

第29回IEEE光起電力専門家会議(29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference) 報告

2002.5.27

山口 真史(豊田工大)

1. 開催月日: 2002年5月20日~24日。

2. 開催場所: Hyatt Regency New Orleans (ニューオーリンズ、米国)。

3. 本会議の概要: 1年半毎に開催される太陽光発電に関する米国会議である。今回の会議の組織委員長は J. Benner (NREL)、論文委員長は R. Araya (BP Solar) で、報告者は International Advisory Committee の Co-Chairman をつとめた。今回、R.M. Swanson (Sun Power) が、ポイントコンタクト型高効率結晶太陽電池の開発、集光型セルおよび TPV 技術に関する先駆的業績により、William Cherry Award を受賞した。

38カ国から778名の参加者があり、IEEE-PVSCとしては、これまでの最多の参加者数となった。図1に、国別参加者数を示す。国別では、米国約311名(40%)、日本約86名(11%)、ドイツ約62名(8%)、英国約23名(3%)、オーストラリア約16名(2%)、オランダ2%、フランス2%、ベルギー2%、スペイン2%、の順であった。

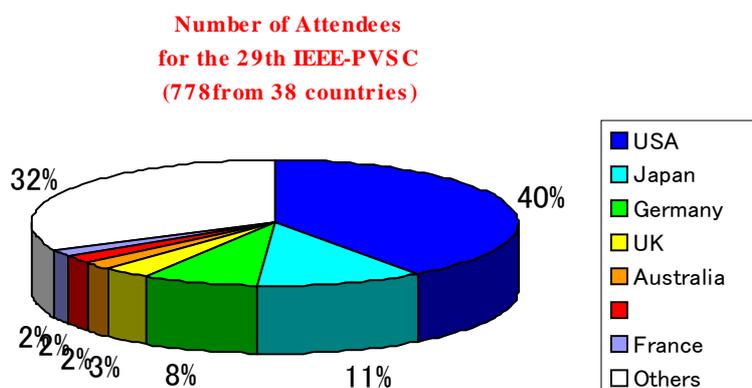


図1 国別参加者数

発表論文については、20日から本会議とジョイントで開催された1st International Conference on Solar Electric Concentrationsの23件を合わせ、479件の発表があった。これまでの最多の発表論文数で、太陽光発電に対する大きな関心と関連分野に参画する人々の増加を反映していると思われる。他に、12件のLate News発表があった。

**Number of Papers to be presented
at the 29th IEEE-PVSC
(New Orleans, USA, May 20-24, 2002)**

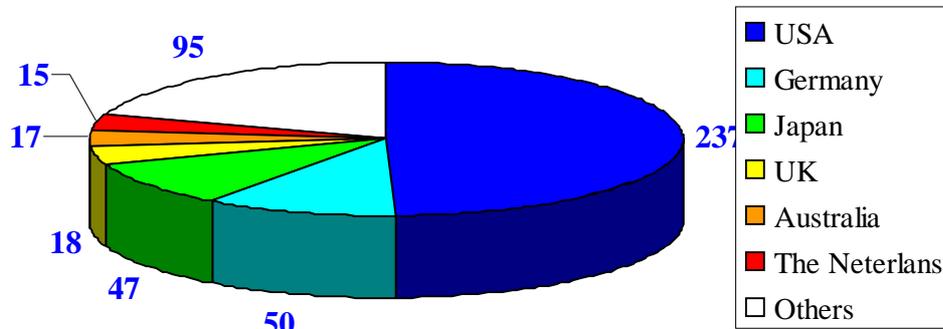


図 2 発表論文数の国別内訳

図 2 には、国別発表論文数（Late Newsを除く）を示す。国別では、米国 237 件、ドイツ 50 件、日本 47 件、英国 18 件、オーストラリア 17 件、オランダ 15 件の順であった。

**Number of Papers to be presented
at the 29th IEEE-PVSC
(New Orleans, USA, May 20-24, 2002)**

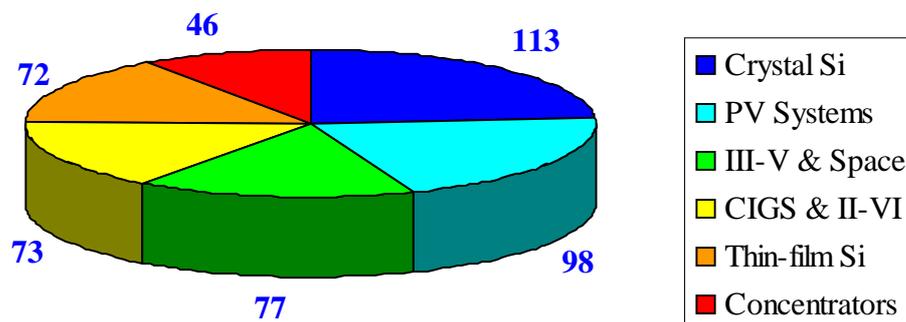


図 3 発表論文数の分野別内訳

表 1 発表機関別の発表論文数

Rank	Affiliation	Country	III-V & Space	Others	Total
1	NREL	USA	6	32	38
2	Fraunhofer ISE	Germany	3	14	17
3	Sandia Nat'l Lab.	USA	1	14	15
4	Toyota Tech. Inst.	Japan	7	2	9
4	Tokyo U. A&T	Japan	0	9	9
4	BP Solar	USA	0	9	9
7	Georgia Tech.	USA	0	8	8
7	ECN	Netherlands	0	8	8
7	Konstanz Univ.	Germany	0	8	8
7	UNSW	Australia	3	5	8
11	Spectrolab	USA	6	1	7

図 3 には、分野別発表論文数を示す。分野別では、結晶 Si 系 113 件、PV システム 98 件、III-V 族を含む宇宙 77 件、CIGS および III-V 族系 73 件、薄膜 Si 系 72 件、集光系 46 件、の順であった。従来、IEEE 会議は、III-V 族を含む宇宙分野や結晶 Si 分野の論文発表が多かったが、今回、PV システム分野の論文発表も多く、プログラム構成に関する運営側の努力の跡が現れていた。

国別で見ると、米国からの発表論文の中では、CIGS 系 50 件、PV システム 49 件、III-V 族・宇宙の 47 件が拮抗していた。日本からの論文発表は、PV システムが多く、次いで、結晶 Si 系 9 件、薄膜 Si 系 8 件、III-V 族・宇宙の 8 件となっている。ドイツ、オーストラリアは共に、圧倒的に、結晶 Si 系の論文発表が多く、国柄が現れていた。

表 1 に、機関別発表件数を示す。欧米の PV に関する COE (中核的研究拠点) に値する研究機関や大学からの発表が多く、PV に関する研究開発の重点化と裾野の拡大の必要性を感じた。

4. III-V 族化合物太陽電池、集光型セル及び宇宙用セル分野の主な発表論文の概要

III-V 族、集光型および宇宙用セル関係では、本会議とジョイントで開催された 1st International Conference on Solar Electric Concentrations の 23 件を合わせると、100 件の論文発表があった。論文委員会の見るハイライトは、宇宙用太陽電池の生産レベルの変換効率 28%、多接合および集光型太陽電池における日本の研究開発の進展、次世代の novel idea であった。

4.1 多接合セルの高効率化

多接合セルの高効率化のための要素技術として、トップセル材料の最適化と高品質化、トンネル接合のバンドギャップ制御と不純物拡散の抑制、格子定数整合、キャリア閉じ込め、光閉じ込め、などがあり、これらの最適化が必要である。

例えば、現状の InGaP、GaAs、Ge のサブセルのバンドギャップ Eg は最適ではない。InGaP トップセル層も薄層化することで、高効率化を実現している。一般的には、オーダー状態の InGaP (Eg = 1.8 eV) が用いられているが、AM1.5 G 用には Eg = 1.9 eV が、AM0 用には Eg = 2.0 eV が最適である。Ge サブセ

ルは、十分な光収集電流が得られているので、ミドルセルの低E_g化が高効率化に有効である。また、GaAsミドルセルも、厳密には、Ge基板には格子不整合系なので、InGaAsミドルセルが検討されている。従って、当面は、InGaP (E_g = 1.9 eV) / InGaAs / Geの3接合セル、将来的には、AlInGaP / InGaAs / ~1.0 eV (GaInNAsなど) / Geの4接合セルが研究開発対象となる。

多接合セルでは、トンネル接合、窓層、BSF層も構造要素であり、これらの少数キャリア物性が重要である。これらの界面での再結合速度の低減が必要である。また、キャリア閉じ込めに加え、光閉じ込めも検討されるべきであり、格子整合を含めて多接合層の結晶品質の向上も重要である。

(1) R.R. King et al. (Spectrolab), "High-efficiency space and terrestrial multijunction solar cells through bandgap control in cell structures"

GaInP / GaAs / Ge 3接合セルの最適化によりAM1.5Gの150~400倍集光で効率34%、AM0の1-sunで効率30.1%の高効率を実現している。NREL、ジャパンエネルギー、豊田工大などが指摘して来た事を忠実に実証したとは言え、見るべきものがある。

GaInPトップセル層として、disorder層のE_g = 1.9 eVと従来のものより100 meVのE_gアップをはかった。ミドルセルについては、Inを1%加え、Ga_{0.99}In_{0.01}Asミドルセルが検討され、図4に示すように、時間分解フォトルミネッセンス(TRPL)法により、2450 nsの高ライフタイム()が実現している。Ge基板との格子整合による低転位密度化の効果と考えている。Ga_{0.99}In_{0.01}Asミドルセルは、そのE_gから15 mVのV_{oc}低下が予想されるが、高を反映して、逆に約70 mVのV_{oc}向上がはかられている。

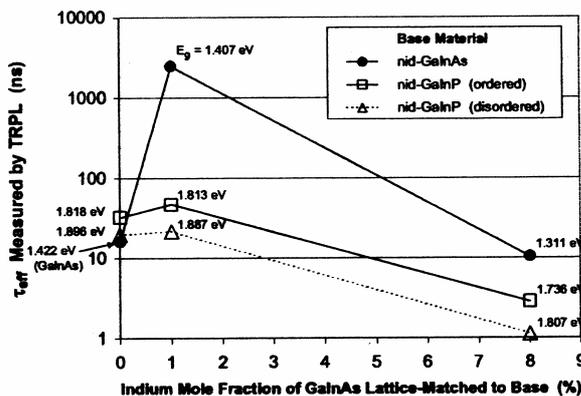


Fig. 6. Dependence of lifetime measured by TRPL in AlGaInP/GaInP/AlGaInP and GaInP/GaInAs/GaInP double heterostructures on indium composition in the base.

図 4

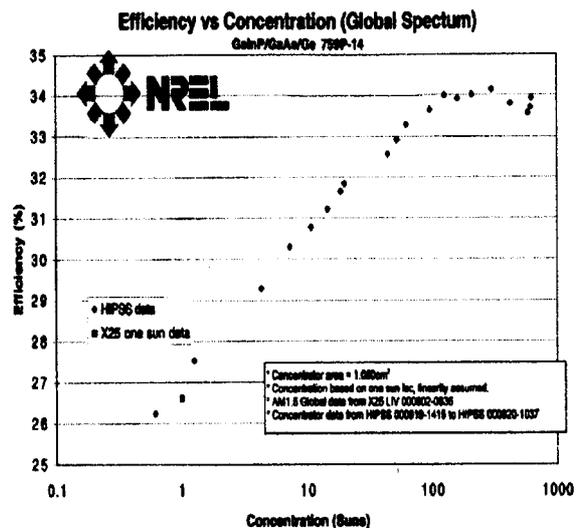


Fig. 10. Performance of a 3-junction Spectrolab terrestrial concentrator cell with 34% efficiency (1.0 cm², AM1.5G, 15-40 W/cm², 25°C) measured at NREL, as a function of incident intensity.

図 5

トンネル接合についても、高Eg化がはかられている。トンネルピーク電流密度Jpの低下が懸念されたが、p-AlGaAs/n-GaInPヘテロ接合構造トンネル接合では、タイプIIのヘテロ接合のバンドオフセットがトンネル接合部の空間電荷層を狭め、高Jp化につながっている。Jpとしては、637 A/cm²が得られ、35000倍の高集光にも適用可能な値が得られている。

こうした最適化により、GaInP/InGaAs/Ge₃接合セル(1 cm²)で、AM1.5Gの100~400倍集光で効率34%(25%)の高効率を実現している。図5には、GaInP/InGaAs/Ge₃接合セルの変換効率(25%)の集光度(AM1.5G)依存性を示す。また、図6に示すように、4 cm²セルを用い、AM0の1-sun(135.3 mW/cm²)で効率30.1%(28%)、26.62 cm²セルでAM0効率26.8%が得られている。今後も、最適化により高効率化がはかられ、高効率化による低コスト化につながるものと考えている。

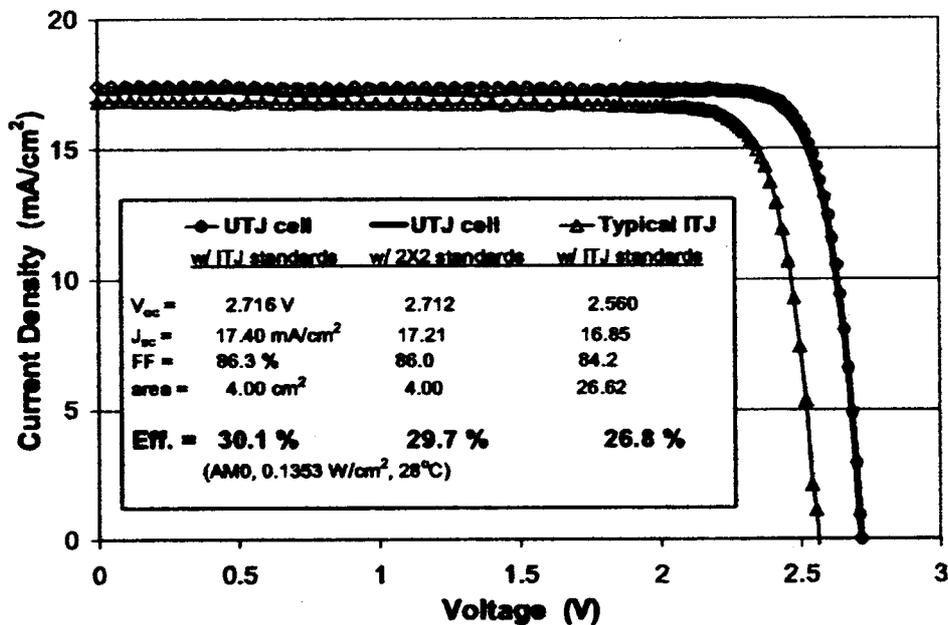


Fig. 11. Light I-V curve of highest AM0 efficiency cell measured at 30.1% (4.0 cm², AM0, 0.1353 W/cm², 28°C) using the same full-size (26.62 cm²) balloon-flight standard reference cells used for production ITJ solar cells, and 29.7% using more recent 4-cm² balloon-flight standards.

図 6

(2) M.A. Stan et al. (Emcore PV), “27.5% efficiency InGaP/InGaAs/Ge advanced triple junction (ATJ) space solar cells for high volume manufacturing”

Emcore PVのグループからは、宇宙用InGaP/InGaAs/Ge₃接合セルの量産ベースの技術開発の状況が報告された。BOL(beginning-of-life)効率とEOL(end-of-life)効率の向上をターゲットにして、特に、EOL効率向上のためには、放射線耐性の向上を加味した太陽電池構造の最適化がはかられている。

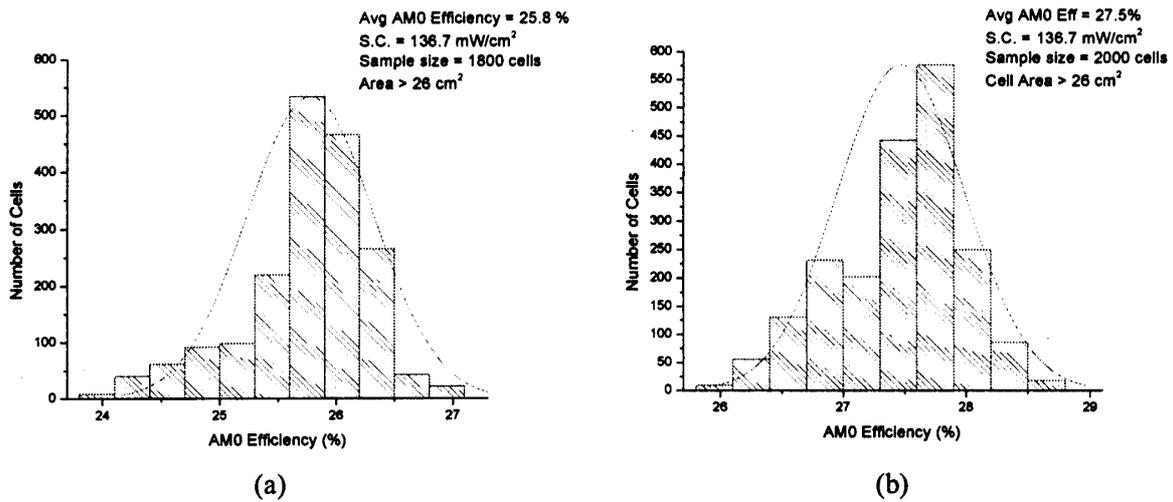


Fig. 3 The 1 sun AM0 efficiency distribution of 1800 production triple junction and 2000 advanced triple junction solar cells are shown in (a) and (b) respectively.

図 7

第1世代セルは、InGaP/GaAs/Ge3接合セルで、GaAsミドルセルはGe基板とは0.08%の格子不整合があった。図7に、第1世代セルおよび改良型ATJセルの1-sun AM0効率の度数分布を示す。第1世代セルでは、1800枚の27.5 cm²セルで、1-sun AM0 (136.7 mW/cm², 28)での評価において、最高効率27.3%、平均効率25.8%が得られていた。また、EOL (1 MeV電子線1 × 10¹⁵ cm⁻²照射後) / BOL = 0.87であった。今回のATJセルでは、GaAsバッファ層とミドルセルに1.5% Inが添加されている。この結果、第1世代セルに比べて、Voc、Jscとして2.9%、5.1%の向上がはかられた結果、図7に示すように、平均AM0効率も25.8%から27.5%に改善されている。最高効率としては、26.6 cm²の大面積セルで、1-sun AM0効率28.8%が得られている。なお、EOL / BOL = 0.85である。

(3) M.O. Potton et al. (Essential Research Inc.), “Development of a high efficiency metamorphic triple-junction 2.1eV/1.6eV/1.2eV AlGaInP/InGaAsP/InGaAs space solar cells”

図8の構造の宇宙用2.1eV/1.6eV/1.2eVの3接合セルを提案している。モデル計算によれば、1-sun AM0効率31.5%、AM0の100倍集光で効率36.5%の実現可能効率が試算されている。3セルは互いに格子整合だが、InGaAsボトムセルはGaAs基板とは格子不整合である。

特別なバッファ層を開発し、ほぼ欠陥フリーのヘテロエピ成長を実現しているとの事である。今回は、GaAs基板上の1.2 eVのInGaAs単一接合セル、1.6 eVのInGaAsP単一接合セルおよび2接合セルの検討結果が報告された。InGaAs、InGaAsPの単一接合セルのAM0効率は各々、16.4%、12.4%であった。InGaAsP/InGaAs2接合セル(1 cm²)は、ARコートなしで、AM0効率

15.9% ($J_{sc} = 13.3 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc} = 1.85 \text{ V}$, $FF = 79.3\%$)を得ており、AR形成で22.2%のAM0効率を見込んでいる。さらに、セル構造の改良により27%は実現できると読んでいる。AlGaInPトップセルの成長も進行中との事であった。

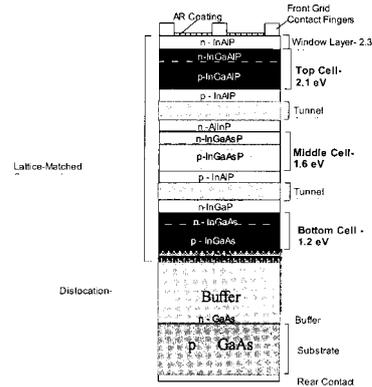


Figure 1: Schematic representation of the triple-junction cell under development.

¹ Work supported by Air Force SBIR Phase II contract F29601-99-C-0135 sponsored by AFRL Space Vehicles Directorate (AFRL/VS). The POC for this effort is Dr. Donna Sentil and can be contacted at 505-846-9340.

図 8

4.2 集光型セル

本会議開会の前日(5/20)から「1st International Conference on Solar Electric Concentrations」が開始され、2日目からもジョイントセッションとして、集光型セル・システムに関する論文発表があった。これは、昨年10月29日～31日にスペインで開催予定であったが、米国テロの影響で延期されていたものであった。45件の論文発表があった。

(1) R. Swanson (Sun Power), “Perspective on the past, present, and future of concentrating PV”

表2 結晶Si太陽電池モジュールの過去、現在、未来

	1976	2002	2010
Module price	\$62/W	\$3.25/W	\$2.34/W
Poly Si	\$280/kg	\$22/kg	\$12/kg
Efficiency	7%	12%	18%
Wafer size	2 inch	6 inch	?
Slicing	ID saw	Wire	?
Metal	Plated	Screen	?
Automation	None	Some	Complete
Volume	Very small	400MW	2-3GW

1975年のP. Maycockによる予測によれば、1983年には、\$1/Wの太陽電池モジュールが実現できるはずであった。表2に示すように、1976年から2002年までに、約1桁半の価格低減がはかられたが、2010年でもモジュール価格は\$2.34/Wと飽和傾向にある。Swanson氏の価格(コスト)試算によれば、図9に示すように、集光技術はコスト低減の可能性が大であり、1GWの生産規模で\$0.6/Wのコスト低減が期待できる。Sun Power社では、点接触型の集光用結晶Si太陽電池が開発されている他、プラスチックモジュール、二次光学系、TiO₂光学レンズなどが開発されている。今後は、変換効

率 35% モジュールが、コスト低減の有効性をもたらすとしており、同時に、Market Demonstrationが必要であると述べた。

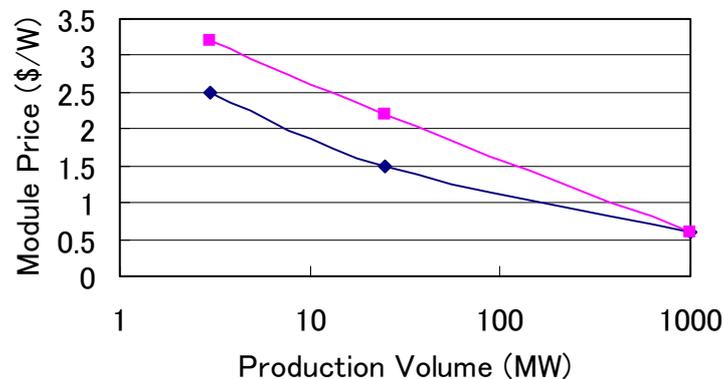


図9 集光型太陽電池モジュールの生産規模依存性に関する試算結果

(2) V. Garboushian (Amonix), “Continuous installation of concentrating PV in the southwest”

同社は、Arizona Public Service (APS) との関係の下、10年間のフィールド実証の経験を有する。1992年の2kWの集光型太陽電池モジュール開発に始まり、現在の25kWシステムに至る。APSには、これまで300kW集光式太陽光発電システムが設置されている。当初の性能、コスト追究から、種々の課題に直面して、課題を克服して、今日に至っている。25kWシステムは、1日で設置可能で、年産1MWの生産設備を導入し、追尾系の制御性、インバータや光学系の改善がはかられて来ている。コスト低減は、引き続き必要であり、今後、アリゾナに5MWの設置を予定している。やはり、10年間の経験には学ぶべきものがある。

(3) A.W. Bett et al. (Fraunhofer ISE), “Development of III-V-based concentrator solar cells and their applications in PV-modules”

本論文は、当初、招待論文予定のものであった。

集光技術、太陽光発電のコスト低減の可能性はあるが、実際の集光システムは2、3しかない。これはやや人為的だが、集光システムが種々の要素(セル、光学系、追尾系等)の集大成であり、個々の相互作用を最適化しなければならないことにもよる。今回は、Fraunhofer ISEにおけるセル開発の進展を述べている。

コスト試算によれば、500倍集光で変換効率30%以上の実現が目標となる。従って、多接合セルに注力している。理論的には、2接合セルでは、GaAs/GaSbのメカニカル・スタックセルで高効率期待できる。LPE成長GaAsセルとZn拡散GaSbセルのメカニカル・スタック2接合セルのAM1.5Dの100倍集光で効率31.3%を実現すると共に、フレネルレンズを用いたモジュールの屋外での160倍集光で23%の効率が得られている。

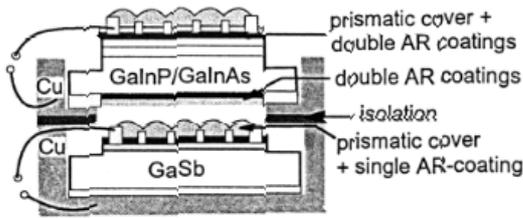


Figure 1: Sketch of the mechanically stacked triple-junction cell using a monolithic dual-junction cell as top cell and a GaSb bottom cell.

図 1 0

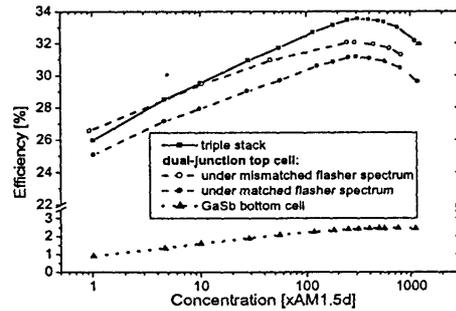
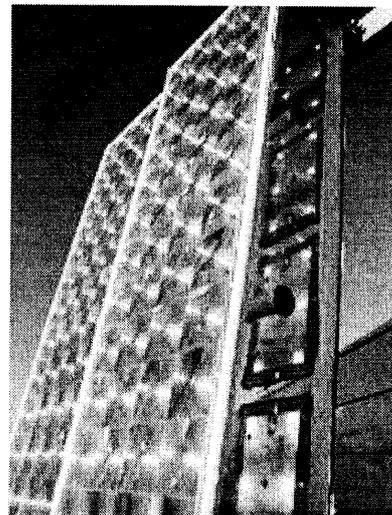
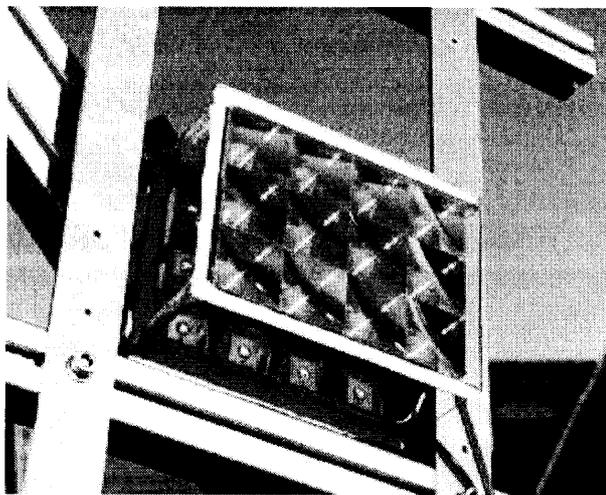


Figure 4: Efficiency versus concentration for the mechanically stacked triple-junction cell and its subcells. In addition, the influence of the flasher spectrum on the measurement of the monolithic tandem cell is shown.

図 1 1

GaAs 基板上に $Ga_{0.35}In_{0.65}P / Ga_{0.83}In_{0.17}As$ モリシック 2 接合セルが MOVPE で作製され、300 倍集光で効率 31.1% を実現すると共に、Zn の気相拡散による GaSb の p-n 接合セルとのメカニカル・スタック 3 接合セルが構成された。メカニカル・スタック 3 接合セルの構成は、図 10 に示す通りであり、自由キャリア吸収を減らすために、350 μm 厚の n-GaAs 基板が用いられ、n-on-p 構成のため第二のトンネル接合が追加されている。以前用いられていた AlInAs / GaInAs の Bragg Reflector 反射層は、赤外域の透明性を増加させるために、省略されている。



Photographs of the modules under test. Left: Test module with an geometrical concentration of $C=123$. This module showed an maximum efficiency of 24.8 %, see below. Right: Test module with a geometrical concentration of $C=500$. Results of his type of module will be presented at the conference.

図 1 2

セルは 4 mm 径で、表面コンタクトには、Au-Ni/AuGe/Ni が 2 μm 厚で蒸着および電着され、上部構造セルの裏面には、上記電極材料によるコンタクトが周辺リング状の 2 次元形状となっている。上部構造セルの両面の反射防止膜には TiO_2 / MgF_2 が用いられている。この構成で、図 1 1 に示すように、AM1.5D の 308 倍集光で、効率 33.5%

のトップデータを実現している。半絶縁性GaAs基板の導入やARコーティングの改良により、効率35%が実現可能としている。図12には、モノリシック2接合セルの500倍用試験モジュールを示す。

(4) K. Araki et al. (Toyota Tech. Inst.), “Japanese R&D activities of multi-junction and concentrator solar cells”

これも、当初、招待講演を依頼されていたものであった。これまでの日本における多接合セルおよび集光型セルのR&Dの状況が報告された。ジャパンエナジー（JE）によるInGaP/InGaAs/Ge3接合セルのAM1.5G効率31.7%、JE、住友電気および豊田工大（TTI）によるInGaP/GaAs/InGaAsメカニカル・スタック3接合セルのAM1.5G効率33.3%と共に、TTI、JEにより、InGaP/GaAs2接合セルのAM1.5Dの20倍集光で31.5%が実現している。昨年度からのNEDOのプロジェクトとして、シャープを中心に、集光型セル・システムの技術開発がスタートした。ターゲットは、2006年3月までに、500倍集光でセル効率40%とモジュールコスト100円/Wの実現の見通しである。

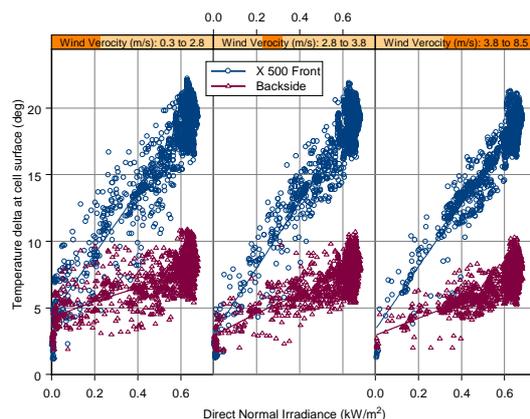


図13 500倍（幾何集光倍率）集光のセル温度と筐体裏面周囲温度

多接合セルの地上用集光式太陽光発電システムへの適用のためには、太陽光スペクトルの変化を考慮することも重要であり、集光型太陽電池のトップセルとミドルセルのバンドギャップ設計の指針が得られている。フレネルレンズ等光学系の一様性やモジュール設計も検討されている。光学系の一様性の向上により、集光型太陽電池の特性向上もはかれる。

また、集光モジュールの放熱構造に熱流モデルを適用し、各部の熱流、温度差を計算により予測すると共に、シート型熱電対による接触温度測定、および集光セル接合部の非接触温度評価がなされた。リファレンスセルとして、SPFG (Single and non-alignment Photolithography Fine Grid) 単結晶集光型Siセルが設計、試作され、Vocの変化から集光型太陽電池の接合部温度が評価された。

図13には、シート型熱電対による500倍集光のセル温度と筐体裏面温度に関する測定結果を示す。熱流モデルによる予測、シート型熱電対による接触測定、リファレンスセ

ルによる非接触測定による結果は良い一致が得られ、熱放散を考慮すれば、500倍集光時の集光型太陽電池モジュールの温度上昇は、20～30程度であることがわかった。

日本における気象条件の調査も行われ、気象条件を考慮した集光式太陽光発電システムの電力コストも試算され、0.17 \$ / kWhの実現の可能性がある。

(5) L.M. Fraas et al. (JX Crystals), “AM0 calibration of 34% efficient mechanically stacked GaInP/GaAs-GaSb circuits”

Tecstar、EntechおよびNASAとの協力で、GaInP/GaAs//GaSbメカニカル・スタック3接合セルのAM0の15倍集光で効率33.3%を得ている。薄いGaAs基板とPrismaticカバーガラスの導入により、効率35%(AM0の15倍集光)が期待でき、宇宙用セルへの適用性が十分あるとの事である。

4.3 GaInNAs等新材料系

将来の4接合セルを構成するEg 1.05 eVの3接合目のセル材料として、GaInNAs等の新材料が注目されている。しかし、現状では、p-GaInNAsの少数キャリア拡散長および移動度は低く、11 mA/cm²のJscが得られているに過ぎない。Egから考えると理想値の1/4で、4接合セルの電流整合に必要な17 mA/cm²にも満たない。

(1) R.R. King et al. (Spectrolab), “High-voltage low-current GaInP/GaInP/GaAs/GaInNAs/Ge solar cells”

GaInNAs材料の品質向上より、むしろデバイス設計に問題解決の解の一つがあると考えられる。4接合セルを5接合や6接合セルにすることにより、電流整合のJscを下げられる。例えば、GaInP/GaInP/GaAs/GaInNAs/Ge 5接合セルでは、Jsc ~ 11 mA/cm²でよく、AM0効率33%が期待できる。

ここでは、GaInP/GaInP/GaAs/GaInNAs/Ge 5接合セルの可能性を検証するために、各サブセルが成長され、量子効率、I-V特性が測定された。結果を、図14に示す。GaInP(1.9 eV)/GaInP(1.7 eV)/GaAs/GaInNAs(1.08 eV)/Geの5接合セルで、3.9 Vの高Vocが得られる。活性Geの導入により、4 V以上のVocの実現を予定している。

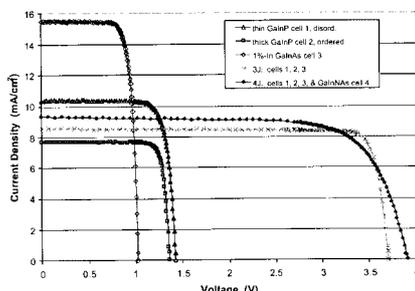


Fig. 14. Light I-V curves for the 3 top individual subcells of a GaInP/GaInP/1% In GaInAs/GaInNAs/Ge 5-junction solar cell, for the 3-junction cell formed by the combination of these subcells, and a 4-junction GaInP/GaInP/GaAs/GaInNAs cell on an inactive Ge substrate.

図 1 4

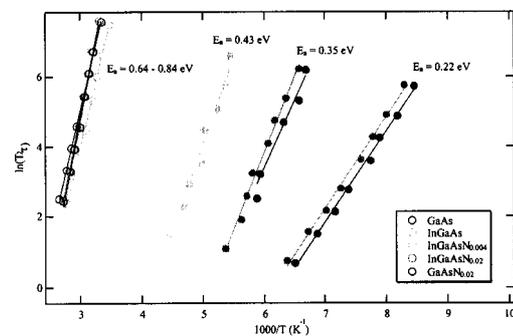


Figure 2. Arrhenius plot of DLTS data collected on samples using a reverse bias of 1 V, a pulse amplitude of 0.4 V, and a pulse width of 5 ms.

図 1 5

(2) S.W. Johnston et al. (NREL), "Deep-level transient spectroscopy in InGaAsN lattice matched to GaAs"

GaInP/GaAs/InGaAsN/Ge4接合セルは、AM0効率41%が期待できるが、InGaAsNの少数キャリア特性は、多接合セル用には低い。MOCVD成長InGaAsN成長層によるショットキーダイオードを構成し、DLTS解析を検討した。

図15には、DLTSデータのアレニウスプロットを示す。各試料は、350K付近に類似した欠陥中心 ($E_v + 0.64 \sim 0.84 \text{ eV}$) を含む。この欠陥中心の捕獲断面積は、 $10^{-13} \sim 10^{-10} \text{ cm}^2$ で、トラップ濃度 N_T も $10^{13} \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ の範囲にある。1%以下のNを含む試料は、 $E_c - 0.43 \text{ eV}$ (210K付近) に電子トラップを有し、 $\sigma = 10^{-12} \text{ cm}^2$ 、 $N_T = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ である。2%Nを含む試料 (約6%Inを含む場合も、含まない場合も) は、 $E_c - 0.35 \text{ eV}$ (160K付近) と $E_c - 0.22 \text{ eV}$ (125K付近) に電子トラップを有し、各々、 $\sigma = 10^{-12} \text{ cm}^2$ 、 $N_T = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ と $\sigma = 10^{-15} \text{ cm}^2$ 、 $N_T = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ である。Xeパルス光照射によるopticalDLTSデータも測定されている。

4.4 ヘテロエピ成長、ウエハボンディングおよび薄膜剥離技術

これまでは、GaAs基板やGe基板に格子定数整合した多接合セルおよび集光型セルによって、高効率化と実用化がはかられてきた。今後、さらなる高効率化と低コスト化を実現するためには、格子不整合の検討も必要である。今後の低コスト、軽量薄膜太陽電池の実現のためには、多接合セルに関するヘテロエピ成長、ウエハボンディング、薄膜剥離技術におけるブレークスルーの創成が期待される。

(1) M. Yamaguchi et al. (Toyota Tech. Inst.), "High performance and radiation resistance of GaAs-on-Si solar cells with novel structures"

NTTグループは、先に、Si基板上のGaAsのヘテロエピ成長において、熱サイクルアニール法と歪超格子層の挿入法との併用により、 $1 \sim 4 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ の低転位密度化をはかり、Si基板上のGaAs太陽電池において、AM1.5効率20%、AM0効率18.3%を実現している。その後、豊田工大、NASDA、NTTの共同研究の成果として、図16に示すように、技術試験衛星ETS-VIによる実証試験の結果、GaAs-on-Siセルが従来の宇宙用Si薄型セル (50 $\mu\text{m} \sim 200 \mu\text{m}$ 厚) やLPE成長GaAsバルクセルより放射線耐性に優れていることを実証した。

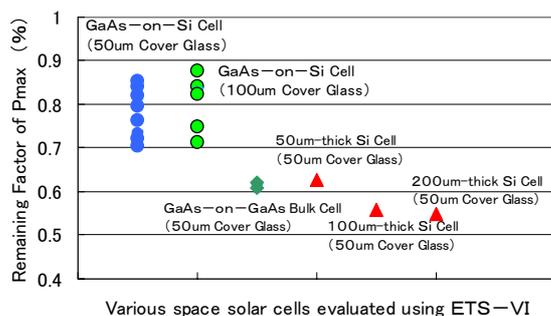


Fig. 4. Remaining factor of maximum output power P_{max} for the GaAs-on-Si solar cells after 94 days from launching in comparison with those for liquid-phase epitaxy grown GaAs-on-GaAs cells and 50 μm , 100 μm and 200 μm thick Si cells.

図 1 6

図16には、ETS-1による宇宙実証におけるGaAs-on-Siセルの出力保存率をSi薄型セルとGaAsバルクセルのそれらと比較して示す。ETS-1には、2cm角GaAs-on-Siセルが48枚搭載され、試験された。平均AM0効率は16.9%である。

今回、歪超格子構造によるSi基板上的GaAsヘテロエピ膜の低転位密度化に加えて、歪超格子や超格子構造の光・キャリア閉じ込め効果を明らかにするため、図17(a)に示すBragg reflector構造のGaAs-on-Siセルの放射線耐性効果が検討された。図17(b)に示すBragg reflectorによる裏面光反射効果の結果、GaAs-on-Siセルの放射線耐性の向上が確認された。Bragg reflector、超格子、歪超格子構造等のNovel構造は、Si基板上的多接合構造の高効率化と放射線耐性の向上に有効であることが示唆された。

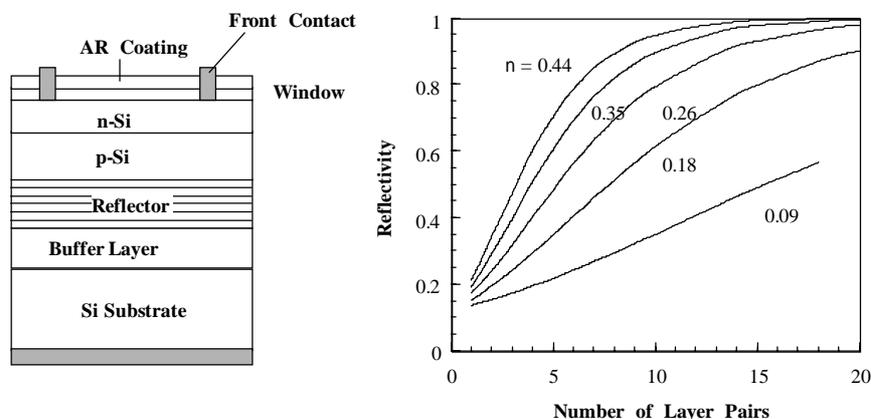


Fig. 5. A schematic cross-section of a GaAs-on-Si cell with multi-layered grating reflector and reflectivity vs. number of layer pairs in a multilayer reflector, with Al content x in the $Al_xGa_{1-x}As$ layers as a parameter.

(a)

(b)

図17

(2) S.A. Ringel et al. (Ohio State Univ.), "Progress in III-V solar cells on high quality SiGe/Si substrates"

OSUのグループは、最近、Si基板上的GaAsヘテロエピ成長において、GeSi組成傾斜厚膜バッファ層を用いるにより、 $8 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$ の低転位密度化と10nsの高ライフタイムのGaAsヘテロエピ膜を実現し、その後の進展が期待されていた。

今回、従来のp-on-n構成に加え、n-on-p構成が検討され、8インチ径SiGe/Siウエハが開発されつつある。0.2cm角の小面積ではあるが、図18に示すように、AM0効率は17.1%が得られている。

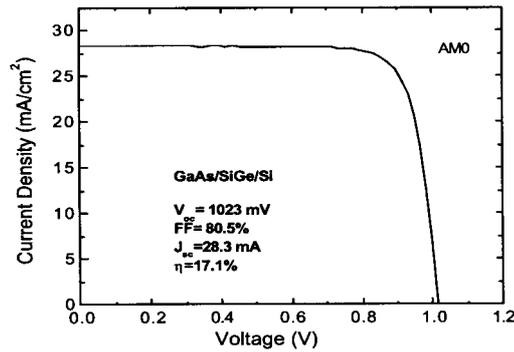


Figure 2. Light I-V response for a representative cell of a different series of InGaP/GaAs cell (0.2 cm x 0.2 cm) growths. The high V_{oc} , in excess of 1 V but still below the GaAs/GaAs control, displays evidence of a very small sub-gap photoresponse indicative of an active GaAs/Ge interface that is now under evaluation.

図 1 8

4 . 5 宇宙用太陽電池

(1) S. Bailey et al. (NASA), “Photovoltaic cell and array technology development for future unique NASA missions”

表 3

Table 1. Commercial Space Solar Cells

Parameter	Silicon	High Efficiency Silicon	Single Junction GaAs	Dual Junction	Triple Junction
Status	Obsolete	SOA	Obsolete	Nearly Obsolete	SOA
STC Efficiency (%)	12.7 - 14.8	16.6	19	22	26.8
STC Operating Voltage (V)	0.5	.53	.90	2.06	2.26
Cell Weight (mg/cm ²)	13 - 50	13 - 50	80 - 100	80-100	80-100
Temp Coefficient at 28°C	-0.55%/C	-0.35%/C	-0.21%/C	-0.25%/C	-0.19%/C
Cell Thickness (μm)	50 - 200	76	140 to 175	140 to 175	140 to 175
Radiation Tolerance	.66 - .77		.75	.80	.84
Absorptance	.75		.89	.91	0.92

太陽系探査衛星、金星からのサンプル回収衛星、地球 火星間のインターネットプログラム等の今後のミッション衛星について概説されると共に、太陽電池の効率、重量比出力の過去 現在 未来が述べられた。変換効率については、過去 9 ~ 15 % のものから、現在 25 % の段階にあり、将来的には 40 % に向うだろう。重量比出力についても、過去 30 ~ 40 W / kg から、現在 100 W / kg のレベルにあり、将来的には 300 ~ 500 W / kg に向うだろう。表 3 には、商用宇宙セルの現状レベルを比較して示す。薄膜セルは、1 kW / kg の可能性の可能性がある、LEO 軌道の低コスト・軽量薄膜セルとしての適用の可能性はある。表 4 には、AM1.5、AM0 での薄膜セルの現状を示す。薄膜セルといえども、AM0 効率 17 % 以上が必要で、CIS 系 2 接合セルに期待している。

表 4

Table 2. Current Status of Thin-film Cell Efficiencies for AM1.5 and AM0.

Cells	Efficiency(%) AM 1.5 global	Efficiency(%) AM0	Area (cm ²)	Description
Cu(Ga,In)Se	18.8	16.4*	1.04	NREL, on glass ³
CdTe	16.4	14.7*	1.131	NREL, on glass ³
a-Si/a-Si/a-SiGe**	13.5	12.0	.27	USSC ³
Photo-electrochemical	10.6	9.8*	.25	EPFL, nanocrystalline dye ³

* Courtesy of Keith Emery, NREL. The efficiency and Jsc for global reference conditions (25°C, 1000 W/m², IEC 60904-3, ASTM E892 global) were taken from the references and translated to AM0 using the new ASTM E490-2000 reference spectrum. The calculated efficiency assumes that the fill factor does not change for the increased photocurrent. Quantum efficiencies corresponding to the table entries were used in the calculations.

**unstabilized.

4.6 評価解析 (太陽電池・材料の放射線損傷)

(1) A. Jasenek et al. (Univ. Stuttgart), "Illumination-enhanced annealing of electron-irradiated Cu(In, Ga)Se₂ solar cells"

(2) S. Kawakita et al. (NASDA), "In-situ measurement of degradation of Cu(In, Ga)Se₂ thin film solar cells during electron and proton irradiation"

CIGSセルは、薄膜セルとしては、高効率で放射線耐性にも優れていることから、将来の薄膜形宇宙用セルとして期待されている。しかし、CIGSの放射線照射効果、照射欠陥の挙動については、不明の点が多い。

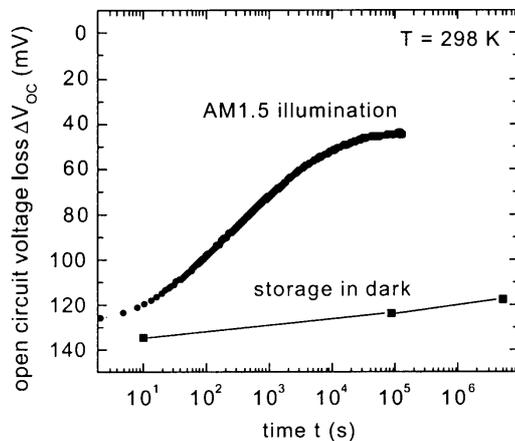


Figure 3: Time evolution of the open circuit voltage loss ΔV_{oc} of two CIGS solar cells irradiated with an electron fluence of $\phi_e = 10^{18} \text{ cm}^{-2}$. One cell is stored in dark, one is kept under AM1.5 illumination under open circuit conditions, both at room temperature. Illumination drastically enhances the annealing of electron-irradiated defects in CIGS. The open circuit voltage loss is reduced from $\Delta V_{oc} = 125 \text{ mV}$ to 45 mV , already under illumination at room temperature.

図 1 9

今回、Univ. Stuttgart (US) と NASDA (NA) のグループが、CIGSセルの放射線損傷が、太陽光照射により回復することを見出した。CIGSセルは、1 MeV電子線照射ではほとんど劣化しないが、 10^{18} cm^{-2} 照射では劣化し、400 K近傍で熱アニールを示し、熱アニールの活性化エネルギーは1.05 eVである。図19は、室温における暗状態での保存およびAM1.5ソーラーシミュレータ光照射によるCIGSセルの開放端電圧の回復効果の違いに関するUSグループの結果を示す。図20は、CIGSセルの放射線損傷の熱アニールおよび太陽光照射によるアニール速度の温度依存性に関するNA

グループの結果を示す。明らかに、InP等で見出されていると同様の太陽光照射による放射線照射欠陥の促進アニール現象が、CIGSでも見出された。照射欠陥の閾値エネルギーが、CuやGaで低いことが予想され、CuやGa系の照射欠陥が少数キャリア注入促進アニール現象に関係しているのではと推察しているが、今後の両者の切磋琢磨による研究の展開を期待したい。

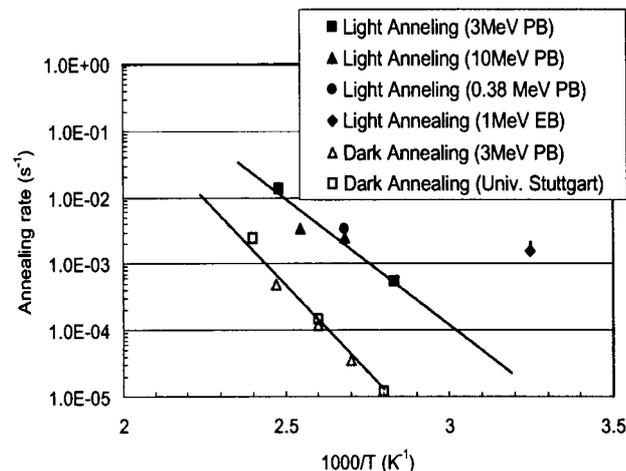


Fig. 5. Arrhenius plot of annealing rate obtained from proton and electron irradiation in-situ measurement under illumination (solid symbols). The open triangles depict isochronal annealing results of 3MeV proton irradiated cells in dark in air. The open cubes presents the results of isochronal annealing experiment of 1MeV-electron irradiated cells in air by University Stuttgart.

図 2 0

(2) M. Yamaguchi et al. (Toyota Tech. Inst.), “Consideration on unique radiation-tolerance properties of solar cells made with InP-family”

豊田工大のグループは、InP、InGaPに引き続き、四元系のInGaAsP太陽電池についても、GaAsセルに比べて優れた放射線耐性および少数キャリア注入による照射損傷の促進アニール効果を見出している(図21)。こうしたInP系の優れた放射線耐性と照射欠陥の少数キャリア注入による促進アニール現象を明らかにすべく、DLTS解析を行っている。DLTS法で見出されている主要照射欠陥のエネルギー準位、熱アニールおよび少数キャリア注入アニールの活性化エネルギーのInP組成依存性を図22に示す。InP系の放射線耐性および照射欠陥の熱アニールおよび少数キャリア注入アニール現象がInP組成に依存する結果が得られているが、照射欠陥の起源を含めて、今後の研究が必要である。

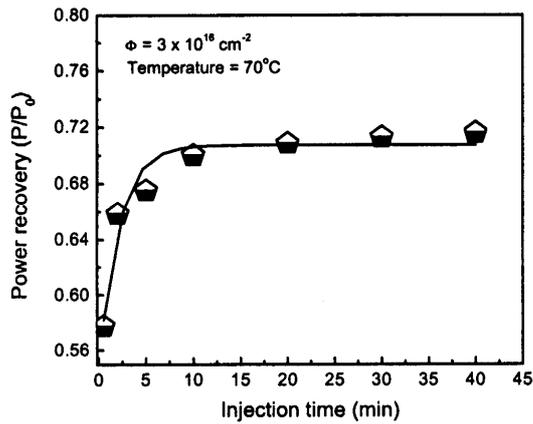


Fig. 4. The maximum power recovery of an InGaAsP cell due to current injection of 1 A cm^{-2} at 70°C .

図 2 1

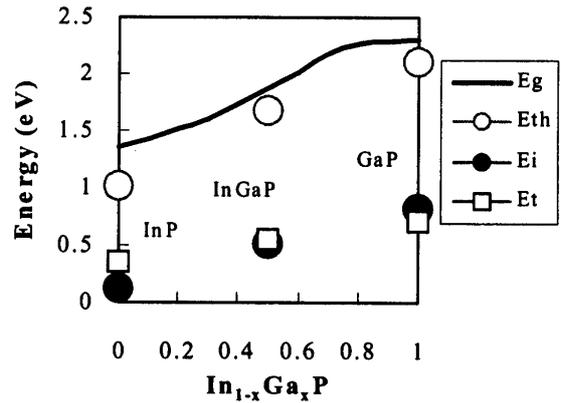


Fig. 3. Bandgap energy dependence of energy levels, thermal annealing activation energies and minority-carrier-injection-annealing activation energies for major defect centers in $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}$ materials.

図 2 2

5 . 感想

20日から本会議とジョイントで1st International Conference on Solar Electric Concentrationsが開催された。欧米および日本を中心に、集光式太陽光発電技術の技術開発の進展と実用化の機運を感じた。また、
- 族、集光型および宇宙用セル関係では、約100件の論文発表があり、IEEE PVSCの伝統を感じた。

残念ながら、TECSTAR社が宇宙用太陽電池のビジネスから手を引いた。米国におけるITバブルが一因になったとはいえ、長い間、宇宙用太陽電池の技術開発と量産化に貢献してきた実績を思うとさびしい気がする。同時に、多接合セルの技術開発において、p-n-n構成にこだわり過ぎた事も、技術開発面でSpectrolab社に逆転された一因になったと思う。

今後は、基礎研究をベースにして、3、4接合化での欧米との切磋琢磨、集光技術のR&Dの強化、OnSi技術や新規薄膜技術でのブレークスルー、宇宙用、地上用への実用化と新たな応用分野開拓、等、
- 族材料や太陽電池分野での研究開発の進展に貢献して行きたい。

(以上)

