基板と N-GaAs 基板における集光下での効率の変化

また、SI 基板上のセルにおいて電極パターンが十字型の場合とくし型の場合についての特性を比較した。これは、一般的な集光型太陽電池では直列抵抗成分を小さくすることのできる十字型電極を用いているのに対し、10 直列接続太陽電池においてはくし型電極を用いているためである。図 4-2 に電極パターンの違いによる集光下での効率の変化を示す。同一の SI 基板上のセルについては十字型電極では 9 倍集光まで効率が上昇するのに対し、くし型電極においては非集光時が最も効率が高く、集光すると効率が著しく低下する結果となった。

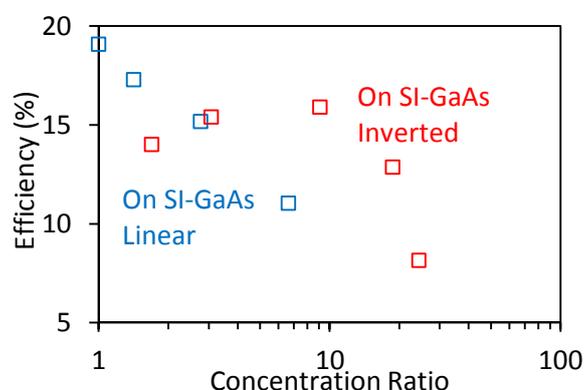


図 4-2 SI-GaAs 基板十字型電極とくし型電極における集光下での効率の変化

この時、 V_{oc} の変化を比較すると図 4-3(a) SI-GaAs 基板くし型電極、N-GaAs 基板十字型電極では、ほぼ同じく対数関数的に増大していた。また、SI-GaAs 基板十字型電極では 10 倍集光までは対数関数的に増大している。しかし、 FF は図 4-3(b) に示すように、N-GaAs 基板十字型電極ではほぼ変わらないのに対し、SI-GaAs 基板では集光することで著しく低下し、SI-GaAs 基板十字型電極では 10 倍以上で著しく低下している。つまり、この FF の減少が効率低下の最大の要因である。 FF の減少は § 2.4 で述べたように、直列抵抗成分で生じるジュール熱損失に起因しており、SI-GaAs 基板とくし型電極を用いることで直列抵抗が増大していると考えられる。この直列抵抗成分の増大の原因は第 5 章でより詳細に検討する。

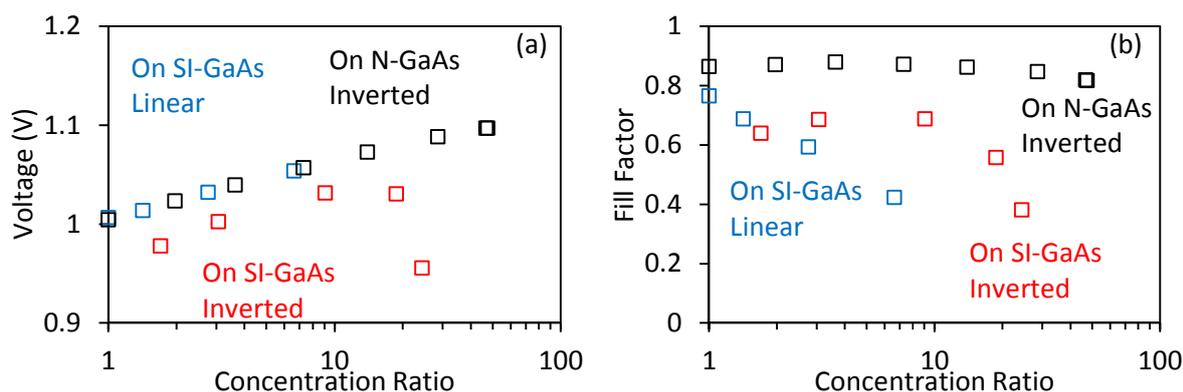


図 4-3 非分割セルの集光下での(a) V_{oc} と(b)FFの変化

4.2 GaAs 単接合と InGaP/GaAs2 接合の集光下における特性の比較

集光型太陽光発電においては、単接合に比べてより高効率を示す多接合太陽電池がセルとして用いられる。また、§3.4において比較したように GaAs 単接合に比べて InGaP/GaAs2 接合は小電流であるためより集光下での特性が良いと考えられる。そこで、どの程度 InGaP/GaAs2 接合が優位となるかについて検討する。

最大効率を示す集光倍率を求める式(2-23)と、表3-10の結果を用いると InGaP/GaAs2 接合においては GaAs 単接合の 3.6 倍の集光度まで効率が增加すると計算できる。ただし、理想係数は 2 接合で単接合の 2 倍になると仮定し、直列抵抗成分は変わらないとした。

実際の測定結果を見ると図4-4に示されるように、InGaP/GaAs では予想よりも大きな 7 倍集光まで効率が上昇した。これは、InGaP/GaAs の理想係数、または、直列抵抗成分が計算で用いた値とは異なったためと考えられる。いずれにせよ、InGaP/GaAs2 接合を用いることでより高集光に耐えうることを確認できた。

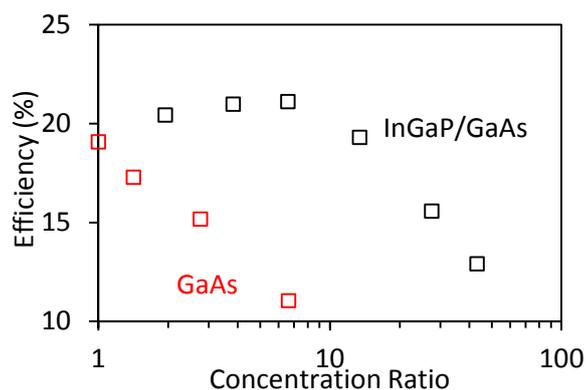


図 4-4 GaAs と InGaP/GaAs の集光下での効率の変化

4.3 10 直列接続太陽電池の集光下における優位性

10 直列接続太陽電池は非分割のセルに比べてセルの面積が小さくなるため、小電流となり、より高集光まで効率の低下が起こらないと予想される。式(2-23)によれば、10 直列で 1 つのセル面

積が非分割セルの 1/10 になり、他のパラメータが変わらないとすると、最大効率を示す集光度は 10 倍になると予想できる。

電極パターンや基板による影響を小さくするために、10 直列接続太陽電池と比較用の SI-GaAs 基板くし型電極セルで特性を比較する。図 4-5 からわかるように、10 直列接続 GaAs 太陽電池では電流が小さく抑えられているために、非分割セルに比べて、高い集光度でも直列抵抗成分による FF の減少があまり見られない。そのため、図 4-6 で示すように、10 直列接続太陽電池においては 12 倍集光まで効率が上昇した。予想よりも大きい集光度まで効率が上昇した理由としては、10 直列太陽電池においてはセル 1 つあたりの V_{oc} が非分割セルより小さいことや直列抵抗成分の影響があると考えられる。また、非分割セルに比べて効率が小さくなっているのは、10 直列接続太陽電池は直列接続部により受光面積損失が大きいためである。直列接続部の幅は、N 型コンタクト層露出部、絶縁膜、電極のバスバーの幅によって決められている。このうち N 型コンタクト層露出部の幅が $170 \mu\text{m}$ と最も多い割合を占めており、面積損失を少なくするためには、この部分の面積を小さくする必要がある。しかし、この面積を小さくすると、N 型電極の面積も小さくなるため、接触抵抗とのトレードオフを考える必要がある。また、この部分の面積を小さくすることに伴い、絶縁膜の幅も小さくしなければならない。絶縁膜の幅はプロセスによる制限があるが、スパッタリングではなく、PECVD による SiN_x 絶縁膜を用いた場合に $57 \mu\text{m}$ という値を達成した先行研究があるように[21]、プロセスをさらに改善することで、より受光面積損失を小さくし、効率を改善することができる。

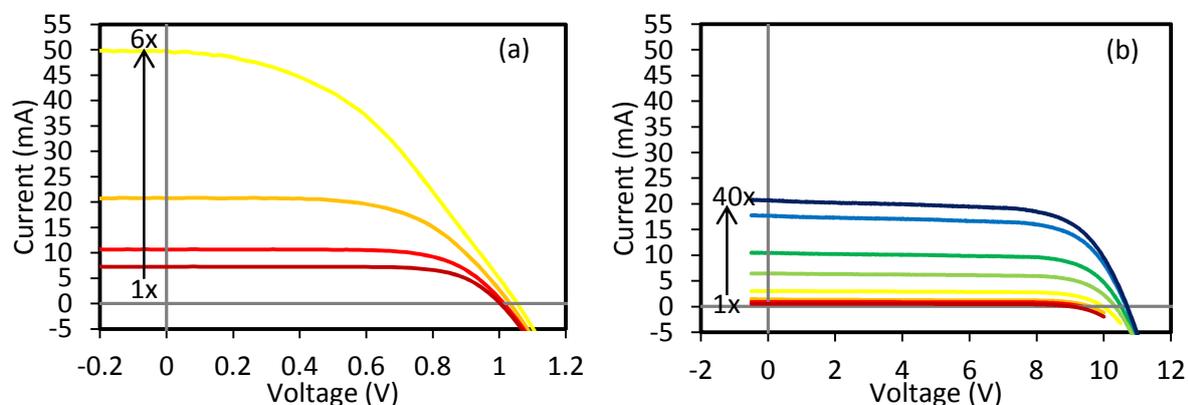


図 4-5 (a)SI-GaAs 基板くし型電極非分割セルと(b)10 直列接続 GaAs 太陽電池の集光下での電流-電圧特性の変化

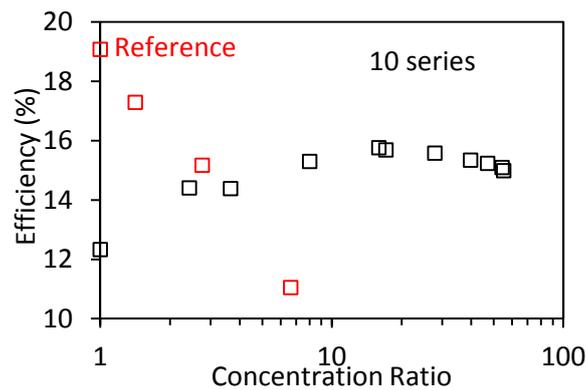


図 4-6 非分割セルと 10 直列接続 GaAs 太陽電池の集光下での効率の変化

次に、InGaP/GaAs₂ 接合においても、10 直列接続にすることでどの程度集光倍率を上げることができるかを調べるために、非分割セルと Single セル、10 直列接続太陽電池の集光下での効率の変化を比較した。その結果、Single セルでは図 4-7 に示すように 37 倍集光まで効率が低下しないことが確かめられた。10 直列接続した場合は、遮光層の最適化ができていないため、効率は低い、37 倍集光しても効率が下がらないことがわかった。

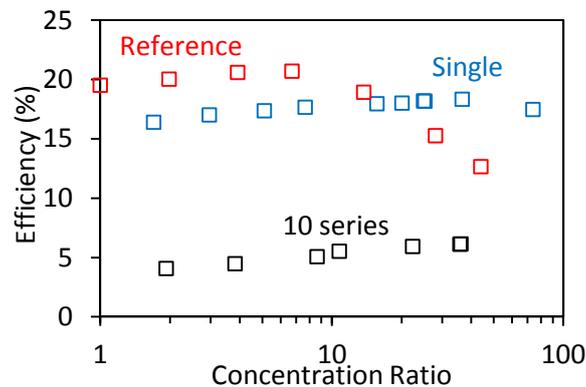


図 4-7 InGaP/GaAs セルにおける比較用セル、Single セル、10 直列接続セルの集光下での効率の変化

4.4 第4章のまとめ

本章では作製した 10 直列接続太陽電池の集光下での優位性を評価するために、集光度と効率の変化を測定した。本章のまとめとして、実験結果から導かれる高集光へ向けた展望を示す。

まず、10 直列接続構造を用い、1 つあたりのセルサイズを小さくすることで、電流を小さく抑えられるため最大効率を示す集光度は GaAs において非分割の場合よりも 12 倍大きくすることができる。さらに、GaAs 単接合から InGaP/GaAs₂ 接合へ層構造を変えることにより、小電流、大電圧を示し、集光度はさらに 7 倍大きくなることが確認できた。また、基板と電極パターンが集光下における特性に影響を与えることがわかり、SI-GaAs 基板、くし型電極を用いた太陽電池セルを N-GaAs 基板、十字型電極を用いた太陽電池と同程度まで直列抵抗成分を小さくすることが

できれば、さらに13倍集光度を大きくすることができると見込める。これらの技術を全て合わせ、N-GaAs基板と同等の直列抵抗成分を持つ10直列接続InGaP/GaAs太陽電池を作製することで、最大効率を示す集光度は1092倍になると期待される。(図4-8参照)

10直列接続太陽電池でこのようなさらなる高集光を実現するためには、SI-GaAs基板くし型電極を用いることによる直列抵抗成分の影響を検討し、直列抵抗成分を小さくするためのデザインの最適化が必要といえる。また、直列接続部があることによる受光面積損失も大きくなっているため、受光面積損失を小さくするようなデザインを考える必要がある。

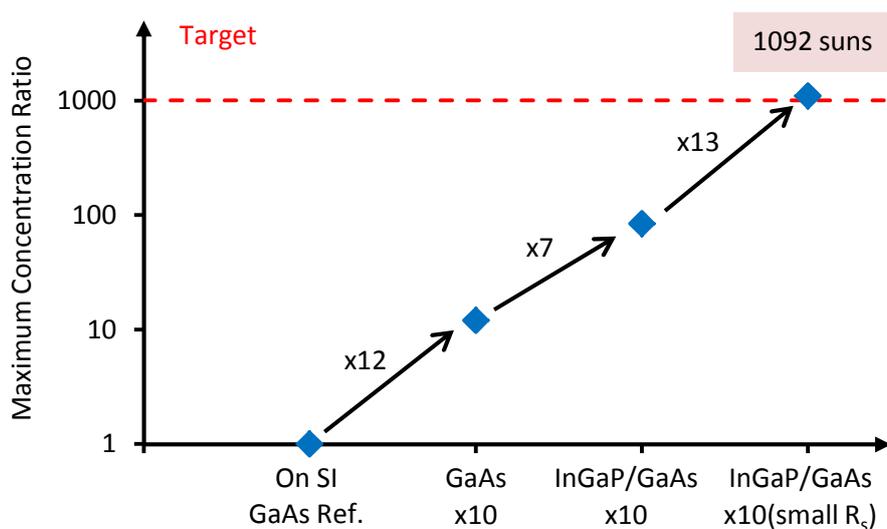


図 4-8 実験結果のもとづく、高集光に向けた太陽電池セルのロードマップ

第5章 直列抵抗成分の測定・評価

第4章で示したように、直列接続太陽電池ではSI-GaAs基板くし型電極を用いることにより、N-GaAs基板十字型電極を用いる場合よりも直列抵抗成分が大きくなっていることが予測された。より高集光へ応用できる直列接続太陽電池の作製のためには、どの部分の直列抵抗が問題となっているのか、また、直列抵抗を小さくするために最適なデザインのためにはどうすればよいのか、を考える必要がある。そこで、この章ではまず、1000倍以上の高集光を実現するために目標となる直列抵抗の値を算出し、その後、非分割の3種類のセルとSingleセル、10直列接続太陽電池について直列抵抗成分を測定し、比較する。そして、より詳細に直列抵抗成分の構成要素を求めるために、TLM法によって金属-半導体間の接触抵抗を測定する。その値を用いて、直列抵抗成分の構成要素の算出を行い、実測値と比較、検討を行う。

5.1 超高集光実現のための直列抵抗成分の目標値

第3章において、10直列接続太陽電池を用いることにより、小電流、大電圧のセルが実現できることが確認できた。まず、この小電流セルにおいて、1000倍以上の高集光を実現するための直列抵抗成分の目標値を§2.4で述べた理論にもとづき、式(2-23)を用いて算出する。目標値を算出するためには、表3-5、表3-6、表3-10のSI-GaAs基板くし型電極とSingleセルの特性をもとに、まずは、10直列接続が理想的な状態で実現できたと仮定して、パラメータを設定した。 V_{OC} は10セル側壁のパッシベーションができ、セルサイズが小さくなった場合にも損失がないとした。また、 I_{SC} はSingleセルの J_{SC} にもとづき、受光面積損失がないとした。用いたパラメータとSingleセルの直列抵抗成分の目標値を表5-1に示す。GaAsにおいては $0.25\ \Omega$ 以下、InGaP/GaAsにおいては、 $0.75\ \Omega$ 以下であることが必要といえる。この抵抗値の実現に向けたアプローチを検討するため、次節からより詳細な直列抵抗成分の算出を行う。

表 5-1 1000倍以上集光可能なSingleセルの目標となる直列抵抗成分の値と用いたパラメータ

Sample	GaAs	InGaP/GaAs	Fixed parameters
n	2	4	$k = 1.38 \times 10^{-23}\ \text{J/K}$
$V_{OC}(1)\ (\text{V})$	1.01	2.27	$T = 300\ \text{K}$
$I_{SC}(1)\ (\text{mA})$	0.72	0.40	$q = 1.6 \times 10^{-19}\ \text{C}$
$R_S\ (\Omega)$	< 0.25	< 0.75	$P_{in}(1) = 0.1\ \text{W/cm}^2$

5.2 暗電流の等価回路モデルを用いた直列抵抗成分の測定

太陽電池全体の直列抵抗を測定するために、§2.5.2で述べたように、暗状態の電流-電圧特性を測定し、SPICEを用いて等価回路モデルでフィッティングを行った。図5-1にその結果を示す。複数作製したサンプルについては平均値を棒グラフで示し、標準偏差をエラーバーとして示した。

一般的に用いられている N 型基板上の十字型電極セルが最も小さな値を示し、基板を SI 基板に変えることで、抵抗値はおおよそ 4 倍になった。さらに、電極を十字型からくし型に変えることで、抵抗値はおおよそ 2.5 倍となった。この抵抗値の変化が § 4.1 で比較した SI 基板くし型電極セル、SI 基板十字型電極セル、N 型基板十字型電極セルの最大効率を示す集光度がそれぞれ非集光、9 倍集光、13 倍集光という違いを示す原因といえる。実際の直列抵抗成分の測定値を式(2-23)へ代入してみると、 C_{max} は SI 基板くし型電極セルでは 2 倍、SI 基板十字型電極セルでは 5 倍、N 型基板十字型電極セルでは 22 倍となり、測定結果の傾向とほぼ一致した。この結果から、最大効率を示す集光度の変化が異なる基板と電極パターンを用いることによって直列抵抗成分が増大したためであるということが裏付けられた。また、Single セルの直列抵抗は SI 基板くし型電極セルとほぼ同程度であり、この値に比べて 10 直列接続セルにおいては直列抵抗が 10 倍となっている。InGaP/GaAs セルでは GaAs セルに比べて極めて大きい抵抗値を示し、非分割セルでは 15 倍、Single セルでは 25 倍となった。これは、InGaP/GaAs においては、図 3-3 に示すように、層数が増え、さらにトンネル接合の層も含まれることが原因と考えられる。この層を縦方向に流れる電流に対する断面積が Single セルの方が小さいために、Single セルにおいて GaAs と InGaP/GaAs の変化の割合が大きくなっている。この直列抵抗成分のより詳細な構成については § 5.4 で述べる。

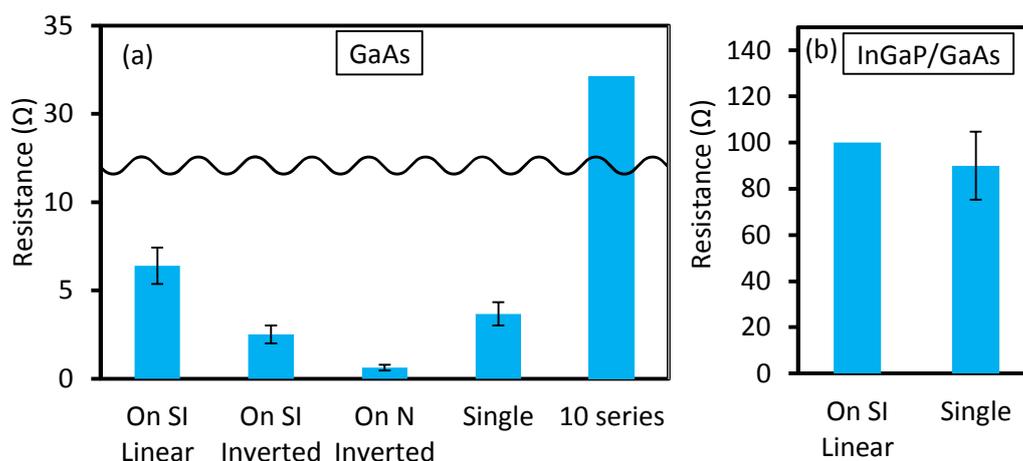


図 5-1 等価回路モデルのフィッティングによって求めた(a)GaAs 非分割セル、Single セル、10 直列接続セル(b)InGaP/GaAs 非分割セル、Single セルの直列抵抗の値

5.3 TLM 法による金属-半導体間接触抵抗の測定

直列抵抗成分のより詳細な構成成分を算出するために、本研究で電極として用いた Ag/Au と p-GaAs 間及び AuGe/Au と n-GaAs 間の接触抵抗を § 2.5.3 で述べた TLM 法によって測定した。TLM 法の測定に用いた電極パターンは電極幅 $W = 5 \text{ mm}$ 、電極長さ $d = 0.5 \text{ mm}$ の電極が電極間ピッチで $l = 0.5 \text{ mm}$ の間隔で 10 個並んだパターンである。また、電流が周辺部を周りこんで流れることを防ぐために、電極を蒸着後、サンプルは電極幅と等しい 5 mm 幅でフォトリソグラフィとウェットエッチングによりメサ型に分離した。電流-電圧特性の測定はプローブの接触抵抗の影響を無視するために 4 端子法を用いた。

I-V 特性を測定したところ、Ag/Au, p-GaAs 間はアニーリングをせずに直線となったため、オ

一ミック接触となっているといえる。また、AuGe/Ni, n-GaAs 間はアニーリング前は電流-電圧特性が直線とならなかったが、380 °Cで2分間アニーリングをすることで直線となり、オーミック接触を得ることができた。図 5-2 に、電極間距離と抵抗の関係を示す。

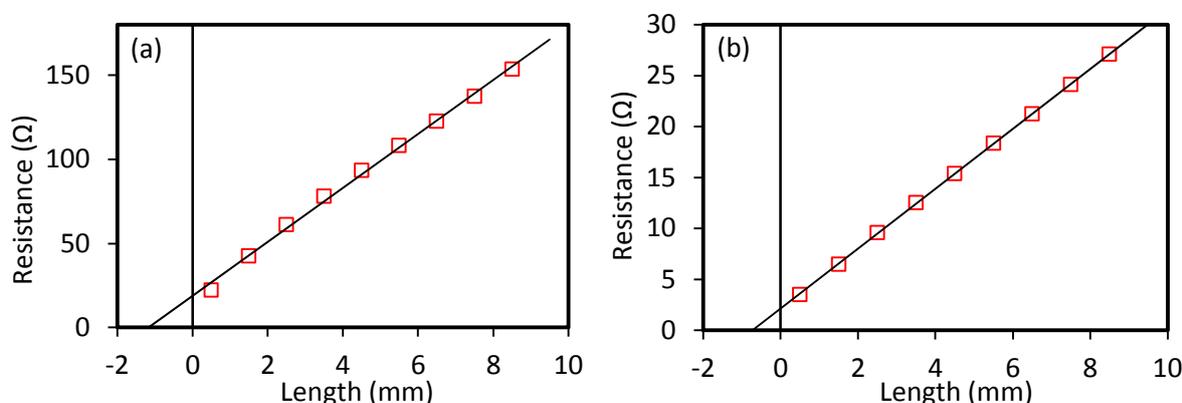


図 5-2 (a)Ag/Au-p-GaAs, (b)AuGe/Au-n-GaAs の抵抗

このグラフとエンド抵抗の測定結果から、式(2-45)、(2-46)を用いて接触抵抗を算出した。その結果を表 5-2 に示す。接触抵抗の値は Ag/Au-p-GaAs 間が $7.8 \times 10^{-2} \Omega \text{ cm}^2$ 、AuGe/Au-n-GaAs が $1.2 \times 10^{-2} \Omega \text{ cm}^2$ という結果となった。これまでの研究で、N-GaAs や P-GaAs に用いられる電極の接触抵抗の値としては $10^{-6} \Omega \text{ cm}^2$ 、のオーダーのものが得られており[52]、一般的な太陽電池に用いられる接触抵抗の値は $10^{-4} \Omega \text{ cm}^2$ のオーダーとなっている。その値に比べると本研究で作製した電極の接触抵抗は極めて大きい。この接触抵抗は今後さらなる改善の余地があると言える。

表 5-2 Ag/Au-p-GaAs, AuGe/Au-n-GaAs のエンド抵抗, 伝搬長, シート抵抗, 接触抵抗の値

Material	$R_E (\Omega)$	$L_1 (\text{mm})$	$R_{SK} (\Omega/\text{sq})$	$R_{SH} (\Omega/\text{sq})$	$\rho_C (\Omega \text{ cm}^2)$
Ag/Au-p-GaAs	0.94	0.17	280	80	7.8×10^{-2}
AuGe/Au-n-GaAs	0.22	0.22	23	15	1.2×10^{-2}

5.4 直列抵抗成分の算出

GaAs 太陽電池の Single セルと、非分割の3種類のセルについて直列抵抗成分を算出する。N型基板, SI 基板を用いた場合それぞれについて、直列抵抗成分の構成要素を図 5-3 に示す。SI 基板を用いた場合には、N型基板で裏面電極にあたる電極が露出されたコンタクト層の表面にあるため、基板の抵抗 r_{su} の代わりにコンタクト層を横方向に流れる電流に対する抵抗 r_c を考える必要がある。§2.5.1 に示したように、 $r_{w,E}$ は式(2-33)、 $r_{FC,BC}$ は式(2-35)、 $r_{B,Su}$ は式(2-37)を用いて求めることができる。 r_G と r_c については、それぞれ式(2-28)、式(2-33)を応用して考える必要がある。これらの算出方法について次に述べる。

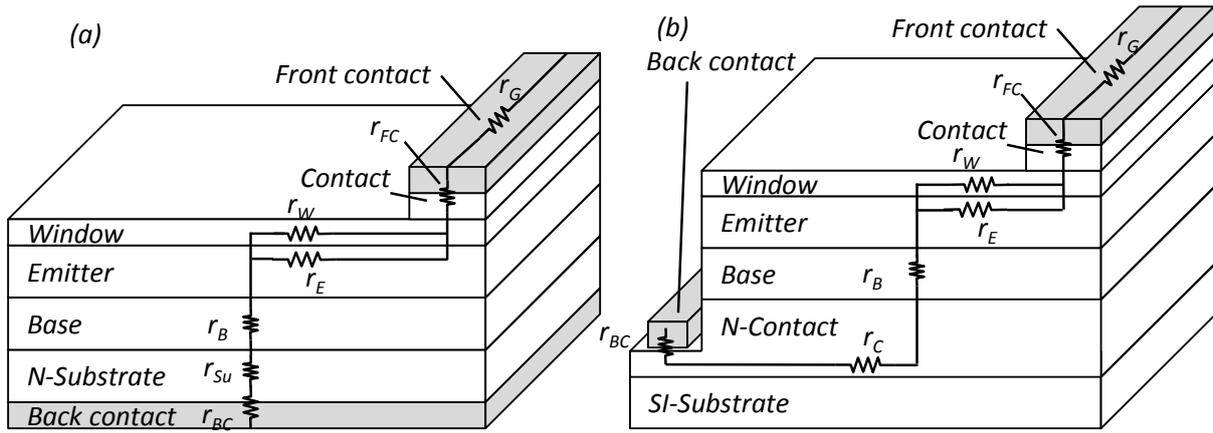


図 5-3 (a)N 型基板と(b)SI 基板を用いた場合の直列抵抗成分の構成要素

(1)グリッド抵抗(r_G)

§2.5.1 では、バスバーが 2 本のくし型電極の直列抵抗を求めた。本研究で作製したサンプルはバスバーが 1 本のくし型電極と十字型電極である。式(2-28)の導出を応用するとそれぞれの抵抗 $r_{G, Lin.}$, $r_{G, Inv.}$ は次のように表すことができる。

$$r_{G, Lin.} = \frac{L_{fg} \rho_M L_c^2}{3W_{fg} t} \quad (5-1)$$

$$r_{G, Inv.} = \frac{L_{fg} \rho_M L_c^2}{24W_{fg} t} \quad (5-2)$$

(2)N 型コンタクト層抵抗(r_C)

Single セルについて、図 5-4 左に示すように N 型コンタクト層を電流が流れる方向のセルの長さを L_c とする。式(2-33)の導出においては電極の両側から電流が流れ込むことを考えていたが、Single セルでは電流は一方から流れて N 電極に流れ込む。そのため、 L_{fg} を $2L_c$ に置き換えて考えればよい。よって、Single セルにおける N 型コンタクト層抵抗 $r_{C, Sin.}$ はコンタクト層のドーピング濃度を N_C 、厚さを W_C とすると

$$r_{C, Sin.} = \frac{L_c^2}{3q\mu N_C W_C} \quad (5-3)$$

と表すことができる。

また、SI-GaAs 基板上的の比較用セルでは図 5-4 右のように、N 型電極が受光面を取り囲むように表面にある。対称性を考えて 4 分割にし、中心から x 離れた位置での電流を $I(x)$ とすると、

$$I(x) = J_m x^2 \quad (5-4)$$

また、微小範囲における抵抗成分は

$$dR = \frac{2\rho_C}{x} dx \quad (5-5)$$

$$\rho_c = \frac{1}{q\mu N_c W_c} \quad (5-6)$$

単位セル($L_c \times L_c/2 \times 1/2$ の領域)の横方向の抵抗における損失は,

$$P_{loss} = \int_0^{L_c/2} I^2(x) dR = \frac{J_m^2 L_c^2 \rho_c}{128} \quad (5-7)$$

と表せる. このとき単位セルへの入力は,

$$P_1 = \frac{J_m V_m L_c^2}{4} \quad (5-8)$$

である. よって, N型コンタクト層抵抗 $r_{c,Ref.}$ は,

$$r_{c,Ref.} = \frac{P_{loss}}{P_1} \cdot \frac{V_m}{J_m} = \frac{L_c^2}{32q\mu N_c W_c} \quad (5-9)$$

となる.

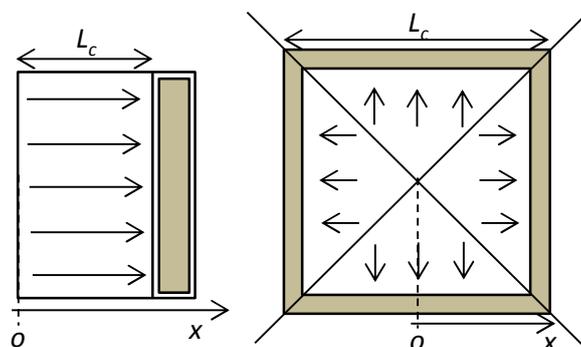


図 5-4 SI-GaAs 基板上 Single セル(左)と比較用セル(右)の N 型電極パターンと N 型コンタクト層での電流の流れ

以上の算出方法にもとづき, GaAs 太陽電池の Single セルと, 非分割の 3 種類のセルの直列抵抗成分を求めた結果を表 5-3 と図 5-5 に示す. 太陽電池の各層のドーピング濃度と厚さは図 3-3 に示した通りである. また, 表面電極 Ag/Au の厚さ $t = 750 \text{ nm}$, Au 電極の抵抗率は $\rho_M = 2.5 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ [16], GaAs の電子の移動度 $\mu_n = 8500 \text{ cm}^2/\text{V/s}$, ホールの移動度 $\mu_p = 400 \text{ cm}^2/\text{V/s}$ [32], InGaP のホールの移動度 $\mu_p = 80 \text{ cm}^2/\text{V/s}$ [53]は共通のパラメータとして用いた. N 型基板のキャリア濃度 $N_{Su} = 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 厚さ $W_{Su} = 350 \mu\text{m}$ である. 表面, 裏面電極の接触抵抗は TLM 法を用いて測定した表 5-2 の結果を用いた. 非分割セルの 3 種類のセルについては, 図 5-1 に示した測定値の比較とほぼ同じ傾向が見られている. Single セルの計算結果は測定値に比べて 1 桁程度値が大きくなっている. Single セルでは電極の面積が小さいため接触抵抗成分の影響が最も顕著に見られるが, この接触抵抗がセルによりばらつきがあるためではないかと考えられる.

表 5-3 各セルの電極パラメータと直列抵抗成分の計算結果

Parameter	Reference			Single
	On SI Linear	On SI Inverted	On N Inverted	
W_{fg} (μm)	10	10	10	10
L_{fg} (μm)	160	110	110	160
L_C (mm)	5.5	5.5	5.5	0.82
F_{FC} (%)	7.9	21.2	21.2	7.7
F_{BC} (%)	31.7	31.7	100	11.3
Resistance ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)				
r_G	5.4×10^{-2}	4.6×10^{-3}	4.6×10^{-3}	1.2×10^{-3}
r_V	1.4×10^{-2}	6.9×10^{-3}	6.9×10^{-3}	1.4×10^{-2}
r_B	9.4×10^{-4}	9.4×10^{-4}	9.4×10^{-4}	9.4×10^{-4}
r_C	1.9×10^{-2}	1.9×10^{-2}	-	1.9×10^{-2}
r_{Su}	-	-	1.3×10^{-5}	-
r_{FC}	9.9×10^{-1}	3.7×10^{-1}	3.7×10^{-1}	1.0
r_{BC}	3.8×10^{-2}	3.8×10^{-2}	1.2×10^{-2}	1.1×10^{-1}
r_{total}	1.11	0.44	0.39	1.14
$R_{total}(\Omega)$	3.68	1.45	1.30	55.7

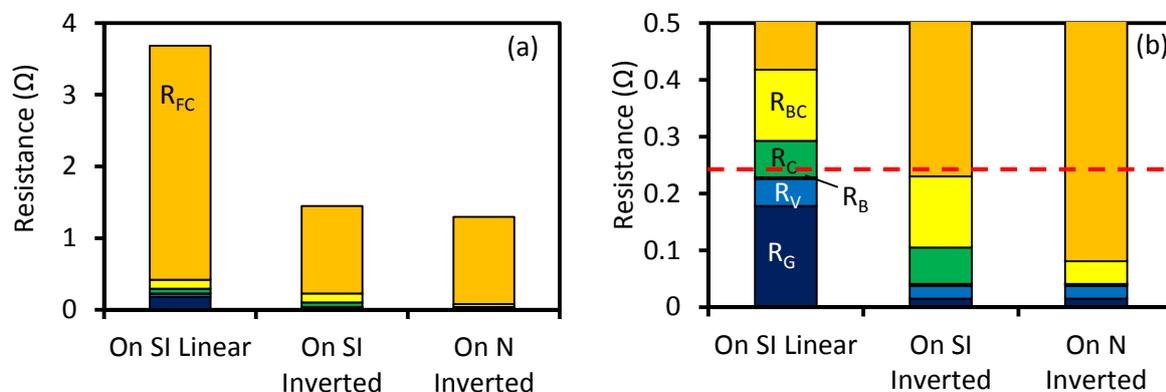


図 5-5 (a)直列抵抗成分の構成と(b)拡大図(点線は目標とする抵抗値を示す)

非分割セルについてより詳細に見てみると、計算結果から、直列抵抗成分の構成要素においては接触抵抗が最も大きな値となっていることがわかる。この接触抵抗の値をこれまで報告されてきたような $10^{-4} \Omega \text{cm}^2$ 以下のオーダー[52]に抑えることができれば、接触抵抗は他の抵抗成分に比べて無視できるほど小さくなる。このオーダーの接触抵抗であれば、N型コンタクト層露出部の幅を小さくした場合にも、接触抵抗による直列抵抗成分の増大はあまり見られないと考えられ、直列接続部の幅を小さくし、受光面積損失をさらに減らすことができる。また、グリッド抵抗とグリッド間抵抗は、目標とする集光倍率に最適なグリッドピッチ、グリッド幅、電極厚さがあり、

電極デザインの最適化をすることが必要である。また、SI-GaAs 基板上的のセルにおいてはN型コンタクト層の抵抗も無視できない値となっている。この抵抗値をより小さくするためには式(5-3)、(5-9)から、コンタクト層の厚さを厚くし、ドーピング濃度を高くすればよいと考えられる。そこで、接触抵抗を $10^{-4} \Omega \text{ cm}^2$ 、電極厚さを2倍の1500 nm、コンタクト層の厚さを2倍の3600 nm、ドーピング濃度を $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ へと改善した場合の直列抵抗成分を図5-6に示す。このような改善を行うことにより、直列抵抗成分を大幅に減少させることができ、目標となる直列抵抗値以下を実現できると考えられる。

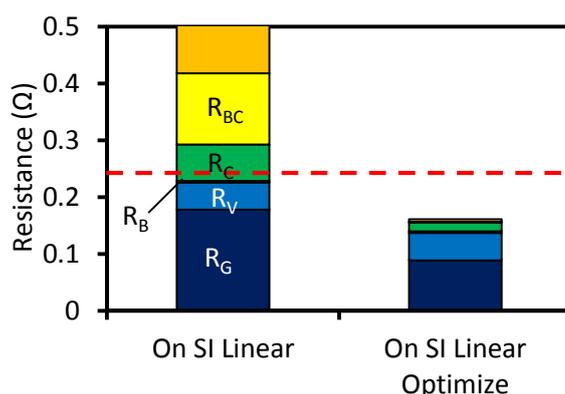


図 5-6 SI-GaAs 基板くし型電極において接触抵抗，電極，コンタクト層を改善した場合の直列抵抗成分の変化

5.5 第5章のまとめ

効率の最大値を与える集光度を決定するパラメータの一つである直列抵抗成分についての評価を行った。まず、作製した太陽電池から得られた短絡電流，開放電圧にもとづき，1000倍以上の高集光を実現するための抵抗成分の目標値を算出した。その結果，GaAs においては 0.25Ω 以下，InGaP/GaAs においては， 0.75Ω 以下の必要があるといえる。

次に，暗電流を等価回路モデルでフィッティングすることにより，実際の太陽電池の直列抵抗を測定した。SI 基板くし型セルの直列抵抗成分がN型基板十字型セルに比べて，10倍大きい値になっており，基板と電極パターンが直列抵抗に影響を与え，集光度の最大値を下げる要因であることが確かめられた。

さらに，直列抵抗を大きくしている要因を調べるために，TLM法を用いた金属-半導体間の接触抵抗の測定を行った。その値はAg/Au-p-GaAs間が $7.8 \times 10^{-2} \Omega \text{ cm}^2$ AuGe/Au-n-GaAsが $1.2 \times 10^{-2} \Omega \text{ cm}^2$ という結果となり，他の研究で用いられている電極の接触抵抗に比べて， $10^2 \sim 10^4$ 程度大きいことがわかった。

太陽電池セルの全ての直列抵抗成分を各構成要素ごとに求めた計算結果によると，直列抵抗成分のうち，接触抵抗が最も大きな割合を示していることがわかった。また，SI基板を用いることにより，N型コンタクト層を横方向に流れる電流に対する抵抗も無視できない値となる。さらに，十字型電極ではなく，くし型電極を用いていることでグリッド抵抗の増大にも影響を与えている。この3種類の抵抗を低減することで，より高集光への応用，そして，受光面積損失のより少ない

太陽電池の作製が実現可能となる.

第6章 結論

本研究では、集光型太陽光発電において問題となるジュール熱損失を軽減し、高集光倍率でも高い効率を維持することのできる太陽電池セルを開発し、その特性を評価した。

まず、第3章ではジュール熱損失の要因の一つである電流を小さくするために、太陽電池をモノリシックに分割し、直列接続した構造を作製することを目指した。10直列接続 GaAs 太陽電池においては、SiO₂/ポリイミドからなる2層絶縁膜を用いることで、短絡電流は非分割のセルに比べて1/10程度小さく、開放電圧はSingleセルの約10倍の9.4 Vを示す太陽電池の作製に成功した。さらに、プロセスを変えることなく、各セルに並列にモノリシックに集積したバイパスダイオードが正常に動作し、太陽電池セル表面における光強度分布にばらつきがある場合の悪影響を最小限に抑えることができた。InGaP/GaAs₂ 接合太陽電池についても同様のプロセスを用いて、10直列接続に成功し、光照射下で問題となるSI基板のリーク電流を抑えるための遮光層を導入することで、14.8 Vの開放電圧を得た。

第4章では、集光した場合の特性を評価した。10直列接続 GaAs 太陽電池においては非分割セルの13倍の集光度に耐えうることが確かめられた。また、10直列接続 InGaP/GaAs 太陽電池においては37倍集光まで効率の低下が見られなかった。さらに、一般的に集光型太陽光発電に用いられているN型基板、十字型電極パターンに対して、直列接続太陽電池で用いるSI基板、くし型電極パターンが集光時の効率に影響を与えることを明確にした。

第5章では、ジュール熱損失のもう一つの要因である直列抵抗成分について詳細に評価した。まず、数千倍集光でも効率の低下しない太陽電池作製のための目標となる直列抵抗成分の値としてGaAsにおいては0.25 Ω以下、InGaP/GaAsにおいては、0.75 Ω以下であることを示した。そしてTLM法を用いて算出した接触抵抗の値にもとづき、本研究で作製した太陽電池の直列抵抗の構成要素を算出した。その結果、金属-半導体間の接触抵抗が大部分を占めていることがわかり、また、N型コンタクト層の抵抗成分と電極での抵抗成分も無視できないことがわかった。

数千倍集光を実現するための課題としては、次の5点が挙げられる。

- ・遮光層に用いるAgの厚さを最適化し、また、位置合わせをより高精度にするため、早い段階のプロセスである絶縁膜形成の際に遮光層を導入することで、10直列接続 InGaP/GaAs 太陽電池の特性を向上させる。
- ・10直列接続 InGaP/GaAs 太陽電池において、ボトムセルのN型コンタクト層を露出させるプロセスを追加することで、バイパスダイオード動作時の電圧の減少を抑える。
- ・受光面積損失を少なくするために、N型コンタクト層露出部、絶縁膜層の幅を小さくする。

- ・ 金属-半導体間の接触抵抗を小さくする.
- ・ N型コンタクト層のドーピング濃度, 厚さを変えることにより直列抵抗を小さくする.

以上のような課題を解決することにより, 数千倍集光でも効率の低下が見られない太陽電池を作製することができ, より低コストの太陽光発電システムが実現できることが期待される.

参考文献

- [1] 経済産業省 資源エネルギー庁, “エネルギー白書 2013,” 2013. .
- [2] “BP Statistical Review of World Energy,” 2013. [Online]. Available: bp.com/statisticalreview.
- [3] エネルギー・環境会議コスト等検証委員会, “コスト等検討委員会報告書,” 2011.
- [4] 経済産業省, “再生可能エネルギー発電設備の導入状況,” 2013. [Online]. Available: <http://www.meti.go.jp/press/2013/11/20131118003/20131118003.html>.
- [5] NEDO, “太陽光発電ロードマップ(PV2030+).” 2009.
- [6] F. Dimroth, M. Grave, P. Beutel, U. Fiedeler, C. Karcher, T. N. D. Tibbits, E. Oliva, G. Siefer, M. Schachtner, A. Wekkeli, A. W. Bett, R. Krause, M. Piccin, N. Blanc, C. Drazek, E. Guiot, B. Ghyselen, T. Salvetat, A. Tauzin, T. Signamarcheix, A. Dobrich, T. Hannappel, and K. Schwarzburg, “Wafer bonded four- junction GaInP/GaAs//GaInAsP/GaInAs concentrator solar cells with 44.7% efficiency,” *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, 2014.
- [7] NREL, “Best Research-Cell Efficiencies,” 2013. [Online]. Available: <http://www.nrel.gov/ncpv/>.
- [8] Y. Chu, “Review and Comparison of Different Solar Energy Technologies,” 2011.
- [9] R. King, D. Bhusari, D. Larrabee, X.-Q. Liu, E. Rehder, K. Edmondson, H. Cotal, R. K. Jones, J. H. Ermer, C. M. Fetzer, D. C. Law, and N. H. Karam, “Solar cell generations over 40% efficiency,” *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 20, pp. 801–815, 2012.
- [10] 経済産業省 資源エネルギー庁, “太陽光発電システム等の普及動向に関する調査,” 2013.
- [11] P. T. Chiu, D. C. Law, R. L. Woo, S. B. Singer, D. Bhusari, W. D. Hong, a. Zakaria, J. Boisvert, S. Mesropian, R. R. King, and N. H. Karam, “Direct Semiconductor Bonded 5J Cell for Space and Terrestrial Applications,” *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 4, no. 1, pp. 493–497, Jan. 2014.
- [12] T. Takamoto and M. Kaneiwa, “集光型化合物太陽電池,” *シャープ技報*, pp. 49–53, Dec-2005.
- [13] N. Yamada and K. Okamoto, “負の屈折率層を有する非結像フレネルレンズの光学解析,” *太陽エネルギー*, vol. 37, no. 4, pp. 41–47, 2011.
- [14] D. Friedman, R. King, R. Swanson, J. McJannet, and D. Gwinner, “Editorial: Toward 100 Gigawatts of Concentrator Photovoltaics by 2030,” *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 3, no. 4, pp. 1460–1463, 2013.
- [15] 小長井誠, 山口真史, 近藤道雄, *太陽電池の基礎と応用*. 培風館, 2010.
- [16] A. Moore, “An optimized grid design for a sun-concentrator solar cell,” *RCA Rev.*, vol. 40, pp. 140–152, 1979.
- [17] C. Algora and V. Diaz, “Influence of series resistance on guidelines for manufacture of concentrator p-n GaAs solar cells,” *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 8, pp. 211–225, 2000.
- [18] K. Nishioka, T. Takamoto, T. Agui, M. Kaneiwa, Y. Uraoka, and T. Fuyuki, “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,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 90, pp. 1308–1321, 2006.
- [19] H. J. Hovel, “Novel Materials and Devices for Sunlight Concentrating Systems,” *IBM J. Res. Dev.*, vol. 22, no. 2, pp. 112–121, Mar. 1978.

-
- [20] P. G. Borden, "A monolithic series-connected Al_{0.93}Ga_{0.07}As/GaAs solar cell array," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 35, no. 7, pp. 553–554, 1979.
- [21] H. Helmers, E. Oliva, W. Bronner, F. Dimroth, and A. W. Bett, "Processing techniques for monolithic interconnection of solar cells at wafer level," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 57, no. 12, pp. 3355–3360, 2010.
- [22] H. Helmers, W. Y. Thor, T. Schmidt, D. W. van Rooyen, and A. W. Bett, "Optical analysis of deviations in a concentrating photovoltaics central receiver system with a flux homogenizer.," *Appl. Opt.*, vol. 52, no. 13, pp. 2974–2984, May 2013.
- [23] R. Loeckenhoff, G. Dibowski, F. Dimroth, M. Meusel, S. Riesen, and A. W. Bett, "1000 Sun, Compact Receiver Based on Monolithic Interconnected Modules (MIMS)," in *2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference*, 2006, pp. 737–740.
- [24] H. Helmers, E. Oliva, W. Bronner, F. Dimroth, a. W. Bett, A. W. Bett, R. D. McConnell, G. Sala, and F. Dimroth, "Advanced Processing Techniques Used for the Development of Dual-Junction Monolithic Interconnected Modules," in *6th International Conference on Concentrating Photovoltaic Systems*, 2010, pp. 39–42.
- [25] NREL, "Solar Spectra." [Online]. Available: <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/>.
- [26] J. Noring, D. Grether, and A. Hunt, "Circumsolar radiation data: the Lawrence Berkeley Laboratory reduced data base," 1991.
- [27] W. Shockley and H. J. Queisser, "Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells," *J. Appl. Phys.*, vol. 32, no. 3, pp. 510–519, 1961.
- [28] J. Nelson, *The Physics of Solar Cells*. Imperial College Press, 2003.
- [29] A. Cheknane, H. S. Hilal, J. P. Charles, B. Benyoucef, and G. Campet, "Modelling and simulation of InGaP solar cells under solar concentration: Series resistance measurement and prediction," *Solid State Sci.*, vol. 8, no. 5, pp. 556–559, May 2006.
- [30] C. Algora and V. Diaz, "Design and optimization of very high power density monochromatic GaAs photovoltaic cells," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 45, no. 9, pp. 2047–2054, 1998.
- [31] D. Pysch, a. Mette, and S. W. Glunz, "A review and comparison of different methods to determine the series resistance of solar cells," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 91, no. 18, pp. 1698–1706, Nov. 2007.
- [32] P. Würfel, *Physics of Solar Cells From Basic Principles to Advanced Concepts*. Wiley-VCH, 2009.
- [33] G. Reeves and H. Harrison, "Obtaining the specific contact resistance from transmission line model measurements," *Electron Device Lett. IEEE*, vol. 3, no. 5, pp. 111–113, 1982.
- [34] 渥美貴久, "半導体-金属コンタクトの研究 TLM 法によるコンタクト抵抗の測定," 高知工科大学 電子・光システム工学科卒業論文, 2001.
- [35] 太陽光発電協会, *太陽光発電システムの設計と施工(改訂3版)*. 株式会社オーム社, 2006.
- [36] K. Sasaki, T. Agui, K. Nakaido, N. Takahashi, R. Onitsuka, and T. Takamoto, "Development of InGaP/GaAs/InGaAs inverted triple junction concentrator solar cells," in *9th International Conference on Concentrating Photovoltaic Systems*, 2013, vol. 22, pp. 22–25.
-

-
- [37] Spectrolab, [Online]. Available: <http://www.spectrolab.com/dataSheets.htm>.
- [38] AZURSPACE, [Online]. Available: <http://www.azurspace.com/index.php/en/products/products-cpv/cpv-solar-cells>.
- [39] Emcore, [Online]. Available: <http://www.emcore.com/terrestrial-photovoltaics/terrestrial-solar-cells/>.
- [40] イオンビーム応用技術編集委員会, “イオンビーム技術の開発,” 株式会社 シーエムシー, 1989.
- [41] S. M. Sze, *半導体デバイス-基礎理論とプロセス技術*. 産業図書株式会社, 1987.
- [42] 丹呉浩侑, *半導体プロセス技術*. 培風館, 1998.
- [43] 徳山巍, *集積回路プロセス技術シリーズ 半導体ドライエッチング技術*. 産業図書株式会社, 1992.
- [44] 山田雄吾, “集光応用を目指した III-V モノリシック集積直列接続太陽電池の試作,” 東京大学工学部 電子工学科卒業論文, 2011.
- [45] S. van Riesen, F. Dimroth, and A. Bett, “Fabrication of MIM-GaAs solar cells for high concentration PV,” in *3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, 2003, no. Lcl, pp. 833–836.
- [46] J. Ohsawa, K. Shono, and Y. Hiei, “High-voltage micro solar cell arrays of GaAs with output voltage up to 100V,” in *2002 IEEE/LEOS International Conference on Optical MEMs, Conference Digest.*, 2002, pp. 103–104.
- [47] Y. Bai, J. Wang, Y. Wang, H. Zhang, N. Chen, J. Yao, T. Huang, Y. Wang, X. Zhang, and J. Wu, “Improved performance of GaAs-based micro-solar cell with novel polyimide/SiO₂/TiAu/SiO₂ structure,” *Sci. China Technol. Sci.*, vol. 54, no. 4, pp. 830–834, Jan. 2011.
- [48] J. Ohsawa, M. Kawasaki, T. Tanaka, N. Tsuchida, S. Hayakawa, and M. Yoshida, “A GaAs micro solar cell with output voltage over 20 V,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 38, pp. 6947–6951, 1999.
- [49] Y. Wang, N. Chen, X. Zhang, Y. Bai, Y. Wang, T. Huang, H. Zhang, and H. Shi, “Analysis of leakage current in GaAs micro-solar cell arrays,” *Sci. China Technol. Sci.*, vol. 53, no. 5, pp. 1240–1246, Apr. 2010.
- [50] X. Sun, R. Hong, H. Hou, Z. Fan, and J. Shao, “Thickness dependence of structure and optical properties of silver films deposited by magnetron sputtering,” *Thin Solid Films*, vol. 515, pp. 6962–6966, 2007.
- [51] A. Belghachi and S. Khelifi, “Modelling of the perimeter recombination effect in GaAs-based micro-solar cell,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 90, no. 1, pp. 1–14, Jan. 2006.
- [52] A. Baca, F. Ren, J. Zolper, R. Briggs, and S. Pearton, “A survey of ohmic contacts to III-V compound semiconductors,” *Thin Solid Films*, pp. 599–606, 1997.
- [53] S. Sato, H. Miyamoto, M. Imaizumi, K. Shimazaki, C. Morioka, K. Kawano, and T. Ohshima, “Degradation modeling of InGaP/GaAs/Ge triple-junction solar cells irradiated with various-energy protons,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 93, pp. 768–773, Jun. 2009.
-

本研究に関する発表

国際学会

- [1] M. Seno, K. Watanabe, M. Sugiyama, Y. Nakano, “Monolithic Integrated Series-Connected GaAs Solar Cells with Bypass Diodes for Reduced Joule Energy Loss under Concentration”, 27th European PV Solar Energy Conference and Exhibition, 1AV.3.5, Frankfurt, Germany, September, 2012
- [2] M. Seno, K. Watanabe, M. Sugiyama, Y. Nakano, “Performance of Monolithic Integrated Series-Connected GaAs Solar Cells under Concentrated Light”, 9th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems, Miyazaki, Japan, April, 2013
- [3] M. Seno, K. Watanabe, M. Sugiyama, Y. Nakano, “The I-V Characteristics of Monolithic Integrated Series-Connected GaAs Solar Cells under Concentration”, JSAP-MRS Joint Symposia, Kyoto, Japan, September, 2013
- [4] M. Seno, K. Watanabe, M. Sugiyama, Y. Nakano, “Fabrication of Monolithic Integrated Series-Connected InGaP/GaAs Dual-junction Solar Cells”, 23rd Photovoltaic Science and Engineering Conference, 4-O-16, Taipei, Taiwan, November, 2013

国内学会

- [5] 瀬能未奈都, 渡辺健太郎, 杉山正和, 中野義昭, 「高集光発電用マイクロ集積直列接続 GaAs 太陽電池の試作」, 春季第 59 回応用物理学関係連合講演会、18a-C1-7, 新宿区, 2012 年 3 月
- [6] M. Seno, K. Watanabe, M. Sugiyama, Y. Nakano, “Monolithic Integrated Series-Connected GaAs solar Cells with Bypass Diodes for Reduced Joule Energy Loss under Concentration”, 第 31 回電子材料シンポジウム, 伊豆市, 2012 年 7 月
- [7] 瀬能未奈都, 渡辺健太郎, 杉山正和, 中野義昭, 「高集光発電用マイクロ集積直列接続 GaAs 太陽電池の試作」, 化学工学会第 44 回秋季大会, G215, 仙台市, 2012 年 9 月
- [8] 瀬能未奈都, 渡辺健太郎, 杉山正和, 中野義昭, 「モノリシック集積直列接続 GaAs 太陽電池の集光特性評価」, 春季第 60 回応用物理学学会学術講演会, 厚木市, 2013 年 3 月

学術雑誌

- [9] K. Watanabe, Y. Yamada, M. Seno, M. Sugiyama, Y. Nakano, “Fabrication of Monolithic Integrated Series-Connected GaAs Photovoltaic Cells for Concentrator Applications”, Japanese Journal of Applied Physics, vol. 51, pp.10, 2012

プロシーディング

- [10] M. Seno, K. Watanabe, M. Sugiyama, Y. Nakano, “Performance of Monolithic Integrated Series-Connected GaAs Solar Cells under Concentrated Light”, 9th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems, AIP Conference Proceedings, vol. 1556, pp.26-29, 2013

受賞

- ・ Poster Award, 27th European PV Solar Energy Conference and Exhibition, Frankfurt, Germany, September, 2012

謝辞

本論文を作成するにあたり、多くの方々のご協力をいただきました。この場をお借りして御礼申し上げます。

指導教員である中野義昭教授には、研究室打ち合わせの際に大変有益なご助言をいただき、本研究の参考となるような様々な資料も提供していただきました。また、素晴らしい研究環境を整えていただき、快適に実験を進めることができました。杉山正和准教授には本研究のテーマを決めるにあたり貴重なご意見をいただき、その後の研究を進める上で実験の方針についてもご指導いただきました。また、学会発表の際には、抄録、発表資料を丁寧に添削していただきました。種村拓夫准教授には、研究室打ち合わせで本研究に関して客観的な視点からの的確なご指摘をいただきました。渡辺健太郎助教には、GaAs 太陽電池ウェハーを提供していただき、実験装置の使用方法から、各種プロセス、測定方法に至るまで細部にわたり指導していただきました。また、実験結果の考察や本論文の構成についてもご助言いただきました。久保田雅則助教には、フォトマスクの作製や武田先端知クリーンルームの装置の使用の際にお世話になりました。財津優氏には駒場クリーンルームの実験装置の取り扱いについてご指導いただき、また、発表資料の作成の仕方を教えていただきました。藤井宏昌氏には、太陽電池の基礎について丁寧に教えていただき、また、実験結果の考察や学会発表時にも貴重なアドバイスをいただきました。同期の伊藤成顕氏、瀧勇也氏、中村亮裕氏、野尻悠平氏は異なる研究分野ではありましたが、お互いに励まし合い、研究を進めることができました。

また、シャープ株式会社の高本達也氏、佐々木和明氏には InGaP/GaAs₂ 接合太陽電池ウェハーを提供していただきました。

その他、中野・杉山・種村研究室の皆様には、日頃から様々な相談にのっていただき、また、研究に関するご助言をいただきました。さらに、普段の研究室生活においても大変お世話になりました。特に、太陽電池グループの方々には、グループ打ち合わせだけではなく、日々、実験結果や実験手法について活発な議論にお付き合いいただき、研究を進めるうえでの多くの知識や示唆を得ることができました。

最後に、いつも温かく見守ってくださった家族、友人に深く感謝いたします。

ありがとうございました。

2014年2月
瀬能 未奈都