



Title	太陽電池の光電物性と測定・評価法に関する研究
Author(s)	下川, 隆一
Citation	大阪大学, 1988, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/2722
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

太陽電池の光電物性と測定・評価法 に関する研究

1987年

下 川 隆 一

目 次

第1章 序論	1
1.1 はじめに	1
1.2 本研究の歴史的・社会的背景	1
1.3 本論文の構成と概要	5
参考文献	8
第2章 結晶系シリコン太陽電池のデバイス特性	10
2.1 まえがき	10
2.2 太陽電池のセル特性	10
2.3 入射スペクトル, スペクトル応答と出力電流	12
参考文献	15
第3章 太陽電池用基板シリコン結晶の評価	16
3.1 まえがき	16
3.2 結晶粒界及び結晶欠陥の構造的評価	16
3.2.1 清浄表面を保つ気相拡散銅デコレーション法の開発	17
3.2.2 銅デコレーション法による多結晶シリコン基板の評価	19
3.2.3 銅デコレーション法による評価結果と光電特性の関連	26
3.3 結晶粒界及び結晶欠陥の光電的手法による評価	28
3.3.1 高分解能 MBIC 技術の開発	29
3.3.1.1 装置と原理	29
3.3.1.2 性能と応用	29
3.3.2 MBIC 法による結晶粒界の評価	34
3.3.2.1 結晶界面近傍における MBIC 信号の理論解析	34
3.3.2.2 歪や欠陥を伴わない結晶界面の評価	37
3.3.2.3 歪や欠陥を伴った結晶界面の評価	39
3.3.2.4 結晶の不完全性による実効少数キャリア拡散長	44
3.3.3 各種結晶粒界及び結晶欠陥と光電特性の関連	46
3.4 まとめ	53
参考文献	56

第4章 基板の結晶不完全性と太陽電池のデバイス特性・デバイス物性	58
4.1 まえがき	58
4.2 多結晶シリコン太陽電池のデバイス特性	58
4.2.1 高効率多結晶シリコン太陽電池	59
4.2.1.1 製作方法	59
4.2.1.2 基板の結晶性とセル特性	60
4.2.2 小面積セルによるデバイス特性解析	61
4.2.2.1 小面積セルの出力特性, 分光感度特性	61
4.2.2.2 小面積セルの電流・電圧特性	66
4.3 多結晶シリコン太陽電池のスペクトル応答特性と少数キャリア拡散長	69
——照射光強度・波長依存性——	
4.3.1 各種結晶部分の光生成電流, 分光感度の測定	69
4.3.2 スペクトル応答特性及び少数キャリア拡散長のバイアス光依存性	70
4.3.2.1 スペクトル応答特性のバイアス光強度及び波長依存性	70
4.3.2.2 少数キャリア拡散長のバイアス光強度及び波長依存性	72
4.3.3 光バイアス効果の理論的検討	75
4.3.3.1 光生成電流と少数キャリア拡散長	75
4.3.3.2 少数キャリア拡散長のバイアス光強度及び波長依存性	75
4.3.4 結晶欠陥による捕獲準位と少数キャリア拡散長	77
4.3.5 バイアス光照射下における少数キャリア濃度分布	79
4.4 まとめ	81
参考文献	81
第5章 入射スペクトルによる太陽電池出力の変化	83
——大気パラメータの効果——	
5.1 まえがき	83
5.2 直達日射下におけるセル出力特性	84
5.2.1 直達日射スペクトル分布	84
5.2.2 結晶シリコン太陽電池のセル出力特性	86
5.2.2.1 分光感度モデル	86
5.2.2.2 セル出力特性	89
5.2.3 アモルファスシリコン太陽電池のセル出力特性	90
5.2.3.1 分光感度モデル	90

5.2.3.2	セル出力特性	92
5.3	人工太陽（ソーラシミュレータ）下におけるセル出力特性	97
5.3.1	人工太陽光のスペクトル分布	97
5.3.2	結晶シリコン太陽電池，アモルファスシリコン太陽電池のセル出力特性	99
5.4	全天日射下におけるセル出力特性	100
	——散乱日射の角度分布，光応答特性の入射角度依存性を考慮した場合——	
5.4.1	全天日射スペクトル分布	100
5.4.1.1	計算方法	100
5.4.1.2	理論計算結果とデータ比較	107
5.4.1.3	散乱日射の角度分布	113
5.4.2	結晶シリコン太陽電池，アモルファスシリコン太陽電池のセル出力特性	114
5.4.2.1	分光感度の入射角度依存性	116
5.4.2.2	セル出力特性	119
1)	直達日射成分によるセル感度特性	120
2)	分光感度の入射角度依存性の効果	121
3)	水平面全天日射下におけるセル感度特性	123
4)	37°傾斜面全天日射下におけるセル感度特性	126
	——水平面全天日射からの近似計算——	
5.5	まとめ	129
	参考文献	129
第6章	レファレンス太陽電池方式による太陽電池出力の標準測定法	132
6.1	まえがき	132
6.2	レファレンス太陽電池方式による放射照度測定（設定）	132
6.3	レファレンス太陽電池方式における測定誤差	134
6.3.1	測定誤差分析法	134
6.3.2	誤差分析計算例	136
6.3.3	結晶 Si 太陽電池の測定誤差計算	139
6.4	太陽電池の持回り測定実験と簡易スペクトル分布測定に基づく補正	142
6.4.1	持回り測定方法	145
6.4.2	出力測定値 (I_{sc} , V_{oc} , FF , η) の分布状況	147
6.4.3	簡易スペクトル分布測定に基づく補正計算	150
6.5	レファレンス太陽電池の適正構造	153

6.5.1 モジュール構造における光収集エンハンスメント (photon collection enhancement) の効果	153
6.5.1.1 光収集エンハンスメント現象	154
6.5.1.2 各種のモジュール構造における光収集エンハンスメント	156
6.5.2 反射の効果	159
6.5.3 放射照度の不均一性の効果	161
6.5.4 レファレンス太陽電池の適正構造の検討	161
6.6 太陽電池出力の標準測定法	163
6.7 まとめ	165
参考文献	165
 第7章 レファレンス太陽電池の標準較正法	167
7.1 まえがき	167
7.2 レファレンス太陽電池の屋内較正法 (日本提案による標準較正法)	167
7.3 屋内較正值と屋外較正值の比較	169
7.4 標準ランプ基準と WRR 基準の比較	173
7.5 まとめ	177
参考文献	177
 第8章 レファレンス太陽電池方式の異種基板材料太陽電池への適用性	179
8.1 まえがき	179
8.2 多結晶シリコン太陽電池への適用性	179
8.2.1 分光感度特性のバイアス光依存性	179
8.2.1.1 分光感度測定	179
8.2.1.2 分光感度特性のバイアス光依存性	180
8.2.2 照射強度に対する出力電流の直線性	183
8.2.3 出力測定誤差の計算	184
8.3 アモルファス太陽電池への適用性	186
8.3.1 分光感度特性のバイアス光, バイアス電圧依存性	187
8.3.2 照射強度に対する出力電流の直線性	188
8.3.3 出力測定誤差の計算	188
8.4 まとめ	191
参考文献	192

第 9 章 結論.....	193
---------------	-----

謝 辭	196
-----------	-----

用語表

a-Si	アモルファスシリコン, amorphous-Si
AM	エアマス, Air Mass, m .
AR	反射防止, Antireflection
ASTM	American Society for Testing and Materials
α	吸収係数, Absorption Coefficient
BSF	Back Surface Field
β	波長 $1\mu\text{m}$ における混濁度係数, Turbidity
c-Si	結晶シリコン, crystal-Si
CV	放射照度 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ 下における単位面積当たりの出力電流, Calibration Value
D	拡散定数, D_n (電子) D_p (正孔)
d	接合の深さ
$E(\lambda)$	分光放射照度
E_t	電子の擬フェルミレベル, E_{td} (暗状態) E_{tl} (明状態)
E_g	バンドギャップ値
EBIC	電子ビーム誘起電流, Electron Beam Induced Current
EFG	Edge-Defined Film-Fed Growth
EVA	Ethylene Vinyl Acetate
FF	曲線因子, Fill Factor
G	電子・正孔対の発生率
GB	結晶粒界, Grain Boundary
$I(\tau, \mu, \phi)$	放射強度, Radiation Intensity
IEC	国際電気標準会議 International Electrotechnical Commission
IR	Infra-Red
J_l	光生成電流密度
J_{sc}	短絡電流密度
J_o	逆方向飽和電流密度
JIS	日本工業規格, Japanese Industrial Standard
k_{ext}	単位質量当たりの消散係数, mass extinction coefficient
L	少数キャリア拡散長, L_n (電子), L_p (正孔), L_{nd} (暗状態), L_{nl} (明状態)
LBIC	レーザ・ビーム誘起電流, Laser Beam Induced Current

λ	波長
m	エアマス, Air Mass
MBIC	分光ビーム誘起電流, Monochromatic Light Beam Induced Current
N_A	アクセプタ濃度
N_D	ドナー濃度
N_c	伝導帯の実効状態密度
n_i	真性キャリア濃度
N_t	捕獲準位密度
n_t	電子を捕獲した捕獲準位密度, n_{td} (暗状態), n_{tl} (明状態)
N_T	pn 接合を横切るキャリア総数
N_h	pn 接合を横切る正孔総数
N_e	pn 接合を横切る電子総数
ω_0	1 回の散乱に対するアルベド, Single-Scattering Albedo
$P(\mu, \phi; \mu', \phi')$	位相関数, phase Function
PV	photovoltaic
Φ	光子密度, Φ_0 (入射光)
ϕ	方位角, Azimuth Angle
$\Phi_{ab}(\lambda)$	測定光源の絶対分光放射照度
$\Phi_m(\lambda)$	測定光源の相対分光放射照度
$\Phi_s(\lambda)$	標準太陽光の絶対分光放射照度
$Q(\lambda)$	相対分光感度
$Q_q(\lambda)$	量子効率 (収集効率)
$R(\tau_1, \mu, -\mu_0)$	反射率
$R(\lambda)$	分光感度
ρ	大気密度
S	表面再結合速度
SOG	Solar Grade
SPV	Surface Photovoltage
$T(\tau_1, -\mu, -\mu_0)$	透過率
TCO	透明導電膜, Transparent Conductive Oxide
θ	天頂角, Zenith Angle, $\mu = \cos\theta$
τ	少数キャリア寿命, Minority Carrier Lifetime
τ	光学的厚さ, Optical Thickness
τ_R	Rayleigh 散乱による減衰係数

τ_a	エアロゾル散乱による減衰係数
τ_{ma}	オゾンその他の分子による減衰係数
UV	Ultra-Violet
V_{oc}	開放電圧
W	降水量, Precipitable Water Vapor
W_p	p 層の膜厚
W_i	i 層の膜厚
WRR	World Radiometric Reference
η	変換効率, Conversion Efficiency

太陽電池の光電物性と測定・評価法 に関する研究

下 川 隆 一

第1章 序 論

1.1 はじめに

石油代替エネルギー開発の一環として進められてきた太陽光発電技術の研究開発は、この10年、目覚ましい進歩を遂げ、太陽電池の生産量はここ数年で年産30 MWp を越えるようになった。モジュール価格は \$5/Wp を下回るようになり、応用分野も急速に拡大している。また、発電効率の面においても各種の工夫、改良がなされ、単結晶シリコン太陽電池においてセル効率は20%、モジュール効率は15%を越え、次第に理論効率に近い値になってきている。太陽電池の測定・評価法に関しても、太陽電池性能の向上に伴って進展し、高効率太陽電池の性能を評価するにふさわしい手法・精度となっている。そして、今日では太陽電池セル・モジュールの出力測定法の標準化がこの分野の普及・発展に重要なものとなり、最近 IEC (International Electrotechnical Commission) 案¹⁾と JIS (Japanese Industrial Standard) 案²⁾が完成し間もなく規格化されることになっている。

本研究開始時(1979年)は、丁度低コストのキャストシリコン太陽電池とリボンシリコン太陽電池の量産化技術開発が始まり、そして一方で薄膜太陽電池の基礎研究が開始された時期にあたる。そこで、本章においてはシリコン結晶の製造処理技術の確立された時期に立ち返って本研究の歴史的、社会的背景とその推移をたどり、本研究の意義を明らかにする。次いで、本論文の構成と内容の概要を述べる。

1.2 本研究の歴史的・社会的背景

電解溶液中に浸した電極の光起電力効果が Becquerel によって1839年に、そして、本格的な固体(セレン, Se)の光起電力効果が Adams & Day によって1876年に発見されて以来、各種の材料

の組合せによる PV セル製作が試みられたが、いずれも天然の結晶を利用している段階であるために、効率は Se PV セルで0.8%どまりで実用化に至らなかった。その後、さしたる進展はなく、トランジスタ時代を創成した1940年～1950年代の Bell 研究所における人工結晶、特にシリコン結晶の製造、処理技術の輝かしい発展を迎えた。太陽電池の分野においてもこのシリコン結晶製造技術と不純物拡散技術を使って、1954年に Bell 研究所の Pearson, Fuller, Chapin によって初めて太陽電池と呼ぶにふさわしい効率6%の浅い接合のシリコン太陽電池が試作された。これが今日の太陽電池の始まりである。その後、数年の間に民間企業が太陽電池の生産を始め、結晶成長技術、拡散技術、設計理論等の発展により変換効率も10%をこえ、通信用中継装置の電源、あるいは宇宙衛星用の電源として実用化された。しかし、高コストのために、やはり商用電源には経済的にたちうちできず、中継装置、燈台、宇宙用、又僻地用などの特殊電源として使用されるにとどまっていた¹⁵⁾。

ところが、石油エネルギー危機を契機に、太陽エネルギーも石油に代る新エネルギー源の1つとして注目を集め、アメリカでは1973年 ERDA (エネルギー庁) の「新エネルギー開発助成計画」、わが国では1974年通商産業省工業技術院の「サンシャイン計画」が公にされ、太陽電池の低コスト化をめざす研究が始まった。これらの研究開発の中心はモジュール価格の大きな部分を占める原料シリコンと太陽電池シリコン結晶基板の製造コストを下げることで、図1.1³⁾に示すシリコン太陽電池の製造工程フローのすべての工程の低コスト化をめざしている。著者は、第1段階の技術革新は低コストの原料シリコンの製造技術と低コストの太陽電池基板シート化技術の開発にあり、そして第2段階の技術革新は薄膜太陽電池の開発にあると考え、1979年にこれらの新型太陽電池の基礎的な研究を開始した。

低コストの太陽電池シリコン基板シート化技術は図に示されるように、大別して3種類の方法、

- ① シリコン融液から結晶インゴットを高速で引き上げるチョクラルスキー法
 - ② 鋳型にシリコン融液を流し込み、結晶インゴットを作るキャスティング法 (鋳造法)
 - ③ シリコン融液から薄いリボン状に結晶を成長するリボン結晶成長法
- が考えられ、著者は②③の研究開発に協力し多結晶シリコン太陽電池の解析・評価を行いながら第2段階の多結晶シリコン薄膜太陽電池の研究開発を行ってきた。

シリコン多結晶の電気伝導に関しては IC の素子絶縁や電極技術に関連してかなりの知見が得られ、シリコン多結晶の半導体的性質に関しても薄膜トランジスタの研究においていくつかの知見が得られている。しかし、太陽電池は少数キャリア寿命が性能を支配し、基板結晶の完全性に敏感な性質をもつ少数キャリアデバイスであり、この点に関するデータはほとんど皆無であった。

以上のような太陽電池の低コスト化プロジェクトの開始と同じ頃、地上用太陽電池の性能を客観的に評価する方法の研究が始められた。地上用太陽電池測定法の研究は、ERDA (米国エネルギー省 DOE の前身)/ NASA のリーダーシップのもとに、太陽光発電国家プロジェクト開始後間もなく始められた。1975年に第1回⁴⁾、続いて1976年に第2回⁵⁾の測定法ワークショップが開催され、①地上用光発電のための太陽光強度とスペクトル、②地上太陽光のシミュレーション、③太陽電池の

測定及び較正方法，の3テーマについて討議され，この成果に基づいて地上用太陽電池の標準測定法が発表された⁶⁾。これは，AM (air mass, エアマス) 1.5 “直達日射” を標準太陽光とするレファレンス太陽電池方式⁷⁾を採用したもので，当時国際的に広く使用された測定法である。米国に続いて，日本においてもサンシャイン計画太陽光発電プロジェクトが1974年に始まり，その一環として，地上用太陽電池標準測定法委員会が日本電機工業会に設けられ，地上用セル・モジュールの評価方法の研究が始められた。そして，1980年に AM 1.5 “直達日射” を標準太陽光とする暫定の標準測

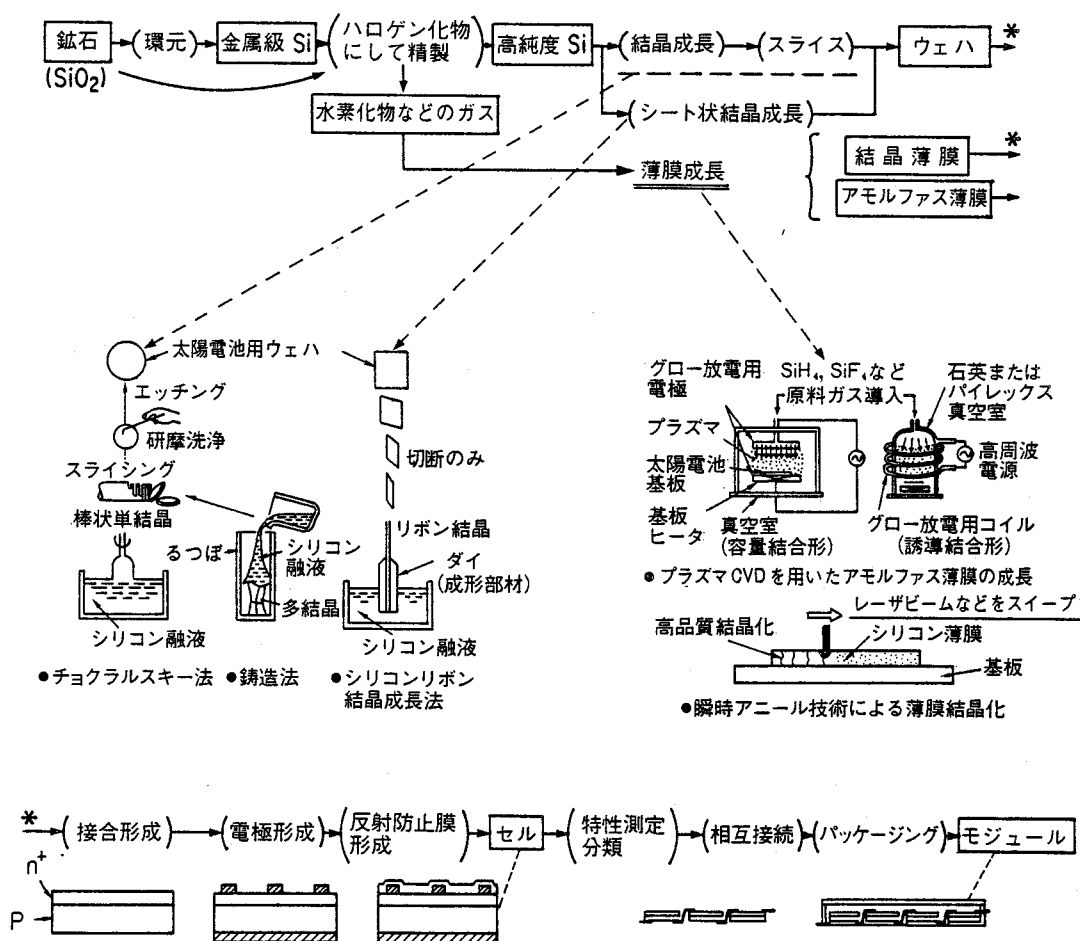


図1.1 低コストシリコン太陽電池の製造工程フローダイアグラム

定法が発表された⁸⁾。基本的には NASA / ERDA の“直達日射”法と同じであるが、標準太陽光は電子技術総合研究所の研究⁹⁾に基づいて、日本の実情に合ったものに修正されている。EC 諸国の場合は EC の Joint Research Center (Ispra Italy) に地上用太陽電池の測定法委員会が置かれ、EC の標準測定法がまとめられた。基本的には、前述した NASA/ERDA の測定法に倣ったもので、標準太陽光は全く同一のものを採用している。

その後、測定法の研究の進展に伴い、全天日射によるレファレンス太陽電池の較正法に関心が集まった。その理由としては、①太陽電池は全天日射の下で使用されること、②全天日射の場合にはある範囲の大気条件のもとで安定な測定が可能であること、などが挙げられる。それ故に、DOE / SERI (Solar Energy Research Institute) 及び RAE (Royal Aircraft Establishment, 英国) は、全天日射測定法を集中的に研究し、全天日射下における較正法を提案した^{7,10)}。DOE / SERI の較正法は傾斜面における全天日射下で較正がなされ、RAE の較正方法は水平面における全天日射下で較正がなされるもので、現在、前者は“Total Sunlight Method” 後者は“Global Sunlight Method” と呼ばれている。DOE / SERI の較正法は間もなく ASTM (American Society for Testing and Materials) の標準測定法¹¹⁾として採用され、太陽電池が太陽の方向に37°傾斜した位置におけるエアマス1.5の“全天日射”を標準太陽光とするレファレンス太陽電池方式が米国における標準測定法として確立された。この標準太陽光は米国の平均的な日射状態を表すもので、37°は米国の平均緯度、エアマス1.5は米国の平均の光発電出力を示す太陽高度である。

丁度同じ頃、日本においても太陽電池の工業標準化の必要性が叫ばれるようになり、1981年から光産業技術振興協会に太陽電池専門委員会が設けられ、太陽電池全般についての JIS (日本工業規格) 案を検討することになった。著者等は①日本の不順な気候では較正に適した測定条件を得る機会が少ないこと、そして②屋内における測定の方が精度が高いこと、を考慮して標準ランプを絶対照度基準とする屋内較正法を確立し、日本の標準較正法として提案した¹²⁾。この較正法は現在“Solar Simulator Method” と呼ばれている。

国際的にも、1981年に IEC (International Electrotechnical Commission, 国際電気標準会議) 総会において、太陽光発電システムに関しては、コンポーネントまで含めて TC (Technical Committee, 技術委員会)-82において扱われることに決定され、1982年に第1回の IEC / TC-82 委員会が開催され、活動方針と WG (ワーキング・グループ) -1, 2, 3 の設置を決定した。早急に国際標準化が求められているセル・モジュール出力測定法の制定を主たる目的とする WG-2 は、単結晶シリコン太陽電池の平板型モジュールの出力測定法を優先的に検討し、かなりの紆余曲折を経て最近ようやく一致した見解に到達した。その内容は、ASTM の37°傾斜の AM 1.5 全天日射を標準太陽光とするレファレンス太陽電池方式を採用し、その他の規定や手順は EC の Joint Research Center でまとめたものを基にして仕上げたものである。しかし、レファレンス太陽電池の較正法については各国の主張があり、未だ統一見解に達していない。ASTM の“Total Sunlight Method”, RAE の“Global Sunlight Method”, 日本の“Solar Simulator Method”, のいずれも IEC TC-82

の較正法として現在認められているが、サミット太陽光発電専門家会議^(注)の持回り測定結果をみて較正法を絞ることになっている。

1.3 本論文の構成と概要

本研究は主として低コスト・高効率の多結晶シリコン太陽電池の開発を目的としてなされた、太陽電池の光電物性と測定・評価法の研究である。新材料・新プロセスによる新型の太陽電池の開発過程においては、それらに適合した測定評価技術が求められ、その適切な評価に基づいて新たな製作技術、製作条件の進展がもたらされる。例えば、1940～1950年代の無転位 CZ シリコン結晶の開発は今日の IC 技術の発展の基礎を築いたが、これはシリコン単結晶の測定評価技術の発展に負うところが大きい。そして、低コストシリコン基板の研究開発は、この CZ シリコン結晶開発時に立ち返って各種の試みがなされることになる。

低コスト・高効率シリコン太陽電池の研究開発の特徴は、①低コスト化技術から必然的に発生してくる結晶の不完全性（不純物、結晶粒界、結晶欠陥）を測定評価しより優れた結晶基板を製作すること、②結晶基板の不完全性が太陽電池出力特性に及ぼす効果を調べデバイス特性の高性能化をはかること、である。このために、シリコン製作条件→シリコン結晶の不純物及び欠陥の評価→不純物及び欠陥のデバイス特性に及ぼす効果→デバイス性能の標準測定、という順序でそれぞれの段階ごとに適切な測定評価法が求められる。

本論文は表1.1に示すような構成から成り立っている。前半は主としてシリコン結晶基板とそれから製作された太陽電池のデバイス特性、デバイス物性の評価法について記し、後半は主としてデバイス性能の標準測定法について記す。

第1章 序論

本章においては、本研究を始めそして遂行した歴史的・社会的背景について述べ、次いで本論文の構成と概要を記す。

第2章 結晶系シリコン太陽電池のデバイス特性

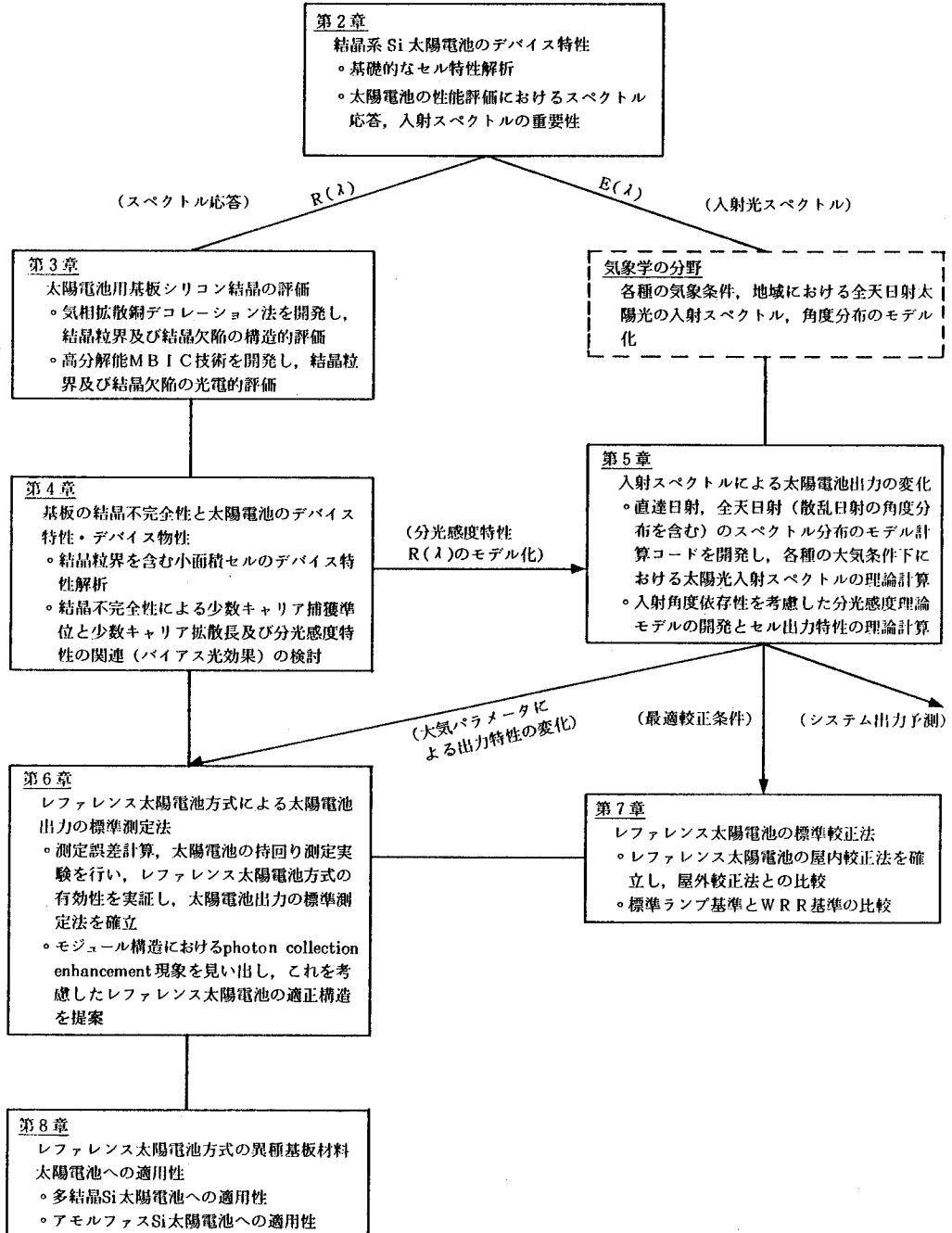
本論文の記述に関連する基礎的知識として、結晶系シリコン太陽電池のデバイス特性について簡単に説明し、太陽電池の本質的な要素を明確にする。太陽電池の性能評価については、入射スペクトルとスペクトル応答（分光感度特性）の重要性を示す。

(注) サミット太陽光発電専門家会議

1982年のベルサイユ・サミット（主要先進国首脳会議）で、停滞を続ける世界経済の活性化のために先端科学技術の分野で開発協力を進めるべきことが提唱され、1983年のウィリアムズバーグ・サミットにおいて、国際協力プロジェクトの推進が了承された。この合意に基づいて、太陽光発電プロジェクトに関しては、太陽電池の共通評価法の確立を目的とした太陽電池セル・モジュールの国際的な持回り測定実験を行っている。1984年に行われた太陽電池セルの持回り測定実験^{13),14)}に続いて、現在は太陽電池モジュールの持回り測定実験を行っている。

表1.1 本研究の構成と概要

太陽電池の光電物性と測定・評価法に関する研究



第3章 太陽電池用基板シリコン結晶の評価

太陽電池用基板シリコン結晶を評価するには、基板の結晶学的な構造と光電氣的性質の関係を把握する必要がある。通常、結晶中に存在する不純物のために、この関係が複雑な見えにくいものになっているが、一定水準以上の純度のものになれば光電氣特性は欠陥の性質を反映してくる。本章では、まず、太陽電池用基板シリコン結晶の結晶粒界や結晶欠陥等の結晶不完全性の構造的な評価を銅デコレーション法で行い、続いて、太陽電池の光電氣的性質に影響を与える結晶粒界や結晶欠陥について著者の開発した高分解能 MBIC (monochromatic light beam induced current) 法で調べ、各種欠陥と光電物性の関連を明らかにする。

第4章 基板の結晶不完全性と太陽電池のデバイス特性・デバイス物性

太陽電池用基板シリコン結晶の評価に続いて、これらの結晶の不完全性が太陽電池のデバイス特性、デバイス物性に及ぼす影響について調べ、太陽電池の高性能化をはかる必要がある。本章では、製作した高効率多結晶シリコン太陽電池のデバイス特性の分析を通して、結晶不完全性そしてその他の出力損失要因の点検を行い高効率化の可能性を検討する。次に、太陽電池の出力特性を決定づける分光感度特性が照射光強度、照射光波長に依存すること、そして、それが少数キャリア拡散長の増大に原因していることを明らかにし、結晶欠陥と少数キャリア拡散長の関連について検討する。

第5章 入射スペクトルによる太陽電池出力の変化 ——大気パラメータの効果——

低コスト基板シリコン結晶の不完全性がデバイス出力特性に与える効果についてこれまで検討してきたが、デバイス性能が向上し、太陽電池の効率が高くなるに従い、競合する材料の太陽電池出力や理論出力との比較が問題とされ、客観的な標準出力測定法が必要となってくる。とりわけ、太陽電池の出力電流は入射スペクトルに大きく依存して変化し、太陽電池の出力性能がこの入射スペクトルによって大きく左右されるため、標準の太陽光スペクトルを定め、この標準太陽光のもとで太陽電池の評価がなされねばならない。

本章では、この標準太陽光と標準測定法を確立するにあたって、各種の自然太陽光下における太陽電池出力の変化について検討した結果を述べる。結晶シリコン太陽電池とアモルファスシリコン太陽電池の分光感度モデル、そして各種の大気条件（大気パラメータ）における自然太陽光の分光放射モデルを開発することにより、この両者の積和から各種の大気条件における太陽電池出力の理論計算を可能にする。続いて、この理論解析の結果から次の3つの事項を明らかにする。

- ① 大気パラメータ変化による入射スペクトルの変化そして太陽電池出力の変化。
- ② 大気パラメータ変化に対して比較的安定な太陽電池出力測定が可能な測定条件（大気条件）の範囲。
- ③ 太陽電池を利用する光発電システムの出力予測。

第6章 レファレンス太陽電池方式による太陽電池出力の標準測定法

本章では、第5章の理論計算に基づいて、レファレンス太陽電池方式による出力測定の測定精度について吟味し、この方式の有効性と限界を明らかにする。続いて、標準測定法としてのコンセン

サスを得るために行った太陽電池の持回り測定の結果を分析し、この方式の有効性を実証する。また、モジュール構造において発見した光収集エンハンスメント (photon collection enhancement) の効果、ソーラシミュレータ下における反射の効果、等を考慮してレファレンス太陽電池の適正構造について論ずる。最後に、IEC 案及び JIS 案として確立した太陽電池の出力測定法について述べる。

第7章 レファレンス太陽電池の標準較正法

全天日射下におけるレファレンス太陽電池の屋外較正法と標準ランプを照度基準とする日本提案の屋内較正法との比較を行い、屋内較正法の較正精度を実証する。更に、WRR 基準に基づく屋外較正值と標準ランプ基準に基づく屋内較正值の比較を行い、長年の間放置されていた、この2つの絶対基準の違い、そして問題点を明らかにする。

第8章 レファレンス太陽電池方式の異種基板材料太陽電池への適用性

最近進歩の著しい多結晶シリコン太陽電池とアモルファスシリコン太陽電池をとりあげ、単結晶シリコン太陽電池を対象として確立されたレファレンス太陽電池方式の適用性を検討する。

第9章 結論

本論文のまとめを行い、今後の課題・展望を述べる。

参考文献

- 1) F. C. Treble : Proc. 17th IEEE Photovoltaic Specialists' Conf., Kissimmee, FL, May 1-4, 1984, IEEE, New York, 1984, p.482. IEC TC-82 Committee Document 82 (central Office) 4.
- 2) 勸光産業技術振興協会「オプトエレクトロニクスの標準化に関する調査研究IV」昭和60. p.510.
勸光産業技術振興協会「オプトエレクトロニクス日本工業規格素案」昭和60.5.16.
- 3) 林：電気学会雑誌 第102巻12号（昭和57年）p.1123
- 4) L. N. Scudder and T. M. Klucher : "Terrestrial Photovoltaic Measurements" Workshop Proceedings, March 19-21 (1975), Cleveland, Ohio, NASA TMX-71802.
- 5) NASA Publication : "Terrestrial Photovoltaic Measurements-II" November (1976), Baton Rouge, Louisiana, NASA CP-2010.
- 6) NASA Publication : "Terrestrial Photovoltaic Measurement Procedures" (June 1977), NASA TM 73702.
- 7) F. C. Treble : Proc. 1st Commission of the European Communities Conf. on Photovoltaic Solar Energy, Luxemburg, September 27-30, 1977, Reidel, Dordrecht, 1978, pp. 732-744.
- 8) ㈱日本電機工業会：“太陽エネルギー利用システム調査研究-昭和55年度サンシャイン計画委託調査研究成果報告書”（1981.3）p.267.
- 9) 羽生，鈴木，長坂：電子技術総合研究所研究報告 第812，813号（昭和56年），第830号（昭和

58年).

- 10) R. Matson, R. Bird and K. Emery : SERI Document, SERI / TR-612-964, Sept. 1981, p.8.
- 11) American Society for Testing and Materials : Calibration and Characterization of Non-Concentrator Terrestrial Photovoltaic Reference Cells under Global Irradiation, ASTM Stand, E1039-85.
- 12) R. Shimokawa, F. Nagamine, Y. Miyake, K. Fujisawa and Y. Hamakawa : Jpn. J. Appl. Phys. 26 (1987) 154.
- 13) H. Ossenbrink, R. Steenwinkel and K. Krebs : The result of the 1984-1985 round robin calibration of reference solar cells for the Summit Working Group on Technology, Growth and Employment. Commission of the European Communities, Joint Research Centre Ispra establishment, EUR 10613EN, April 1986.
- 14) 下川：新エネルギー総合開発機構「サンシャイン計画委託調査研究成果報告書-日豪等太陽エネルギー技術協力事業V」 p.1 (昭和61年3月)
- 15) 下川, 堀米：エレクトロニクス'81, No.9, p.1009.

第2章 結晶系シリコン太陽電池のデバイス特性

2.1 まえがき

ここでは本論文の記述に関連する基礎的知識として結晶系シリコン太陽電池のデバイス特性について簡単に説明しておく。各種のセル構成の太陽電池、例えば p-n 接合太陽電池、MIS 型太陽電池、多接合 (multi-junction) 太陽電池等が存在するが、最も普及し理論的にも明確にされている p-n 接合太陽電池の電流・電圧特性を中心に議論をすすめ、太陽電池の本質的な要素を明確にする。また、太陽電池の性能評価については、入射スペクトルとスペクトル応答 (分光感度特性) の重要性を示す。

2.2 太陽電池のセル特性

太陽電池は、光照射により接合近くで電子・正孔対を生成するように工夫された半導体ダイオードである。光により生成された電子・正孔対は、接合による内部電界によって分離され、半導体の一方に正の、他方に負の電荷が集まり両端に起電力が発生する (ダイオードの光起電力効果)。このように、照射された光はダイオードの光起電力効果により電気エネルギーに変換される。このときの理想的な太陽電池の単位面積当たりの電流 (J) - 電圧 (V) 特性は次式で与えられる¹⁾。

$$J = J_L - J_{01} [\exp(qV/kT) - 1] \quad (2.1)$$

但し

$$J_{01} = qn_i^2 \left(\frac{D_n}{N_A L_n} + \frac{D_p}{N_D L_p} \right) \quad (2.2)$$

J_L は光生成電流密度、 J_{01} は暗状態における逆方向飽和電流密度である。 N_A 、 N_D は p 側のアクセプタ濃度、n 側のドナー濃度で、 n_i は真性キャリア濃度、 D_n 、 D_p および L_n 、 L_p は、それぞれ電子、正孔の拡散定数と少数キャリア拡散長である。出力電圧を最大にするためには J_{01} はできるだけ小さくされねばならない。

(2.1) 式をグラフで表すと図2.1のようになる。実線は光照射時、破線は暗状態の電流・電圧特性である。このとき、図の第1象限の部分が外部に取り出せる起電力となる。今、太陽電池に負荷をつなぐとき、その負荷インピーダンスで動作点が定まり、一定の電圧で一定の電流が供給される。負荷インピーダンスがゼロのときの出力電流、すなわち、電流軸との交点を短絡電流 J_{sc} と呼び、負荷インピーダンスが無限大のときの電圧、すなわち電圧軸との交点を開放電圧 V_{oc} と呼んでい

る。直列抵抗が小さいと短絡電流は光生成電流に等しくなり、照射光量に比例する。開放電圧は(2.

1) 式で $J = 0$ より

$$\begin{aligned} V_{oc} &= \frac{kT}{q} \ln(J_{sc}/J_{01} + 1) \\ &\approx \frac{kT}{q} \ln(J_{sc}/J_{01}) \end{aligned} \quad (2.3)$$

で与えられる。

出力電力は

$$P = JV = J_L V - J_{01} V [\exp(qV/kT) - 1] \quad (2.4)$$

で表され、そして、最大出力は最適負荷条件すなわち $\partial P / \partial V = 0$ の条件のときの電流密度 J_m 、電圧 V_m から求まり

$$\begin{aligned} P_{\max} &= J_m V_m \\ &= FF \cdot J_{sc} \cdot V_{oc} \end{aligned} \quad (2.5)$$

と表される。 FF は曲線因子と呼ばれ、電流・電圧特性の“ふくらみ”を表し、理想的な太陽電池の場合には $FF = 0.82 \sim 0.83$ となる。エネルギー変換効率 η は、入射光エネルギー P_{in} と3つのデバイスパラメータ J_{sc} 、 V_{oc} 、 FF から

$$\eta = (FF \cdot J_{sc} \cdot V_{oc} / P_{in}) \times 100 \quad (\%) \quad (2.6)$$

で与えられる。

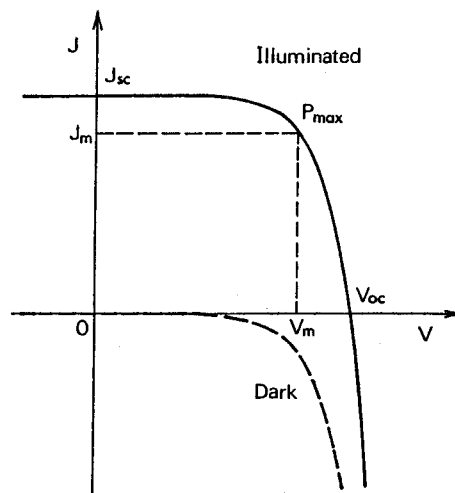


図2.1 p-n 接合の太陽電池光照射時，暗状態時の電流・電圧特性

実際の太陽電池，特に，多結晶シリコン太陽電池の場合は (2.1) 式のような単純な形では不十分で，図2.2の等価回路で示すように，①接合にかかる電圧と端子電圧の差を表すための直列抵抗 R_s ，②接合の電流リークを表す並列抵抗 R_{sh} ，③空乏層領域，表面，粒界面等におけるキャリアの再結合による項 $J_{02} \exp(qV/nkT)$ ($n \geq 2$)，の3つの要素を考慮した次式で表現される。

$$J = J_L - J_{01} \exp [q(V + JR_s)/kT - 1] - J_{02} \exp [q(V + JR_s)/nkT - 1] - \frac{(V + JR_s)}{R_{sh}} \quad (2.7)$$

これらのセルパラメータの値は，光照射時と暗状態時で変化が無いと仮定して暗状態における J - V 特性測定から値が求められる。これらの3つの要素は，いずれも (2.1) 式の理想的な太陽電池の性能を低下させる方向に働く。従って，高効率の太陽電池を製作する場合，光生成電流の増加により短絡電流 J_{sc} の増大を図ること，そして飽和電流 J_{01} の低下により開放電圧 V_{oc} の増大を図ること，がまず第1に重要なことであるが，ここで述べた3つの要素の効果を少なくすることも実用面では重要になってくる。

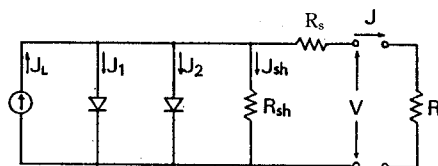


図2.2 p-n 接合太陽電池の等価回路

2.3 入射スペクトル，スペクトル応答と出力電流

太陽電池の出力電流密度 J_{sc} は，入射スペクトルと太陽電池のスペクトル応答によって決定され，次式で表される。

$$J_{sc} = \int E(\lambda) \cdot R(\lambda) d\lambda \quad (2.8)$$

$E(\lambda)$ は入射光の分光放射照度， $R(\lambda)$ は太陽電池の分光感度， λ は入射光の波長である。分光放射照度 $E(\lambda)$ は宇宙用太陽電池のように用途が大気圏外に限られているのであれば一義的に定まるが，地上用太陽電池の場合には図2.3に示すように地球を取り巻く大気による太陽光の散乱，吸収があり，太陽の位置，大気の状態によって大きく変化する。従って，太陽電池の出力電流も入射スペクトルに依存して大きく変化し，この入射スペクトルは太陽電池の性能を評価するときに最も重要な問題となってくる。

一方、太陽電池がこの入射スペクトルにどのように応答するかを表す分光感度 $R(\lambda)$ は太陽電池性能に強く関係する。そこで、p-n 接合太陽電池の分光感度を図2.4に示す簡単な一次元モデルで考える。接合部は表面から d の距離にあり、接合の空乏層巾は拡散長 L_n や L_p よりも十分小さいと仮定する。距離 x における光子密度 Φ は、表面 ($x=0$) における光子密度を Φ_0 、吸収係数を α として、

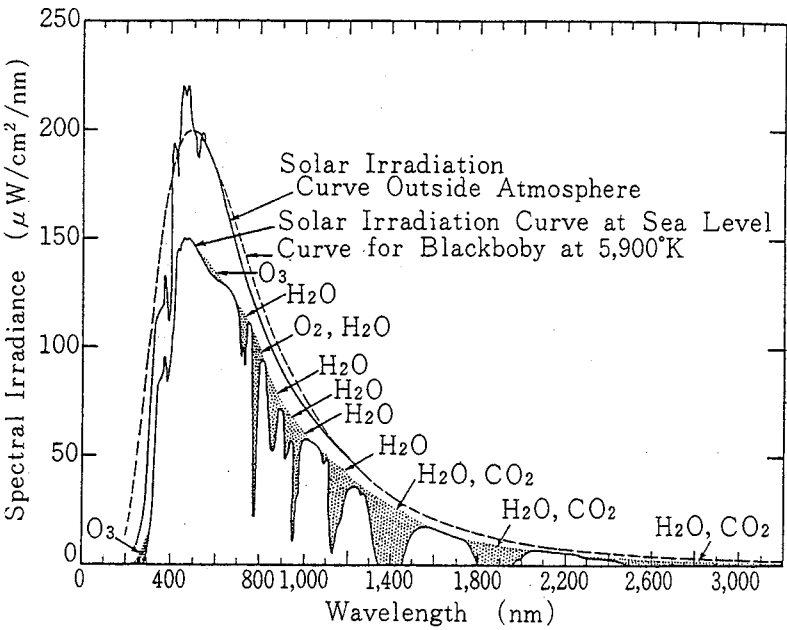


図2.3 地上における太陽直射光の分光放射照度分布³⁾

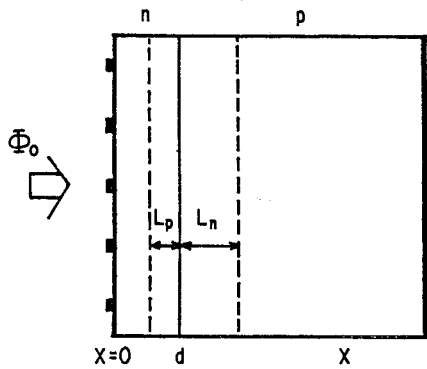


図2.4 スペクトル応答計算用の太陽電池一次元モデル

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\alpha x} \quad (2.9)$$

で与えられ、この光子によって生成される電子・正孔対の発生率は光電量子効率を 1 とすると

$$G(x) = \Phi_0 \alpha e^{-\alpha x} \quad (2.10)$$

で与えられる。生成された少数キャリアは拡散によって n 側では $\exp\{-(d-x)/L_p\}$, p 側では $\exp\{-(x-d)/L_n\}$ の割合で接合に到達する。従って、収集される少数キャリアは、n 側の正孔

$$N_h = \int_0^d \Phi_0 \alpha \exp(-\alpha x) \cdot \exp\left(-\frac{d-x}{L_p}\right) dx \quad (2.11)$$

p 側の電子

$$N_e = \int_d^\infty \Phi_0 \alpha \exp(-\alpha x) \cdot \exp\left(-\frac{x-d}{L_n}\right) dx \quad (2.12)$$

で与えられる。こうして、p-n 接合を横切るキャリアの総数は

$$N_T = \frac{\Phi_0 \alpha}{\alpha - \frac{1}{L_p}} [\exp(-d/L_p) - \exp(-\alpha d)] + \frac{\Phi_0 \alpha \exp(-\alpha d)}{(\alpha + \frac{1}{L_n})} \quad (2.13)$$

となる。

従って、波長 λ の光子密度 $\Phi_0(\lambda)$ により生成された電子・正孔対による光電流は

$$\begin{aligned} J_L(\lambda) &= qN_T \\ &= q\Phi_0 \left\{ \frac{\alpha}{\alpha - \frac{1}{L_p}} [\exp(-d/L_p) - \exp(-\alpha d)] + \frac{\alpha \exp(-\alpha d)}{(\alpha + \frac{1}{L_n})} \right\} \end{aligned} \quad (2.14)$$

となり、波長 λ の入射フォトンに対する太陽電池の光起電力効果量子効率(以後、量子効率と略する。また、キャリア収集効率とも言う。)は

$$\begin{aligned} Q_q(\lambda) &= \frac{J_L(\lambda)}{q\Phi_0(\lambda)} \\ &= \frac{\alpha}{\alpha - \frac{1}{L_p}} [\exp(-d/L_p) - \exp(-\alpha d)] + \frac{\alpha \exp(-\alpha d)}{(\alpha + \frac{1}{L_n})} \end{aligned} \quad (2.15)$$

で与えられる。より厳密には、素子の構造を考慮して $G(x)$ を電子・正孔対の生成源とした拡散方程式を解けば光電流を理論的に計算できる²⁾。大きな光電流、すなわち、大きな短絡電流を得るには接合を極力浅くして短波長応答をよくすると共に、拡散長 L_n を極力大きくして長波長応答を良くすることが望ましい。通常、接合深さ d は $0.3 \sim 0.4 \mu\text{m}$ であるので、結晶シリコン太陽電池の場合は波長 800nm 以上の入射光に対してはいずれの指数項も 1 に近づき、その結果

$$Q_q(\lambda) \doteq \frac{\alpha}{\alpha + \frac{1}{L_n}} \quad (2.16)$$

と近似することができ、量子効率（収集効率）はまさしく拡散長 L_n の大きさによって決定される。また、(2.2)式でみるように L_n が大きくなることによって J_{01} も減少し、その結果、開放電圧 V_{oc} も大きくなる。従って、低コストで高効率の結晶シリコン太陽電池を開発する場合、まず第1になすべき努力は、結晶粒径を大きくして結晶粒界の効果を小さくすること、そして、結晶粒内の少数キャリア拡散長 L を大きくすることである。

入射スペクトルが等エネルギー E ワットの場合、光子数 $\Phi_0(\lambda)$ は

$$\Phi_0(\lambda) = \frac{E}{q(=1.602 \times 10^{-19} \text{C})} \cdot \frac{\lambda (\mu\text{m})}{1.24} \quad (\text{個/sec}) \quad (2.17)$$

ということになり、単位波長あたりの光電流 $J_L(\lambda)$ 、そして分光感度 $R(\lambda)$ は

$$J_L(\lambda) = q\Phi_0(\lambda) Q_q(\lambda) = \frac{\lambda}{1.24} E Q_q(\lambda) \quad (\text{A}) \quad (2.18)$$

$$R(\lambda) = \frac{J_L(\lambda)}{E} = \frac{\lambda}{1.24} Q_q(\lambda) \quad (\text{A/W}) \quad (2.19)$$

と表すことができる。

参考文献

- 1) S. M. Sze : Physics of Somiconductor Devices (John Wiley & Sons, 1969) p.643.
- 2) H.J. Hovel : Semiconductors and Semimetals, vol. 11 Solar cells (Academic Press, 1975) p. 15.
- 3) R. Matson, R. Bird and K. Emery : Terrestrial Solar Spectra, Solar Simulation, and Solar Cell Efficiency Measurement, SERI/TR-612-964 (198) p.8.

第3章 太陽電池用基板シリコン結晶の評価

3.1 まえがき

太陽電池モジュールのコスト低減化が求められ、すべての製造工程において創意工夫が試みられる中で、多くの仕事が太陽電池用基板シリコンウェハの研究に向けられている。現在までに開発された基板製造技術は、すでに述べたように大別して3種類の方法、①シリコン融液から結晶インゴットを高速で引き上げるチョクラスキー法、②鑄型にシリコン融液を流し込み結晶インゴットを作るキャスティング法、③シリコン融液から薄いリボン状に結晶を成長するリボン結晶成長法がある。いずれの製造技術も、コスト低減化をはかる目的で原料として金属級ないしソーラグレードのシリコンを使用して高速で結晶を製作しているために、常に不純物と結晶不完全性の問題をかかえている。最近では、シリコン原料の精製技術が向上し半導体級に近いものまで製作できるようになり、現在のところ、結晶不完全性が当面の研究課題となっている。幸いなことに、各種の方法で製造されたシリコン多結晶の結晶粒界、結晶欠陥については、共通点が多い。

本章では、実用化されている EFG リボンシリコン多結晶とキャスティングシリコン多結晶を使用して、結晶粒界と結晶粒内の欠陥の構造と性質を明らかにする。3.2節では、粒界及び欠陥の構造的な評価を銅デコレーション法¹⁾を使用して行い、3.3節では、粒界及び欠陥の光電的性質を MBIC 法^{2),3)}により明らかにして、粒界及び欠陥と光電物性の関連について検討する。

3.2 結晶粒界及び結晶欠陥の構造的評価

シリコン結晶の欠陥を検出する方法は種々あるが、それらはいずれも、その時代の要請に見合った品質のシリコン結晶を製造、評価する中から生まれてきた。初期において、CZ 法、FZ 法結晶の評価方法として、各種の選択エッチング技術^{4~6)}が開発された。また、無転位シリコン結晶の研究過程において銅デコレーション法^{5),7)}、X線トポグラフ法^{8),9)}が開発され、後者は今日も単結晶評価技術として広く使われている。しかし、太陽電池用の低コストシリコン製造法によって作られた結晶は、粒界その他の欠陥を多く含んでいるために従来のX線トポグラフ法によって評価することは難しく、また、選択エッチング法は——これは本研究から確認されたのであるが——太陽電池の光電流特性にあまり影響を与えない局所的な小さな歪みにまで敏感に反応し、その結果、除去されなくてもよい欠陥と、除去されねばならない悪質の欠陥との区別をつけにくい。そこで、著者は、銅原子が歪場の存在に従って偏析する傾向をもっていることに着目して、銅デコレーション法により EFG リボン結晶の評価を試みた¹⁾。

3.2.1 清浄表面を保つ気相拡散銅デコレーション法の開発

シリコン結晶における銅原子の拡散係数が大きいこと、そして温度差による銅の溶解度の変化が大きいこと、を利用してシリコン結晶の欠陥部に銅原子を偏析しその像を赤外顕微鏡で観察する方法が銅デコレーション法と呼ばれている。銅の拡散は、通常シリコン結晶表面を硝酸銅 ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$)、硫酸銅 (CuSO_4)、あるいは金属銅の推積層でおおい、熱処理することによってなされる^{10),11)}。しかし、これらの方法は表面が汚れ、欠陥像が不鮮明になるので、赤外顕微鏡観察の前に表面をミラーポリッシングしなければならない欠点をもつ。そこで、著者は、サンプルシリコン結晶の清浄表面を保つために、図3.1に示す2ゾーン拡散炉を用いて、金属銅をソースとする気相拡散デコレーション法を開発した^{1),5),12),13)}。この方法は、上部ゾーンに粒状の金属銅を、下部ゾーンにサンプルをおいた後、キャリアガスのアルゴンで置換し、両ゾーンを同時に昇温することによって、銅の拡散を行うもので、最適拡散条件は、通常 Ar ガス流量 0.5~0.7 l/min, サンプル温度 950°C~1,050°C, 金属銅温度955°C~1,055°C (サンプル温度より 5°C高く設定)、拡散時間 1~3 hrである。次に、石英管の冷えた部分にサンプルをひき出し、急冷することによって銅の偏析を行う。典型的な冷却速度は約12°C/sec である。銅の気相拡散の条件については後程述べることにする。

以上のようにして銅デコレートされたサンプルを赤外顕微鏡によって観察した。結晶粒の面方位はX線バック・ラウエ法によって調べられた。図3.2は、銅デコレートされた {111}, {110}, {100} 面の CZ ウェハの赤外顕微鏡写真である。黒く見える部分が銅の偏析パターンである。この CZ 結晶のデコレーションパターンは、S. M. Hu¹⁴⁾によって観察されたものと一致しており、{111} ウェハの場合には $\langle 112 \rangle$ 方向に針 (needle) 状のものが、そして $\langle 110 \rangle$ 方向にスWORD (sword) 状のものが横たわっている。これらは、いずれも {110} 面上に横たわる長楕円 (長軸 $\langle 110 \rangle$, 短軸 $\langle 100 \rangle$) 形のデコレーションから成っているものと考えられ、これに従って描かれた {111} {110} {100} 面の理想のデコレーションパターンを示しておく。

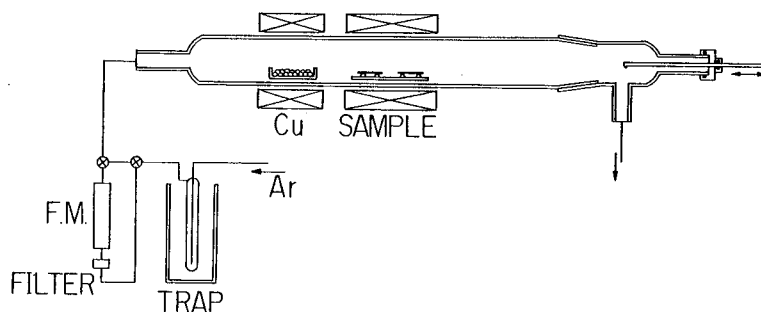


図3.1 2ゾーン銅拡散炉

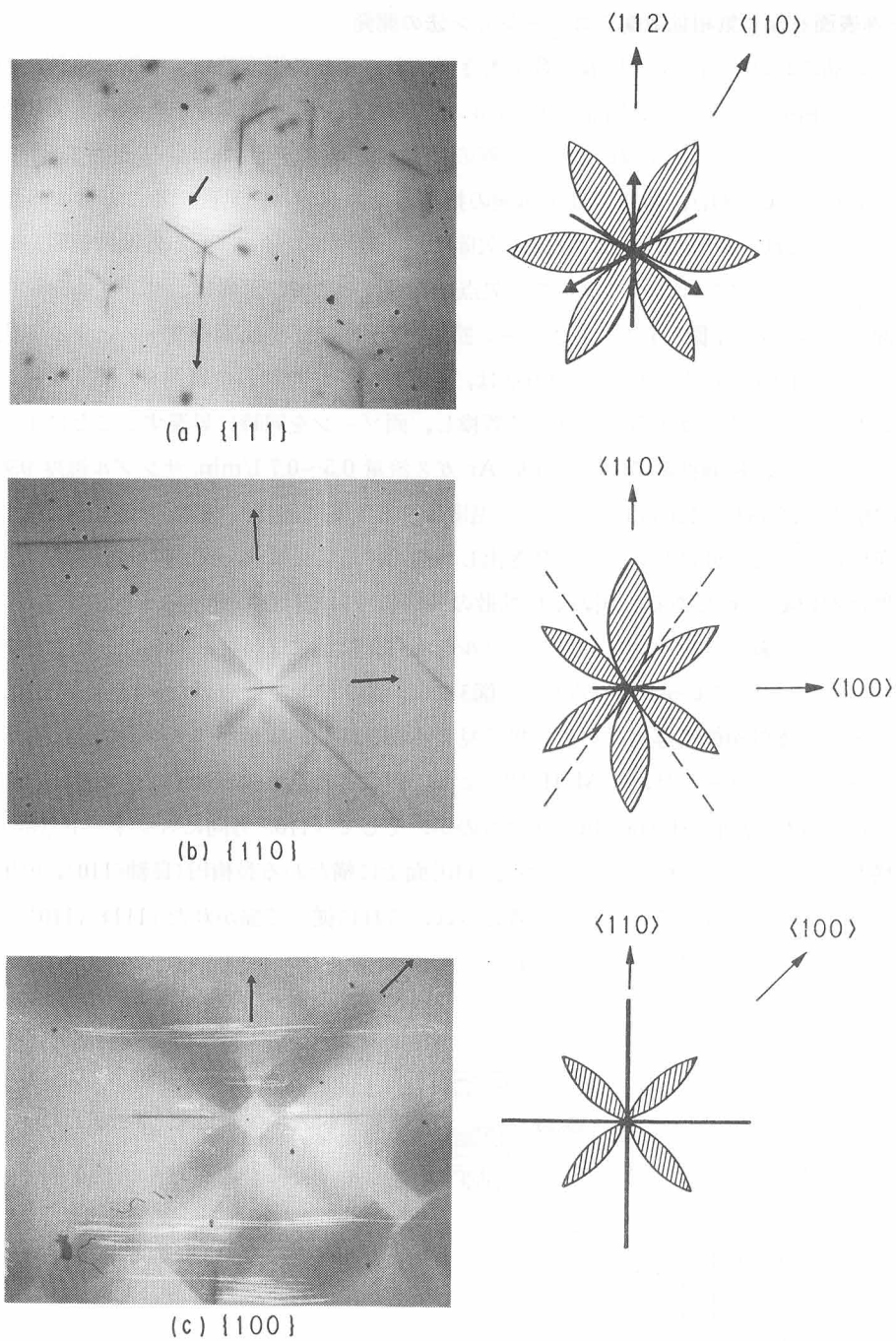


図3.2 CZ シリコン結晶の銅デコレーション像と理想デコレーションパターン

- (a) $\{111\}$ 面, needle 状のデコレーションが表面と交わる場所に銅とシリコンの合金ができる。
- (b) $\{110\}$ 面, 点線は銅デコレートされた $\{110\}$ 面と表面の交線を示す。
- (c) $\{100\}$ 面, 表面を薄くポリッシングした時の銅デコレーション像。

清浄表面を保つ銅の気相拡散を行うには、次の3つの条件が満足される必要がある。

- ① 冷却時に銅のデコレーション像が形成されるように、十分な量の銅原子がシリコン結晶内部に拡散していること。
- ② サンプル表面に銅の推積が生じないように、金属銅ソース温度とサンプル温度の差を大きくしすぎないこと。
- ③ 冷却速度は可能な限り速くすること。

本研究では②の温度差を5°Cとした上で、①、③の条件について検討を加えた。まず、サンプル温度850°C~1,100°C、冷却速度12°C/secの銅デコレーション実験を行い、代表的なデコレーション像を図3.3に示した。図3.3cはサンプル温度1,000°Cのデコレーション像で、CZ-Si結晶は{111}面の典型的なパターンを示し、そして、EFGリボン結晶は、大きな歪を伴った面欠陥はもちろん粒内の小さな個々の欠陥も鮮明なデコレーション像を示している。サンプル温度950°C以下では、CZ-Si結晶はほとんどデコレートされないか、あるいは図3.3a, bに示すように、樹枝状の像がところどころみられる程度である。リボン結晶は大きな歪を伴った面欠陥がデコレートされるだけで粒内の小さな欠陥はデコレートされない。これは、サンプル温度が低いために銅の拡散係数及び溶解度が小さく、十分な像を形成できないためと思われる。反対に、サンプル温度が1,100°C以上になると、十分な銅原子の拡散、溶解はあるが、急速冷却が困難になり12°C/secでは、ほとんどの銅原子が表面に拡散し、図3.3dにみるように表面で銅-シリコンの合金を形成する。そして、CZ-Si内部はデコレートされず、リボン結晶の大きな歪を伴った欠陥部のみデコレートされる。図3.3d'は表面の銅-シリコンの合金層をポリッシングした後の赤外顕微鏡像である。

次に、冷却速度の効果を調べた。石英管の冷えた部分にサンプルをひき出し急冷する方法(12°C/sec)以外に、2つの手法を試みた。1つはサンプルを水中に落下することによる急速冷却。2つはサンプル炉内でゆっくり冷却。前者の場合は、サンプル温度1,100°Cの場合でも十分にデコレートし、図3.3cのような完全なデコレーション像を得ることができる。しかし、サンプルが空気に触れ表面が汚染されて赤外顕微鏡像が不鮮明になり、試料表面のポリッシングが必要となる欠点をもつ。後者の場合は、冷却速度約2.5°C/secと徐冷であるために、多くの銅原子は表面に拡散し、図3.4のように表面の一部に銅-シリコンの合金部をもったデコレーション像となる。

3.2.2 銅デコレーション法による多結晶シリコン基板の評価

CZシリコンウェハで確立した銅デコレーション技術を使用して、多くの結晶欠陥を含んでいるEFGリボンシリコン結晶の評価を行った。使用されたりボン結晶は、幅2.5cm、厚さ300~500 μ mでケミ・メカポリッシング→脱脂→軽い鏡面エッチ(HF-HNO-CH₃COOH系エッチ液)→HF処理が施されたものをスタート試料とした。主な欠陥は不規則粒界、直線粒界(双晶と積層欠陥から成っており、時々小角度(low-angle)の粒界を伴っている)、そして転位である¹⁵⁾。これらの欠陥の光電流特性に及ぼす効果は後程述べることにして、まずEFGシリコン結晶の各種欠陥のデコ

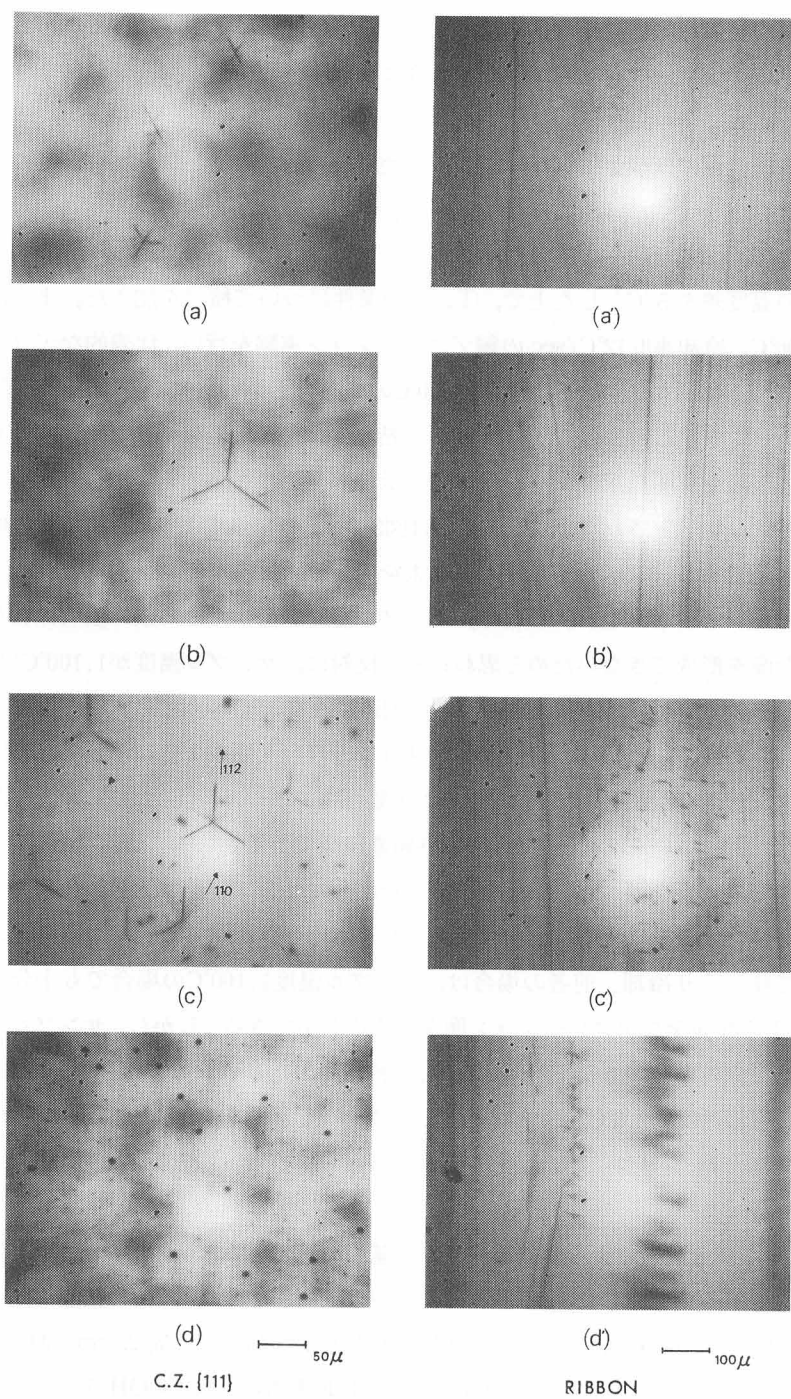


図3.3 CZ-Si 結晶と EFG リボン結晶の銅デコレーション条件。冷却速度12°C/sec, サンプル温度 (a) (a') 900°C, (b) (b') 950°C, (c) (c') 1000°C, (d) (d') 1100°C

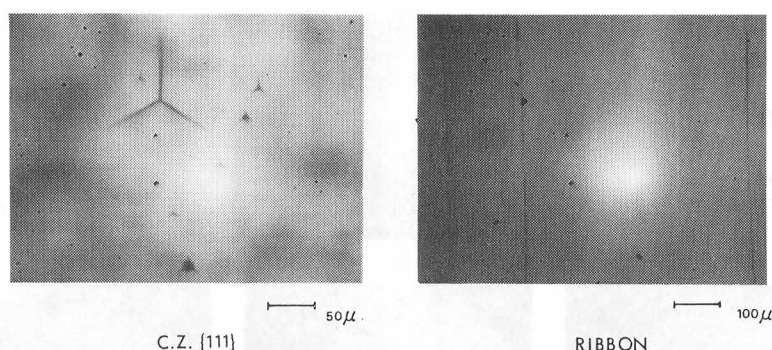


図3.4 CZ-Si 結晶と EFG リボン結晶の銅デコレーション条件。
冷却速度150°C/min, サンプル温度1000°C

レーション像について述べる。

(1) 不規則粒界

SiC の混入や固液界面の温度の乱れから生ずる不規則粒界は最も容易にデコレートされる。図3.5は、これの典型的なデコレーション像で、大きな歪場をもっている粒界には多くのドット状の銅が偏析している¹⁶⁾。粒界の左側の部分は、 $\{120\}$ に近い面方位をもち良質の単結晶の基本的なデコレーションパターンを示している¹⁷⁾。右側の部分は、 $\{110\}$ の基本的なパターンに加えて、歪が存在することを示していると思われる銅のクラウド (clouds) が多く存在する。時々、図3.6に見られるように、粒界上に表面から裏面にまで達している連続した銅デコレーションがみられる。この部分を含んで製作されたショットキ型太陽電池はリークの大きな特性を示す。

(2) 大角度 (high-angle) 粒界

直線状の大角度 (high-angle) 粒界 (高次の双晶面と思われる) のデコレーションパターンは図3.7のようになる。2つの異なった十字形の偏析パターンが見られ、これは2つの異なった面方位の結晶粒が存在することを示している。この2つの十字形パターンの間に、平行なラインが上下方向に走っているのが観察される。この欠陥のデコレーション像を理解するために、表面と断面のジルトルエッチパターンとX線ラウエ観察による結晶粒の極点図 (pole map) を図3.8に示す。この粒界は表面と60°の角度をなす面欠陥であることが断面写真からわかる。そして極点図から、この粒界は結晶粒Aからみると $(2\bar{1}2)$ 面にあたり、結晶粒Bからみると $(21\bar{2})$ 面にあたっていることがわかる。前述したラインは、この面欠陥上を $[101]$ 方向に走っている。以上のことからこの面欠陥は $[101]$ 晶帯軸 (zone axis) の $\{221\}$ 双晶面であると思われる。結局、この大角度粒界には、図3.7にみられるように $[101]$ 方向に走っているライン以外のデコレーションはみられなく、loosely-packedの $\langle 110 \rangle$ 方向に走る非常に小さな歪場があるだけである。

(3) 直線粒界 (linear boundaries)

双晶や積層欠陥などの面欠陥の集合体を直線粒界 (linear boundaries) と呼んでいる。これは、

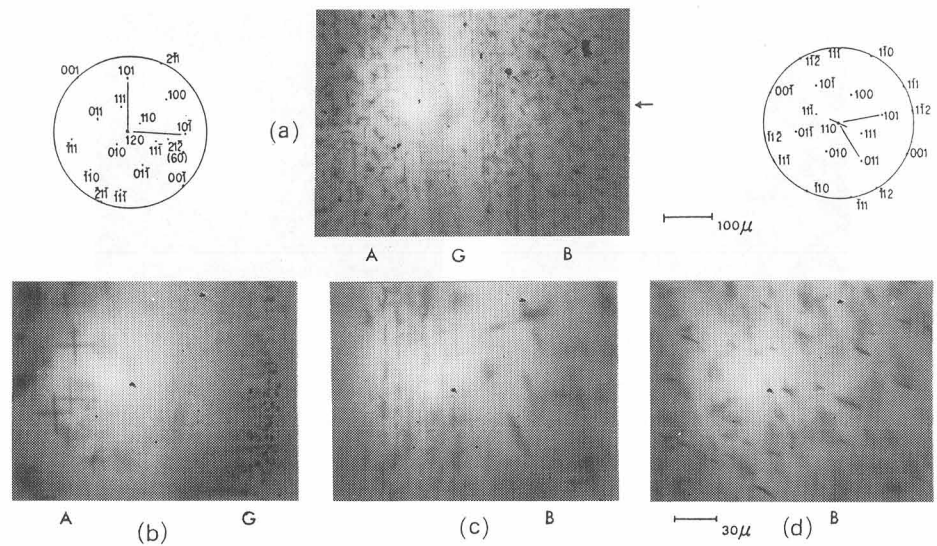


図3.5 (a) 不規則粒界の銅デコレーション像と結晶粒A, Bの極点図(pole map)。(b), (c), (d) : 矢印の位置の拡大像。

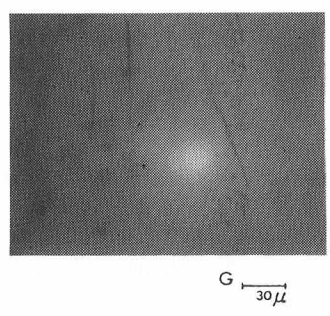


図3.6 不規則粒界面上の連続した銅デコレーション像。

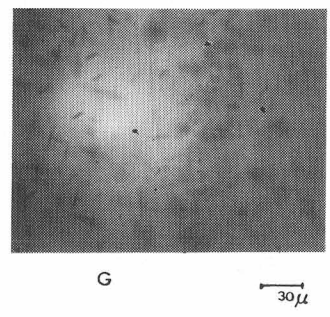


図3.7 大角度 (high-angle) 粒界の銅デコレーション像。

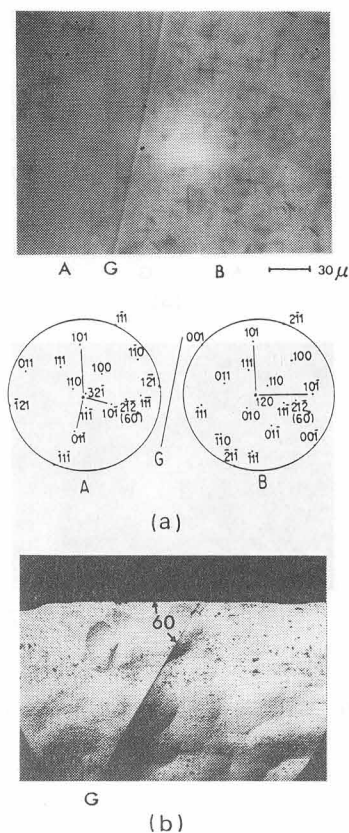


図3.8 大角度(high-angle)粒界の(a)ジルトルエッチ像と結晶粒A, Bの極点図(pole map),
(b)断面のジルトルエッチ像

EFG シリコン結晶の最も特徴的な欠陥で、時々小角度 (low angle) で交叉するのがみられる^{15),18)}。この小角度で交叉する直線粒界のデコレーション像とそのジルトルエッチ像を図3.9に示す。粒界Gは結晶粒Aの直線粒界a, そして結晶粒Bの直線粒界bに交互に平行となっている。直線粒界はほとんど歪場を伴っていないために、明確なデコレーションは現れない。また、交叉するところにみられる小角度の粒界は、大角度粒界と同様に $\langle 110 \rangle$ 方向のみにデコレーションラインがみられる。しかし、多くの歪みを伴った直線粒界 (図3.10) や複雑に交叉する直線粒界 (図3.11) は明確にデコレートされ、歪場を表していると思われる連続の偏析ラインを伴っている。

(4) 歪場

大きな結晶粒の内部にも、時々多くの歪みが入り、X線トポグラフでは影となって現れる部分がある。図3.12は、このような部分のデコレーション像である。 $\{120\}$ に近い面方位の結晶構造を反映した十字形の基本パターンが歪場によりテールをひき、それに加えて直線状のデコレーションが $\langle 110 \rangle$ 方向に走っている。

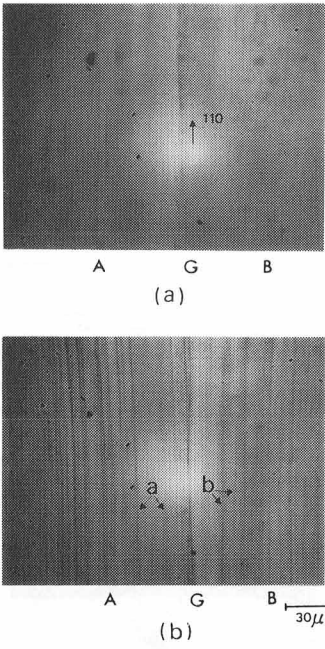


図3.9 直線粒界の(a)銅デコレーション像,
(b)ジルトルエッチ像

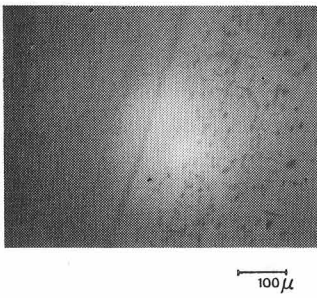
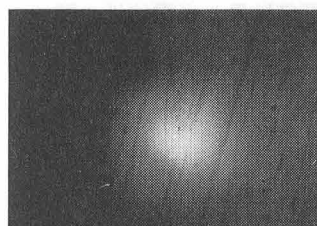
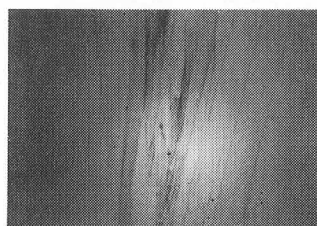


図3.10 歪みを伴った直線粒界の銅デコレーション像。

(a) 100μ 

(b)

図3.11 複雑に交叉する直線粒界の(a)銅デコレーション像,
(b)ジルトルエッチ像

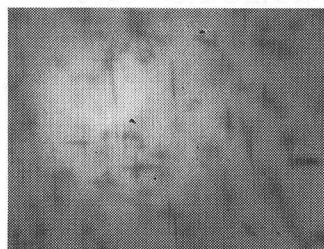
 30μ

図3.12 歪場の銅デコレーション像。

3.2.3 銅デコレーション法による評価結果と光電特性の関連

シリコンリボン結晶のショットキ型セル（光が透過するように薄く金属を蒸着）を製作し、これにレーザ・ビームを照射、スキャンニングすることによって、結晶に含まれている各種欠陥の光電特性を調べた。レーザ・ビームは He-Ne レーザ（波長 $6,328\text{\AA}$ ）—金属顕微鏡システムによって得られ、ビーム径は約 $20\mu\text{m}$ である。ショットキ型セルは、n 型リボンシリコン結晶の場合には厚さ約 $100\text{\AA}$ の金 (Au) を蒸着することによって、又 p 型リボンシリコン結晶の場合には、 HNO_3 液に試料を浸して酸化膜（約 $15\text{\AA}$ ）でコートした後に、厚さ約 $100\text{\AA}$ のアルミニウム (Al) を蒸着して製作した。裏面のオーミック・コンタクトはアブレーション・ニッケルメッキによって作られた。

ショットキ型セルの光電流測定の後、n 型サンプル上の金 (Au) を $\text{I-NH}_4\text{I}$ 溶液 ($\text{I } 0.3\text{g}$, $\text{NH}_4\text{I } 12\text{g}$, $\text{H}_2\text{O } 10\text{ml}$, $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH } 15\text{ml}$) でシリコン表面を侵すことなく取り除き、p 型サンプル上のアルミニウム (Al) は、フッ酸 (HF) 溶液により酸化膜と同時に取り除いて、銅デコレーション用のサンプルとした。脱脂、洗浄後、銅デコレーションを行い、レーザ・ビーム・スキャンニングによって調べた光電特性との相関をみた。

2 つの典型的な光電流プロットを図 3.13 に示した。顕微鏡写真は、レーザ・ビームスキャンニングに対応したリボン結晶表面のジルトルエッチ像である。図 3.13(a) の信号ゼロのところは、レーザ・ビーム位置を確認するためのマーカー位置である。また、図 3.13(b) のプロットが中高になっているのはサンプルの中央付近から電極を取り出したためである。プロット上の矢印は光電流特性と欠陥の対応を示している。レーザスキャンニングによる光電流特性において顕著な落ち込みを示している矢印 “G” “L_s” “L_i” “S” によって示された欠陥のデコレーションパターンの典型例は、それぞれ図 3.5, 3.10, 3.11, 3.12 に示されている。これらの欠陥は、大きな歪場を伴って明確に銅デコレートされている。他方、落ち込みを見せない矢印 “H” と “L” によって示された欠陥のデコレーション像は各々図 3.7, 図 3.9 で、これらの欠陥は歪場を伴わず、明確なデコレーションがなされていない。以上のように、大きな歪場を伴った欠陥と光電流信号の減少との相関がみられた。

この銅デコレートされた欠陥と光電流信号の相関は、図 3.13(b) の矢印 “L_s” の部分を拡大してデコレーション像との対応を示した図 3.14 からよく理解することができる。歪みを伴って明確にデコレートされた直線粒界と光電流の減少とは 1 : 1 に対応づけられる。しかし、明確にデコレートされず、ジルトルエッチによってはじめて検出される小さな歪みしか伴わない直線粒界 “L” は、光電流特性に悪い影響を与えていない。これらの結果は、欠陥の光電流特性に及ぼす効果が歪場に関係していることを示し、そしてまた、この歪場をデコレートする銅デコレーション法が太陽電池用材料の評価に適した手法であることを示している。ジルトルエッチング等の化学的な欠陥検出法は、表面における欠陥しか検出できないという欠点をもつ上に、光電流特性に効果をもたらさないような小さな歪みの欠陥まで検出し、歪場を伴った欠陥との区別がつけにくくなる欠点をもつ。

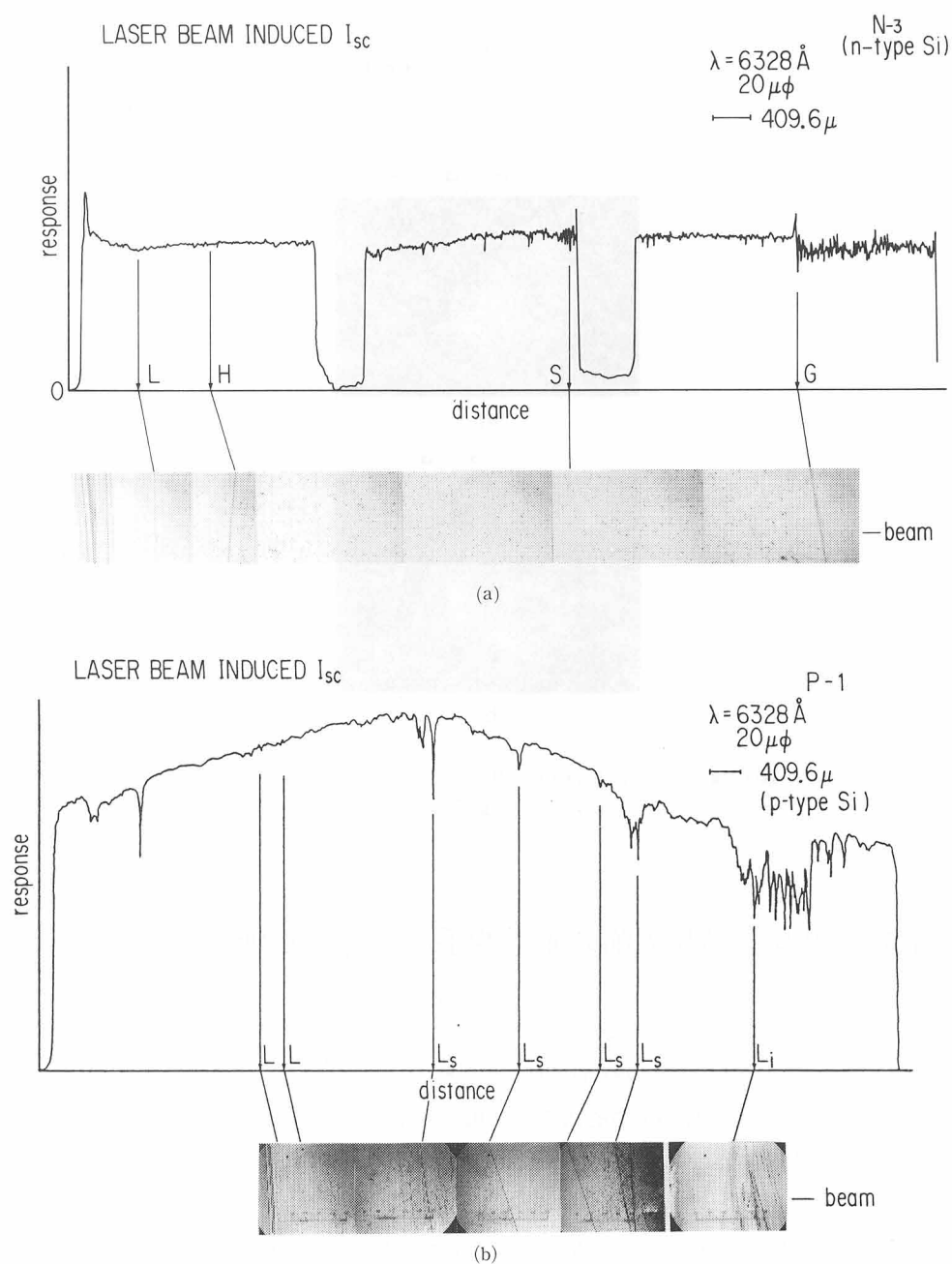


図3.13 ショットキ型セルのレーザ・スキャンニング特性と各種欠陥の相関

(a) n 型 EFG リボン結晶セル, (b) p 型 EFG リボン結晶セル

L : 歪場を伴わない直線粒界 (linear boundary), H : 大角度 (high-angle) 粒界,

L_s : 歪場を伴った直線粒界 (linear boundary), L_i : 複雑に交叉する直線粒界 (linear boundary)

S : 歪場, G : 不規則粒界

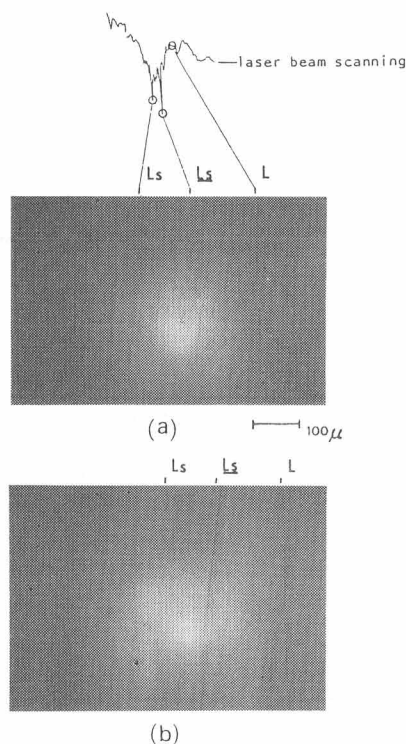


図3.14 図3.13(b)の矢印“L_s”の (a)銅デコレーション,
(b)ジルトルエッチ像の例

3.3 結晶粒界及び結晶欠陥の光電的手法による評価

多結晶シリコン基板は、結晶粒界と結晶粒内の結晶性によって特徴づけられ、これらの結晶の imperfection (不完全性) と太陽電池特性の相関をみることに大きな努力が払われている^{3),19),20)}。このような局在した結晶不完全性の電気的活性度を知る手段として、EBIC (electron beam induced current) 法^{21~28)}、LBIC (laser beam induced current) 法^{1),29)}、MBIC (monochromatic light beam induced current) 法^{19),30),31)}が使用されているが、EBIC 法の場合は加速電圧に従って電子のレンジが増大すること、LBIC 法の場合は適当な光の浸透深さをもつ波長 800nm~1,000nm のレーザーが得られないこと、MBIC 法³⁰⁾の場合は微小な光ビームが得られていないこと、等の理由により、これまでのところ、多結晶シリコン太陽電池の結晶不完全性の分布をとらえるに留っており、結晶粒界の定量的な評価手段とはなっていない。最近、Seager²⁹⁾がクリプトンイオン・レーザーを使用した LBIC 法によって、多結晶シリコン結晶粒界の少数キャリア再結合速度の評価を試みているが、ビーム径が 5~7μmφ、波長が 800nm 以下であるために、歪や欠陥を多く伴っている可能性の

ある再結合速度の非常に大きな ($s \geq 10^5 \text{ cm/sec}$) 悪質な粒界のみ評価するに留まっている。我々は、輝度の高い Xe ランプを使用して、ビーム径 $1 \sim 2 \mu\text{m}\phi$ 、波長 $350 \sim 1,150 \text{ nm}$ 連続可変の高分解能 MBIC 装置を開発し、これを使用することによって局在した各種のキャストシリコン結晶欠陥の光電的性質を明らかにした³⁾。

本節では、まず、高分解能 MBIC 装置の原理と性能を紹介し、続いて、歪や欠陥を伴わない結晶粒界におけるスキヤニング MBIC 実測値と Zook³²⁾の理論計算値が良く一致することを示す。次に、周囲に歪や欠陥を伴わない結晶粒界の太陽電池出力特性に及ぼす効果を考える場合には、実効的な少数キャリア拡散長の概念を使用すればよいこと、そして、歪や欠陥を伴う粒界の場合は粒界の effective influence width を指標とすることによって粒界を評価できること、を明らかにする。そして最後に、高分解能 MBIC 装置を使用して、キャストシリコン結晶の各種の結晶欠陥の光電的性質を明らかにする。

3.3.1 高分解能 MBIC 技術の開発

3.3.1.1 装置と原理

高分解能 MBIC 装置は図3.15に示すような構成から成り立っている。Xe ランプを光源としてモノクロメータを通して単色化された分光ビームはまずピンホール位置で結像する。ここで各種の大きさのピンホールによりスポット径の制御がなされる。分光ビームはその後、チョッピングされ、レンズを通して顕微鏡システムに入れられ、対物レンズを通して更に微小なスポットに結像される。このようにして微小な径にされた分光ビームを図に示すように結晶粒界を横断するようにスキヤニングし、その時に誘起される出力信号をプリアンプ、ロックインアンプを通して分離検出して光生成電流分布を測定する。

本装置は、紫外外部で一定の強度をもち、そして近赤外部 ($800 \sim 1,000 \text{ nm}$) に強い輝線をもつ高輝度の Xe ランプ (図3.16) の特徴を利用して、グレーティング分光により波長 $350 \sim 1,150 \text{ nm}$ 連続可変の単色光を得、顕微鏡システムによって微小なビーム径 $1 \sim 2 \mu\text{m}\phi$ の分光ビームを得るものである。ビーム径は、対物レンズの倍率を上げると $0.2 \mu\text{m}$ まで小さくすることが可能な装置となっているが、スキヤニング MBIC 装置としての分解能は、床振動、S/N、波長限界を考えると $1 \sim 2 \mu\text{m}$ が限度となっている。スキヤニングはパルス駆動で $0.1 \mu\text{m}$ ステップ送りである。チョッピング周波数は 68 Hz を使用した。

3.3.1.2 性能と応用

高分解能 MBIC 装置の位置分解能を、光センサーの電極パターンを利用して調べた。ビーム径 $1 \mu\text{m}\phi$ と $4 \mu\text{m}\phi$ の 600 nm 分光ビームを光センサーの電極部を垂直に横切るようにスキヤニングし、得られた電流出力分布 (図3.17) から分解能を決定した。出力信号が明確に“1”から“0”に変わるにはサンプル上のビームスポット径に等しい遷移領域があれば十分であるはずだが、ビームスポット径が $4 \mu\text{m}\phi$ 、 $1 \mu\text{m}\phi$ と小さくなると、電極パターンの切れ具合や床振動等が原因で、

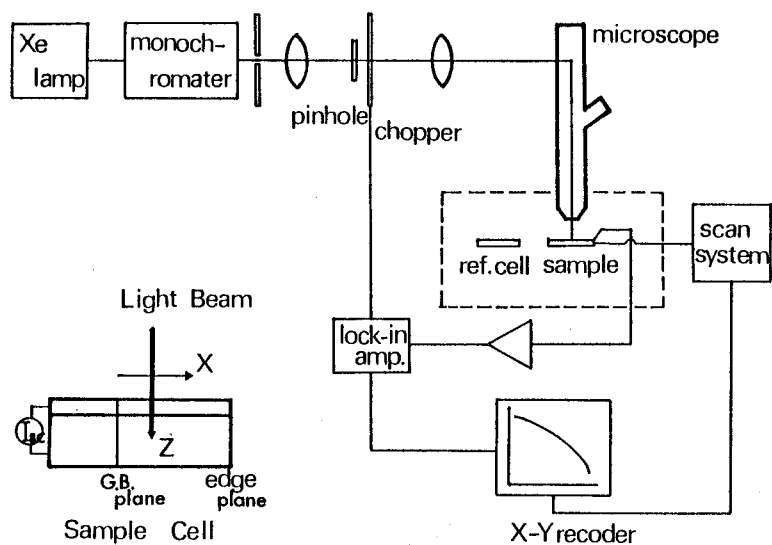


図3.15 高分解能 MBIC 装置

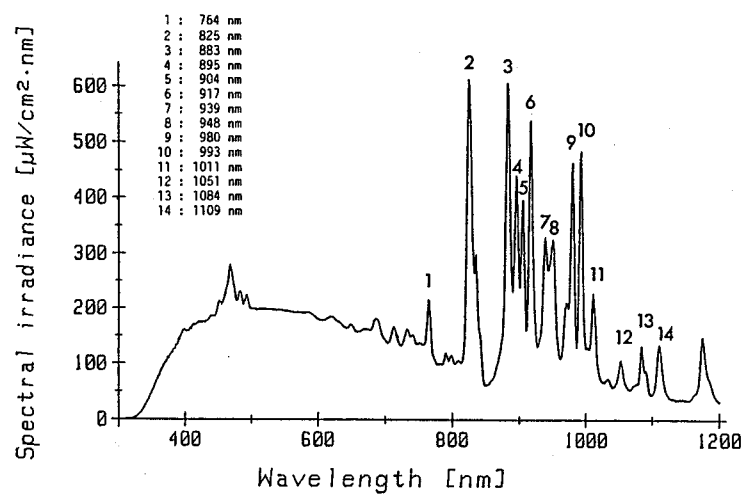


図3.16 高輝度 Xe ランプの分光放射照度分布

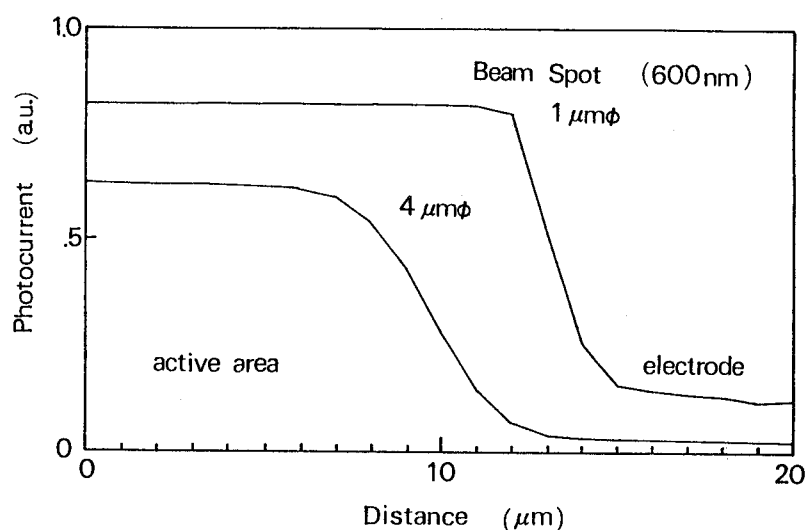


図3.17 光センサーの電極パターン付近の出力電流分布。
——分光ビーム ($\lambda=600\text{nm}$) 位置分解能の確認

$4\mu\text{m}\phi$ の場合には1.5倍の $6\mu\text{m}$, $1\mu\text{m}\phi$ の場合には2倍の $2\mu\text{m}$ を要する, という結果となった。しかし, 分解能としてはビームスポット径と同じ位であるといえることができる。

高分解能 MBIC 装置の特徴は, 局在した個所の光電的性質を把握することができ, その上, ビーム光の波長を変えることによって深さ方向の変化も知ることができることである。また, 分光ビームをスキャンニングすることによって, 図3.18に示すように粒界近傍の出力電流分布を詳細にみることができ, 数多くのスキャンニングをすることにより, 後程示すような3次元像もみることができる。また, 少数キャリア拡散長 L をパラメータとする第5章の分光感度モデルを使用して求められた少数キャリア拡散長とホットレスポンスの関係, を図3.19に示しておいたが, このグラフに見られるように $1,000\text{nm}\sim 1,100\text{nm}$ の波長の分光ビームを選ぶことにより, スキャンニング特性がそのまま少数キャリア拡散長に対応していることになる。

この MBIC 装置の分光ビームを局部に固定し, 分光ビームの波長を順次変えることによって微小部分の分光感度特性を得ることが出来る。また, SPV 法^{33),34)} (surface photovoltage method) によって, この局部の少数キャリア拡散長を得ることができる。図3.20, 図3.21は, (a)裸のシリコン表面の部分, (b)反射防止膜 (AR) コートされた部分, (c) ethylene vinyl acetate (EVA) をはさんで石英ガラスでモジュール構造にされた部分, の3箇所を同一平面上にもつ単結晶シリコン太陽電池のそれぞれの部分の分光感度特性と SPV 測定のプロットである。本来ならば, 光学定数のマッチングのとれているモジュール構造部分の分光感度が最も良いはずであるが, 石英ガラスが厚いために少し低い値となっている。本装置は Xe ランプの輝線を積極的に利用して微小なビームスポット径を得ている訳であるが, このような輝線を利用した場合も, 安定な分光感度測定, SPV 測定が

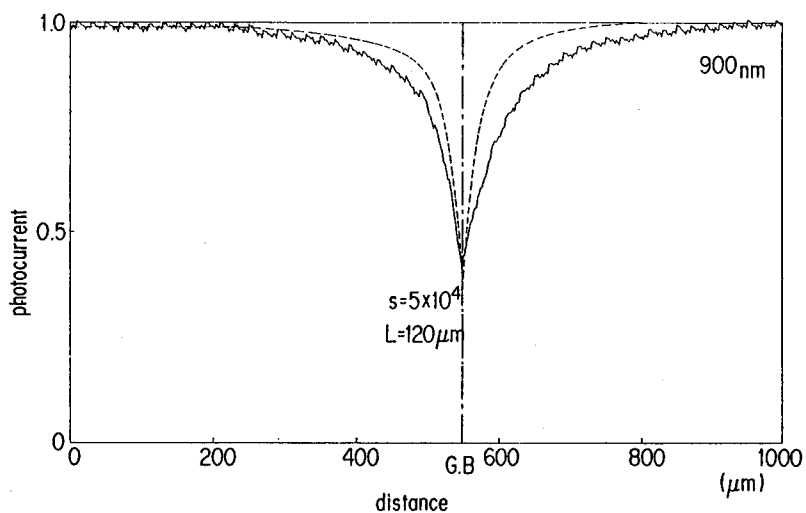


図3.18 高分解能 MBIC スキャンニングによる電流出力分布の例。
破線は Zook 理論値。曲線は $4\sim 5\mu\text{m}$ の表面凹凸パターンを反映している。

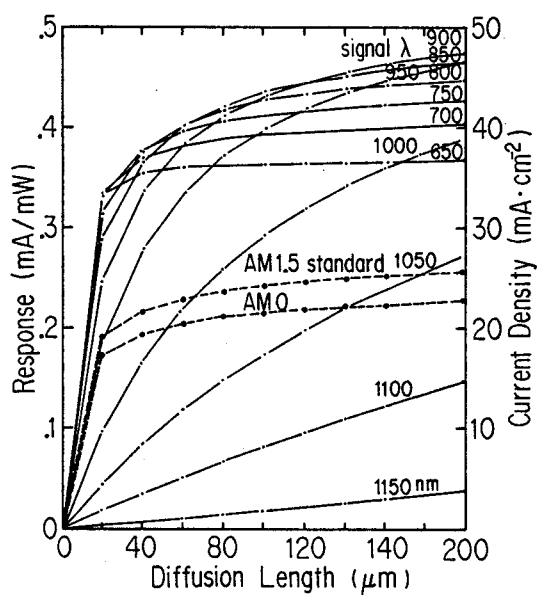


図3.19 シリコン結晶太陽電池の少数キャリア拡散長と各種波長のホトレスポンス。

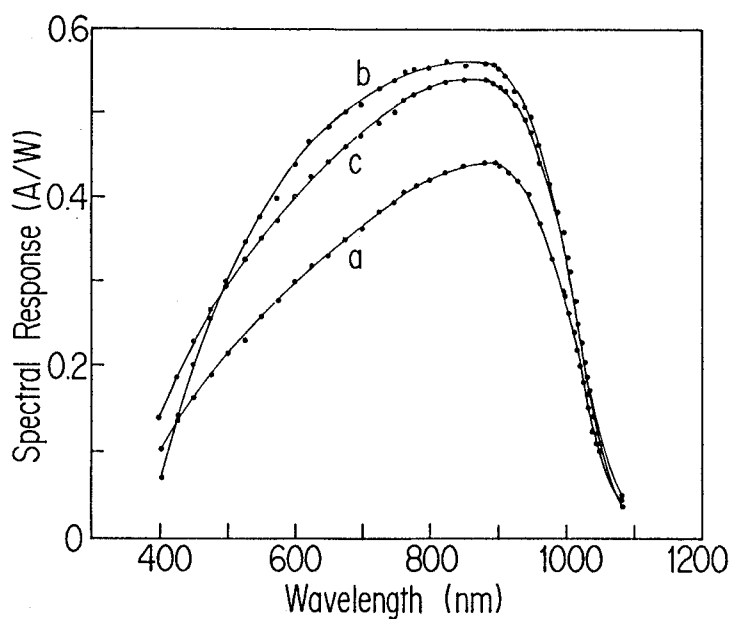


図3.20 3種類の表面構造をもつ単結晶シリコン太陽電池の分光感度特性。
(a)裸のシリコン表面, (b)反射防止膜コートされた表面,
(c)モジュール構造の表面。

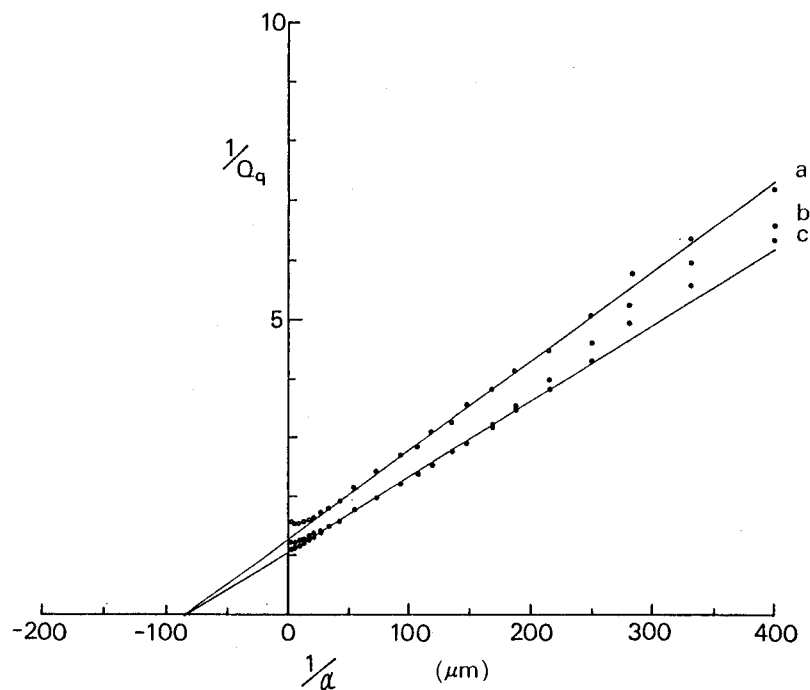


図3.21 3種類の表面構造をもつ単結晶シリコン太陽電池のSPVプロット。少数キャリア拡散数 L は $85\mu\text{m}$ 。(a)裸のシリコン表面, (b)反射防止膜コートされた表面, (c)モジュール構造の表面。

可能であることを示している。また、近赤外波長域 750~1,015nm においては、裸のシリコン、AR コートされたシリコン、モジュール構造のシリコン、の表面反射特性が波長にあまり依存しなく、いずれの構造の場合においても SPV 測定から同一の少数キャリア拡散長を求めることができることを示している。SPV 測定から少数キャリア拡散長を得る場合に、最も注意すべき点は吸収係数（浸透深さ）の値であるが、この研究では Rajkanan³⁵⁾の値を使用した。分光ビームの測定波長(λ)、吸収係数(α)及び浸透深さ($1/\alpha$)を表3.1に示しておく。

3.3.2 MBIC 法による結晶粒界の評価

開発した高分解能 MBIC 装置を使用して、キャストシリコン太陽電池の結晶粒界近傍の評価を行い、結晶粒界の光電物性との関連を明らかにする。MBIC 測定に使用したキャストシリコン太陽電池は、厚さ 450 μm の P 型 2 $\Omega\cdot\text{cm}$ の結晶に、通常のリソ拡散プロセスで太陽電池に形成したもので、変換効率は AM1.5, 100mW/cm² 下で約12%のものである。局在した歪や欠陥を伴わない結晶界面としては、メサエッチされた CZ シリコン太陽電池の端面を使用した。また、少数キャリア拡散長(L)は、波長 750nm~1,050nm のスキヤニング MBIC 測定結果から SPV 法^{33),34)} (surface photovoltage method) により求めた。

3.3.2.1 結晶界面近傍における MBIC 信号の理論解析

光ビームと結晶界面が共に接合面に垂直になっている場合の MBIC 出力は、次式から求められる。この式は、適当な境界条件をもつ 3 次元の少数キャリア拡散方程式の解から Zook³²⁾により導き出された式である。

$$I(x)/I(\infty) = 1 - \frac{2S(1+A)}{\pi} \times \int_0^\infty \frac{\sinh^2 t e^{-(x \cosh t)/L}}{\cosh t (S + \cosh t) (A^2 + \sinh^2 t)} dt \quad (3.1)$$

$$I(\infty) = \frac{A}{1+A}$$

$A = \alpha L$, $S = sL/D$ で α , L , s , D は、それぞれ吸収係数、少数キャリア拡散長、結晶粒界における再結合速度、拡散係数を表している。この理論式は分光ビームの大きさを考慮していない式であるが、ビーム径を考慮した理論式³⁶⁾を使用した場合でも、図3.22の計算例($\lambda = 830\text{nm}$, $L = 50\mu\text{m}$, $s = 2 \times 10^4 \text{cm/s}$)に示されるように、ビーム径が 2 $\mu\text{m}\phi$ の場合、結晶粒界から 4 μm 以上離れた位置においては同じ結果となる。

少数キャリア拡散長 $L = 50\mu\text{m}$ のシリコン太陽電池の界面近傍における MBIC 信号の計算例を図3.23、図3.24に示した。図3.23は、界面のキャリア再結合速度 $s = 2 \times 10^4 \text{cm/s}$ で、分光ビームの波長 λ を変えたときの MBIC 信号、図3.24は、分光ビーム波長 830nm で、界面のキャリア再結合速度 s を変化させたときの MBIC 信号である。波長が 800nm を越える辺りから界面におけるキャリア再結合の影響が拡散長 L を越える距離にまで及び、そして、キャリア再結合速度 s が $5 \times 10^3 \text{cm/s}$ を越える辺りから界面の効果が無視できない位に大きくなっているのがわかる。

表3.1 分光ビームの測定波長 (λ) とシリコン結晶の吸収係数 (α), 浸透深さ ($1/\alpha$)。

λ (nm)	α (μm^{-1})	$1/\alpha$ (μm)
350	8.71×10	.0115
375	5.49	.0182
400	8.74×1	.1140
425	5.27	.1900
450	3.07	.3260
475	1.82	.5500
500	1.27	.7890
525	1.04	.9570
550	8.71×10^{-1}	1.1500
575	7.26	1.3800
600	6.05	1.6500
625	5.03	1.9900
650	4.18	2.3900
675	3.46	2.8900
700	2.85	3.5100
725	2.34	4.2800
750	1.90	5.2500
764	1.69	5.9100
780	1.47	6.7900
800	1.23	8.1200
825	9.75×10^{-2}	10.3000
852	7.45	13.4000
883	5.33	18.8000
895	4.64	21.5000
904	4.17	24.0000
917	3.54	28.3000
929	3.02	33.1000
945	2.41	41.5000
948	2.31	43.3000
962	1.86	53.8000
980	1.37	72.9000
993	1.08	92.9000
1000	9.36×10^{-3}	107.0000
1005	8.42	119.0000
1011	7.38	135.0000
1015	6.74	148.0000
1020	5.98	167.0000
1025	5.28	189.0000
1030	4.64	216.0000
1035	4.05	247.0000
1040	3.51	285.0000
1045	3.01	332.0000
1051	2.49	400.0000
1084	7.49×10^{-4}	1330.0000
1109	5.89	1700.0000

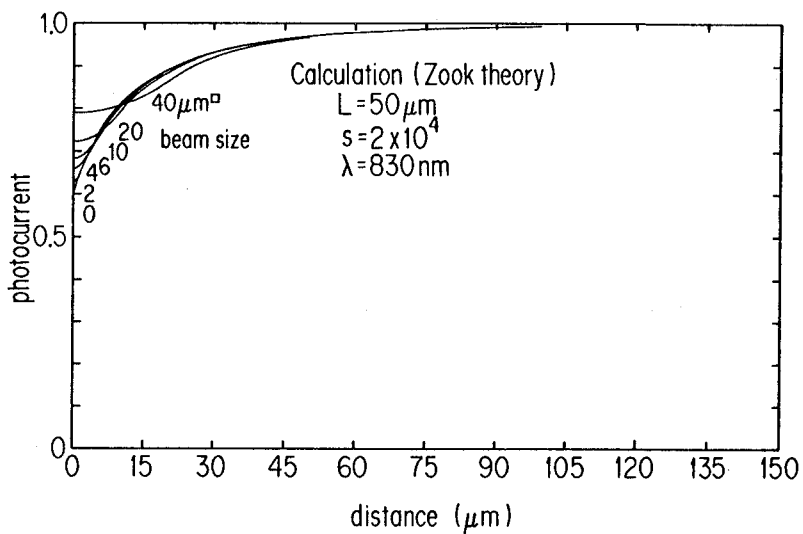


図3.22 ビーム径を考慮した結晶界面近傍における MBIC 信号の計算例 ($L=50\mu\text{m}$, $s=2 \times 10^4$ cm/sec $\lambda=830\text{nm}$)

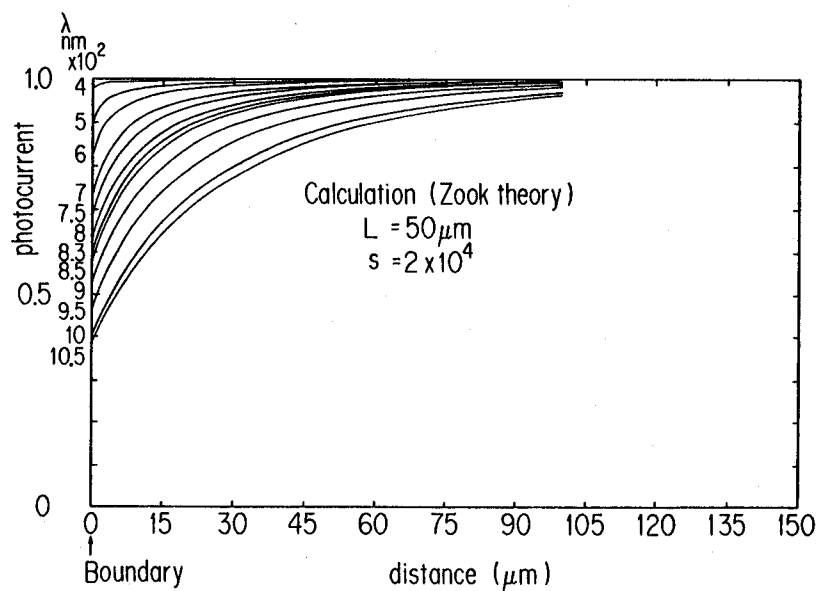


図3.23 結晶界面近傍における各種波長 λ の MBIC 信号の理論計算例 ($L=50\mu\text{m}$, $s=2 \times 10^4$ cm/sec)

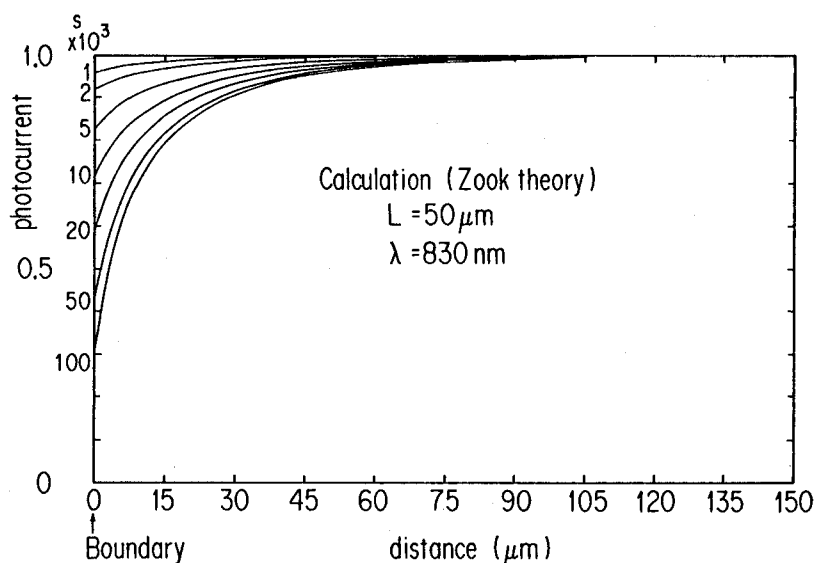


図3.24 各種表面再結合速度 s の結晶界面近傍における MBIC 信号の理論計算例 ($L=50\mu\text{m}$, $\lambda=830\text{nm}$)

3.3.2.2 歪や欠陥を伴わない結晶界面の評価

メサエッチされた CZ シリコン太陽電池の端面近傍の典型的なスキニング MBIC データを図3.25に示す。代表的な4波長について、界面から遠く離れた位置における出力値で規格化された出力電流値で表されている。実線は、光ビームと結晶界面が共に接合面に垂直になっている場合(図3.15参照)の(3.1)式から求められた理論計算値である。図3.25に示す如く、実測値と $L=50\mu\text{m}$, $s=2\times 10^4\text{cm/s}$ の場合の理論計算カーブは、粒界近傍 $4\sim 5\mu\text{m}$ を除いて良く一致している。このうちの1つの波長の実験データと2つの未知のパラメータ L , s を含む理論計算カーブとのフィッティング (fitting) から L と s の値を決めることができる。他の3つの波長の実測データと理論計算値の一致は、この手法により L と s の値が評価できることを裏づけている。同じような結果が、多少はノイズが大きくなるが、キャストシリコン太陽電池の端面の場合にも得られている。このような実験と理論計算結果との一致は、(3.1)式が歪や欠陥を伴わない結晶粒界近傍の MBIC データを良く表現していることを示している。

次に、 $750\sim 1,050\text{nm}$ のスキニング MBIC データから、SPV 法により少数キャリア拡散長を求めたものが図3.26である。図から結晶粒界の効果が拡散長の距離をこえて及んでいることがわかる³⁷⁾。実線は、(3.1)式から求めた値を使用して SPV 法により求めた少数キャリア拡散長を示す。図3.25において実測値と理論計算値が良い一致を示すことから当然予想されることではあるが、少数キャリア拡散長の場合も良く一致している。図3.27は、(3.1)式による理論計算値を使用した SPV プロットを示している。結晶粒界から $5\mu\text{m}$ の位置におけるプロット以外は直線的な特性を

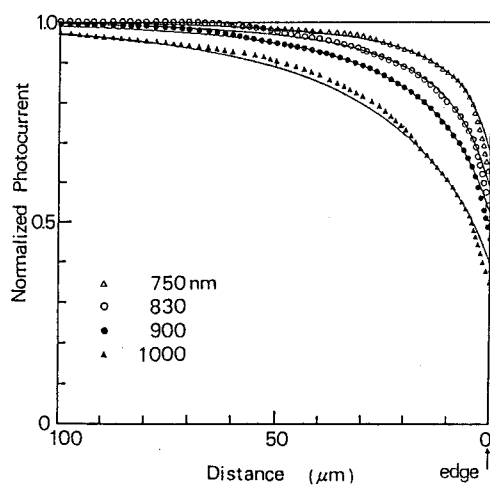


図3.25 CZ シリコン太陽電池の端面近傍におけるスキャンニング MBIC ($\lambda = 750, 830, 900, 1000\text{nm}$) 信号。実線は理論計算値。

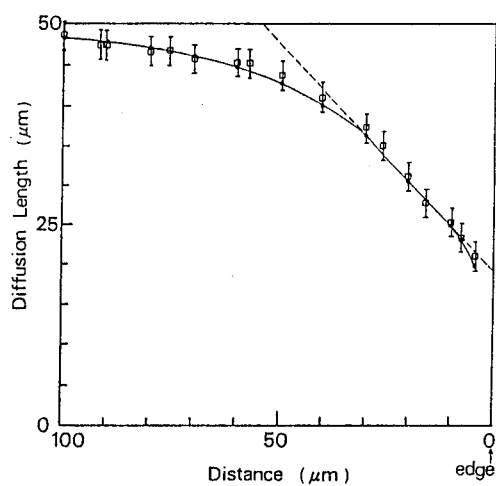


図3.26 CZ シリコン太陽電池の端面近傍における実効少数キャリア拡散長。

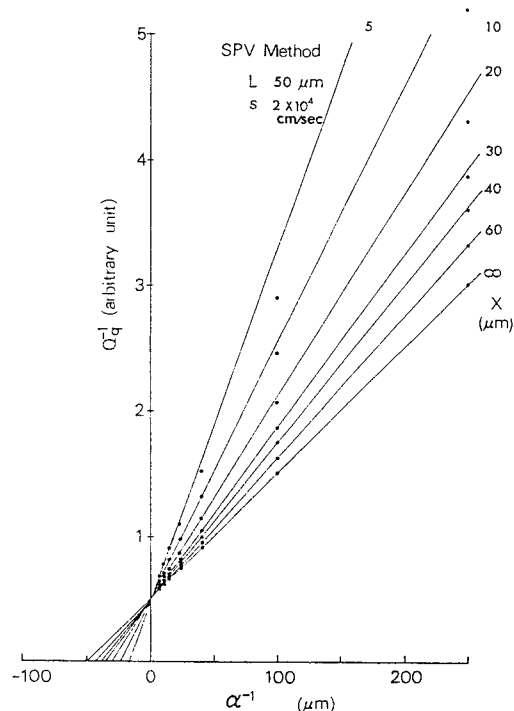


図3.27 理論計算値から求めた SPV プロット
($L=50\mu\text{m}$, $s=2\times 10^4\text{cm/sec}$)

っており、結晶粒界の太陽電池出力電流特性に及ぼす効果を考える場合には、バルクの少数キャリア拡散長の代りにこの粒界による少数キャリアの吸い込みを考慮した実効的な少数キャリア拡散長の概念を使用すればよいことを示している。

3.3.2.3 歪や欠陥を伴った結晶界面の評価

図3.28は、典型的なキャストシリコン太陽電池の結晶粒界の写真と、その波長 900nm の分光ビーム・スキャンニング像である。結晶形態については後程述べることにするが、結晶粒 G_1 と G_2 、結晶粒 G_2 と G_3 、そして結晶粒 G_4 と G_5 は双晶関係にあり、これらの境界面は図3.28(b)のスキャンニング像からも明らかなように電気的には全く不活性である。又、結晶粒 G_1 、 G_3 は $\{110\}$ 面に近い結晶面をもち、結晶粒 G_4 は $\{100\}$ 面で、結晶粒 G_1 、 G_2 、 G_3 と結晶粒 G_4 の間に存在する不規則粒界はほぼ表面に垂直に走っている。図3.28(b)に示されるように、この不規則粒界は電気的に活性である。結晶粒 G_1 と G_4 、 G_2 と G_4 、 G_3 と G_4 の結晶境界面 G_{14} 、 G_{24} 、 G_{34} 及び結晶粒 G_4 の端面における波長 (830, 900, 1,000nm) のスキャンニング MBIC データを図3.29に示す。いずれのデータも結晶粒内における出力電流値で規格化されている。破線は (3.1) 式から算出された理論計算値で、拡散長はすべて同じで $L_b=120\mu\text{m}$ 、少数キャリア再結合速度は G_{14} 、 G_{24} 、 G_{34} の粒界及び G_4 の端面において各々 $s=5\times 10^4$ 、 2×10^4 、 4×10^3 、 $2\times 10^4\text{cm/s}$ である。図3.29(a)の結

晶粒 G_4 端面の場合には、測定データと理論計算値が3波長とも非常に良い一致を示している。これについては前項で既に述べた。図3.29(a), (b), (c)の結晶粒界 G_{14} , G_{24} , G_{34} の場合は計算値からかなりそれている。結晶粒の端面において良い一致を示すことから考えて、この測定値と計算値との差は、結晶粒界近傍における歪や欠陥によるものと考えられる。

図3.30に結晶粒界 G_{14} , G_{24} , G_{34} 近傍における少数キャリア拡散長の分布を示した。実線 L_{meas} は、図3.29のスキヤニング MBIC 測定値をもとに SPV 法から求めた少数キャリア拡散長で、破線 L_{ideal} は、理論計算値をもとに SPV 法から求めた歪を伴っていない結晶界面近傍における少数キャリア拡散長である。結晶粒内のキャリア寿命を τ_{bulk} (拡散長 L_{bulk})、粒界近傍の結晶不完全性に起

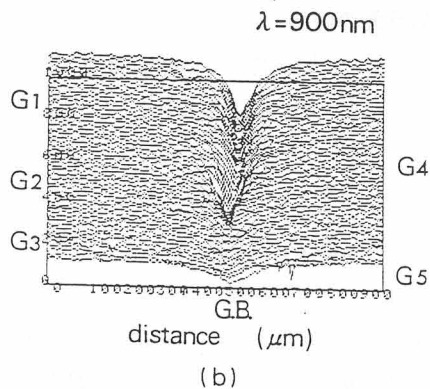
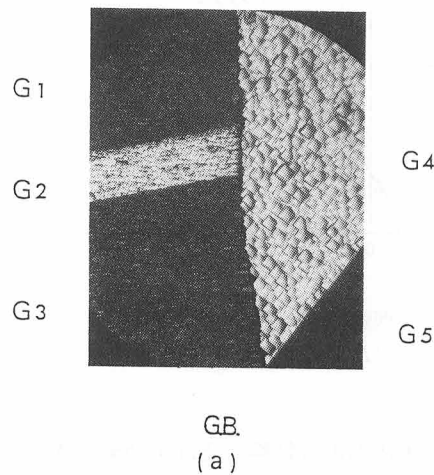
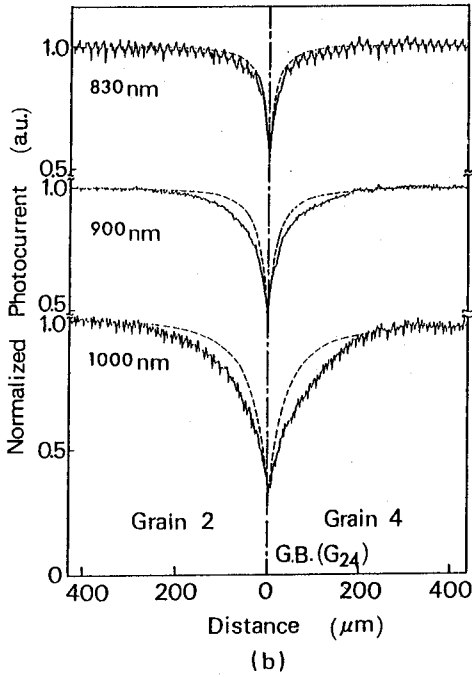
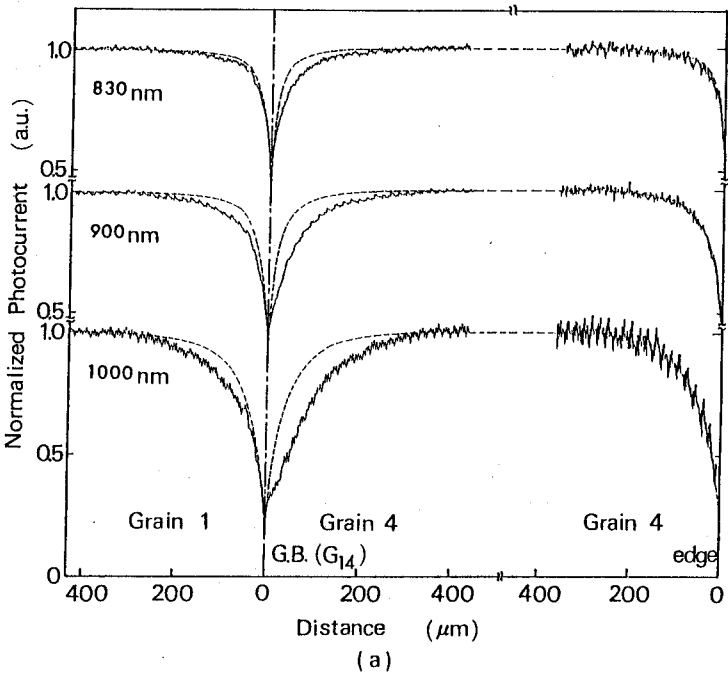


図3.28 キャストシリコン太陽電池の結晶粒界の(a)表面写真, (b)スキヤニング MBIC ($\lambda = 900\text{nm}$) 3次元像。



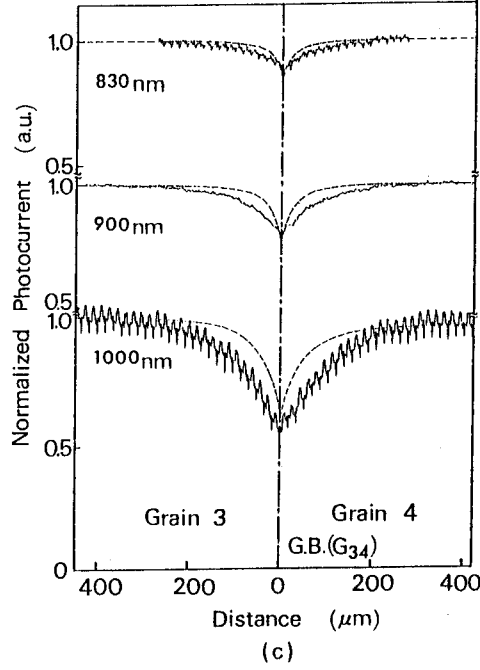


図3.29 (a)結晶粒界 G_{14} と結晶粒 G_4 の端面, (b)結晶粒界 G_{24} , (c)結晶粒界 G_{34} , の近傍におけるスキャンニング MBIC ($\lambda = 830, 900, 1000\text{nm}$) 信号

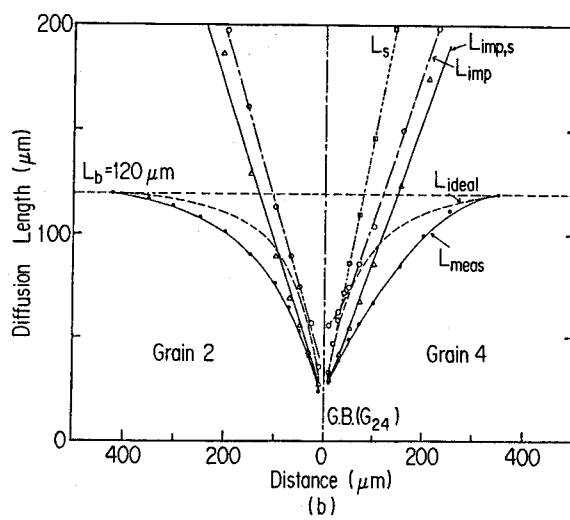
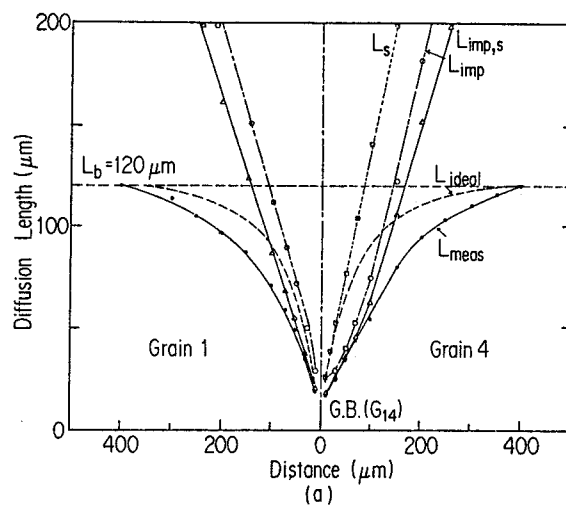
因するキャリア寿命を τ_{imp} (拡散長 L_{imp}), 結晶粒界の再結合速度に起因するキャリア寿命を τ_s (拡散長 L_s) とするとき, 実測されたキャリア寿命 τ_{meas} (拡散長 L_{meas}) と (3.1) 式をもとに計算されたキャリア寿命 τ_{ideal} (拡散長 L_{ideal}) は近似的に次の式で表すことができる。

$$\frac{1}{\tau_{\text{meas}}} = \frac{1}{\tau_{\text{bulk}}} + \frac{1}{\tau_s} + \frac{1}{\tau_{\text{imp}}} \quad (3.2)$$

$$\frac{1}{\tau_{\text{ideal}}} = \frac{1}{\tau_{\text{bulk}}} + \frac{1}{\tau_s} \quad (3.3)$$

拡散長 L は一般に $\sqrt{D\tau}$ と表すことができ, L_{bulk} は $120\mu\text{m}$ であるので, 図3.30の L_{meas} と L_{ideal} のデータから L_{imp} と L_s を求めることができる。その結果が図3.30にグラフ化されている。 L_{imp} は, 結晶粒界から離れるに従ってほぼ直線的に増大し, 結晶性が回復していることを示している。又, 結晶粒界と粒界近傍の結晶不完全性の両者に起因する拡散長 $L_{\text{imp},s}$ も同様に計算され, 図3.30に示されている。

最後に, この結晶粒界の電氣的活性度は新しい概念 effective influence width を指標として考えると良く理解できることを示す。少数キャリア拡散長が結晶粒界における再結合速度 s によって支配される領域 ($L_s \leq L_b$) を effective influence width W_s , 結晶粒界近傍の結晶の不完全性によ



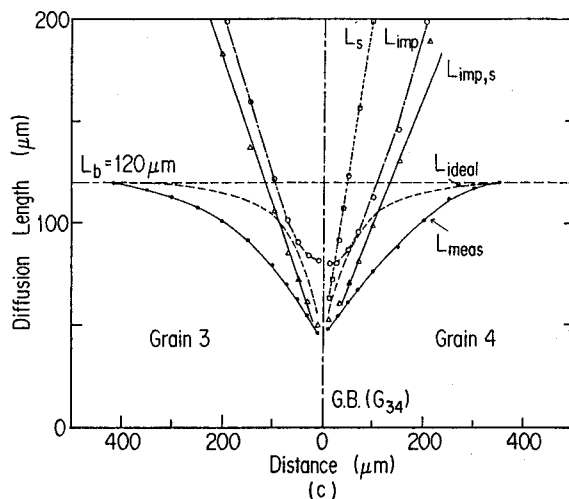


図3.30 (a)結晶粒界 G_{14} , (b)結晶粒界 G_{24} , (c)結晶粒界 G_{34} , の近傍における実効少数キャリア拡散長。

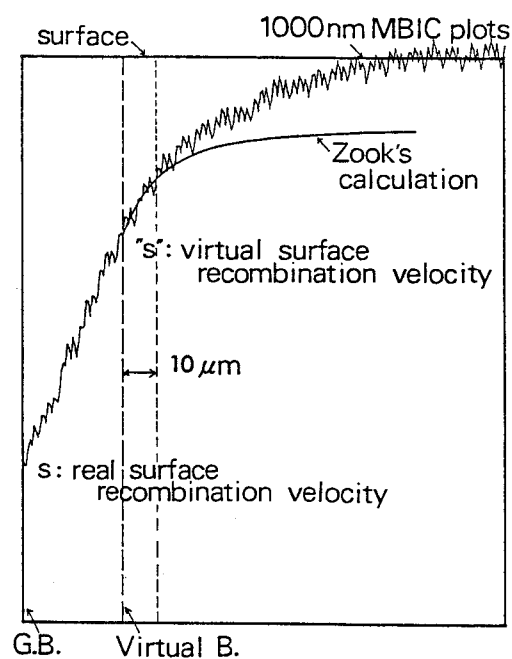
て支配される領域 ($L_{imp} \leq L_b$) を effective influence width W_{imp} , そしてこの両者によって支配される領域 ($L_{imp,s} \leq L_b$) すなわち結晶粒界の効果の及ぶ範囲を W_{eff} と定義すると, 結晶粒界 G_{14} , G_{24} , G_{34} の W_s , W_{imp} , W_{eff} は表3.2のようになる。予想通り, 結晶粒界 G_{14} , G_{24} の W_s は大きく $85\mu\text{m}$, $78\mu\text{m}$ であるが, 結晶粒界 G_{34} の W_s は s が小さいために $48\mu\text{m}$ の小さい値となっている。結晶粒界近傍の結晶の不完全性に基づく W_{imp} は結晶粒界 G_{14} の G_4 側の部分では非常に大きな値となっているが, これを除いてはほとんど同じ広がり約 $110\mu\text{m}$ を示し, 結晶粒界による歪の効果はほぼ一様に及んでいることがわかる。以上の両者の効果を総合した effective influence width W_{eff} は, 結晶粒界 G_{34} , G_{24} , そして G_{14} の順に大きな値を示し, 結晶粒界の電気的活性度の差を表している。

3.3.2.4 結晶の不完全性による実効少数キャリア拡散長

結晶の不完全性による実効少数キャリア拡散長(L_{imp})は2つの要素を含んでいる。1つは, 光ビーム照射位置における結晶の不完全性によるキャリア損失が原因の実効少数キャリア拡散長(L_{imp}^0)で, もう1つは, その周囲の結晶の不完全性によるキャリア吸い込み効果によるキャリア損失が原因の実効少数キャリア拡散長である。結晶の不完全性の分布を知る上では前者が重要な要素となってくるが, この2つの要素を分離することは困難である。そこで, 図3.31に示すように仮定の表面再結合速度 s を持つ境界面を想定して, 理論カーブを描き, この理論カーブとスキャンニングMBICプロットとの合致により近似的に L_{imp}^0 (この段階では L_{bulk} の効果を含んでいる) を求めることを試みた。この近似法においては, 仮定の境界面から結晶粒界の方向に流れ出たキャリアは全て回収されないものと仮定されていることになる。従って, 侵入深さの大きな波長 $1,000\text{nm}$ の光

表3.2 結晶粒界 G_{14} , G_{24} , G_{34} の effective influence width

Grain Boundary	$L_b (\mu\text{m})$	$s (\text{cm/sec})$	$W_s (\mu\text{m})$	G1, 2, 3-side (μm)			G4-side (μm)		
				W_{imp}^0	W_{imp}	W_{eff}	W_{imp}^0	W_{imp}	W_{eff}
G_{14}	120	5×10^4	85	80	110	144	120	150	163
G_{24}	120	2×10^4	78	75	105	135	95	115	145
G_{34}	120	4×10^3	48	75	100	120	85	110	130

図3.31 実効少数キャリア拡散長 L_{imp}^0 を求める近似法。

ビームスキャンニング MBIC プロットに合致することによって L_{imp}^0 (この段階では L_{bulk} の効果を含んでいる) を求めた。続いて, $L_{\text{bulk}} (=120\mu\text{m})$ の効果を取り除いて, 真の L_{imp}^0 を求めた。結晶粒界 G_{14} の場合の L_{imp}^0 が図3.32に示されている。また, このようにして求められた結晶粒界 G_{14} , G_{24} , G_{34} 近傍の結晶の不完全性による実効少数キャリア拡散長 L_{imp}^0 が支配的な領域 ($L_{\text{imp}}^0 \leq L_{\text{bulk}}$) である effective influence width W_{imp}^0 の値は表3.2に示されている。

この近似法の精度については, 実測の 1,000nm MBIC プロットの代わりに Zook の理論計算プロットを用いて調べられた。その結果, 正しい値 ($L=120\mu\text{m}$) よりも少し小さな値を示したが, 結晶粒界から拡散長 L の1/2以上離れた地点においては誤差は約15%以下であった。

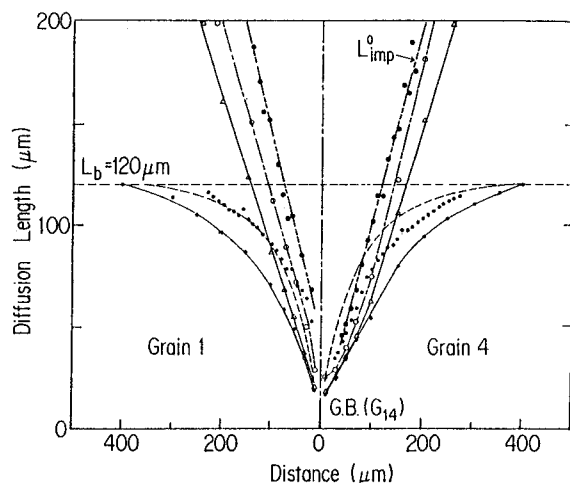


図3.32 結晶粒界 G_{14} 近傍における実効少数キャリア拡散長 L_{imp}^0

3.3.3 各種結晶粒界及び結晶欠陥と光電特性の関連

これまで高分解能 MBIC 法による結晶粒界及び欠陥の評価方法について述べてきたが、本項では、この方法を使用してキャストシリコン (SILSO, NEDO-Cast) 太陽電池の各種粒界及び欠陥の光電的性質を明らかにする。試料のキャストシリコン太陽電池は、前項と同じプロセスで接合形成がなされたもので、変換効率が約12%のものを主に用いた。これらのサンプル太陽電池の粒界を横断するように分光ビーム (直径 $2\mu\text{m}\phi$, 波長 900nm) をスキャンニングし、そのときに誘起される出力電流分布から粒界と欠陥の光電的性質を把握した。結晶粒の方位は X線マイクロラウエパターンから決定し、結晶性については、主に Secco エッチング-光学顕微鏡観察によって調べた。

キャストシリコン結晶は、その断面写真 (図3.33) から分かるように、結晶成長がルツボの底面と側面から生じていることに帰因して、いくつかの特徴がみられる。1つは、ルツボと接している個所に、初期の結晶成長時における小さな多くの結晶粒が存在することである。この個所はわずかで、実際の太陽電池用基板製作時にはトリミングされる。2つは、キャストウェハには、横方向から成長しウェハに対して平行方向に走る大きな結晶粒、底面からコラム状に成長してきた結晶粒、そしてこの両者が合流して斜方向に成長してきた結晶粒、の3種類の結晶粒が含まれていることである。この結晶粒が互いによつかる場所では、欠陥や歪ができやすく、また、不純物の偏析の確率も高いと考えられる。しかし、前者の細かな結晶粒を除くと、これらの結晶粒や結晶粒界の光電的性質には有意差がみられなく、キャストシリコン結晶のマクロな観察から光電特性を把握することは困難である。

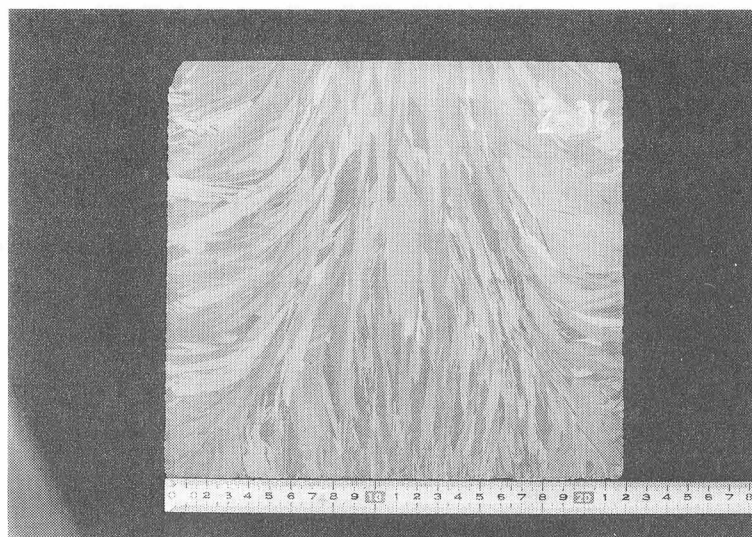


図3.33 キャストシリコンインゴットの断面写真。

従って、キャストシリコン多結晶基板を評価する場合、光電的性質の面から結晶粒や欠陥を観察することにする³⁸⁾。すると、いくつかの特徴がみえてくる。まず、光電特性の良くない部分として、①不規則粒界、②局在する小さな結晶粒、③転位の集合体、特に subgrain boundary を形成している個所、④双晶関係から少しはずれた微小角度の粒界、等がある。逆に、特性の良い部分としては、積層欠陥、双晶粒界が典型で、電気的には全く不活性である。特性の良い太陽電池においては結晶粒界のかなりの部分が双晶粒界になっており、良質のキャストシリコン結晶を製作する上で双晶粒界が大きな役割を果たしているものと考えられる。以下、順次、これらの代表的な粒界及び欠陥部をみていく。

(1) 不規則粒界

結晶成長時に種づけ (seeding) をしない場合には、キャストシリコン結晶は熱放散の流れに従って不規則に成長し、大部分の粒界はこの不規則粒界となる。そして、厚さ $400\mu\text{m}$ のキャストウェハではインゴット (図3.33) の結晶粒界の一部断面をみることになり、粒界は直線的な、あるいはゆっくりわん曲した面状の欠陥となる。互いの結晶方位、わん曲の状態等の外部観察から、これらの粒界の光電特性を把握することは困難で、結局のところ、コラム状の粒界と傾斜した粒界の特徴がみられる程度である。粒界の光電特性については、粒界の表面再結合速度 s と粒界周辺の結晶不完全性が重要な役割を果たしていることはすでに前項で述べた。ここでは、表面再結合速度 s がほぼ同じ程度 ($s \approx 5 \times 10^4 \text{cm/s}$) の代表的な3種類の不規則粒界、すなわち、①コラム状の粒界、②境界層をもつ粒界、そして③傾斜した粒界、の断面写真と MBIC 特性を図3.34、図3.35、図3.36に示し、その特徴をみることにする。断面はいずれも結晶欠陥をみるために Secco エッチングされている。

MBIC 特性としては粒界のキャリア再結合効果が顕著に現れてくる波長 830, 900, 1,000nm の分光ビームスキャンニングの結果を代表的なものとして示した。

これらの不規則粒界の MBIC 特性を比較すると、いくつかの特徴がみられる。図3.34の鋭い凹み (dip) をもつコラム状粒界の MBIC 特性についてはすでに前項で検討したので、これを基本にして他の2つの MBIC 特性を検討する。まず、図3.35の MBIC 特性は、中央部に約 $18\mu\text{m}$ の遷移領域をもち、そして裾広がりの中の広い凹み特性を示している。これは、中央に約 $18\mu\text{m}$ の境界層をもち、その周囲に多くの結晶不完全性を伴っていることを示している。粒界の左側のラインは積層欠陥であるが、電気的には不活性である。また、図3.36の MBIC 特性は、長波長ビームになるに従い凹みの中心が右にシフトし、そして、中心より左側は鋭い凹みで、右側はすそ広がりの中での広い

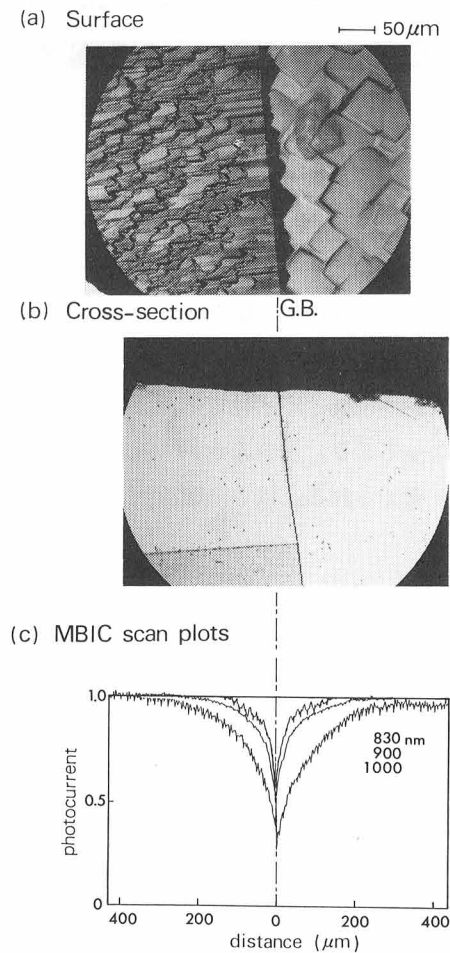


図3.34 コラム状粒界の(a)表面写真, (b)断面写真 (Secco エッチング後), (c)MBIC 特性。

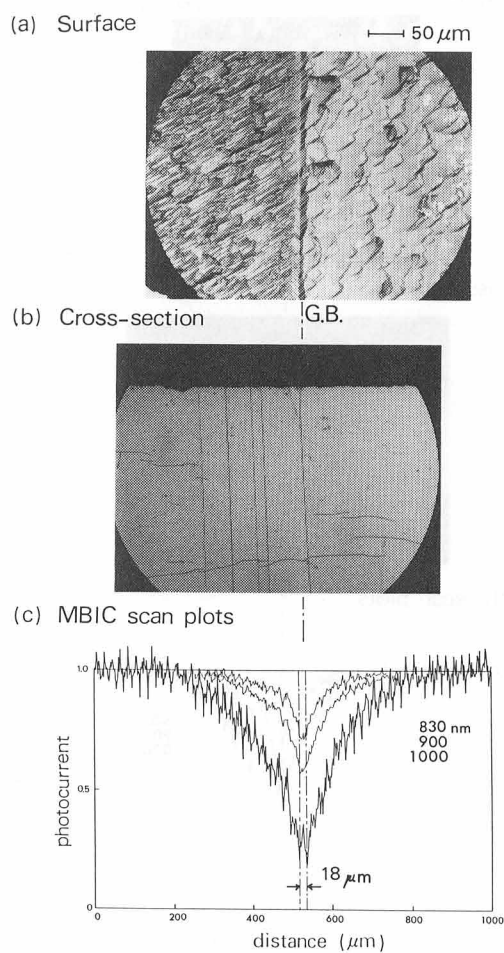


図3.35 境界層（約 $18\mu\text{m}$ ）をもつ粒界の(a)表面写真，(b)断面写真（Secco エッチング後），(c)MBIC 特性。

凹みとなっている。これは、粒界が傾斜しているために示す特徴で、長波長になる程、光の浸透深さが深くなり、凹み位置は右にシフトし凹みの裾も広がることになる。

以上の比較検討の結果、境界層のないコラム状の粒界が、この中では一番光電特性の良い粒界であるといえる。

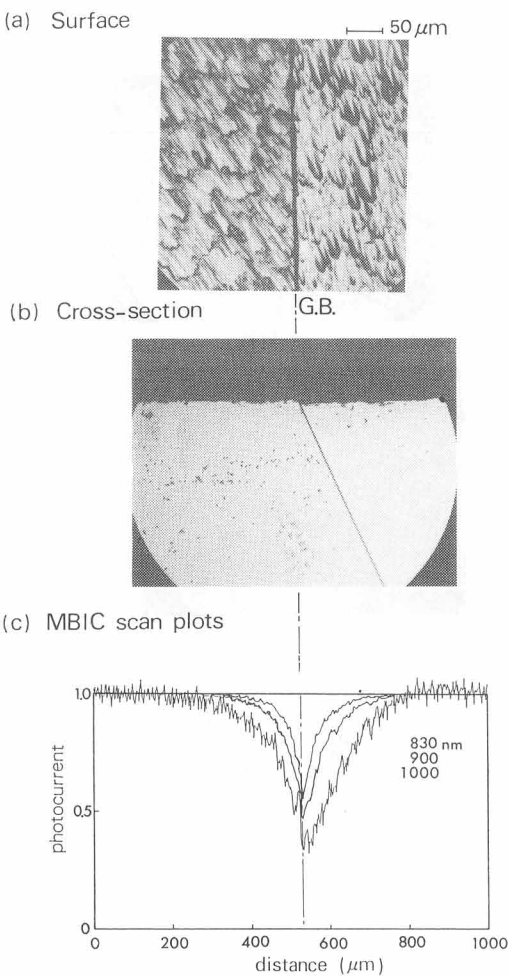


図3.36 傾斜した粒界の(a)表面写真, (b)断面写真 (Secco エッチング後), (c)MBIC 特性。

(2) 小さな結晶粒

図3.37の写真に示すように、大きな結晶粒の間に時々小さな結晶粒が存在する。このような小さな結晶粒の MBIC 特性の特徴は凹みが巾広く、深い点である。すなわち、粒界における表面再結合速度 s が $5 \times 10^4 \sim 10^5 \text{ cm/s}$ と大きく、その上、これらの粒界の効果が重畳した特性を示している。

従って、このような小さな結晶粒が集合した個所の光電特性は非常に悪く、場合によってはリーク電流の大きな太陽電池となる。しかし、この小さな結晶粒の周囲の結晶性は良好で、Secco エッチングされた断面写真には転移等の結晶性の乱れはみられなく、また、MBIC 特性の凹みも鋭く周囲の結晶不完全性は少ないものと思われる。小さな結晶粒の左側の欠陥は双晶粒界と積層欠陥で、一部結晶性の乱れた個所を除くと、電気的には不活性である。

(3) 転位の集合体と subgrain boundary

図3.38は転位が密集し、subgrain boundary が発生している個所の Secco エッチング写真と MBIC 特性である。断面写真からわかるように転位密度は、場所によって異なるが $10^4 \sim 10^6$ 個/cm²もあり、そしてかなり多くの subgrain boundary が発生している。特に、③④の部分は多くの転位

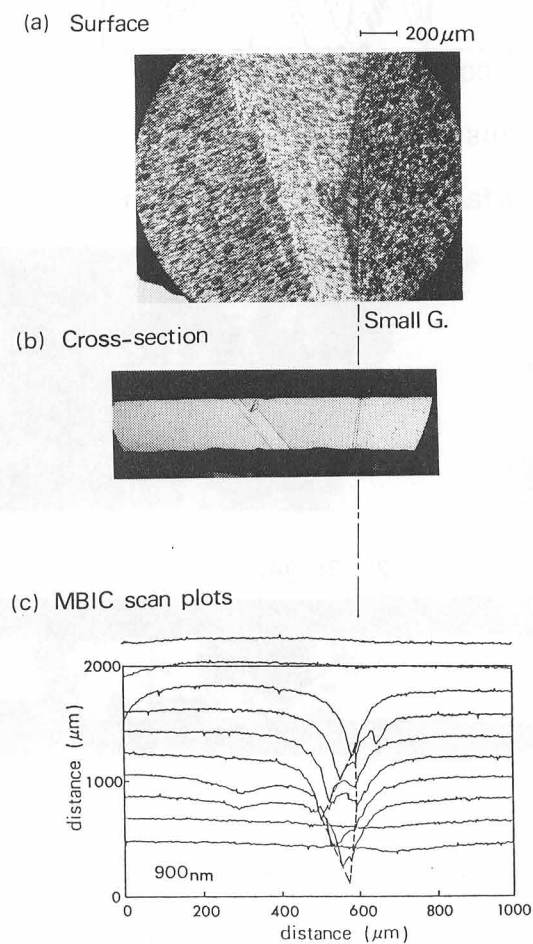


図3.37 局在した小さな結晶粒の(a)表面写真、(b)断面写真 (Secco エッチング後)、(c)MBIC 特性。

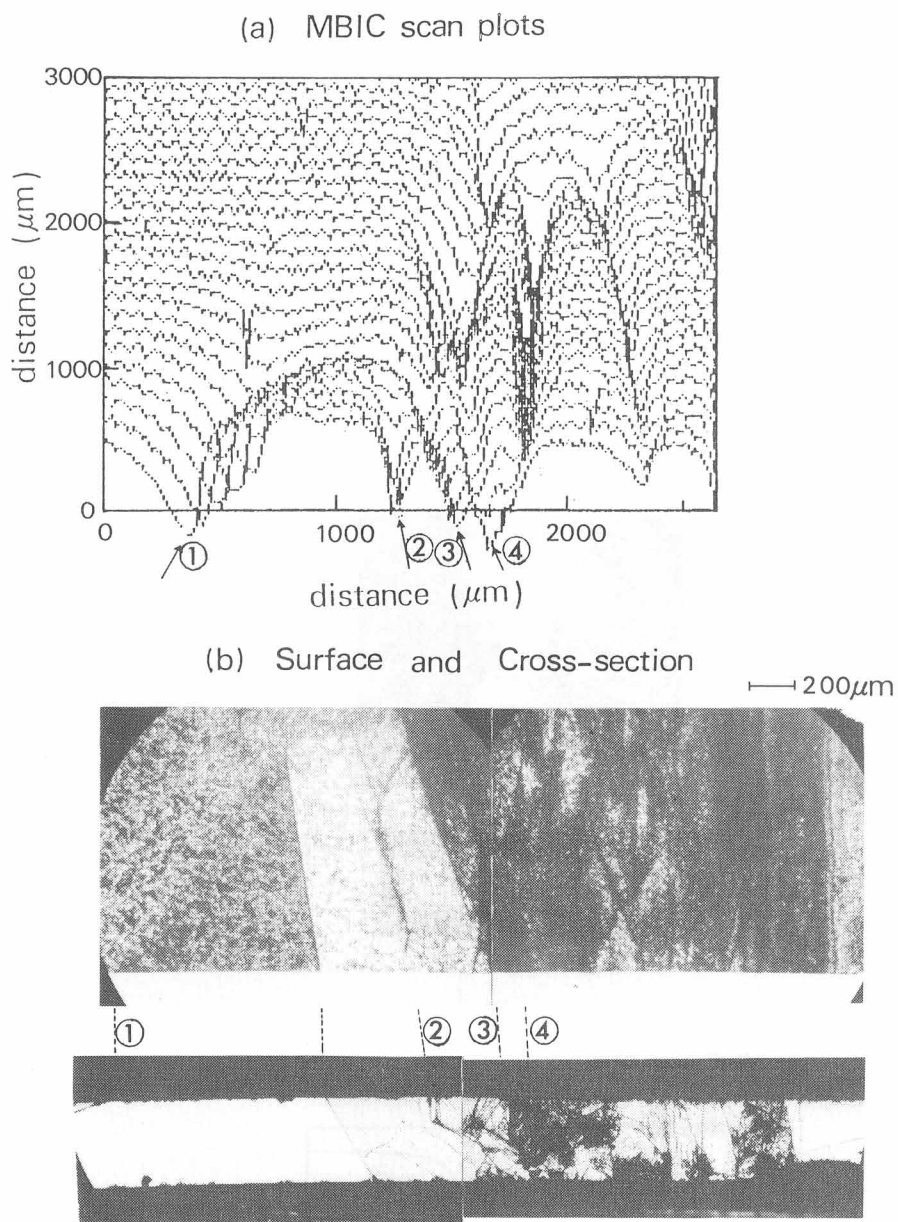


図3.38 転位の集合体と subgrain boundary の(a)MBIC 特性, (b)表面と断面の写真 (Secco エッチング後)。
 ①: 傾斜した不規則粒界, ②, ③, ④: 転位群もしくはsubgrain boundary

を伴った明確な subgrain boundary をなしていて、MBIC 特性の凹みもかなり広く深い。また、②の個所は明確に subgrain boundary とまでは言えないが、転位が集中していて、MBIC 特性もかなりの凹みを示している。そして、このように転位が多い個所では、特に凹みにならなくても全体的に MBIC 特性が悪くなっている。このような個所から製作された太陽電池の特性は、電流リークも多く出力電圧も低い。左端の MBIC 特性の凹み①は傾斜した不規則粒界の光電特性を示し、次の粒界は双晶粒界で電気的には不活性である。

(4) 双晶粒界と双晶からわずかにそれた粒界

図3.39は双晶粒界と双晶関係からそれはじめた粒界の MBIC 特性である。表面写真の直線部分の{111}面双晶粒界では MBIC 特性は平坦で、この粒界が電気的に不活性であることを示している。しかし、この双晶関係からそれはじめると、下方の粒界Bにみられるように MBIC 特性に鋭い凹みが生じ始め、双晶関係からわずかにそれた粒界の表面再結合速度 s が大きいことを示している。上方の粒界は単純な傾斜した不規則粒界である。

また、図3.40は、双晶関係からわずかにそれた部分（微小角度のズレをもつ双晶粒界）をとるところにもつ双晶粒界の MBIC 特性を示している。双晶粒界の MBIC 特性は平坦であるが、双晶関係からそれた部分においては、図3.39と同様に MBIC 特性に大きな凹みが生じる。この凹みが生じる個所が微小角度のズレをもった双晶粒界であることは、図3.41の X線回折顕微写真とその切断写真から理解でき、そのズレの角度は約0.09度である³⁹⁾。

3.4 まとめ

本章では、低コストの太陽電池用基板シリコン結晶の改良を計るために、シリコン基板の結晶粒界及び結晶欠陥の構造と光電的性質を明らかにする方法の検討を行った。そして、気相拡散銅デコレーション法によるシリコン結晶の構造的評価法と、MBIC 法によるシリコン結晶の光電的手法による評価法を提案し、これらの手法を使用して、シリコン基板結晶の各種の結晶粒界及び結晶欠陥と光電特性の関連を明らかにした。

まず、銅デコレーション法については、サンプルの清浄表面を保つ銅の気相拡散法を開発することによって、観察前のサンプル表面のミラーポリッシングを不要にし、結晶表面近くの結晶性評価を可能にした。続いて、この手法を使用して EFG リボン結晶の各種の結晶粒界及び結晶欠陥の評価を行い、EFG リボン太陽電池の光電特性が結晶の歪場と関係していることを示した。

MBIC 法については、ビーム径 $1\sim 2\mu\text{m}$ 、波長 $350\sim 1,150\text{nm}$ 連続可変の高分解能 MBIC 装置を開発（ビーム径は顕微鏡の倍率からは $0.2\mu\text{m}$ まで小さくすることが可能な装置となっているが、床振動、波長限界等を考えると、これがスキャンニング MBIC 装置としての分解能の限界である）し、これを使用することによって、多結晶シリコン太陽電池の結晶粒界及び粒界近傍の結晶の不完全性を定量的に評価できることを示した。即ち、結晶粒界の少数キャリア再結合速度と粒界近傍の実効

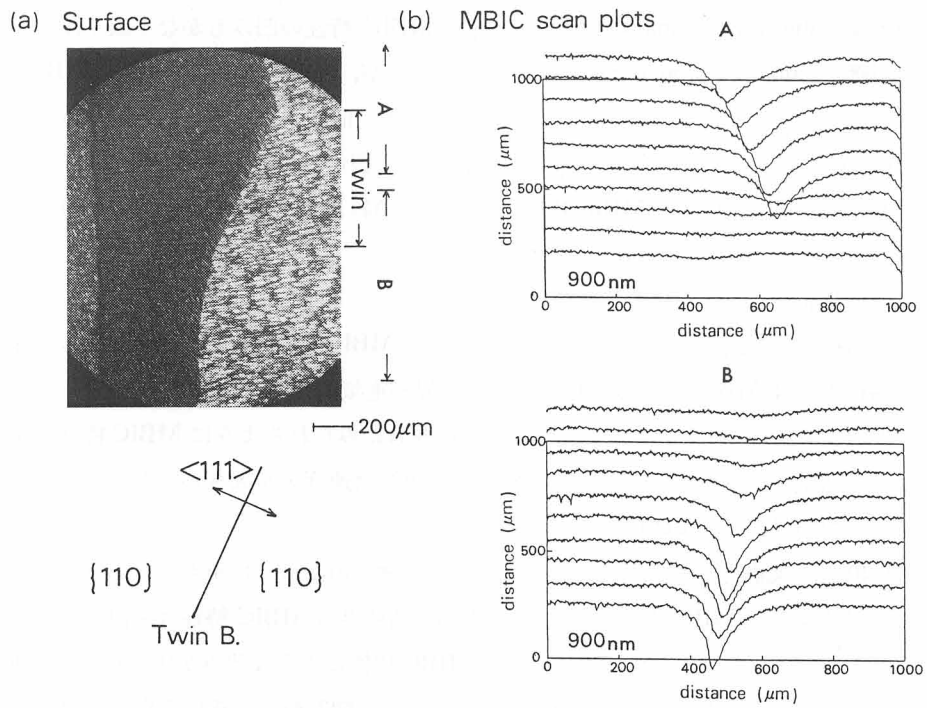


図3.39 双晶粒界と双晶からわずかに離れた粒界の(a)表面写真, (b)MBIC 特性。

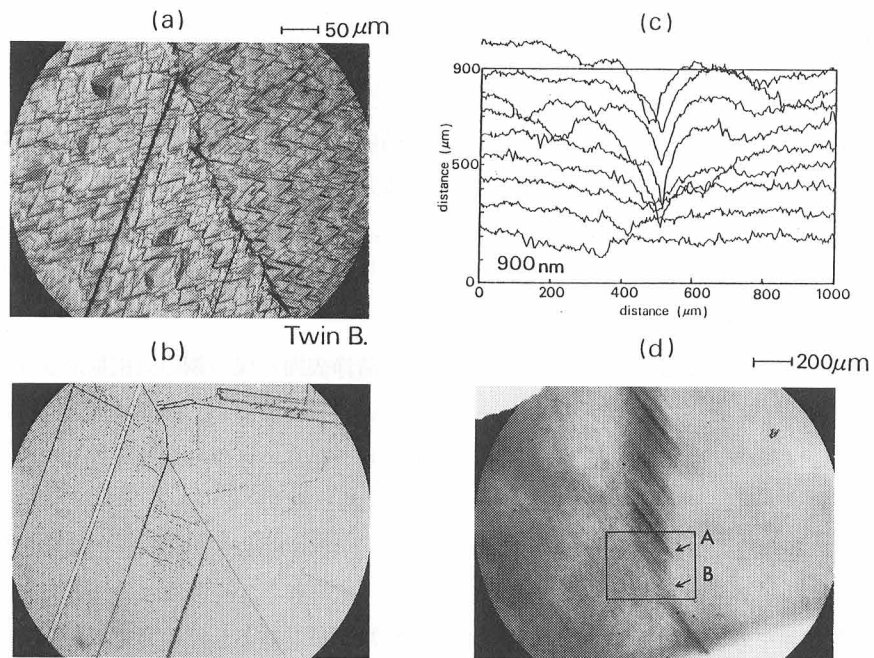


図3.40 微小角度のズレをもつ双晶粒界の(a)表面写真, (b) Secco エッチング後の写真, (c) MBIC 特性, (d)X線回折顕微写真——□部分が(a)(b)(c)に対応。

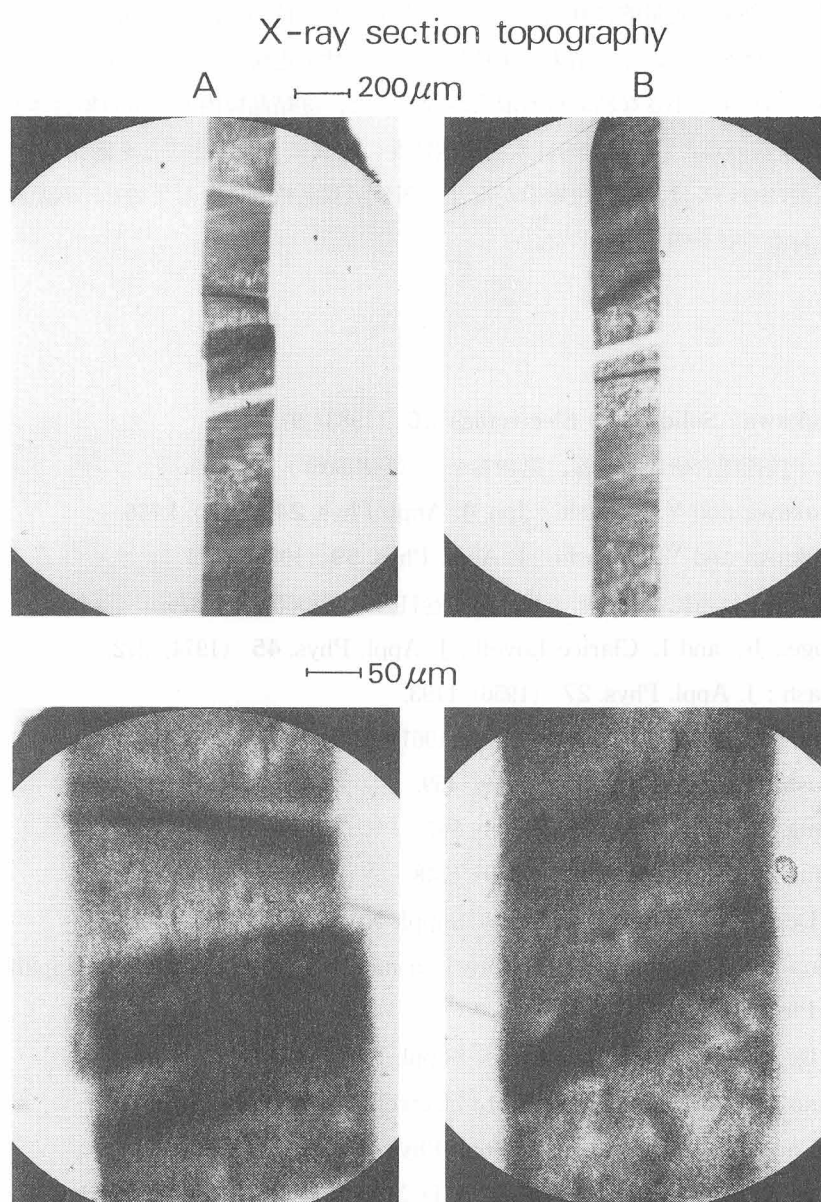


図3.41 X線回折切断顕微写真 (A)微小角度のズレをもつ双晶粒界部分, (B)ズレのない双晶粒界部分。下段は上段の双晶部分の拡大写真である。

的な少数キャリア拡散長を評価し、これに基づく粒界の effective influence width を指標とすることによって粒界の効果を定量的に評価できることを示した。続いて、この手法を使用してキャストシリコン結晶の評価を行い、その結果、①粒界がコラム状で近傍に歪や欠陥を伴わないこと、②結晶粒径が大きく局在する小さな結晶粒の混入がないこと、③結晶粒内に転位の集合体や subgrain boundary を含まないこと、が基本的に太陽電池特性の改良につながることを確認した。更に、特性の良い太陽電池においては、結晶粒界のかなりな部分が双晶粒界になっており、双晶粒界が大きな役割を果たしていることを明らかにした。

参考文献

- 1) R. Shimokawa : Solid-State Electronics 26 (1983) 97.
下川：電子技術総合研究所イ報，第49巻2号（昭和60年）p.95.
- 2) R. Shimokawa and Y. Hayashi : Jpn. J. Appl. Phys. 24 (1985) L736.
- 3) R. Shimokawa and Y. Hayashi : J. Appl. Phys. 59 (1986) 2571.
下川，林：電子技術総合研究所イ報，第49巻11号（昭和60年）p.876.
- 4) F. L. Vogel, Jr., and L. Clarice Lovell : J. Appl. Phys. 45 (1974) 272.
- 5) W. C. Dash : J. Appl. Phys. 27 (1956) 1193.
- 6) E. Sirtl and A. Adler : Z. Metallk. 52 (1961) 529.
- 7) W. C. Dash : J. Appl. Phys. 30 (1959) 459.
- 8) A. R. Lang : J. Appl. Phys. 29 (1958) 597.
- 9) A. R. Lang : J. Appl. Phys. 30 (1959) 1748.
- 10) A. J. R. De Kock : Philips Res. Repts. Suppl. No. 1 (1973) 15.
- 11) J. Aoyama and S. Kawada : Oyo Buturi (a monthly publication of the Japan Society of Applied Phys.) 47 (1978) 1040.
- 12) A. J. R. De Kock : Philips Res. Repts. Suppl. No. 1 (1973) 15.
- 13) Y. Takano and M. Maki : Solid-State electronics 45 (1976) 1058.
- 14) S. M. Hu and M. R. Poponiak : J. Appl. Phys. 43 (1972) 2067.
- 15) K. V. Ravi, H. B. Serreze, H. E. Bates, A. D. Morrison, D. N. Jewett and J. C. T. HO : Conf. Rec. 11th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., Scottsdale, (1975) p. 280.
- 16) J. E. Lawrence : J. Electrochem. Soc. 112 (1965) 796.
- 17) G. H. Schwuttke : J. Electrochem. Soc. 108 (1961) 163.
- 18) K. Yang, G. H. Schwuttke and T. F. Ciszek : J. Crystal Growth. 50 (1980) 301.
- 19) D. Leung, P. A. Iles, S. Hyland and A. Kachare : Proceedings of the 17th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., 1984, p. 264.

- 20) R. Shimokawa and Y. Hayashi : IEEE Trans. ED-30 (1983) 1770.
- 21) C. J. Wu and D. B. Wittry : J. Appl. Phys. 49 (1978) 2827.
- 22) C. Donolato : J. Appl. Phys. 54 (1983) 1314.
- 23) J. Marek : J. Appl. Phys. 53 (1982) 1454.
- 24) M. Watanabe, G. Actor and H. C. Gatos : IEEE Trans. ED-24 (1977) 1172.
- 25) D. E. Burk : IEEE Trans. ED-29 (1982) 1887.
- 26) J. I. Hanoka : Solar Cells 1 (1979/80) 123.
- 27) R. O. Bell and J. I. Hanoka : J. Appl. Phys. 53 (1982) 1741.
- 28) T. Fuyuki and H. Matsunami : Jpn. J. Appl. Phys. 20 (1981) 745.
- 29) C. H. Seager : J. Appl. Phys. 53 (1982) 5968.
- 30) D. L. Lile and N. M. Davis : Solid-State Electronics 18 (1975) 699.
- 31) J. D. Zook : Proceedings of 3rd E. C. Photovoltaic Solar Energy Conference, Cannes, France, edited by W. Palz (Commission of the European Communities, 1980), p. 569.
- 32) J. D. Zook : Appl. Phys. Lett. 37 (1980) 223.
- 33) E. D. Stokes and T. L. Chu : Appl. Phys. Lett. 30 (1977) 425.
- 34) B. L. Sopori and A. Baghdadi : Solar Cells 1 (1979) 237.
- 35) K. Rajkanan, R. Singh and J. Shewchun : Solid-State Electronics 22 (1979) 793.
- 36) J. D. Zook : Appl. Phys. Lett. 42 (1983) 602.
- 37) T. Daud and K. M. Koliwad : Appl. Phys. Lett. 33 (1978) 1009.
- 38) 下川, 林 : 第33回応用物理学関係連合講演会講演予稿集 p.480 (昭和61年春季).
- 39) 高エネルギー物理学研究所, 千川純一氏, 河田洋氏による撮影.

第4章 基板の結晶不完全性と太陽電池のデバイス特性・デバイス物性

4.1 まえがき

最近、単結晶シリコン太陽電池において小面積 (4cm^2) で20%^{1),2)}、大面積 (4インチ ϕ) で18%³⁾、モジュールで15%⁴⁾、を超える高効率の太陽電池が開発され、理論出力値と出力測定値の差を生み出す要因 (損失要因) の具体的な点検、確認、そして、それに基づく25%を超える高効率シリコン太陽電池の研究が開始された。多結晶シリコン太陽電池の場合も、低コストを主とする研究開発から高効率の多結晶シリコン太陽電池の開発を目標とする時代に入り、小面積 (4cm^2) で16%、大面積 (100cm^2) で14%の効率のものが得られる製造技術が確立された^{5~7)}。著者も前章で述べたように、シリコン多結晶の結晶性と光電物性について研究を行い、各種の結晶欠陥、特に、結晶粒界の光電的性質を明らかにし、この高効率多結晶シリコン太陽電池の開発に貢献してきた⁷⁾。現在、多結晶シリコン太陽電池の場合、大面積で効率16%の高効率の太陽電池の開発が目指され、粒界などの結晶欠陥の太陽電池の電流・電圧特性に及ぼす効果、そして、結晶欠陥のパッシベーションについて研究がなされている。

本章では、結晶の不完全性 (不純物、結晶粒界、結晶欠陥) が太陽電池の出力性能に及ぼす効果を明らかにし、高効率化の可能性を検討する。まず、4.2節では、高効率 ($\eta=14\%$) キャストシリコン太陽電池の小面積セルによる電流・電圧特性解析と分光感度測定に基づいて、結晶粒界の出力特性に与える効果を明らかにし出力損失要因の点検を行う⁸⁾。続いて4.3節では、出力性能を決定づける分光感度特性が照射光強度、照射光波長に依存すること、そしてそれが少数キャリア拡散長の増大に原因していることを明らかにし、結晶欠陥と少数キャリア拡散長の関連について検討する^{9),10)}。

4.2 多結晶シリコン太陽電池のデバイス特性

本節では、量産ラインを使用して製作した高効率キャストシリコン太陽電池⁷⁾の出力特性を調べ、結晶粒界などの欠陥による出力性能低下、その他の出力損失要因の点検を行い、高効率化の可能性を検討する⁸⁾。まず、著者の開発した高分解能 MBIC 技術による電流出力分布地図に基づいて、いくつかの小面積セルを製作し、これらのセルの出力特性、分光感度特性、暗状態における電流・電圧特性の分析を行う。続いて、メサエッチ技術を使用して順次面積の小さなミニセルを製作し、同様の測定・分析を行い、結晶欠陥が電流・電圧特性に及ぼす効果を明らかにする。

4.2.1 高効率多結晶シリコン太陽電池

4.2.1.1 製作方法

SOG (solar grade) キャストウェハを用いた高効率多結晶シリコン太陽電池の製作プロセスの概略を図4.1に示す⁷⁾。キャストウェハはP型、抵抗率 0.5~1.5Ωcm、面積 10×10cm²、厚さ 400μmである。まず、キャストウェハをテクスチャエッチングし、続いて、通常のリン拡散プロセスで約 0.4μm の接合深さを持つ n⁺p 接合を作る。次に、Al ペーストを裏面にスクリーン印刷し、赤外線ランプアニールを行うことによって BSF 構造を形成する。次は反射防止膜の形成であるが、均一な膜形成が反射防止にとって重要であるため、スプレー法あるいは CVD 法を使用してテクスチャ表面に TiO_x を形成する。最後に、Ag ペーストを表面と裏面にスクリーン印刷し、赤外線ランプアニールにより電極形成を行う。これらのプロセス技術の最適化を行うことによって、高効率のキャストシリコン太陽電池を製作することが可能となった。

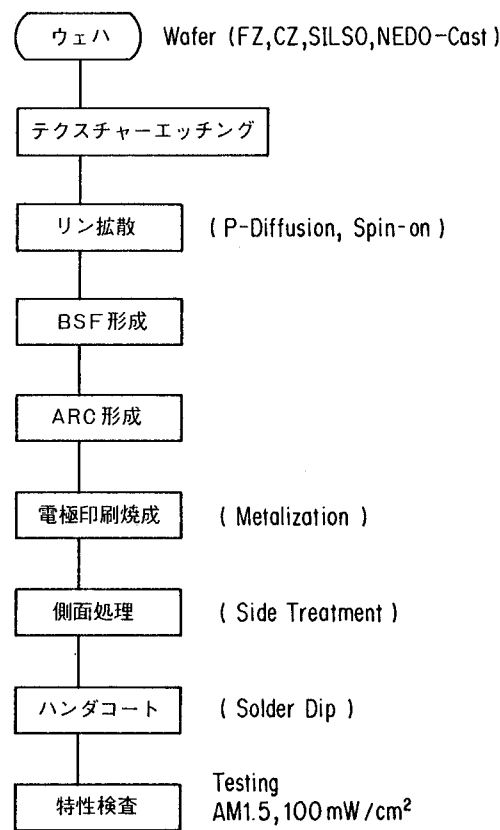


図4.1 セルプロセス

4.2.1.2 基板の結晶性とセル特性

良質のキャストウェハを用いた高効率多結晶シリコン太陽電池と、キャストインゴットの底部から作られた少し質の劣るウェハを用いた低効率の太陽電池の代表的な出力特性を表4.1に示した。測定は、(財)機械電子検査検定協会(JMI)で較正された単結晶シリコンレファレンス太陽電池を用いて、AM1.5, 100mW/cm² のソーラシミュレータ下でなされた。続いて、図4.2に示す位置の2×2cm² 部分の分光感度測定を行い、それぞれの部分の IEC AM1.5 標準太陽光下における出力特性を推定した。短絡電流 J_{sc} は、分光感度と標準太陽光の分光放射照度の積和から求められ、高効率太陽電池の場合のそれぞれの出力電流値は図4.2に示されている。開放電圧 V_{oc} は、理想的な接合を仮定して 10×10cm² の太陽電池の V_{oc} 測定値から計算された。2×2cm² 部分の推定された出力特性のうち最大のものと最小のものを表4.1に示した。

表4.1 高効率多結晶シリコン太陽電池と低効率の多結晶シリコン太陽電池の AM1.5, 100-mW/cm² 標準太陽光下における出力特性

		J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	FF	η (%)
◦ High η cell	(100cm ²)	31.81	0.596	0.755	14.31
	η_{max} (4 cm ²)	33.80(+6.3%)	0.598	//	15.26
	η_{min} (4 cm ²)	30.13(-5.3%)	0.595	//	13.53
◦ Low η cell	(100cm ²)	25.14	0.562	0.755	10.67
	η_{max} (4 cm ²)	26.65(+6.0%)	0.564	//	11.35
	η_{min} (4 cm ²)	23.22(-7.6%)	0.560	//	9.82

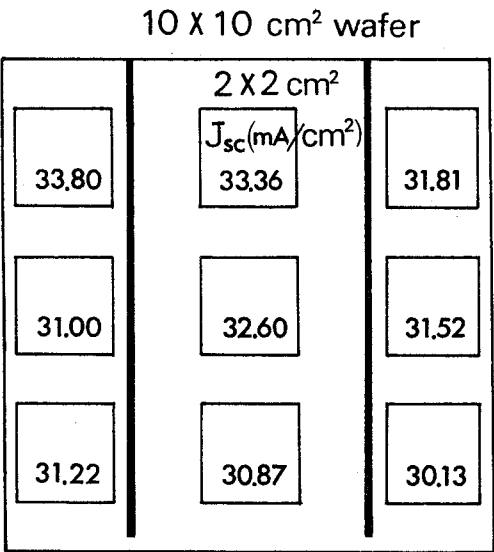


図4.2 高効率多結晶シリコン太陽電池の 2×2cm²部分セルの出力電流 (mA/cm²)

高効率多結晶シリコン太陽電池の場合、 $2 \times 2 \text{ cm}^2$ 部分の J_{sc} のバラツキは $\pm 5 \sim 6 \%$ で、かなり均一な特性を示し、最大出力のものは効率 15.26% 、最低のものでも 13.53% と高い効率を示している。一方、質の劣るキャストウェハを使用した低い効率の太陽電池の場合は、 J_{sc} が減少しているばかりでなく、それ以上に V_{oc} の低下が目立っている。この V_{oc} 低下の原因については、後程、暗状態における電流・電圧特性測定結果から分析されるが、出力電流 J_{sc} については、図4.3に示した高効率の太陽電池と低効率の太陽電池の $2 \times 2 \text{ cm}^2$ 部分 (η_{max} 部) の分光感度特性から理解することができる。図4.3の破線はバイアス光なしの場合の分光感度特性、実線は $\text{AM1.5 } 100 \text{ mW/cm}^2$ のバイアス光下における分光感度特性である。良質のキャストウェハを用いた太陽電池は、バイアス光なしでも長波長感度が良い分光感度特性を示し、バイアス光ありの場合に少し変化するにすぎない。他方、質の劣るウェハを用いた場合は、バイアス光なしのときは長波長感度が非常に悪く、バイアス光を加えることによって分光感度特性が大巾に改善され、一応の太陽電池出力特性を示すようになる。

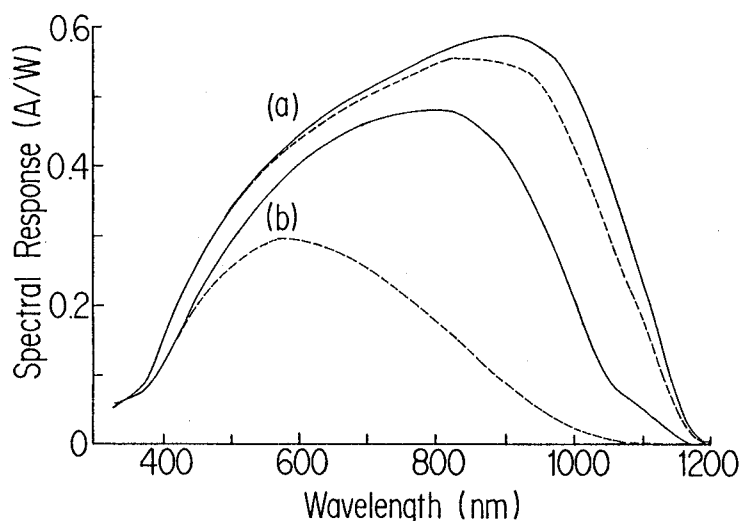


図4.3 (a)高効率多結晶シリコン太陽電池と(b)低い効率の多結晶シリコン太陽電池の $2 \times 2 \text{ cm}^2$ 部分 (η_{max} 部) の分光感度特性。実線は $\text{AM1.5 } 100 \text{ mW/cm}^2$ のバイアス光有りの場合で、破線はバイアス光無しの場合の特性。

4.2.2 小面積セルによるデバイス特性解析

4.2.2.1 小面積セルの出力特性、分光感度特性

前項で示した代表的な高効率多結晶シリコン太陽電池の出力特性の損失要因を調べるために、多くの小面積のミニセルを製作し、代表的なミニセルについて出力特性と暗状態の電流・電圧特性を調べた。まず、最大出力を示す $2 \times 2 \text{ cm}^2$ 部分 (η_{max} 部) の MBIC スキャンニングによる出力電流分布地図¹¹⁾を描き、このデータに基づいて出力の大きな個所と欠陥等を含んだ出力の小さな個所を

分離した。ミニセルの分離はメサエッチ技術を使用して行った。その後は、特徴のある個所を含む小さなミニセルを順次製作し、その出力特性と暗状態における電流電圧特性の測定を行った。

図4.4に $\eta_{\max}$ 部の波長 900nm MBIC スキャンニング (ビーム径 $4\mu\text{m}$) 特性を示した。中央付近に電氣的に活性な結晶粒界が集中して乱れた部分がある他は、いくつかの結晶粒界が走るのみで全体的に高出力をもたらしている。この MBIC スキャンニングの高出力部分④と欠陥の多い部分⑤のミニセルを作り、その小面積部分の太陽電池出力特性、暗状態の電流電圧特性の測定を行った。測定結果を表4.2と図4.5に示す。また、低効率の太陽電池から作られたミニセル③の太陽電池出力特性と暗状態の電流電圧特性も表4.2と図4.6に示す。高効率太陽電池のミニセル④⑤は、ともに出力電流 J_{sc} が大きい特性を示しているが、低効率太陽電池のミニセル③の出力電流 J_{sc} は小さい。前項と同じようにして、ミニセル④ (16mm^2) の J_{sc} 値から推定した出力特性をカッコ内に示したが、16.1%の高い効率を示している。この値は、全く同じプロセスで製作された CZ-Si 太陽電池の効率とほぼ同じである。

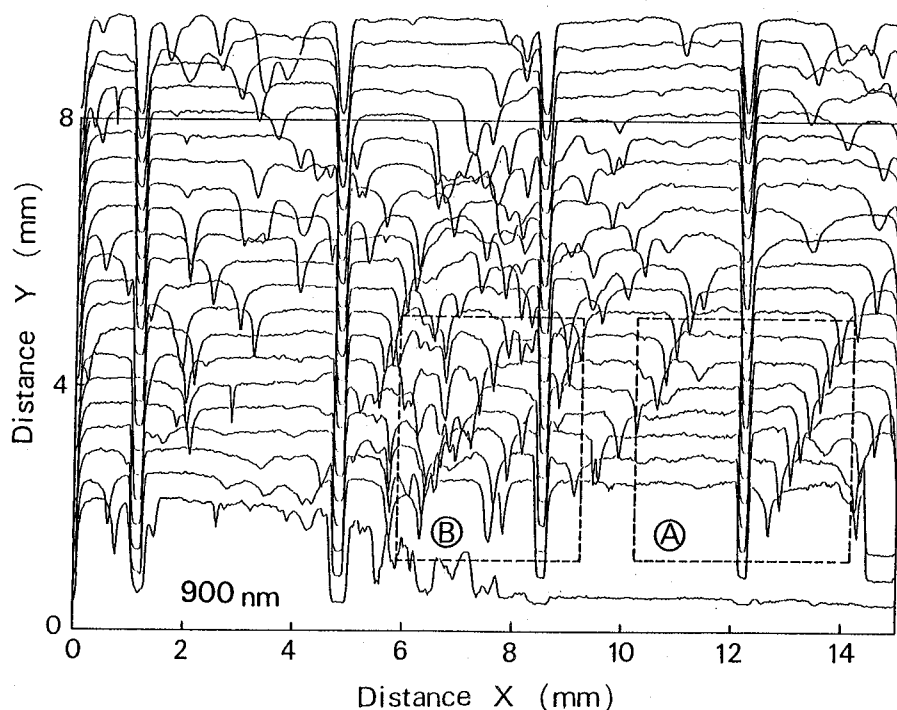


図4.4 高効率多結晶シリコン太陽電池の $2 \times 2 \text{ cm}^2$ 部分 ($\eta_{\max}$ 部) の波長 900nm MBIC スキャンニング特性。

表4.2 ミニセル④, ⑤, ⑥とミニセルA-1, A-2, A-3のAM1.5 100mW/cm²標準太陽光下における出力特性。

	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	FF	η (%)
◦ High η cell				
mini-cell(A) (16mm ²)	35.6	0.582 (0.599)	0.703 (0.755)	14.57 (16.10)
A-1 (1.80mm ²)	25.6	0.542	0.728	10.11
A-2 (1.75mm ²)	26.9	0.540	0.621	9.03
A-3 (1.59mm ²)	27.0	0.534	0.691	9.96
mini-cell(B) (13mm ²)	32.0	0.544	0.611	10.61
◦ Low η cell				
mini-cell(C) (14mm ²)	22.5	0.534	0.717	8.70

* () 内の数字は10×10cm²セルから推定されたもの。

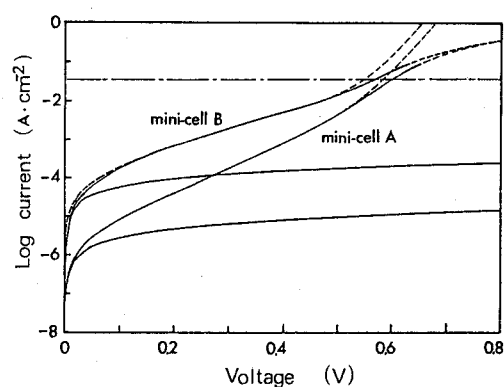


図4.5 ミニセル④, ⑤の暗状態における電流・電圧特性。破線は表4.3に示された理論計算カーブで、 $R_s=0$ の場合のカーブも付す。

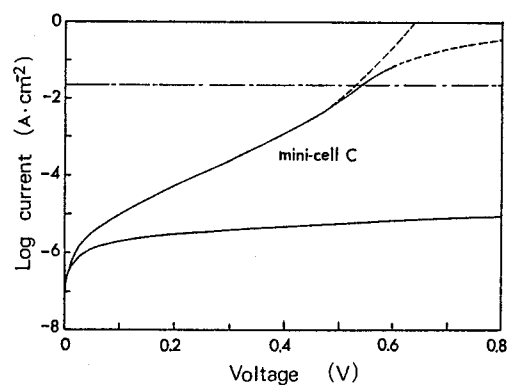


図4.6 低効率の多結晶シリコン太陽電池のミニセル⑥の暗状態における電流・電圧特性。破線は表4.3に示された理論計算カーブで、 $R_s=0$ の場合のカーブも付す。

このミニセル④の高出力電流は、図4.7のミニセル④の分光感度特性及び量子効率特性から理解することができる。破線は少数キャリア拡散長 L_D から近似計算された理論曲線である。 $L_D=136\mu\text{m}$ とした場合に、波長 600nm 以上では実測値と非常に良い一致を示しており、この波長範囲では、分光感度の測定精度 2～3 % の範囲内で表面における反射がほとんどないことを示している。この分光感度特性から計算された IEC AM1.5 標準太陽光下におけるミニセル④の J_{sc} は、 $34.57\text{mA}/\text{cm}^2$ (UV 波長域における反射による損失は $1.57\text{mA}/\text{cm}^2$) で、破線の理想セルの場合は、 $L_D=136\mu\text{m}$ のとき $37.14\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $L_D=200\mu\text{m}$ のとき $38.31\text{mA}/\text{cm}^2$ である。また、図4.7には、比較のために、 $2\times 2\text{cm}^2$ η_{max} 部の分光感度特性 (図4.3の(a)) と量子効率特性を点線で再度示しておいた。この図4.7から、今後の多結晶シリコン太陽電池の高効率化をはかる上でのいくつかの示唆を得ることができる。すなわち、多結晶シリコン基板を改良して拡散長 L を大きくすることも重要であるが、短波長感度の改良による効果もかなり残されていること、そして、セルの面積が大きくなるとセル感度波長域全体にわたって反射が未だ 7～8 % 程度あり、多結晶シリコン表面におけるテクスチャエッチング技術、反射防止膜技術の工夫改善の余地が大きいことがわかる。

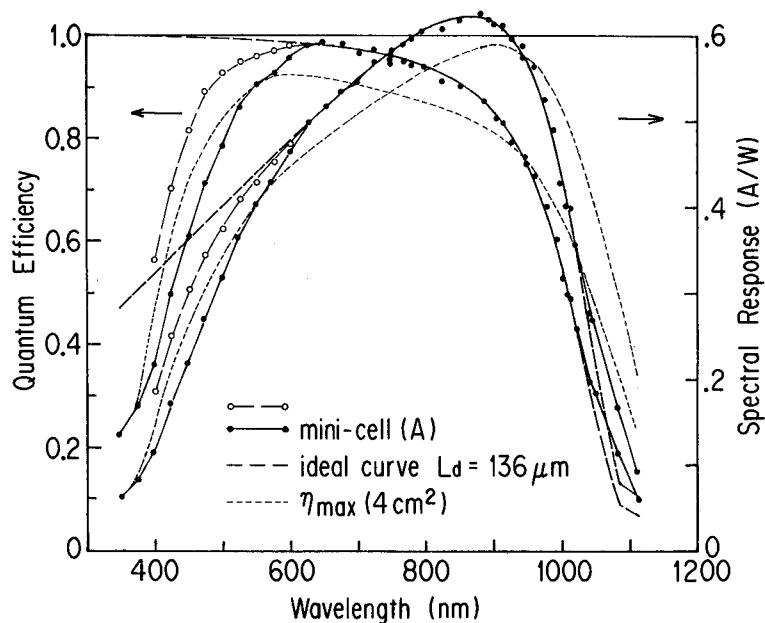


図4.7 ミニセル④の分光感度特性と量子効率特性 (AM1.5, $100\text{mW}/\text{cm}^2$ のバイアス光あり)。黒丸は外部量子効率で、白丸は UV 波長域における反射損失を考慮した内部量子効率である。破線は、少数キャリア拡散長 $L_D=136\mu\text{m}$ のときの理想の分光感度特性で、点線は図4.3(a)を再プロットしたもの。

多結晶太陽電池の高効率化をはかる上で問題となるのは開放電圧 V_{oc} である。結晶粒界をわずかに含まないミニセル④の V_{oc} は大きな値を示しているが、欠陥の多いミニセル⑤の V_{oc} はかなり低い値となり、質の劣るキャストウェハから作られた太陽電池のミニセル⑥の値に近くなっている。但し、いずれのミニセルもメサエッチされた小面積のものであるために電極部及び端面の効果が強調され、 V_{oc} 値は $10 \times 10 \text{ cm}^2$ セルの V_{oc} 値よりも低い値になっている。また、ミニセル⑤の FF の低下も目立つ。この V_{oc} 及び FF の低下要因については、暗状態の電流・電圧特性から理解することができ、項を改めて論じることにする。

次に、結晶粒界 (GB) の効果を調べる目的で、ミニセル④から、さらに小面積のミニセルをいくつか製作し、その出力特性と暗状態の電流・電圧特性を調べた。図4.8の波長 900nm MBIC スキャンニング特性の A-1, A-2, A-3 部分をメサエッチで分離し、測定を行った。ミニセル A-1 は GB を含んでいない単結晶セルで、ミニセル A-2 は 1 個の GB を含み、そして、1 端はスクライプされた状態になっている。ミニセル A-3 は 1 個の電氣的に活性な GB と 1 個のあまり活性でない GB を含んでいる。測定結果を表4.2と図4.9に示した。これらは、分析用のサンプルで微小面積であるために、 J_{sc} , V_{oc} ともに低く、効率は大巾に低下している。同一の結晶粒において、ほぼ同じセル面積をもつこれらのミニセルの出力特性の相対比較を行ってみると、 J_{sc} , V_{oc} はあまり有意差がみられなく、 FF の差が効率 η の差となって表れている。これについても、暗状態の電流・電圧特性から理解することができ、次項で検討する。

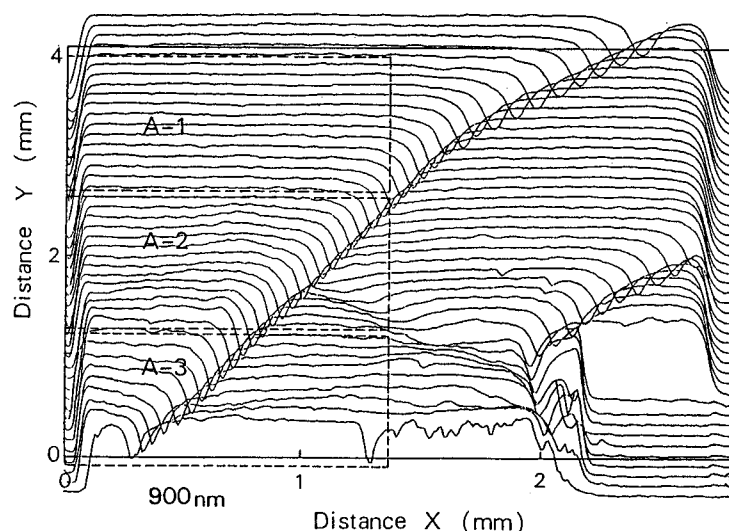


図4.8 ミニセル④の波長 900nm MBIC スキャンニング特性。

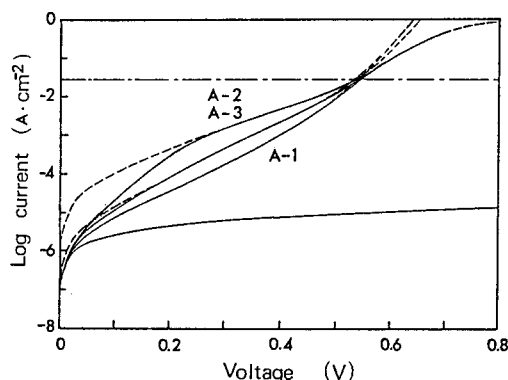


図4.9 ミニセル④のA-1, A-2, A-3部分の暗状態における電流・電圧特性。破線は表4.3に示された理論計算カーブで、 $R_s=0$ の場合のカーブも付す。

4.2.2.2 小面積セルの電流・電圧特性

これまでの小面積ミニセルの特性解析から、小面積の場合には単結晶シリコン太陽電池並の効率16%のものが製作可能であることが実証された。そして、出力電流 J_{sc} を更に大きくすることによって高効率化をはかるには、キャスト基板の拡散長 L_D の改良はもちろんのこと、エミッタ層の改善、表面反射防止の技術、場合によっては、表面パッシベーションの技術が必要であることが明確になった。問題は、多結晶シリコン太陽電池の開放電圧 V_{oc} である。結晶粒界や粒内の欠陥が、この V_{oc} 低下の原因になっているものと思われ、これを明確にするために小面積ミニセルの暗状態における電流・電圧特性の分析を行った。

多結晶 Si 太陽電池の電流-電圧 (J - V) 特性は、近似的に次式でモデル化できる⁵⁾。

$$J = J_{01} \exp \left\{ \frac{q(V - JR_s)}{kT} - 1 \right\} + J_{02} \exp \left\{ \frac{q(V - JR_s)}{nkT} - 1 \right\} + \frac{(V - JR_s)}{R_{sh}} - J_L \quad (4.1)$$

ここで、 J_{01} はバルク基板におけるキャリア再結合による飽和電流、 J_{02} は空乏層領域におけるキャリアの再結合による飽和電流、 n は空乏層領域を表すダイオードの n 因子、 R_{sh} は接合の電流リークを表す並列抵抗、 R_s は接合にかかる電圧と端子電圧の差を表すための直列抵抗、 J_L 、 J はそれぞれ単位面積当たりの光発生電流と流れる電流を表す。単結晶シリコン太陽電池の場合は、空乏層領域における再結合電流成分が非常に小さく無視でき、理想のダイオードの特性を表す式となる。多結晶シリコン太陽電池の場合は、結晶粒界におけるキャリアの再結合が第2の指数関数項に、そして、結晶粒界や欠陥による電流リークが並列抵抗低下に貢献し、これらの因子が大きな働きをする^{12),13)}。本節においては、このモデル式を使用して n^+p 多結晶 Si 太陽電池の出力特性の損失要因を、

- ① バルク基板における再結合 ($J_{01}, n=1$) による出力損失。
- ② 空乏層領域における再結合 ($J_{02}, n\neq 1$) による出力損失。
- ③ 並列抵抗 R_{sh} による出力損失。

に分けて分析を行う。

(4.1) 式に従って前項で示された暗状態の電流・電圧特性の分析を行った結果を表4.3に示した。また、各々の電流・電圧特性のグラフには、最適の理論カーブを破線で示し、同時に V_{oc} の値が確認できるように $R_s=0$ の場合の理論カーブも示しておいた。低効率のミニセル③と高効率のミニセル④、⑤の3者を比較すると、低効率のミニセル③の場合は、主として J_{01} が大きいことが原因で、また、ミニセル⑤の場合は、 J_{01} に加えて GB や欠陥によると思われる J_{02} の増大が原因で、 V_{oc} として FF の低下をもたらしているのが分かる。

GB と欠陥の効果については、更に小面積のミニセルA-1, 2, 3の特性比較から明らかである。A-1, 2, 3は、前述したように同一の結晶粒においてGBを含んでいない部分(A-1)、GBを含んでいる部分(A-3)、GBとスクライプ端を含んでいる部分(A-2)のミニセルで、これらのミニセルの暗状態における電流・電圧特性は、表4.3、及び図4.9から分かるように、ほぼ同じ J_{01} , R_{sh} , R_s の値をもち、 J_{02} の値のみが結晶性により変化している特性を示している。しかし、出力特性は、表4.2でみるように、 V_{oc} の低下にまでは至らず FF が少し低下するにとどまっている。GBや欠陥が増加し、 J_{02} が更に増大するならばミニセル⑤と同様の電流・電圧特性を持つに至り、 V_{oc} が低下することになる。

表4.3 ミニセル④、⑤、③とミニセルA-1, A-2, A-3の暗状態における電流・電圧特性と合致する理論計算カーブのパラメータ J_{01} , J_{02} , R_{sh} , R_s の値。

	J_{01} (A/cm ²)	J_{02} (A/cm ²)	n	R_{sh} (Ω・cm ²)	R_s (Ω・cm ²)
◦ High η cell					
mini-cell(A) (16mm ²)	4.0×10^{-12}	1.9×10^{-6}	2.53	9.2×10^4	0.40
A-1 (1.80mm ²)	1.5×10^{-11}	1.2×10^{-6}	2.35	8.0×10^4	0.17
A-2 (1.75mm ²)	1.0×10^{-11}	5.0×10^{-5}	3.40	8.0×10^4	0.17
A-3 (1.59mm ²)	1.5×10^{-11}	3.0×10^{-6}	2.35	8.0×10^4	0.17
mini-cell(B) (13mm ²)	1.0×10^{-11}	1.2×10^{-4}	4.10	3.0×10^3	0.50
◦ Low η cell					
mini-cell(C) (14mm ²)	2.0×10^{-11}	3.0×10^{-6}	2.60	1.0×10^6	0.50

最後に、最高出力を示しているミニセル④の電流・電圧特性を中心に、多結晶シリコン太陽電池の性能を表す(4.1)式の特性パラメータ J_{01} , J_{02} , R_{sh} , R_s の値を変化させることによって得られた電流・電圧特性を図4.10に示した。多結晶シリコン太陽電池の特徴は、結晶粒界や粒内欠陥が原因で J_{02} が大きな値となり、 FF さらに V_{oc} を低下させるところにあるが、図4.10を参考にしてミニセル④について考えてみると、結晶製作技術の改良、あるいは結晶欠陥のパッシベーション技術により、 J_{02} を $5 \times 10^{-7} \text{mA/cm}^2$ 以下にすることができるならば J_{02} の効果を見無視することができ、単結晶太陽電池と同じ高出力特性が期待できる。

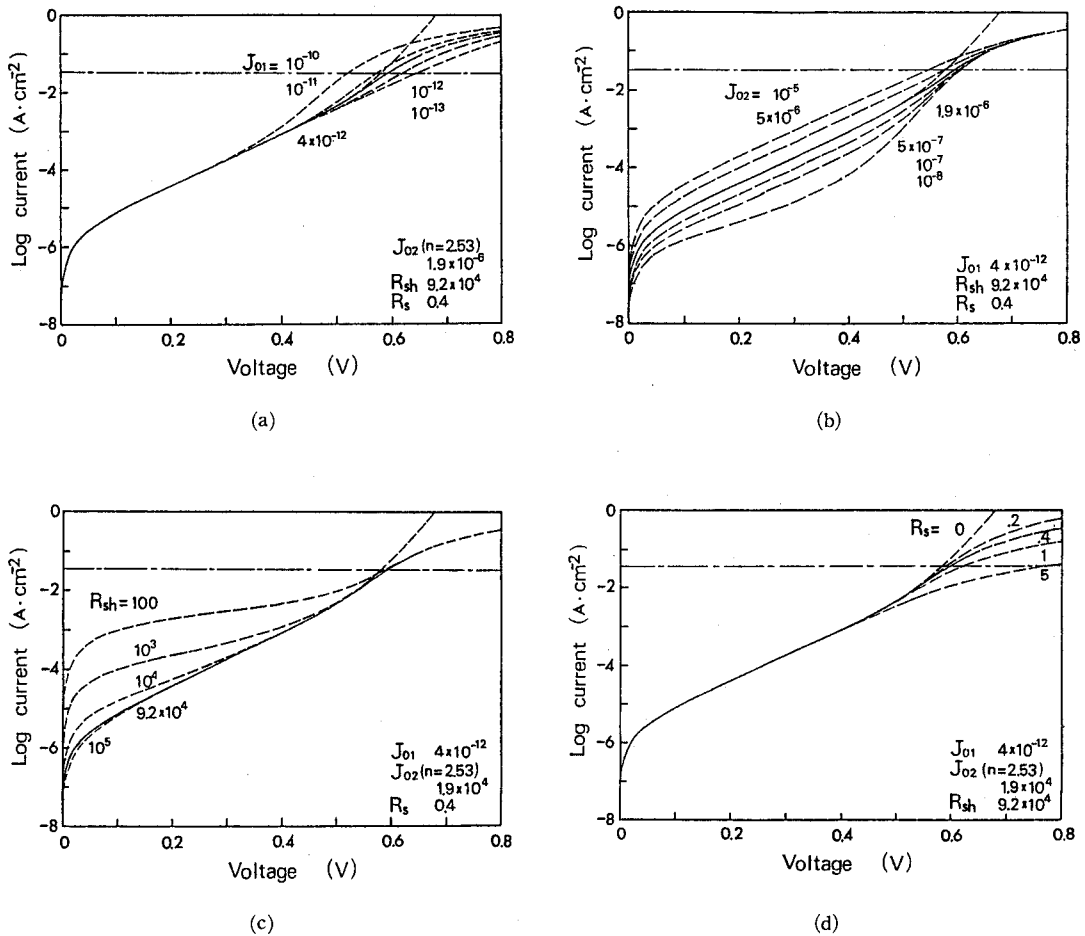


図4.10 ミニセル④の暗状態における電流・電圧特性を中心に、パラメータ(a) J_{01} , (b) J_{02} , (c) R_{sh} , (d) R_s の値を変化させたときの理論計算カーブ。

4.3 多結晶シリコン太陽電池のスペクトル応答特性と少数キャリア拡散長

——照射光強度・波長依存性——

太陽電池の出力性能を決定づける分光感度特性が少数キャリア拡散長に大きく依存することはすでに述べたが、この拡散長が照射光強度・照射光波長に従って増大し、分光感度特性が改善される現象を見出した¹⁰⁾。EFG (edge-defined film-fed growth) 法によって製作されたシリコン結晶は、多くの欠陥や歪み、不純物を含んでいるために、一般に少数キャリア・ライフタイムは小さく、その結果、少数キャリア拡散長は $20\sim 30\mu\text{m}$ しかない。しかし、光照射下においては、このリボン結晶から作られた太陽電池の少数キャリア拡散長は増大し、変換効率は、この暗状態における拡散長から予測されるものよりも、かなり高い値となっている^{14~18)}。同じ現象は、キャスト・シリコン結晶太陽電池¹⁹⁾、ソーラ・グレードの CZ-Si 太陽電池²⁰⁾にもみられる。それ故、最近では、実際の光量に近い白色バイアス光照射下において、太陽電池の分光感度測定、少数キャリア・ライフタイム測定がなされるようになってきた。

本節では、この拡散長増大現象の照射光強度依存性、照射光波長依存性の定量的な測定データに基づいて、拡散長増大のメカニズムを解明し、結晶欠陥と少数キャリア拡散長の関連について明らかにする¹⁰⁾。

4.3.1 各種結晶部分の光生成電流、分光感度の測定

測定された太陽電池は、厚さ $450\mu\text{m}$ の p 型 $2\Omega\text{-cm}$ の EFG シリコンリボン結晶を使用して通常のリン拡散プロセスで太陽電池に形成したもので、変換効率は、AM1 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ 下で約 $7\sim 8\%$ のものである。まず、太陽電池の場所による特性の不均一性を考慮して、図4.11に示す約 $150\mu\text{m}\phi$ の波長可変の単色光ビーム・スキャンニング装置を使用して、順次波長を変えて光生成電流分布を測定した。続いて、太陽電池の結晶性の異なる典型的な3つの個所に単色光ビームを固定して、順次、バイアス光強度及び波長を変えて、ホトレスポンスを測定し、その部分の分光感度特性の変化を調べた。図4.11の上部は Xe ランプを光源とするエネルギー可変の分光器で、下部はエネルギー強度及び波長可変のバイアス光源である。チョッピングされた単色光ビーム信号 (波長 900nm では $10\mu\text{W}/\text{cm}^2$) とバイアス光源からの直流光が、ハーフ・ミラーを通して重畳されるように構成されている。最後に、この分光感度曲線から、SPV法^{21),22)} (surface photovoltage method) によって少数キャリア拡散長を求め、そのバイアス光強度依存性及びバイアス光波長依存性を調べた。信号光及びバイアス光の強度は、較正された結晶シリコンセルによって評価した。白色バイアス光については、最大強度波長の 950nm の光として評価した。

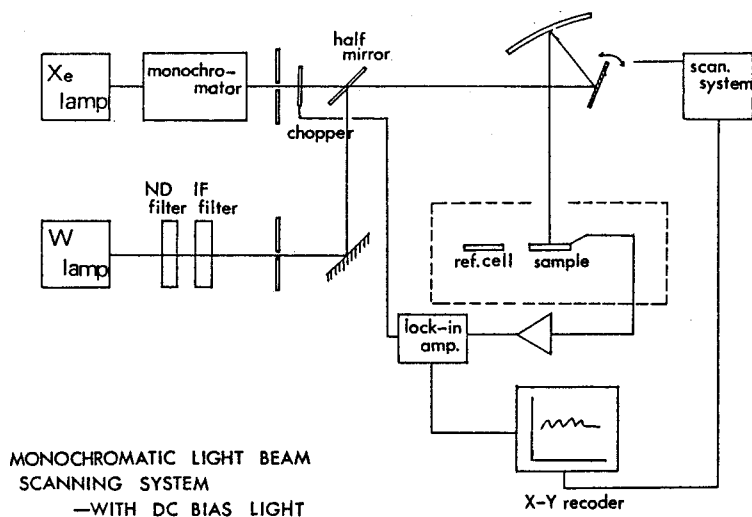


図4.11 単色光ビーム・スキャンニング装置

4.3.2 スペクトル応答特性及び少数キャリア拡散長のバイアス光依存性

4.3.2.1 スペクトル応答特性のバイアス光強度及び波長依存性

信号波長を変えて同一個所を単色光ビームでスキャンニングすることによって、EFG リボンシリコン太陽電池の局所的な分光感度測定がなされた。図4.12は、バイアス光なしの場合と、バイアス光（ハロゲンランプ、最大強度波長 950nm, 42mW/cm²）ありの場合の各種信号波長における単色光ビーム・スキャンニング特性である。波長 400~500nm の単色光ビーム・スキャンニング特性も、500nm の場合と同じように平坦で、且つバイアス光の効果がなく、接合が均一に形成されていることを示している¹⁴⁾。長波長の単色光ビーム・スキャンニングになるに従って、太陽電池の深部の特性が反映され、EFG リボンシリコンの結晶性の違いがレスポンスに表れてくる。典型的な3個所についてみると、A点においては、信号波長 750nm 以上でわずかに光バイアス効果が表れてくる程度であるが、B点、C点では、信号波長 550nm からすでにレスポンスの低下がみられると同時に、バイアス光によるレスポンスの増大がみられはじめ、長波長信号になるに従ってバイアス光の効果が増大している。B点では、バイアス光の効果によって、かなりレスポンスの回復がみられ、短波長信号に対するレスポンスはA点と同レベルまで回復するが、C点では、もはやバイアス光を照射しても、一定程度しか回復しない。A点は、3章で示した直線粒界の集合した歪の少ない個所、B点は、小さな結晶粒の中心部、そして、C点は、不規則粒界近傍で欠陥が多く集合している個所である。

図4.13は、B点における分光感度特性のバイアス光照射による変化の例を示したもので、長波長感度が非常に大きくなっており、少数キャリア拡散長の増大が予測される。この長波長感度の増大を定量的にみるために、900nm のレスポンスを1つの目安としてバイアス光の効果をみた。図4.14

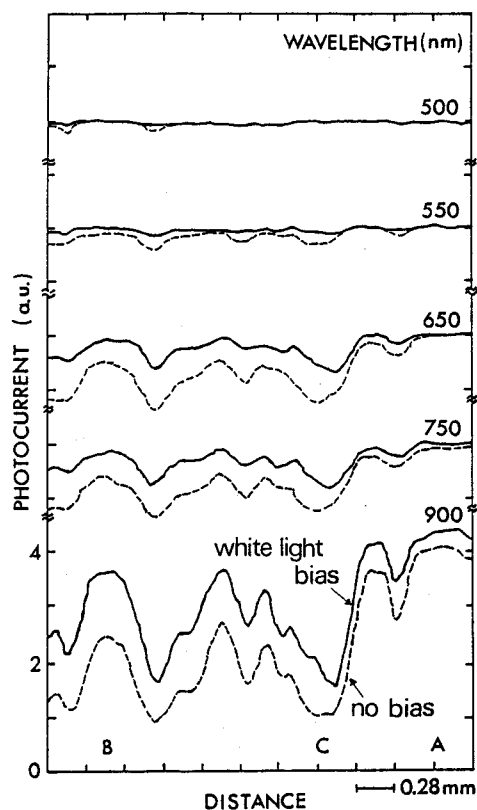


図4.12 EFG リボン太陽電池のビーム・スキャンニング特性。白色バイアス光がある場合が実線で、ない場合が破線。A, B, Cはホトレスポンスの大, 中, 小の典型的な部分を示す。

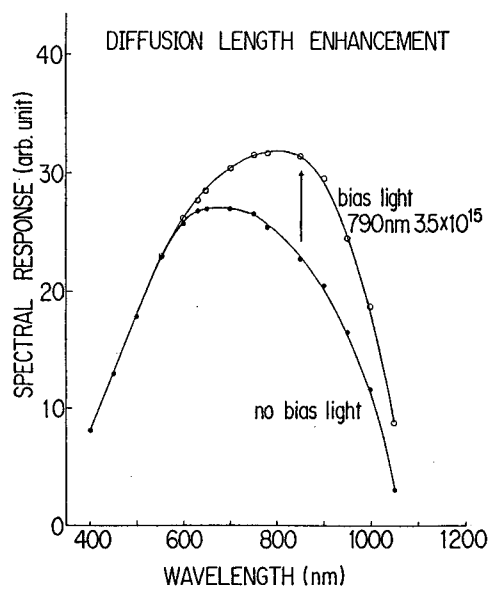


図4.13 バイアス光による分光感度特性の変化 (少数キャリア拡散長の増大)。

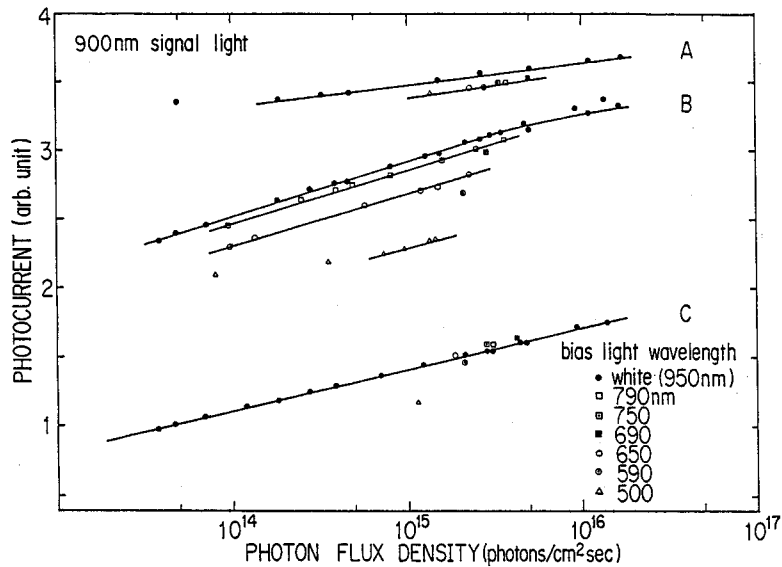


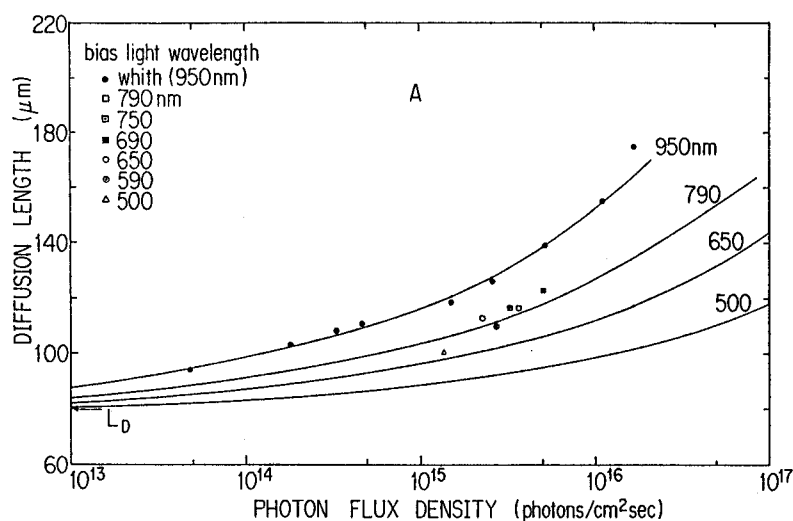
図4.14 A, B, C点における波長 900nm のホトレスポンスのバイアス光強度及び波長依存性

は、バイアス光強度及び波長を変化させた時のA, B, C点における波長 900nm のホトレスポンスの変化を表している。いずれのレスポンスもバイアス光強度とともに単調に増大しているが、ホトカレントが大きくなると飽和する傾向にある。単色光バイアスの場合も白色光バイアスの場合と全く同じ傾向であることが、B点の特性からわかる。バイアス光波長依存性については、B点に典型的にみられ、バイアス光波長が増大するに従って、ホトレスポンスも増大している。他方、A点、C点の場合は、あまり顕著な効果を示していない。EFG シリコン太陽電池全体の分光感度特性は、単色光ビーム・スキャンニングによって得られたものを総合した特性で、EFG リボン結晶の平均的な拡散長をもつB点の特性に類似している。そして、同じパワーであるならば、紫外光の強いバイアス光源よりも赤外光の強いバイアス光源を使用した場合の方が、太陽電池の長波長感度特性は良くなっている。

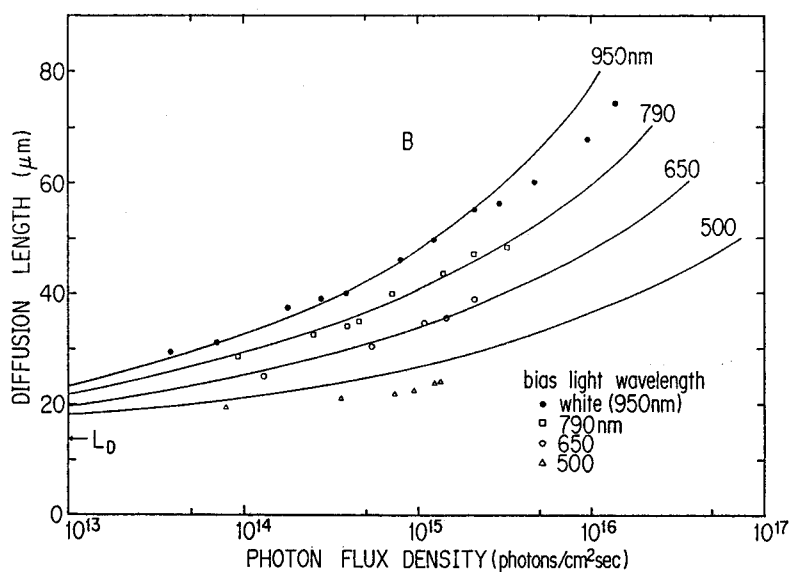
4.3.2.2 少数キャリア拡散長のバイアス光強度及び波長依存性

分光感度曲線から求められたA, B, C点の少数キャリア拡散長は図4.15の如くである。バイアス光波長をパラメータとして、バイアス光強度を変えた時の少数キャリア拡散長の変化を示している。実線は、後程述べる deep trap-filling model に従って理論計算された少数キャリア拡散長である。この片対数のグラフにおいて、拡散長は図4.14に似てバイアス光強度に従って単調に増加し、弱いバイアス光によっても、かなりな程度まで増大することを示している。バイアス光波長の効果については、B点 (図4.15(b)) に典型的にみられるように、波長に従って増大している。しかし、A点 (図4.15(a))、C点 (図4.15(c)) においては、バイアス光波長の効果は小さく、A点では 500nm

～790nm の波長域の単色光バイアスのもとでは波長依存性がなく、950nm を最大強度波長とする白色光バイアスの場合のみ、他よりも大きな効果を示している。C点では、650nm 以上の波長のバイアス光の下では波長依存性がなく、590nm 以下の波長において波長の差が現れている。照射光量 $\Phi_0 = 1.47 \times 10^{15}$ ホトン/cm² sec の場合の少数キャリア拡散長をバイアス光波長の関数として表すと、図4.16のようになる。実線は、後程述べる理論により計算された光照射下における少数キャリア拡散長 L_{ni} を表し、破線は、拡散長の光バイアスによる増大を示す L_{ni}/L_{nd} を表している。



(a)



(b)

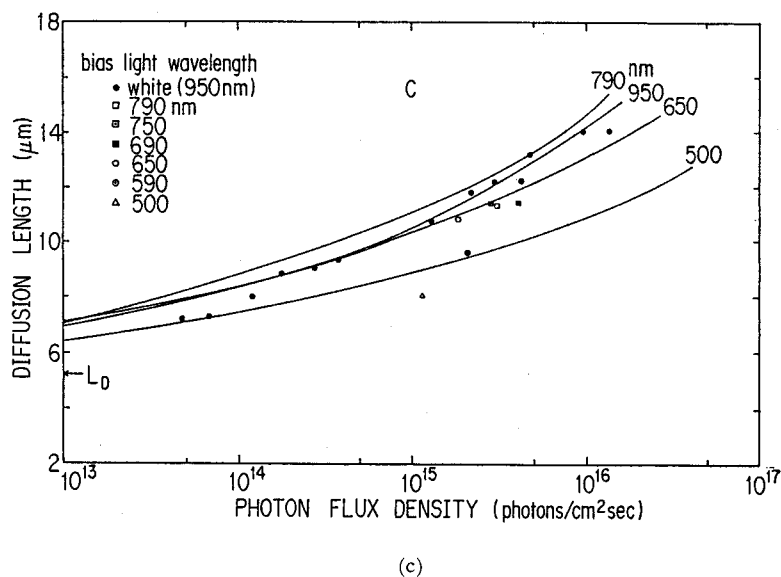


図4.15 A, B, C点の少数キャリア拡散長のバイアス光強度及び波長依存性。実線は deep trap-filling model に従って計算された値。

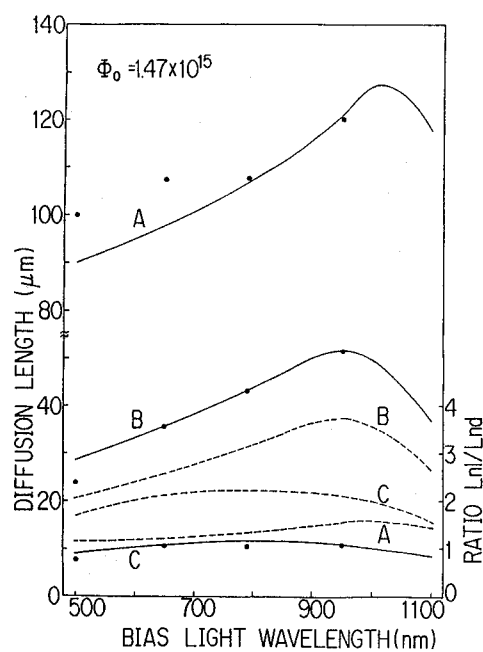


図4.16 A, B, C点における拡散長 (L_n) のバイアス光波長依存性。

4.3.3 光バイアス効果の理論的検討

以上の実験結果から、EFG リボンシリコン太陽電池の少数キャリア拡散長は照射光強度及び波長に従って増大することが実証された。本項では、これらの測定データを基にして、照射光強度及び波長の効果について理論的に検討する。

4.3.3.1 光生成電流と少数キャリア拡散長

浅い n^+p 接合の太陽電池に、波長 800nm～1,050nm の吸収係数の小さな光を照射したときの出力 J_{sc} は、主として、 p 型基板域で発生した少数キャリアによって支配され、基板の厚さが拡散長 (L_n) に比して大きい場合は、

$$J_{sc\lambda} = q(1-R)\Phi_0 \frac{\alpha_\lambda L_n}{1 + \alpha_\lambda L_n} \quad (4.2)$$

と表される。 q は電荷、 R は表面反射率 (波長 800nm～1,050nm では、ほぼ一定^{23),24)})、 α_λ は吸収係数、 Φ_0 は入射光量である。今、 $\alpha_\lambda L_n \ll 1$ の場合、あるいは、 $\Delta(\alpha_\lambda L_n) \ll 1$ の場合を考えると、 $J_{sc\lambda}$ は L_n と同じような傾向をもつことになる。図4.14のB点C点の場合が前者で、A点の場合が後者に相当し、波長 900nm の $J_{sc\lambda}$ は、バイアス光強度に依存して増大する少数キャリア拡散長 L_n の傾向を反映する。他方、 $\alpha_\lambda L_n \gg 1$ の場合は、 $J_{sc\lambda}$ は一定値に近づく。EFG リボン太陽電池の平均的な性質はB点に類似しているため、出力 $J_{sc\lambda}$ は、少数キャリアの拡散長に比例してかなり大きな変化を示すことになる。

4.3.3.2 少数キャリア拡散長のバイアス光強度及び波長依存性

図4.15の少数キャリア拡散長の照射光波長依存性については、照射光の浸透深さを考えることによって直観的に理解することができる。バイアス光の浸透深さが拡散長に比して小さい時は、拡散長内のシリコン基板の大部分はバイアス光を受けず、拡散長の増大はほとんど生じない。他方、浸透深さが拡散長と同じかあるいはそれ以上である時は、シリコン基板は十分にバイアス光を受けて拡散長は増大する。しかし、いずれの場合も、照射光波長の違いによって拡散長はあまり変化しない。波長 790nm 以下のバイアス光照射下のA点の場合が前者に相当し、波長 650nm 以上のバイアス光照射下のC点の場合が後者に相当する。A点とC点の丁度中間の拡散長をもつB点の場合は、バイアス光の浸透深さによって拡散長内のバイアス光を受ける部分の割合が大きく変わり、バイアス光波長の影響を顕著に受けることになる。

厳密には、光照射によって発生する過剰少数キャリアは基板内部あるいは表面方向にすばやく拡散していくため、定常状態における少数キャリア分布に基づいて拡散長増大現象が考えられねばならない。今、禁制帯内にガウス分布した再結合にあずかる深いドナー準位が存在し、そして少数キャリア寿命が全くこの準位の空状態の衝突断面積と密度によって決まる、とする deep trap-filling model¹⁵⁾を仮定する。すると、少数キャリア寿命について次式が成立する。

$$\tau_i / \tau_d = (N_t - n_{td}) / (N_t - n_{ti}) = \left[\int_{E_{td}}^{E_c} N(E) dE \right] / \left[\int_{E_{ti}}^{E_c} N(E) dE \right] \quad (4.3)$$

N_t はトラップ全体の密度で, τ_d , τ_i , そして, n_d , n_i は, 各々暗の状態, 明の状態における少数キャリア寿命, そして, 電子を捕獲したトラップの密度を表している。 E_d , E_i は, それぞれ暗の状態, 明の状態における電子の擬フェルミレベルである。トラップ準位は, ガウス分布していると仮定して, 次式で表すことができる。

$$N(E) dE = N_0 \exp \{ -[(E-E')/\Delta E]^2 \} dE \quad (4.4)$$

E' は平均, $\Delta E^2/2$ は分散である。

電子移動度が照射強度によって変化しないと考えると, 暗状態における少数キャリア拡散長 L_{nd} と明状態における L_{ni} の比は (4.3) 式より

$$\begin{aligned} L_{ni}/L_{nd} &= (\tau_{ni}/\tau_{nd})^{1/2} \\ &= \{ [\operatorname{erf}(\epsilon_c) - \operatorname{erf}(\epsilon_d)] / [\operatorname{erf}(\epsilon_c) - \operatorname{erf}(\epsilon_i)] \}^{1/2} \\ \epsilon_c &= (E_c - E')/\Delta E \\ \epsilon_d &= (E_d - E')/\Delta E \\ \epsilon_i &= (E_i - E')/\Delta E \end{aligned} \quad (4.5)$$

となる。(4.5) 式において, E' , ΔE , E_d , L_{nd} の値が与えられるならば, 各種のバイアス光照射下における E_i に対応して, 少数キャリア拡散長 L_{ni} を求めることができる。

暗状態のフェルミ・レベル E_d は, 平衡状態におけるフェルミ・レベルに等しく, p 型シリコン基板のドーピング濃度から計算され, また, 明状態の擬フェルミ・レベルは,

$$E_i = kT \ln(N_c/n) \quad (4.6)$$

と表され, 少数キャリア濃度 n の値が定まれば計算することができる。 N_c は, 伝導帯の実効状態密度を表している。この少数キャリア濃度 n の値は, 光照射によって生成された過剰少数キャリアの拡散方程式を解くことによって求められるが, EFG リボン結晶の深さ方向の不均一性及び拡散長増大現象のために, 寿命 τ_n は深さ及び少数キャリア濃度 n の関数となり, 厳密な解を求めることは困難である。そこで, 著者は, 大胆に問題を単純化して少数キャリア濃度を求める。即ち, 少数キャリア寿命 τ_n は深さ方向に均一であると仮定した上で, 拡散長近傍の少数キャリアがもっとも拡散長の変化に敏感であることを考えて, 拡散長に等しい深さにおける少数キャリア濃度 n の値から擬フェルミ・レベル E_i を決めることにする。

すると, 定常状態における少数キャリアの拡散方程式は

$$D_n \frac{\partial^2 n(x)}{\partial x^2} + \alpha \Phi_0 e^{-\alpha x} - \frac{n(x)}{\tau_n} = 0 \quad (4.7)$$

と表され, 境界条件は第 1 次近似として

$$\begin{cases} n(x=x_d) \doteq 0 \\ n(x=\infty) = n_{p0} \doteq 0 \end{cases}$$

とすることができる。 x_d は、表面から空胞層の内端までの距離を表している。この方程式を解くと $n(x)$ が求まり

$$n(x) = \frac{\alpha \Phi_0}{D_n(\alpha^2 - \frac{1}{L_n^2})} \times \{e^{-[\alpha - (1/L_n)]x_d} e^{-x/L_n} - e^{-\alpha x}\} \quad (4.8)$$

となる。照射光量 Φ_0 とその時の拡散長 L_n が実験データから与えられるならば、(4.8) 式から n 値が求まり、(4.6) 式から E_{ti} が求まる。

次に、未知数 E' , ΔE , L_{nd} の値が与えられるならば (4.5) 式より拡散長 L_{ni} の値が求めることができる。そこで、ある波長のバイアス光の光量 Φ_0 を変えたときの拡散長 L_n の実験データと、理論計算から出された拡散長 L_{ni} の値が合致するように、未知数 E' , ΔE , L_{nd} の値を定めることにする。このようにして、 E' , ΔE , L_{nd} の値が定まれば、すべての照射光のもとにおける L_{ni} の値を一般的に求めることができる。

4.3.4 結晶欠陥による捕獲準位と少数キャリア拡散長

理論分析の有効性を裏づける意味で、顕著なバイアス波長効果を示すB点の実験データと理論計算値の対応をみた。まず波長 790nm のバイアス光のもとにおける拡散長の実験データに理論計算値が合致するように E' , ΔE , L_{nd} の値を決める。そして、これらの値を使用して波長 500nm, 650nm, 790nm, 950nm の照射光 (Φ_0) の下における L_{ni} の値を計算した。計算による L_{ni} のカーブは、図4.15(b)に実線で示されており、波長 500nm のバイアス光の場合を除いては実験データとよく一致し、理論モデルによる分析が有効であることを示している。波長 500nm のバイアス光の場合には、理論計算による L_{ni} カーブの方が実験データより少し大きい。この不一致は、光の浸透深さが小さいために、接合深さの精度が計算値にかなり影響を与えたことによって生じたものと思われる。

A点、C点の場合は、実験が容易である白色バイアス光下における拡散長の実験データに理論計算値が合致するように E' , ΔE , L_{nd} の値を定め、各種照射光下における L_{ni} の値を計算した。この結果は、図4.15(a)及び図4.15(c)に実線で描かれている。白色バイアス光下における拡散長増大の実験データと理論値は良く一致しているが、その他の波長の照射光の場合は良い一致を示さない。しかし、この場合においても、実験データと定性的には同じような傾向を示している。即ち、図4.15(a)においては、790nm 以下の波長のバイアス光の場合、また、図4.15(c)においては、650nm 以上の波長のバイアス光の場合、波長の違いによる効果は小さくなってきている。

バイアス光の浸透深さが拡散長に一致する時、例えば、B点の波長 950nm バイアス光照射のとき、拡散長の増大が非常に大きくなる。 $\Phi_0 = 1.47 \times 10^{15}$ ホトン/cm²sec の場合の L_{ni} , L_{ni}/L_{nd} をバイアス光波長の関数として図4.16に示した。 L_{ni}/L_{nd} のカーブは、拡散長の増大がB点で大きいことを、

特に、900nm～1,000nm において大きいことを示している。それ故に、太陽電池を評価する場合、標準太陽光と同じ波長分布とりわけ 900nm～1,000nm の間で同一の波長分布をもつ照射光のもとで、効率測定がなされることが望ましい。

少数キャリア拡散長のバイアス光依存性の測定結果と理論計算値の一致から求められた E' 、 ΔE 、 L_{nd} の値は表4.4に示されている。これらの数値は、A、B、C点の結晶欠陥による捕獲準位分布を表しており、エネルギー帯図で表現すると図4.17のようになる。結晶性の良いA点の場合は、ほぼ禁制帯の中央に捕獲準位をもち、これにより少数キャリア寿命、少数キャリア拡散長の大きさが決定される。結晶性の悪いB点、C点の捕獲準位は、図に示すように価電子帯より 0.36eV の位置に中心をもち、A点の場合を、はるかに越える捕獲準位密度をもっている。C点は、その捕獲準位密度が非常に高いため、ガウス分布している裾野の準位密度のみ、図に描かれている。

表4.4 図4.15の少数キャリア拡散長の計算に使用されたパラメータ値（A、B、C点の捕獲準位密度分布）。

	E' (eV)	ΔE (eV)	L_{nd} (μm)	N_0
position A	0.58	0.17	79.8	0.135
B	0.36	0.21	13.8	1
C	0.36	0.27	5.2	7.58

* N_0 は position B の値で規格化された値。

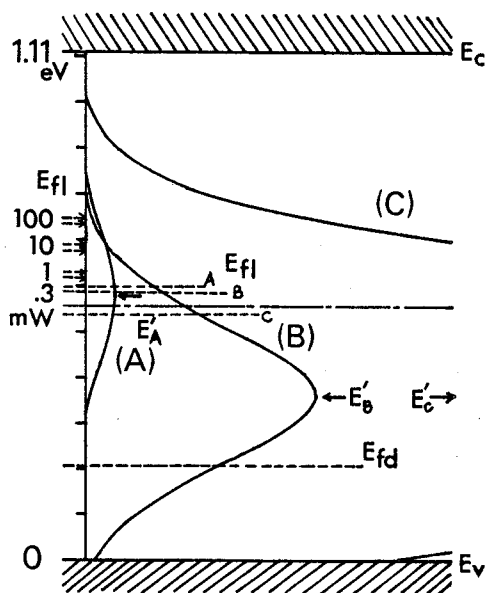


図4.17 A、B、C点の捕獲準位密度分布と電子の擬フェルミレベル。

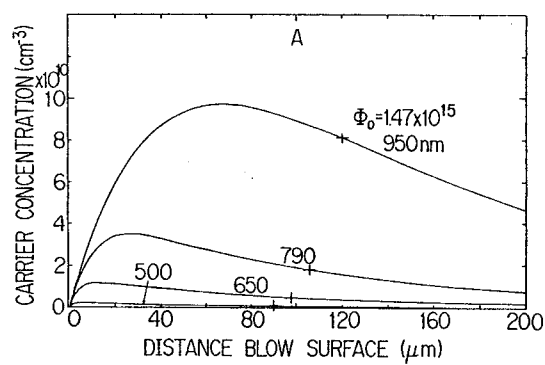
暗状態の擬フェルミレベル (E_{fd}) は、価電子帯の上端より 0.21eV のところに、そして光量 $\Phi_0 = 1.47 \times 10^{15}$ ホトン/cm²sec (0.3mW/cm²sec) の波長 950nm 光照射下における A, B, C 点の擬フェルミレベル (E_{fi}) は、それぞれ 0.601, 0.589, 0.537eV のところにあり、いずれも図4.17に破線で示した。また、光量 1, 10, 100mW/cm²sec の 950nm 光照射下の擬フェルミレベル (E_{fi}) は表4.5に示した。A 点は、捕獲準位密度が低く、その少数キャリア拡散長はかなり大きい、光生成キャリアにより準位が埋められるとき拡散長は次第に増大していく。B 点の場合は、図4.17に示されているように、10mW/cm²sec の光量になると A 点と同じような空状態の準位密度になり、それに伴って少数キャリア拡散長も急速に増大する。しかし、B 点は、A 点の補獲準位も含んでいるらしく、図4.15(b)の拡散長 L_{n1} の測定値は 1mW/cm²sec 以上の光量になると理論値ほど上昇しなくなる。C 点の場合は、捕獲準位密度が高く、光生成キャリアで埋まるには至らなく、拡散長はあまり大きくならない。

表4.5 各種の照射強度下における電子の擬フェルミレベル値。

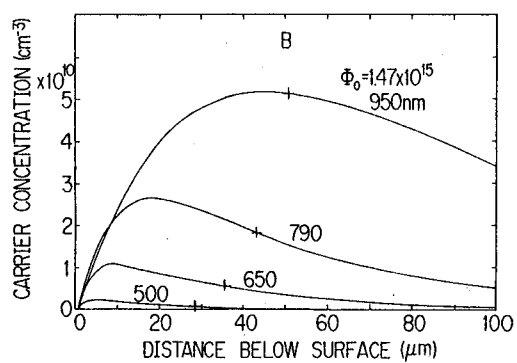
950nm illumination	0.3mW/cm ² sec		1mW/cm ² sec		10mW/cm ² sec		100mW/cm ² sec	
	$L_{n1}(\mu\text{m})$	$E_{fi}(\text{eV})$	$L_{n1}(\mu\text{m})$	$E_{fi}(\text{eV})$	$L_{n1}(\mu\text{m})$	$E_{fi}(\text{eV})$	$L_{n1}(\mu\text{m})$	$E_{fi}(\text{eV})$
Position A	120	0.601	137	0.632	195	0.691	286	0.751
B	51	0.589	66	0.620	120	0.679	173	0.739
C	11	0.537	12.8	0.545	17	0.615	30	0.695

4.3.5 バイアス光照射下における少数キャリア濃度分布

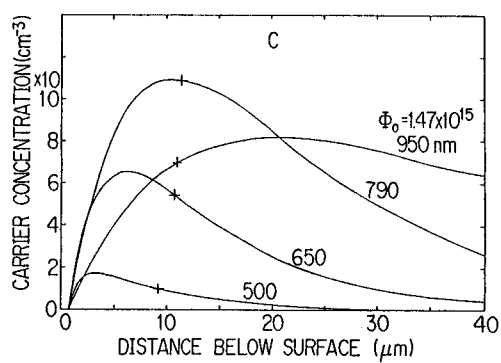
これまでの理論分析は、少数キャリア寿命 τ_n が深さ方向に均一で、拡散長に等しい深さにおける少数キャリア濃度 n の値から擬フェルミ・レベル E_{fi} が定まる、という仮定のもとになされた。そこで、この仮定の妥当性について考えるために、バイアス光照射下における少数キャリアの濃度分布を計算した。図4.18は、A, B, C 点における $\Phi_0 = 1.47 \times 10^{15}$ ホトン/cm²sec の場合の少数キャリア濃度分布を示している。 E_{fi} の計算のために使われた少数キャリア濃度の位置は十字印で示されている。図4.18(a), (b)の場合、少数キャリア濃度分布は、バイアス光波長の違いによる変化よりもかなりゆるやかであり、バイアス光波長の効果を論ずる時、理論計算上の仮定は有効であるといえる。これに反して、図4.18(c)の場合は、少数キャリア濃度分布が大きく変わり理論計算上の仮定を満足しなくなってくる。しかし、この場合においても、拡散長近傍においてみた場合、第1次近似としては仮定が成立し得るものと思う。



(a)



(b)



(c)

図4.18 A, B, C点における少数キャリア濃度分布
($\Phi_0 = 1.47 \times 10^{15} \text{ ホトン/cm}^2 \cdot \text{sec}$ の場合)

4.4 まとめ

本章では、結晶の不完全性（結晶粒界、結晶欠陥、不純物）が太陽電池のデバイス性能、デバイス物性に及ぼす効果を明らかにし、高効率化の可能性を検討した。まず、量産ラインを使用して製作した高効率キャストシリコン太陽電池の出力特性を調べ、結晶粒界などの欠陥による出力性能低下、その他の出力損失要因の点検を行い、高効率化の可能性を検討した。著者の開発した高分解能 MBIC 技術による電流出力分布地図に基づいて、いくつかの小面積セルを製作し、これらのセルの出力特性、分光感度特性、暗状態における電流・電圧特性の分析を行った。その結果、結晶粒界や結晶欠陥が空乏層領域における再結合飽和電流の増大、場合によっては、並列抵抗の低下をもたらし、太陽電池の開放電圧 V_{oc} 。そして FF を低下させることが明確になった。

次に、少数キャリア拡散長が照射光強度、照射光波長に従って増大し、太陽電池の出力性能を決定づける分光感度特性が改善される現象を見出し、そのメカニズムについて理論的検討を加えた。まず、光照射による少数キャリア拡散長増大現象は、少数キャリア寿命が深いトラップの空状態によってコントロールされるとする deep trap-filling model によって定量的に説明できることを示した。照射光強度及び波長依存性については、このトラップの状態が光照射下における拡散長に等しい深さの少数キャリア濃度によって支配される、と考えれば理解できることを見出した。そして、これらの理論的検討から、各種の結晶粒界及び結晶欠陥による捕獲準位分布を推定し、少数キャリア拡散長との関連を明らかにした。

参考文献

- 1) R. A. Sinton, Y. Kwark, J. Y. Gan and R. M. Swanson : IEEE Trans. Electron. Devices EDL-7 (1986) 567.
- 2) M. A. Green, Z. Jianhua, A. W. Blakers, M. Taouk and S. Narayanan : IEEE Trans. Electron. Devices EDL-7 (1986) 583.
- 3) M. B. Spitzer and C. J. Keavney : Proc. 18th Conf., IEEE Photovoltaic Specialists, Las Vegas, 1985, p.43.
- 4) This was announced by W. Challaighan (JPL) at the 26th Flat-Plate Solar Arrey Project Integration Meeting, Pasadena, April 29-30 and May 1, 1986.
- 5) S. M. Johnson and C. Winter : Proc. 17th Conf., IEEE Photovoltaic Specialists, Florida, 1984, p.1121.
- 6) S. Narayanan, S. R. Wenham and M. A. Green : Appl. Phys. Lett. 48 (1986) 873.
- 7) N. Takamori, M. Asai, A. Shibata, K. Nishida, A. Suzuki, K. Kaneko, T. Misawa, R.

- Shimokawa, Y. Hayashi, J. Shigeta and S. Ikeda : Jpn. J. Appl. Phys. **25** (1986) L958.
- 8) R. Shimokawa, K. Nishida, A. Suzuki and Y. Hayashi : to be published in Jpn. J. Appl. Phys.
- 下川, 西田, 鈴木, 林 : 電子技術総合研究所イ報第51巻 5, 6 号 (昭和62年) p. 389.
- 9) R. Shimokawa and Y. Hayashi : Jpn. J. Appl. Phys. **21** (1982) L558.
- 10) R. Shimokawa and Y. Hayashi : IEEE Trans. Electron Devices **ED-30** (1983) 1770.
- 11) R. Shimokawa and Y. Hayashi : J. Appl. Phys. **59** (1986) 2571.
- 12) J. Culik and K. Grimes : Proc. 17th Conf., IEEE Photovoltaic Specialists, Florida, 1984, p. 1137.
- 13) A. Neugroschel and J. A. Mazer : IEEE Trans. Electron. Devices **ED-29** (1982) 225.
- 14) E. Fabre, M. Mautref, and A. Mircea : Appl. Phys. Lett. **27** (1975) 239.
- 15) C. T. Ho, R. O. Bell and F. V. Wald : Appl. Phys. Lett. **31** (1977) 463.
- 16) C. T. Ho and J. D. Mathias : IEEE Trans. Electron Devices **ED-25** (1978) 1332.
- 17) A. Pogany : Proc. Fourteenth Photovoltaic Specialists Conference 1980 p. 410.
- 18) C. T. Ho and J. D. Mathias : Solid-State Electron. **24** (1981) 115.
- 19) C. V. Hari Rao, R. O. Bell, M. C. Cretella, J. C. Ho, F. V. Wald and K. V. Ravi : Proc. Thirteenth Photovoltaic Specialists Conference, 1978 p. 1213.
- 20) S. Matsubara, T. Warabisako, E. Kuroda, T. Saitoh, T. Tokuyama, Y. Enomoto, K. Kaneko and N. Hasegawa : Proc. Twelfth Conference on Solid State Devices (Japan Soc. of Appl. Phys., Tokyo, Japan), 1980 p. 297.
- 21) E. D. Stokes and T. L. Chu : Appl. Phys. Lett. **30** (1977) 425.
- 22) R. O. Bell and G. M. Freedman : Proc. Thirteenth Photovoltaic Specialists Conference, 1978 p. 89.
- 23) W. E. Phillips : Solid-State Electron. **15** (1972) 1097.
- 24) H. R. Philipp and E. A. Taft : Phys. Rev. **120** (1960) 37.

第5章 入射スペクトルによる太陽電池出力の変化

——大気パラメータの効果——

5.1 まえがき

デバイス性能が向上し、太陽電池の効率が高くなるに従い、競合する材料の太陽電池出力や理論出力との比較が問題とされ、客観的な標準出力測定法が必要となってくる。特に、出力電流は太陽電池の光応答特性（分光感度）が波長依存性をもつために、光源の分光放射照度分布によって大きく影響をうける。用途が大気圏外（エアマス0）に限られているのであれば一義的に分光放射照度は定まるが、地上用太陽電池の場合には、自然太陽光の分光放射照度は大気の状態、場所、時間によって大きく変化する。人工太陽光の分光放射照度も、太陽光近似度が悪い上に、光源、フィルタ、その他の光学系の調整、及びエージングによって変化する。そのため、安定な再現性のある地上用標準太陽光源というものは存在しない。もし、波長に対して非選択性のサーモパイルや日射計等の熱的受光器を使用して放射照度の測定がなされるならば、太陽電池出力測定値のバラツキ誤差は大きなものとなる。従って、自然太陽光の下で太陽電池出力の測定を行う場合には、大気条件の変化に対して比較的安定な出力測定が可能な測定条件（大気パラメータ）の範囲を見出し、その範囲内において太陽電池セル・モジュールの出力測定がなされねばならない。また、人工太陽光下で測定がなされる場合は、入射スペクトルの測定を行い、標準の太陽光スペクトル下における出力に修正計算されねばならない。

一方、太陽電池を利用する発電システムを設計する立場からは、①太陽電池モジュールの各種の設置状態（傾斜角度、方位、太陽光追尾等）における、そして②各種の大気条件（大気パラメータ）、太陽高度における、太陽電池出力の予測が不可欠である。場合によっては、設置場所の特殊事情（大気パラメータの偏り、周辺部からの反射等）を考慮することも必要となってくる。

以上、いずれの立場から、各種の大気条件（大気パラメータ）における太陽光をシミュレートした日射モデルと、その下における太陽電池出力の理論計算が必要とされる。本章では、自然太陽光（直達日射・全天日射）の理論的分析に基づいて、各種の大気条件における太陽光の分光放射照度分布のモデル^{1),2)}計算を行い、大気条件（大気パラメータ）変化に伴う太陽電池出力の変化の様子^{2~5)}を明らかにする。まず、5.2節では、各種の直達日射下における結晶シリコン太陽電池とアモルファスシリコン太陽電池の出力の計算を行い、大気パラメータの効果^{2),3)}を明らかにする。続いて、5.3節では、各種の分光放射照度特性をもつ人工太陽（ソーラシミュレータ）下における結晶シリコン太陽電池とアモルファスシリコン太陽電池の出力を計算し、5.2節の自然太陽光下における出力と

の比較を行う^{2),3)}。5.4節では、著者の見出した分光感度の入射角度依存性を考慮して、全天日射下において同様の計算を行い、大気パラメータの効果を明らかにする^{4),5)}。

5.2 直達日射下におけるセル出力特性

5.2.1 直達日射スペクトル分布

地上に到達する太陽直射光は、地球を取巻く大気の状態によって大きく影響される。大気の状態は太陽高度によって定まり、太陽が天頂位置にあるときの大気の状態を単位にとり、これをエアマス (airmass) 1としている。太陽高度 h が 30° (天頂角 θ は 60°) のときのエアマスは2で、エアマス1から2までの間はエアマス (m) は $m = \text{cosec } h = \sec \theta$ で表される。エアマスが2を越えると光の屈折率を考慮しなければならない。

大気の状態による太陽直射光の減衰の様子は、雲のない快晴又は、これに近い状態について考えると図2.3のようになり、①大気中の空気分子による散乱(Rayleigh 散乱)、②大気中に浮遊するエーロゾル (浮遊微粒子) による散乱 (Mie 散乱)、③大気中のオゾン (O_3) 酸素 (O_2) 水蒸気 (H_2O) 炭酸ガス (CO_2) などの分子による吸収、に基づくものに分けて考えられる。地上における太陽直射光による分光放射照度を E_λ^m (m =エアマス) とするならば、大気における減衰は次式によって表される⁶⁾。

$$E_\lambda^m = E_\lambda^0 e^{-(\tau_R + \tau_a + \tau_{ma}) \cdot m} \quad (5.1)$$

E_λ^0 : 大気外 (エアマス 0) の分光放射照度

τ_R : Rayleigh 散乱による減衰係数 (①)

τ_a : エーロゾル散乱による減衰係数 (②)

τ_{ma} : オゾンその他の分子吸収による減衰係数 (③)

- ① 空気分子粒径が約100 Å以下による散乱の減衰係数は、波長の4乗に逆比例し

$$\tau_R = 0.00838 \cdot \lambda^{-(3.916 + 0.074\lambda + 0.050/\lambda)} \quad (5.2)$$

という式で表すことができ、計算によって正確に把握することができる。

- ② エーロゾル (粒径が約0.1~2 μm) による散乱は、粒子の粒径分布、その他によって変化するので計算によって把握することは難しく、Angstromの実験式が近似的に用いられている。

$$\tau_a = \beta \lambda^{-\alpha} \quad (5.3)$$

ここで、 β は、混濁係数とよばれ、サンフォトメータ (混濁度計) を用いて測定される。波長依存性を示す α は通常1.3~1.5の値が用いられている。実際、大気状態により、 β は0.01~0.3と大きく変化し、エーロゾルが太陽放射を変化させるもっとも大きな要因となっている。

③ 大気中の分子による吸収については、図2.3に示すような固有の波長域に吸収がみられる。オゾンによる太陽放射の吸収係数は Inn⁷⁾の値を採用し、酸素分子による吸収は Adiks⁸⁾の値、水蒸気による吸収は 1,000nm 以下の波長においては Koepke⁹⁾の値、1,000nm 以上の波長においては Gates¹⁰⁾の値を採用した。大気中の水蒸気量は降水量にして 2mm から 30mm (雨上りの快晴時) と大きく変化するので、これが太陽放射の地域差を生ぜしめる大きな要因となる。水蒸気の吸収帯にあたる 825nm, 938nm の2波長で透過率を測定することによって、あるいは、気象用のゾンデによる降水量測定によって、水蒸気量が評価されている。

以上、述べてきたことから、太陽直射光は主にエアマス(m)、混濁係数(β)、降水量(W)によって大きく変動することがわかる。日本の暫定標準太陽光¹¹⁾の大気パラメータ($m=1.5$, 波長 $1\mu\text{m}$ における $\beta=0.07$, $W=10\text{mm}$)を中心に、大気条件 (大気パラメータ m , β , W) を変えて計算した太陽直射光の分光放射照度分布を図5.1に示す²⁾。

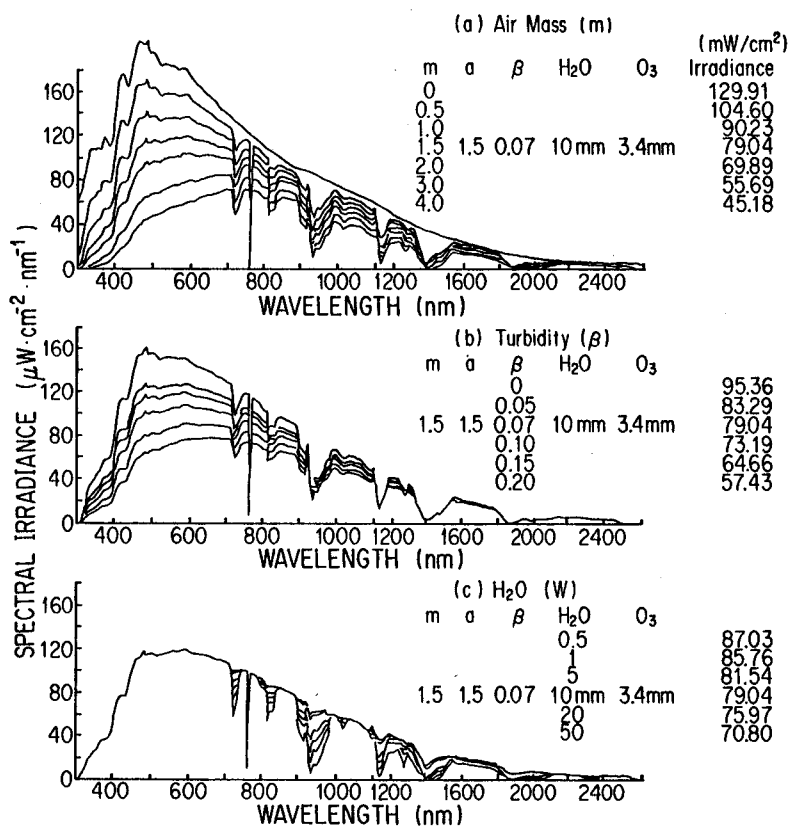


図5.1 太陽直達日射の放射照度分布 ($\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$)

5.2.2 結晶シリコン太陽電池のセル出力特性

太陽電池の単位面積当たりの出力電流（短絡電流） J は、太陽電池の分光感度 $R(\lambda)$ と照射光の分光放射照度 $E(\lambda)$ の積を全波長にわたって積分した形

$$J = \int E(\lambda) \cdot R(\lambda) d\lambda \quad (5.4)$$

で表され、この式に従って出力電流の計算がなされる。また、calibration value(CV)、すなわち、太陽光の放射照度が $100\text{mW}/\text{cm}^2$ である時の単位面積当たりの出力電流値は、次式によって計算される。

$$\text{calibration value}(CV) = \frac{\int E(\lambda) \cdot R(\lambda) d\lambda}{\int E(\lambda) d\lambda} \times 100 \quad (\text{mA}/\text{cm}^2) \quad (5.5)$$

従って、各種の大気条件における太陽光の分光放射照度 $E(\lambda)$ と太陽電池の分光感度 $R(\lambda)$ が与えられるならば、(5.4) 式と (5.5) 式から各々の大気条件下における出力電流と CV が計算され、太陽電池出力性能に及ぼす大気パラメータの効果がわかる。

5.2.2.1 分光感度モデル

出力計算に使用された各種のシリコン太陽電池の分光感度特性を図5.2に示す。シリコン太陽電池の長波長感度域における光電流は近似的に

$$J = q \frac{E}{hc} \lambda \cdot \frac{L}{\frac{1}{\alpha(\lambda)} + L} \quad (5.6)$$

E : 入射光エネルギー
 λ : 波長
 $\alpha(\lambda)$: 吸収係数
 L : 少数キャリア拡散長

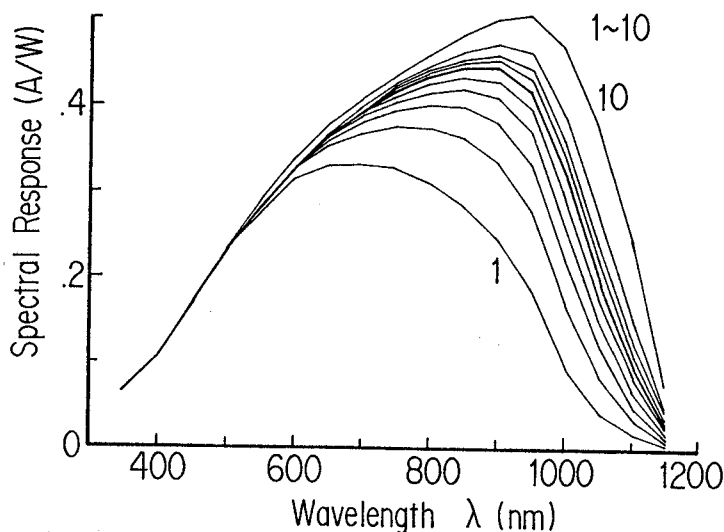


図5.2 少数キャリア拡散長の異なったシリコン太陽電池の分光感度モデル (cell1-10: $L=20-400\mu\text{m}$)。

表5.1 各種太陽直達日射下における c-Si 太陽電池の出力電流計算値 (mA/cm²)。ソーラーシミュレータの場合は 350nm~1100nm の範囲で日本の暫定標準太陽光の積分放射照度 (78.06mW/cm²) と等しくなるように設定した。

Sunlight	Cell	CELL-1 (L=20μm)	CELL-2 (L=40μm)	CELL-3 (L=60μm)	CELL-4 (L=80μm)	CELL-5 (L=100μm)	CELL-6 (L=120μm)	CELL-7 (L=140μm)	CELL-8 (L=160μm)	CELL-9 (L=200μm)	CELL-10 (L=400μm)
m=1.5, β=.07, W=.5		15.7170	17.9369	19.0244	19.7228	20.2174	20.5983	20.9115	21.1617	21.5823	22.7806
	1	15.6776	17.8800	18.9566	19.6475	20.1368	20.5152	20.8232	21.0708	21.4873	22.6755
	5	15.3846	17.4838	18.5023	19.1550	19.6175	19.9823	20.2672	20.5023	20.8992	22.0417
	20	14.9776	16.9329	17.8700	18.4691	18.8939	19.2382	19.4916	19.7089	20.0780	21.1545
	50	14.4192	16.1886	17.0256	17.5608	17.9410	18.2559	18.4783	18.6749	19.0128	20.0149
	m=1.5, W=10, β=0	18.7437	21.0964	22.2163	22.9302	23.4339	23.8339	24.1397	24.3948	24.8285	26.0951
	.05	16.1377	18.2589	19.2785	19.9304	20.3919	20.7599	21.0400	21.2748	21.6726	22.8273
	.1	13.9332	15.8472	16.7760	17.3716	17.7947	18.1331	18.3899	18.6061	18.9713	20.0252
	.15	12.0577	13.7857	14.6320	15.1763	15.5642	15.8756	16.1111	16.3101	16.6456	17.6086
	.20	10.4618	12.0230	12.7944	13.2919	13.6477	13.9343	14.1503	14.3336	14.6418	15.5225
β=.07, W=10, m=0		22.5308	25.3474	26.7087	27.5824	28.1992	28.6717	29.0654	29.3773	29.9046	31.4332
	.5	19.4511	21.8953	23.0701	23.8229	24.3554	24.7740	25.1040	25.3747	25.8338	27.1724
	1.0	17.1460	19.3674	20.4366	21.1215	21.6066	21.9913	22.2883	22.5352	22.9538	24.1706
	1.5	15.2124	17.2480	18.2303	18.8590	19.3047	19.6606	19.9311	20.1583	20.6363	21.7546
	2.0	13.5538	15.4256	16.3311	16.9105	17.3217	17.6516	17.8994	18.1091	18.4634	19.4851
	3.0	10.9026	12.5098	13.2936	13.7952	14.1521	14.4401	14.6532	14.8353	15.1417	16.0158
	4.0	8.8499	10.2235	10.8960	11.3255	11.6314	11.8799	12.0603	12.2163	12.4780	13.2182
	Simulator I	17.9364	20.1985	21.3354	22.0860	—	23.0452	—	—	24.1617	25.5597
	Simulator II	18.6974	21.1805	22.4274	23.2487	23.8388	24.3005	24.6869	24.9954	25.5243	27.0539
	Simulator III	19.8572	22.2303	23.3080	23.9754	—	24.7851	—	—	25.6633	26.7741
	Simulator IV	18.1713	21.3504	22.9874	24.0430	—	25.3355	—	—	26.7908	28.3788

表5.2 各種太陽直達日射 (100mW/cm²) 下における c-Si 太陽電池の出力電流計算値 (mA/cm²)。ソーラシミュレータの場合は 350nm~1100nm の範囲で日本の暫定標準太陽光の積分放射照度 (78.06mW/cm²) と等しくなるように設定した。

Sunlight	Cell	CELL-1 (L=20μm)	CELL-2 (L=40μm)	CELL-3 (L=60μm)	CELL-4 (L=80μm)	CELL-5 (L=100μm)	CELL-6 (L=120μm)	CELL-7 (L=140μm)	CELL-8 (L=160μm)	CELL-9 (L=200μm)	CELL-10 (L=400μm)
m=1.5, β=.07, W=.5	.5	18.0593	20.610	21.8596	22.6621	23.2304	23.668	24.0279	24.3154	24.7987	26.1756
	1	18.2808	20.8489	22.1043	22.9099	23.4804	23.9217	24.2808	24.5695	25.0551	26.4407
	5	18.8675	21.442	22.6911	23.4915	24.0588	24.5061	24.8555	25.1438	25.6306	27.0318
	20	19.7151	22.2889	23.5224	24.311	24.8702	25.3234	25.657	25.943	26.4288	27.8459
	50	20.3661	22.8653	24.0474	24.8034	25.3404	25.7851	26.0993	26.377	26.8543	28.2697
m=1.5, W=10, β=.05	0	19.6557	22.1229	23.2973	24.0459	24.5741	24.9936	25.3143	25.5818	26.0366	27.3648
	.05	19.3753	21.9221	23.1462	23.9289	24.483	24.9248	25.2611	25.543	26.0207	27.407
	.1	19.037	21.6522	22.9212	23.735	24.313	24.7754	25.1263	25.4216	25.9206	27.3606
	.15	18.6478	21.3203	22.6292	23.4709	24.0709	24.5525	24.9167	25.2244	25.7432	27.2326
	.20	18.2166	20.935	22.2782	23.1446	23.7641	24.2631	24.6392	24.9583	25.495	27.0285
β=.07, W=10, m=.5	0	17.3434	19.5115	20.5594	21.2319	21.7067	22.0704	22.3735	22.6136	23.0195	24.1961
	.5	18.5957	20.9324	22.0555	22.7752	23.2843	23.6845	24.000	24.2588	24.6977	25.9774
	1.0	19.0026	21.4645	22.6495	23.4085	23.9461	24.3725	24.7016	24.9753	25.4392	26.7878
	1.5	19.2464	21.8219	23.0646	23.8601	24.424	24.8742	25.2165	25.5039	25.9903	27.3987
	2.0	19.3931	22.0712	23.3668	24.1959	24.7842	25.2562	25.6108	25.9108	26.4178	27.8796
	3.0	19.5773	22.4632	23.8708	24.7715	25.4123	25.9295	26.3121	26.639	27.1893	28.7589
	4.0	19.5881	22.6283	24.1168	25.0676	25.7446	26.2946	26.694	27.0392	27.6184	29.2568
Simulator I		17.9364	20.1985	21.3354	22.0860	—	23.0452	—	—	24.1617	25.5597
Simulator II		18.6974	21.1805	22.4274	23.2487	23.8388	24.3005	24.6869	24.9954	25.5243	27.0539
Simulator III		19.8572	22.2303	23.3080	23.9754	—	24.7851	—	—	25.6633	26.7741
Simulator IV		18.1713	21.3504	22.9874	24.0430	—	25.3355	—	—	26.7908	28.3788

と表すことができる¹²⁾ところから、市販されている典型的な地上用 n/p シリコン太陽電池の分光感度測定データ (cell 6, $L=120\mu\text{m}$) を基礎に、その少数キャリア拡散長の異なった各種のシリコン太陽電池の分光感度を計算により導出したものである¹³⁾。cell 1—10 は、少数キャリア拡散長 $L=20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 200, 400\mu\text{m}$ の太陽電池に対応している。拡散長の小さな ($L=20\sim 80\mu\text{m}$) ものは、新しく開発された多結晶シリコン太陽電池を想定したもので、拡散長の大きな ($L=200\sim 400\mu\text{m}$) ものは BSF (back surface field) 処理を施されたものを想定している。

5.2.2.2 セル出力特性

先に述べた太陽直射光の分光放射照度 (図5.1) と結晶シリコン太陽電池の分光感度モデル (図5.2) を用いて、計算式 (5.4) と (5.5) から出力電流と calibration value (CV) を求めた。計算に使用した直達日射は、日本の AM1.5 標準太陽光 (エアマス $m=1.5$, 波長 $1\mu\text{m}$ における混濁度 $\beta=0.07$, 降水量 $W=10\text{mm}$) を中心にして、大気パラメータ m , β , W の値をそれぞれ変化させることによって得られたものである。

各種の大気条件下における単位面積当たりのセル出力電流値を表5.1に、そして、大気パラメータ m , β , W に依存する様子を図5.3に示した。また、太陽直射光の放射照度が $100\text{mW}/\text{cm}^2$ (300nm $\sim$ 2,600nm の範囲) である場合の単位面積当たりの太陽電池の出力電流計算値 (CV) を表5.2に、そして屋外におけるシリコン太陽電池の出力 (CV) が大気パラメータ m , β , W に依存する様子を図5.4に示した。図5.5は、暫定標準太陽光下における太陽電池の出力電流を“1”として、各々の太陽直射光下における出力電流値を規格化したものである。エアマス (m) の変化に対しては、少数キャリア拡散長 L の大きな太陽電池ほど大きな変化を示すが、混濁度 (β) や降水量 (W) の変化に対しては、逆に、 L の小さな太陽電池ほど大きな変化を示している。測定がなされる快晴時における大気条件として、 $m=1\sim 3$, $\beta=0.02\sim 0.20$, $W=2\sim 30\text{mm}$ の範囲を考えた場合、出力電流値は10%を越す変動幅をもつことがわかる。

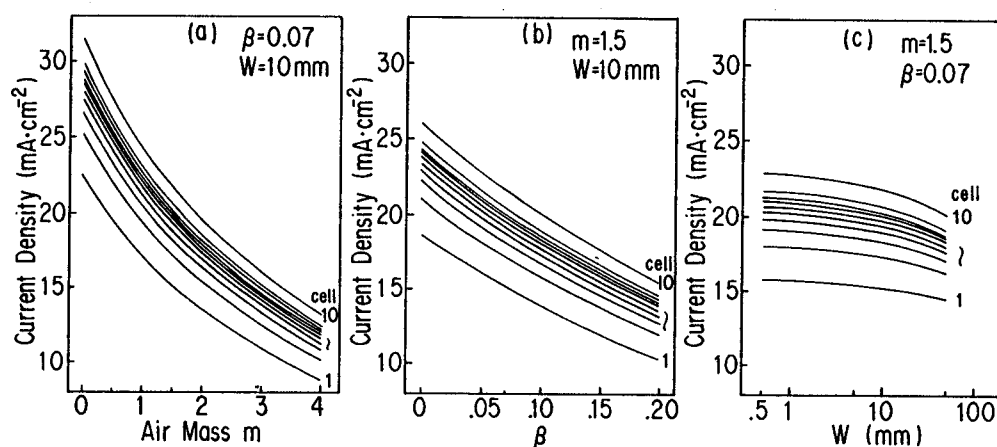


図5.3 シリコン太陽電池出力電流特性の大気パラメータ依存性。

(a)エアマス (m) 依存性, (b)混濁度 (β) 依存性, (c)降水量 (W) 依存性。

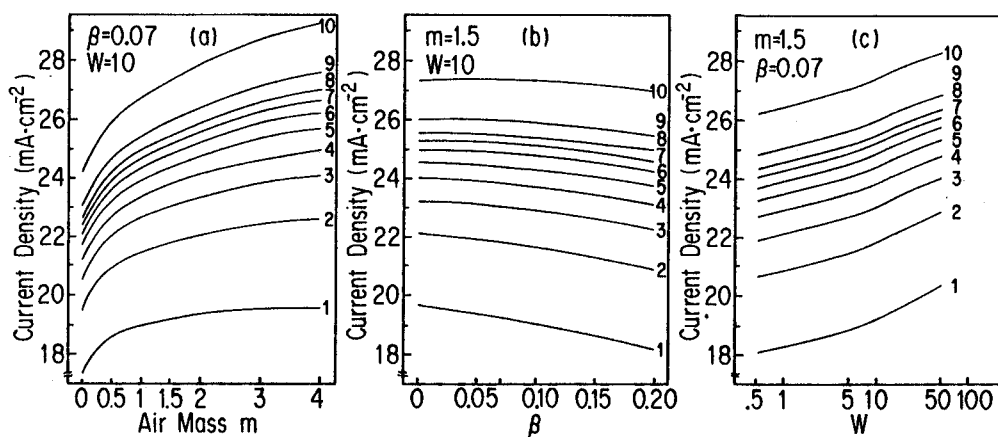


図5.4 シリコン太陽電池出力電流特性(放射照度 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ 下)の大気パラメータ依存性。

(a)エアマス (m) 依存性, (b)混濁度 (β) 依存性, (c)下降水量 (W) 依存性。

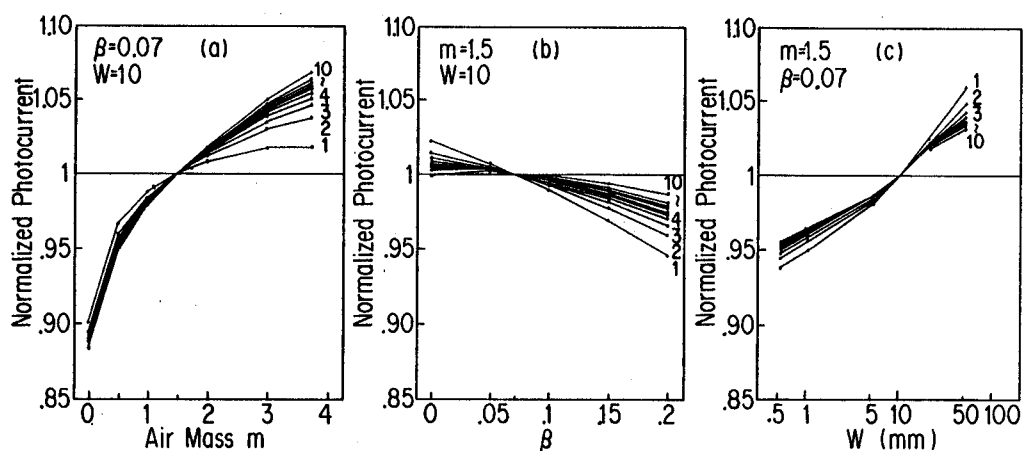


図5.5 標準太陽光下における出力電流を“1”として規格化された出力電流。

(a)エアマス (m) 依存性, (b)混濁度 (β) 依存性, (c)下降水量 (W) 依存性。

5.2.3 アモルファスシリコン太陽電池のセル出力特性

5.2.3.1 分光感度モデル

p-i-n アモルファス (a-Si) 太陽電池の測定値をベースにして、各種の単一接合の a-Si 太陽電池を実効的に表現する分光感度モデルを製作し、図5.6に示した³⁾。これらの分光感度の基本式は次式で表され、p層は全く光電流に寄与しないデッド層で、i層においてのみ光電流を収集できるものとした。

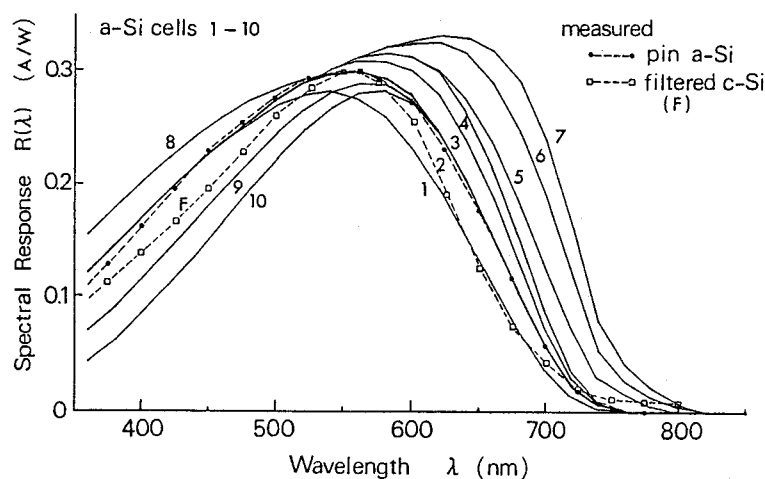


図5.6 p-i-n a-Si 太陽電池の分光感度理論モデル。

$$R(\lambda) = A_0 \exp(-\alpha_p W_p) \{1 - \exp(-\alpha_i W_i)\} \quad (5.7)$$

A_0 は、理論計算値と実測値のフィッティングから求められる定数で、 W_p , W_i は p 層, i 層の膜厚, α_p , α_i は p 層, i 層の吸収係数である。ここで、吸収係数 α_p , α_i は、代表的な a-Si のバンドギャップ値を使用して次式で表した。

$$(\alpha_p h\nu)^{1/2} = 950(h\nu - E_g) \quad (5.8)$$

$$(\alpha_i h\nu)^{1/2} = 850(h\nu - E_g) \quad (5.9)$$

$h\nu$ は光子エネルギー, E_g は p 層, i 層のバンドギャップ値で、p 層の場合は 1.9eV, i 層の場合は 1.65eV (セル⑤—⑦の場合は 1.60eV) である。但し、i 層のバンド端では、テイル準位を考慮して近似的に次式を使用した。

$$\begin{aligned} (\alpha_i h\nu)^{1/2} &= 180(h\nu - E_g) && (\text{セル①—④, セル⑧—⑩}) \\ &= 350(h\nu - E_g) && (\text{セル⑤—⑦}) \end{aligned} \quad (5.10)$$

但し, $E_g = 1.50\text{eV}$ (セル⑤—⑦の場合は 1.55eV)

次に、代表的な、透明電極(TC)/p-i-n/Al a-Si 太陽電池の分光感度測定値と、 $W_p = 160\text{\AA}$, $W_i = 0.3\mu\text{m}$ のときの理論カーブ②が良い一致を示すので、この両者のフィッティングから A_0 の値を求めた。そして、このカーブ②の分光感度をもつセル②を中心として、p 層の厚さ W_p , i 層の厚さ W_i を変化させることによって、図に示されるような種々の分光感度特性をもつ太陽電池を得た。カーブ①—⑦は、 $W_p = 160\text{\AA}$ で $W_i = 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ (以上 $E_g = 1.65$) $0.4, 0.65, 1.0\mu\text{m}$ (以上 $E_g =$

1.60) のセルに対応している。また、カーブ⑧—⑩は、 $W_i=0.3\mu\text{m}$ で $W_p=120, 250, 320\text{\AA}$ のセルに対応している。カーブ F は、保谷 C-500 グリーンフィルタを窓材とした単結晶シリコン太陽電池で、いわゆる擬似 a-Si 太陽電池と呼ばれるセルの分光感度測定値である。a-Si 太陽電池の短波長感度は p 層の厚さによって決定され、長波長感度は i 層の厚さによって決定される。過剰キャリアの易動度と寿命の積で表される a-Si 太陽電池性能のパラツキは、実効的に i 層の膜厚を変えることによって得られたセル①—⑦で代表できる。また、セル②を中心に考えるとき、後程第 8 章で検討される、バイアス光及びバイアス電圧による分光感度のシフトは、実効的にセル⑧とセル①によって表すことができる。また、a-Si の劣化についてはセル⑨⑩で代表できる。

5.2.3.2 セル出力特性

結晶シリコン太陽電池の場合と全く同様に、5.2.2 項の (5.4) 式と (5.5) 式からセル出力電流 J と calibration value CV の計算を行った。 $E(\lambda)$ としては、5.2 節において理論計算により求められた、各種の大気条件下における直達日射の分光放射照度モデルを使用し、 $R(\lambda)$ としては、先に述べたアモルファスシリコン太陽電池の分光感度モデルのセル①—⑩とセル F を使用した。

各種の大気条件下における単位面積当たりのセル出力電流値を表 5.3 に、そして大気パラメータ m , β , W に依存する様子を図 5.7 に示した。また、放射照度 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ 下におけるセル出力電流 (CV) の計算結果を表 5.4 に、そして、屋外における出力電流 (CV) が大気パラメータ m , β , W に依存する様子を図 5.8 に示した。図 5.9 は、標準太陽光のもとにおける a-Si セル①—⑩の出力電流 (CV) で、p 層あるいは i 層の膜厚に対してプロットされている。当然、p 層の膜厚が大きくなるに従って出力電流 (CV) は減少し、i 層の膜厚が大きくなるに従って出力電流 (CV) は上昇する。図 5.10 は、標準太陽光下における a-Si 太陽電池の出力電流を“1”として、各々の太陽直射光下における出力電流値を規格化したものである。a-Si 太陽電池の出力電流 (CV) 特性は、 $m=0$ の場合を除くならば、エアマス m そして混濁度 β が増大するに従って減少する。これは、短波長域における光が散乱されて減少するためである。一方、降水量 W が増大すると、a-Si 太陽電池の感度波長域をこえる赤外領域における吸収が増大し、結果として、出力電流 (CV) が増大する。セル⑧⑨⑩は、それぞれ①④⑤と類似の相対分光感度特性をもつために、規格化されたグラフにおいては、ほぼ同じ傾向をもっている。結晶シリコン太陽電池の場合と比較するとき、a-Si 太陽電池の場合は、出力電流 (CV) が大気条件に非常に敏感であるため測定が難しく、又、大気条件を無視するならば 10% を越す測定誤差が生じうることがわかる。

表5.3 各種太陽直達日射下における a-Si 太陽電池の出力電流計算値 (mA/cm²)。ソーラシミュレータの場合は 350nm~1100nm の範囲で日本の暫定標準太陽光の積分放射照度 (78.06mW/cm²) と等しくなるように設定した。

	CELL-1	CELL-2	CELL-3	CELL-4	CELL-5	CELL-6	CELL-7	CELL-8	CELL-9	CELL-10	CELL-F
m=1.5, $\beta=0.7$, W= 5	7.2746	8.0364	8.5266	8.8453	9.1995	9.9487	10.4678	8.3937	7.3578	6.8503	7.0670
1	7.2741	8.0355	8.5255	8.8438	9.1967	9.9445	10.4620	8.3928	7.3570	6.8494	7.0661
5	7.2717	8.0321	8.5210	8.8384	9.1854	9.9265	10.4370	8.3893	7.3535	6.8460	7.0620
20	7.2685	8.0272	8.5145	8.8302	9.1675	9.9000	10.3999	8.3844	7.3486	6.8410	7.0565
50	7.2654	8.0223	8.5080	8.8221	9.1495	9.8723	10.3610	8.3796	7.3437	6.8361	7.0509
m=1.5, W=10, $\beta= 0$	9.6256	10.5712	11.1728	11.5603	11.9714	12.8632	13.4706	11.1392	9.6124	8.9105	9.2982
.05	7.8737	8.6823	9.2005	9.5360	9.8971	10.6761	11.2094	9.0772	7.9336	7.3771	7.6345
.1	6.4552	7.1472	7.5938	7.8843	8.2016	8.8822	9.3506	7.4548	6.5609	6.1190	6.2819
.15	5.3016	5.8940	6.2788	6.5303	6.8090	7.4036	7.8148	6.1341	5.4347	5.0824	5.1772
.20	4.3639	4.8712	5.2030	5.4208	5.6655	6.1852	6.5464	5.0591	4.5102	4.2289	4.2755
$\beta=.07$, W=10, m= 0	12.2059	13.2767	13.9515	14.3842	14.8465	15.8467	16.5299	14.0326	11.8767	10.9020	11.6536
.5	10.2814	11.2457	11.8555	12.2468	12.6597	13.5570	14.1670	11.8292	10.1547	9.3732	9.8848
1.0	8.6274	9.4830	10.0284	10.3802	10.7560	11.5688	12.1237	9.9380	8.6253	7.9973	8.3377
1.5	7.2707	8.0313	8.5188	8.8355	9.1784	9.9164	10.4227	8.3877	7.3519	6.8443	7.0602
2.0	6.1506	6.8257	7.2630	7.5483	7.8614	8.5324	8.9950	7.1080	6.2856	5.8732	5.9988
3.0	4.4453	4.9793	5.3307	5.5624	5.8244	6.3804	6.7677	5.1585	4.6319	4.3559	4.3691
4.0	3.2505	3.6739	3.9568	4.1454	4.3650	4.8268	5.1518	3.7901	3.4464	3.2586	3.2157
Simulator I	10.0874	11.0061	11.5902	11.9680	12.3843	13.2477	13.8453	11.6305	9.8553	9.0544	9.6431
Simulator III	9.6987	10.7032	11.3607	11.1795	12.2983	13.3424	14.0773	11.2026	9.7524	9.0546	9.3579
Simulator IV	7.7622	8.4595	8.9035	9.1912	9.5126	10.1937	10.6670	8.9457	7.5633	6.9424	7.4128

表5.4 各種太陽直達日射 (100mW/cm²) 下における a-Si 太陽電池の出力電流計算値 (mA/cm²). ソーラシミュレータの場合は 350nm~1100nm の範囲で日本の暫定標準太陽光の積分放射照度 (78.06mW/cm²) と等しくなるように設定した。

	CELL-1	CELL-2	CELL-3	CELL-4	CELL-5	CELL-6	CELL-7	CELL-8	CELL-9	CELL-10	CELL-F
m=1.5, $\beta=0.7$, W=5	8.3587	9.2340	9.7973	10.1635	10.5705	11.4313	12.0278	9.6445	8.4543	7.8711	8.1201
	8.4818	9.3698	9.9410	10.3123	10.7238	11.5957	12.1992	9.7863	8.5785	7.9867	8.2393
	8.9179	9.8505	10.4501	10.8393	11.2649	12.1738	12.7998	10.2886	9.0183	8.3958	8.6608
	9.5675	10.5663	11.2077	11.6233	12.0673	13.0315	13.6895	11.0365	9.6730	9.0049	9.2886
	10.2618	11.3310	12.0169	12.4606	12.9230	13.9439	14.6342	11.8356	10.3725	9.6555	9.9588
m=1.5, W=10, $\beta=$	10.0943	11.0856	11.7164	12.1228	12.5539	13.4891	14.1260	11.6812	10.0801	9.3440	9.7506
	9.4533	10.4242	11.0464	11.4491	11.8827	12.8180	13.4583	10.8983	9.5252	8.8570	9.1661
	8.8197	9.7653	10.3755	10.7724	11.2059	12.1358	12.7758	10.1856	8.9641	8.3604	8.5829
	8.1992	9.1153	9.7105	10.0995	10.5304	11.4500	12.0860	9.4866	8.4049	7.8601	8.0067
	7.5985	8.4819	9.0596	9.4389	9.8650	10.7699	11.3989	8.8091	7.8534	7.3636	7.4446
$\beta=.07$, W=10, m=	9.3956	10.2199	10.7393	11.0724	11.4282	12.1982	12.7241	10.8018	9.1423	8.3916	8.9705
	9.8292	10.7511	11.3341	11.7082	12.1030	12.9608	13.5440	11.3090	9.7081	8.9610	9.4501
	9.5616	10.5098	11.1143	11.5042	11.9207	12.8215	13.4364	11.0141	9.5592	8.8632	9.2405
	9.1987	10.1600	10.7778	11.1785	11.6123	12.5460	13.1866	10.6120	9.3014	8.6593	8.9324
	8.8004	9.7663	10.3921	10.8002	11.2483	12.2083	12.8702	10.1703	8.9936	8.4035	8.5831
3.0	7.9821	8.9410	9.5720	9.9881	10.4586	11.4570	12.1524	9.2628	8.3173	7.8216	7.8454
4.0	7.1945	8.1317	8.7579	9.1753	9.6613	10.6835	11.4028	8.3888	7.6281	7.2125	7.1175
Simulator I	10.0874	11.0061	11.5902	11.9680	12.3843	13.2477	13.8453	11.6305	9.8553	9.0544	9.6431
Simulator III	9.6986	10.7032	11.3607	11.7952	12.2983	13.3424	14.0773	11.2026	9.7524	9.0546	9.3578
Simulator IV	7.7621	8.4595	8.9034	9.1912	9.5126	10.1937	10.6670	8.9457	7.5633	6.9424	7.4128

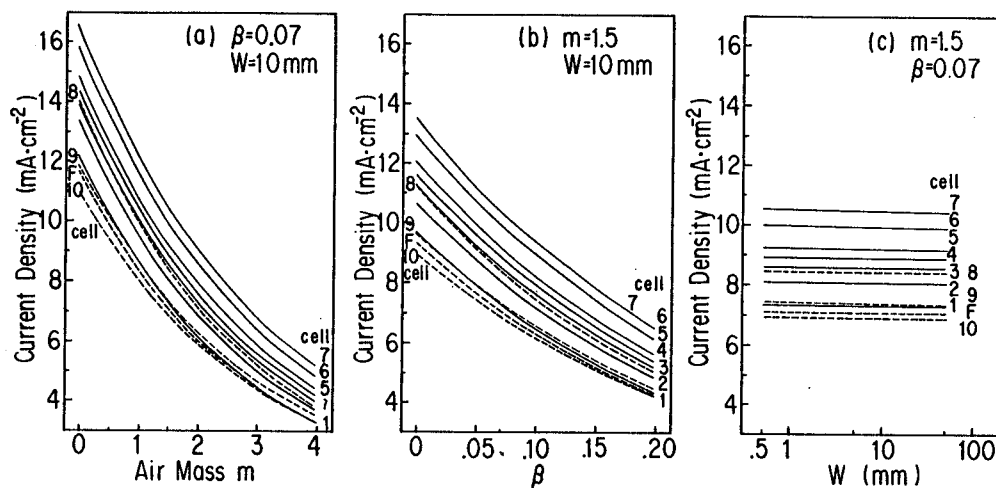


図5.7 p-i-n a-Si 太陽電池の出力電流特性の大気パラメータ依存性。

(a) エアマス (m) 依存性, (b) 混濁度 (β) 依存性, (c) 降水量 (W) 依存性。

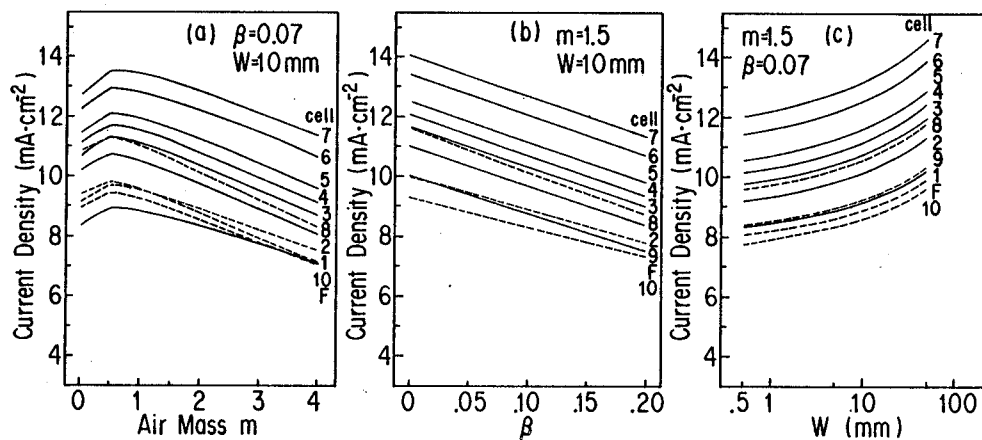


図5.8 p-i-n a-Si 太陽電池の出力電流特性 (放射照度 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ 下) の大気パラメータ依存性。

(a) エアマス (m) 依存性, (b) 混濁度 (β) 依存性, (c) 降水量 (W) 依存性。

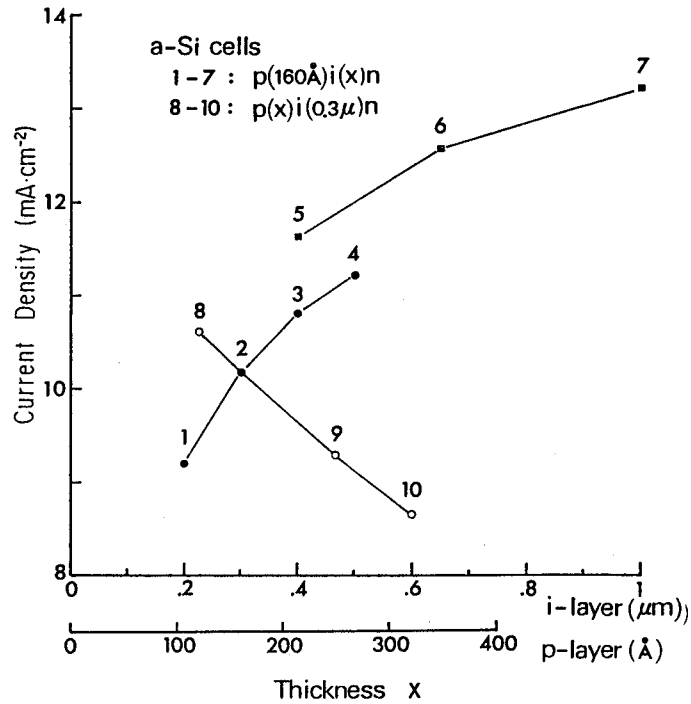


図5.9 日本の暫定標準太陽光（放射照度 100mW/cm²）下における出力電流 (CV)

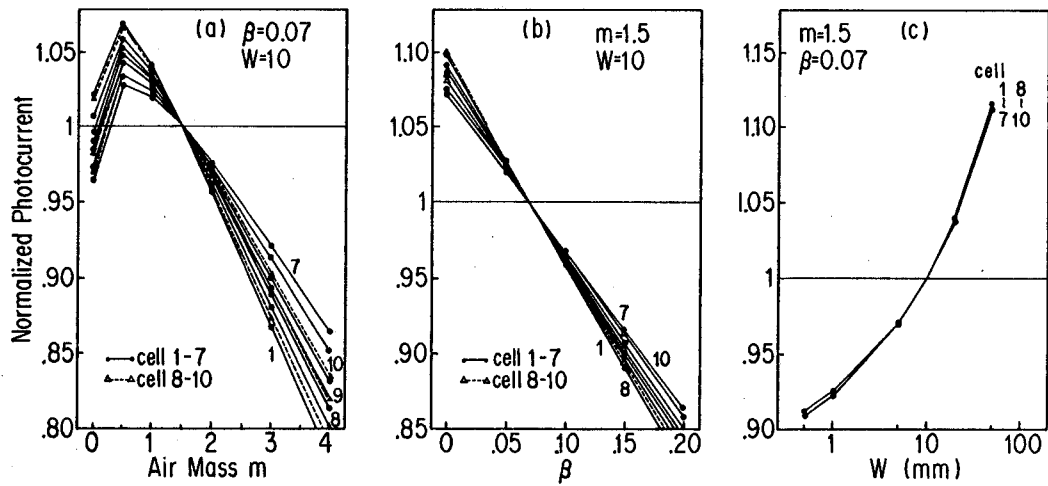


図5.10 日本の暫定標準太陽光下における出力電流を“1”として規格化された出力電流。

(a) エアマス (m) 依存性, (b) 混濁係数 (β) 依存性, (c) 降水量 (W) 依存性

5.3 人工太陽（ソーラシミュレータ）下におけるセル出力特性

5.3.1 人工太陽光のスペクトル分布

通常、用いられている定常光型ソーラシミュレータは、Xe ショートアークランプを光源として使用したもので、その特徴は、①色温度が $6,000^{\circ}\text{K}$ と太陽の温度 ($5,762^{\circ}\text{K}$) に近いこと、②輝度が高く、適当な光学系を用いれば平行度のよい光ビームが得られること、である。反面、近赤外部 ($800\sim 1,000\text{nm}$) に、キセノン (Xe) 特有の強い輝線が存在し、これをおさえる補正フィルタが必要となってくる。ソーラシミュレータに要求される性能としては、放射照度、スペクトル分布（分光放射照度）、測定位置における照度の均一性と時間的安定性、などが主に考えられる。

放射照度は使用目的によって異なるが、通常は $70\sim 130\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ の照度がとれるようにソーラシミュレータは設計され、 $100\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 前後の照度（AM 1 の太陽光の照度に近い。確立されつつある標準測定法では AM1.5, $100\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ を基準測定条件としている。）で太陽電池の測定がなされる。照度を変化させるには、1) ランプ電流を変化させる、2) メッシュを入れる、3) レンズ位置を変えて発散ビームにし、測定位置を変化させることによって照度を変える、等の手段がとられる。2)、3) の方式はスペクトル変化はないが、面分布の均一性とサンプルの設定位置精度に注意する必要がある。通常は1)の方法が用いられるが、この場合はスペクトル分布が変化するので、あまり大きく変えることは問題である。

スペクトル分布については、光源の Xe アークランプ放射光が連続スペクトルと輝線スペクトルを含んでいて、ランプ電流を増加させると、前者の強度が後者の強度に比して相対的に増大する。色温度が太陽の温度と類似している Xe アークランプを使用する場合も、目的とする標準太陽光を擬した分光放射照度分布を得るには、近赤外部の輝線をおさえるフィルタと同時に大気透過特性と等価なフィルタが必要とされる。実際には、大気によって散乱される紫外部 ($200\sim 480\text{nm}$) と強い輝線の存在する近赤外部 ($800\sim 1,000\text{nm}$) を、2枚の多層膜フィルタを用いておさえることによって、AM1, AM1.5, AM2 等のソーラシミュレータが製作されている。図5.11にレファレンス太陽電池較正用に開発した AM1.5 のソーラシミュレータの分光放射特性の例を示す。また、図5.12に、このシミュレータの 100nm 間隔で表した分光放射特性を示す。現在の Xe ランプシミュレータでは $400\sim 500\text{nm}$ と $800\sim 900\text{nm}$ の波長域の近似度を高めることが難しく、標準太陽光からの“ズレ”が $\pm 25\%$ 以下であるならば、Aクラスとされている。しかし、タンデム型の a-Si 太陽電池や光バリアス効果の大きな太陽電池を評価する場合には、更に高近似のスペクトル分布をもったソーラシミュレータの開発が要求されてくる。

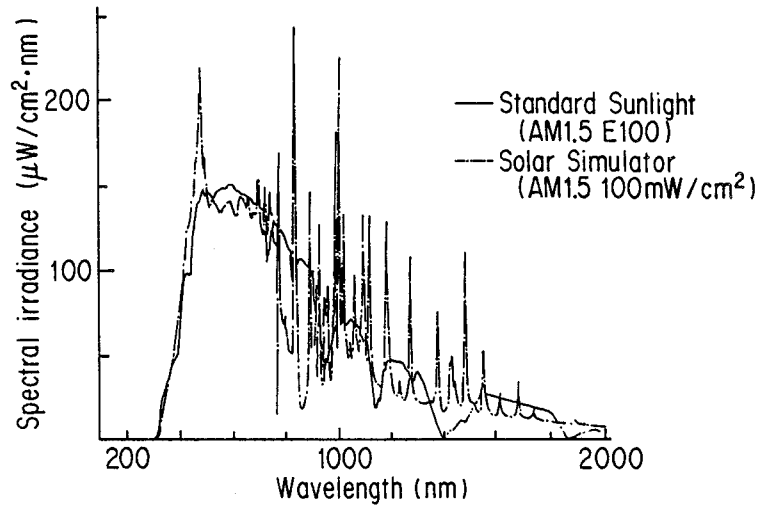


図5.11 AM1.5 ソーラシミュレータの分光放射特性

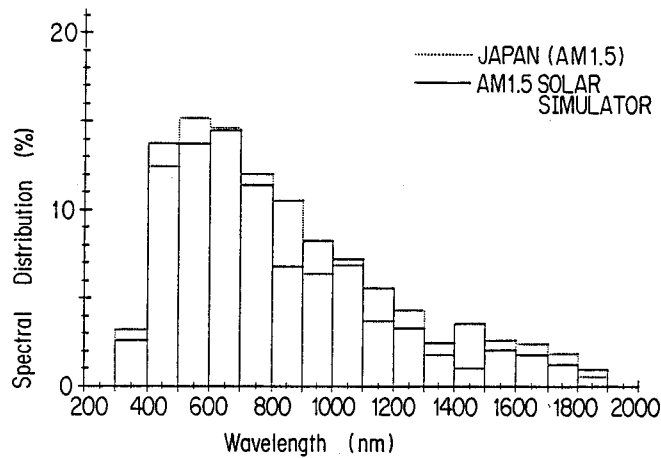


図5.12 AM1.5 ソーラシミュレータの分光放射特性 (波長間隔 100nm)

最後に、太陽電池の出力計算及び測定誤差計算に使用するための代表的なソーラシミュレータの分光放射照度特性を図5.13に示す²⁾。後程、太陽電池の持回り測定結果に示すように、現在のところ近似度の悪いソーラシミュレータや近赤外部のフィルタの劣化したソーラシミュレータがかなり使用されており、次の4種のXeソーラシミュレータを代表例として選んだ。

- ① Simulator I：紫外光量の大きな分光放射特性をもつもの。

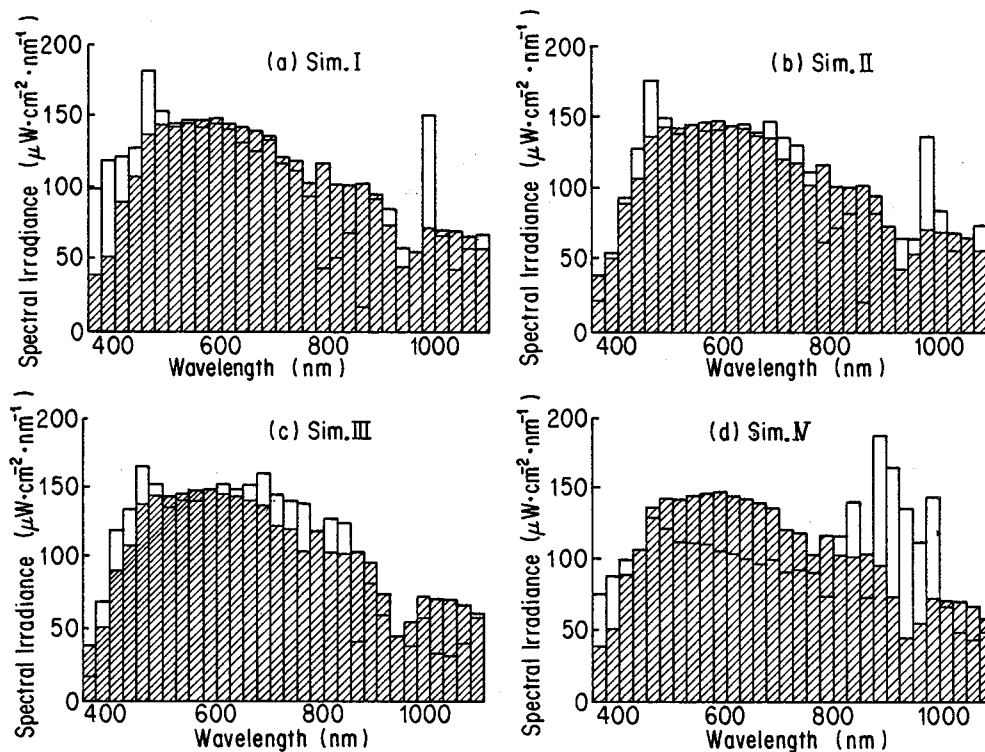


図5.13 キセノン (Xe) ランプ・ソーラシミュレータの放射照度分布
 (a) Simulator I, (b) Simulator II, (c) Simulator III, (d) Simulator IV.
 斜線部は日本の AM1.5 暫定標準太陽光の放射照度分布を示す。

- ② Simulator II：暫定標準太陽光に良く近似した分光放射特性をもつもの。
- ③ Simulator III：近似度の良くない air mass1.5 の分光放射特性をもつもの。
- ④ Simulator IV：赤外光量の大きな分光放射特性をもつもの。近赤外部のフィルタが劣化したものの代表例として、裸の 30kW Xe ランプの分光放射特性を示した。

ソーラシミュレータの分光放射照度は 350nm～1,100nm の波長範囲で暫定標準太陽光の積分放射照度 (78.06mW/cm²) と等しくなるように規格化されている。

5.3.2 結晶シリコン太陽電池、アモルファスシリコン太陽電池のセル出力特性

人工太陽光下におけるセル出力は、直達日射の場合と同様に5.2.2項の (5.4) 式から計算される。 $E(\lambda)$ としては、前述した4種の人工太陽光の分光放射照度を使用した。但し、アモルファスシリコン太陽電池の場合は、3種の人工太陽光 (シミュレータ I, III, IV) を使用した。結晶シリコン太陽電池の場合の計算結果を5.2.2項の表5.2に、そして、アモルファスシリコン太陽電池の場合の計算結果を5.2.3項の表5.4に示した。

5.4 全天日射下におけるセル出力特性

——散乱日射の角度分布，光応答特性の入射角度依存性を考慮した場合——

全天日射は直達日射成分と散乱日射成分を含み，そのスペクトル分布は場所・日時・大気条件によって大きく異なる。直達日射については，理論解析が十分になされ，各種の大気条件下における直達日射スペクトル分布^{2),6),14)}そして太陽電池出力^{13),15),16)}の計算がすでになされている。しかし，散乱日射を含む全天日射の場合は，直達日射のところで示したような簡単な減衰の指数法則で計算できず，長い計算時間を必要とするため，特別な大気条件の全天日射しか報告されていない¹⁷⁻¹⁹⁾。また，後程，報告するように，太陽電池の分光感度が入射角度依存性をもつ^{4),5),20)}こともあって，全天日射下における太陽電池出力の理論予測は未だになされていない。

著者は，全天日射下における太陽電池出力を予測するため，太陽電池の分光感度の入射角度依存性を調べ理論解析を行う⁵⁾とともに，全天日射のスペクトル分布，角度分布の理論計算を可能にするコンピュータ・コードを新しく開発した¹⁾。本節では，最初に，全天日射スペクトル分布の計算方法と計算結果を示し，次に，この全天日射モデル計算を使用して全天日射下における結晶シリコン太陽電池とアモルファスシリコン太陽電池のセル出力特性を明らかにする。

5.4.1 全天日射スペクトル分布

本項では，まず全天日射のスペクトル分布，角度分布の理論計算方法の概略を述べ，続いて，計算による全天日射スペクトル分布と実測データ及び文献データとの比較を行う。最後に，各種の大気条件における散乱日射の角度分布特性を明らかにし，散乱日射フラックスが天頂角 50° 付近でピーク値をもち，そのピーク位置がエアマス，混濁度，降水量等の大気条件にあまり依存しないことを示す¹⁾。

5.4.1.1 計算方法

散乱放射のフラックスを計算する方法は，大きく分けて2種類の方法がある。1つは，Monte Carlo 法によるもの¹⁷⁾で，もう1つは，放射伝達の式を近似的に解く方法である。著者は，計算時間を短縮し，各種の大気条件下における散乱放射のスペクトル分布，角度分布を計算するために，後者の方法を採用した。そして，散乱の異方性，大気の不均一な成層状態を考慮した M. Tanaka²¹⁾の放射伝達の式を簡略化して使用した。即ち，水平面を通る放射のフラックスだけが必要で，方位角による強度分布は必要のない水平面全天日射を考えることにして，放射伝達の式を簡単化した。計算手法としては，J. E. Hansen によって開発された doubling and adding 法²²⁾を採用した。

まず，放射伝達の基本式を導くために，図5.14に示す座標系において，高度 Z 位置における平行
* 平面大気層を考える。ここで，光学的厚さ (optical thickness) τ は，次のように定義される。

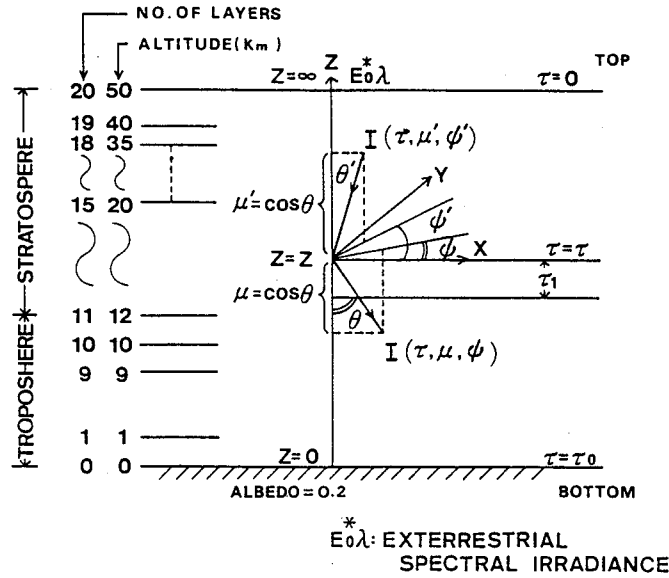


図5.14 放射伝達の座標系

$$\tau = \int_Z^{\infty} k_{\text{ext}} \rho dz \quad (5.11)$$

但し、 k_{ext} は単位質量当たりの消散係数 (mass extinction coefficient)、 ρ は高度 Z における大気の密度である。大気の上端で $\tau=0$ 、地表面で $\tau=\tau_0$ ($=\int_0^{\infty} k_{\text{ext}} \rho dz$) とすると、図に示すように平行平面層における放射の多重散乱過程を記述する放射伝達の基本式は次式^{(21), (23)}で表される。但し、直達光の振舞は減衰の指数法則によって容易に評価できる^{(6), (23), (24)}ので、散乱放射のみを対象とする。

$$\begin{aligned} \frac{\mu dI(\tau, \mu, \phi)}{d\tau} = & I(\tau, \mu, \phi) - \frac{\omega_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^{+1} P(\mu, \phi; \mu', \phi') I(\tau, \mu', \phi') d\mu' d\phi' \\ & - \frac{\omega_0}{4\pi} \pi F_0 P(\mu, \phi; -\mu_0, \phi_0) \exp\left(-\frac{\tau}{\mu_0}\right) \end{aligned} \quad (5.12)$$

ここで、 $I(\tau, \mu', \phi')$ は、天頂角 θ' ($\mu' = \cos\theta'$)、方位角 ϕ' の方向から入射してくる散乱放射の強度、 $I(\tau, \mu, \phi)$ は、天頂角 θ ($\mu = \cos\theta$)、方位角 ϕ の方向へ放射される散乱放射の強度である。 πF_0 は、天頂角 θ_0 ($\mu_0 = \cos\theta_0$)、方位角 ϕ_0 の方向からの太陽放射フラックス、そして、 $P(\mu, \phi; \mu', \phi')$ 、 $P(\mu, \phi; \mu_0, \phi_0)$ は位相関数 (phase function) とよばれ、散乱の角度分布を表す関数である。 ω_0 は、1回の散乱に対するアルベド (single-scattering albedo) で、放射が媒質を微小距離進む間に吸収と散乱によって減衰するが、どれだけのものが散乱光として生き残るかということを示す量である。右辺第2項は、入射してくる散乱光がレベル τ において、散乱によって (μ, ϕ) 方向の散乱光となる放射を表し、右辺第3項は、レベル τ まで直達光としてやってきて、ここで初めて

散乱されて (μ, ϕ) 方向の散乱光となる放射を表している。波長の記号は簡単化のために省略した。また、放射の分極の効果については、最大5～7%程度で、方位角全体にわたる平均をするならば数%にとどまるので、本研究では無視した。

次に、水平面全天日射を考えると、放射強度 $I(\tau, \mu, \phi)$ 、位相関数 $P(\mu, \phi; \mu', \phi')$ は、方位角に関して直交する多項式で展開（フーリエ級数展開）することが可能で、

$$\begin{aligned} I(\tau, \mu, \phi) &= \sum_m I^{(m)} \cos m\phi \\ P(\mu, \phi; \mu', \phi') &= \sum_m P^{(m)}(\mu, \mu') \cos m\phi \end{aligned} \quad (5.13)$$

と表すことができる。その結果、全方位角で平均した放射強度 $I(\tau, \mu)$ は、次式の如く簡単化される。

$$\begin{aligned} \mu \frac{dI^{(0)}(\tau, \mu)}{d\tau} &= I^{(0)}(\tau, \mu) - \frac{\omega_0}{2} \int_{-1}^1 P^{(0)}(\mu, \mu') I^{(0)}(\tau, \mu') d\mu' \\ &\quad - \frac{\omega_0}{4\pi} \pi F_0 P^{(0)}(\mu, -\mu_0) e^{-\tau/\mu_0} \end{aligned} \quad (5.14)$$

次に、この多重散乱過程を表す式を解く訳であるが、著者等は、single scattering layer 近似²³⁾と doubling and adding 法²²⁾を使って近似的に解を求めた。今、散乱が1回だけ生じる非常に薄い層（single scattering layer）を考え、この層の光学的厚さ（optical thickness）を τ_1 、入射してくる放射の方向を太陽の方向 $-\mu_0$ に固定し、境界条件として平行平面大気層の上端（ $\tau=0$ ）に入射する散乱光、そして、下端（ $\tau=\tau_1$ ）から反射してくる散乱光はないものと仮定すると、この散乱が1回だけ生じる平行平面大気層全体による透過率 $T(\tau_1, -\mu, -\mu_0)$ と反射率 $R(\tau_1, \mu, -\mu_0)$ は、次式のようになる。

$$\begin{aligned} R(\tau_1, \mu, -\mu_0) &\equiv \frac{I^{(0)}(\tau_1, \mu)}{\mu_0 F_0} \\ &= \frac{\omega_0}{4(\mu + \mu_0)} \left[1 - \exp \left\{ -\tau_1 \left(\frac{1}{\mu} + \frac{1}{\mu_0} \right) \right\} \right] P^{(0)}(\mu, -\mu_0) \quad (5.15) \\ T(\tau_1, -\mu, -\mu_0) &\equiv \frac{I^{(0)}(\tau_1, -\mu)}{\mu_0 F_0} \\ &= \begin{cases} \frac{\omega_0}{4(\mu - \mu_0)} \left[\exp \left(-\frac{\tau_1}{\mu} \right) - \exp \left(-\frac{\tau_1}{\mu_0} \right) \right] P^{(0)}(-\mu, -\mu_0) & \mu \neq \mu_0 \\ \frac{\omega_0 \tau_1}{4\mu_0^2} \exp \left(-\frac{\tau_1}{\mu_0} \right) P^{(0)}(-\mu, -\mu_0) & \mu = \mu_0 \end{cases} \quad (5.16) \end{aligned}$$

この反射率 $R(\tau_1, \mu, -\mu_0)$ と透過率 $T(\tau_1, -\mu, -\mu_0)$ を計算するには、1回散乱に対するアルベド ω_0 、位相関数 $P^{(0)}(\mu, \mu_0)$ 、光学的厚さ τ_1 が与えられねばならない。これらの諸量は、Rayleigh

散乱, 大気中の各種の分子による吸収に加えて, 複素屈折率 (refractive index) と粒度分布 (size distribution) によって定まるエアロゾル (浮遊微粒子) の光学定数を使用して, Mie 理論によって計算した。複素屈折率は, Palmer and Williams²⁵⁾の値, そして, 粒度分布は, 対流圏の場合は Junge 分布, 成層圏の場合は実効半径 (effective radius) $r_e=0.25$, 実効変位 (effective variance) $r_v=0.22$ の修正 Gamma 分布²⁶⁾を使用した。位相関数 $P^{(0)}(\mu, \mu')$ は, 次式で表される Henyey Greenstain 位相関数²⁷⁾を使用した。

$$P(\Theta) = \frac{1-g^2}{1+g^2-2g\cos\Theta} \quad (5.17)$$

g は異方性位相関数の第一項の非対称項で, Θ は散乱角度である。実際の (5.15) (5.16) 式の計算には, 方位角全体で平均した形の次式²⁸⁾を使用した。

$$P^{(0)}(\mu, \mu') = \frac{2(1-g^2)}{\pi(a+b)^{3/2}} \cdot \frac{E\{2b/(a+b)\}^{1/2}}{1-2b/(a+b)} \quad (5.18)$$

$$\begin{aligned} \text{但し } a &= 1+g^2-2g\mu\mu' \\ b &= 2g(1-\mu^2)^{1/2}(1-\mu'^2)^{1/2} \end{aligned}$$

そして, E は第2種楕円関数 (elliptic function) を表す。

計算に使用した各波長における single-scattering の諸量, すなわち single-scattering アルベド ω_0 , 消散係数 k_{ext} そして非対称項 g の値は, 複素屈折率とともに, 表5.5, 表5.6に示した。表5.5 は対流圏エアロゾルの場合で, 表5.6は成層圏エアロゾルの場合である。透過率 $T(\tau_1, -\mu, -\mu_0)$ そして反射率 $R(\tau_1, \mu, -\mu_0)$ は, 非対称項 g とアルベド ω_0 を使用して, $\mu=0$ と $\mu=1$ の間の12点でガウス区分求積法によって数値計算された。入射してくる放射の方向が $-\mu_0$ ではなく一般に $-\mu'$ の場合も, 同様の計算が可能で, $\mu'=0$ と $\mu'=1$ の間の12点でそれぞれ同様の計算がなされ, $T(\tau_1, -\mu, -\mu')$ そして $R(\tau_1, \mu, -\mu')$ が求められた。

次に, 地表面における散乱日射を計算するために, この1回散乱の平行平面層の積層からなる大気全体において各層間の多重散乱を考え, 本研究では J. E. Hansen²⁹⁾の doubling and adding 法を使用して光学的厚さ τ_0 をもった大気全体の反射率, 透過率を計算した。すなわち, 2つの平行平面層において, 各々の層の反射率と透過率が既知であるならば, この2層間の多重反射過程を計算することにより結合された2層全体の反射率, 透過率を得ることができ, この操作を繰り返すことによって, 地表面における散乱日射を計算する手法である。2つの層が同じ光学的性質をもつとき, doubling 法, 異なった光学的性質をもつとき adding 法と呼ばれる。境界条件として, 地表面においては反射率 $R=A$ (A は地表面におけるアルベドで0.2を使用した。), 透過率 $T=0$ とした。具体的には, 初期の層の光学的厚さ $\tau_1=2^{-20}$ で, doubling 法適用のために, 図5.14に示すように大気の対流圏を11層に, 成層圏を9層に分け, 温度・圧力・エアロゾル密度・水分とオゾンの濃度を含んだ McClatchey³⁰⁾の大気モデルを使用した。そして, 水分の吸収係数は M. Kerschgens³¹⁾, オゾンの吸

表5. 5 対流圏エーロゾルの光学定数

No	1) λ (nm)	2) $m = n - i$	3) $k_{\text{ext}} (N=1\text{cm}^{-3})$ [km ⁻¹]	4) ω_0	5) g
1	325	1.50 -0.01i	9.3505×10^{-5}	0.90676	0.71056
2	375	〃	8.4765	0.90796	0.70177
3	425	〃	7.6991	0.90842	0.69322
4	475	〃	7.0280	0.90850	0.68561
5	525	〃	6.4496	0.90836	0.67939
6	575	〃	5.9494	0.90808	0.67448
7	625	〃	5.5149	0.90775	0.67068
8	675	〃	5.1352	0.90737	0.66773
9	720	〃	4.8330	0.90702	0.66562
10	765	〃	4.5628	0.90666	0.66392
11	815	〃	4.2945	0.90628	0.66239
12	865	〃	4.0549	0.90592	0.66116
13	935	〃	3.7718	0.90544	0.65985
14	1000	〃	3.5212	0.90501	0.65881
15	1040	〃	3.3884	0.90476	0.65831
16	1080	〃	3.2651	0.90453	0.65786
17	1150	〃	3.0445	0.90410	0.65712
18	1240	〃	2.8491	0.90370	0.65652
19	1410	1.495-0.012i	2.4955	0.88719	0.65997
20	1605	1.490-0.014i	2.1836	0.87090	0.66343
21	1890	1.485-0.016i	1.8474	0.85440	0.66671
22	2155	1.480-0.020i	1.6214	0.82491	0.67148
23	2595	1.475-0.022i	1.3423	0.80830	0.67438
24	3285	1.470-0.024i	1.0568	0.79089	0.67680

- 1) Wavelength
- 2) Refractive index
- 3) Extinction coefficient
- 4) Single scattering albedo
- 5) Asymetry factor

表5. 6 成層圏エアロゾルの光学定数

No	1) λ (nm)	2) mc = n _y - n _i · i	3) k _{ext} (N = 1cm ⁻³) [km ⁻¹]	4) ω ₀	5) g
1	325	1.455-0.0i	2.1589×10 ⁻⁴	1.0	0.72248
2	375	1.450-0.0i	2.1016	〃	0.73115
3	425	1.435-0.0i	1.9661	〃	0.74287
4	475	1.432-0.0i	1.8223	〃	0.74271
5	525	1.431-0.0i	1.6716	〃	0.73875
6	575	1.431-0.0i	1.5228	〃	0.73231
7	625	1.430-0.0i	1.3752	〃	0.72487
8	675	1.429-0.0i	1.2365	〃	0.71619
9	720	1.427-3.0•10 ⁻⁸ i	1.1168	0.9999998	0.70795
10	765	1.427-8.2•10 ⁻⁸ i	1.0141	0.9999995	0.69828
11	815	1.427-9.0•10 ⁻⁸ i	9.1063×10 ⁻⁵	0.9999994	0.68698
12	865	1.425-1.83•10 ⁻⁷ i	8.1148	0.9999988	0.67577
13	935	1.424-6.0•10 ⁻⁷ i	6.9896	0.9999955	0.65950
14	1000	1.422-1.53•10 ⁻⁶ i	6.0126	0.9999888	0.64266
15	1040	1.421-1.50•10 ⁻⁶ i	5.5059	0.9999887	0.63242
16	1080	1.420-1.55•10 ⁻⁶ i	5.0457	0.9999878	0.62203
17	1150	1.417-3.50•10 ⁻⁶ i	4.2255	0.9999691	0.60100
18	1240	1.413-7.0•10 ⁻⁶ i	3.9889	0.9999342	0.56633
19	1410	1.407-6.2•10 ⁻⁵ i	2.7752	0.9993032	0.51598
20	1605	1.400-2.0•10 ⁻⁴ i	1.8740	0.9972332	0.45861
21	1890	1.389-8.0•10 ⁻⁴ i	1.1056	0.9850657	0.37990
22	2155	1.375-1.5•10 ⁻³ i	6.9771×10 ⁻⁶	0.9627847	0.31560
23	2595	1.340-3.8•10 ⁻³ i	3.5197	0.8520540	0.23101
24	3285	1.340-4.0•10 ⁻³ i	1.7323	0.7617468	0.15254

- 1) Wavelength
- 2) Refractive index
- 3) Extinction coefficient
- 4) Single scattering albedo
- 5) Asymetry factor

収係数は Eqbal³²⁾, Rayleigh 散乱の光学的厚さは C. Frohlich³³⁾, のものを使用した。また, 大気圏外の太陽放射スペクトル分布³²⁾は表5.7に示される値を使用した。この表は, Eqbal のデータを基礎に, 水分による吸収波長帯を除いては 50nm の波長帯に分けて平均化されたものである。最後に, 地表面における散乱日射と直達日射は次式から求められた。

$$\text{散乱日射 } I(\tau_0, -\mu) = \mu_0 F_0 T(\tau_0, -\mu, -\mu_0)$$

(5.19)

$$\text{直達日射 } I(\tau_0, -\mu_0) = \mu_0 F_0 e^{-\tau_0/\mu_0}$$

(5.20)

表5.7 大気圏外の太陽放射スペクトル分布

No	Band Limits	Band Center	$\Delta\lambda$ (nm)	Irradiance		Absorption
	λ (nm)	λ (nm)		E_0 (W/m ²)	$E_0\Delta\lambda$ (W/m ² /nm)	Band
1	300~ 350	325	50	39.34	0.7868	O ₃
2	350~ 400	375	50	53.92	1.0784	
3	400~ 450	425	50	87.08	1.7416	
4	450~ 500	475	50	99.52	1.9904	
5	500~ 550	525	50	94.36	1.8872	O ₃
6	550~ 600	575	50	91.26	1.8252	O ₃
7	600~ 650	625	50	83.81	1.6762	O ₃
8	650~ 700	675	50	74.47	1.4894	O ₃
9	700~ 740	720	40	55.02	1.3755	H ₂ O, O ₃
10	740~ 790	765	50	60.92	1.2184	
11	790~ 840	815	50	54.55	1.0910	H ₂ O
12	840~ 890	865	50	49.17	0.9834	H ₂ O
13	890~ 980	935	90	74.28	0.8253	
14	980~1020	1000	49	29.81	0.7453	H ₂ O
15	1020~1060	1040	40	27.26	0.6815	
16	1060~1100	1080	40	24.98	0.6245	
17	1100~1200	1150	100	55.17	0.5517	
18	1200~1280	1240	80	37.41	0.4676	H ₂ O
19	1280~1540	1410	260	93.87	0.3610	
20	1540~1670	1605	130	32.62	0.2509	H ₂ O
21	1670~2110	1890	440	64.72	0.1471	
22	2110~2200	2155	90	7.37	0.0819	H ₂ O
23	2200~2990	2595	790	36.02	0.0456	
24	2990~3580	3285	590	10.83	0.0184	H ₂ O

以上述べてきたような近似手法により，各種の大気条件下における地表面の全天日射のスペクトル分布，角度分布を求める訳であるが，計算のパラメータとしては，太陽高度を表すエアマス m ，エアロゾルによる波長 500nm における光学的厚さを表す混濁度 τ （基本式の τ は Rayleigh 散乱，吸収による光学的厚さも含んでいる。），降水量 W を選び，それぞれのパラメータの全天日射に及ぼす効果を調べた。エアマス m は 1, 1.5, 1.67（直達光が 37° 傾斜面に垂直となる。）2, 2.5, 3, 4, 混濁度 τ は 0（従って，Rayleigh 散乱と吸収のみ），0.1, 0.2, 0.27, 0.5, そして，降水量 W は，日本の冬期と夏期の快晴日の代表値 1.34cm と 5.0cm を使用した。

5.4.1.2 理論計算結果とデータ比較

各種の大気条件下における水平面全天日射のスペクトル分布，角度分布が計算された。本研究で初めて明らかにされた散乱日射の角度分布の特徴については，次項で示すことにして，ここではまず，代表的な大気条件下における水平面全天日射量，水平面全天日射スペクトル分布のエアマス m 依存性，混濁度 τ 依存性，降水量 W 依存性を示し，実測データ及び他の文献データとの比較を行った。図 5.15 は，混濁度 τ (500nm) = 0.1, 0.27, 0.50, 降水量 $W = 5.0\text{cm}$ の大気条件下における水平面の全天日射，直達日射，散乱日射の放射照度をエアマスに対してプロットしたものである。予想通り，エアマス m が増大するに従って，又，混濁度 τ が大きくなるに従って，直達日射量は急速

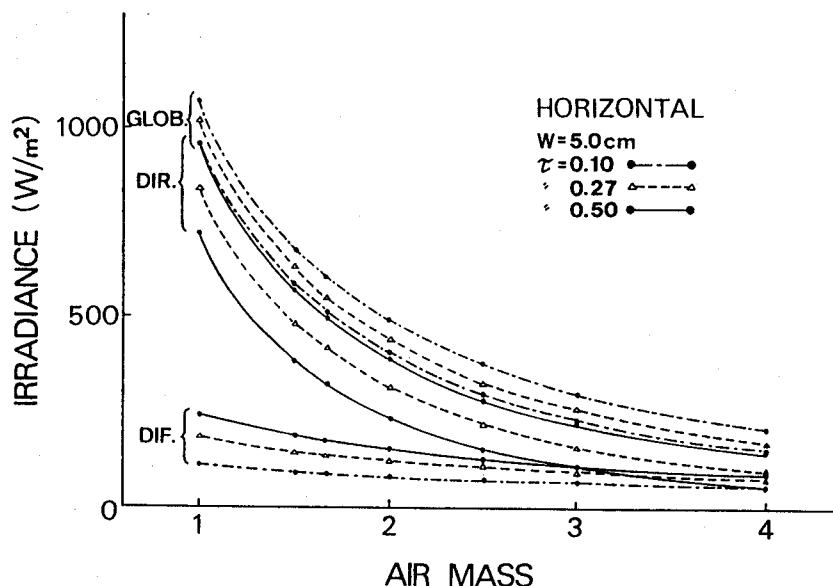


図 5.15 大気条件 τ (500nm) = 0.1, 0.27, 0.50, $W = 5.0\text{cm}$ における水平面の全天日射量，直達日射量，散乱日射量。

に減り、散乱日射の果す役割が大きくなっている。図5.16は、 $\tau=0.27$, $W=5.0\text{cm}$, $m=1.5$ における水平面の全天日射、直達日射、散乱日射のスペクトル分布である。そして、水平面全天日射スペクトル分布の m , τ , W 依存性については図5.17～図5.19に詳しく示したが、これらの分布はいずれも、Bird and Hulstrom³⁴⁾のデータと良く一致した傾向を示している。

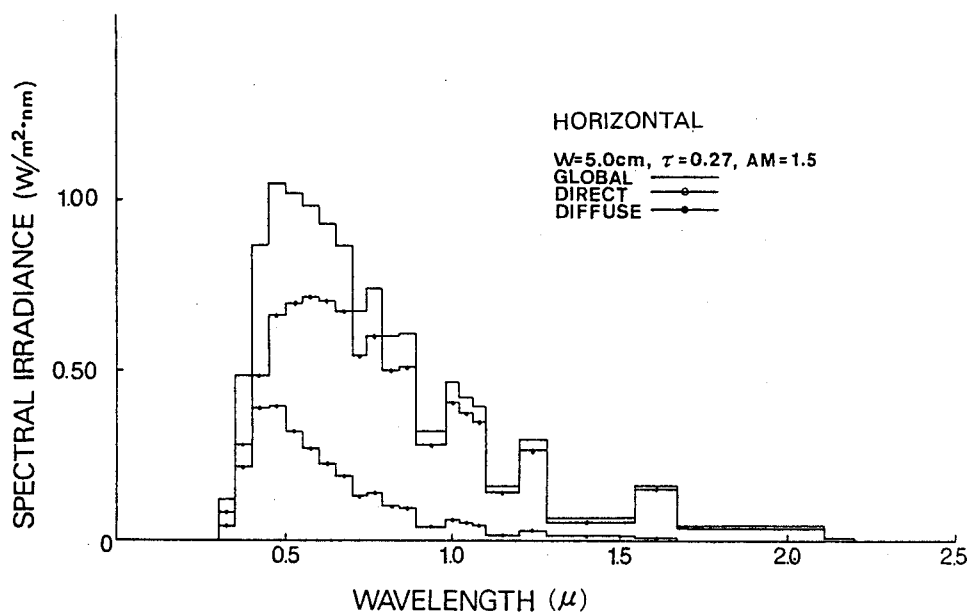


図5.16 大気条件 $\tau=0.27$, $W=5.0\text{cm}$, $m=1.5$ における水平面の全天日射、直達日射、散乱日射のスペクトル分布。

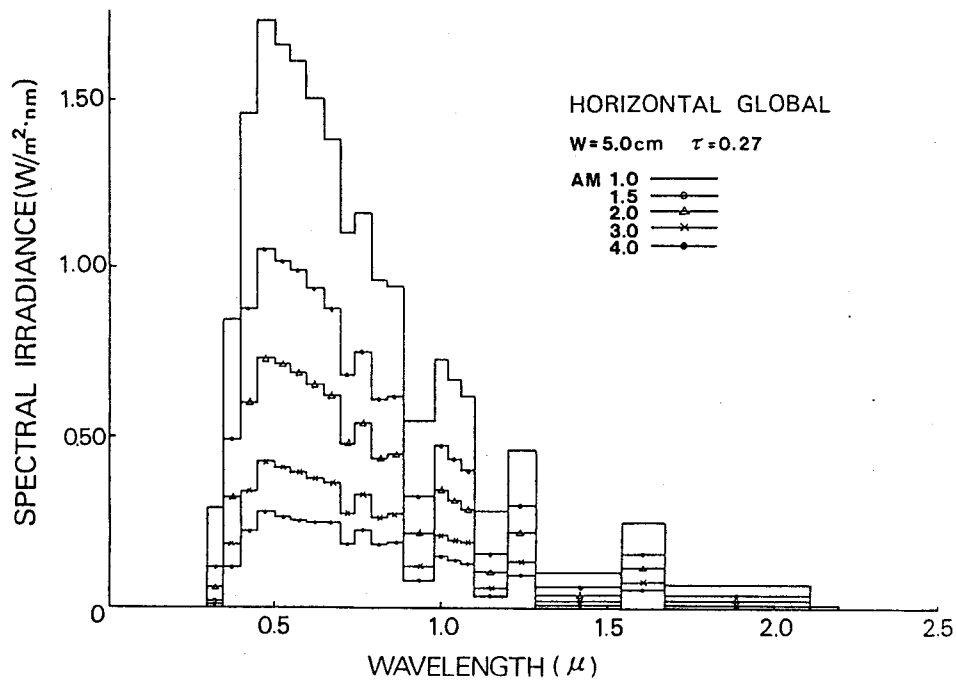


図5.17 水平面全天日射スペクトル分布のエアマス m 依存性。

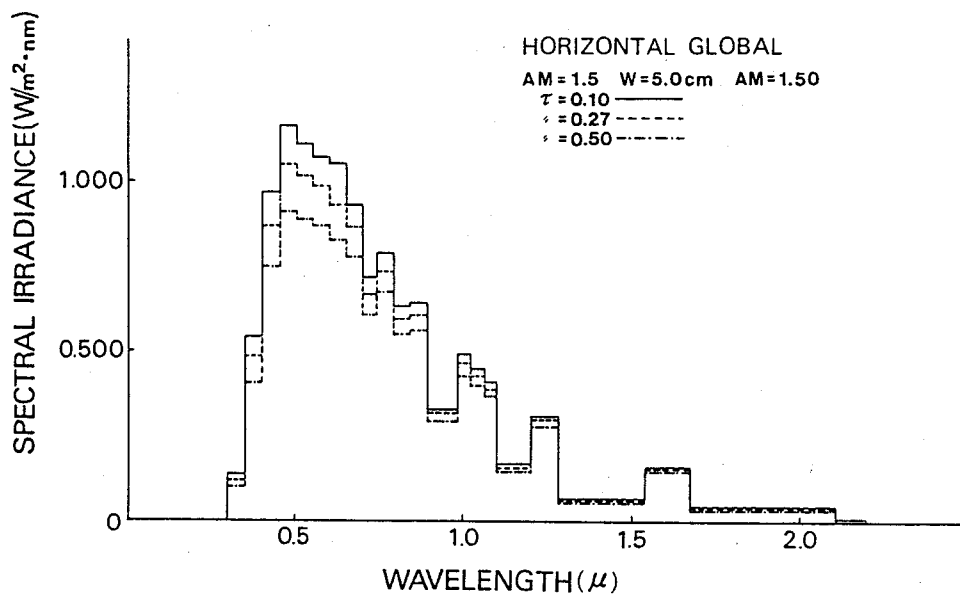


図5.18 水平面全天日射スペクトル分布の混濁度 τ 依存性。

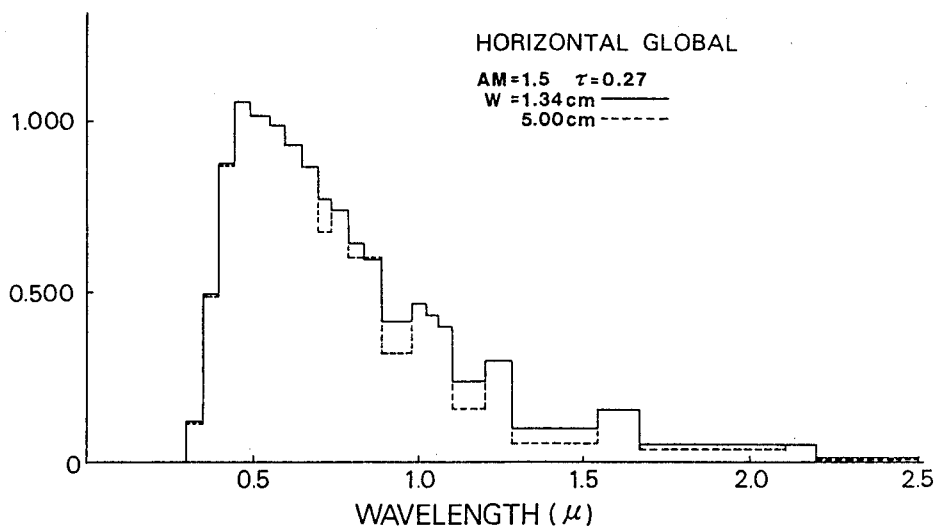


図5.19 水平面全天日射スペクトル分布の降水量 W 依存性。

次に、理論計算結果を本研究の測定データ、そして、文献のデータと比較した。図5.20は、日本の冬期 ($W=1.34\text{cm}$) と夏期 ($W=5.0\text{cm}$) の代表的な大気条件下において測定した水平面全天日射量 (黒丸) をエアマスに対してプロットしたもので、同時に、理論計算結果 (実線) もプロットしたが非常に良い一致を示している。なお、混濁度 τ は EKO MS-120 サンフォトメータを使用して測定し、降水量は相対湿度測定から推定した。

続いて、本研究において理論計算した全天日射スペクトル分布と、Bird and Hulstrom のモンテカルロ法によって求めた理論計算値³⁴⁾との比較を図5.21に示した。本研究の場合は、 $m=1$, $\tau=0.27$, $W=1.34\text{cm}$ で日射量は $1,083.5\text{W/m}^2$ であり、Bird and Hulstrom の場合は、 $m=1$, $\tau=0.27$, $W=1.42\text{cm}$ で、日射量は $1,074.9\text{W/m}^2$ である。前者の降水量 W がわずかに後者の値より小さく、日射量がわずかに後者より大きくなっているが、図5.21で見ると両者の値は良く一致している。厳密には、本研究の計算値の方が波長 $1\mu\text{m}$ 以下では Bird and Hulstrom の値よりわずかに小さく、波長 $1\mu\text{m}$ 以上ではわずかに大きくなっている。この小さな差異は、計算に使用したエアロゾルの複素屈折率、粒度分布等の諸量の違いからくるものと思われるが、太陽電池出力を予測する目的から考えると、この差異は問題にならない。

更に、本研究において計算した直達日射スペクトル分布 (太線) と、日本の AM 1.5 直達の標準太陽光¹¹⁾のスペクトル分布 (細線) との比較を図5.22に示した。本研究の場合は $m=1.5$, $\alpha=1.5$, $\beta=0.07$, $W=1.34\text{cm}$ で日射量は 835.3W/m^2 であり、日本の AM 1.5 標準太陽光の場合は $m=1.5$, $\alpha=1.5$, $\beta=0.07$, $W=1.00\text{cm}$, 日射量は 789.9W/m^2 である。図中の十字印は、日本の AM 1.

5 標準太陽光の大気条件下における当時の測定値である。波長 $1.0\mu\text{m}$ 以下においては非常に良い一致を示しているが、 $1.0\mu\text{m}$ を越えるところでは前者の方が後者より少し大きくなっている。この場合にも、太陽電池出力の予測という目的から考えて、この差異は問題にはならない。

以上、本研究の計算結果と測定データそして文献データとの比較を行ったが、いずれの場合も非常に良い一致を示し、本研究の理論計算、そして測定された諸量の測定法がいずれも正確であることを裏づけている。本研究の理論計算の特徴は、散乱日射の角度分布を精度よく計算できることにあり、次項で改めて散乱日射の角度分布について述べる。

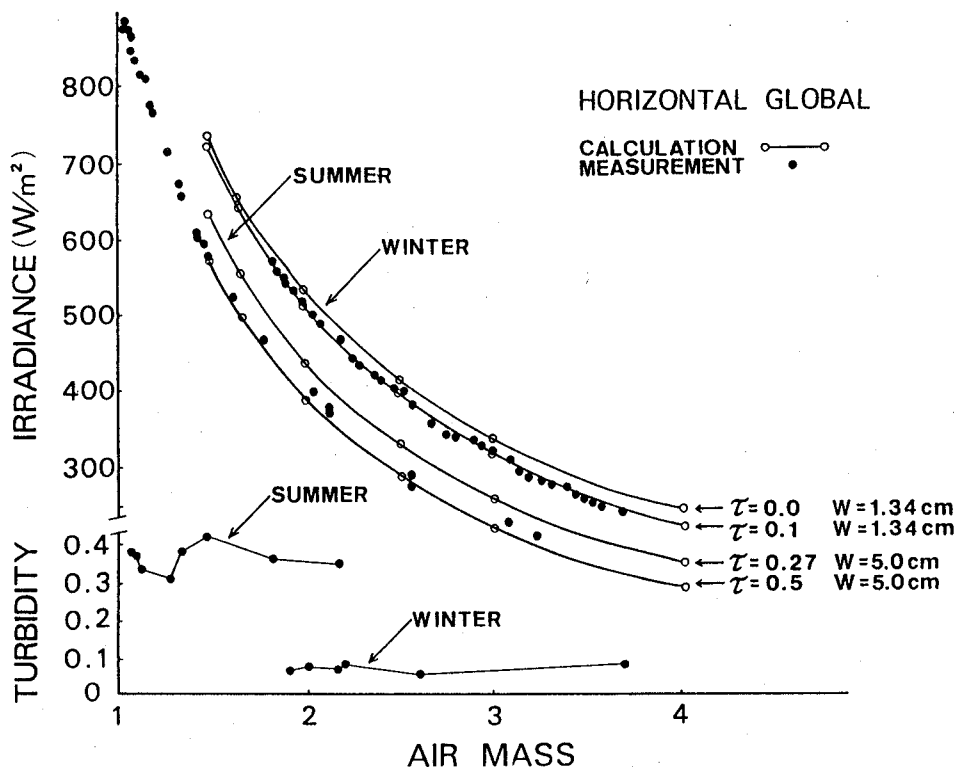


図5.20 水平面全天日射の測定値と計算値の比較
黒丸が測定値で、白丸(実線)が計算値である。

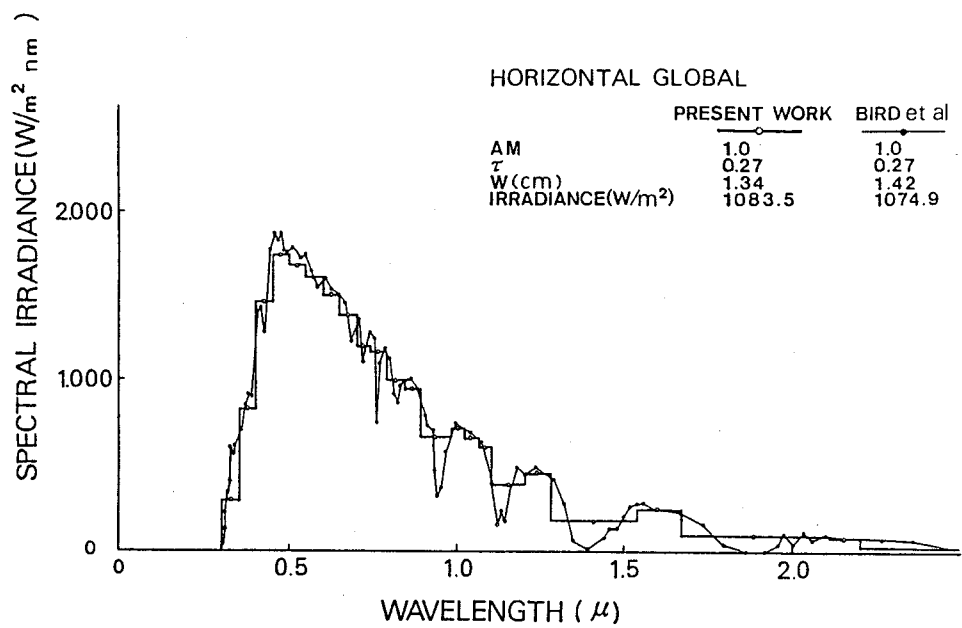


図5.21 Bird et al^[34]の水平面全日射スペクトル分布計算値（黒丸）と著者の計算値（白丸）の比較。

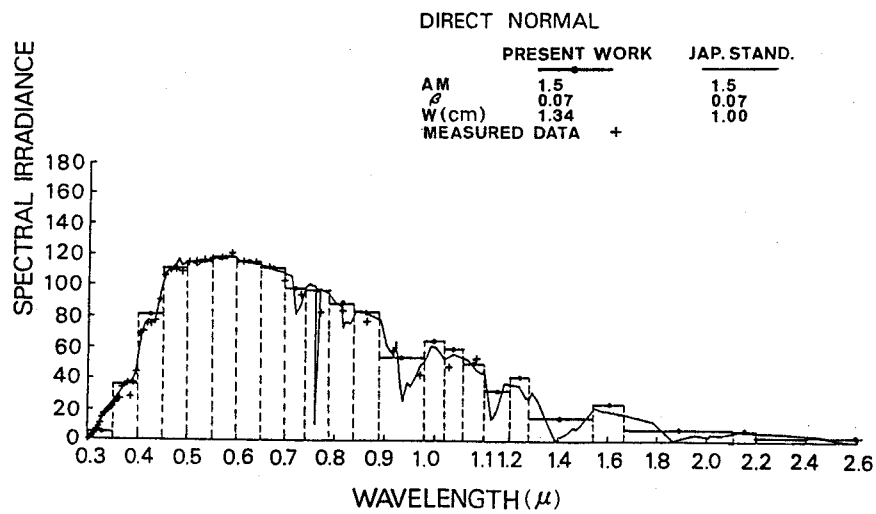


図5.22 日本の AM1.5 直達の標準太陽光^[11]のスペクトル分布（細線）と著者の直達日射スペクトル分布計算値（太線）の比較。

5.4.1.3 散乱日射の角度分布

本章では、各種の大気条件下における水平面散乱日射の角度分布データを示し、その特徴について述べる。図5.23にエアマス $m=1, 1.5, 2, 3, 4$ 、混濁度 $\tau=0.27$ 、降水量 $W=5.0\text{cm}$ の大気条件下における水平面散乱日射強度と散乱日射フラックスの天頂角 θ による分布を示した。図に示された散乱日射強度と散乱日射フラックスは、12区分された天頂角の角度巾約 10° と全方位角によって限られた領域で平均化されている。この12区分された散乱日射フラックスの総和が散乱日射量である。図示されたように、散乱日射強度はエアマス1を除いて天頂角が大きくなるに従って増大し、天頂角 $81^\circ\sim 87^\circ$ で最大となる。太陽光の前方散乱はエアマス1.5のカーブに、わずかの影響しか与えず、天頂角 $\theta=48^\circ$ 付近にみられるわずかのカーブの盛り上りがその効果である。エアマス1についてみると、散乱日射強度は天頂角 50° 付近で最小値をもち、小さな天頂角で非常に大きな値をもつ。これはエアロゾルによる太陽光の前方散乱のためである。次に、水平面散乱日射フラックスの角度分布であるが、エアマスに関係なく、天頂角 $\theta=50^\circ$ 付近で最高値をもっている。より正確には、エアマスが大きくなるに従って、少しずつピーク位置は天頂角の大きい方にシフトしている。この散乱日射フラックスのピーク位置は、太陽電池の光応答特性（分光感度）が入射角度依存性をもつ

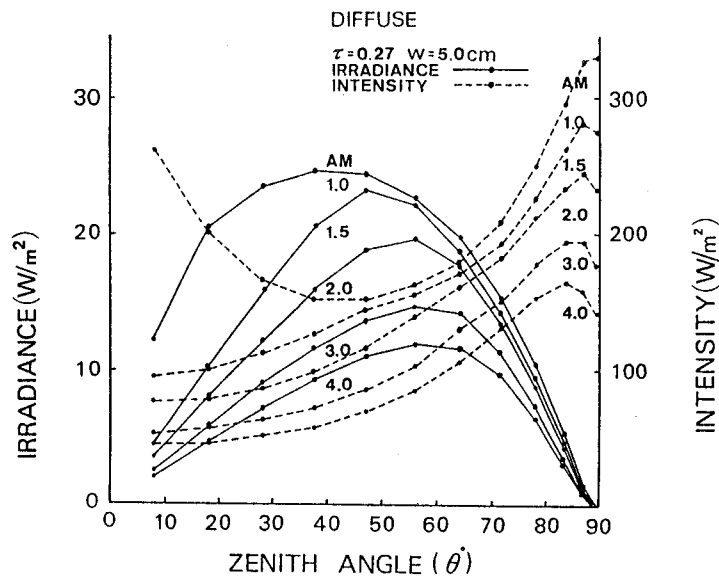


図5.23 エアマス m をパラメータとした水平面散乱日射のフラックス (irradiance) と強度 (intensity) の角度 (天頂角 θ) 分布特性。大気条件は $m=1, 1.5, 2, 3, 4$, $\tau=0.27$, $W=0.5\text{cm}$ である。

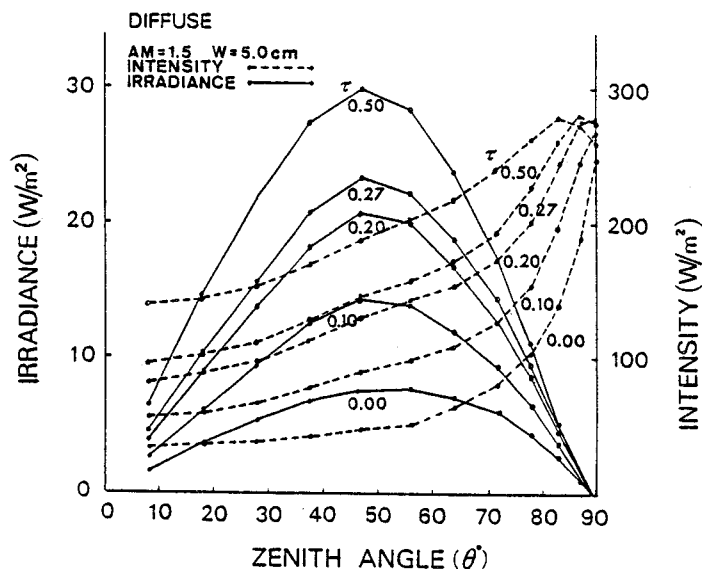


図5.24 混濁度 τ をパラメータとした水平面散乱日射のフラックス (irradiance) と強度 (intensity) の角度(天頂角 θ)分布特性。大気条件は $\tau=0, 0.1, 0.2, 0.27, 0.5$, $m=1.5$, $W=5.0\text{cm}$ である。

角度領域^{4),5)}にあたり、太陽電池出力に大きな影響を与えることが予測される。

図5.24は、混濁度 $\tau=0, 0.1, 0.2, 0.27, 0.5$ 、エアマス $m=1.5$ 、降水量 $W=5.0\text{cm}$ の大気条件下における水平面散乱日射強度と散乱フラックスの角度分布である。 τ が減少するに従って、天頂角の大きなところで散乱強度が強くなり、散乱日射フラックスのピーク位置も 50° から少しずつ天頂角の大きい方にシフトしている。 $\tau=0$ のカーブは、散乱が純粋の Rayleigh 散乱のみによる場合の散乱日射の角度分布を表している。

最後に、波長別の日射強度と日射フラックスの角度分布を図5.25、図5.26に示した。図5.25は、エアマス $m=1.5$ 、混濁度 $\tau=0.27$ 、降水量 $W=5.0\text{cm}$ の大気条件下における波長 425, 500, 625, 765, 865nm の散乱日射の角度分布特性で、図5.26は、エアマス $m=1, 1.5, 2, 3, 4$ 、混濁度 $\tau=0.27$ 、降水量 $W=5.0\text{cm}$ の大気条件下における波長 525nm の散乱日射の角度分布特性である。いずれの波長の場合も、50nm の波長巾の日射量で表されている。波長別にみた散乱日射の角度分布の場合も、これまで述べてきたことと同様の傾向がみられ、散乱日射フラックスのピーク値も 50° 付近にあり、散乱日射の角度分布特性は波長に依存しないようである。

5.4.2 結晶シリコン太陽電池、アモルファスシリコン太陽電池のセル出力特性

本項では、各種太陽電池の分光感度の入射角度依存性を実験及び理論計算から明らかにした上で、前項で述べた全天日射モデル計算を用いて、全天日射下における太陽電池出力の理論予測を初めて

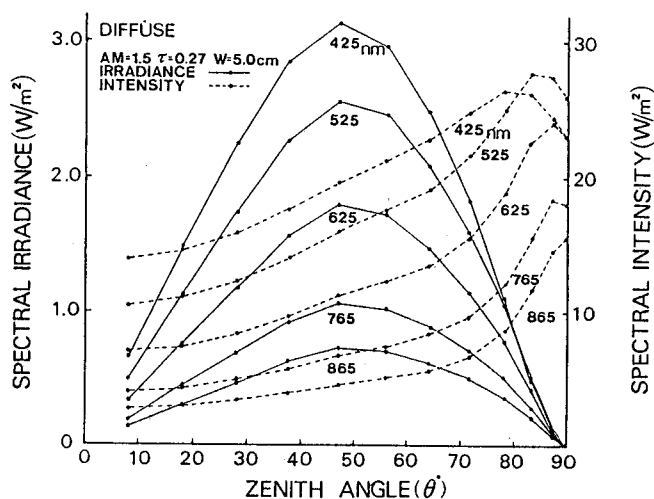


図5.25 波長別の水平面散乱日射のフラックス (irradiance) と強度 (intensity) の角度 (天頂角 θ) 分布特性, 大気条件は $m=1.5$, $\tau=0.27$, $W=5.0\text{cm}$ である。

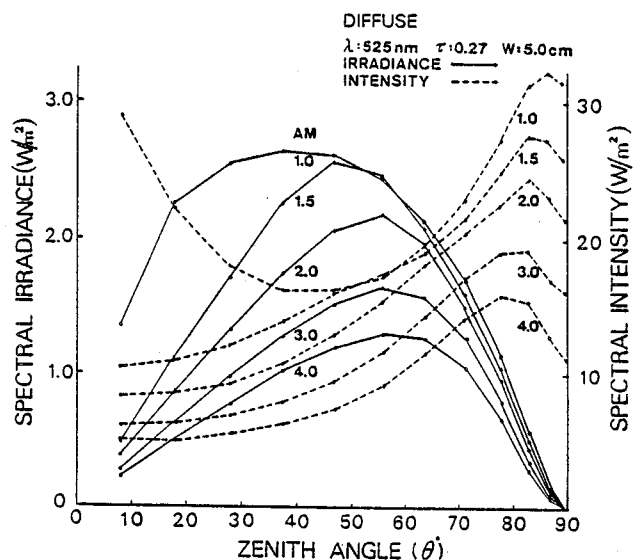


図5.26 エアマス m をパラメータとした波長 525nm の水平面散乱日射のフラックス (irradiance) と強度 (intensity) の角度 (天頂角 θ) 分布特性。大気条件は $m=1, 1.5, 2, 3, 4$, $\tau=0.27$, $W=5.0\text{cm}$ である。

行った^{4),5)}。続いて、直達日射下、水平面全天日射下、そして、近似的ではあるが、傾斜面全天日射下における大気パラメータのセル感度特性に与える効果について理論計算を行い、最も安定な屋外測定法は太陽高度の高い場合における水平面全天日射法であることを見出した。更に、この理論計算を用いて、太陽電池出力の較正時における入射角度依存性による測定誤差を定量的に示す。

5.4.2.1 分光感度の入射角度依存性

異なった屈折率をもつ媒体に光が入射するとき、光の一部は境界面で反射され、その反射率は媒体の屈折率、境界面の状態、そして光の入射角度によって変わる。実用化されている太陽電池の表面は通常テクスチャ加工、あるいは各種の反射防止膜コーティングが施されているが、分光感度の入射角度依存性の本研究に於ては、図5.27に示した4種類のセル構造をもった太陽電池、即ち

- (a) モジュール構造の c-Si (結晶シリコン) 太陽電池
- (b) モジュール構造の a-Si (アモルファスシリコン) 太陽電池
- (c) 裸の c-Si 太陽電池
- (d) 不活性ガスで封止された c-Si 太陽電池

を対象として、実験及び理論計算を行った。

反射率、透過率の理論計算は、平行平面、均質、異方性なし、吸収なしの多層薄膜の場合の計算式³⁵⁾に基づき、図5.28に示す屈折率 n_0, n_1, n_2, n_3 、膜厚 d_1, d_2, d_3 の四層構造において、垂直偏光 ($E \parallel$ 入射面)、平行偏光 ($E \perp$ 入射面) の寄与を1/2ずつと仮定して行った。透過率 (T) は次式で表される。

$$T = \frac{1}{2} \left\{ \frac{(1-r_{01\parallel}^2)(1-r_{12\parallel}^2)}{1+2r_{01\parallel}r_{12\parallel}\cos 2\delta_1+r_{01\parallel}^2r_{12\parallel}^2} + \frac{(1-r_{01\perp}^2)(1-r_{12\perp}^2)}{1+2r_{01\perp}r_{12\perp}\cos 2\delta_1+r_{01\perp}^2r_{12\perp}^2} \right\} \quad (5.21)$$

但し

$$\left\{ \begin{array}{l} r_{12\parallel} = \frac{r_{12\parallel} + r_{23\parallel} e^{-2i\delta_2}}{1 + r_{12\parallel} r_{23\parallel} e^{-2i\delta_2}} \\ r_{12\perp} = \frac{r_{12\perp} + r_{23\perp} e^{-2i\delta_2}}{1 + r_{12\perp} r_{23\perp} e^{-2i\delta_2}} \\ r_{1j\parallel} = \frac{\tan(\theta_1 - \theta_j)}{\tan(\theta_1 + \theta_j)} \\ r_{1j\perp} = \frac{\sin(\theta_1 - \theta_j)}{\sin(\theta_1 + \theta_j)} \\ \delta_2 = \frac{2\pi}{\lambda} n_2 d_2 \cos \theta_2 \\ \delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 d_1 \cos \theta_1 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} i : 0, 1, 2 \\ j : 1, 2, 3 \end{array}$$

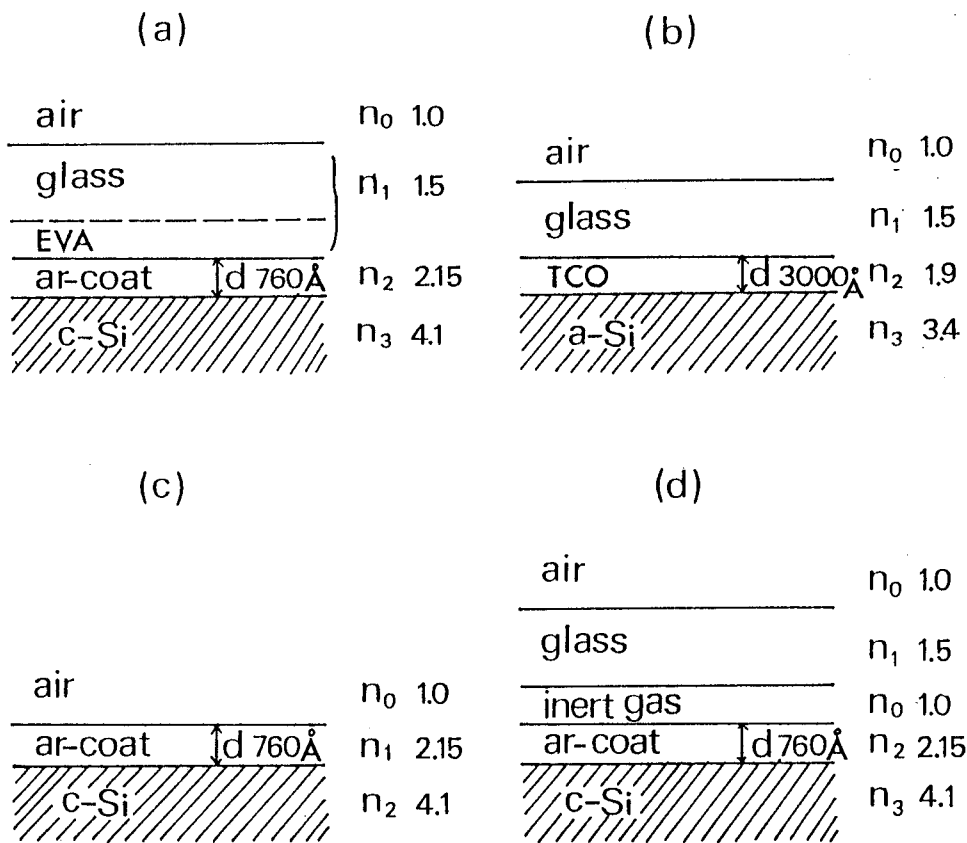


図5.27 太陽電池の代表的なセル構造
(a) モジュール構造の c-Si 太陽電池, (b) モジュール構造の a-Si 太陽電池, (c) 裸の c-Si 太陽電池, (d) 不活性ガス封止の c-Si 太陽電池。d は膜厚, n は屈折率。

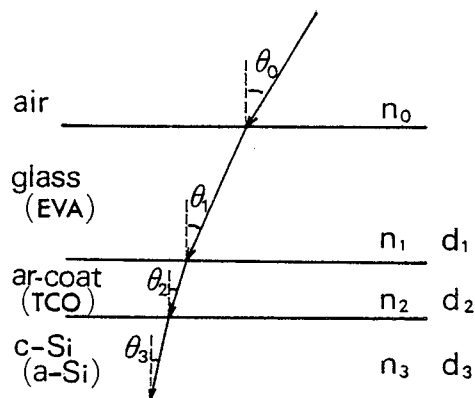


図5.28 四層構造における光の反射と屈折。d は膜厚, n は屈折率。

d_1 が非常に大きい場合、(5.21) 式の垂直偏光、平行偏光のそれぞれにおいて $T_{\max}$ と $T_{\min}$ の幾何平均をとると、次式の d_2 層においてのみ多重反射を考慮した式と同じになる。

$$T = \frac{1}{2} \left\{ \frac{(1-r_{01//}^2)(1-r_{12//}^2)}{1-r_{01//}^2 r_{12//}^2} + \frac{(1-r_{01\perp}^2)(1-r_{12\perp}^2)}{1-r_{01\perp}^2 r_{12\perp}^2} \right\} \quad (5.22)$$

また、計算に用いられた各層の屈折率の値、膜厚の値は図5.27に示されている。分光感度の入射角度依存性測定は a-Si 太陽電池以外は、著者が開発した MBIC (monochromatic light beam induced current) 装置³⁶⁾を使用して行い、a-Si 太陽電池の場合は、全面積照射による分光感度測定を行った。

実測及び計算結果は図5.29、図5.30に示されている。実線が計算値で、白丸、黒丸が実測値である。図5.29は、500nm と 900nm (a-Si レファレンスセルの場合は 500nm と 600nm) の波長における光応答電流の入射角度依存性を表し、角度 0° の値で規格されている。図5.29 (d) 以外は、概して言えば、入射角 30° 以下では出力電流の変化はなく 60° を越えるあたりから急激に減少している。

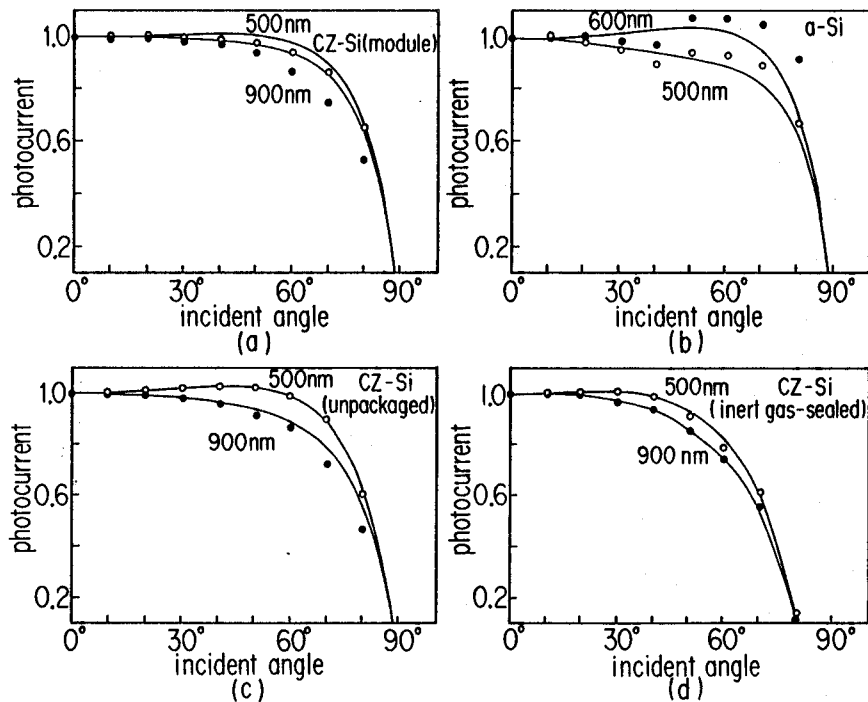


図5.29 太陽電池の光応答特性の入射角度依存性。○印は波長 500nm、●印は波長 900nm(a-Si の場合は 600nm) における測定値。
(a)モジュール構造 c-Si セル, (b)モジュール構造 a-Si セル, (c)裸の c-Si セル, (d)不活性ガス封止の c-Si セル

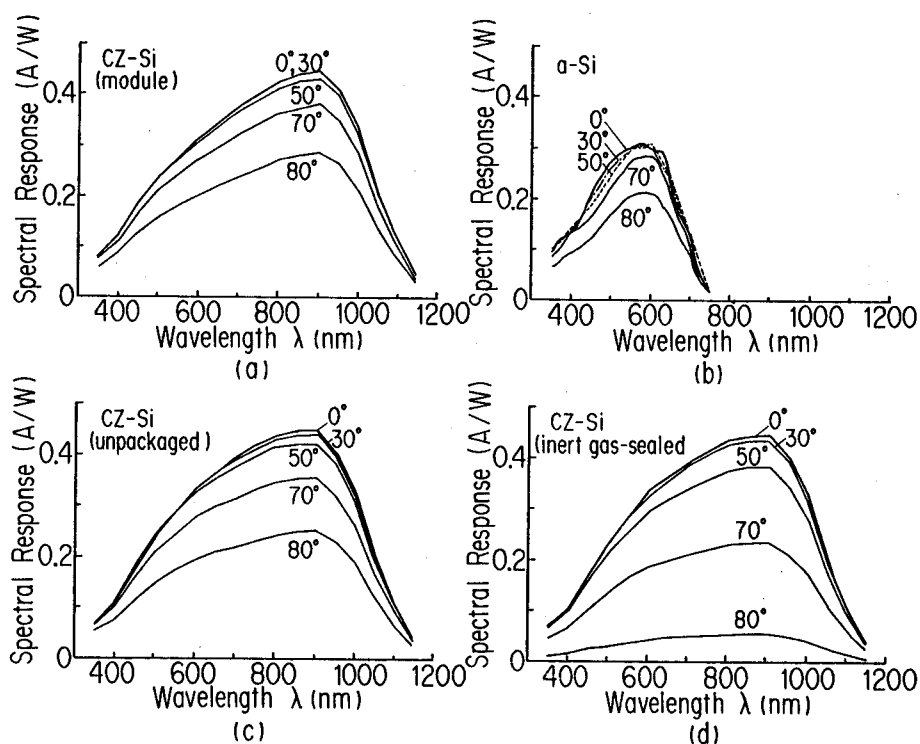


図5.30 分光感度特性の入射角依存性。入射角度 0° , 30° , 50° , 70° , 80° 。
 (a)モジュール構造 c-Si セル, (b)モジュール構造 a-Siセル, (c)裸の c-Si セル,
 (d)不活性ガス封止の c-Si セル。

図5.29 (d) の場合は、入射角度 40° 位から急激に減少し始める。理論計算値と実測値は、かなり良い一致を示しており、太陽電池出力の太陽光入射角度依存性の計算に、この理論計算値を使用することが可能である。図5.30には、垂直入射の場合の4種類の太陽電池の実測の分光感度特性と、入射角度 30° , 50° , 70° , 80° の場合の計算による分光感度特性が示されている。これらの実測値を基礎にして計算された分光感度の入射角度依存性データが、以下の太陽電池出力計算に使用された。

5.4.2.2 セル出力特性

太陽電池の出力特性に及ぼす大気パラメータの効果を調べた。これは、次式で定義される太陽電池のセル感度を各種の大気条件のもとで計算することによってなされた。

$$\text{セル感度} = \frac{\iint R(\lambda, \theta) E(\lambda, \theta) d\lambda d\theta}{\iint E(\lambda, \theta) d\lambda d\theta} \quad (5.23)$$

ここで、 $R(\lambda, \theta)$ は単位面積 (1cm^2) 当たりの太陽電池の入射角度依存性を考慮した分光感度、 $E(\lambda, \theta)$ は太陽放射 (直達日射あるいは全天日射) の角度分布を含んでいる分光放射照度、 λ は入射光の波長、 θ は天頂角である。前項で述べた入射角度依存性を考慮した分光感度と、著者等が開発し

た全天日射モデル計算¹⁾による角度分布を含んだ分光放射照度を使用して、図5.27に示された4種類のレファレンス太陽電池について、セル感度特性を調べた。

1) 直達日射成分によるセル感度特性

モジュール構造の c-Si (結晶シリコン) 太陽電池と a-Si (アモルファスシリコン) 太陽電池の直達日射下におけるセル感度特性の計算結果を図5.31、図5.32に示した。図5.31は、降水量 $W=5.0\text{cm}$ 、混濁度 (波長 500nm) $\tau=0, 0.1, 0.2, 0.27, 0.5$ の大気条件と、 $W=1.34\text{cm}$ 、 $\tau=0.27$ の大気条件、の場合のセル感度を、エアマス m に対してプロットしたものである。波長 900nm に分光感度のピーク値をもつ c-Si 太陽電池の場合、混濁度 τ が大きく短波長の放射照度が小さくなっているときを除いて、エアマス m が増すほどセル感度は増す。波長 580nm に分光感度のピーク値をもつ a-Si 太陽電池の場合は、エアマス m が増大するに従ってセル感度は減少する。代表的な大気条件 ($\tau=0.27$ 、 $W=5.0\text{cm}$) において、エアマス m が1から1.5に変化するとき、c-Si 太陽電池のセル感度は0.84%増大し、a-Si 太陽電池のセル感度は4.25%減少している。

降水量については、水分による吸収帯が太陽電池、特に a-Si 太陽電池の感度波長領域をこえるところがあり、その量は全放射照度に大きく影響を与えるが、セル出力にはわずかしき貢献しない。従って、c-Si、a-Si 太陽電池、いずれの場合も降水量が増大するにつれてセル感度は増大する。 $m=1$ 、 $\tau=0.27$ の大気条件において、降水量 W が 1.34cm から 5.0cm に変化するとき、c-Si 太陽電池では 3.05% 、a-Si 太陽電池では 5.99% 、セル感度は増大する。

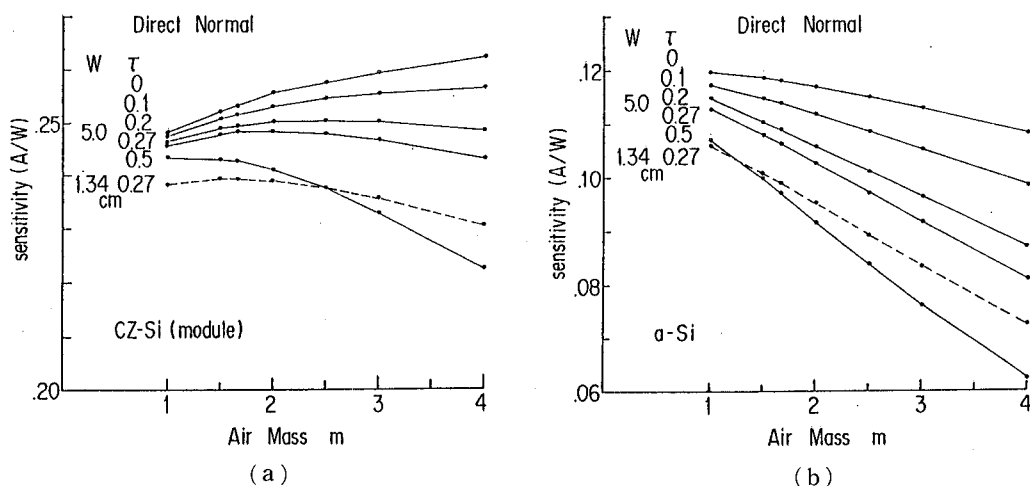


図5.31 直達日射下における(a)モジュール構造 c-Si セル、(b)モジュール構造 a-Si セル、のセル感度特性。大気条件は $W=5.0\text{cm}$ 、 $\tau=0, 0.1, 0.2, 0.27, 0.5$ (実線)そして $W=1.34\text{cm}$ 、 $\tau=0.27$ (破線) で、エアマス m に対してプロットされている。

図5.32は、降水量 $W=5.0\text{cm}$ 、エアマス $m=1, 1.5, 2, 3, 4$ の場合において、混濁度 τ に対してプロットした c-Si, a-Si 太陽電池のセル感度特性である。いずれの太陽電池のセル感度も混濁度 τ が增大するに従って減少している。これは、降水量の場合とは逆で、混濁度 τ の増大により紫外部の放射照度が減少し、全放射照度に与える効果よりもセル出力に効果を与えるためである。エアマスが増大すると、光路長が長くなるために、それだけこの効果を増幅することになり、混濁度 τ の増大により、急激にセル感度が減少する。 $m=1, W=5.0$ の大気条件において混濁度 τ が 0.1 から 0.5 に変化するとき、c-Si 太陽電池では 1.64%, a-Si 太陽電池では 8.98%, セル感度は減少する。

これらの計算結果を他の計算データと共に表5.8に示した。a-Si 太陽電池のセル感度が大気条件の変化に対して敏感で変動しやすいことが明らかで、a-Si 太陽電池の屋外測定の実験が予測される。直達日射下における c-Si 太陽電池のセル感度の気象パラメータ依存性については、Bird¹⁷⁾, Mastson et al¹⁶⁾ の報告と良い一致を示している。Curtis¹⁵⁾ の場合は、降水量の効果は著者の計算結果より少し小さいようである。

2) 分光感度の入射角度依存性の効果

分光感度の入射角度依存性によるセル出力測定誤差について検討する。図5.33は、モジュール構造の c-Si と a-Si 太陽電池の全天日射下におけるセル感度特性で、降水量 $W=5.0\text{cm}$ 、混濁度 $\tau=0.27$ の大気条件において、エアマス m に対してプロットしたものである。三角印の値は、全天日射の分光放射照度 $E(\lambda, \theta)$ と垂直入射の場合の分光感度 $R(\lambda, \theta=0^\circ)$ から計算され、分光感度の入射角度依存性は無視されている。白丸は、全天日射の分光放射照度 $E(\lambda, \theta)$ と入射角度依存性を考慮した $R(\lambda, \theta)$ から計算されたものである。この2つの計算値の差が、水平面全天日射下におけるセル感度に及ぼす入射角度依存性の効果を表している。

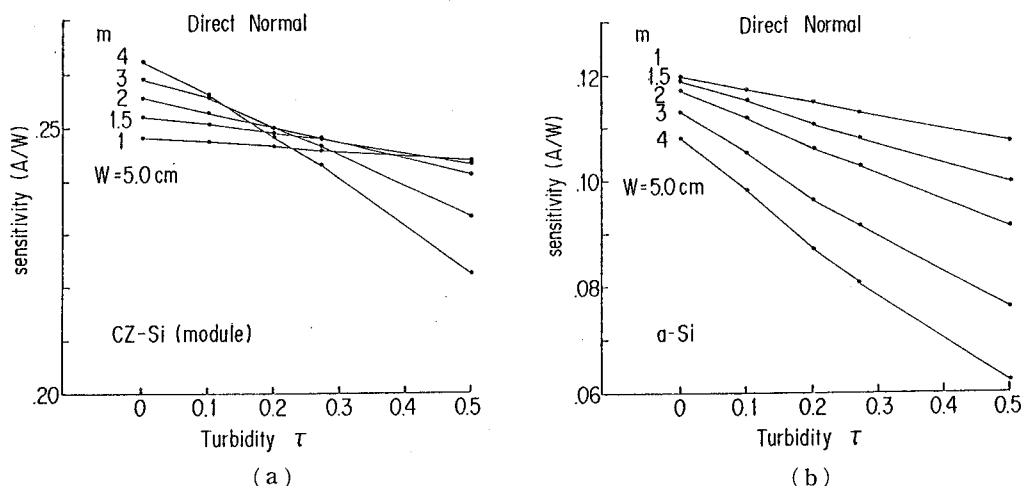


図5.32 直達日射下における(a)モジュール構造 c-Si セル、(b)モジュール構造 a-Si セル、のセル感度特性。大気条件は $W=5.0\text{cm}$, $m=1, 1.5, 2, 3, 4$ で、混濁度 τ に対してプロットされている。

表5. 8 直達日射・水平面全天日射下におけるモジュール構造 c-Si, a-Si セルの大気条件変化に伴うセル感度変化 (%)。

	Variation of cell sensitivity with a change of atmospheric parameter (%)							
	$\tau = 0.1 \rightarrow 0.27, W = 5.0$		$\tau = 0.1 \rightarrow 0.50, W = 5.0$		$W = 1.34 \rightarrow 5.0, \tau = 0.27$		$W = 5.0, \tau = 0.27$	
	$m = 1$	$m = 1.5$	$m = 1$	$m = 1.5$	$m = 1$	$m = 1.5$	$m = 1 \rightarrow 1.5$	$m = 1 \rightarrow 2$
For the global horizontal irradiance								
module-packaged c-Si cell	0.55	0.84	1.14	1.68	2.57	2.79	0.97	3.66
a-Si cell	1.49	2.22	3.54	4.95	5.39	5.91	1.56	4.80
* For the 37° tilted								
module-packaged c-Si cell		1.09		2.34		2.96		
a-Si cell		3.25		6.96		6.18		
For the direct normal irradiance								
module-packaged c-Si cell	0.67	1.23	1.64	3.07	3.05	3.47	0.84	1.04
a-Si cell	4.00	6.29	8.98	14.24	5.99	6.84	4.25	9.30

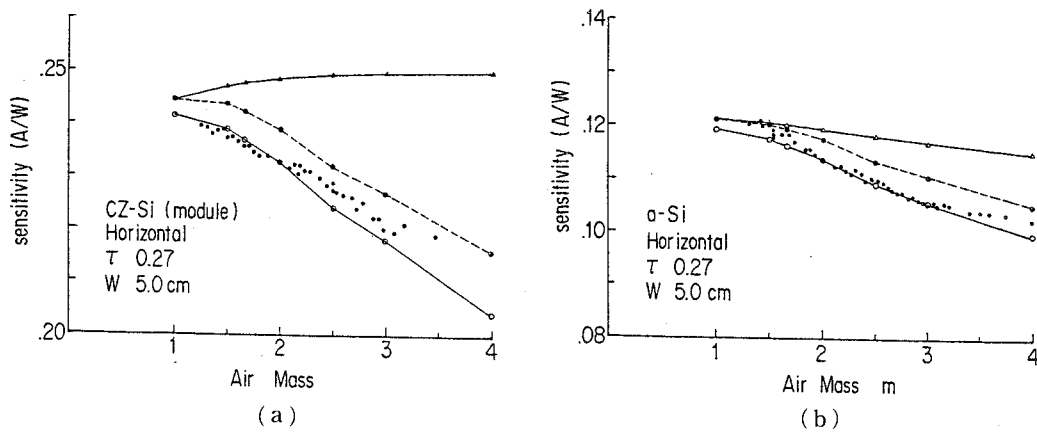


図5.33 水平面全天日射下における(a)モジュール構造 c-Si セル, (b)モジュール構造 a-Si セル, のセル感度計算値と測定値の比較。実線 (Δ印, ○印) 破線 (●) は計算値で, ・印は測定値である。

第3の黒丸(破線)の計算データは、直達日射についてのみ入射角度依存性を考慮したもので、散乱日射については入射角度依存性を無視して計算された。直達日射の場合は、太陽電池の入射角度依存性が明確ならば容易に計算補正することが可能であり、また、太陽に垂直に太陽電池を配置すること(太陽光に垂直に配置した傾斜面全天日射)によって入射角度依存性による測定誤差を少なくすることができる。これらの補正がなされることによって、入射角度依存性の効果を大幅に減じることができ、残された測定誤差は散乱日射によるものだけになる。

代表的な大気条件における入射角度依存性による測定誤差計算結果を表5.9に示した。EVA, その他樹脂の埋め込みがない不活性ガス封止の c-Si 太陽電池の場合は、エアマス1のときでさえ測定誤差が3.5%にもなり、レファレンス太陽電池としては不適な構造であることがわかる。これ以外の構造では、エアマス1の場合が測定誤差が最も小さく1.5%以下、エアマス1.5の場合でも約2%である。しかし、エアマスが増大するに従って直達日射は急激に減少し、散乱日射が相対的に重要な役割を果たすようになるため、測定誤差は増大する。

以上の理論計算結果を確認するために、夏期における代表的な大気条件($\tau=0.27$, $W=5.0\text{cm}$)のもとで、モジュール構造の c-Si, a-Si 太陽電池の水平面全天日射下におけるセル感度測定を行った。測定データはエアマス2の値で規格化し、測定データと計算データの傾向が比較しやすいように図5.33に示されている。エアマスの変化に従って一致した傾向を示し、入射角度依存性を考慮した理論計算が正しいことを示している。しかし、散乱日射の角度分布が原因である小さな測定誤差を確認できるほどの精度のある実験は難しく、表5.9に示されている測定誤差は理論的推定にとどまった。

3) 水平面全天日射下におけるセル感度特性

モジュール構造の c-Si, a-Si 太陽電池の水平面全天日射下におけるセル感度特性の計算結果を図

表5.9 太陽電池の光応答特性（分光感度）の入射角度依存性による測定誤差（％）。

		Errors due to deviation from the cosine response(%) the upper : for direct and diffuse irradiance the lower : for diffuse irradiance		
		Air mass $m=1$ 1.5 2		
module- packaged c-Si cell	$W=5.0, \tau=0.27$	1.23	3.30	6.74
		1.23	1.92	2.66
	$\tau=0.1$	0.66	2.62	6.16
		0.66	1.16	1.66
	$\tau=0.5$	1.74	3.74	6.56
		1.74	2.54	3.32
unpackaged c-Si cell	$W=5.0, \tau=0.27$	1.43	4.51	9.42
		1.43	2.25	3.21
inert gas- sealed c-Si cell	$W=5.0, \tau=0.27$	3.52	14.99	27.84
		3.52	5.97	8.94
module- packaged a-Si cell	$W=5.0, \tau=0.27$	1.53	2.57	4.95
		1.53	2.31	3.08
	$\tau=0.1$	1.04	2.02	4.63
		1.04	1.66	2.32
	$\tau=0.5$	1.93	2.87	4.73
		1.93	2.70	3.41

5.34, 図5.35に示した。図5.34は、直達日射の図5.31に対応しており、降水量 $W=5.0\text{cm}$ 、混濁度 $\tau=0, 0.1, 0.2, 0.27, 0.5$ の場合と $W=1.34\text{cm}$ 、 $\tau=0.27$ の場合において、エアマス m に対してプロットしたものである。全天日射は、散乱された光の大部分を散乱日射として回収するので、直達日射に比して短波長における放射照度が大きくなり、a-Si 太陽電池のセル感度は直達日射下よりも大きくなる。しかし、c-Si 太陽電池の場合は、短波長の感度が良くないために逆に小さくなる。エアマス m が増大するに従って両者ともセル感度は減少するが、太陽高度が高い場合 ($m=1\sim1.5$) は、エアマス m に対して緩やかな勾配となっており、安定な測定が可能であることを示している。例えば、代表的な大気条件 ($\tau=0.27, W=5.0\text{cm}$) において、エアマス m が1から1.5に変化するとき、c-Si 太陽電池のセル感度は0.97％、a-Si 太陽電池のセル感度は1.56％しか減少しない。降水量については、直達日射の場合と同じ傾向を示し、降水量 W が大きくなるに従ってセル感度は大きくなる。但し、全天日射下においては、散乱日射として回収した短波長成分が大きく、この分だけ降水量 W の変化に対するセル感度の変動は少なくなる。 $m=1, \tau=0.27$ の大気条件において、降水量 W が1.34cm から5.0cm に変化するとき、c-Si 太陽電池では2.57％、a-Si 太陽電池では5.39％、セル感度が増大する。

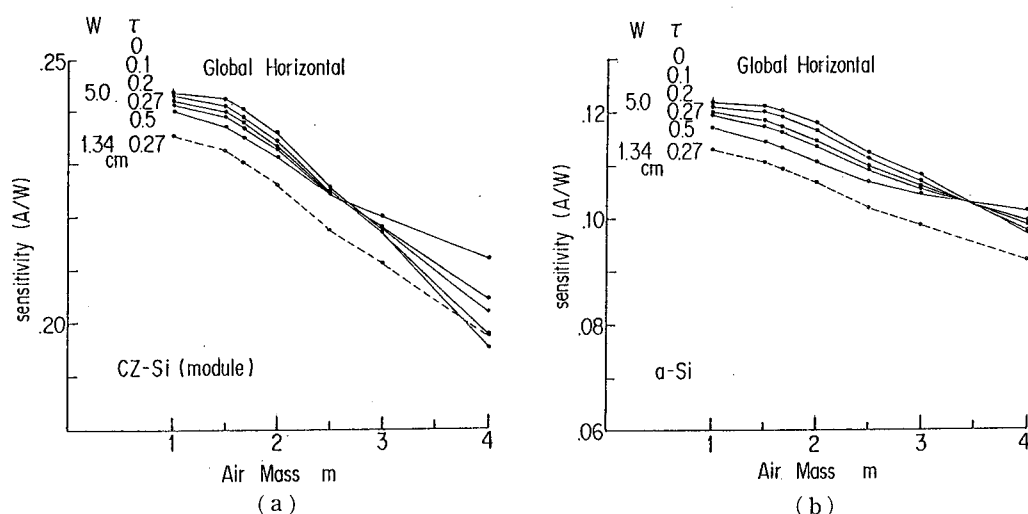


図5.34 水平面全天日射下における(a)モジュール構造 c-Si セル, (b)モジュール構造 a-Si セル, のセル感度特性。大気条件は $W = 5.0$ cm, $\tau = 0, 0.1, 0.2, 0.27, 0.5$ (実線) そして $W = 1.34$ cm, $\tau = 0.27$ (破線) で, エアマス m に対してプロットされている。

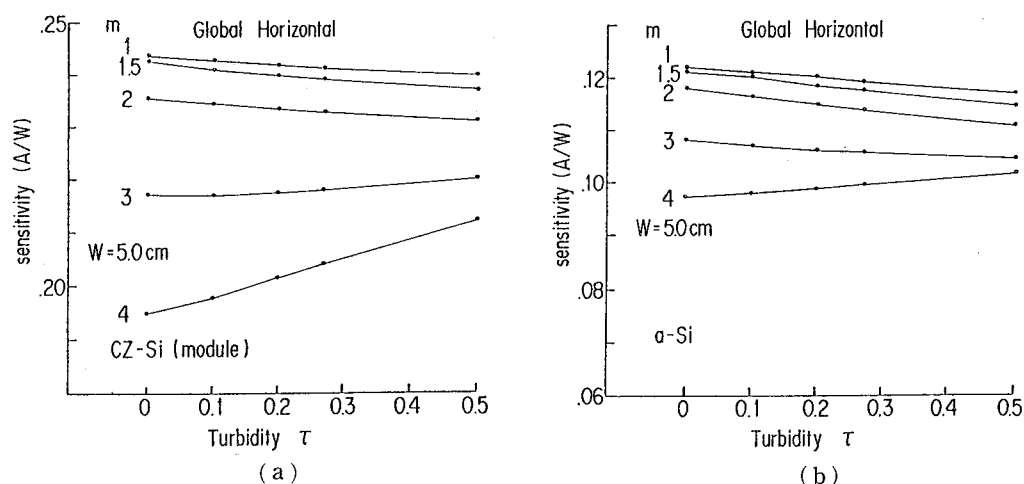


図5.35 水平面全天日射下における(a)モジュール構造 c-Si セル, (b)モジュール構造 a-Si セル, のセル感度特性。大気条件は $W = 5.0$ cm, $m = 1, 1.5, 2, 3, 4$ で, 混濁度 τ に対してプロットされている。

図5.35は、同じく直達日射の図5.32に対応しており、降水量 $W = 5.0$ cm, エアマス $m = 1, 1.5, 2, 3, 4$ の場合において、混濁度 τ に対してプロットしたものである。いずれの太陽電池のセル感度も、混濁度 τ が大きくなるに従って減少している。しかし、この変化は直達日射の場合に比して非常に小さい。 $m = 1$, $W = 5.0$ cm の大気条件において混濁度 τ が 0.1 から 0.5 に変化するとき、c-Si 太陽電池では1.14%, a-Si 太陽電池では3.54%, の減少にすぎない。これは散乱をうけた太陽光のかなりの部分が散乱日射として回収されるためで、全天日射下における測定の安定性を裏づけ

ている。

これらの計算結果は直達日射の場合と並べて表5.8に示した。全天日射下におけるセル感度、特に a-Si 太陽電池のセル感度は、直達日射下よりも大気条件に依存せず測定が安定であることを示している。但し、a-Si 太陽電池の場合は、全天日射下においても降水量 W の変化に対してはセル感度の変動が大きく、従って a-Si 太陽電池の出力測定をする場合、降水量の変動の少ない条件で行うか、あるいは降水量の測定を精度よく行う必要がある。37°傾斜面全天日射下におけるセル感度特性の近似計算については、後程、詳細に述べることにするが、降水量、混濁度が変化したときのエアマス1.5におけるセル感度の変動については、参考のために表5.8に記しておいた。直達日射下と水平面全天日射下の中間のセル感度特性を示し、c-Si 太陽電池の場合は、水平面全天日射の場合と同様に安定な測定が可能であることを示している。最後に、著者等の理論計算結果は Treble³⁷⁾, Curtis³⁸⁾, Whitaker³⁹⁾の実験値と良く一致していることを述べておく。

4) 37°傾斜面全天日射下におけるセル感度特性——水平面全天日射からの近似計算——

水平面全天日射計算から近似的に37°傾斜面における太陽電池のセル感度特性を求めた。この近似計算手法は単純で、37°傾斜した太陽電池に太陽側から全天日射光がすべて入射するとして、全く同じ太陽電池の分光感度 $R(\lambda, \theta)$ 、水平面全天日射の分光放射照度 $E(\lambda, \theta)$ を使用して計算した。実際には、太陽電池の背後部分からの散乱日射を減じ、地表面反射による成分を加え、その上で散乱日射のスペクトル分布・角度分布を正確に計算する必要があるが、その場合、散乱日射を全方位角で平均するという手法をとることができず、非常に長い計算時間がかかる。そこで、太陽側からの散乱日射強度が最も強いことを考えて、傾斜角度が低い場合にはこのように扱えるものと考えた。計算結果は、直達日射、水平面全天日射の場合と同じように図5.36と図5.37に示した。そして、大

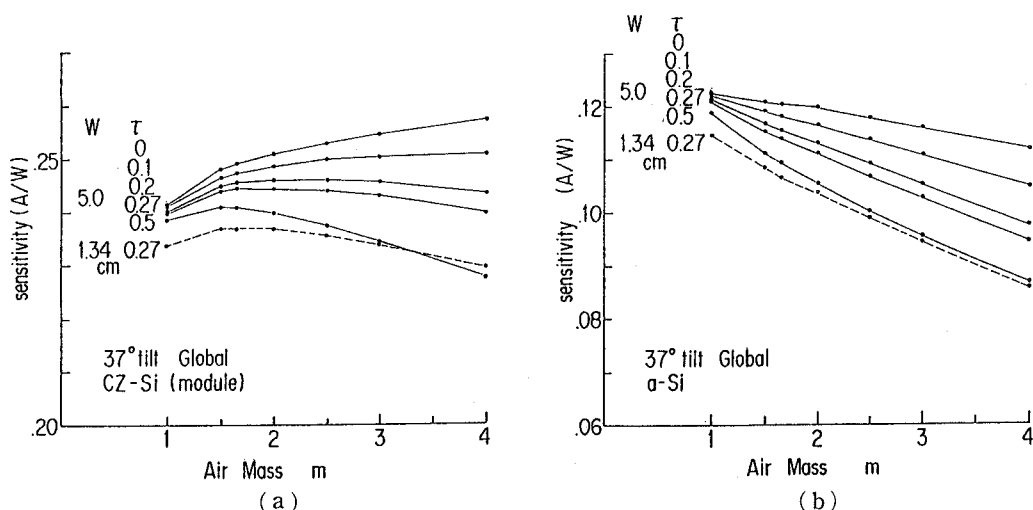


図5.36 37°傾斜面全天日射下における(a)モジュール構造 c-Si セル, (b)モジュール構造 a-Si セル, のセル感度特性。大気条件は $W=5.0$ cm, $\tau=0, 0.1, 0.2, 0.27, 0.5$ (実線) そして $W=1.34$ cm, $\tau=0.27$ (破線) で、エアマス m に対してプロットされている。

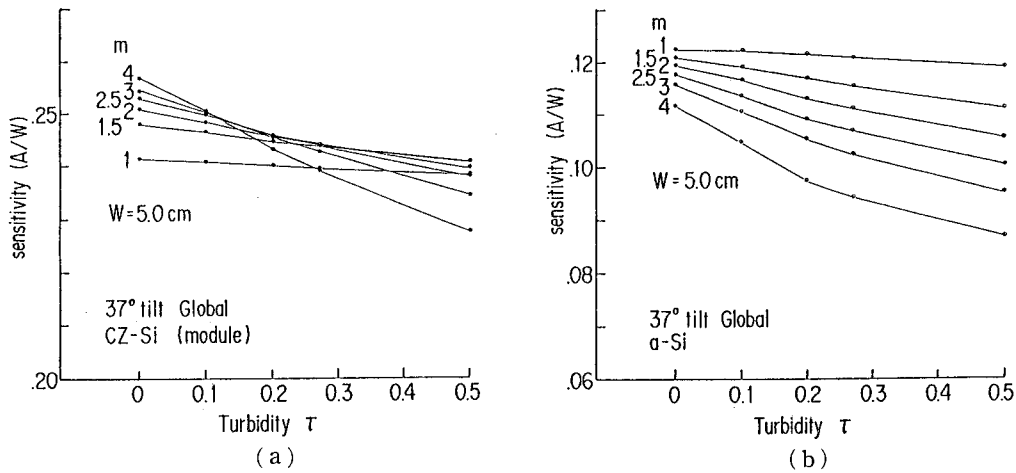


図5.37 37°傾斜面全天日射下における(a)モジュール構造 c-Si セル, (b)モジュール構造 a-Si セル, のセル感度特性。大気条件は $W = 5.0$ cm, $m = 1, 1.5, 2, 3, 4$, で, 混濁度 τ に対してプロットされている。

気パラメータが変化した場合のセル感度の変動については, 表5.8に37°傾斜面全天日射データを加えて表5.10として示した。(エアマス1.67は37°傾斜面に太陽光が垂直に入射する場合である。) 著者の傾斜面全天日射下における実測例⁴⁰⁾も, この近似計算結果と一致した傾向を示している。

この表5.10の計算データをもとにして, IEC TC-82 委員会の認めている3種類のレファレンス太陽電池屋外較正法⁴¹⁾, すなわち①直達日射法 (Direct Sunlight Method), ②水平面全天日射法 (Global Sunlight Method), ③傾斜面 (直達光に垂直) 全天日射法 (Total Sunlight Method), について考えてみる。a-Si 太陽電池の標準測定法は研究に着手したばかりであるので, 以下の議論は c-Si 太陽電池を中心にすすめることにする。エアマス m , 混濁度 τ , 降水量 W の変化に対するセル感度の変動という面から太陽電池出力測定の安定性を考えるとき, 太陽高度が高くエアマスが1.5以下の場合には, 水平面全天日射法が最も安定していることになる。エアマスが増大する場合も, エアマスの変化による変動は大きくなるがエアマスは正確に把握することができ, 混濁度 τ , 降水量 W の変化に対して基本的に変動の少ないこの手法が最も優れていると言える。しかし, この水平面全天日射法には, 測定チャンスが少ないという大きな欠点がある。エアマスが大きくなると, 測定に必要な $70 \sim 80 \text{ mW/cm}^2$ 以上の日射強度が得られなくなることで, 表5.9に示したように入射角度依存性による測定誤差が大きくなること, これらの理由のために水平面全天日射法の場合は太陽高度の高い条件下で測定がなされねばならない。

一方, 直達日射法の場合は, 表からもわかるようにエアマスの変化に対しては安定しているが, 大気パラメータの変化に敏感で全天日射法よりも変動が大きくなっている。また, 日射強度の面でも大気条件が悪い場合には不足気味になり, 気象条件の良くない日本においては, 測定チャンスが少ない。

表5.10 37°傾斜面全天日射下におけるモジュール構造 c-Si, a-Si セルの大気条件変化に伴うセ
ル感度変化 (%)。

	Variation of cell sensitivity with change of atmospheric parameter (%)											
	$\tau = 0.1 \rightarrow 0.27, W = 5.0$			$\tau = 0.1 \rightarrow 0.50, W = 5.0$			$W = 1.34 \rightarrow 5.0, \tau = 0.27$			$W = 5.0, \tau = 0.27$		
	m = 1	m = 1.5	m = 1.67	m = 1	m = 1.5	m = 1.67	m = 1	m = 1.5	m = 1.67	m = 1 \rightarrow 1.5	m = 1.5 \rightarrow 2	m = 1 \rightarrow 2
For the global horizontal irradiance												
module-packaged c-Si cell	0.55	0.84	0.84	1.14	1.68	1.64	2.57	2.79	2.84	0.97	3.66	2.69
a-Si cell	1.49	2.22	2.32	3.54	4.95	5.12	5.39	5.91	6.06	1.56	4.80	3.23
*For the 37° tilted												
module-packaged c-Si cell	0.47	1.09	1.33	0.93	2.34	2.75	2.50	2.96	3.05	1.69	1.88	0.19
a-Si cell	1.08	3.25	3.72	2.76	6.96	7.94	5.27	6.18	6.38	4.72	8.44	3.72
For the direct normal irradiance												
module-packaged c-Si cell	0.67	1.23	1.43	1.64	3.07	3.60	3.05	3.47	3.53	0.84	1.04	0.20
a-Si cell	4.00	6.29	7.07	8.98	14.24	16.03	5.99	6.84	7.09	4.25	9.30	5.06

これら二つの方法の中間が傾斜面全天日射法で、水平面全天日射法よりも出力測定の安定性は劣るが、エアマスの変化に対する変動は少なくなり、その上、日射強度も大きく測定チャンスが大幅に増大する。結論としては、出力測定の安定性に加えて測定チャンスを考えると、日本における屋外測定法としては、傾斜面（直達光に垂直）全天日射法が最も適切であると言える。

5.5 まとめ

本章では、太陽電池の標準出力測定法を確立するにあたって、各種の大気条件下における太陽光スペクトル分布と、その太陽光下における太陽電池出力の予測を行った。

まず、結晶シリコン太陽電池とアモルファスシリコン太陽電池の分光感度モデル、そして、各種の大気条件（大気パラメータ）における自然太陽光の分光放射モデルを開発することにより、この両者の積和から各種の大気条件における太陽電池出力の理論計算を可能にした。著者の理論計算は、分光感度の入射角度依存性と散乱日射の角度分布特性を考慮した初めてのもので、この理論計算から大気パラメータ変化による入射スペクトルの変化、太陽電池出力の変化の様子を明らかにした。そして、大気パラメータ変化に対して比較的安定な太陽電池出力の測定が可能な条件（大気条件）の範囲を見い出した。また、最も安定な屋外測定法は、太陽高度の高い場合における水平面全天日射法であることを理論計算で示した。

参考文献

- 1) Y. Miyake, R. Shimokawa, Y. Nakanishi and Y. Hamakawa : Solar Cells 20 (1987) 127.
下川, 三宅, 中西, 浜川 : 電子技術総合研究所イ報, 第51巻5, 6号(昭和62年) p.424.
- 2) R. Shimokawa, F. Nagamine and Y. Hayashi : Solar Cells 15 (1985) 39.
下川, 長峰, 林 : 電子技術総合研究所イ報, 第49巻2号(昭和60年) p.137.
- 3) R. Shimokawa, M. Nishiura, M. Horiguchi and Y. Hamakawa : Solar Cells 19 (1987) 149.
- 4) R. Shimokawa, Y. Miyake, Y. Nakanishi, Y. Kuwano and Y. Hamakawa : Jpn. J. Appl. Phys. 25 (1986) L102.
- 5) R. Shimokawa, Y. Miyake, Y. Nakanishi, Y. Kuwano and Y. Hamakawa : Solar Cells 19 (1987) 59.
- 6) 羽生, 鈴木, 長坂 : 電子技術総合研究所研究報告第812号, 昭和56. p.3.
- 7) E. C. Y. Inn and Y. Tanaka : J. Opt. Soc. Amer. 43 (1953) 870.
- 8) T. G. Adiks, Y. S. Georgiyevskiy, M. S. Malkevich and N. S. Filippova : Izv. Acad. Sci. USSR Atmos. Oceanic Phys. 8 (1972) 210.
- 9) P. Koepke and H. Quenzel : Appl. Optics 17 (1978) 2114.

- 10) D. M. Gates : J. Opt. Soc. Amer. **50** (1960) 1299.
- 11) ㈱日本電気工業会「太陽エネルギー利用システム調査研究」(昭和55年度サンシャイン計画委託調査研究成果報告書) 昭和56. p.279.
- 12) R. Shimokawa and Y. Hayashi : Jpn. J. Appl. Phys. **21** (1982) L 558.
IEEE Trans. Electron Devices **ED-30** (1983) 1770.
- 13) 下川, 堀口, 浜川 : 電子技術総合研究所イ報, 第49巻 2 号 (昭和60年) p. 122.
- 14) K. W. Boer : Terrestrial Photovoltaic Measurements- II Workshop Proceedings, ERDA/ NASA- 1022/76/10, Baton Rouge, LA, Nov. 1976, p. 17.
- 15) H. B. Curtis : Proc. 2nd Workshop on Terrestrial Photovoltaic Measurements, Baton Rouge, LA, November, 10-12, 1976, in NASA Conf. Publ. CP-2010 (1976) 93-107.
- 16) R. Matson, R. Bird and K. Emery : SERI Tech. Rep. TR-612-964, September 1981, p. 55 (Solar Energy Research Institute).
- 17) R. E. Bird : Solar Cells **7** (1982-1983) 107.
- 18) R. E. Bird : Solar Energy **32** (1984) 461.
- 19) R. Hulstrom, R. Bird and C. Riordan : Solar cells **15** (1985) 365.
- 20) K. Selcuk and J. I. Yellott : Solar Energy **6** (1962) 155.
- 21) M. Tanaka : J. Meteorol. Soc. Jpn. **49** (1971) 321.
- 22) J. E. Hansen : J. Atmos. Sci. **28** (1) (1971) 120.
- 23) K. N. Liou : An Introduction to Atmospheric Radiation (Academic Press. New York, 1980) p.176.
- 24) R. Matson, R. Bird and K. Emery : SERI Document, SERI/TR-612-964, Sept. 1981, p.3.
- 25) K. F. Palmer and D. Williams : Appl. Opt. **14** (1) (1975) 208.
- 26) R. A. McClatchey et al : Rep. Meet. of WMO-ISCU Joint Scientific Committee experts on aerosol and climate, Geneva, October 27-31, 1980, p.24.
- 27) J. E. Hansen : J. Atmos. Sci. **26** (1969) 478.
- 28) W. J. Wiscombe : J. Quant. Spectros. and Radait. Transfer **16** (1976) 637.
- 29) J. E. Hansen and L. D. Travis : Space Sci. Rev. **16** (1974) 602.
- 30) R. A. McClatchey, R. W. Fenn, J. E. A. Selby, F. F. Bolz and J. S. Garing : Optical Properties of the Atmosphere, 3rd edn., Air Force System Command, 1972, p.4.
- 31) M. Kerschgens, E. Rasckke and U. Reuter : Beitr. Phys. A tmos. **49** (1976) 81.
- 32) M. Iqbal : An Introduction to Solar Radiation, Academic Press, New York, 1980, pp. 44, 127.
- 33) C. Frohlich and G. E. Shaw : Appl. Opt. **19** (1980) 1773.
- 34) R. E. Bird and R. L. Hulstrom : Solar Cells **8** (1983) 85.
- 35) O. Heavens : Optical Properties of Thin Solid Films, Academic Press, New York, 1955.

- 36) R. Shimokawa and Y. Hayashi : J. Appl. Phys. 59 (1986) 2571.
- 37) F. C. Treble : Proc. 1st Commission of the European Communities Conf. on Photovoltaic Solar Energy, Luxembourg, September 27-30, 1977, Reidel, Dordrecht, 1978, pp.732-744.
- 38) H. B. Curtis : Proc. 14th Photovoltaic Specialists Conf., San Diego, CA, January 7-10, 1980, IEEE, New York, 1980, pp.500-505.
- 39) R. D. Whitaker, A. W. Purnell and G. A. Zerlaut : Solar Cells 7 (1982-1983) 135-146.
- 40) R. Shimokawa, F. Nagamine, Y. Miyake, K. Fujisawa and Y. Hamakawa : Jpn. J. Appl. Phys. 26 (1987) 86.
- 41) Details are written in "Requirements for reference solar cells along with four currently in use methods for calibrating primary reference solar cells, IEC TC-82 Draft 82 (Secretariat) 24, June 1985".

第6章 レファレンス太陽電池方式による太陽電池出力の標準測定法

6.1 まえがき

太陽電池セル・モジュールの出力特性を評価するとき、通常の電氣的な測定技術のほかに、特に重要なことは、照射光の放射照度とそのスペクトル分布を正確に再現性よく設定しなければならないことである。しかし、自然太陽光の場合には、設置場所、天候、月・日・時等によってスペクトル分布が変化して一定せず、また人工光源の場合には、スペクトル分布が未だ自然太陽光のものからほど遠い状態にある。もし、照射光量が波長選択性のない日射計やサーモパイルで計測されるならば、太陽電池の出力電流測定値はかなりのバラツキ、誤差を示すことになる¹⁾。このような照射光のスペクトル分布の相違による誤差を縮少するために、レファレンス太陽電池方式による太陽電池出力測定（設定）法が提案され²⁾、現在、この方法が太陽電池出力の標準測定法として国際的に確立されつつある^{3),4)}。

本章では、このレファレンス太陽電池方式による太陽電池出力の標準測定法を確立するにあたってなされた研究を中心に、レファレンス太陽電池方式の有効性と限界を明らかにする。まず、6.2節で、レファレンス太陽電池方式の原理について述べた上で、6.3節において、レファレンス太陽電池方式における出力測定誤差の新しい分析方法⁵⁾を紹介し、この手法に基づいて測定誤差を生み出す要因を解明する。続いて、各種の自然太陽光、人工太陽光下における単結晶 Si 太陽電池の出力測定誤差の計算⁶⁾を行い、レファレンス太陽電池方式の有効な範囲と限界を明確にする。6.4節では、標準測定法としてのコンセンサスを得るために行った太陽電池の持回り測定の結果を分析し、レファレンス太陽電池方式の有効性と限界を明らかにする^{7),8)}。また、持回り測定実験の際に試みた簡易的な分光放射照度分布の測定、そして、これに基づいてなされたスペクトル分布補正による測定誤差の縮少について検討する。6.5節では、モジュール構造において発見した光収集エンハンスメント（photon collection enhancement）の効果⁹⁾、ソーラシミュレータと太陽電池セル・モジュール間の反射の効果について述べた上で、モジュール構造のレファレンス太陽電池の適正構造について検討する¹⁰⁾。最後の6.6節では、放射照度測定以外の重要な電気測定技術についての事項も含めて、確立された太陽電池出力の標準測定法^{3),4)}について述べる。

6.2 レファレンス太陽電池方式による放射照度測定（設定）

測定光源の相違による測定誤差を縮少するために、被測定太陽電池と同じ相対分光感度をもちそ

して予め規約された標準太陽光下における出力値に較正されたレファレンス太陽電池（較正值は放射照度 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ の標準太陽光下における短絡電流値で表される。）を使用して、照射光（自然太陽光、人工太陽光）の光量を計測あるいは調整し、等価的に標準太陽光下における太陽電池の電気的性能を評価する方法が、レファレンス太陽電池方式と呼ばれている^{1),2)}。この方式が採られるならば、レファレンス太陽電池は標準太陽光と照射光のスペクトル分布の違いを自動的に補正する機能を果たすことになり、規約された標準太陽光のもとにおける出力測定が実効的に可能となる。

太陽電池の出力電流（短絡電流） I は、一般に太陽電池の分光感度 $R(\lambda)$ と照射光の分光放射照度 $E(\lambda)$ の積を全波長にわたって積分した形、

$$I = \int E(\lambda) \cdot R(\lambda) d\lambda$$

で表される。以下の分析においては、関数を明確に表示するために表6.1に定義した記号を使用し、そして、出力電流 I には太陽電池の関数（レファレンス太陽電池 ref, あるいは被測定太陽電池 cell）と照射光源の関数（標準太陽光 std, あるいは測定光源 meas）を表す2つの記号を付して表示することにする。

レファレンス太陽電池方式に従って太陽電池の出力測定を行う場合、まず標準太陽光（分光放射照度 $E_{\text{std}}(\lambda)$ ）のもとで較正されたレファレンス太陽電池（分光感度 $R_{\text{ref}}(\lambda)$ ）を使用して、その短絡電流 I が較正值を満足するように光量を調整する。これは、

$$\begin{aligned} I_{\text{ref-meas}} &= \int E_{\text{meas}}(\lambda) R_{\text{ref}}(\lambda) d\lambda \\ &= I_{\text{ref-std}} \left(= \int E_{\text{std}}(\lambda) R_{\text{ref}}(\lambda) \cdot d\lambda \right) \end{aligned} \quad (6.1)$$

を満足するように測定光源の放射照度（ $E_{\text{meas}}(\lambda)$ ）を定めることを意味する。光量調整の難しい場合（自然太陽光の場合など）は、測定された分光放射照度 $E_{\text{meas}}(\lambda)$ に $(I_{\text{ref-std}}/I_{\text{ref-meas}})$ を乗じることによって等価的に (6.1) 式を満足する分光放射照度を得ることができる。この場合は、以下の式の $E_{\text{meas}}(\lambda)$ を $E_{\text{meas}}(\lambda) \times (I_{\text{ref-std}}/I_{\text{ref-meas}})$ とおきかえることになる。次に、この人工太陽光の下で被測定太陽電池（分光感度 $R_{\text{cell}}(\lambda)$ ）の出力測定がなされる。この出力電流は

$$I_{\text{cell-meas}} = \int E_{\text{meas}}(\lambda) \cdot R_{\text{cell}}(\lambda) d\lambda \quad (6.2)$$

と表される。ここで、レファレンス太陽電池と被測定太陽電池の相対分光感度が同じであることを

表6.1 記号の定義

$E_{\text{std}}(\lambda)$	: AM1.5標準太陽光の絶対分光放射照度
$E_{\text{sim}}(\lambda)$	: 測定光（人工太陽光）の絶対分光放射照度
$R_{\text{ref}}(\lambda)$	: レファレンス太陽電池の絶対分光感度
$R_{\text{cell}}(\lambda)$	: 被測定太陽電池の絶対分光感度

考えると $R_{\text{cell}}(\lambda) = kR_{\text{ref}}(\lambda)$ と表すことができ、(6.1) と (6.2) 式から

$$\begin{aligned}
 I_{\text{cell-meas}} &= k \int E_{\text{meas}}(\lambda) R_{\text{ref}}(\lambda) d\lambda \\
 &= k \int E_{\text{std}}(\lambda) R_{\text{ref}}(\lambda) d\lambda \\
 &= \int E_{\text{std}}(\lambda) R_{\text{cell}}(\lambda) d\lambda \\
 &= I_{\text{cell-std}}
 \end{aligned} \tag{6.3}$$

が導かれる。これがレファレンス太陽電池方式の原理である。

6.3 レファレンス太陽電池方式における測定誤差

レファレンス太陽電池方式の測定精度上の重要な鍵は、レファレンス太陽電池の選択と較正にある。後者については後程述べるが、前者は、いかに被測定太陽電池の相対分光感度と合致した感度をもつレファレンス太陽電池を選択できるかということである。実際問題として、太陽電池生産工程上の特性のバラツキ、また、太陽電池の分光感度測定技術上の問題、等によるレファレンス太陽電池の選択の誤りが原因で、被測定太陽電池とレファレンス太陽電池の分光感度の不一致が生じ測定誤差が生まれる。特に、標準太陽光の分光放射照度から大きくはずれた特性をもつ人工太陽光のもとでは大きな誤差を生じる可能性がある。更に、実用上の便宜のために、分光感度特性の異なっていくつかのレファレンス太陽電池を ready-made で製作し、その中から被測定太陽電池の分光感度に近いレファレンス太陽電池を選択することが考えられる。このように考えてくると、照射光のスペクトル分布および太陽電池の分光感度の不一致による出力測定誤差が当然予測されねばならず、事前の誤差計算分析が重要となる。

本節では、新しい誤差計算分析の手法、そして、それに基づいてなされた GaAs 太陽電池、単結晶 Si 太陽電池の誤差計算例について述べる⁵⁾。そして、被測定太陽電池の分光感度とレファレンス太陽電池の分光感度の差異が大きい程、出力測定誤差は大きくなるという従来の考え方^{11),12)}に誤りが含まれていることを明らかにする。

6.3.1 測定誤差分析法

6.2項で示されたレファレンス太陽電池方式に従って、人工太陽光のもとで太陽電池の出力測定がなされる場合、 $R_{\text{cell}} \neq kR_{\text{ref}}(\lambda)$ のときには測定誤差が生じる。この場合の補正項を M 、測定誤差を D と表すと

$$\begin{aligned}
 M &= \frac{I_{\text{cell-meas}}}{I_{\text{cell-std}}} \quad (\text{光量調整の難しい場合は, } = \frac{I_{\text{cell-meas}}}{I_{\text{cell-std}}} \cdot \frac{I_{\text{ref-std}}}{I_{\text{ref-meas}}}) \tag{6.4} \\
 D &= M - 1 \\
 &= \frac{I_{\text{cell-meas}} - I_{\text{cell-std}}}{I_{\text{cell-std}}}
 \end{aligned}$$

$$= \frac{\int \{E_{\text{meas}}(\lambda) - E_{\text{std}}(\lambda)\} \cdot R_{\text{cell}}(\lambda) d\lambda}{\int E_{\text{std}}(\lambda) R_{\text{cell}}(\lambda) d\lambda} \quad (6.5)$$

となる。

分析のために、標準太陽光と光量調整された人工太陽光の分光放射照度の差を、 $\Delta E(\lambda)$ という新しい関数で表すと、

$$\Delta E(\lambda) = E_{\text{meas}}(\lambda) - E_{\text{std}}(\lambda) \quad (6.6)$$

となる。すると測定誤差 D は (6.5) 式から

$$D = \frac{\int \Delta E(\lambda) R_{\text{cell}}(\lambda) d\lambda}{\int E_{\text{std}}(\lambda) R_{\text{cell}}(\lambda) d\lambda} \quad (6.7)$$

となる。また、(6.1) 式から ΔE は

$$\int \Delta E(\lambda) R_{\text{ref}}(\lambda) d\lambda = 0 \quad (6.8)$$

を満足する。この測定誤差 D を計算するには、被測定太陽電池の分光感度 $R_{\text{cell}}(\lambda)$ は相対値で与えられれば十分で、一般に $aR_{\text{cell}}(\lambda)$ (a は任意の定数) と表すことができ、(6.7) 式は

$$D = \frac{\int \Delta E(\lambda) \cdot aR_{\text{cell}}(\lambda) d\lambda}{\int E_{\text{std}}(\lambda) \cdot aR_{\text{cell}}(\lambda) d\lambda} \quad (6.9)$$

と表すことができる。

次に、(6.9) 式の分母が $I_{\text{ref-std}}$ に等しくなるように $aR_{\text{cell}}(\lambda)$ を規格化した上で、レファレンス太陽電池の分光感度と被測定太陽電池の規格化された分光感度との差を $\Delta R(\lambda)$ という新しい関数で表すと

$$\Delta R(\lambda) = aR_{\text{cell}}(\lambda) - R_{\text{ref}}(\lambda) \quad (6.10)$$

$$a = \frac{\int E_{\text{std}}(\lambda) R_{\text{ref}}(\lambda) d\lambda}{\int E_{\text{std}}(\lambda) R_{\text{cell}}(\lambda) d\lambda}$$

となる。従って、(6.8) 式と (6.9) 式から測定誤差 D は

$$D = \frac{\int \Delta E(\lambda) \cdot \Delta R(\lambda) d\lambda}{I_{\text{ref-std}}} \quad (6.11)$$

と表すことができるようになり、分母が一定であるので、この二つの関数 $\Delta E(\lambda)$ と $\Delta R(\lambda)$ を分析することによって測定誤差の大きさを決定する要因を明確にすることができる。

6.3.2 誤差分析計算例

前項で示された分析手法に従って、GaAs 太陽電池の出力電流の測定誤差の要因分析を行った⁹⁾。図6.1に示される分光感度特性をもつ5個の GaAs 太陽電池を選び、そのうちの1つのセル“R”をレファレンス太陽電池、残りの4つを被測定太陽電池W, X, Y, Zとした。測定光源としては、実際に使用されている Xe ランプソーラシミュレータ (以後シミュレータと呼ぶ) の中から、AM1.5 太陽光をシミュレートしたシミュレータIII、紫外光の強いシミュレータI、そして、赤外光の強いシミュレータIVを選択した。これらの光源の分光放射照度特性は、5章の図5.13に示されている。また、標準太陽光としては AM 1.5 の暫定標準太陽光¹³⁾を使用した。(6.5) 式から計算された各種のソーラシミュレータ下における被測定 GaAs 太陽電池の出力電流の測定誤差 D を表6.2に示した。シミュレータI, III, IV, いずれの場合も、レファレンス太陽電池と被測定太陽電池の分光感度の不一致が大きくなるに従い、測定誤差 D は通常言われるように増加する傾向にある。例えば、シミュレータIV—太陽電池Zの場合などはかなり大きな誤差となっている。しかし、必ずそのようになる訳ではなく、シミュレータI—太陽電池Zの場合のように小さな誤差となる場合もある。他方、分光感度の不一致が小さい太陽電池では一般に測定誤差は小さくなるが、この場合においても、太陽電池YはシミュレータIのもとではかなり大きな誤差を示し、逆に、シミュレータIVのもとでは非常に小さな誤差となっている。また、標準太陽光に近いエネルギースペクトル分布をもつシミュレータIIIの場合も一般に期待されるように小さな誤差を示すのではあるが、太陽電池Wのようにかなり大きな誤差を示す場合も生ずる。

測定誤差の大きさは、前項の(6.6)式から計算された $\Delta E(\lambda)$ と、規格化された分光感度を使用して(6.10)式から計算された $\Delta R(\lambda)$ の両者の波長特性を比較し、 $\Delta E(\lambda) \cdot \Delta R(\lambda)$ 積の特性を考慮することによって理解することができる。図6.2に、シミュレータI, III, IVの25nm間隔で計算され

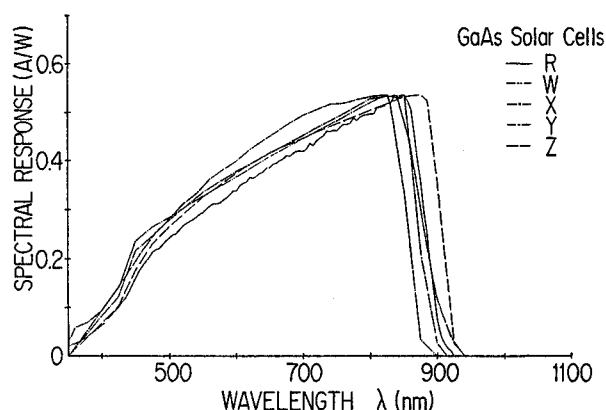


図6.1 誤差計算に用いられた各種 GaAs 太陽電池の分光感度特性。R：レファレンス太陽電池，W, X, Y, Z：被測定太陽電池

表6.2 GaAs 太陽電池W, X, Y, Zの出力測定誤差の計算値 (%)

Simulator	Calculated Error (%)			
	cell W	cell X	cell Y	cell Z
I (ultraviolet-rich)	4.76	1.84	2.27	0.84
III (air mass 1.5)	3.29	1.12	0.85	-1.15
IV (infrared-rich)	-2.72	-1.81	0.05	5.03

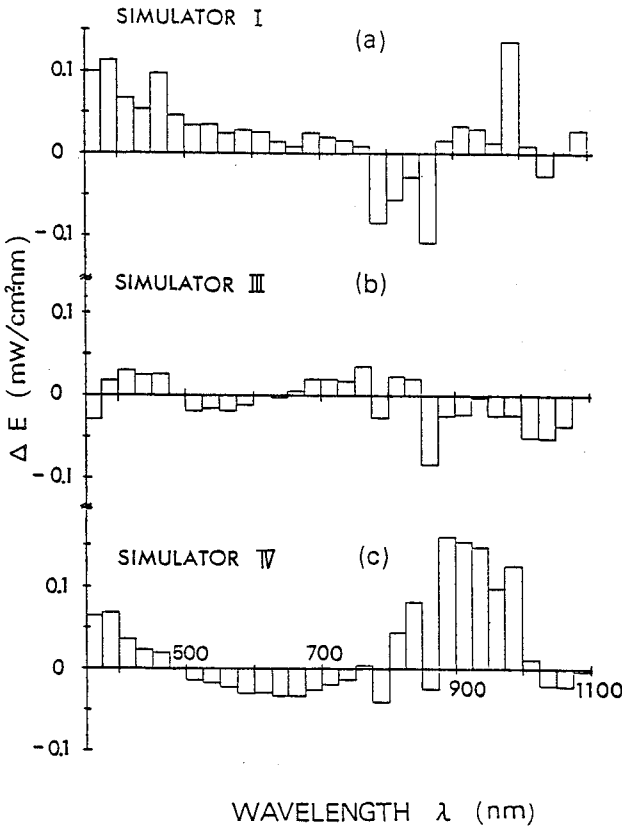


図6.2 標準太陽光と光量調整されたシミュレータ I, III, IVの分光放射照度の差 $\Delta E(\lambda)$

た $\Delta E(\lambda)$ 、そして、図6.3に被測定太陽電池 W, X, Y, Z の $\Delta R(\lambda)$ の曲線が示されている。 $\Delta R(\lambda)$ は、波長 825nm～925nm 領域で大きな値を示し、この領域における $\Delta E(\lambda)$ と $\Delta R(\lambda)$ のお互いの波長特性が大きな誤差要因となる。まず、分光感度の違いの大きな太陽電池 Z について考えてみる。太陽電池 Z の $\Delta R(\lambda)$ は、900nm 近傍で最大となっているが、 $\Delta E(\lambda)$ は、シミュレータ I, III ではこの 900nm 付近で小さな値を示し、シミュレータ IV では最高値を示している。その結果として、 $\Delta E(\lambda) \cdot \Delta R(\lambda)$ 積は、シミュレータ I, III では小さな値を示し、シミュレータ IV では大きな値を示すことになる。図6.4に太陽電池 Z の $\Delta E(\lambda) \cdot \Delta R(\lambda)$ 積の波長特性を示すが、これを全波長について積分したものが測定誤差を表す。明らかに、 $\Delta R(\lambda)$ の最大値と $\Delta E(\lambda)$ の最大値の一致しているシミュレータ IV の場合に、表6.2に示されたような大きな測定誤差が生じることになる。

次に、分光感度の違いの小さな太陽電池 Y を考えてみると、 $\Delta R(\lambda)$ は 850nm 近傍で最高値を示し、シミュレータ I, III の $\Delta E(\lambda)$ もこの近傍で最高値を示すので、 $\Delta E(\lambda) \cdot \Delta R(\lambda)$ 積は大きな値になる。特に、シミュレータ I の場合は、それに加えて $\Delta E(\lambda)$ と $\Delta R(\lambda)$ の極性が全波長にわたって一致し、図6.5(a)に示すように、 $\Delta E(\lambda) \cdot \Delta R(\lambda)$ 積は常に正の値を示し、その結果、この波長積分で表現される測定誤差はより一層大きなものとなる。逆に、シミュレータ IV の $\Delta E(\lambda)$ は 850nm 近傍で小さな値を示すのに加えて $\Delta E(\lambda)$ と $\Delta R(\lambda)$ の極性は互いに不規則で、結果として図6.5(c)に示すように $\Delta E(\lambda) \cdot \Delta R(\lambda)$ 積は正と負を交互にくり返し、この積分値は互いにキャンセルされて小さいものとなり、測定誤差は極端に小さくなる。また、シミュレータ III—太陽電池 W の組合せが大きな誤差値を示すことは、図6.2の $\Delta E(\lambda)$ と図6.3の $\Delta R(\lambda)$ がいずれも 850nm 付近で最高値となり、 $\Delta E(\lambda) \cdot \Delta R(\lambda)$ 積が大きな値をもつためであることがわかる。

Si 太陽電池の場合も、同様に出力電流の測定誤差計算がなされ、表6.3のような結果が得られた。図6.6に示される分光感度特性を持つ 5 個の Si 太陽電池を選び、そのうちの 1 つ、セル “3” をレファレンス太陽電池、残りの 4 個を被測定太陽電池とした。表6.3に示した測定誤差の大きさを決定

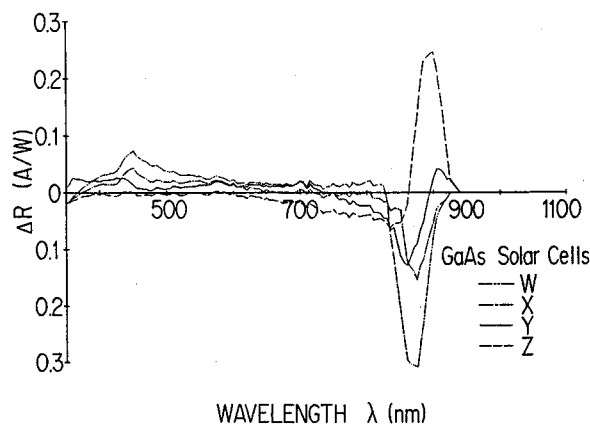


図6.3 レファレンス太陽電池と規格化された被測定太陽電池 W, X, Y, Z の分光感度の差 $\Delta R(\lambda)$

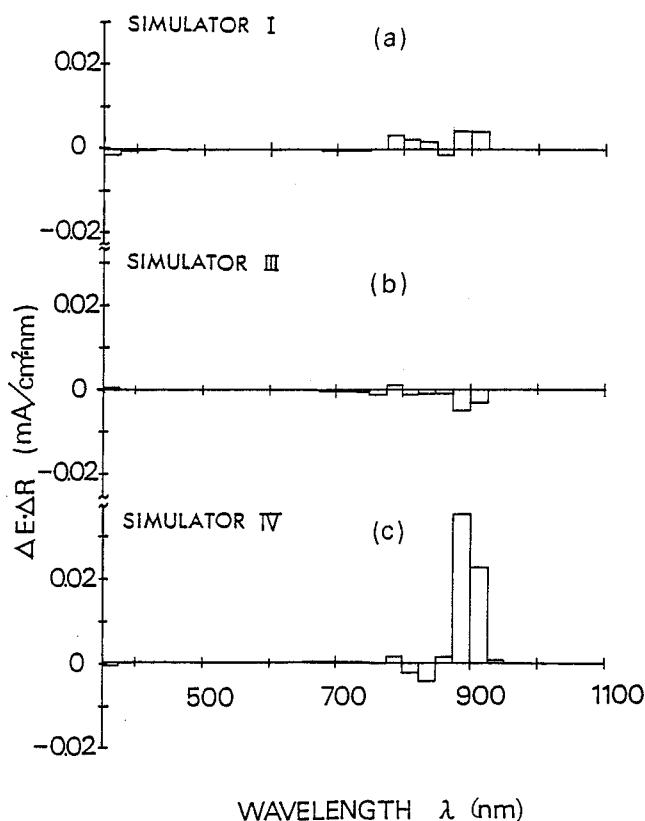


図6.4 被測定太陽電池Zの $\Delta E(\lambda) \cdot \Delta R(\lambda)$ 特性

する要因は、GaAs 太陽電池の場合と同様に、 $\Delta E(\lambda)$ 曲線 (図6.7) と $\Delta R(\lambda)$ 曲線 (図6.8) の積 $\Delta E(\lambda) \cdot \Delta R(\lambda)$ の特性を考えることによって理解できる。例えば、レファレンス太陽電池“3”から大きくそれた分光感度特性をもつ太陽電池“1”の場合を考えてみると、シミュレータIVのもとでは誤差が大きくなっているが、シミュレータIのもとでは予想よりはるかに小さなものとなっている。これは、 $\Delta E(\lambda)$ と $\Delta R(\lambda)$ の積が、前者では波長 400nm~1,000nm の間において同符号で加算的で、後者では異符号で減算的であるためである。

6.3.3 結晶 Si 太陽電池の測定誤差計算

被測定太陽電池とレファレンス太陽電池、そして、測定光源と標準太陽光の間の分光特性の不一致による出力誤差の計算解析を行った⁶⁾。5.2.2項で述べた結晶シリコン太陽電池の分光感度モデルを使用して、拡散長 $L=120\mu\text{m}$ のシリコン太陽電池をレファレンス太陽電池、他の拡散長の異なったシリコン太陽電池を被測定太陽電池とした場合の、各種測定光源下における誤差計算結果を表6.4に示した。測定光源としては、5章の理論計算から求められた分光放射照度をもつ直達日射、

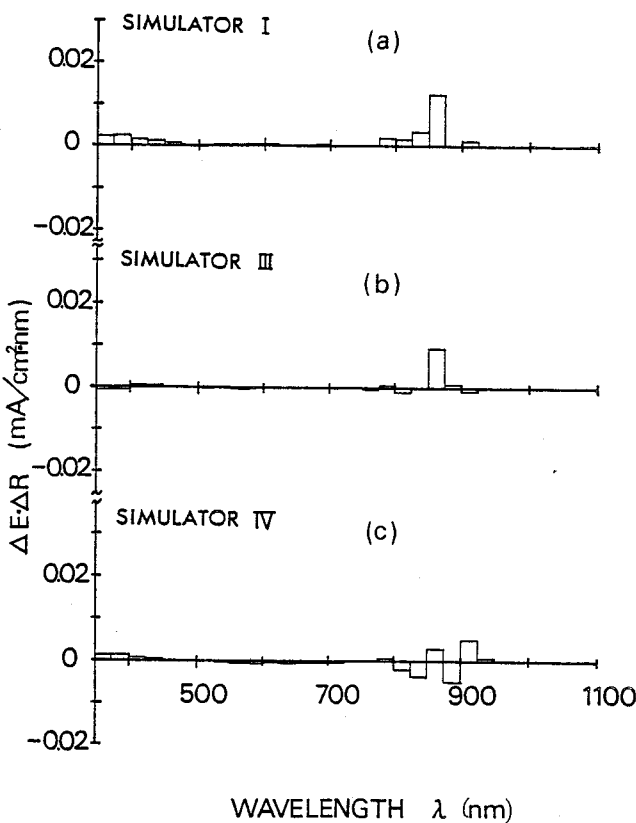


図6.5 被測定太陽電池Yの $\Delta E(\lambda) \cdot \Delta R(\lambda)$ 特性

表6.3 Si 太陽電池 1, 2, 4, 5 の出力測定誤差の計算値 (%)

Simulator	Calculated Error (%)			
	cell 1	cell 2	cell 4	cell 5
I (ultraviolet-rich)	-0.09	-0.09	0.34	0.69
III (air mass 1.5)	2.24	0.85	-0.90	-1.93
IV (infrared-rich)	-3.94	-1.07	1.20	1.69

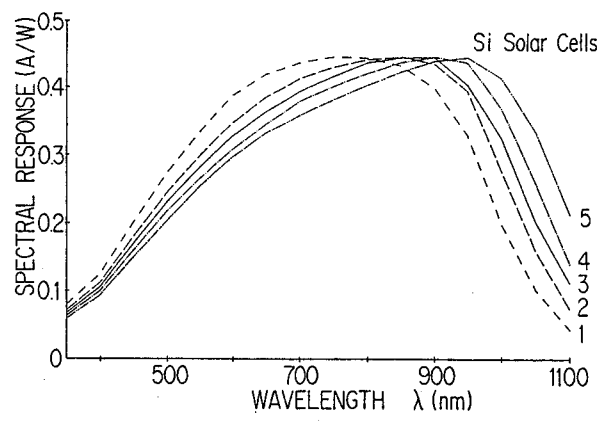


図6.6 差計算に用いられた各種 Si 太陽電池の分光感度特性。3：レファレンス太陽電池，1，2，4，5：被測定太陽電池

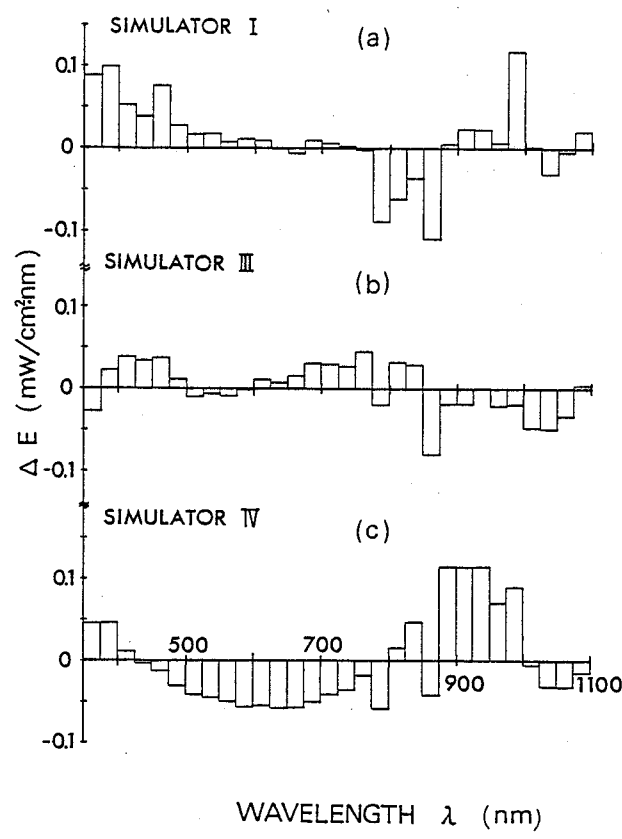


図6.7 標準太陽光と光量調整されたシミュレータ I，III，IVの分光放射照度の差 $\Delta E(\lambda)$ 。

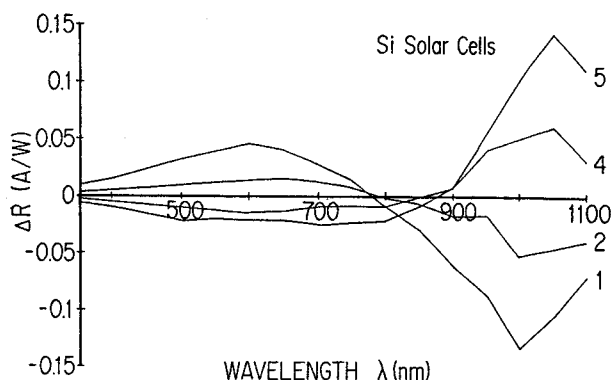


図6.8 レファレンス太陽電池と規格化された被測定太陽電池1,2,4,5の分光感度の差 $\Delta R(\lambda)$ 。

そして4種類のXe人工太陽光を用いた。測定誤差は％で表示されている。また、屋外測定における測定誤差が大気パラメータ m , β , W によって変化する様子を図6.9に示した。出力測定誤差は、分光感度が異なる程大きくなる傾向を示し、また、測定光源が標準太陽光からそれるほど大きくなっている。とりわけ、大気パラメータ m , β が異なる条件下で測定がなされるときは誤差が大きくなる。しかし、通常出力測定がなされる $m=1\sim3$, $\beta=0.02\sim0.20$, $W=2\sim30\text{mm}$ の大気パラメータの範囲内で考えると、分光感度の大きく異なるレファレンス太陽電池を使用しなければ、例えば、Cell-4（拡散長 $L=80\mu\text{m}$ ）の太陽電池を例にとって考えると、約1％の誤差にとどまる。

6.4 太陽電池の持回り測定実験と簡易スペクトル分布測定に基づく補正

レファレンス太陽電池方式による出力測定法の有効性については、これまで述べてきた誤差計算解析から明確にされたと思うが、この測定法を標準測定法として確立するには、各種の測定光源の下において測定精度が確認され関係機関のコンセンサスを得ることが必要である。このために、著者等は、財光産業技術振興協会に設けられた太陽電池標準化専門委員会を中心として、1982年に第1回⁷⁾、1984年に第2回⁸⁾の太陽電池持回り測定を行った。

第1回は、太陽電池出力測定の実態を把握すること、そして、単結晶Si太陽電池を中心としてレファレンス太陽電池方式の有効性を実証し啓蒙すること、を目的とした。その結果、多くの研究機関では確信のないままにサーモパイル、日射計などの熱的受光器、あるいはエアマス0で較正されたシリコン太陽電池、を使用してソーラシミュレータの光量を測定し、その下で太陽電池セル・モジュールの測定を行っていることが判った。各機関基準に従って光量 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ に設定されたソーラシミュレータ下において、同一の結晶シリコン太陽電池の出力測定を行った結果、出力測定値は図6.10に示すように24.8％ものバラツキを示した。

第2回は太陽電池の標準測定法を確立するにあたり次の3項を目的とした。

表6.4 誤差計算結果 (%)

Sunlight	Cell	CELL-1 (L=20 μ m)	CELL-2 (L=40 μ m)	CELL-3 (L=60 μ m)	CELL-4 (L=80 μ m)	CELL-5 (L=100 μ m)	CELL-6 (L=120 μ m)	CELL-7 (L=140 μ m)	CELL-8 (L=160 μ m)	CELL-9 (L=200 μ m)	CELL-10 (L=400 μ m)
m=1.5, $\beta=.07$, W=.5		-1.386	-0.740	-0.394	-0.180	-0.040	0.000	0.143	0.199	0.278	0.405
	1	-1.235	-0.655	-0.348	-0.159	-0.036	0.000	0.123	0.172	0.240	0.346
	5	-0.496	-0.265	-0.142	-0.066	-0.016	0.000	0.049	0.069	0.097	0.143
	20	0.618	0.328	0.176	0.082	0.021	0.000	-0.058	-0.083	-0.117	-0.171
	50	2.080	1.080	0.578	0.281	0.087	0.000	-0.155	-0.230	-0.326	-0.466
	m=1.5, W=10, $\beta=0$	1.639	0.895	0.526	0.297	0.134	0.000	-0.092	-0.174	-0.300	-0.601
	.05	0.465	0.255	0.150	0.085	0.038	0.000	-0.027	-0.050	-0.086	-0.173
	.1	-0.694	-0.382	-0.225	-0.128	-0.058	0.000	0.040	0.075	0.130	0.259
	.15	-1.841	-1.018	-0.602	-0.342	-0.154	0.000	0.106	0.200	0.347	0.696
	.20	-2.967	-1.648	-0.977	-0.556	-0.251	0.000	0.172	0.325	0.565	1.133
$\beta=.07$, W=10, m=0		1.555	0.766	0.462	0.282	0.158	0.000	0.000	-0.068	-0.180	-0.473
	.5	1.472	0.742	0.428	0.248	0.122	0.000	-0.043	-0.104	-0.200	-0.425
	1.0	0.766	0.387	0.222	0.127	0.062	0.000	-0.025	-0.057	-0.106	-0.217
	1.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	2.0	-0.762	-0.387	-0.222	-0.126	-0.060	0.000	0.028	0.059	0.107	0.216
	3.0	-2.412	-1.251	-0.717	-0.406	-0.188	0.000	0.098	0.200	0.356	0.693
	4.0	-3.722	-1.906	-1.086	-0.615	-0.287	0.000	0.141	0.293	0.524	1.014
	Simulator I (AM1.0全太陽射を擬したもの)	0.591	-0.093	-0.154	-0.088	—	0.000	—	—	0.342	0.691
	Simulator II (AM1.5標準太陽光を擬したもの)	-0.558	-0.647	-0.466	-0.261	-0.037	0.000	0.266	0.375	0.525	1.011
	Simulator III (AM1.5標準太陽光を擬したもの)	3.545	2.238	1.419	0.845	—	0.000	—	—	-0.904	-1.929
Simulator IV (標の 30kW Xe ランプ)		-7.304	-3.942	-2.149	-1.068	—	0.000	—	—	1.203	1.690

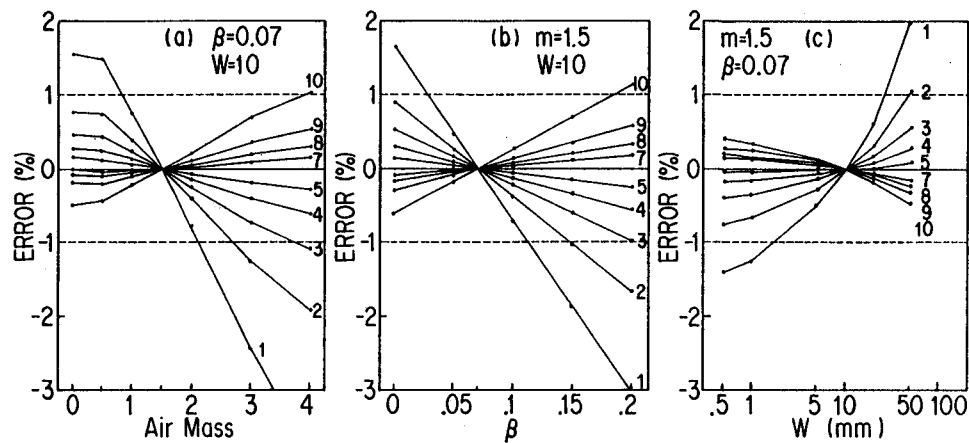


図6.9 $L=120\mu\text{m}$ の太陽電池をレファレンス太陽電池とした場合の各種太陽直達日射下における出力測定誤差。(a)エアマス m , (b)混濁度 β , (c)降水量 W , の異なった大気条件の太陽直達日射下における誤差の傾向。

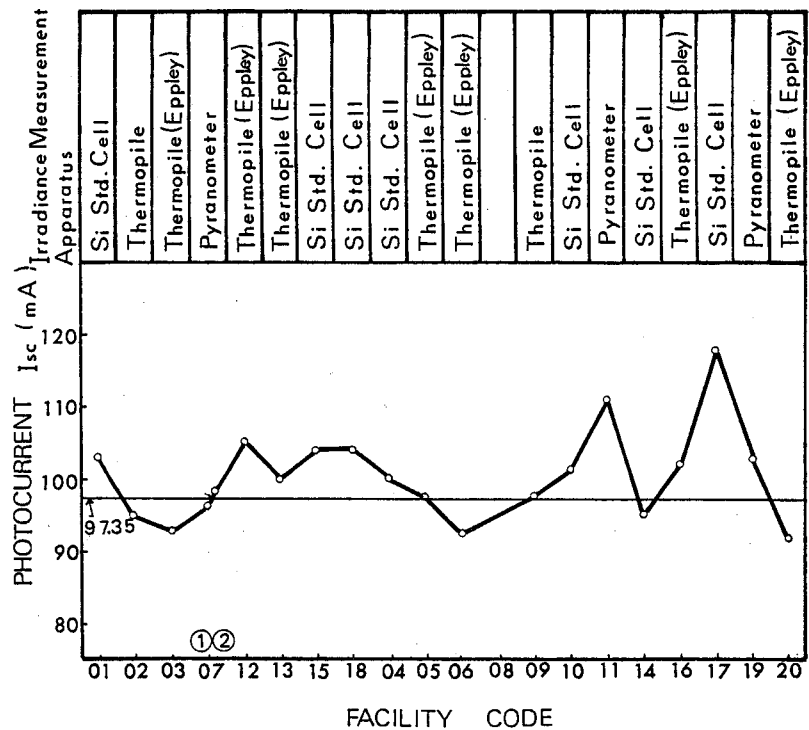


図6.10 各社基準による AM1.0, $100\text{mW}/\text{cm}^2$ 人工太陽光下におけるシリコン結晶太陽電池 (SI-1) の出力電流 I_{sc}

- ① 単結晶 Si 太陽電池においてレファレンス太陽電池方式による出力測定法の有効性を再度確認するとともに、分光感度特性の少しずつ異なったサンプル太陽電池を使用して、測定光源及び太陽電池の分光特性の相違による出力測定値のバラツキの大きさを把握すること。
- ② 新しく開発された poly-Si 太陽電池、CdS 太陽電池、アモルファス Si 太陽電池を持回り測定に加えて、レファレンス太陽電池方式による出力測定法の適用範囲を拡大すること。
- ③ シャープカットフィルターを用いて簡易的に測定光源のスペクトル分布を把握すること。

本節では第2回の太陽電池持回り測定データに基づいてレファレンス太陽電池方式の有効性と限界について検討する。

6.4.1 持回り測定方法

5種類のレファレンス太陽電池（5個）とサンプル太陽電池（11個）を製作し、標準容器に封入したものを各測定機関に順次持回り、各測定機関のソーラシミュレータ及び測定装置（14機関17ソーラシミュレータ、15⑧は裸の Xe ランプ）を使用して、供試太陽電池の出力測定を行う。供試太陽電池の種類、測定手順、測定項目については以下に示す。

(a) 供試太陽電池

持回り測定実験には表6.5に示した5種類の太陽電池が使用された。レファレンス太陽電池方式の有効性と分光特性の違いによる測定値の誤差・バラツキをみるために、レファレンス太陽電池と同一の分光感度特性をもつ太陽電池、そして、分光感度の異なったいくつかの太陽電池をサンプル太陽電池として用意した。これらの供試太陽電池の分光感度特性を図6.11に示す。

(b) 測定方法

財機電子検査検定協会（JMI）において IEC AM 1.5 全天日射 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ の標準太陽光下の出力値に較正されたレファレンス太陽電池を使用して、測定光源（ソーラシミュレータ）の放射照度を $100\text{mW}/\text{cm}^2$ に設定し、この下で順次供試太陽電池の出力測定を行った。太陽電池の測定温度は 25°C とした。具体的には次の順序で供試太陽電池の出力測定を行った。

- ① SI2-1 ref. cell で測定光源の照度設定を行い、その下で SI2-1, 2, 3, 4, PS2-1, GA2-1, CD2-1, AS2-1 の出力測定。
- ② PS2-1 ref. cell で測定光源の照度設定を行い、その下で PS2-1, 2, 3, SI2-4 の出力測定。
- ③ GA2-1 ref. cell で測定光源の照度設定を行い、その下で GA2-1, 2, 3 の出力測定。
- ④ CD2-1 ref. cell で測定光源の照度設定を行い、その下で CD2-1, 2, 3 の出力測定。
- ⑤ AS2-1 ref. cell で測定光源の照度設定を行い、その下で AS2-1, 2, 3 の出力測定。
- ⑥ SI2-1 ref. cell で測定光源の照度設定を行い、続いて、シャープカットフィルタを SI2-1 ref. cell に順次のせて、その時の出力 (I_{sc}) の測定を行う。シャープカットフィルタは透過限界波長 350nm , 390nm , 450nm , 500nm , 550nm , 600nm , 650nm , 700nm , 760nm , 800nm , 850nm の計11枚である。

表6.5 供試太陽電池の種類

素子名	型 式	セル番号
CZ-Si	n/p 電子線照射劣化セル	SI2-1, 2
	n/p	SI2-3, 4
Poly-Si	n/p	PS2-1, 2, 3
GaAs	GaAlAs/GaAs	GA2-1, 2, 3
CdS	CdS/CdTe	CD2-1, 2, 3
a-Si	SnO ₂ /p (a-SiC) -i-n, 二段集積型	AS2-1, 2, 3

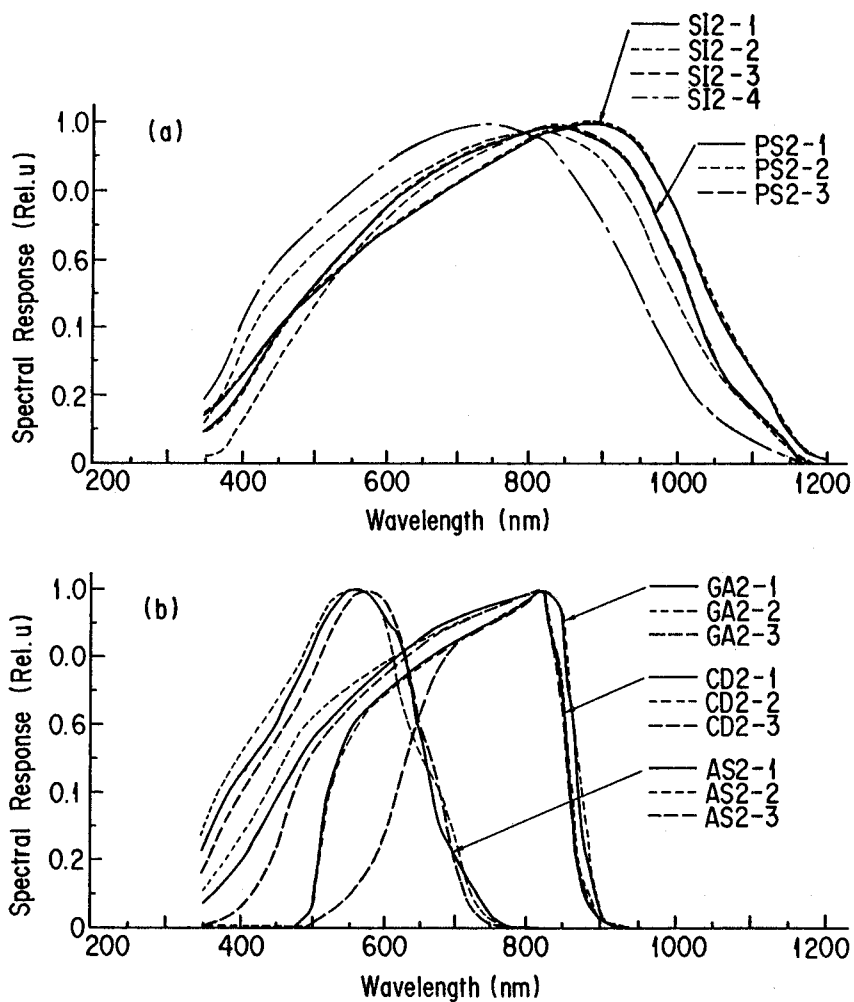


図6.11 供試太陽電池の分光感度特性。(a)単結晶 Si, 多結晶 Si 太陽電池, (b)GaAs, CdS, a-Si 太陽電池。

(c) 測定項目

- ① 諸特性： I_{sc} , V_{oc} , I_{op} , V_{op} , P_{max} , FF , η の測定。
- ② シャープカットフィルタ法による測定光源の分光放射分布の測定。

6.4.2 出力測定値 (I_{sc} , V_{oc} , FF , η) の分布状況

持回り測定結果をまとめると次のようになる。

測定値の分布状況 (バラツキ) ΔI_{sc} , ΔV_{oc} , ΔFF , $\Delta \eta$ を

$$\frac{\text{max 値} - \text{min 値}}{(\text{max 値} + \text{min 値})/2} \quad (\%) \text{ で表す。}$$

(1) 測定光源の分光分布の違い以外の理由に基づく測定誤差

レファレンス太陽電池でソーラシミュレータの放射照度を $100\text{mW}/\text{cm}^2$ に設定した後、改めてレファレンス太陽電池自身の出力を測定した時の諸特性のバラツキを表6.6に示した。 ΔI_{sc} は1～2.5%ものバラツキを示している。これは、予想外の誤差・バラツキであって、ソーラシミュレータの放射照度の変動や放射照度設定時と出力測定時の測定装置が異なることによるものと思われる。その他、 ΔV_{oc} , ΔFF , そして、これらの結果としての $\Delta \eta$ も1～4%もの大きなバラツキを示し、温度制御技術や電氣的測定技術上の問題も大きいということを示している。これらの測定誤差、バラツキはいずれも理論的には予期されていないもので、現在の太陽電池測定技術の水準から考えるならば、ソーラシミュレータの変動率 $\pm 1\%$ の範囲内におさえられる性質のものである。

(2) レファレンス太陽電池方式の有効性と限界

単結晶 Si 太陽電池 SI2-1 をレファレンス太陽電池とした場合の各種太陽電池の短絡電流値 I_{sc} の分布状況 (バラツキ) を図6.12に示した。各測定機関のソーラシミュレータの分光分布特性に従って I_{sc} 出力値が変動し、そして、被測定太陽電池の分光感度特性がレファレンス太陽電池 SI2-1 からそれるに従ってその変動が大きくなり、 ΔI_{sc} のバラツキが大きくなっているのがわかる。表6.7は後程示すシャープカットフィルタ法により選択されたソーラシミュレータ (IR 光過剰の 2B, 10, 3, 15B, , そして UV 光過剰の 13, 5, 11 を除く) 下における各種太陽電池の測定値のバラツキ ΔI_{sc} , ΔV_{oc} , ΔFF , $\Delta \eta$ を%で示している。かつこ内の数値は、全ソーラシミュレータ下における測定値のバラツキである。

前述した予期されない人為的な測定誤差が1～2.5%であることを考慮すると、サンプル太陽電池 SI2-3 まではバラツキが4%以下で、レファレンス太陽電池方式による出力測定が有効な太陽電池の範囲であるといえる。他方、異なった材料の太陽電池の場合は15%をこえるバラツキを示し、ソーラシミュレータの分光分布が標準太陽光に近似しない場合は大きな測定誤差が生じることを示している。

表6.6 レファレンス太陽電池方式により放射照度を 100mW/cm²に設定後, 同一のレファレンス太陽電池を測定したときの測定値の分布状況 (%)

	Variation of I_{sc} , V_{oc} , FF, η $\frac{\max - \min}{(\max + \min)/2}$ (%)			
	ΔI_{sc}	ΔV_{oc}	ΔFF	$\Delta \eta$
SI2-1	1.4 %	1.9 %	2.1 %	3.2 %
PS2-1	1.7	1.6	1.7	3.9
GA2-1	0.76	0.9	1.3	1.5
CD2-1	2.4	2.3	3.3	4.2
AS2-1	2.6	※3.5	※8.9	※10.9

* degradation due to measurement procedure mistakes

表6.7 レファレンス太陽電池方式により放射照度を 100mW/cm²に設定後, 各種サンプル太陽電池を測定したときの測定値の分布状況 (%)

ref. cell sample cell	Variation of I_{sc} , V_{oc} , FF, η $\frac{\max - \min}{(\max + \min)/2}$ (%)			
	ΔI_{sc}	ΔV_{oc}	ΔFF	$\Delta \eta$
SI2-1				
SI2-2	2.0 (3.9)	2.7 (2.7)	1.4 (3.2)	5.1 (7.9)
PS2-1	3.6 (6.0)	1.7 (1.9)	0.79 (1.7)	4.1 (6.2)
SI2-3	3.9 (12.0)	1.2 (2.2)	1.4 (3.1)	5.3 (11.4)
SI2-4	6.9 (23.2)	1.5 (2.5)	1.4 (2.7)	8.0 (24.2)
GA2-1	15.3 (21.5)	1.3 (1.3)	1.8 (1.8)	16.7 (20.8)
CD2-1	19.7 (20.5)	2.7 (2.7)	1.2 (4.2)	18.7 (19.2)
AS2-1	20.5 (49.4)	*3.3 (4.9)	*7.0 (14.5)	*8.2 (47.6)
PS2-1				
PS2-2	1.8 (2.9)	1.6 (2.5)	2.8 (2.8)	3.4 (3.4)
PS2-3	2.4 (6.6)	1.4 (2.3)	1.4 (1.8)	3.3 (8.9)
SI2-4	5.6 (19.5)	1.3 (1.6)	3.4 (3.5)	7.6 (20.0)
GA2-1				
GA2-2	1.4 (1.8)	0.7 (1.1)	1.1 (2.3)	1.8 (2.8)
GA2-3	3.8 (6.2)	0.7 (1.3)	1.1 (2.3)	3.4 (8.5)
CD2-1				
CD2-2	2.0 (2.0)	2.4 (2.4)	2.1 (2.3)	3.7 (3.9)
CD2-3	6.8 (18.8)	2.5 (2.9)	2.5 (4.6)	8.4 (18.8)
AS2-1				
AS2-2	3.2 (5.1)	1.6 (2.1)	2.7 (2.7)	2.0 (3.4)
AS2-3	2.1 (3.5)	1.4 (1.7)	3.7 (3.7)	3.7 (3.7)

* degradation due to measurement procedure mistakes

レファレンス太陽電池 PS 2-1, GA 2-1, CD 2-1, AS 2-1 を使用してソーラシミュレータの放射照度を $100\text{mW}/\text{cm}^2$ に設定した場合の、サンプル太陽電池の諸特性のバラツキも表6.7に示した。サンプル太陽電池 PS, GA, CD, AS 2-2 はレファレンス太陽電池と類似の相対分光感度特性をもっていて、この場合の ΔI_{sc} は 2～3 % 以下でレファレンス太陽電池方式の有効性を示している。

(3) シャープカットフィルター法による簡易的なスペクトル分布測定

レファレンス太陽電池 SI2-1 上に順次シャープカットフィルタを設置して測定した出力値 (I_{sc}) をグラフ化したものが図6.13である。横軸は測定機関をコード番号で表したもので、各測定機関のソーラシミュレータの放射特性の違いが表れている。ソーラシミュレータの 2B, 10, 3, 15B は、典型的に 15B の裸の Xe ランプの分光分布特性にみられる如く、エアマス・フィルターの劣化による IR 光過剰の特徴を表している。また、ソーラシミュレータ13, 5, 11は、UV 光カットが不十分で UV 光過剰の特徴を表している。参考のために、IEC の AM 1.5 全天日射と日本の AM 1.5 直達日射の標準太陽光を測定光源として用いた場合の出力値を図6.13に示しておいた。

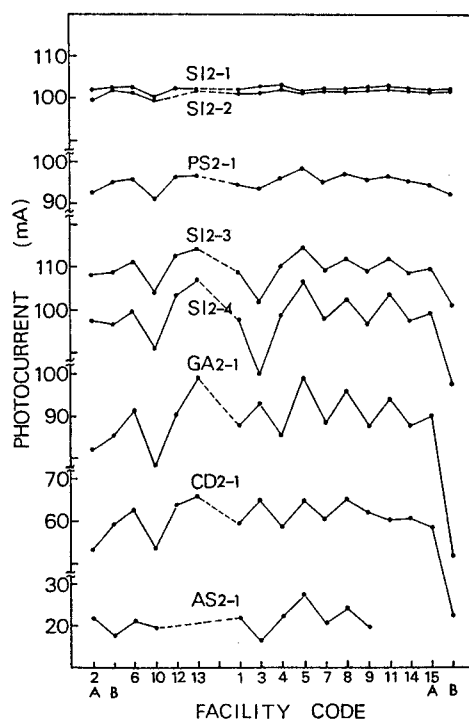


図6.12 レファレンス太陽電池 SI2-1 により放射照度を $100\text{mW}/\text{cm}^2$ に設定後、各種サンプル太陽電池を測定したときの測定値の分布状況。

次に、シャープカットフィルタ法の測定精度を考慮して、波長 350～500nm, 500～650nm, 650～760nm, 760～850nm, 850nm 以上の 5 波長帯域の出力値 $\Delta I_{sc} (\lambda_{i+1}-\lambda_i)$ を使って、各機関のソーラシミュレータ放射特性をみたのが図6.14である。図には、AM 1.5 全天日射の標準太陽光の場合の $\Delta I_{sc} (\lambda_{i+1}-\lambda_i)$ (破線)を示しておく。この標準太陽光の $\Delta I_{sc} (\lambda_{i+1}-\lambda_i)$ の値を基準として、350～500nm, 500～650nm, 650～760nm の波長帯域では $\pm 20\%$, 760～850nm, 850nm 以上の波長帯域では $\pm 30\%$ の範囲に入る $\Delta I_{sc} (\lambda_{i+1}-\lambda_i)$ をもつコード 2A, 6, 10, 12, 1, 4, 7, 8, 9, 14, 15A の計11台のソーラシミュレータを選択した場合の測定値のバラツキを表6.7に示した。

6.4.3 簡易スペクトル分布測定に基づく補正計算

前項で示したようにシャープカットフィルタ法により、IR 光過剰と UV 光過剰のソーラシミュレータを除くことができ、出力測定値のバラツキも大巾に縮少した。さらに積極的に、この簡易的なスペクトル分布測定に基づいて、ソーラシミュレータのスペクトル分布の違いによる出力測定誤

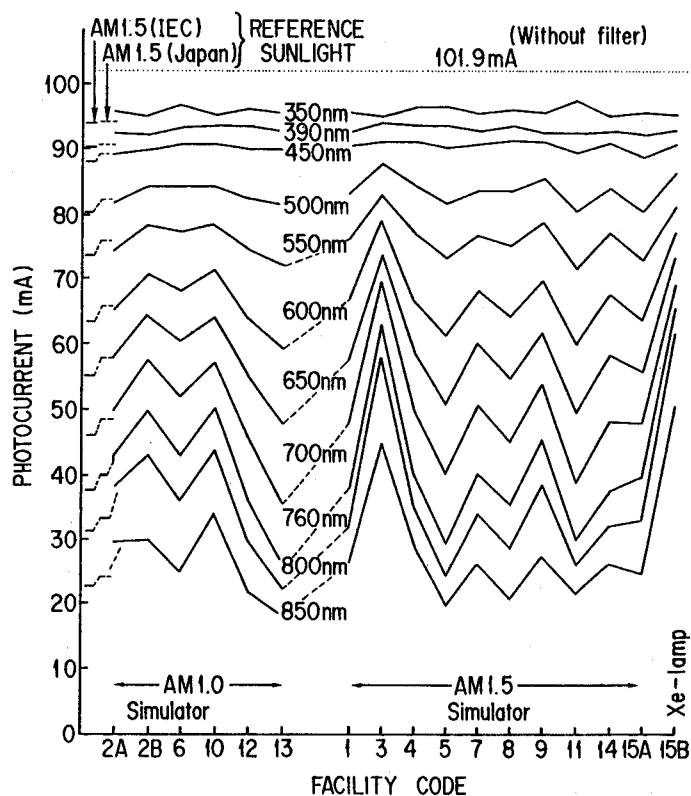


図6.13 シャープカットフィルタ法によるレファレンス太陽電池 SI2-1 出力値の分布状況。各測定光源のスペクトル分布の相違を反映している。

差の補正も可能である。図6.12の GA 2-1, CD 2-1, AS 2-1 の出力測定値 I_{sc} は、それぞれ波長 350～850nm, 500～850nm, 350～650nm 間の放射照度特性を表すシャープカットフィルタ法の出力値 $\Delta I_{sc}(\lambda_{i+1}-\lambda_i)$ に対応しており、 $\Delta I_{sc}(\lambda_{i+1}-\lambda_i)$ で規格化された $I_{sc}/\Delta I_{sc}(\lambda_{i+1}-\lambda_i)$ の値のバラツキは図6.15に示すように大巾に減少し、測定ミスと思われるコード3の機関を除くと、それぞれ5.8%, 5.7%, 3.4%となる。従って、このような波長帯域をもつバンドパスフィルタを用いた時の SI 2-1 レファレンス太陽電池の較正がなされていれば、異なった材料の太陽電池の評価も可能となる。

また、レファレンス太陽電池の較正センターである JMI のソーラシミュレータ（コード1）の分光放射照度測定値と $\Delta I_{sc}(\lambda_{i+1}-\lambda_i)$ の相関関係を基礎として、次式に従って出力測定値 I_{sc} のスペクトル補正を行い、バラツキを縮小することができる。

補正された $I_{sc} = I_{sc} \times \frac{\int_{280}^{2000} \phi_s(\lambda) Q(\lambda) d\lambda}{\sum_i \frac{\Delta I_{sc}(\lambda_{i+1}-\lambda_i)}{\Delta I_{scJMI}(\lambda_{i+1}-\lambda_i)} \cdot \int_{\lambda_i}^{\lambda_{i+1}} \phi_m(\lambda) Q(\lambda) d\lambda}$

(6.12)

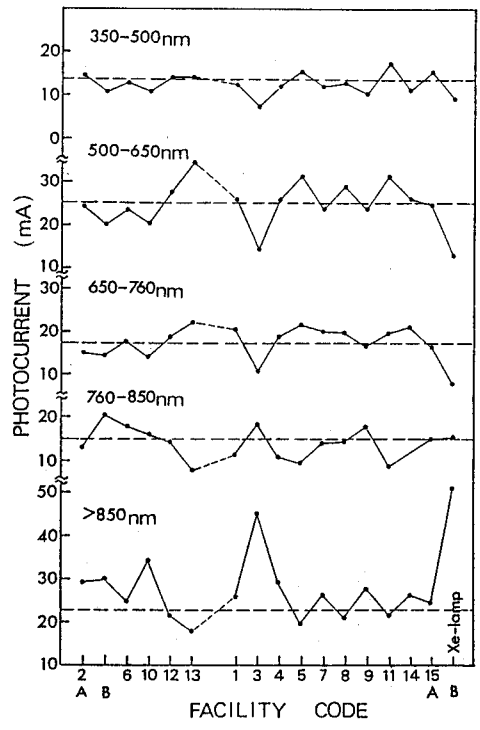


図6.14 シャープカットフィルタ法による5波長帯域のレファレンス太陽電池 SI2-1 出力値の分布状況。各測定光源のスペクトル分布の相違を反映している。

但し、

$Q(\lambda)$: 被測定太陽電池の相対分光感度

$\phi_s(\lambda)$: IEC AM1.5 全天日射標準太陽光

$\phi_m(\lambda)$: JMI のソーラシミュレータの絶対分光放射照度

$\Delta I_{sc}(\lambda_{i+1}-\lambda_i)$: 2 波長間の放射照度を表すシャープカットフィルタ法の出力値

λ_i, λ_{i+1} : 使用されたシャープカットフィルタの透過限界波長

補正計算結果を表6.8に示したが、測定値のバラツキを5%以下にすることができた。 $\Delta I_{sc}(\lambda_{i+1}-\lambda_i)$ の測定精度から考えると、図6.14に示したように5つのフィルタを使用する場合の補正の方が良いようである。

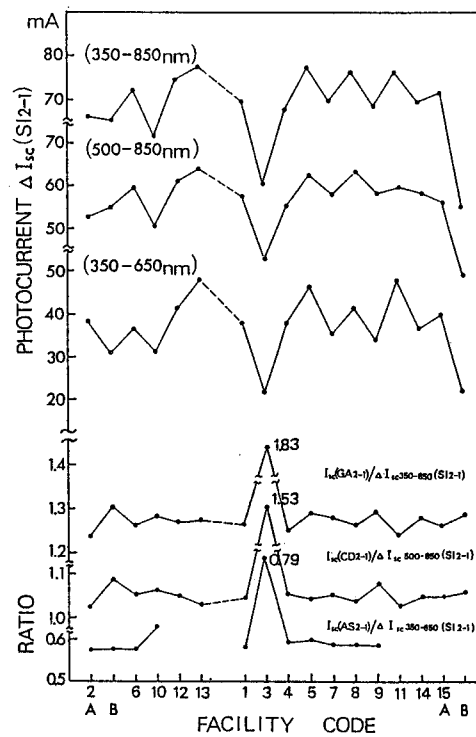


図6.15 シャープカットフィルタ法の $\Delta I_{sc}(\lambda_{i+1}-\lambda_i)$ と、それで規格化された出力電流値 $I_{sc}/\Delta I_{sc}(\lambda_{i+1}-\lambda_i)$ の分布状況。

表6.8 シャープカットフィルタ法により補正された
出力値の分布状況 (%)

Reference Cell SI2-1	Variation of $I_{sc} \frac{\max - \min}{(\max + \min)/2}$ (%) except facility cord 3, 10, 15B	
	11 filters	5 filters
SI2-1	3.25	1.80
2-2	2.66	2.76
2-3	3.93	4.19
2-4	4.90	4.99
PS2-1	2.57	2.91
GA2-1	4.82	4.37
CD2-1	3.89	4.47
AS2-1	8.40	4.08

6.5 レファレンス太陽電池の適正構造

レファレンス太陽電池の適正構造（大きさ、デザイン等）については、測定対象であるセル・モジュールに合致した構造・形状をもつレファレンス太陽電池が必要である、とする IEC TC-82 委員会の見解¹⁴⁾が発表されている。この見解は、レファレンス太陽電池がソーラシミュレータ下で使用される場合を想定し、照射光の不均一性そして被測定セル・モジュールとシミュレータ間の反射を考慮して、一定の大きさのレファレンス太陽電池を要求している。しかし、レファレンス太陽電池が大きくなるに従い分光感度測定精度の維持が困難になる上に、モジュール構造における光収集エンハンスメント (photon collection enhancement)⁹⁾ の効果が無視できなくなり、測定誤差が増加する。本来、レファレンス太陽電池は、放射照度測定の役割のみを負うべきで、類似の相対分光感度特性をもつ多くの太陽電池セル・モジュールに共通して使用できるものが良い。本節では、まず光収集エンハンスメントの効果、続いてソーラシミュレータ下における反射の効果、そして放射照度の不均一性の効果について述べ、最後に、レファレンス太陽電池の適正構造について検討する¹⁰⁾。

6.5.1 モジュール構造における光収集エンハンスメント (photon collection enhancement) の効果

最近、高いパッキング・ファクタ (packing factor) をもつ高効率太陽電池モジュールが開発された¹⁵⁾が、通常の太陽電池モジュール構造は、直径 4 インチの太陽電池を使用したガラス/ethylene vinyl acetate (EVA)/セル/プラスチックフィルム (白テドラール, white Tedlar) 構造のものがほとんどである。そして、このような構造のモジュールにおいては、裏面白シートカバー (白テドラール, white Tedlar) の反射による太陽電池出力の増大現象がみられ、これが太陽電池モジュールの分光

感度特性に影響を与えている⁹⁾。

6.5.1.1 光収集エンハンスメント現象

図6.16に示すような太陽電池モジュール構造において、裏面の白テドラー (white Tedlar) の反射による太陽電池出力の増大現象がみつけれられた。この太陽電池モジュール評価用のレファレンス太陽電池は、図からわかるように p-type CZ-Si 太陽電池 ($2 \times 2 \text{ cm}^2$) を強化ガラスと白テドラーの間に EVA を介してはさみこんだ構造をもっている。このレファレンス太陽電池の AM1.5 100 mW/cm^2 のソーラシミュレータ下における出力電流 (短絡電流) を次の3つの方法、すなわち、①セル部分のみ黒のプレートでシャドウする方法、②セル周辺の白テドラー部分のみ黒のプレートでシャドウする方法、③シャドウなしの方法、で測定した。この測定結果を表6.9に示したが、明らかに白テドラー部分からの反射による出力増大がみられ、その大きさは30%にもなっている。白テドラーで反射した光の一部がガラスと白テドラーの間にトラップされ、内部反射を繰り返してセル部分に導かれ電気出力に変換されるものと考えられる。

次に、同じ3通りの方法で分光感度測定を行った。この結果を図6.17に示したが、光収集エンハンスメントが波長 350nm-1,200nm 全体にわたってほぼ平等に生じていることがわかる。また、こ

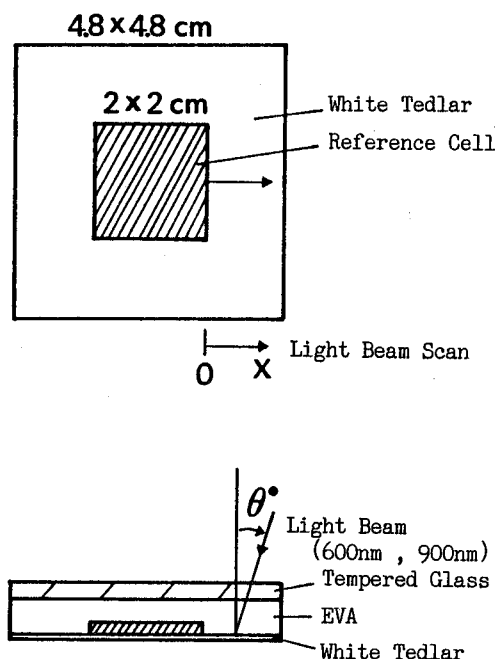


図6.16 $2 \times 2 \text{ cm}^2$ セル、白テドラー (white Tedlar) のレファレンス太陽電池

表6.9 図6.16のレファレンス太陽電池全体，2×2 cm²セル部，白テドラ（white Tedlar）部のソーラ・シミュレータ（AM1.5，100mW/cm²）下における出力電流値。上段が測定値で，下段は分光感度とソーラ・シミュレータの分光放射照度の積和から得られた出力電流。

	with the shading plate on the white TEDLAR	with the shading plate on the cell	without shading
measured I _{sc} (mA)	121.9 (69.2%)	52.3 (29.7%)	176.1 (100%)
calculated I _{sc} (mA)	124.0 (71.1%)	49.0 (28.1%)	174.5 (100%)

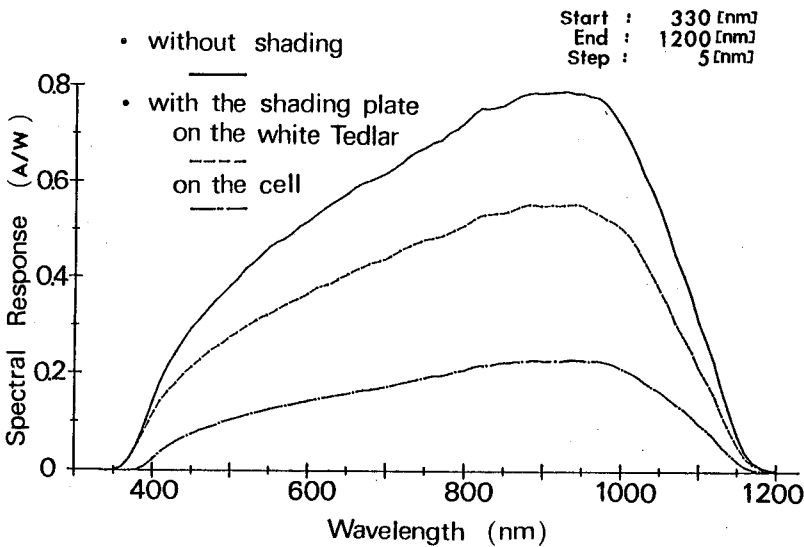


図6.17 レファレンス太陽電池全体，2×2cm²セル部，白テドラー（white Tedlar）部の分光感度特性

の分光感度とソーラシミュレータの分光放射照度の積和から得られた出力電流値を表6.9に示した。計算された出力電流値（I_{sc}）と測定値は非常に良く一致し，分光感度測定精度が良いことを示している。詳細に比較するために，ピーク値で規格化した相対分光感度特性を図6.18に示した。白テドラーからの反射光（①のケース）は短波長成分が少し弱く，そのために，このレファレンス太陽電池全体の分光感度特性（③のケース）は，波長 500nm 以下において，セルのみの分光感度特

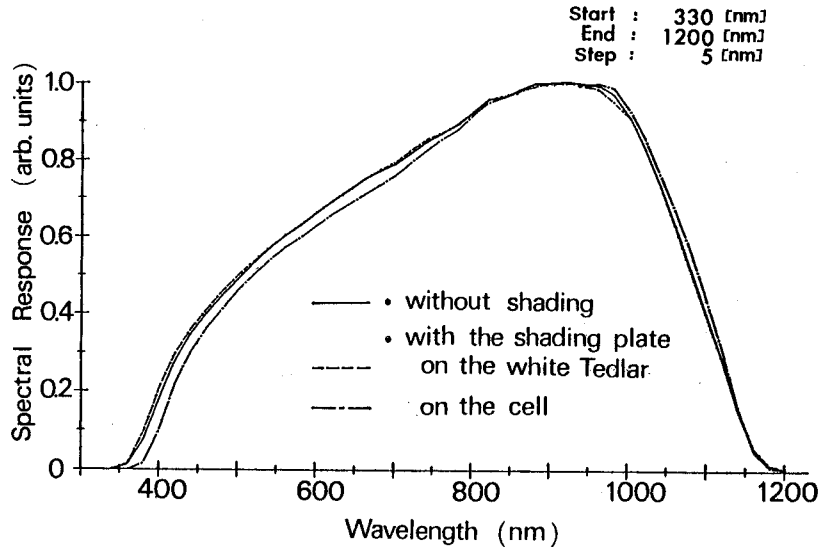


図6.18 図6.17をピーク値で規格化したときの相対分光感度。

性 (②のケース) よりも減少している。

この白テドラーからの反射特性を著者の開発した MBIC 装置¹⁶⁾を使用して調べた。図6.16に示したように、まずセル端から外側方向に波長・600nm と 900nm の光ビームでスキャンし、次にセル端から 6mm の位置に光ビームを固定して光ビームの入射角度を変えてセル出力を測定した。図6.19 は、セル出力をセル端からの距離 X (mm) に対してプロットしたもので、セル部分に光ビームが入射したときの出力を100とし、それに対する比率 (%) で表されている。セル端近傍では約13%の収集比率を示し、距離 X に従いゆっくりと減少し、 X が 6mm を越す辺りから減少が大きくなる傾向にある。図6.20 は、 $X=6$ mm 位置におけるセル出力の入射角度依存性を示したもので、出力は角度 20° 近くで最高値をもち、かなり大きな角度依存性を示している。

6.5.1.2 各種のモジュール構造における光収集エンハンスメント

基礎実験に続いて、図6.21に示すような実際のモジュール配置 (ミニモジュール) のレファレンス太陽電池の光収集エンハンスメントについて調べた。図の中央部のセル以外は全てダミーセル (あるいは黒のプレート) で、セルの周辺部は裏面シートカバー部 (白テドラー) である。基礎実験と同様に、 $AM1.5\ 100\text{mW}/\text{cm}^2$ のソーラシミュレータの下で3通りの方法でミニモジュール・レファレンス太陽電池の出力測定を行った。同時に、裏面シートカバーの色を変えたもの (白, 黒, 赤の3色), また、ダミーセルなしのものも測定した。測定結果は表6.10に示す。白テドラーを使用した実際のモジュール構成の場合 (RM-1, 2, 5, 9) は、約4%の出力の増大があったことになる。これ

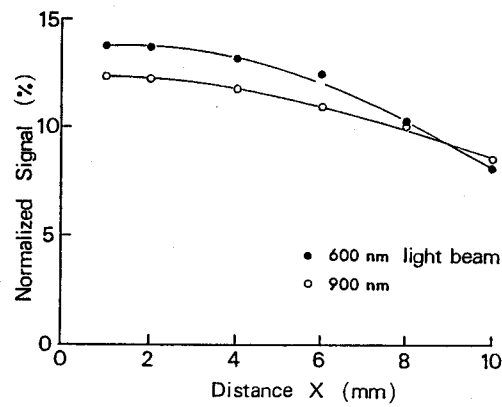


図6.19 セル端からの距離 Xmm における MBIC 信号 (分光ビーム波長は 600nm, 900nm)。

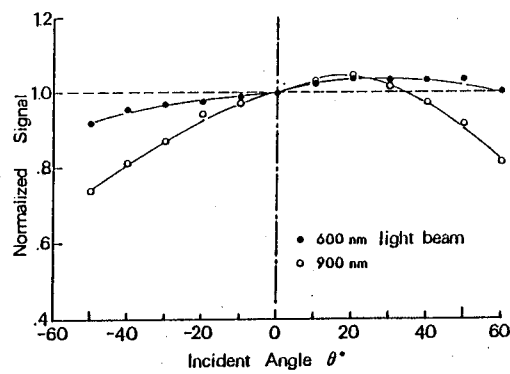


図6.20 X=6mm 地点において入射角度 θ に対してプロットされた MBIC 信号 (分光ビーム波長は 600nm, 900nm)

は出力がセル端からの距離Xの関数として表されている図6.19から推定することができる。すなわち、周囲の白テドラー部の総面積がセル面積 ($\pi \times 5^2 \text{cm}^2$) $\times 0.62$ であるので、平均して約6.5%の収集比率であれば、総体としてのセル出力の増加は約4%となる。また、黒テドラーを使用した場合 (RM-7, 14) は、ダミーセルに関係なく、ほとんど反射はない。逆に周囲が全面的に白テドラーとなっている場合 (RM-11) は、10%もの反射による出力の増大がある。赤テドラーを使用した場合 (RM-8) は、丁度中間の1.8%の反射による出力の増大がある。

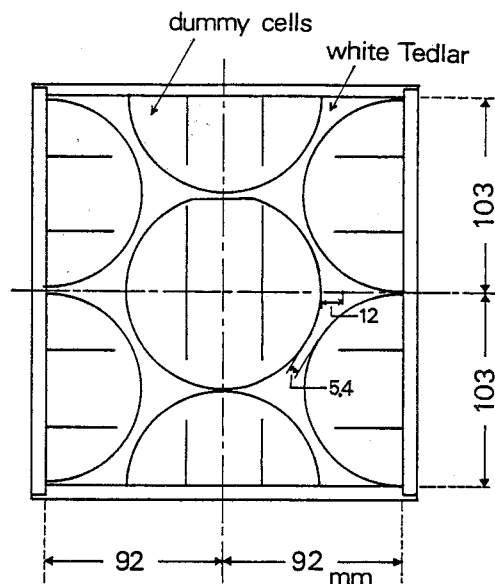


図6.21 ミニモジュール構造のレファレンス太陽電池。

表6.10 図6.21のレファレンス太陽電池全体、4インチセル部、白テドラー (white Tedlar) 部のソーラシミュレータ (AM1.5, 100mW/cm²) 下における出力電流。

No	I _{sc}	No mask [A]	Mask around cell [A]	Mask on cell [A]	Remarks
RM-1		2.2052 (100%)	2.1032 (95.38%)	0.1125 (5.10%)	White Tedlar sheet Dummy cells around
RM-2		1.9740 (100)	1.8834 (95.41)	0.0813 (4.12)	
RM-5		2.1418 (100)	2.0651 (96.42)	0.0860 (4.02)	
RM-9		2.0224 (100)	1.9449 (96.17)	0.0734 (3.63)	
RM-8		2.1411 (100)	2.1002 (98.09)	0.0386 (1.80)	Red Tedlar sheet Dummy cells around
RM-7		1.9860 (100)	1.9694 (99.17)	0.0099 (0.50)	Black Tedlar sheet Dummy cells around
RM-14		2.0103 (100)	1.9923 (99.11)	0.0160 (0.80)	Black Tedlar sheet No cells around
RM-11		2.2495 (100)	2.0018 (88.99)	0.2349 (10.44)	White Tedlar sheet No cells around

6.5.2 反射の効果

自然太陽光下における測定とは異なり，ソーラシミュレータ下においては太陽電池モジュールとの間で多重反射が生じ，太陽電池出力が増大する可能性がある。そこで，図6.22に示す試料ステージを使用してソーラシミュレータ下における反射の効果を調べた。まず，図6.16で示した容器の $2 \times 2 \text{ cm}^2$ セル，黒テドラーのレファレンス太陽電池を黒の試料ステージ上にセットして出力測定を行い，続いて，レファレンス太陽電池の周囲のステージ上に白テドラーを敷きつめ反射を多くして同様の出力測定を行い反射の効果を調べた。次に，シミュレータのコリメータレンズの直下にガラス板を挿入して，反射を大きくして同じ測定を行った。以上の測定を，通常の測定位置 ($Z=40\text{cm}$) よりもシミュレータ側に順次近づけて，反射の効果を大きくして行った。測定結果を表6.11に示す。

通常の測定は前面ガラスなし，周囲は黒，測定位置は $Z=40\text{cm}$ でなされるが，この位置では周囲に白テドラーを敷いた場合も，前面ガラスを置いた場合も，わずかしき反射の効果はなく無視できる。また，ソーラシミュレータの光はほぼ平行ビームになっているので，距離 Z を変えても出力は表に示すようにわずかしき変化しない。しかし，周囲が白のテドラーの場合には，測定位置がソーラシミュレータに近づくに従い，特に， $Z=10\text{cm}$ 位置から急に反射の効果が大きくなり，前面ガラスのある場合には，これが一層大きくなって通常の測定位置 $Z=40\text{cm}$ の場合よりも4.93%もの出

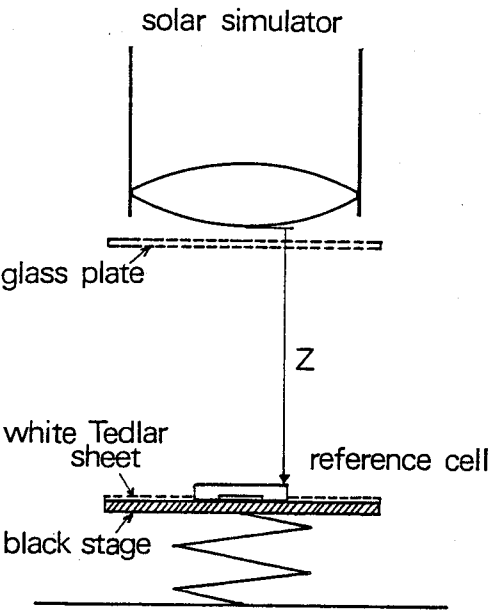


図6.22 太陽電池特性の屋内測定装置

表6.11 ソーラシミュレータ下における太陽電池セル・モジュールの各種の設置方法における反射の効果。

コリメータレンズからの距離 Z		40cm	25cm	10cm	5 cm
(1) レファレンス c-Si 太陽電池 (2 × 2 cm セル, black Tedlar)					
(a) 前面ガラス無し					
・周囲 黒		126.18	126.28 (+0.08%)	126.44 (0.21%)	126.98 (+0.63%)
・周囲 白		126.59	127.02 (+0.34%)	127.77 (+0.93%)	128.74 (+1.17%)
(反射による出力増大率)		+0.32%	+0.59%	+1.00%	+1.39%
(b) 前面ガラス有り					
・周囲 黒		113.44	114.85 (+1.24%)	116.07 (+2.32%)	116.37 (+2.58%)
・周囲 白		113.69	115.35 (+1.46%)	118.22 (+3.98%)	119.30 (+4.93%)
(反射による出力増大率)		+0.22%	+0.44%	+1.85%	+2.52%
(2) ミニモジュールの c-Si 太陽電池 (RM-1) (4 インチ φ, ダミーセル, white Tedlar)					
(a) 前面ガラス無し		2564	2594 (+1.17%)	2644 (+3.12%)	
(b) 前面ガラス有り		2305	2312 (+0.30%)	2333 (+1.21%)	
(3) ミニモジュールの c-Si 太陽電池 (RM-11) (4 インチ φ, ダミーセル無し, White Tedlar)					
(a) 前面ガラス無し		2562	2599 (+1.44%)	2663 (+3.94%)	
(b) 前面ガラス有り		2303	2324 (+0.91%)	2352 (+2.13)	

力の増加がみられる。

最後に、実際のモジュールに近い構造のミニモジュール (RM-1, 11) を使用して同じ測定を行った。測定結果を表6.11に示したが、前面ガラス無し、前面ガラス有り、いずれの場合もシミュレータに近づくにつれ、特に、 $Z=10\text{cm}$ 位から急に出力は増大する。そして、白テドラーの占める割合の大きいミニモジュール RM-11 の方が RM-1 よりも増加が大きくなっている。これらはいずれも反射の効果と思われる。

6.5.3 放射照度の不均一性の効果

ソーラシミュレータ下においては放射照度の不均一が生じる可能性があり、レファレンス太陽電池と被測定太陽電池の大きさが異なる場合には、これが原因で測定誤差が生じる。放射照度の不均一性が $\pm 1\%$ であるソーラシミュレータ下において較正された $2\times 2\text{cm}^2$ のレファレンス太陽電池と4インチ ϕ のレファレンス太陽電池を使用して、この放射照度の不均一性による測定誤差の大きさについて検討する。前者のレファレンス太陽電池の較正值は 112.7mA 、後者は 2021mA で、この較正值の比は $\frac{2021}{112.7}=17.93$ である。

放射照度の不均一性が $\pm 1\%$ のソーラシミュレータの出射口にメッシュを挿入して少し過剰に不均一な放射照度をもつソーラシミュレータを製作し、この照射光の下で上記の較正された2つのレファレンス太陽電池を測定した。測定位置及び測定結果は図6.23に示されている。照射面の中心位置における測定結果は $2\times 2\text{cm}^2$ セルが 87.56mA 、4インチ ϕ セルが $1,459\text{mA}$ でこの測定値の比は $\frac{1,459}{87.56}=16.66$ となり較正值の比から7.6%も減少している。もし、このように、単なる中心位置における測定がなされるならば、面積の異なったレファレンス太陽電池を使用した場合は測定誤差が非常に大きくなる。しかし、面積の小さな $2\times 2\text{cm}^2$ セルをレファレンス太陽電池として使用した場合でも、図6.23に示すように多数の測定点を取り、それらの測定値の平均値を採用するならば、面積の異なる被測定太陽電池を評価することができる。例えば、図に示す①～⑤のセル出力の平均値は 82.00mA 、①～⑨のセル出力の平均値は 80.36mA で、これらの平均値を採用した場合の4インチ ϕ セル出力との比は、それぞれ $\frac{1,459}{82.00}=17.79$ 、 $\frac{1,459}{80.36}=18.16$ で、較正值の比から -0.8% 、 $+1.3\%$ それるにすぎない。

6.5.4 レファレンス太陽電池の適正構造の検討

モジュール構造における光収集エンハンスメントの効果、ソーラシミュレータと太陽電池間の反射の効果、そして、放射照度の不均一性の効果、について特徴を述べてきたが、それらの測定データをもとにしてレファレンス太陽電池の適正構造について検討する。

本来、レファレンス太陽電池は被測定太陽電池セル・モジュールの分光感度特性を忠実に反映する同一材料、同一構造のものであることが望ましく、加えて、各種の出力測定システムで同じ測定条件で放射照度測定を行うには、同一形状のものが最適である。しかし、分光感度測定を含むレファ

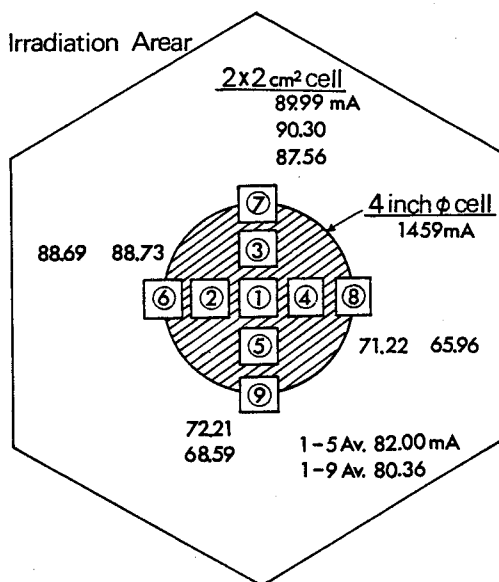


図6.23 不均一な放射照度をもつソーラシミュレータ下における出力測定位置及び出力測定値。

レンズ太陽電池の校正精度、使用時の便利さ、汎用性の点で、図6.16に示すような $2 \times 2 \text{ cm}^2$ の大きさのレファレンス太陽電池が使用されてきた。この場合、セル部は、太陽電池セル・モジュールと同一の光学的特性をもつが、その周囲の形状、光学的特性については、何の配慮もされていない。周囲の効果を多少配慮したものが図6.21のミニモジュール構造のレファレンス太陽電池である。被測定太陽電池セル・モジュールが小型で、白テドラー部の面積が小さい間は、いずれのレファレンス太陽電池を使用しても問題は生じないが、セル・モジュールが大型になり、セル周辺部の面積が増大してくると光収集エンハンスメントの効果、反射の効果、放射度不均一性の効果を吟味する必要がある。

まず、相対分光感度の違いであるが、特に分光感度を変える目的で赤テドラーを使用した場合は別として、白テドラーを使用する限り、この部分からの反射による寄与は全波長にわたってほぼ平等であり、面積が広い場合でも図6.18に示すように違いはわずかで、この分光特性の相違による測定誤差は非常に小さく問題にならない。しかし、白テドラー部の光応答の入射角度依存性は図6.21に示す如く、かなり大きく、5.4.2.1項の不活性ガス封止のc-Siセルの場合¹⁷⁾とほぼ同じで、白テドラー部の面積が増すと測定誤差となって現れてくる。例えば、水平面全天日射下で、AM1.5の場合を考えると、不活性ガス封止のc-Siセルの測定誤差は約6%である¹⁷⁾ので、白テドラー部による出力増加が30% ($2 \times 2 \text{ cm}^2$ セル)、10% (RM-11)、4% (RM-1) のレファレンス太陽電池の入射角度依存性による測定誤差は、同じ条件下では、1.8%、0.6%、0.24%と推定できる。従って、特別

に白テドラー部を広くしたり、色をつけたりしない限りはセル周囲の白テドラーによる光収集エンハンスメントの効果による測定誤差は生じない。

次に、ソーラシミュレータ下で測定がなされる場合には、ソーラシミュレータからの反射及びソーラシミュレータの放射照度の不均一性による測定誤差が生じうる。反射については、各種の測定条件で実験してきたように $2 \times 2 \text{ cm}^2$ セルの場合も、ミニモジュールの場合も、通常の測定位置では問題にならない。しかし、太陽電池セル・モジュールをソーラシミュレータに近づけると $Z=10 \text{ cm}$ 辺りから急に反射の効果が増加し、測定誤差も 1% を越えるようになる。従って、特別にソーラシミュレータに近づけた測定を行う場合のみ、反射を考慮する必要が生じる。放射照度の不均一性については、ソーラシミュレータの安定度が良い限り、放射照度が不均一の場合も、図 6.23 に示すように数ヶ所の測定を行い、その平均値を採用することにより、測定誤差をソーラシミュレータの安定度以内にすることができる。但し、不均一な出力特性をもつ太陽電池セル・モジュール（例えば多結晶シリコン太陽電池）を評価するときの扱いは全く別の問題で、この場合には均一な放射照度特性をもつソーラシミュレータが必要である。

以上、レファレンス太陽電池の適正構造について検討を進めてきたが、結論として光収集エンハンスメントの効果、反射の効果、放射照度の不均一性の効果はいずれもわずかで通常の太陽電池セルモジュールにおいては無視しうる。従って、汎用性のある $2 \times 2 \text{ cm}^2$ のセル、黒テドラーのレファレンス太陽電池が最適である。

6.6 太陽電池出力の標準測定法

太陽電池出力を測定するとき、前述した測定光源の放射照度とそのスペクトル分布の問題のほか、重要な共通課題として、電気測定技術等があげられる。標準の出力測定法については IEC TC-82 委員会案³⁾、JIS 案⁴⁾がほぼ確定したので、これに沿って述べていきたい。

基本的な測定手順としては、太陽電池セル・モジュールを自然太陽光あるいは人工太陽光に曝し、温度を一定に保ちながら負荷を短絡状態から開放状態まで走査して I-V 特性を測定するのであるが、次の事項が規約されている。

(A) 一般的事項

- 1) 測定用光源の放射照度を測定あるいは設定する方法はレファレンス太陽電池方式による。レファレンス太陽電池の相対分光感度は本質的に被測定太陽電池のものと同一であるべきである。(JIS 案の場合は、より厳密に、同一材料、同一条件で製作されたものとなっている。これは分光感度測定技術が難しいことによる測定誤差を最小限度にするためである。) レファレンス太陽電池は、公認の較正施設もしくは、これに準じた施設（日本では財機電機電子検査検定協会）で較正される。
- 2) レファレンス太陽電池及び被測定太陽電池の温度は $\pm 1^\circ \text{C}$ の精度で測定される。そして、レファレンス太陽電池の測定温度が較正時 (25°C) から 2°C 以上相違しているならば、レファレンス太

陽電池の較正值は測定温度のときの値に修正される。

- 3) レファレンス太陽電池と被測定太陽電池は $\pm 5^\circ$ の範囲内で同一平面上にくるようにする。コリメータは使用しない。
- 4) 被測定太陽電池のI-V特性測定は図6.24に示される4端子法を用いる。この場合、電流、電圧は $\pm 0.5\%$ 以上の精度で測定がなされるべきである。短絡電流は端子間電圧が0のときの出力電流で、測定はシリーズ抵抗による電圧降下を補償するバイアス電源を用いてなされるか、あるいは、開放電圧の3%以下の電圧で測定がなされるのであれば、4端子の標準抵抗器の電圧降下を測定することによってなされる。電圧計の内部抵抗は少なくとも $20\text{ k}\Omega/\text{V}$ で、十分大きいものが使用される。
- 5) 太陽電池の出力特性は基準測定条件（セル温度 25°C 、AM1.5 標準太陽光、 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ ）における次の特性で表示される。
 - (a) 短絡電流 I_{sc} (mA 又は A)
 - (b) 開放電圧 V_{oc} (mV 又は V)
 - (c) 最大出力 P_{max} (mW 又は W) $= V_{op} \cdot I_{op}$
 - (d) 最適動作電圧 V_{op} (mV 又は V)
 - (e) 最適動作電流 I_{op} (mA 又は A)
 - (f) 曲線因子 $FF = P_{max} / (I_{sc} \cdot V_{oc})$
 - (g) 変換効率 η (%)
- (B) 自然太陽光下における測定
レファレンス太陽電池と被測定太陽電池は同一平面上でできる限り近づけてマウントし、直達光

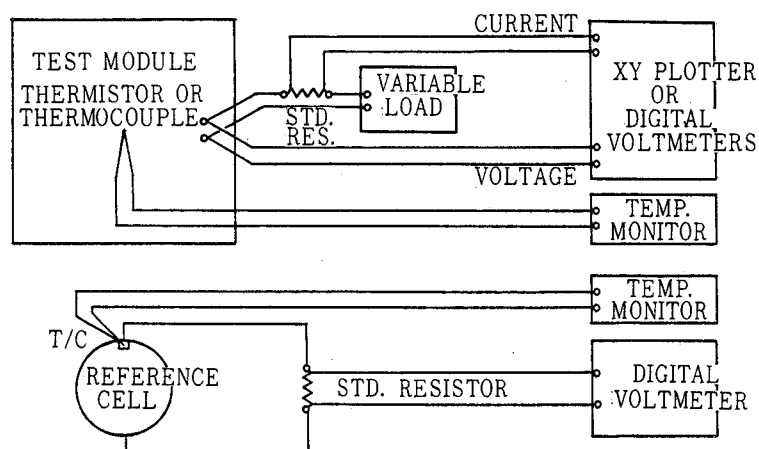


図6.24 電流電圧特性測定システム。

から $+10^\circ$ 以内に垂直であること、放射照度は少なくとも 800Wm^{-2} 以上（測定値の 1kWm^{-2} への外挿誤差を最小限にするため）で、そして、測定中におけるその変動が $\pm 1\%$ 以下であるときに、測定がなされるべきである。

(C) 人工太陽光（定常光，パルス光）下における測定

レファレンス太陽電池，被測定太陽電池は，照射光に対して $\pm 5^\circ$ の範囲内で垂直になるようにマウントされる。放射照度はレファレンス太陽電池が較正值（ I_{sc} ）をもつように設定される。パルス光の場合，被測定太陽電池の応答時間に見合う測定時間間隔が必要である。

6.7 まとめ

照射光のスペクトル分布の相違による出力測定誤差を減少するために，レファレンス太陽電池方式による太陽電池出力の標準測定法を確立した。まず，レファレンス太陽電池方式の出力測定精度について吟味し，この方式の有効性と限界を明らかにした。続いて，標準測定法としてのコンセンサスを得るために行った太陽電池の持回り測定結果を分析し，この方式の有効性を実証した。また，モジュール構造において発見した光収集エンハンスメント（photon collection enhancement）の効果，ソーラシミュレータ下における反射の効果等を考慮して，レファレンス太陽電池の最適構造を提案した。最後に，IEC 案及び JIS 案として確立した太陽電池の出力測定法について述べた。

参考文献

- 1) 財光産業技術振興会「オプトエレクトロニクスの標準化に関する調査研究II」昭和58, p. 512.
- 2) F. C. Treble : Proc. 1st Commission of the European Communities Conf. on Photovoltaic Solar Energy, Luxemburg, September 27-30, 1977, Reidel, Dordrecht, 1987, pp. 732-744.
- 3) F. C. Treble : Proc. 17th IEEE Photovoltaic Specialists' Conf., Kissimmee, FL, May 1-4, 1984, IEEE, New York, 1984, p. 482.
IEC TC-82 Committee document 82 (Central Office) 4.
- 4) 財光産業技術振興協会「オプトエレクトロニクスの標準化に関する調査研究IV」昭和60, p. 510.
財光産業技術振興協会「オプトエレクトロニクス日本工業規格素案」昭和60. 5. 16.
- 5) R. Shimokawa, M. Horiguchi and Y. Hamakawa : Solar Cells 13 (1984~1985) 221.
下川，堀口，浜川：電子技術総合研究所イ報，第49巻2号（昭和60年）p. 131.
- 6) 下川，堀口，浜川：電子技術総合研究所イ報，第49巻2号（昭和60年）p. 122.
- 7) R. Shimokawa, K. Fujisawa, M. Horiguchi, S. Yoshikawa and Y. Hamakawa : Proc. 5th Conf. on Photovoltaic Solar Energy, Athens, October 17-21 (1983) p. 657.
財光産業技術振興協会「オプトエレクトロニクスの標準化に関する調査研究II」昭和58, p. 512.

- 8) R. Shimokawa, J. Nose, M. Fujisaki, K. Mitsui, S. Nakano, M. Nishiura, H. Uda and Y. Hamakawa : Proc. 18th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., Las Vegas, Nevada, October 21-25 (1985) p. 945.
(財光産業技術振興協会「オプトエレクトロニクスの標準化に関する調査研究IV」昭和60, p. 484.
- 9) R. Shimokawa, F. Nagamine and Y. Hayashi : Jpn. J. Appl. Phys. 25 (1986) L165.
- 10) 下川, 長峰, 林 : 電子技術総合研究所イ報, 第51巻 5.6号 (昭和62年) p.417.
- 11) K. Krebs : EC Document, EUR 7078 EN (1981) Specification no. 101, p. 36.
- 12) K. Bogus, J. C. Larue and R. L. Crabb : Proc. 1st. E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference, Luxembourg, (1977), p. 754.
- 13) (株)日本電気工業会「太陽エネルギー利用システム調査研究」(昭和55年度サンシャイン計画委託調査研究成果報告書) 昭和56. p. 279.
- 14) Documents presented to the Technical Committee TC-82 of IEC 82/WG2 (Secretary) 33, August, 1984.
- 15) M. I. Smokler : Proc. 6th E. C. Photovoltaic Solar Energy Conf., London, 1985 (D. Reidel Publishing CO., Dordrecht, 1985) p. 370.
- 16) R. Shimokawa and Y. Hayashi : J. Appl. Phys. 59 (1986) 2571.
- 17) R. Shimokawa, Y. Miyake, Y. Nakanishi, Y. Kuwano and Y. Hamakawa : Jpn. J. Appl. Phys. 25 (1986) L102.

第7章 レファレンス太陽電池の標準較正法

7.1 まえがき

これまでレファレンス太陽電池の較正は、WRR (World Radiometric Reference) 基準に適合した絶対放射計を使用して自然太陽光の下でなされてきた。この屋外較正法は大別して2種類の方法、一つは直達日射を使用する方法¹⁾、もう一つは全天日射を使用する方法^{2),3)}がある。最近、後者の方法が現実の太陽電池の使用目的にかなう、測定方法も容易で、大気条件の変化に対しても安定な測定が可能であることが実証され⁴⁻⁷⁾、IEC TC-82 委員会はこの方法を推奨し、標準太陽光として37°傾斜面における AM1.5 全天日射を採用するに至った^{8),9)}。一方、著者等は、この全天日射の標準太陽光を認めつつも、日本の不順な気候では較正に適した測定条件を得る機会が少ないこと、そして屋内における測定の方が精度が高いこと、を考慮して標準ランプを照度基準とする屋内較正法を確立し、日本の標準較正法として提案した^{10),11)}。そして、WRR 基準と標準ランプ基準の2つの異なった絶対基準を比較する手法を開発し、屋内、屋外較正值の比較を行った¹¹⁾。

本章では、標準ランプを照度基準とする屋内較正法を中心に、各種の WRR 基準による屋外較正法について検討を加える。7.2節では、まず、確立したレファレンス太陽電池の屋内較正法について述べ、屋外較正法との比較を行う。続いて、7.3節、7.4節において、WRR 基準に基づく屋外較正值と標準ランプ基準に基づく屋内較正值の比較、そして、これまで放置されていたこの2つの絶対基準の比較を行う。

7.2 レファレンス太陽電池の屋内較正法（日本提案による標準較正法）

本研究において確立したレファレンス太陽電池の屋内較正法¹¹⁾は、まず、AM1.5 全天日射の標準太陽光を擬したソーラシミュレータの下でレファレンス太陽電池の出力電流（短絡電流 I_{sc} ）を測定し、次に、分光放射照度標準ランプ（JPD-100-500CS）で較正したスペクトロラジオメータを使用してソーラシミュレータの絶対分光放射照度分布を測定し、その上で、スペクトル補正計算によって標準太陽光の下における較正值を得る方法である。較正值は、放射照度 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ の標準太陽光下における短絡電流値で表され、次式から求められる。

$$I_{sc \text{ cal}} = I_{scm} \frac{\int \phi_s(\lambda) Q(\lambda) d\lambda}{\int \phi_{ab}(\lambda) Q(\lambda) d\lambda} \quad (7.1)$$

但し $I_{sc \text{ cal}}$: レファレンス太陽電池の較正值

I_{scm} : $100\text{mW}/\text{cm}^2$ に近い放射照度をもつソーラシミュレータ下におけるレファレンス

太陽電池の I_{sc} 測定値

$Q(\lambda)$ ：レファレンス太陽電池の相対分光感度

$\Phi_{ab}(\lambda)$ ：ソーラシミュレータの絶対分光放射照度

$\Phi_s(\lambda)$ ：標準太陽光の絶対分光放射照度

標準ランプの分光放射照度の確度は $\pm 1\%$ 以内であることが実証されている¹²⁾。

もし、放射照度基準を WRR 基準に適合させる必要がある場合は、さらに WRR基準に適合した絶対放射計を使用してソーラシミュレータの絶対放射照度を測定し、次式から較正值を計算することになる。

$$\Phi_{ab}(\lambda) = \frac{E_m}{\int \Phi_m(\lambda) d\lambda} \cdot \Phi_m(\lambda) \equiv a\Phi_m(\lambda) \quad (7.2)$$

$$I_{sc\,cal} = I_{scm} \cdot \frac{\int \Phi_m(\lambda) d\lambda}{E_m} \cdot \frac{\int \Phi_s(\lambda) Q(\lambda) d\lambda}{\int \Phi_m(\lambda) Q(\lambda) d\lambda} \quad (7.3)$$

但し、 $\Phi_m(\lambda)$ ：ソーラシミュレータの相対分光放射照度

E_m ：ソーラシミュレータの絶対放射照度

屋内較正は、図7.1のブロック図に示されるような測定装置を使用して何時でも行うことができる。較正手順は次のようになっている。

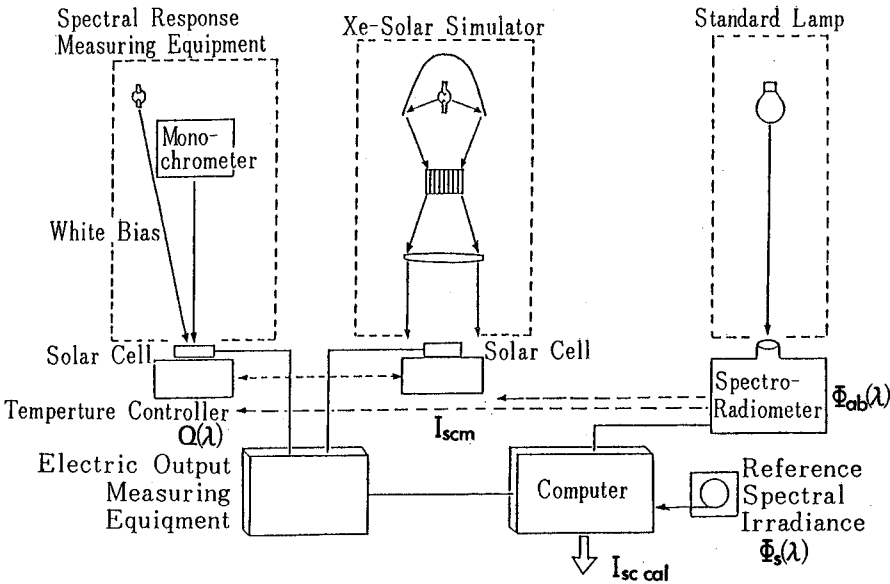


図7.1 太陽電池の屋内較正システムのブロック図

- 1) 放射照度約 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ のバイアス光の下でレファレンス太陽電池 ($25 \pm 1^\circ\text{C}$) の相対分光感度を少なくとも 3 度測定する。
- 2) ソーラシミュレータの放射照度を約 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ にする。
- 3) 分光放射照度標準ランプで較正したスペクトロラジオメータを使って、ソーラシミュレータの絶対分光放射照度を測定する。
- 4) レファレンス太陽電池をソーラシミュレータ下にセットし、温度を $25 \pm 1^\circ\text{C}$ に保持して出力電流を測定する。少なくとも 3 度測定を行い平均値を採用する。
- 5) 以上の 1, 3, 4 項の測定値 $Q(\lambda)$, $\Phi_{\text{ab}}(\lambda)$, I_{scm} から較正值 $I_{\text{sc cal}}$ を計算する。
- 6) 2～5 項までの操作を少なくとも 3 度繰り返し、その $I_{\text{sc cal}}$ の平均値を較正值とする。

このような手順でなされる較正值の再現性は非常に良く、標準偏差は 0.6% である。屋内較正装置の詳細については、文献¹¹⁾を参照していただきたい。

最後に、現在、IEC TC-82 委員会に提案されている ASTM 屋外較正法 (Total Sunlight Method), RAE 屋外較正法 (Global Sunlight Method) と、著者等の提案した日本の屋内較正法 (Solar Simulator Method) との比較を表 7.1 に示した。詳細については、IEC TC-82 委員会の文書¹³⁾を参照していただきたい。

7.3 屋内較正值と屋外較正值の比較

異なった絶対基準に基づいた 2 種の較正法、すなわち、WRR 基準に基づく屋外較正法と標準ランプに基づく屋内較正法が存在していることになるが、この両者の調和を図るために、各種のレファレンス太陽電池の屋内屋外較正值の比較を行った。入射角度依存性⁷⁾を考慮して、(a) モジュール構造 c-Si (結晶シリコン) 太陽電池 (1 個)、(b) モジュール構造 a-Si (アモルファスシリコン) 太陽電池 (2 個)、(c) 裸の c-Si 太陽電池 (2 個)、(d) 不活性ガスで封止された c-Si 太陽電池 (2 個)、の 4 種類のレファレンス太陽電池を選び、前述した日本の屋内較正法と、IEC TC-82 推奨の ASTM の屋外較正法^{3), 8)}により較正を行った。

屋内較正は、前述した屋内較正システムを使用し、屋外較正は、図 7.2 に示されるような測定システムを使用して傾斜面 (太陽光に垂直) 全天日射下で行った。この屋外較正システムは、WRR 基準に適合した絶対放射計 (気象庁の絶対放射計 PMO-6) によって較正された全天日射計 EKO MS-801 と大気パラメータ (混濁度と降水量) を計測するためのサンフォトメータを装備し、そして、同時に 4 個の太陽電池を $25 \pm 2^\circ\text{C}$ に保持して較正することができるシステムとなっている。傾斜面全天日射下における出力測定は、大気条件が多少変化しても安定で⁴⁻⁷⁾、代表的な測定例を図 7.3 に示す。c-Si 太陽電池の場合は、かなり広い大気条件の範囲で安定で、変動は $\pm 1\%$ 程度であった。

今回の屋外較正は、波長 500nm における混濁度 τ が $0.26 \sim 0.64$ 、降水量 W が $12.2 \sim 18.5\text{mm}$ 、エアマス m が $1.02 \sim 1.22$ 、傾斜面全天日射 E_m が $85.6 \sim 95.7\text{mW}/\text{cm}^2$ の条件下で、少なくとも各々

表7.1 レフアレンス太陽電池較正法の比較

	日本提案による屋内較正法 [IEC;Solar Simulator Method]	ASTM屋外較正法 [IEC;Total Sunlight Method]	RAF屋外較正法 [IEC;Global Sunlight Method]
基準状態 標準太陽光 温度 放射照度	IEC AM1.5 global sunlight 大気条件 AM1.5 混濁度パラメータ τ 0.27 at 0.5 μ m 下降水量 1.42cm オゾン 0.34cm ground albedo 0.2 傾斜角 37° 25°C 1000W/m ²	同 左	同 左
日射量測定	スペクトロラジオオメータ (標準ランンプ基準)	全天日射計 (WRR基準) 太陽光追尾 (global normal) 但し、地表面その他のからの反射がないこと、あるいは、水平面遮へい付太陽追尾	全天日射計 (WRR) 水平面 (horizontal)
採光条件	• Aクラスの太陽高近似のソーラシミュレータ • 放射照度1000W/m²	• 快晴、太陽光球の周囲30°以内に雲がないこと。 • 大気条件は充分安定で、日射計応答時間の2倍以上の間における太陽電池電流変動は±0.5%以下であること。 • 全天日射量750W/m²以上 大気条件 Air Mass 1.25~1.75 (太陽高度53.1°~34.8°) 但し、IEC提案では900W/m ² 以上、Air Mass 1~2となっている。	• 快晴、太陽光球の周囲30°以内に雲がないこと。 • 分光放射照度測定に必要な時間は充分安定であること。 • 800W/m²以上 Air Mass≤1.24 (太陽高度≥54°) 散乱日射成分は全天日射量の25%以下

表7.1 レファレンス太陽電池較正法の比較 (つづき)

	日本提案による屋内較正法 [IEC;Solar Simular Method]	ASTM屋外較正法 [IEC;Ttotal Sunlight Method]	RAE屋外較正法 [IEC;Global Sunlight Method]
		混濁度パラメータ α 0.80~2.20 β 0.03~0.16 τ 0.265±0.185 降水量 0.40~2.60cm m×W 0.6~3.9	
分光放射照度測定と修正計算	測定と修正計算の必要あり	測定と修正計算の必要なし ※但し、a-Si太陽電池のときは必要となる。	測定と修正計算の必要あり。 ※但し、修正されない較正值と修正された較正值の間に有意差がなく、分光放射照度測定と修正計算は不要となるかもしれない。
測定回数	3回以上の測定の平均値	較正值は2日間、5回以上の測定の平均値	較正值は2日間以上、1日当たり5回の測定の平均値
※コメント	・常時測定可能であり、測定精度は標準ランプ及びスペクトロラジオメータの絶対精度で決定される。ただ、この絶対基準とWRR基準の比較較正法が国際的に確立されていないため標準ランプ基準がIECで認知されていない。 ・a-Si太陽電池に適用するとき、短波長の分光放射照度測定精度が少し悪くなり、較正精度の点で心配が残る。	・測定チャンスは多いが水平面全天日射計の本来の使用方法とは異なるため測定精度の上で心配が残る。また、WRR基準による全天日射計の較正精度の確立が必要となる。 ・a-Si太陽電池に適用するとき、分光放射照度測定と修正計算が必要となる。この補正はJapan法と全く同じ方法を屋外で行うことになり、測定精度はJapan法より悪くなる。	・測定精度が最も良い手法であるが air mass≤1.24であるため測定チャンスが限られてくる。air massを大きくして測定チャンスを増やした場合、太陽電池の入射角度依存性による誤差が大きくなり測定精度が悪くなる。 ・同左

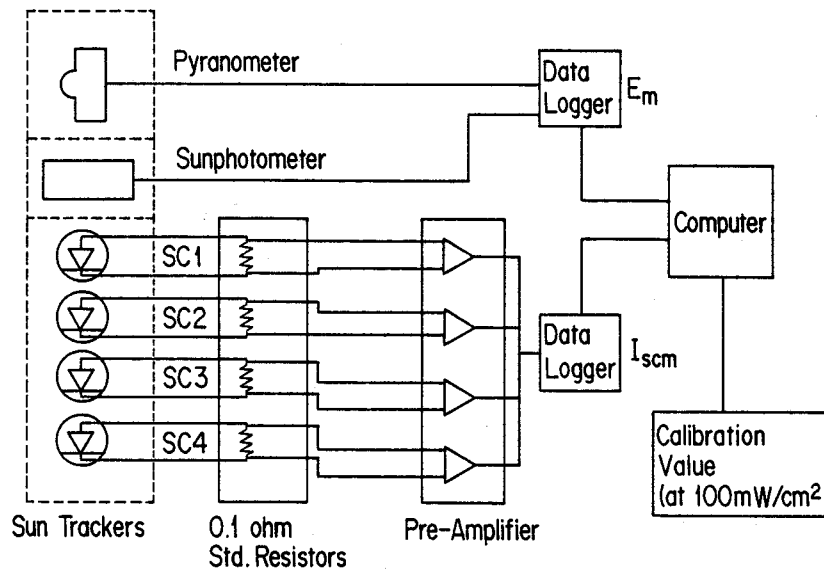


図7.2 太陽電池の屋外較正システムのブロック図

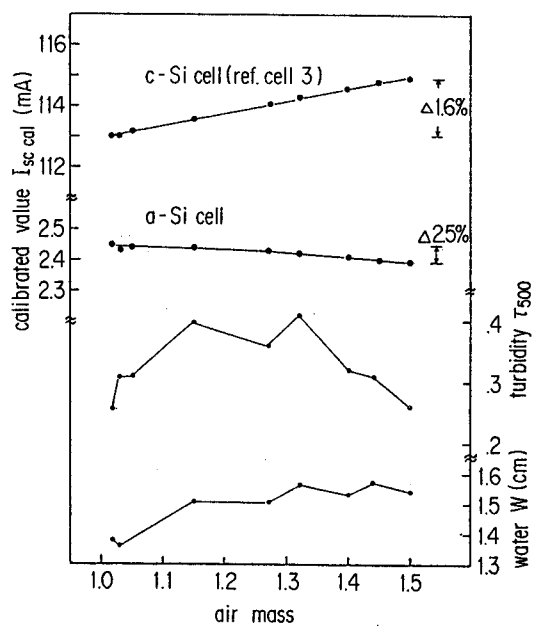


図7.3 傾斜面全天日射下における c-Si 太陽電池と a-Si 太陽電池の屋内較正值の変動

3 回行い、その平均値を較正值とした。エアマス m を除いた他の大気条件は、標準の大気条件⁶⁾よりも少し広がっている。エアマスについては、太陽電池の光応答特性（分光感度）の入射角度依存性を考えて、エアマス値の低い場合、即ち太陽高度の高い場合を選んだ。IEC AM1.5 全天日射の標準太陽光を採用した場合の較正結果を、表7.2の前2列に示した。屋外測定値の変動巾については、表に%で示されている。モジュール構造の c-Si レファレンス太陽電池#3 の場合は、数ヶ月間の較正結果の変動巾が記されている。また、() 内の数値は、屋外較正值に対する屋内較正值の比率を表している。表7.2の前2列の屋内・屋外較正值を比較すると、結晶シリコン太陽電池の場合は非常に良い一致を示すが、アモルファスシリコン太陽電池の場合は両者が一致せず屋内較正值の方が4%程低くなっている。放射基準の異なる方法による較正值の比較であるが、いずれの放射基準も絶対測定技術により確立された基準であり、測定精度の確立している結晶シリコン太陽電池において良い一致を示すことは当然ともいえる。この点に関しては、次の屋内、屋外較正法における2つの放射基準の比較がなされた後に厳密に議論することにする。本節では、不活性ガス封止の c-Si 太陽電池の屋外較正值に対する屋内較正值の比率を表す() 内の数値が、他の構造の c-Si 太陽電池のものよりも1%高くなっていることに注目したい。これは、太陽電池の光応答特性(分光感度)が入射角度依存をもち、その中でもこの不活性ガス封止の構造のものが特に依存性が強い⁷⁾ことに原因しているものと思われる。

7.4 標準ランプ基準と WRR 基準の比較

ソーラシミュレータの放射照度を約 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ に設定し安定化した後に、スペクトロラジオメータ（波長域 $280\text{nm} \sim 2,000\text{nm}$ ）を使用してこの照射光の絶対分光放射照度 $\phi_{\text{ab}}(\lambda)$ を測定し、続いて、WRR 基準の全天日射計 EKO MS-801 を使用してこの照射光のトータルの放射照度 E_m を測定した。この二つの測定値を比較する場合に問題となる波長 $2,000\text{nm}$ 以上の帯域の放射照度は、次の二つの方法で測定した。一つは、波長帯域 $2,000\text{nm} \sim 2,730\text{nm}$ において透過率が0.71であるバンドパスフィルタと全天日射計 EKO MS-801 を使用して波長 $2,000\text{nm}$ 以上の放射照度を測定する方法で、もう一つは、波長 $280\text{nm} \sim 2,500\text{nm}$ の相対分光放射照度測定が可能なスペクトロラジオメータを使用する方法である。後者の方法から得られた照射光の分光分布を図7.4に示したが、この方法から $280\text{nm} \sim 2,000\text{nm}$ と $2,000\text{nm}$ 以上の放射照度の比率を知ることができる。また、前者の方法からは、図7.4からわかるように $2,000\text{nm}$ 以上の放射照度を測定することができる。以上の比較測定をソーラシミュレータの AM フィルタを変えて2度行い、その結果を表7.3に示した。参考のために、EKO MS-801 に代えて Eppler 社のサーモパイルを使い放射照度を測定したが、この結果も併せて表7.3に示した。但し、Eppler 社の較正值は、気象庁において絶対放射計 PMO-6 を基準としてシャドウ方式で較正した値よりも4%低い値となっている。従って表7.3に示される如く、EKO MS-801 を使用した場合よりも放射照度が4%大きくなっているのは当然といえる。この全天

表7.2 各種レフアレンス太陽電池の屋内較正值と屋外較正值の比較

	較正值 $J_{sc\ ca1}$ (mA per 100mW/cm ²)		
	傾斜面全天日射下の較正值 (EKO MS-801, WRR基準)	屋 内 較 正 値 (スペクトララジオメータ, 標準ランプ基準)	屋 内 較 正 値 (EKO MS-801, WRR基準)
(1) レフアレンス太陽電池 # 1 ・不活性ガス封止のc-Siセル ・裸のc-Siセル	114.00, ±0.3% 122.32	114.16 (100.14%) 121.19 (99.08%)	116.10 (101.84%) 123.25 (100.76%)
(2) レフアレンス太陽電池 # 2 ・不活性ガス封止のc-Siセル ・裸のc-Siセル	136.37, ±0.2% 146.34	136.66 (100.21%) 144.94 (99.04%)	138.98 (101.91%) 147.40 (100.72%)
(3) レフアレンス太陽電池 # 3 ・モジュール構造のc-Siセル	114.37, ±1.3%	114.00 (99.68%)	115.94 (101.37%)
(4) レフアレンス太陽電池 # 4 ・モジュール構造のa-Siセル	23.96, ±0.5%	23.08 (96.33%)	23.47 (97.95%)
(5) レフアレンス太陽電池 # 5 ・モジュール構造のa-Siセル	24.78, ±0.6%	23.86 (96.29%)	24.27 (97.94%)

* () は屋内較正值／屋外較正值 (%)を示す。

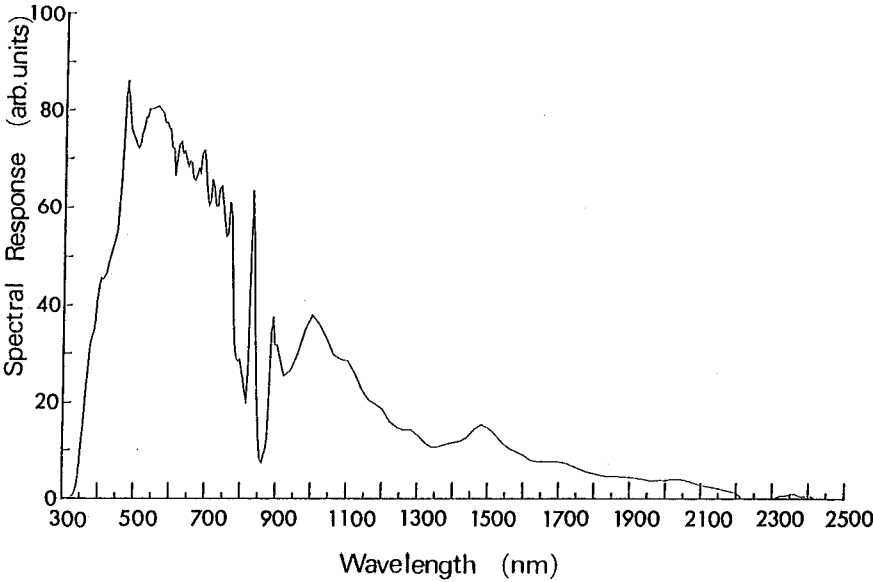


図7.4 ソーラシミュレータの相対分光放射照度分布

日射計，サーモパイルの較正の問題は今後の課題として残されている。

比較測定の結果，屋内屋外較正法における 2 つの放射基準の比較が可能となり，表7.3の波長 280nm～2,000nm 帯の数値に示されるように，WRR 基準の全天日射 EKO MS-801 による放射照度の方が，標準ランプ基準のスペクトロラジオメータの積分放射照度の値よりも約 2 %小さくなっている。これは第 1 回目も第 2 回目も同様である。(7.2) 式から，換算のための定数 “a” の値を求めることができ，

$$a = \frac{E_m}{\int \Phi_m(\lambda) d\lambda} = 0.9821 \quad (\text{第 1 回})$$
$$= 0.9834 \quad (\text{第 2 回})$$

平均して， $a=0.9828$

となり， $\Phi_{ab}(\lambda)=0.9828\Phi_m(\lambda)$ と表すことができる。

次に，(7.3) 式から WRR 基準に基づいた屋内較正値を算出することができ，その結果を表7.2 の第 3 列に示した。第 1 列と第 3 列の比較により WRR 基準の EKO MS-801 を基準とした屋内屋外較正値の比較が可能で，結晶シリコンレファレンス太陽電池の場合は，屋内較正値の方が屋外較正値よりも 1～2 %高く，そして，これらの値は，5.4.2.2項の太陽電池光応答特性の入射角度依存性による測定誤差の理論計算結果と良く一致する。また，不活性ガス封止の c-Si 太陽電池の場合に測定誤差が大きくなる点も一致している。一方，a-Si 太陽電池の場合は，逆に屋内較正値の方が屋外較正値よりも 2 %低くなっている。理論計算⁷⁾からは，光応答特性の入射角度依存性が原因で前

表7.3 標準ランプ基準のスペクトロラジオメータ積分放射照度値と WRR 基準の全天日射計放射照度値の比較

	AM 1.5 ソーラシミュレータの放射照度 (mW/cm ²)			
	スペクトロラジオメータ (標準ランプ基準)	EKO MS-801 (WRR基準)	Eppley サーマوپाइル (WRR基準)	スペクトロラジオメータ (相対値)
第1回目 全波長 >2000nm 280nm~2000nm	101.56	102.83 (100%) 3.09 (3.00%) 99.74 (97.00%)	106.25 (100%) 2.60 (2.44%) 103.65 (97.56%)	
第2回目 全波長 >2000nm 280nm~2000nm	101.92	102.20 (100%) 1.97 (1.93%) 100.23 (98.07%)	106.21 (100%) 1.59 (1.50%) 104.62 (98.50%)	106.72 (100%) 1.63 (1.52%) 105.10 (98.48%)

者の方が1～2%大きくなるはずであるので、a-Si 太陽電池の場合3～4%の測定誤差が屋内と屋の間にあることになる。この原因としては、図7.3にみられるように屋外較正時における大気変化による誤差、そして屋内較正法における紫外部の分光放射照度測定精度からくる誤差がれる。

7.5 まとめ

本研究では、較正されたスペクトロラジオメータを使用して、ソーラシミュレータの下でレファレンス太陽電池を較正する屋内較正法を確立した。そして、屋内・屋外較正值の比較を行った結果、WRR 基準の全天日射計 EKO MS-801 による放射照度の方が標準ランプ基準のスペクトロラジオメータの積分放射照度よりも約2%小さくなっていることが明確になった。また、結晶シリコン太陽電池の場合には、この放射照度基準の相違からくる誤差約2%と光応答特性の入射角度依存性による測定誤差1～2%を考慮すると非常に良い一致をみた。しかしながら、放射照度基準となる全天日射計、サーモパイルの較正值にはバラツキがあり、この問題は今後に残されている。

参考文献

- 1) Terrestrial Photovoltaic Measurement Procedures, NASA TM 73702, June, 1977.
- 2) F. C. Treble : Proc. EC Photovoltaic Solar Energy Conf., Luxemburg, 1977 (Reidel, Dordrecht, 1978) p. 732.
- 3) American Society for Testing and Materials; Calibration and Characterization of Non-Concentrator Terrestrial Photovoltaic Reference Cells under Global Irradiation, ASTM Stand, E1039-85.
- 4) H. B. Curtis : Proc. 14th Photovoltaic Specialists' Conf., San Diego (IEEE, New York, 1980) p. 500.
- 5) R. D. Whitaker, A. W. Purnell and G. A. Zerlaut : Solar Cells 7 (1982-1983) 135.
- 6) R. Shimokawa, Y. Miyake, Y. Nakanishi, Y. Kuwano and Y. Hamakawa : Jpn. J. Appl. Phys. 25 (1986) L102.
- 7) R. Shimokawa, Y. Miyake, Y. Nakanishi, Y. Kuwano and Y. Hamakawa : Solar Cells 19 (1987) 59.
- 8) F. C. Treble : Proc. 17th Photovoltaic Specialists' Conf., Florida 1984 (IEEE, New York, 1984) p. 482.

Details are written in "Requirements for Reference Solar Cells along with Four Currently in Use Methods for Calibrating Primary Reference Solar Cells, IEC TC-82 Draft 82

(Secretariat) 24, June 1985”.

- 9) American Society for Testing and Materials, Terrestrial Solar Spectral Irradiance Tables at Air Mass 1.5 for a 37° Tilted Surface, ASTM Standard E892, 1982.

This irradiance is written in “Measurement Principles for Terrestrial Photovoltaic Solar Devices with Reference Spectral Irradiance Data, IEC TC-82 Draft 82 (Secretariat) 19, 1985.”

- 10) 助光産業技術振興会「オプトエレクトロニクスの標準化に関する調査研究IV」, 昭和60, p. 512.
11) R. Shimokawa, F. Nagamine, Y. Miyake, K. Fujisawa and Y. Hamakawa : Jpn. J. Appl. Phys. **26** (1987) 86.
12) M. Suzuki and N. Ooba : Metrologia **12** (1976) 123.
13) IEC TC-82 Draft 82/WG2 (Secretary) 87, September 1986.

第8章 レファレンス太陽電池方式の異種基板材料太陽電池への適用性

8.1 まえがき

低コスト太陽電池の研究開発が進み、従来の単結晶シリコン太陽電池以外に、多結晶シリコン太陽電池、アモルファスシリコン太陽電池、そしてII-VI族化合物の薄膜太陽電池が市場に登場し、これらの新型太陽電池の評価方法が問題となってきた。現在、普及しつつあるレファレンス太陽電池方式による出力測定法は、単結晶シリコン太陽電池を想定して考案された評価方法で、出力電流が光量に対して直線性を有していること、そして、被測定太陽電池とレファレンス太陽電池の相対分光感度が同じであること、を前提としており、新型太陽電池にどの程度適用可能であるかが検討課題として残されている。

本章では、最近進歩の著しい多結晶シリコン太陽電池とアモルファスシリコン太陽電池をとりあげ、レファレンス太陽電池方式の適用性を検討する^{1),2)}。

8.2 多結晶シリコン太陽電池への適用性

新しく開発された多結晶シリコン太陽電池の測定法上の特徴は、分光感度特性が照射光強度及びそのスペクトル分布に依存する³⁾ことである。従って、基本的には照射光強度に対する直線性はなく、また異なった光源下においては異なった分光感度をもつことになる。その上、多結晶シリコン太陽電池の製品のバラツキが大きいためにレファレンス太陽電池と被測定太陽電池の分光感度の間にはかなりの相違が生じうる。これらは、いずれもレファレンス太陽電池方式による出力測定において誤差を生む要因となる。

本節では、まず、各種のバイアス光照射下においてEFG (edge-defined film-fed growth) シリコン太陽電池とキャスト (casting, 鋳造) シリコン太陽電池の分光感度を測定し、光量に対する出力の直線性を調べる。次に、多結晶シリコン太陽電池の分光感度モデルを使用して、分光感度の相違による出力測定誤差計算を行い、レファレンス太陽電池方式の採用の可能性を検討する²⁾。

8.2.1 分光感度特性のバイアス光依存性

8.2.1.1 分光感度測定

AM1.5標準太陽光を擬した人工光源をバイアス光として備えた定エネルギー分光感度測定装置(図8.1)を使用して、各種のバイアス光照射下における多結晶太陽電池の分光感度特性変化を調べ

た。多結晶太陽電池は面内においてかなりの特性のバラツキをもつ³⁾ことを考えて、放射照度の不均一性が $\pm 1\%$ 以下になるように調整されている。測定試料は面積 4cm^2 、p 型、抵抗率 $1\sim 2\Omega\text{cm}$ の EFG (edge-defined film-fed growth) シリコン結晶とキャストシリコン結晶を使用して、通常のリン拡散プロセスで太陽電池に形成したものをを使用した。前者の変換効率は $\text{AM1.5 } 100\text{mW}/\text{cm}^2$ の人工太陽光照射下で約 $7\sim 8\%$ 、後者は約 10% である。

まず、図8.1の光量調整スリットを調整することにより、その照射下で分光感度測定を行うことによって照射光強度依存性を調べた。バイアス光強度測定にはサーモパイル (Eppley 社製) を、信号光の強度測定には焦電型ラジオメータ (LPC 社製) を使用した。信号光 ($27.6\mu\text{W}/\text{cm}^2$) は 80Hz でチョッピングされ、出力信号はプリアンプ、ロックインアンプを通して分離検出された。続いて、SPV法^{4),5)} (surface photovoltage method) により、これらの太陽電池の平均の少数キャリア拡散長を求めた。

次に、波長 $900\sim 1,000\text{nm}$ 付近の長波長の光が最も大きなバイアス効果をもたらす³⁾ことを考慮して、バイアス光源の AM1.5 フィルタを取り去った裸の Xe ランプ照射下において分光感度測定を行い、簡易的に光源のスペクトル分布の違いによる分光感度変化の様子を調べた。

8.2.1.2 分光感度特性のバイアス光依存性

バイアス光 (AM1.5 人工太陽光) 強度を変えたときの EFG シリコン太陽電池とキャストシリコン太陽電池の分光感度特性変化の代表例を図8.2、図8.3に示した。EFG シリコン太陽電池は EFG シリコン基板の結晶性が未だもう一歩で特性のバラツキが大きい³⁾。良好な結晶の部分から製作されたものは図8.2 (a) のような特性を、あまり良くない部分からのものは図8.2 (b) のような特

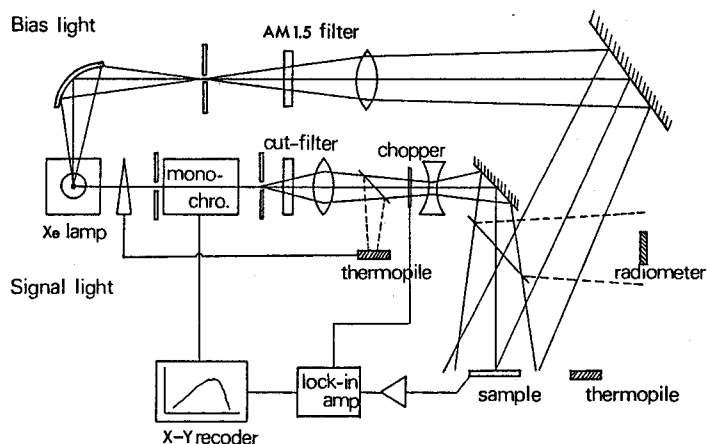


図8.1 定エネルギー分光感度測定装置

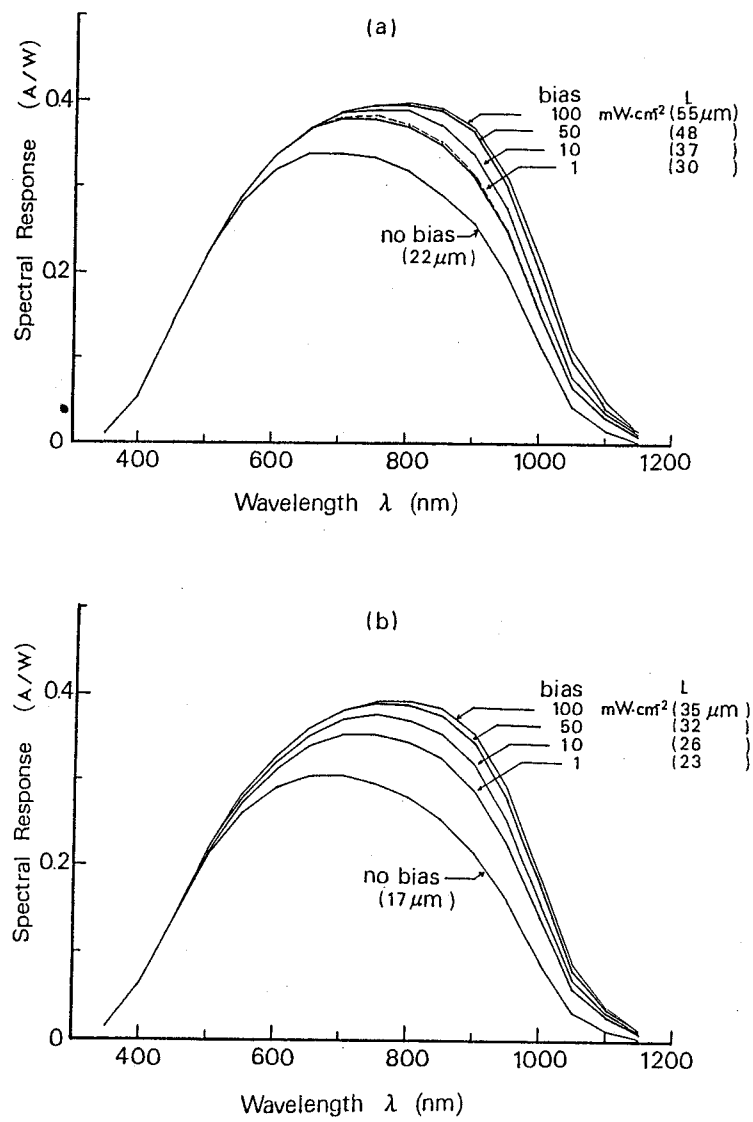


図8.2 EFG シリコン太陽電池の分光感度特性のバイアス光依存性
(a)結晶性の良い部分から製作された太陽電池。破線は裸のキセノンランプ光 $1mW/cm^2$ 照射下における分光感度, (b)結晶性の良くない部分から製作された太陽電池。

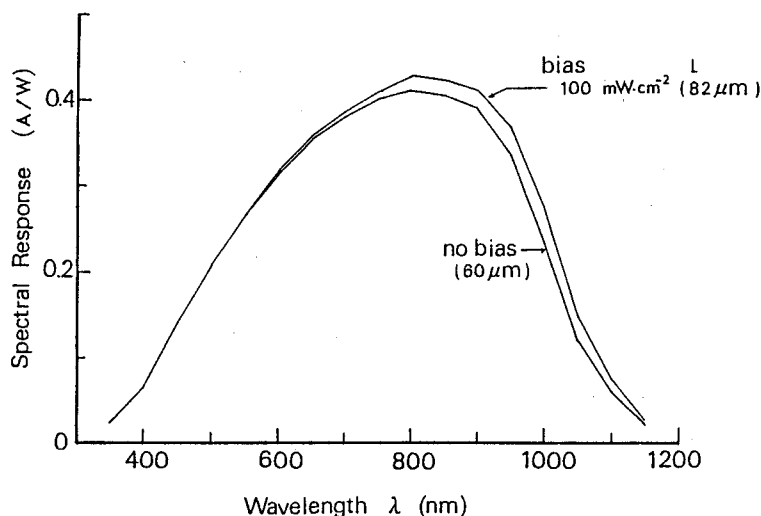


図8.3 キャストシリコン太陽電池の分光感度特性のバイアス光依存性。

性をもつ。いずれも大きなバイアス光強度依存性を示している。キャスト太陽電池は、特性のパラツキもバイアス光強度依存性もともに小さく、図8.3に示すような分光感度特性をもつ。SPV法で評価した少数キャリア拡散長(L)を図に示しておいたが、キャストシリコン太陽電池では、バイアス光なしの場合約 $60\mu\text{m}$ 、 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ のバイアス光照射下では約 $80\mu\text{m}$ である。バイアス光照射強度 $50\sim 100\text{mW}/\text{cm}^2$ の範囲では、分光感度特性に大きな変化がみられなく、少数キャリア拡散長にも有意差が現れなかった。他方、EFGシリコン太陽電池の場合は、バイアス光効果が大きく、良質の結晶部分から製作された太陽電池の少数キャリア拡散長(L)は図8.4のようなバイアス光強度依存性を示した。図には参考のために、各バイアス光強度下における太陽電池の波長 700nm 、 900nm の光応答特性と、分光感度(R_λ)と $100\text{mW}/\text{cm}^2$ AM1.5 標準太陽光の分光放射照度(E_λ)の積を全波長にわたって積分した値($J = \int R_\lambda E_\lambda d\lambda$)を示しておいた。この図8.4のバイアス光強度依存性は、EFGシリコン太陽電池の局所の特性を調べた結果³⁾と同じ傾向を示しており、第4章で述べた deep-trap filling model で理解することができる。照射強度が $100\text{mW}/\text{cm}^2$ の付近においては、拡散長 L の増大にもかかわらず分光感度特性の変化は小さく、積分計算による出力電流値 $J = \int R_\lambda E_\lambda d\lambda$ は飽和する傾向にある。

分光感度のバイアス光スペクトル分布依存性については、バイアス光が AM1.5 人工太陽光の場合と裸のキセノンランプ光の場合の分光感度測定結果の比較を行うことによって検討された。裸の

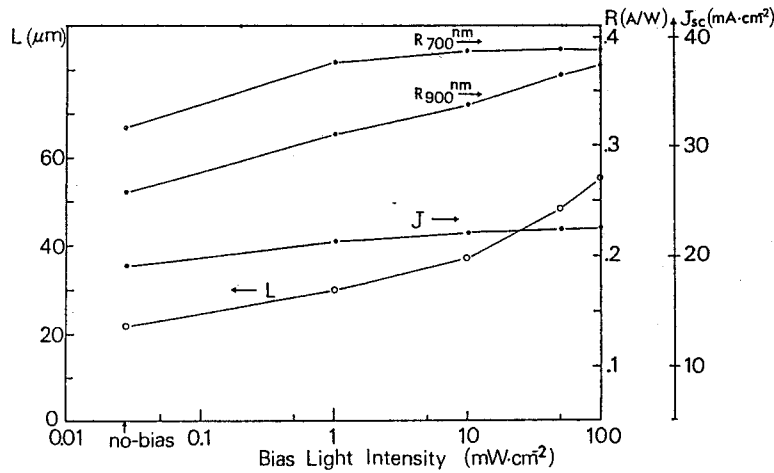


図8.4 EFG シリコン太陽電池の少数キャリア拡散長及び光応答特性のバイアス光強度依存性。

キセノンランプ光バイアスの結果は図8.2(a)に破線で示しておいた。バイアス光強度が $1\text{mW}/\text{cm}^2$ と低い場合に、裸のキセノンランプ照射下における方が長波長感度が幾分大きくなるが、 $10\text{mW}/\text{cm}^2$ 以上の場合には全く有意差がみられなかった。これは、 $10\text{mW}/\text{cm}^2$ 以上の照射強度で分光感度測定や出力電流測定がなされるときは、照射光のスペクトル分布を考慮しなくても良いことを示している。

8.2.2 照射強度に対する出力電流の直線性

出力電流の照射光強度に対する直線性については、光ビームが発散する方式の AM1.5 人工太陽光照射下において照射距離を変えることによって調べられた。照射光のスペクトル分布の変化は光源の安定度 $\pm 1\%$ 以下であることが、スペクトロラジオメータによって確認された。照射強度を変えて出力電流を測定した結果を図8.5に示した。キャストシリコン太陽電池、EFG シリコン太陽電池は、いずれも、人工太陽光の安定度 $\pm 1\%$ の範囲内で直線性を示している。分光感度が照射強度依存性を強く示す EFG シリコン太陽電池の場合においても、図8.4に示す如く $50\sim 100\text{mW}/\text{cm}^2$ の強度範囲においては、積分計算による出力電流値 $J = \int R_\lambda E_\lambda d\lambda$ は飽和する傾向にある。 $50\text{mW}/\text{cm}^2$ のバイアス光照射下における分光感度 (R_λ) のときは、 $J = 22.44\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ のバイアス光照射下における分光感度 (R_λ) のときは $J = 22.75\text{mA}/\text{cm}^2$ である。すなわち、EFG シリコン太陽電池の場合においてもこの程度の非直線性しか示さず、 $50\sim 100\text{mW}/\text{cm}^2$ の放射照度下で測定がなされるならば、この非直線性による測定誤差は 1.36% 以下にとどまる。

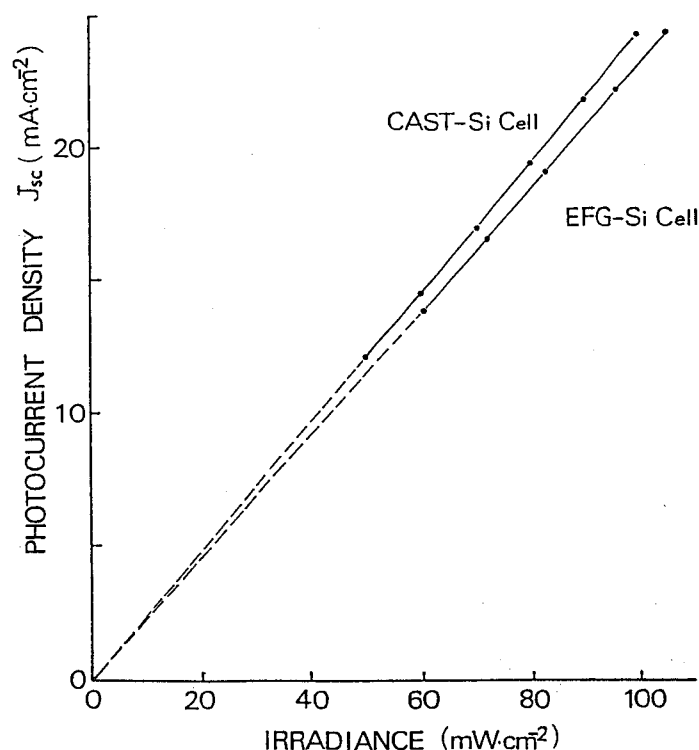


図8.5 キャストシリコン太陽電池と EFG シリコン太陽電池の出力電流特性の直線性。

8.2.3 出力測定誤差の計算

単結晶シリコン太陽電池の場合と全く同様に、5.2.2項の分光感度モデルを使用してレファレンス太陽電池方式による多結晶シリコン太陽電池の出力測定誤差の計算解析を行った。計算に使用した単結晶シリコン太陽電池の分光感度モデル（実線）と図8.2（a）の EFG シリコン太陽電池の分光感度（破線）の比較を図8.6に示した。測定に供された多結晶シリコン太陽電池は、単結晶シリコン太陽電池よりも幾分接合が深いために、短波長域における感度が少し悪くなっている。しかし、問題とされている分光感度特性変化の現れる長波長域においては、分光感度モデルと多結晶シリコン太陽電池の実測の傾向は良く一致しており、単結晶シリコン太陽電池と連続的に考えるメリットもあり、同一の分光感度モデルを使用した。レファレンス太陽電池としては少数キャリア拡散長 $L=60\mu\text{m}$ の太陽電池（セル③）を、被測定太陽電池としては少数キャリア拡散長 $L=20\sim 120\mu\text{m}$ の太陽電池（セル①②④⑤⑥）を選び、光源としては、第5章の直達日射モデルと4種類の Xe 人工太陽光を使用した。

各種測定光源下における誤差計算結果を表8.1に、そして屋外測定における測定誤差が大気パラメータ m , β , W によって変化する様子を図8.7に示した。測定誤差の傾向は6.3.3項で述べた単

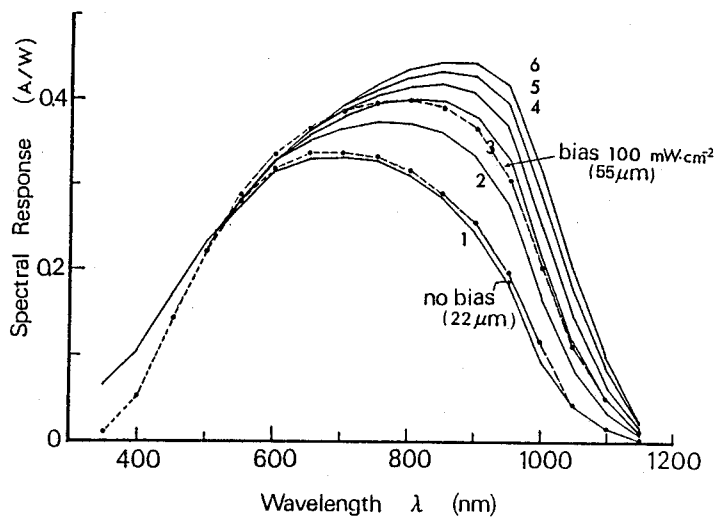


図8.6 計算に使用された分光感度モデル（実線）とEFGシリコン太陽電池の分光感度特性（破線）の比較。

表8.1 c-Si 太陽電池の誤差計算結果 (%)

Cell	Cell-1 (L=20μm)	Cell-2 (40μm)	Cell-3 (60μm)	Cell-4 (80μm)	Cell-5 (100μm)	Cell-6 (120μm)
Sunlight						
m=1.5, β=0.07, W=0.5	-1.002	-0.348	0	0.211	0.351	0.390
1	-0.897	-0.313	0	0.188	0.313	0.344
5	-0.356	-0.122	0	0.081	0.122	0.142
20	0.446	0.157	0	-0.088	-0.147	-0.167
50	1.496	0.499	0	-0.297	-0.489	-0.863
m=1.5, W=10, β=0	1.109	0.366	0	-0.228	-0.396	-0.525
0.05	0.319	0.110	0	-0.060	-0.110	-0.150
0.10	-0.463	-0.151	0	0.111	0.181	0.232
0.15	-1.244	-0.418	0	0.265	0.449	0.612
0.20	-2.009	-0.673	0	0.425	0.735	0.984
β=0.07, W=10, m=0	1.088	0.303	0	-0.180	-0.303	-0.460
0.5	1.046	0.314	0	-0.178	-0.303	-0.418
1.0	0.540	0.163	0	-0.092	-0.163	-0.224
1.5	0	0	0	0	0	0
2.0	-0.543	-0.168	0	0.089	0.158	0.227
3.0	-1.720	-0.541	0	0.309	0.531	0.715
4.0	-2.659	-0.823	0	0.478	0.813	1.100
Simulator I	0.746	0.065	0	0.065	—	0.162
Simulator II	-0.093	-0.185	0	0.206	0.374	0.483
Simulator III	2.088	0.802	0	-0.574	—	-1.405
Simulator IV	-5.277	-1.836	0	1.104	—	2.187

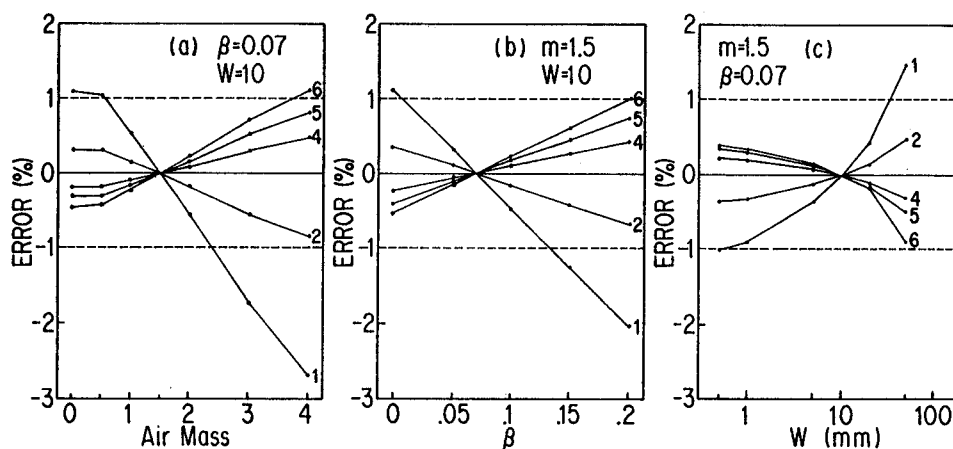


図8.7 $L=60\mu\text{m}$ の太陽電池をレファレンス太陽電池とした場合の各種太陽直達日射下における出力測定誤差。大気パラメータ(a)エアマス m , (b)混濁度 β , (c)降水量 W , の異なった太陽直射光下における誤差の傾向。

結晶シリコン太陽電池の場合と全く同じで、大気パラメータ m , β が異なる条件下で測定がなされるときに大きな誤差を生じる。しかし、通常の出力量測定がなされる $m=1\sim3$, $\beta=0.02\sim0.20$, $W=2\sim30\text{mm}$ の大気パラメータの範囲内で多結晶シリコン太陽電池の $L=40\sim80\mu\text{m}$ の場合を考えると、 m , β , W の違いによって生じる最大の誤差はそれぞれ約0.5%, 0.7%, 0.3%で、合計しても約1.5%にとどまる。更に、 m を限定し、サンホトメータ測定により β , W の範囲を限定するならば、測定誤差は1%以下になりうる。人工太陽光を測定光源とした場合の誤差計算結果も表8.1に示したが、標準太陽光を擬した光源の場合には、測定誤差は1%以下で、そして、紫外域あるいは赤外域の光量の大きな光源の場合でも、測定誤差は2%にとどまっている。

8.3 アモルファス太陽電池への適用性

新しく開発された a-Si 太陽電池の測定法上の特徴は、バイアス光及びバイアス電圧に対して分光感度に変化することである^{1),6)}。従って、基本的には光量に対する出力の直線性はなく、また、分光感度もレファレンス太陽電池のものと相違することになる。これらは、いずれもレファレンス太陽電池方式による出力測定において誤差を生む要因となる。特に、発生した過剰キャリアの寿命が

電界に強く依存する a-Si 太陽電池においては、バイアス電圧による分光感度変化は避けられない問題で、相対分光感度の同一性を基本としているレファレンス太陽電池方式の枠におさまらない可能性を含んでいる。

本節では、まずバイアス光及びバイアス電圧依存性を測定した上で、光量に対する a-Si 太陽電池の出力の直線性を調べ、次に、a-Si 太陽電池の分光感度理論モデルを使用して、分光感度の相違による出力測定誤差計算を行い、レファレンス太陽電池方式の採用の可能性を検討する¹⁾。

8.3.1 分光感度特性のバイアス光、バイアス電圧依存性

8.2節の多結晶 Si 太陽電池の場合と同じ装置を使用して分光感度測定を行った。バイアス光強度 0, 50, 100mW/cm² 下における p-i-n a-Si 太陽電池の代表的な分光感度特性を図8.8に、また、正方向バイアス電圧 -0.2, 0, 0.2, 0.4, 0.5, 0.55V の p-i-n a-Si 太陽電池の代表的な分光感度特性を図8.9に示した。図には測定データと共に、5.2節の a-Si 太陽電池の理論カーブもプロットされている。バイアス光による分光感度変化は、図8.8にみられるように短波長感度が増大する傾向⁶⁾にあるが、わずかしき変化しない a-Si 太陽電池⁷⁾もある。バイアス光強度が低い場合には分光感度変化は大きい、次第に飽和する傾向にあり、50~100mW/cm² の範囲においては全く有意差は見られなかった。また、バイアス電圧の効果であるが、正方向バイアス電圧が増大するに従って分光感度は全波長にわたって減少するが、長波長領域において、いくらか減少が大きくなっている⁷⁾。

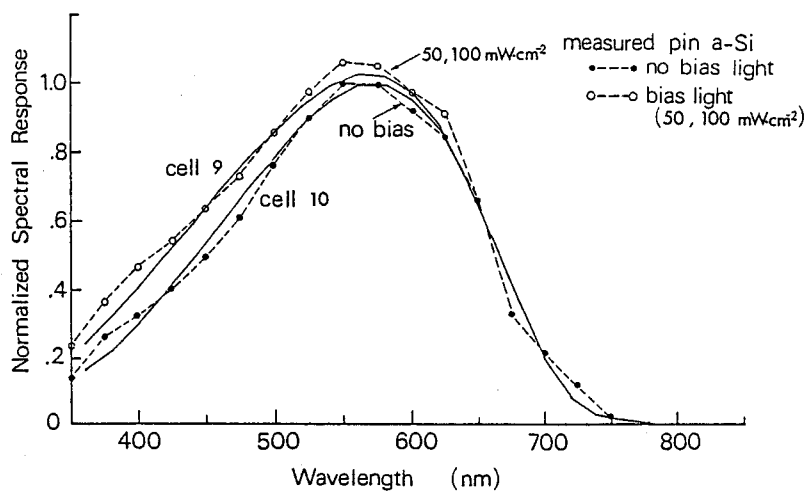


図8.8 p-i-n a-Si 太陽電池の分光感度の照射強度依存性。
実線 (Cell 9, Cell 10) は、分光感度理論モデル。

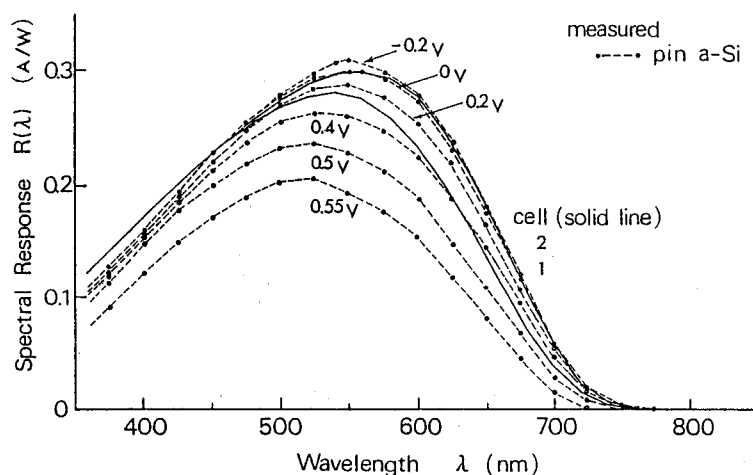


図8.9 p-i-n a-Si 太陽電池の分光感度のバイアス電圧依存性。
実線 (Cell 1, Cell 2) は、分光感度理論モデル。

8.3.2 照射強度に対する出力電流の直線性

多結晶シリコン太陽電池の場合と同じ装置を使用して、AM1.5 人工太陽光の照射強度を変えて p-i-n a-Si 太陽電池の出力測定を行った。照射光強度は Eppley のサーモパイルで測定し、照射光のスペクトル分布に変動がないことはスペクトルラジオメータで確認した。p-i-n a-Si 太陽電池は 25°C に保ち、測定時間は 0.5 秒である。照射強度 20~100 mW/cm² の下で測定した短絡電流 J_{sc} の結果を、他の測定結果 V_{oc} , FF と共に図 8.10 に示した。 J_{sc} は、照射強度に対してわずかに非直線的で、照射強度に対する出力電流 J_{sc} の比として表されるセル感度は、照射強度が大きくなるに従ってわずかに減少している。これらの傾向は、Kuwano⁸⁾ の実験データとよく一致している。この非直線性の程度は、50~100 mW/cm² の照射強度の範囲では約 2.5%、70~100 mW/cm² の範囲では約 1.2% である。従って、レファレンス太陽電池が使用されるときに照射強度の範囲を 70~100 mW/cm² と限るならば、非直線性による測定誤差は人工太陽光の安定度 ± 1% と同程度で許容誤差の範囲内であるといえる。

8.3.3 出力測定誤差の計算

第 5 章の実測の分光感度特性と良い一致を示している分光感度モデル (図 5.6) を使用して、レファレンス太陽電池方式における分光特性の違いによる測定誤差計算を行い、その結果を表 8.2 と図 8.11 に示した。図 5.6 のセル②をレファレンス太陽電池、その他のセルを被測定太陽電池とし、そして、光源としては、第 5 章の直達日射モデルと 3 種類の Xe 人工太陽光を使用した。図 8.11 は、測定誤差の大きさを大気パラメータのエアマス (m)、混濁度 (β)、降水量 (W) に対してプロットした

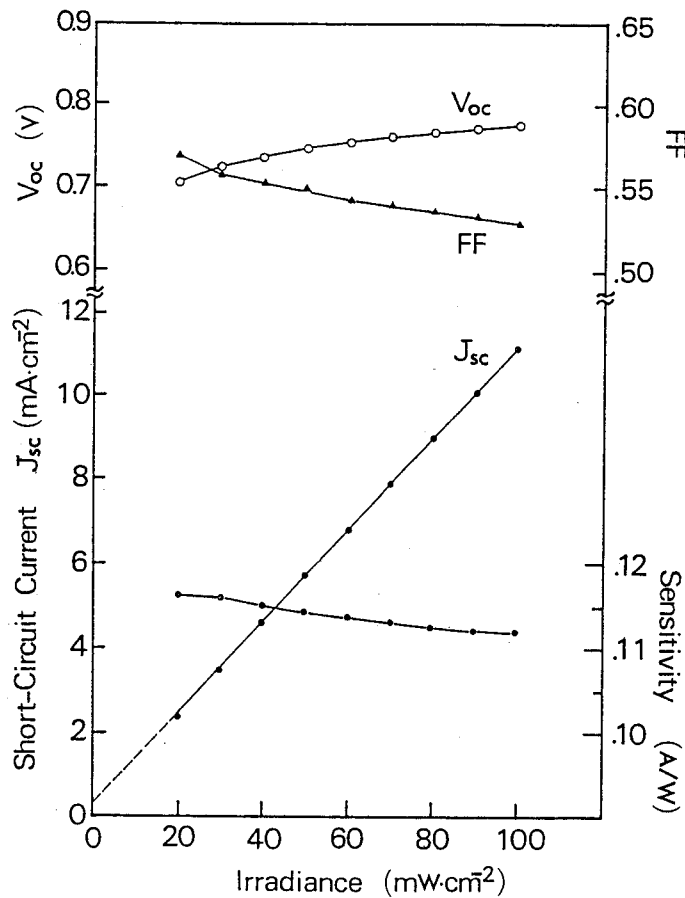


図8.10 p-i-n a-Si 太陽電池の出力電流（短絡電流） J_{sc} ，開放電圧 V_{oc} ，曲線因子 FF ，セル感度の照射強度依存性。

ものである。a-Si 太陽電池の分光感度の相違あるいは太陽光の分光放射照度の相違が大きくなる程，測定誤差が増大することがわかる。分光感度の相違については，バイアス光の効果，バイアス電圧の効果，劣化の影響，デバイスのバラツキ，擬似 a-Si セル，を考慮して少なくともセル①③⑧⑨Fの場合の測定誤差について考えねばならない。今，これらのセルについて測定誤差の大きさを考えるとき，下降水量 W の相違による測定誤差は非常に小さいが， m ， β 値の相違する大気条件のもとでは，結晶 Si 太陽電池の場合よりも測定誤差はかなり大きくなっている。従って，a-Si 太陽電池にレファレンス太陽電池方式の適用を考えると，結晶 Si 太陽電池の場合よりも制限された大気条件下で測定がなされねばならない。もし， $m=1\sim 2$ ， $\beta=0.02\sim 0.15$ ， $W=2\sim 30\text{mm}$ の制限された大気条件のもとで a-Si 太陽電池が測定されるならば，このときの m ， β ， W の違いによる最大の誤差はそれぞれ 0.6%，0.7%，0.03% で全体でも約 1.4% 以下となる。

表8.2 a-Si 太陽電池の誤差計算結果 (%)

Sunlight	CELL-1	CELL-2	CELL-3	CELL-4	CELL-5	CELL-6	CELL-7	CELL-8	CELL-9	CELL-10	CELL-F
m=1.5, $\beta=.07$, W=.5	-0.020	0.000	0.018	0.037	0.156	0.251	0.358	-0.003	0.007	0.013	0.022
	-0.017	0.000	0.015	0.031	0.137	0.220	0.314	-0.003	0.006	0.011	0.020
	-0.007	0.000	0.006	0.012	0.056	0.082	0.117	-0.001	0.002	0.004	0.005
	0.010	0.000	-0.010	-0.019	-0.078	-0.124	-0.178	0.001	-0.004	-0.007	-0.011
	0.027	0.000	-0.026	-0.050	-0.214	-0.344	-0.491	0.004	-0.010	-0.019	-0.031
m=1.5, W=10, $\beta=$	0.573	0.000	-0.368	-0.607	-0.918	-1.460	-1.820	0.885	-0.678	-1.102	0.045
	0.163	0.000	-0.105	-0.175	-0.265	-0.421	-0.526	0.095	-0.189	-0.308	0.015
	-0.245	0.000	0.158	0.262	0.401	0.640	0.801	-0.139	0.269	0.450	-0.029
	-0.651	0.000	0.423	0.702	1.076	1.724	2.158	-0.359	0.718	1.174	-0.090
	-1.053	0.000	0.689	1.144	1.761	2.827	3.545	-0.566	1.136	1.861	-0.167
$\beta=.07$, W=10, m=	1.541	0.000	-0.941	-1.530	-2.162	-3.342	-4.073	1.192	-2.287	-3.659	-0.163
	0.979	0.000	-0.620	-1.020	-1.505	-2.374	-2.937	0.709	-1.366	-2.205	-0.021
	0.485	0.000	-0.310	-0.512	-0.761	-1.205	-1.497	0.335	-0.650	-1.052	0.006
	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	-0.474	0.000	0.308	0.510	0.770	1.230	1.534	-0.299	0.587	0.958	-0.038
3.0	-1.396	0.000	0.920	1.532	2.343	3.770	4.721	-0.813	1.610	2.641	-0.195
4.0	-2.281	0.000	1.526	2.552	3.951	6.394	8.041	-1.233	2.465	4.066	-0.445
Simulator I	1.230	0.000	-0.729	-1.168	-1.551	-2.524	-3.076	1.172	-2.191	-3.474	-0.343
Simulator III	0.083	0.000	0.059	0.162	0.533	0.951	1.337	0.208	-0.473	-0.742	-0.554
Simulator IV	1.345	0.000	-0.785	-1.250	-1.615	-2.417	-2.847	1.243	-2.342	-3.712	-0.331

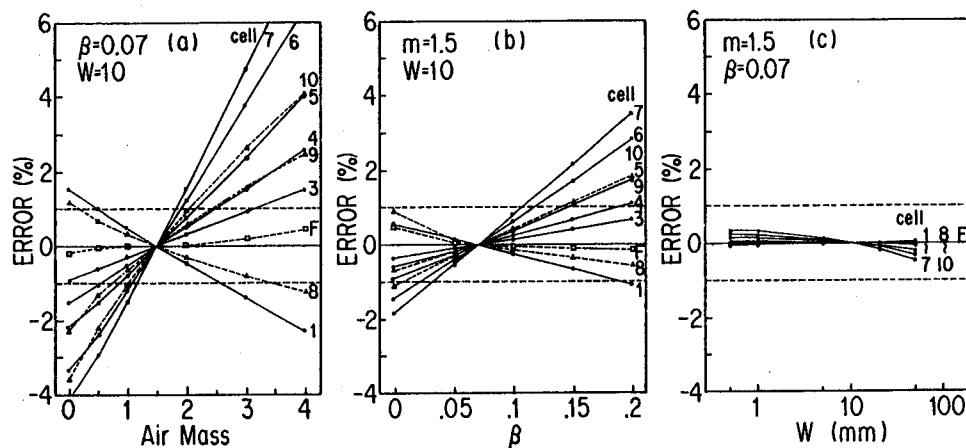


図8.11 Cell 2をレファレンス太陽電池,そして他のセルを被測定太陽電池とした場合の各種太陽直達日射下における出力測定誤差。(a)エアマス m , (b)混濁係数 β , (c)降水量 W ,の異なる大気条件における出力測定誤差を表す。

一方,人工太陽光のもとにおける測定誤差については,表8.2からわかるように特性のよいシミュレータⅢの場合は,セル①③⑧⑨Fに限ると0.5%以下である。特性の悪いシミュレータⅠ,Ⅳの場合でも2.5%以下である。これは, a-Si 太陽電池の感度波長域においてXe ランプの輝線が少なく,測定光源のスペクトル分布が標準太陽光に近似しているためと思われる。

8.4 まとめ

多結晶シリコン太陽電池とアモルファスシリコン太陽電池をとりあげ,レファレンス太陽電池方式による出力測定法の前提である,①放射照度に対する太陽電池電流出力の直線性,そして②被測定太陽電池とレファレンス太陽電池の相対分光感度の合致,について検討がなされた。その結果,前者の“それ”による測定誤差については, $100\text{mW}/\text{cm}^2$ を中心に一定の放射照度の範囲内に限定して出力測定がなされるならば $\pm 1\%$ 以内にする事が可能であり,そして後者の“それ”による測定誤差については,一定の制限された大気条件下で測定がなされるならば $\pm 1 \sim 1.5\%$ 以内にする事が可能であることが明確になった。また,人工太陽光を使用する場合も,標準太陽光を擬したものを使用するならば,分光分布の違いによる測定誤差は $\pm 1\%$ 以内にできることがわかった。従って,分光感度特性が照射光量に依存する多結晶シリコン太陽電池そしてアモルファスシリコン太陽電池,いずれの場合も,単結晶シリコン太陽電池と同様にレファレンス太陽電池方式によって出力を測定することが可能である。但し,アモルファス太陽電池の場合は,大気条件の変化に対して敏感であるために測定誤差が大きくなる傾向にあり,結晶シリコン太陽電池の場合よりも制限された大

気条件下で測定がなされるべきである。

最後に、高効率の太陽電池を目指して研究開発されているタンデム型太陽電池の評価方法について触れておく。このタンデム型のセル構成をもつ太陽電池の場合は、短絡電流の非直線性ばかりでなく、曲線因子 (FF)、開放電圧 (V_{oc}) も、照射光強度あるいはスペクトル分布によって直接影響を受け、短絡電流のレベルを基準状態に合致させるだけのレファレンス太陽電池方式になじまない面が多い。更に、一つの標準太陽光を規約して、その標準太陽下における出力で表現する現在の標準測定法が適切かどうかとも疑わしく、異なったスペクトル分布をもつ、いくつかの太陽光を規約して、その複数の太陽光の下における出力で表現されなければならないかも知れない。いずれにしても、タンデム型太陽電池の出力特性の理論解析を深めると同時に、適切な測定法を開発することが今後の課題となっている。

参考文献

- 1) R. Shimokawa, M. Nishiura, M. Horiguchi and Y. Hamakawa : Solar Cells 19 (1987) 149.
- 2) R. Shimokawa, F. Nagamine and Y. Hayashi : Solar Cells 15 (1985) 39.
- 下川, 長峰, 林 : 電子技術総合研究所イ報, 第49巻2号 (昭和60年) p. 137.
- 3) R. Shimokawa and Y. Hayashi : IEEE Trans. ED-30 (1983) 1770.
- 4) E. D. Stokes and T. L. Chu : Appl. Phys. Lett. 30 (1977) p. 425.
- 5) R. O. Bell and G. M. Freedman : Proc. 13th Photovoltaic Specialists Conf., 1978, p. 89.
- 6) C. R. Wronski, B. Abeles, G. D. Cody, D. L. Morel and T. Tiedje : Proc. 14th IEEE Photovoltaic Specialists' Conf., San Diego, CA, January 7-10, 1980, IEEE, New York, 1980, p. 1057.
- 7) D. E. Carlson : Solar energy conversion, in J. D. Joannopoulos and G. Lucovsky (eds.), The Physics of Hydrogenated Amorphous Silicon I, Springer, Berlin, 1984, p. 203.
- 8) Y. Kuwano, M. Ohnishi, H. Nishiwaki, S. Tsuda, H. Shibuya and S. Nakano : Proc. 15th IEEE Photovoltaic Specialists' Conf., Orlando, FL, May 12-15, 1981, IEEE, New York, 1981, p. 698.

第9章 結 論

本研究は、主として低コスト高効率の多結晶シリコン太陽電池の開発過程においてなされた、太陽電池の光電物性と測定・評価法の研究で、新材料の太陽電池用シリコン多結晶基板の開発とこれに適合したセル製作プロセスの開発を目的としてなされた一連の研究をまとめたものである。

太陽電池の開発初期においては、低コスト化技術から発生してくる結晶の不完全性（不純物、結晶粒界、結晶欠陥）を測定評価し、より優れた結晶基板を製作することに重点がおかれた。著者は、第3章で述べた気相拡散銅デコレーション法を開発し、これを使用して多結晶基板の構造的な評価を行い結晶の改良をはかった。この低コストシリコン結晶基板の結晶性が一定水準に達すると、結晶基板の不完全性が太陽電池出力特性に及ぼす効果が問題になり、多結晶太陽電池の光電物性を評価するために高分解能 MBIC 装置の開発を行った。この高分解能 MBIC 装置を使用して光電的性質の面から結晶の不完全性を観察評価し、少数キャリアデバイスである太陽電池用基板としての、より高度の質をもったシリコン結晶基板の製作をはかった。この装置は $1\sim 2\mu\text{m}$ の位置分解能をもっており、シリコン多結晶の局在した小さな結晶粒界及び結晶欠陥の研究を行うことを可能にした。

続いて、太陽電池の高性能化をはかる目的で、第4章で述べた小面積セル法によるセル出力特性解析に基づいて、結晶粒界及び結晶欠陥のセル出力特性に及ぼす効果、そしてセル出力損失原因になっている要素を明らかにした。また、これらの粒界や欠陥により形成された少数キャリアの捕獲準位分布と少数キャリア拡散長の関連を理論的に解明した。

次に、デバイス性能が向上し太陽電池の効率が高くなるに従い、競合する材料の太陽電池出力や理論出力との客観的な性能比較が問題になった。特に、太陽電池出力が入射スペクトルに大きく左右されることが最大の問題で、これを解決するために、第6、7章で述べた屋内較正に基づくレファレンス太陽電池方式による太陽電池出力の標準測定法を確立した。第5章では、この屋内較正に基づく標準測定法を確立するにあたって、分光感度 $R(\lambda)$ と入射スペクトル $E(\lambda)$ の理論計算モデルを開発し、これにより著者等の提案の正当性を理論的に裏づけた。同時に、各種の大気条件下における太陽電池出力の予測を可能にした。第8章では、このレファレンス太陽電池方式による出力測定法が異種基板材料の多結晶シリコン太陽電池、アモルファスシリコン太陽電池に適用可能であることを実証した。

以下に、本研究によって明らかにされた主要な結果を示す。

- (1) サンプルの清浄表面を保つ気相拡散銅デコレーション法を開発することによって、赤外顕微鏡観察前のサンプル表面処理を不要にし、結晶表面近くの結晶性評価を可能にした。続いて、この手法を使用して EFG リボン太陽電池の光電特性が結晶の歪場と関係していることを見出した。

- (2) ビーム径 $1\sim 2\mu\text{m}$ 、波長 $350\sim 1,150\text{nm}$ 連続可変の高分解能 MBIC 装置を開発し、これを使用することによって、多結晶シリコン太陽電池の結晶粒界の少数キャリア再結合速度と粒界近傍の実効的な少数キャリア拡散長を定量的に評価することを可能にした。そして、粒界の effective influence width を指標とすることによって粒界の効果を定量的に評価できることを示した。続いて、この手法を使用してキャストシリコン結晶の評価を行い、特性の良い太陽電池においては結晶粒界のかなりな部分が双晶粒界になっており、双晶粒界が大きな役割を果していることを明らかにした。
- (3) 高効率キャストシリコン太陽電池の小面積セルを製作し、これらのセルの出力特性、分光感度特性、暗状態における電流・電圧特性の分析を行い、出力損失要因の点検と高効率化の可能性を検討した。結晶粒界や結晶欠陥が空乏層領域における再結合飽和電流の増大、場合によっては並列抵抗の低下をもたらし、その結果、太陽電池の開放電圧 V_{oc} として FF を低下させることを明らかにした。
- (4) 少数キャリア拡散長が照射光強度、照射光波長に従って増大する現象を見出し、そのメカニズムが deep trap-filling model によって定量的に説明できることを示した。そして、これらの理論的検討から各種の結晶粒界及び結晶欠陥による捕獲準位分布を推定し、少数キャリア拡散長との関連を明らかにした。
- (5) 結晶シリコン太陽電池とアモルファスシリコン太陽電池の分光感度モデル、そして、各種の大気条件（大気パラメータ）における自然太陽光の分光放射モデル、を開発することにより、この両者の積和から各種の大気条件における太陽電池出力の理論計算を可能にした。そして、大気パラメータ変化に対して比較的安定な太陽電池出力の測定が可能な条件（大気条件）の範囲を見出した。
- (6) 照射光のスペクトル分布の相違による出力測定誤差を減少するために、レファレンス太陽電池方式による太陽電池出力の標準測定法を確立し、IEC 案及び JIS 案として提案した。また、モジュール構造において発見した光収集エンハンスメント (photon collection enhancement) の効果、ソーラシミュレータ下における反射の効果、等を考慮して、レファレンス太陽電池の最適構造を提案した。
- (7) 放射照度標準ランプで校正されたスペクトロラジオメータを使用してソーラシミュレータの下でレファレンス太陽電池を校正する、屋内校正法を確立した。そして、屋内・屋外較正值の比較を行った結果、WRR 基準の全天日射計による放射照度の方が標準ランプ基準のスペクトロラジオメータの積分放射照度よりも約 2% 低くなっていることが明確になった。
- (8) 分光感度特性が照射光量に依存する多結晶シリコン太陽電池そしてアモルファスシリコン太陽電池、いずれの場合も、単結晶シリコン太陽電池と同様にレファレンス太陽電池方式によって出力を測定することが可能であることを実証した。
- 以上、太陽電池の測定・評価法に関する研究とその実際の適用により、高効率のキャストシリコ

ン太陽電池の製作が可能になった。また、著者等の提案した太陽電池出力の標準測定法は IEC 案及び JIS 案として採用され、現在、成文化されつつある。

謝 辞

本研究は電子技術総合研究所電子デバイス部半導体デバイス研究室において、サンシャインプロジェクト太陽光発電システムに関する技術研究(太陽電池の基礎研究)、経常研究の半導体デバイスの基礎研究の一環として行われたものであります。

本研究を進める上で多大な御教示を賜わるとともに本論文をまとめるにあたり、終始御懇切なる御指導と御討論を賜った大阪大学基礎工学部浜川圭弘教授に衷心より御礼のことばを申し上げます。

また、本論文の作成にあたり、大阪大学基礎工学部難波 進 教授、末田 正 教授、山本錠彦教授には御懇篤なる御検討と御教示を賜りました。厚く御礼申し上げます。

本研究を進めるに当たり、電子デバイス部長鶴島稔夫博士、半導体デバイス研究室長林 豊 博士、前電子デバイス部長片岡照栄博士(現シャープ㈱)、元電子デバイス部長駒宮安男博士(現明治大学教授)の御指導をいただき、心から感謝いたします。また、太陽光発電プロジェクト研究を推進するにあたり電子技術総合研究所次長杉浦 賢 博士、電子計算機部長柏木 寛 博士には、励まし、御教示を賜わり心から感謝致します。特に林室長には本研究の開始当初から本論文をまとめるまでの間、終始一貫して御指導・御討論をいただき、深く感謝致します。

また、本研究を進めるにあたり、御協力いただいた太陽電池標準化委員会(工業技術院標準部委託、(財)光技術産業振興協会)、高効率結晶太陽電池委員会(新エネルギー開発機構委託、テクノバ㈱)の皆様に深く感謝致します。特に、(財)機械電子検査検定協会研究開発部長藤沢和也氏、太陽電池試験研究室長能勢順多氏、主任長峰文昭氏、英弘精機産業㈱取締役製造部長三宅行美氏、ウシオ電機㈱システム事業部技術部長堀口昌宏氏、日本放送協会放送技術研究所物性素子研究部副部長吉川重夫氏、三洋電機㈱中央研究所第5研究部長桑野幸徳博士、日立製作所㈱中央研究所第1部主任研究員齊藤 忠 博士には、本論文における数々の分析・解析に御協力いただき心から感謝致します。

末筆ながら、本研究の期間中終始有益な討論と協力をいただいた信頼性研究室主任研究官由井尚正氏、応用光学研究室主任研究官羽生光宏氏、元応用光学研究室主任研究官鈴木 守 博士(現木更津工業高等専門学校教授)、半導体デバイス研究室室員の皆様に心から感謝いたします。