

第 3 1 回 I E E E 光起電力専門家会議 (31st IEEE
Photovoltaic Specialists Conference) 報告

2 0 0 5 . 1 . 1 3
山口 真史 (豊田工大)

1 . 開催月日 : 2 0 0 5 年 1 月 3 日 ~ 7 日。

2 . 開催場所 : Disney's Coronado Springs Resort (レイク・ブエナ・ビスタ、フロリダ、
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 C. Wronski (Penn. State Univ.)、論文委員長は T. Coutts (NREL) で、報
告者は International Advisory Committee の Co-Chairman をつとめた。今回、T.
Coutts (NREL) が、 族、 族化合物太陽電池、透明導電膜や TPV に関する先駆的
業績により、William Cherry Award を受賞した。

32 ヶ国から 641 名の参加者があった。図 1 に、国別参加者数を示す。国別では、 米国
356 名、 日本 79 名、 ドイツ 61 名、 韓国 16 名、 英国 15 名、 オーストラリア 15
名、 オランダ 13 名、 カナダ 10 名、 の順であった。前回のニューオーリンズでの会議に
比べて、約 100 名の参加者減であった。正月休み中での開催や “ 第 19 回欧州太陽光発電会
議 (19th EU-PVSEC) ” の盛会のしわ寄せなどが原因と考えられる。

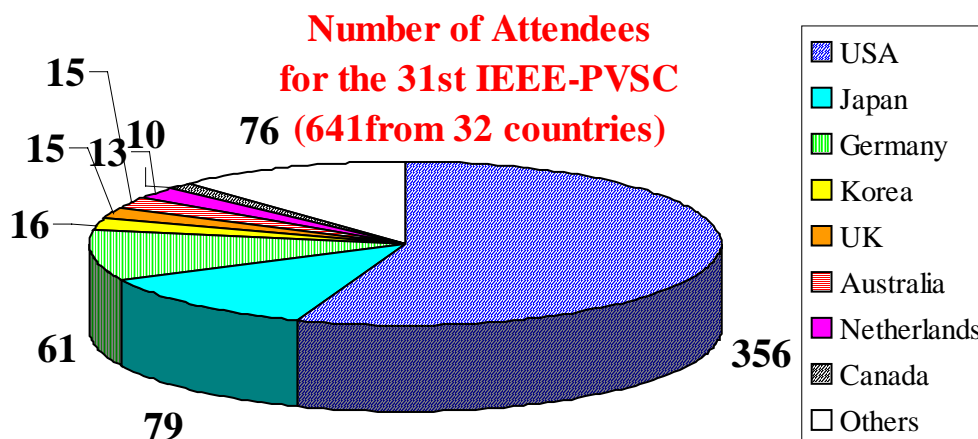


図 1 国別参加者数

今会議のアブストラクト投稿締め切りが、昨年パリで開催された “ 19th EU-PVSEC ” の一
ヶ月後ということもあり、計画の 619 件に対して、480 件と少なかった。今会議は、約 45 年
の歴史を有し、関連会議の兄貴分でもあり、今後の国際会議運営の活性化が望まれる。

参加者減の危機感から、開会式に続くプレーナリセッションで、PV ロードマップや産業
界の招待講演が企画され、またプレーナリ講演に加え、特別招待講演も取り入れるなど、

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

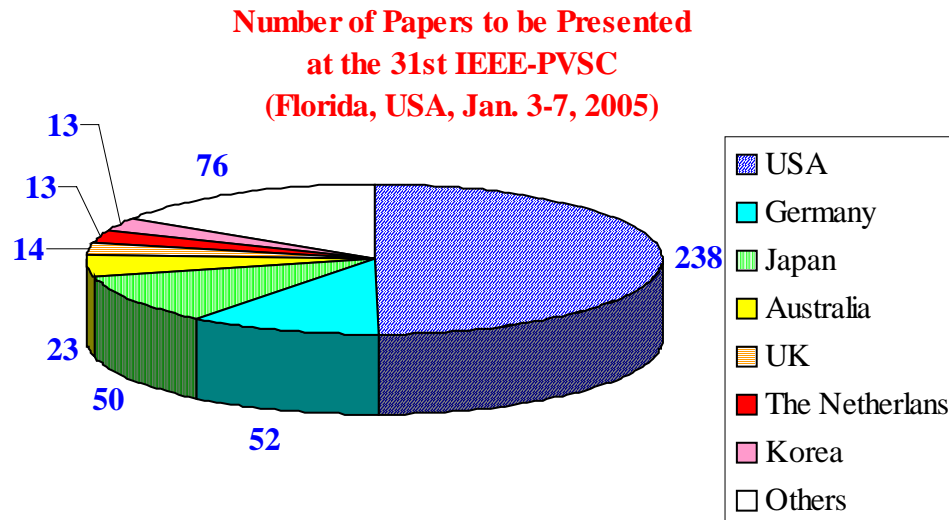


図 2 国別発表論文件数

発表論文数は479件であった。図 2 は、国別発表論文件数を示す。国別では、米国239件、ドイツ52件、日本50件、オーストラリア23件、英国14件、オランダ13件、韓国13件の順であった。加えて、16件のLate News発表なされた。

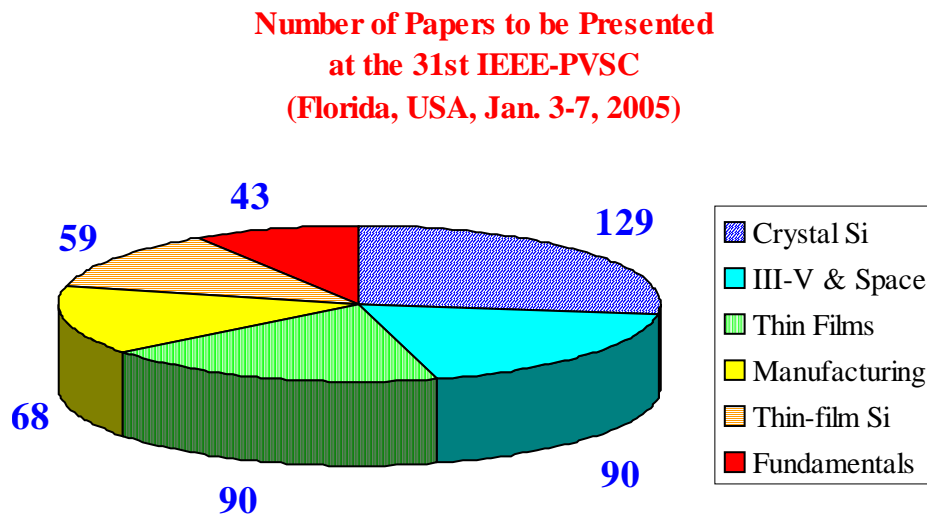


図 3 発表論文件数の分野別内訳

図 3 は、発表論文件数の分野別内訳を示す。分野別では、結晶 Si 系129件、III-V 族、集光および宇宙90件、CIS及び CIS 族90件、モジュールおよびシステム68件、薄膜 Si 系59件、基礎43件、の順であった。従来の IEEE 会議の通り、結晶 Si 分野や III-V 族、集光および宇宙分野の論文発表が多かった。

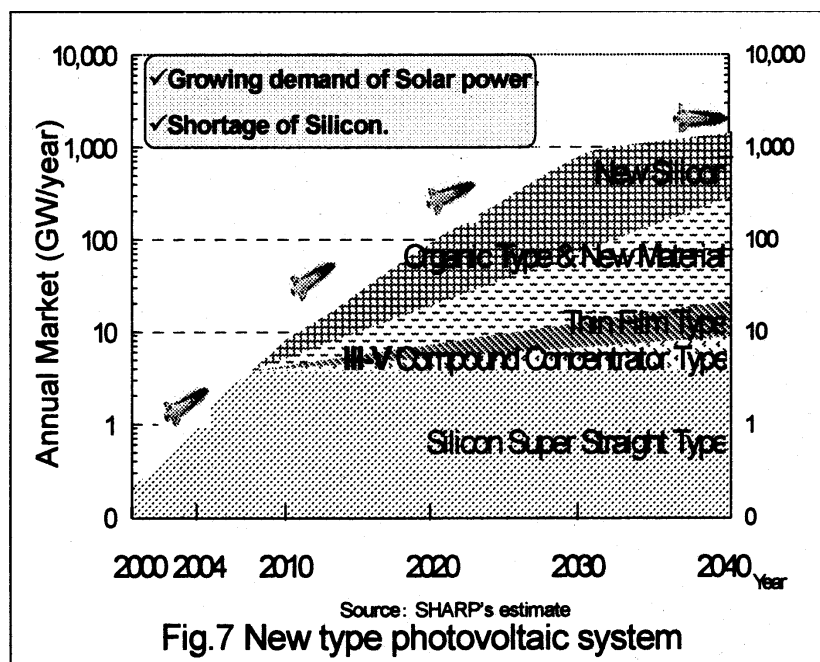
国別で見ると、米国からの発表論文の中では、CIGS・Thin-Film系70件、結晶Si系54件、III-Vs系33件、Thin Si系28件、製造系33件、その他54件が拮抗していた。日本からの論文発表は、結晶Si系15件、モジュール・システム8件の順で、CIGS・Thin-Film系1件と少ない結果となった。ドイツ、オーストラリアは共に、圧倒的に、結晶Si系の論文発表が多く、国柄が現れていた。

表1 国別・分野別の発表論文数

	Fundamentals	Thin-Films	III-Vs	Cryst. Si	Thin Si	Manufacturing	Total
USA	20	70	54	33	28	33	238
Germany	1	7	7	30	5	2	52
Japan	6	1	15	13	7	8	50
Australia	2	0	1	19	0	1	23
UK	2	1	4	1	2	4	14
The Netherlands	1	0	0	8	4	0	13
Korea	5	1	1	0	1	5	13
Others	6	10	8	25	12	15	76
Total	43	90	90	129	59	68	479

開会式に続くプレナリセッションで、PVロードマップや産業界の招待講演が企画された。日本からは、K. Kurokawa (農工大) が“Photovoltaic technology direction – Japanese ‘PV2030’”と題して、T. Tomita (シャープ) が“Toward Giga-Watt production of Silicon Photovoltaic Cells, Modules and Systems”と題して、基調講演いただいた。

ここで、シャープ・ソーラーシステム事業本部長の富田孝司氏の基調講演を簡単に紹介させて頂く。



太陽光発電産業の現状と次のGW以上の生産レベルに向けた課題が述べられた。太陽光発電システムの価格低減が続けられ、2030年には、全世界の総電力の8.6%を太陽光発電が賄うと予測している。このような将来ビジョンの実現のためには、飛躍的な大規模生産が必要である。技術的には、図4に示すように、現在の主流の結晶Si技術に続き、薄膜技術やIII族化合物の集光技術が参入し、将来的には、有機や新材料、ニューシリコンを期待している。太陽光発電は、エネルギー源として、また重要な産業として、社会貢献して行くであろうと述べられた。最後に、シャープは、“全世界の屋根を太陽光発電システムでカバーしよう”という挑戦的スローガンを持っているが、太陽光発電産業に従事する全員で、このスローガンを共用しようとは結ばれた。

4. III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族、集光型および宇宙用セル関係では、90件の論文発表があった。論文委員会の見るハイライトは、集光型3接合太陽電池モジュールおよびシステム開発の進展と商用化の機運、さらなる多接合化のアプローチ、新材料開発および量子・ナノ構造研究における基礎的理解の重要性、などであった。

4.1 集光型セルおよびモジュール

高効率集光型太陽電池(HCPV)モジュールは、PVのコスト低減に有望である。今回は、集光型III族化合物3接合太陽電池モジュールおよびシステムの技術開発が進展しているとの印象である。この分野では、日本の集光型3接合太陽電池モジュール技術が進んでおり、開会式後にあった産業界の基調講演セッションで、富田氏(シャープ)が述べたように、集光型多接合太陽電池モジュールの商用化の機運が感じられた。また、集光型結晶Si太陽電池も高倍集光の方向で検討され始めている。

4.1.1 集光型多接合太陽電池およびモジュール

- (1) K. Araki et al. (大同特殊鋼他) "Development of a new 550X concentrator module with 3J cells –Performance and reliability"
- (2) K. Araki et al. (大同特殊鋼他) "Comparison of efficiency measurements for a HCPV module with a 3J cell in 3 sites"
- (3) H.S. Lee et al. (豊田工大他) "Field test analysis. The behavior of 3-J concentrator cells under the control of cell efficiency"

今回の成果は、要素技術としてのInGaP/InGaAs/Ge 3接合の高効率化、注入モールド法による低コスト1次フレネル光学レンズの開発、光強度の均一化と色収差の補正に有効な2次光学系(ホモジナイザー)の開発、良熱伝導性エポキシシートの開発、等の研究開発によるものである。今回は、図5の右図に示す400倍集光を報告したが、今回は、550倍集光モジュールを報告した。図5の左図には、550倍フレネルレンズを示す。また、右図には、550倍集光モジュールも示す。さらに、残留応力や湿度等、集光型多接合セルモジュールの信頼性に関する課題が検討され、20年を超える高信頼度が予測されている。

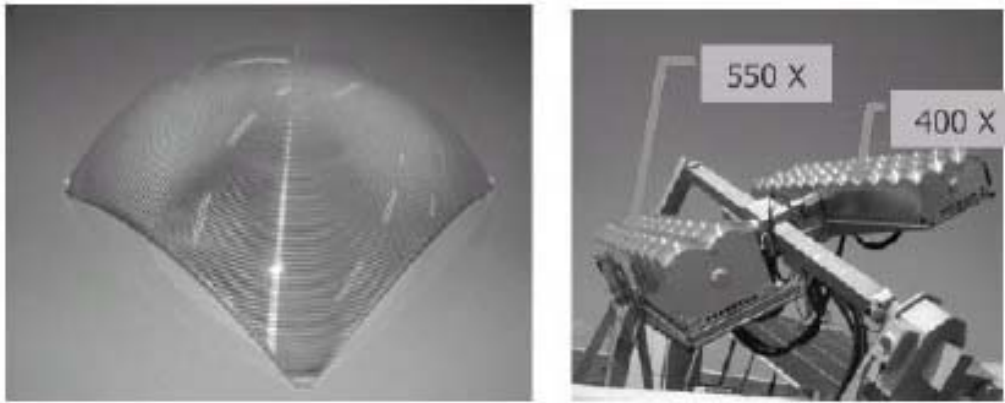


Fig 1 (Left): New 550 X Fresnel lens made by injection molding

Fig 2 (Right): New 550 X concentrator module and the 400 X module presented at SCC2003 and 19th EUPVSC

図 5

表 2

Table. 1 Uncorrected peak efficiency measurement

Concentration	Area cm ²	Site	Ambient	Uncorrected Efficiency	DNI W/m ²
400 X	7,056	Inuyama, Japan Manufacturer	29 C	27.6 %	810
400 X	7,056	Toyohashi, Japan Independent	7 C	25.9 %	645
400 X	1,176	Fraunhofer ISE, Germany Independent	19 C	27.4 %	839
400 X	1,176	NREL, USA Independent	29 C	24.9 %	940
550 X	5,445	Inuyama, Japan Manufacturer	33 C	28.9 %	741
550 X	5,445	Toyohashi, Japan Independent	28 C	27 %	777

400倍および550倍の高効率集合型多接合セルモジュールをFaunhofer ISE、NRELと豊橋技科大で性能評価された結果も報告された。表2に、3機関による集光モジュールの効率測定結果を示す。温度補正なしで、400倍集光モジュールで27.4%、550倍集光モジュールで28.9%の効率が得られている。2006年3月末までに、セル効率の向上(38.9% 40%)、1次光学レンズの光学効率の向上(85.8% 91%)等により、モジュール効率31%以上を目指している。これらの成果は、www.syracuse-pv.webhop.orgで見ることができる。

(4) R. Sherif et al. (Spectrolab), “First demonstration of multi-junction receivers in a grid-connected concentrator module”

Spectrolabは、Concentrating Technologies (CT)およびArizona Public Service (APS)と集光型多接合太陽電池モジュールの研究開発を進めている。同社のGaInP/InGaAs/Ge3接合セルを用い、APS Solar Research & Test (STAR)施設に、2004年夏に、図6に示すように、1kWの系統連係集光太陽電池モジュールを設置した。集光太陽電池モジュールの設計、

製作と長期間の実証試験データ取得を目的としている。効率34.2%レベルの1.65cm x 1.55cmの28セル直列の2並列で56セルの400倍集光モジュールである。850W/cm²の入射強度で、1セル当り約20Wの出力である。アリゾナにおけるモジュールの特性を図7に示す。図8は、モジュールの価格試算結果を示す。現在用いている高いAIN基板に代え、アルミナ基板を用いること、高効率化、高倍集光や生産量の増加により、\$0.5/Wの低価格化が可能である。

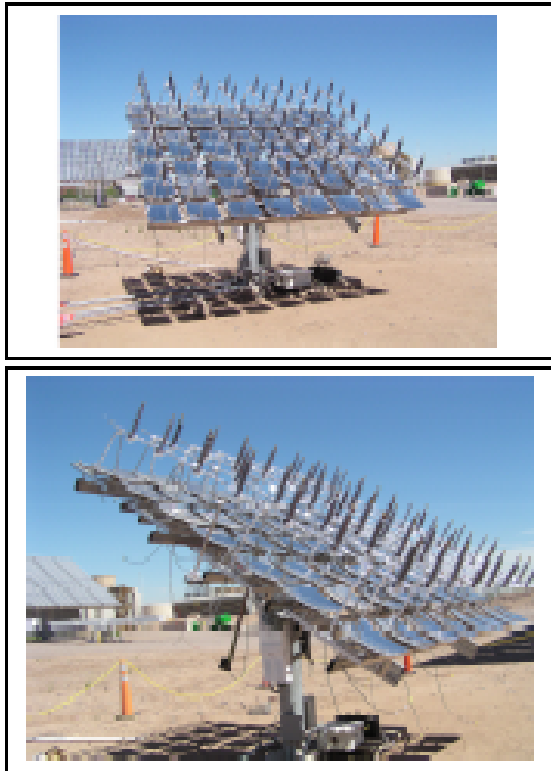


Figure 1: A 1-kW Grid Connected Module at STAR (Top: front view. Bottom: side view)

図 6

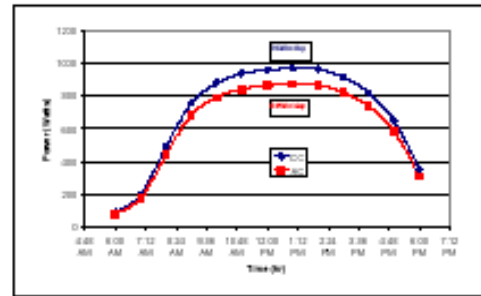


Figure 3: Projected Module Performance in Arizona- Average over the entire year

図 7

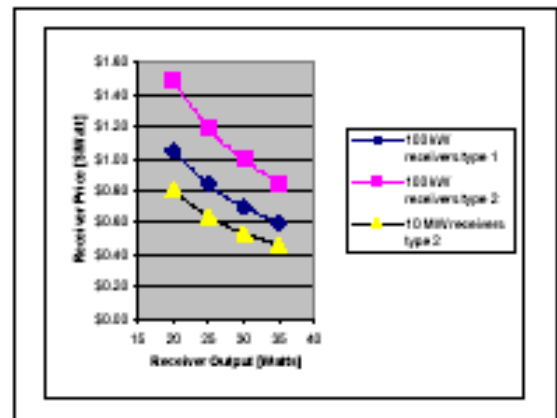


Figure 5: MJ receiver cost projection

図 8

(5) G. Siefer et al. (Fraunhofer ISE), “Experimental comparison of the power output of FLATCONTM modules and silicon flat plate modules”

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が期待できる。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150倍集光で23%の効率が得られている。Fraunhofer ISEの集光タンデムセルモジュールをFLATCON (Fresnel Lens All glass Tandem cell CONcentrator)と命名している。現在のモジュールには、GaAs基板上のGa_{0.65}In_{0.35}P/Ga_{0.83}In_{0.17}Asモリシック2接合セルが用いられている。MOVPEで作製され、300倍集光で効率31.1%を実現している。



Figure 1: Photograph of the outdoor test set-up on the roof of Fraunhofer ISE in Freiburg. Top left: total view of the tracking unit with several FLATCON™ modules mounted on it. Top right: Detailed view of two FLATCON™ modules mounted on the tracker. Bottom left: fixed flat plate module. Bottom right: flat plate module mounted on the tracker.

图 9
表 3

Table 1: Power output per m² during one week in June 2004 for the three different approaches.

Date	FLATCON™ [W/(m ² day)]	flat plate fixed [W/(m ² day)]	flat plate tracked [W/(m ² day)]
24.06.2004	1281	608.4	1119.3
25.06.2004	1122	624.2	709.4
26.06.2004	1190	714.5	844.5
27.06.2004	403	392.4	466.9
28.06.2004	37	716.3	932.9
29.06.2004	1144	761.4	957.5
30.06.2004	1186	709.4	811.8
01.07.2004	0	367.5	353.0
sum	6363	4894.1	6195.2
sum (excluding 28.06.)	6326	4177.8	5262.3

図9は、Faunhofer ISEの屋上に設置された屋外試験用集光モジュールと平板モジュールを示す。表3は、両モジュールの出力比較を示す。集光モジュールは、平板モジュールに比べて、40%高い出力を実現している。

(6) L.M. Fraas et al. (JX Crystals), "Toward 40% efficient stacked III-V terrestrial concentrator cells"

表4

Table 1:

MJ Type	1 st J	2 nd J	3 rd J	4 th J	Efficiency
Mono 2J	InGaP 1.85 eV	GaAs 1.4 eV			36%
Mono 3J	InGaP 1.85 eV	GaAs 1.4 eV	Ge 0.7 eV		42%
Mono 3J I match	InGaP 1.85 eV	GaAs 1.4 eV	GaInNAs 1 eV		47%
Mono 4J I match	InGaP 1.85 eV	GaAs 1.4 eV	GaInNAs 1 eV	Ge 0.7 eV	52%

表5

Table 2: : Idealized efficiency at 300 K for various mechanically stacked MJ cell types at 500 suns AM 1.5D

MJ Type	1 st J	2 nd J	3 rd J	4 th J	Efficiency
Mech 2J	GaAs 1.4 eV	GaSb 0.7 eV			42%
Mech 3J	InGaP 1.85 eV	GaAs 1.4 eV	GaSb 0.7 eV		46%
Mech 4J	InGaP 1.85 eV	GaAs 1.4 eV	GaInAsP 1 eV	GaInAs/InP 0.7 eV	52%

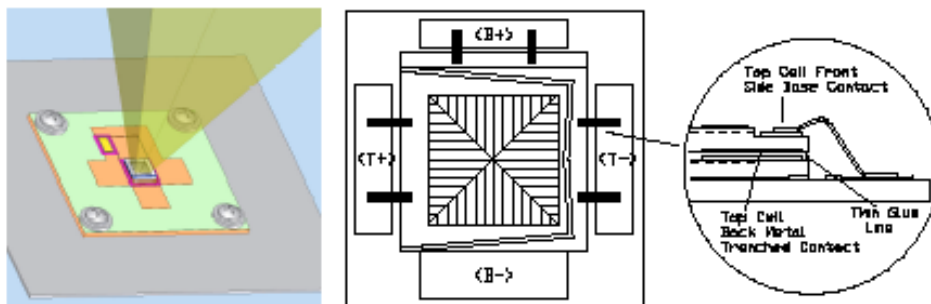


Figure 1: JX Crystals 4 terminal mechanical stack receiver design with both contacts at top of top cell and back metal contact on top cell recessed in trench for thin low delta-T glue line.

図10

日本のグループで、集光型InGaP/GaAs/Ge 3 接合セルで効率38.9%が報告されているけれども、300KでAM1.5Dの500倍集光時の理論効率は42%である。表4は、NRELグループにより試算され

た種々のモノリシック多接合セルのAM1.5Dの500倍集光時の理論効率である。最適化された3接合、4接合セルで、各々、47%、52%が期待できるが、新材料開発が必要であり、ブレークスルーが必要な状況にある。モノリシック型は、格子整合と電流整合の制約があるが、メカニカルスタック型多接合セルは、このような制約がなく、表5に示すように、既存の材料の組み合わせで、高効率実現が期待できる。SpectrolabのInGaP/GaAs 2接合セルとJX CrystalsのGaSb単接合セルを組み合わせ、3接合メカニカルスタックセルの検討を進めている。図10は、4端子メカニカルスタックレーバの構成を示す。理想的には、2接合セルの36%とGaSbセルの10%でトータルの効率46%のポテンシャルがあると言っている。

4.1.2 集光型結晶Si太陽電池

(1) A. Mohr et al. (Fraunhofer ISE), "Silicon concentrator cells in an one-axis tracking concentrator system with a concentration ration of 300X"

Fraunhofer ISEは、1軸追尾の300倍集光のPVシステムを開発している。このシステムは、図11に示すように、楕円トラフミラーと誘電体複合楕円二次集光器(CPCs)を用いている。一次集光の39.7倍とCPCsによる7.7倍で約300倍となっている。用いたCPCsは、許容角 $\pm 23.5^\circ$ である。CPCsは、PMMAで作られ、図12に示すように、裏面ラインコンタクト集光型Si(RLCC)セルの上にマウントされ、光学効率78%である。この集光システムは、セル実装が容易との事で、RLCCセルが、本システム用に開発されている(図13)。Siセルは、CPCsの出口に整合した小面積のアクティブ領域 0.2025 cm^2 ($4.5 \times 4.5 \text{ mm}^2$)を持つ。63倍、265倍集光で、各々、最大効率24%、23.2%が得られている(図14)。また、屋外試験もなされ始めている。

(2) T.M. Bruton et al. (BP Solar), "Low cost, 100X point focus silicon concentrator cells made by the LGBC process"

2003年、西欧や米国で、450 kWpを超える大型PVシステムが20システム以上(設置容量26 MWp)が受注されている。このような大規模PVが、集光式太陽光発電システムの一つの適用領域である。ここで、低コストセルの使用が、集光式太陽光発電システムの広範な普及の一つの要因である。特別仕様のセルの小規模生産では、平板システム用のものより高コストになろう。一つの解は、大量生産の非集光セルを集光用に改良して生産することである。レーザグループ埋め込みコンタクト(LGBC)プロセスは、大量生産プロセスで、非集光セルを高効率で生産している。LGBCプロセスが、集光型セルの生産にも適していることが、EUCLIDES楕円トラフト集光システムで証明されている。125×125mm CZ-Siウェハから116×45mmの2枚のセルが作れる。Entechのlinearフレネルシステム用のセルは、20倍集光で20%を記録した。本研究は、低コストセルの概念を非集光プロセスから点焦点システムへの拡張性を検討することである。

EUCLIDES集光セルから14×10mmのテストセルが切り出された(図15)。Fraunhofer ISEで測定された結果を図16に示す。85倍集光で効率17.4%が得られている。現在は、最適化されていない構造であり、100倍集光で効率18%が得られると考えており、現実的な中期ターゲットとしている。セルコストも、ある程度の生産規模で、100倍集光で効率18%を仮定すると、\$ 0.15/W以下が可能で、平板セルコストより格段に低コストを提供できると主張している。

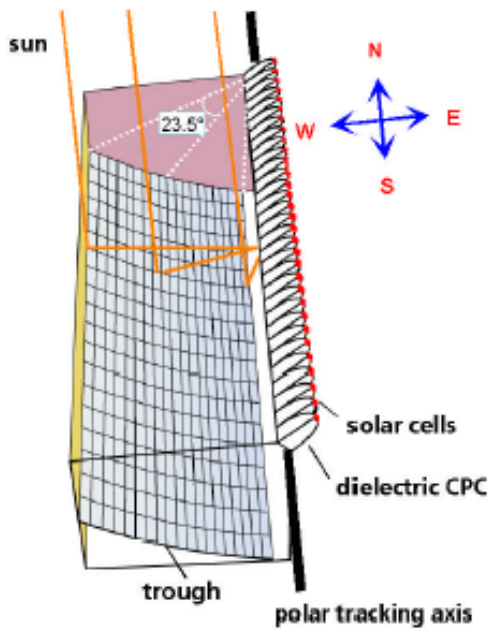


Figure 1: Concept of the one-axis tracking concentrator system consisting of a parabolic trough and dielectric compound parabolic concentrators enabling a geometrical concentration of around 300x. The CPCs used as second stage result in a geometrical concentration of 7.7x concentrating the sunlight by total internal reflection. The CPCs have an acceptance angle of $\pm 23.5^\circ$ allowing a one-axis tracking from the summer to the winter solstice.

☒ 1 1

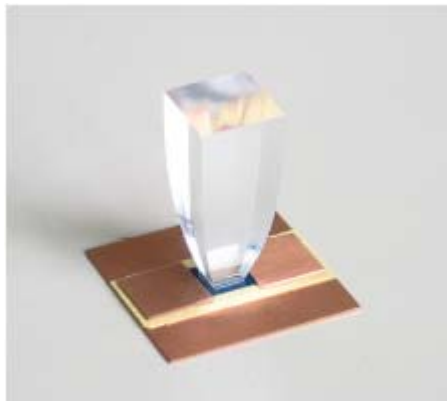


Figure 6: CPC made of PMMA mounted on a RLCC cell. The CPC is glued onto the concentrator cell using an optical transparent adhesive.

☒ 1 2

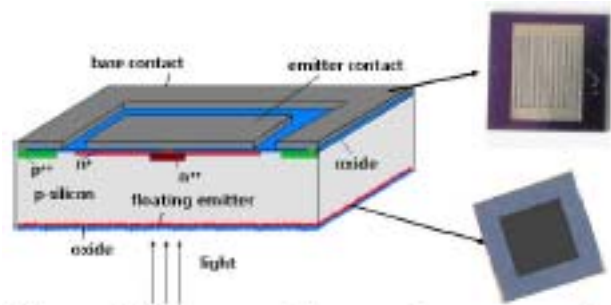


Figure 3: Structure of the rear-line-contacted silicon concentrator cells (RLCC). The interdigitated grid finger structure on the rear side and the textured front side with an AR-coating are shown.

☒ 1 3

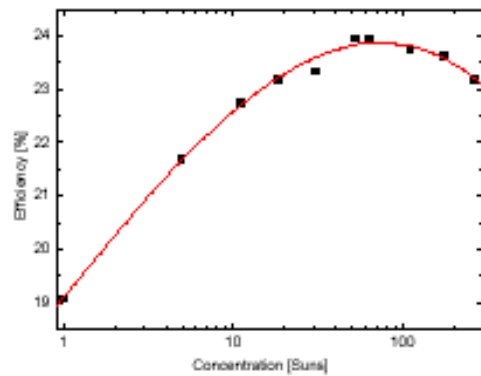


Figure 4: The RLCC cells reach an efficiency of 24% at 63 suns and 23.2% at 265 suns.

☒ 1 4



Figure 1. Small area cell cut from a 30X concentrator cell

☒ 1 5

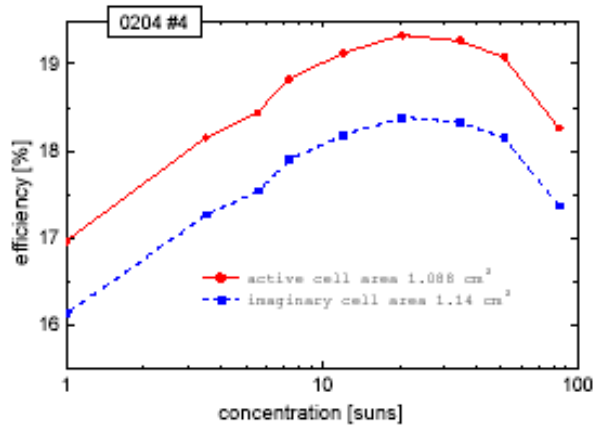


Figure 3. Efficiency versus concentration for a 14x10 mm cell measured at FhGISE with active area being the non-bus bar region and the “imaginary” area correcting for light leakage to the bus bar, with spectral mismatch correction.

図 1 6

4.2 多接合セル

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 E_g 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 ($E_g = 1.8 \text{ eV}$) が用いられているが、AM1.5G用には $E_g = 1.9 \text{ eV}$ が、AM0用には $E_g = 2.0 \text{ eV}$ 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 ($E_g = 1.9 \text{ eV}$) / InGaAs / Geの3接合セル、将来的には、AlInGaP / InGaAs / $\sim 1.0 \text{ eV}$ (InGaAsN) / Geの4接合セルが研究開発対象となる。

4.2.1 多接合セルの高効率化、多接合化、薄型化

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。多接合セルの高効率化、多接合化、薄型化が進行している。

(1) T. Takamoto et al. (シャープ), “Future development of InGaP/(In)GaAs based multijunction solar cells”

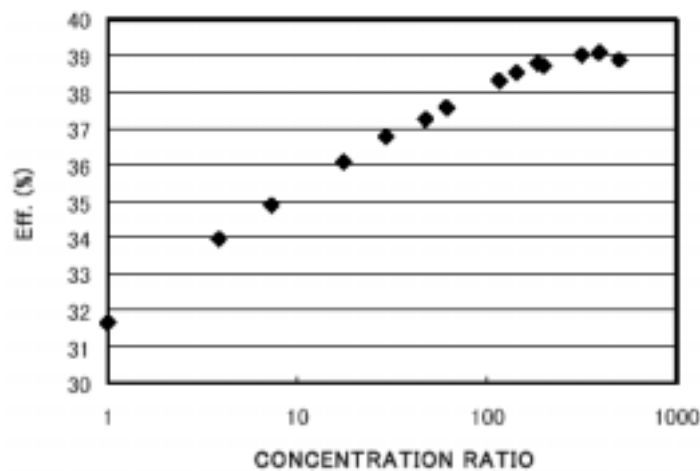
高本らは、InGaP/(In)GaAs系多接合セルの今後について、プレーナリ講演を行った。上記要素技術の開発により、表6に示すように、InGaP/InGaAs/Ge3接合セルのAM1.5Gで効率31.5%、AM0で効率29.2%を実現している。バンドギャップ $E_g 1.82 \text{ eV}$ のInGaPトップセルに代わり、 $E_g 1.96 \text{ eV}$ のAlInGaPトップセルを用いれば、AM1.5G効率33%、AM0で効率31%を実現できるとしている。また、集光型InGaP/InGaAs/Ge3接合セルでは、図17に示すよ

うに、AM1.5の200倍集光で効率39.2%、498倍集光で38.9%を実現している。

表 6

Table 1 Characteristics of the triple-junction cells.

Voc [mV]	Jsc [mA/cm ²]	FF	Eff. [%]	Condition
2567	14.1	0.87	31.5	AM1.5G, 25°C
2568	17.9	0.86	29.2	AM0, 28°C



Voc, FF and efficiency of the concentrator cells as a function of the concentration ratio which is defined by the increase in Jsc of the cell.

図 1 7

InGaP/InGaAs/Ge 3 接合セルは、高効率と優れた放射線耐性を生かして、宇宙用太陽電池として実用されている。まだまだ性能改善の余地がある。今後の課題として、例えば、AlInGaP トップセルが高 Voc に有用だが、Al 組成を増すと、厚いベース層を必要とし、コスト増と放射線耐性の低下につながり、最適化が必要だろう。薄型 Ge 基板は、セル重量の低減とフレキシブルセルの実現に有効だろう。集光型用には、セル接続用トンネル接合には、より高いピークトンネル電流が要求される。日射スペクトル変動や光学レンズを考慮した多接合セルのサブセル厚さの最適化も必要である。InGaAsN といった $E_g \sim 1.1 \text{ eV}$ 程度の新材料からなる高効率セルも、4 ~ 6 接合セルの実現のために望まれている。

第19回欧州 PV 会議に続き、フレキシブル - 族多接合セルの試みを報告し、注目を浴びた。a-Si や CIGS などの薄膜セルが、宇宙用フレキシブル太陽電池として検討しているが、性能は不十分である。ウエハボンディング、エピタキシャル・リフトオフや薄層剥離技術による - 族セルの薄層化と転写技術の試みはあるが、実用レベルで成功した例はない。MOCVD エピタキシャル成長 InGaP/GaAs 2 接合セル (図 1 8) が、金属薄膜上に転写され、セルの厚み約 2 μm 以下、面積 4 x 7 cm までのフレキシブルセル (図 1 9) が作製さ

れている。1 cm角セルで、AM1.5G効率29.4% (図 2 0)、AM0効率25.2%が得られており、金属薄膜による光反射の有効性や放射線耐性の向上のメリットも得られている。この値は、典型的なInGaP/GaAs 2 接合セルの値にほぼ同じである。ペアセルの重量比出力5 W / gであり、フレキシブル宇宙用太陽電池として有望である。今後、エピタキシャル用基板の再利用やエピタキシャルコストの低減がはかられば、全ての太陽電池の中で最高効率の - 族多接合セルを、非集光型でも、地上用として適用することも可能であろう。

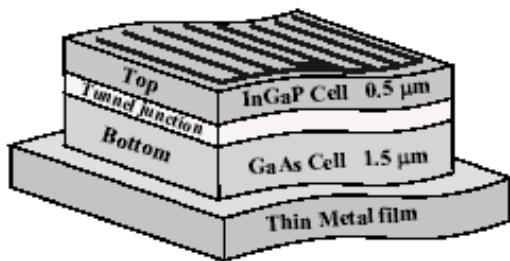


Fig. 7. Schematic illustration of a flexible thin-film InGaP/GaAs dual junction solar cell

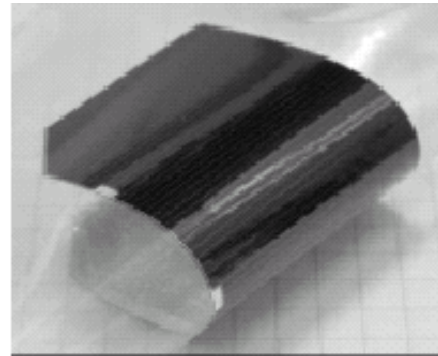


図 1 8

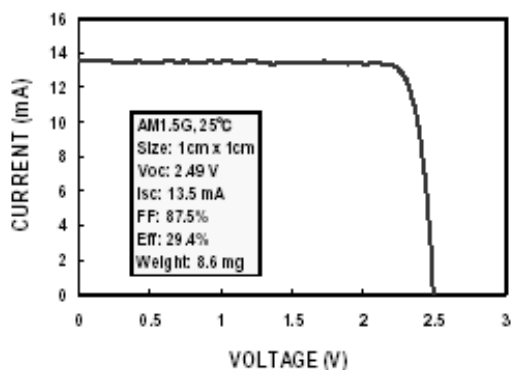


Fig. 9. AM1.5G I-V curve of the best efficiency thin film cell

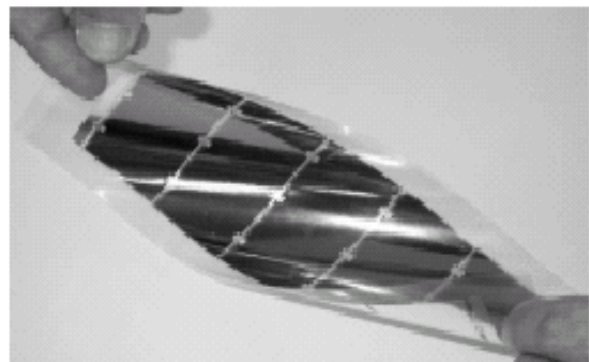


Fig. 8. Photograph of the flexible InGaP/GaAs cell with 4 cm x 7 cm in size and a string in which five cells (3.2 cm x 6.4 cm) are series connected.

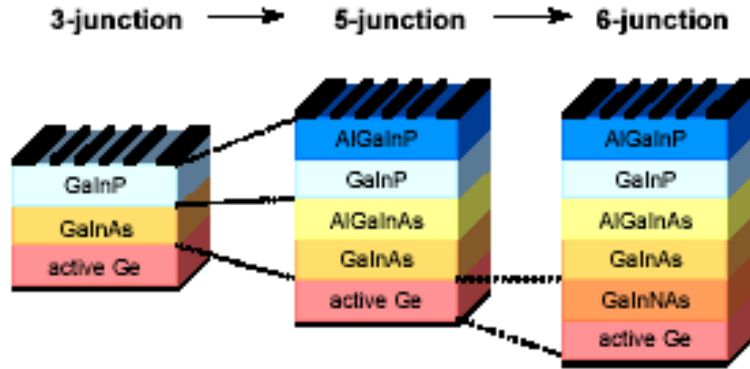
図 1 9

図 2 0

(2) F. Dimroth et al. (Fraunhofer ISE), “3-6 junction photovoltaic cells for space and terrestrial concentrator applications”

欧州宇宙機構およびドイツ教育科学省のサポートで進めているFraunhofer ISEにおける - 族多接合太陽電池の開発状況が報告された。

図 2 1 に示すように、新しい宇宙用太陽電池の開発は、高効率、放射線耐性向上、軽量化にある。欧州グループは、RWEがAM0効率29.1%の宇宙用GaInP/GaAs/Ge 3 接合セルを開発している。また、Fraunhofer ISEは、3 接合セルの集光動作で効率35.2%を実現している。AlGaInP/GaInP/AlGaInAs/GaInAs/GaInNAs/Ge 6 接合セルの理論AM0は46.7%で、図 2 2 に示すような30 ~ 50 μ m厚のGe基板上の超薄型 6 接合セルの実現を目指している。



European roadmap for the development of radiation-hard multijunction solar cells for space applications

図 2 1



First attempts towards 30 – 50 μm thin and lightweight space solar cells on Ge are under development.

図 2 2

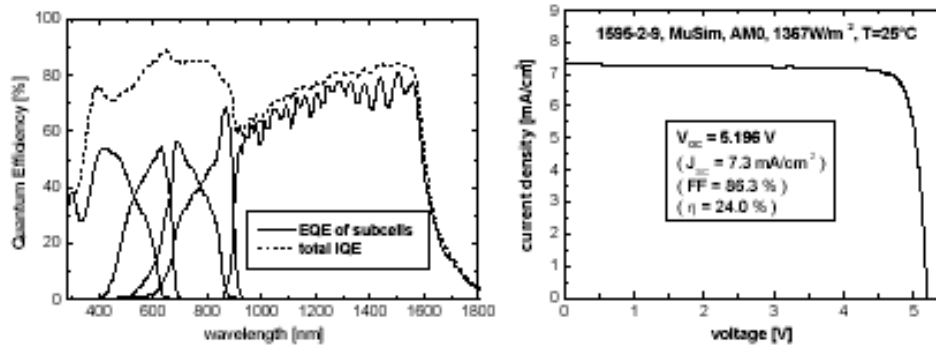


Figure 2: Quantum Efficiency (left) and light IV-characteristics of the first 5-junction solar cells developed at the Fraunhofer ISE. The cell technology was performed at RWE-SSP. This cell achieved a high voltage of 5.2 Volt. The cell has been measured under the 3-source solar simulator at the Fraunhofer ISE calibration laboratory. The current density is not accurate as the spectrum of the 3-source solar simulator can not be controlled simultaneously for all the 5 junctions. Calibrating the AM0 efficiency of these devices is therefore challenging.

図 2 3

第 1 段階として、最近、図 2 3 に示すように、5 接合セルで 5.2V の V_{oc} と AM0 効率 24.0% を達成している。サブセルの厚いものでも $1.4\ \mu\text{m}$ 、トータルでも $4.9\ \mu\text{m}$ 厚であり、現状

の宇宙用3接合セルを超える性能と放射線耐性が期待される。6接合セルの実現に向けた、チャレンジングなGaInNAsサブセルの開発の状況も報告された。図24に示すように、AMO光のGaAs上部セルフィルター下で、 9.3 mA/cm^2 の J_{sc} が得られている。

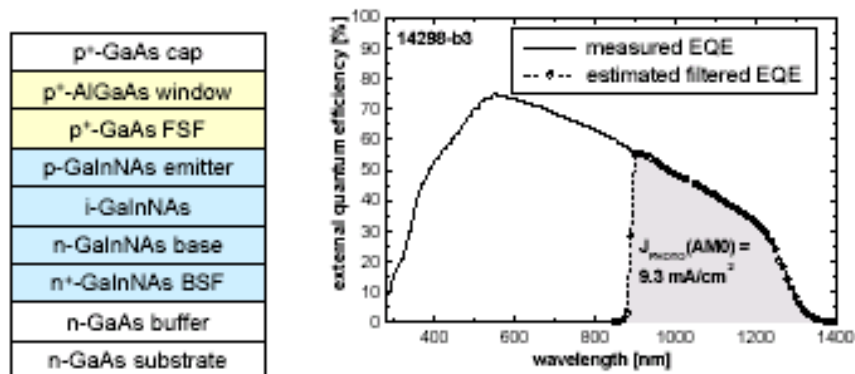


Figure 3: GaInNAs single junction solar cells are developed together with the University of Marburg. These cells will be used as the 5th subcell in a 6-junction space solar cell in the future. Current densities under AMO filtered with GaAs are 9.3 mA/cm^2 and therefore, sufficient for this application.

図 2 4

4.2.2 格子不整合系多接合セル

太陽光スペクトルへの適合性からは、格子不整合系多接合セルの検討が一つの方向である。格子不整合転位の発生による太陽電池特性の低下が課題である。

(1) D.C. Law et al. (Spectrolab), “Multijunction solar cells with subcell materials highly lattice-matched to germanium”

Spectrolabの格子接合系GaInP/GaInAs/Ge 3接合セルの実績は、最高AM0効率30.16%、平均効率28.3%（面積 30 cm^2 以上、12,323枚セル）で、EmcoreやRWEよりは若干先行している。また、地上用への適用を狙いとして、集光型セルの開発を進めており、175倍集光で37.3%を実現している。3接合セルでも、太陽光スペクトルの整合の観点からは、格子不整合系が有利で、理論AM0効率は36.2%である。

格子不整合系についても、精力的に検討が行われている。関心は、 $1.6\text{ eV} / 1.1\text{ eV}$ のバンドギャップ組み合わせである $\text{Ga}_{0.29}\text{In}_{0.71}\text{P} / \text{Ga}_{0.77}\text{In}_{0.23}\text{As}$ （格子不整合率1.6%）にあり、格子整合系より高効率を期待している。今回、Ge基板上の格子不整合率0~2.4%のMOCVD成長GaInPおよびGaInAs単接合セル、GaInP/GaInAs 2接合セルに関する検討結果が報告された。ARなしで、真性効率で比較されている。格子不整合GaInP、GaInAsセルは、格子整合セルとほぼ同等の内部量子効率を示す。Vocおよび電圧オフセット（ $E_g/q - V_{oc}$ ）の E_g 依存性を図25、26に示す。電圧オフセットは、太陽電池材料品質の指標で、格子不整合率0%のGaInPセルでは 425 meV だが、1.6%では 540 meV へと増加する。GaInAsセルでは、格子不整合率0%、1.6%、2.4%のセルで、電圧オフセット 380 meV 、 420 meV 、 480 meV と伸びは小さく、格子不整合率1.6%のGaInAsセルは、高性能結晶Siセルと同等のVocである。表7には、格子不整合率0%、0.2%、0.5%、1.6%のGaInP/GaInAs 2接合セルの特性を比較して示す。格子整合セルは、高品質材料と高 E_g により高Vocを示すが、格子不整合セルは、低 E_g により高 J_{sc} を示す。従って、disorder GaInP トップセルを有する1.6%格子不整合2接合セルはFFが悪くただで、通常のFFが得られれば、格子整合2

接合セルと同様な特性が得られるとしている。

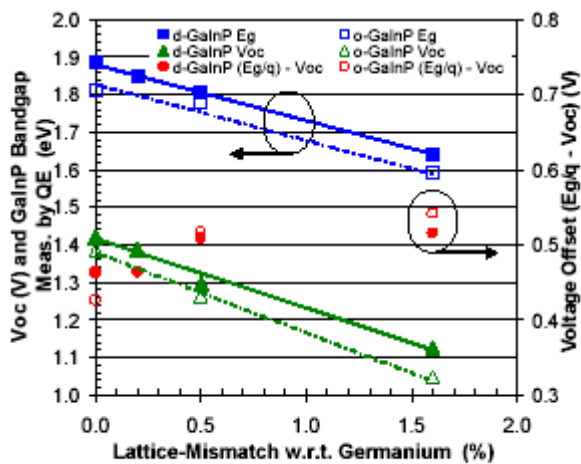


Fig. 3 Measured V_{oc} , bandgap, and $E_g/q - V_{oc}$ offset of various metamorphic GaInP single-junction cells.

図 2 5

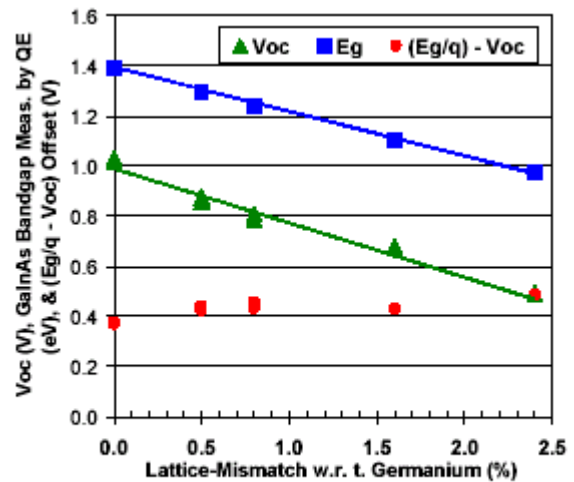


Fig. 4. Measured V_{oc} , bandgap, and $E_g/q - V_{oc}$ offset of various metamorphic GaInAs single-junction cells.

図 2 6

表 7

Table II. Summary of metamorphic GaInP/GaInAs dual-junction cells performance.

	Metamorphic GaInP/GaInAs Dual Junction Cells					
	Lattice-Mismatch (%)					
	0%	0.2%	0.5%	1.6%	1.6%	1.8%*
GaInP ordering	disordered			ordered		disordered
Voc (V)	2.40	2.25	2.18	1.78	1.68	1.76
Jsc* (mA/cm ²)	17.57	18.70	19.28	24.81	21.89	24.81
Fill Factor (%)	85.2	85.0	85.1	49.5	84.6	84.0
Vmp (V)	2.19	2.04	1.96	1.34	1.51	
Active Area	26.3	26.2	26.1	16.7	22.6	26.6
Efficiency (%)						

* Estimated active area Jsc of dual-junction cells with anti-r reflection coating

Performance projection of 1.8% LMM DJ cells with normal fill factor values

(2) N.J. Ekins-Daukes et al. (豊田工大), “Native and radiation induced defects in lattice mismatched InGaAs and InGaP”

Ekins-Daukesら(豊田工大)は、図 2 7 に示す格子不整合 $\text{In}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{As}$ サブセルおよび $\text{In}_{0.48}\text{Ga}_{0.52}\text{P}$ サブセルの as-grown 欠陥および 1 MeV 電子線照射欠陥の DLTS (Deep Level Transient Spectroscopy) 解析結果を報告した。InGaAs サブセルの as-grown 欠陥として、図 2 8 に示すように、H 1 欠陥 (240 K、 $E_v + 0.46 \text{ eV}$)、E 1 欠陥 (190 K)、E 3 欠陥 (400 K、 $E_c - 0.62 \text{ eV}$) が観測され、熱サイクルアニール (TCA) により H 1 欠陥と E 3 欠陥の濃度が低減して折り、両者は転位関与欠陥の可能性がある。1 MeV 電子線照射により、InGaAs サブセル中に、H 0 欠陥が出現し、E 1 欠陥と E 2 欠陥 (225 K) の濃度が増加している。格子不整合 InGaP サブセル中には、DX センター (110 K) が観測されるが、1 MeV 電子線照射により、H 1 欠陥 (110 K)、H 2 欠陥 (200 K)、E 1 欠陥 (110 K) および E 2 欠陥 (270 K) が出現する。

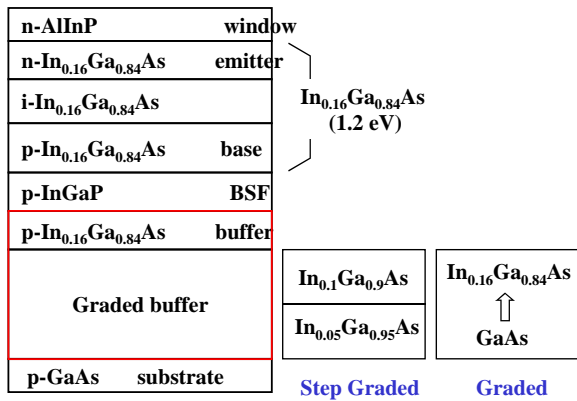


Fig.1 Schematic diagram showing the cell structure for the step-graded and graded In_{0.16}GaAs lattice mismatched devices.

図 2 7

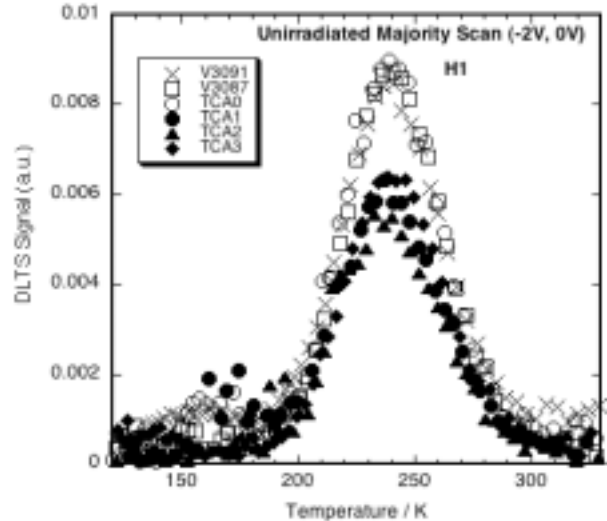


Fig.3 Majority carrier DLTS spectra taken from unirradiated graded (TCA0-3) and step-graded (V3091,3087) samples. The b1 coefficient is plotted on the Y axis.

図 2 8

4.2.3 多接合セル用新材料 InGaAsN

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、InGaAsN等の新材料が注目されている。しかし、現状では、p-InGaAsNの少数キャリア拡散長および移動度は低く、11mA/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17mA/cm²にも満たない。

(1) A.J. Ptak et al. (NREL), “Enhanced-depletion-width GaInNAs solar cells grown by molecular-beam epitaxy”

(2) D.J. Friedman et al. (MREL), “Analysis of depletion-region collection in GaInNAs solar cells”

Ptakら(NREL)は、GaInAsNサブセルの収集電流の増加の一方法として、広い真性領域を有するp-i-n構造について検討した結果を報告した。図29は、GaInAsNセルの内部量子効率(QE)の真性ベース(空乏)層厚依存性に関する計算結果を示す。4接合セルの電流整合を考えると、2μm程度の収集長が必要であると言える。しかし、MOCVD成長GaInAsNのバックグラウンドキャリア濃度は10¹⁷cm⁻³程度で、空乏層厚は~0.2μmで不十分である。これは、Ga空孔やCを含む原材料からの残留C不純物によると考えられる。陽電子消滅による測定結果は、MBE成長に比べて、MOCVD成長GaInAsN膜ではるかに多いことを報告している。また、MOCVD成長では、活性な水素多く含まれ、水素はV-N複合欠陥を誘起する。しかし、MBE成長では、水素やCフリーの成長、不純物やV_{Ga}の形成を低減することが可能である。ここでは、不純物や空孔濃度低減を利用して、MBE成長で3μm以上の空乏層厚を有するGaInAsNセルを実現している。セル構造は、高濃度SiドープGaAsコンタクトキャップ層、SiドープGaAsエミッタ層(n~1.5x10¹⁸cm⁻³)とアンドープGaInAsNベース層から成り、窓層やBSF層はない。図30は、内部量子効率(QE)の空乏層厚依存性に関する実験結果と計算結

果の比較を示す。従来のQE ~ 0.7より高いQEが得られている。現状のGaInNAsセル ($E_g \sim 1.3$ eV) の V_{oc} は ~ 0.7V で、構造を最適化すれば V_{oc} の改善も可能との事で、本構造の可能性を示した。

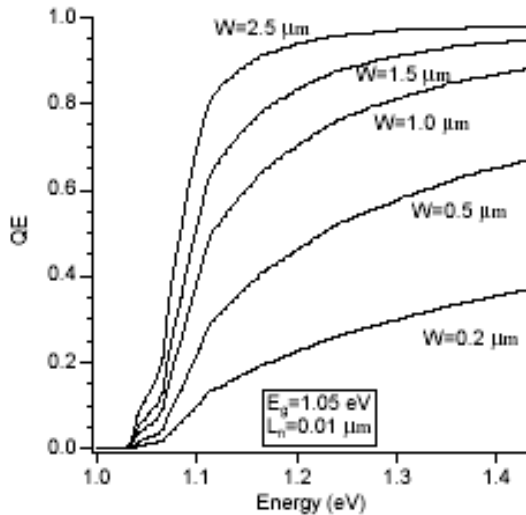


Figure 1. Calculations for GaInNAs with a bandgap of ~ 1.05 eV, showing an increase in QE with increasing depletion width.

図 2 9

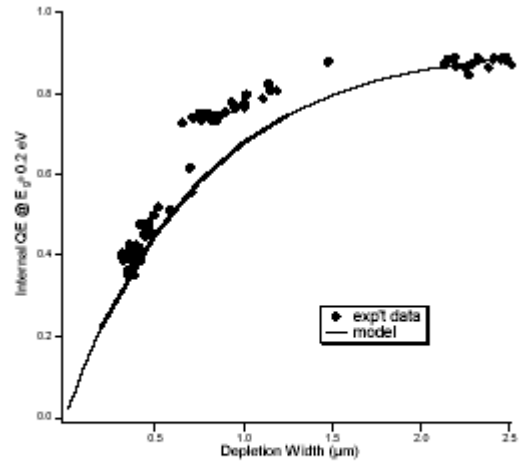


Figure 3. Compilation of internal QE values (taken at $E_g + 0.2$ eV) vs. depletion width. The data resembles the expected values from a simple model that assumes no contribution from diffusion or the emitter.

図 3 0

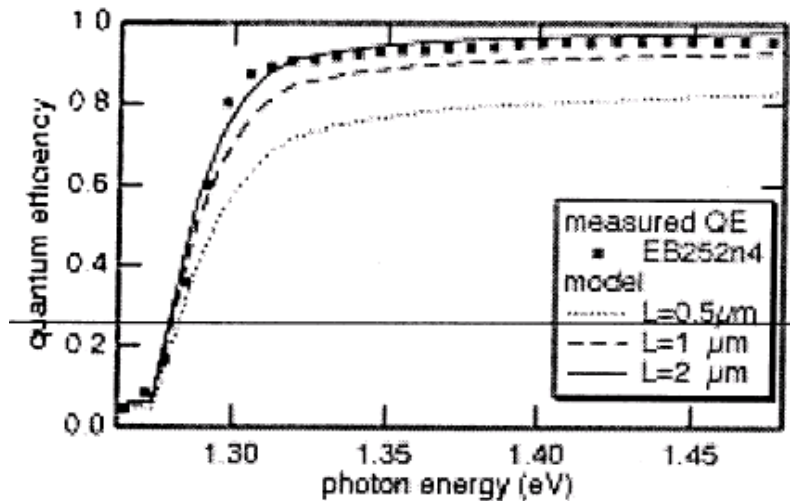


Figure 7. Measured QE for MBE-grown device EB252n4, compared to calculated QE curves from our model with various diffusion lengths.

図 3 1

Friedmanら (NREL) は、MBE成長の空乏層の厚い ($2.7 \mu\text{m}$) GaInNAs ($E_g = 1.28$ eV) デバイスを作製し、上記モデルを実践し、図 3 1 に示すように、少数キャリア拡散長 $2 \mu\text{m}$ に相当する良好な収集効率を得ている。今後は、 1.0 eV デバイスでの実現が課題である。

(3) S. Kurtz et al. (NREL), “ Effect of nitrogen concentration on the performance of Ga(In)As(N) solar cells ”

(4) S. Kurtz et al. (NREL), “ Collection of photocarriers in (GaIn)(NAs) solar cells ”

GaInAsNサブセルの低効率の原因は良くわかっていない。Kurtzら(NREL)は、GaAsNおよびGaInAsNセル特性に及ぼすN濃度の効果を検討した。MOCVD成長GaAs、GaAsN、GaInAsNセルで、構造はn-GaInP窓層/0.1 μ m厚n-GaAs:Seエミッター/3 μ m厚p-Ga(In)As(N):Znベース層/p-GaInP-BSF層から成る。P-on-n構造も比較検討されている。成長温度は600~650である。セル特性は、N濃度(Eg)に強く依存し、成長温度、Nプリカーサ(DMH、NF₃)やIn濃度には余り依存しない結果である。図32は、GaInAsNセルのVocのEg依存性を示す。VocはEgに依存するが、さらに、Nを含むセルは、ずっと低いVocを示す。N-on-p構造では、p-on-n構造よりもN添加により急激なVoc低下を示し、3x10¹⁸cm⁻³程度の低いN濃度でも、GaAsセル特性の低下を示す。Nを含むセルは、暗電流の増加やFFの低下を示す。

図33は、CV特性より求めたn-on-pおよびp-on-nデバイスのキャリア濃度のEg依存性を示す。N濃度の増加と共に、アクセプター濃度は増加し、ドナー濃度は減少する。これらの結果は、アクセプターとして働く点欠陥を生成している可能性を示唆している。これらの欠陥はGa空孔コンプレックスかも知れない、また、N関与欠陥はドナーになり得ると考えている。

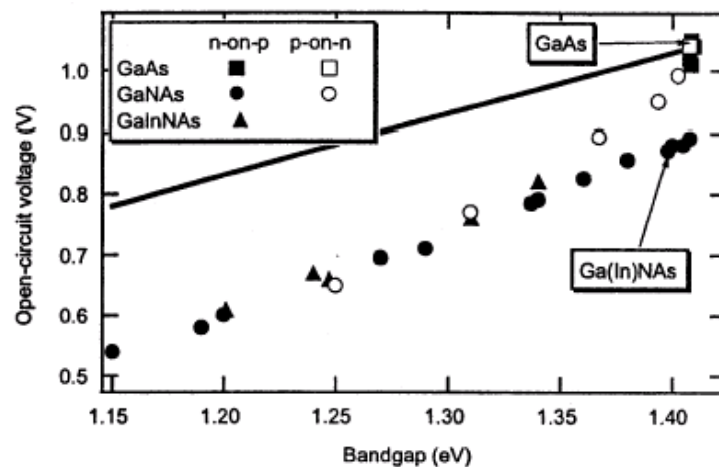


Fig. 3. The open-circuit voltage as a function of bandgap for GaInNAs cells. The line has unity slope, indicating a linear change in Voc with bandgap.

図 3 2

n-on-pセルのVoc低下は、DLTSで観測されている電子トラップに関係しているので、p形ベース中の電子寿命の低下が大きいと考えられる。少数キャリア拡散長は、以下の式で示すように、移動度 μ と少数キャリア寿命 τ の積の1/2乗に比例するので、移動度も重要である。GaAsへのNの添加は、正孔移動度よりも電子移動度を減少させる。従って、電子拡散長の方が、N添加による低下が大きいと言える。

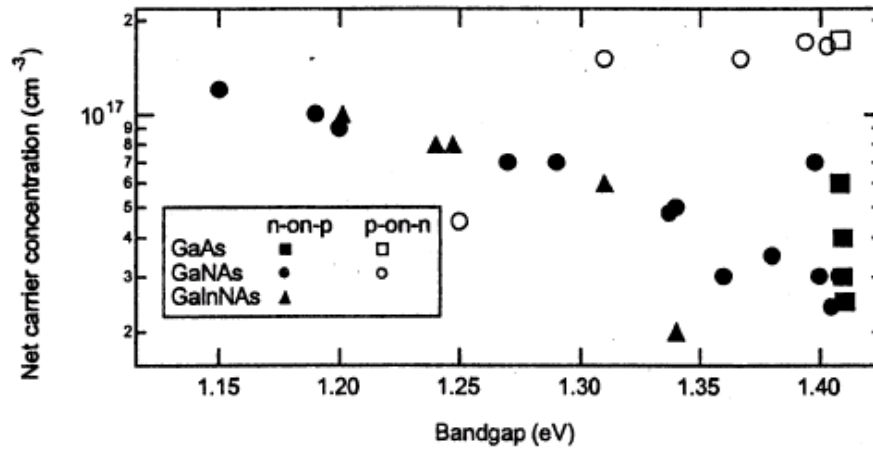


Fig. 5. Base doping of GalnNAs cells as measured by CV at the short-circuit condition.

図 3 3

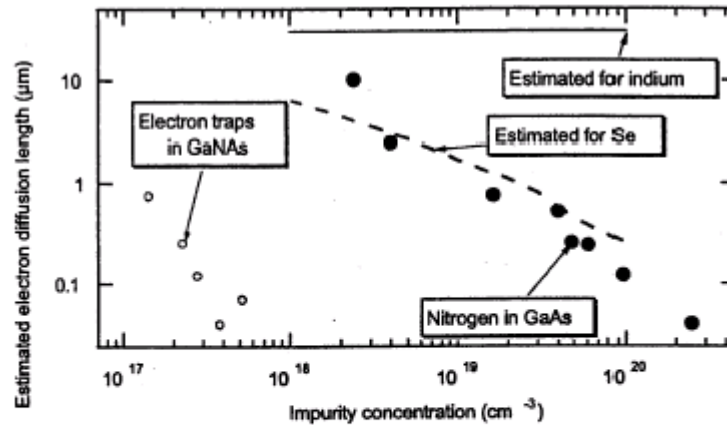


Fig. 7. Electron diffusion lengths as a function of impurity concentration in GaAs. The nitrogen data are from Fig. 6. These data are plotted both as a function of the nitrogen concentration and as a function of the electron trap concentration. The data for In and Se are estimated from the literature [17,20].

図 3 4

内部量子効率のデータから電子の少数キャリア拡散長が推定された。図 3 4 は、推定した少数キャリア拡散長の N 濃度依存性および DLTS から求めた電子トラップ濃度依存性を示す。実線は、通常のドナー濃度依存性を示す。少数キャリア拡散長 L のドナー濃度 N_d 依存性は、以下の式で与えられる。

$$L = \sqrt{\mu \tau k T / q}, \tau = 1 / B N_d,$$
 ここで、 μ は移動度、 τ は少数キャリア寿命、 k はボルツマン定数、 T は絶対温度、 q は電荷、 B は放射再結合確率で、 $B = 2 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 / \text{s}$ である。少数キャリア拡散長 L の N 濃度依存性が、ドナー濃度 N_d 依存性に近いことから、N 自体がドナー不純物のよ

うに振舞うことを示唆している。Inを増加しても、Lはさほど低下していない。

DLTSデータによる電子トラップ濃度は、N濃度の10%以下である。この結果は、問題となる欠陥を形成することなしに、Nを添加し得るかという疑問を示す。アニーリングは、電子トラップを減少させ、セル特性を向上させ得るので、メカニズムを含めて、詳細な研究が必要であろう。

多接合セルの分野では、GaAsに格子整合し、0.9~1.4 e VのE_gの新材料として、(GaIn)(NAs)やGa(AsNSb)に関心がある。例えば、(GaIn)(NAs)セルの低効率、少数キャリア拡散長(移動度、少数キャリア寿命)が低いことによる。解決策として、(GaIn)(NAs)膜のアニールによる品質改善やセルにおける電界形成がある。特に、(GaIn)(NAs)膜のアニールにより、フォトルミネッセンスやセル特性が改善されるが、そのメカニズムもわかっていない。(GaIn)(NAs)膜のアニール効果が検討されている。As-grown試料はp型だが、アニールにより表面層からn型化し、アニールの進行と共に、np接合が深くなる。

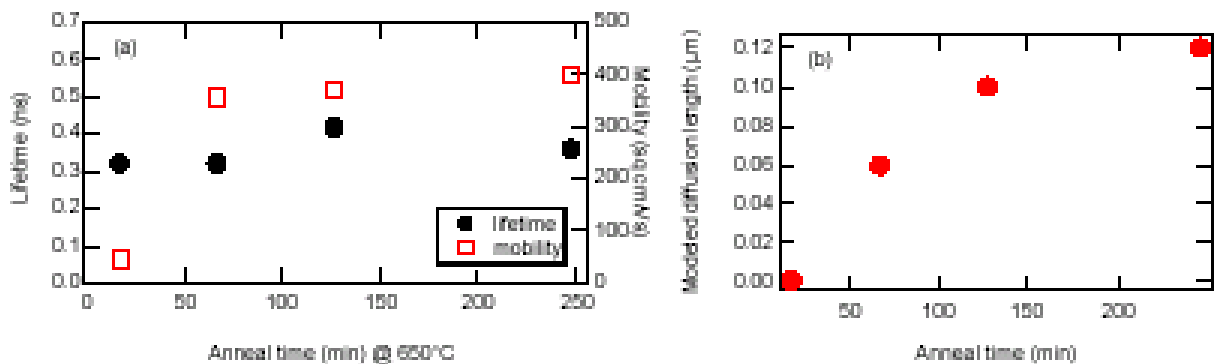


Fig. 1. Photoluminescent lifetime, electron Hall mobility and hole diffusion length of GaInNAs samples.⁵

図 3 5

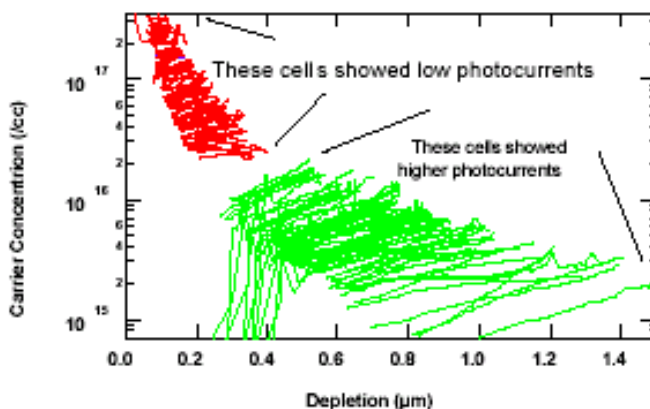


Fig. 2. Comparison of capacitance-voltage profiling for samples with relatively small and large photocurrents.

図 3 6

図 3 5 は、GaInNAs膜の少数キャリア寿命、電子移動度 μ と正孔拡散長Lのアニール時間による変化を示す。アニール時間と共に μ は増加し、飽和するが、Lはあまり変化しない。Lは、n型化したアニール試料の電解液/半導体接合を用いて測定した。右図に示すように、アニール時間と共に、Lは急激に改善されているが、左図の傾向とは合わない。また、

0.1 μmのオーダーという値は、セル特性のモデリングから得られるL値よりずっと低い。セル特性は、キャリア濃度分布にも関係する。図36は、GaInNAsセルのC-V特性によるキャリア濃度分布を示す。結果の違いは、表面層の電界効果を反映し、見ているものが違う可能性を指摘している。

(5) S. Prasad et al. (Univ. South Alabama), “Evolution of defects in InGaAsN”
MOCVD成長InGaAsNおよびGaAsN膜のDLTS測定結果を報告している。GaAsN膜では、 $E_v + 0.45\text{ eV}$ (290 K)と $E_v + 0.85\text{ eV}$ (410 K)が観測され、前者はN濃度にほとんど依存しないが、後者はN濃度に強く依存している。少数キャリアトラップとしては、E1 (120 K、 0.17 eV)、E2 (210 K)とE3 (310 K)が観測されるが、E1がN濃度に強く依存している結果が得られている。

4.2.4 III-V/Si多接合セルへのアプローチ

(1) J.F. Geisz et al. (NREL), “Lattice-matched GaNPAs-on-silicon tandem solar cells”

2接合セルの理想的組合せは $1.7\text{ eV} / 1.1\text{ eV}$ で、理論効率は37% (図37)で、 1.1 eV はSiを示唆している。III-VとSiセルのintegrationは、低コスト、高効率多接合セルとして魅力的で、古くから研究されているが、成功していない。これまで、Si上の格子不整合系III-V族化合物が検討されてきたが、直接遷移型のGaNPAsは、Siに格子整合できる材料である。

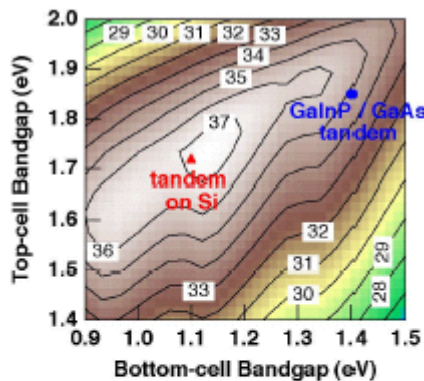


Fig. 1. Iso-efficiency contour plot of ideal series-connected, two-junction solar cell with an optimized top cell thickness, as a function of top-cell and bottom-cell direct band gap using AM1.5G standard spectra. Efficiencies were calculated at 300 K and 1-sun conditions. The red triangle shows the optimal GaNPAs/Si tandem, and the blue circles show the standard GaInP/GaAs tandem cell.

図 3 7

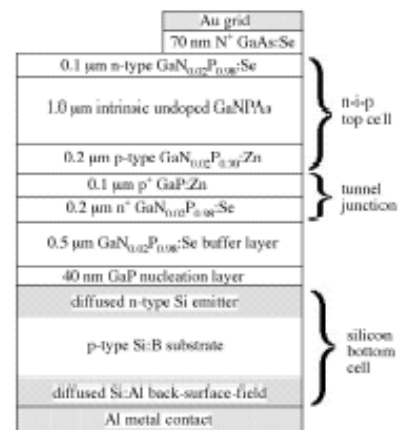


Fig. 2. Schematic of GaNPAs-on-silicon tandem structure.

図 3 8

図38に示すように、MOCVDで、Bドーパ p型Si基板上にGaNPAs-on-Si 2接合セルが作製されている。Siのnp接合は、III-V層からのP拡散による。EBIC (図39)による欠陥密度は、 $2 \times 10^7\text{ cm}^{-2}$ である。2接合セルの特性を図40に示す。現状の低効率は、GaNPAs膜の低品質でn-i-p接合、トンネル接合の低性能による。

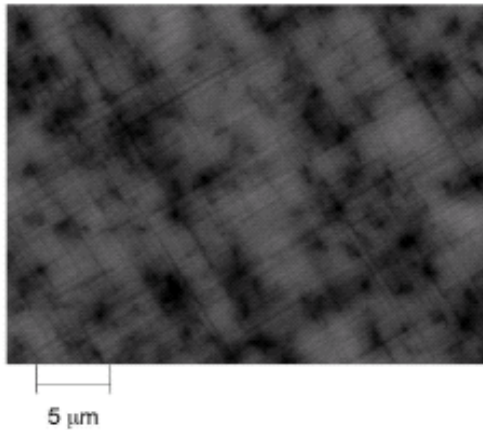


Fig. 4. Electron beam induced current (EBIC) image of GaNP solar cell grown on silicon with dislocation density around $2 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$

図 3 9

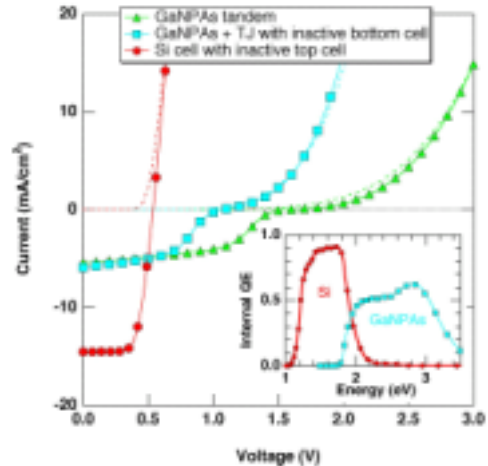


Fig. 6. Performance of GaNPAs-on-silicon tandem and its component parts.

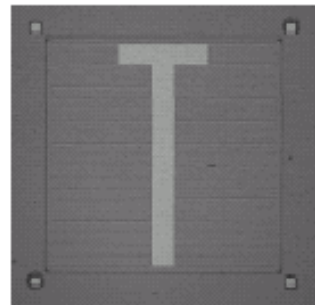
図 4 0

(2) S.A. Ringel et al. (Ohio State Univ.), “Multi-junction III-V photovoltaics on lattice-engineered Si substrates”

Ringelのグループは、SiGeバッファ層により、Si基板上のGaAsヘテロエピ成長で、 $1.2 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ 程度の低転位密度化と少数キャリア寿命10.5 nsのGaAs膜を実現している。Si基板上のGaAs単接合セル (4 cm^2) で、AM1.5G効率18.2% ($V_{oc} = 0.973 \text{ V}$ 、 $J_{sc} = 23.9 \text{ mA/cm}^2$ 、 $FF = 0.781$) を得ている。今回は、Si基板上のp-on-n構成のMBE成長InGaP/GaAs 2接合セル (図 4 1) に関する検討結果が報告された。図 4 2 は、SiGe/Si基板上のInGaP/GaAs 2接合セルのAM0光照射I-V特性をGaAs基板上的ものと比較して示す。Si基板上的セルは、GaAs基板上的のものに比べて、 J_{sc} で99%、 V_{oc} で91%のものが得られている。現状では、電流整合やシャント損失で、高効率は得られていない。また、放射線耐性も、GaAs基板上的のものに比べて良い結果が得られているが、詳細な検討が必要であろう。

p++ GaAs contact layer (1000A)	$\sim 1 \times 10^{18}$
p+ In _{0.47} (Al _{0.7} Ga _{0.3}) _{0.53} P window (300A)	$\sim 2 \times 10^{18}$
p+ In _{0.49} Ga _{0.51} P emitter (2000A)	$\sim 2 \times 10^{18}$
n In _{0.49} Ga _{0.51} P base (4000A)	$\sim 2 \times 10^{17}$
n+ In _{0.49} Ga _{0.51} P back surface field (300A)	$\sim 2 \times 10^{18}$
n+ In _{0.47} (Al _{0.7} Ga _{0.3}) _{0.53} P back surface field (300A)	$\sim 2 \times 10^{18}$
n++ GaAs TJ (250A)	$\sim 2 \times 10^{18}$
p++ GaAs TJ (300A)	$\sim 2 \times 10^{18}$
p+ Al _{0.7} Ga _{0.3} As window (400A)	$\sim 3 \times 10^{18}$
p+ GaAs emitter (5000A)	$\sim 2 \times 10^{18}$
n GaAs base (20,500 A)	$\sim 2 \times 10^{17}$
n+ Al _{0.7} Ga _{0.3} As back surface field (1000A)	$\sim 2 \times 10^{18}$
n+ GaAs buffer (2000 A)	$\sim 2 \times 10^{18}$
n+ substrate	

(a)



(b)

Fig. 1. (a) DJ p⁺n InGaP/GaAs cell structure used for the first generation devices on SiGe/Si substrate and (b) micrograph of the cell on Si. The p⁺n orientation is used since this configuration is less sensitive to V_{oc} reduction due to depletion region recombination enhancements associated with the presence of a low residual threading dislocation density. Note also the use of a GaAs tunnel junction in this demonstration cell design, which will impact overall DJ photoresponse.

図 4 1

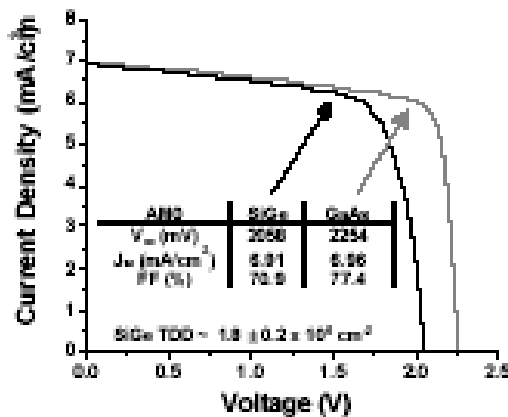


Fig. 3. Light I-V data of an InGaP/GaAs DJ cell grown by MBE on lattice-engineered Si and the same cell structure grown on GaAs, under AM0 conditions (courtesy of NASA, GRC). The DJ Voc on SiGe/Si is 2058 mV and both cells are significantly current-limited by the InGaP sub-cell. The nearly identical photoresponse characteristics are due to shunt problems associated with the InGaP sub-cell and not the substrate (see below).

図 4 2

4.3 宇宙用太陽電池

(1) P. Hausgen (Air Force Research Laboratory), "AFRL thin-film photovoltaic DSX and Roadrunner flight experiments"

米国空軍の衛星に対する要求は、ペイロードの重量比出力の増加、電力系および打ち上げコストの削減、電力システムのスケールアップ、ミッション寿命の拡大である。これらを実現するための衛星用太陽電池の技術的目標は、太陽電池の変換効率の向上(現状の27%から35%以上へ)、電力システムのスケールアップ(現状の15kWから30~100kWへ)、太陽電池アレイの重量比出力の増加(現状の70W/kgから250~450W/kgへ)、太陽電池の面積比出力の増加(10-15W/m²から45-60W/m²へ)、太陽電池セルコストの低減(現状の\$300/Wから\$40/W以下へ)、である。薄膜セルは、これらを実現する可能性を有している。AFRLの技術開発プログラムとして、)

- 族多接合セルの効率30%の3接合、)35%の4、5接合セルやフレキシブルセル薄膜セル、)金属薄フォイル上の10~13%のa-Siセル、)ポリマー基板上的a-Siセル、)金属薄フォイルやポリマー基板上的効率8~15%のCIGSセル、がある。さらに、将来形として、)フレキシブル基板上的の高効率(25~35%) - 族セル、がある。

このうち、薄膜セルの技術開発状況が報告された。薄膜セルの地上試験が実施されているが、種々の宇宙環境の複合効果を明らかにする意味でも、宇宙実証試験が必要である。AFRLは、2つのミッションを計画している。AFRL Roadrunner mission (Experimental Solar Array)とAFRL Deployable Structure Experiment (thin-film Photovoltaic Experiment)である。前者のミッションと実験太陽電池アレイを図43に示す。United Solar Ovonicのa-SiとGlobal Solar ElectricのCIGSの太陽電池アレイである。それぞれ60Wずつの2翼で構成されている。2005年中期中にLEO軌道に打ち上げ、薄膜セルの宇宙環境下での評価を行う予定である。後者は、2009年にMEO軌道に打ち上げ予定で、規模の大

きい薄膜セルの実験を予定している。現在予定している薄膜セルは、United Solar Ovonicのa-Siセル(3kW、100V)、Global Solar ElectricのCIGSセル(1kW、280V)、Iowa Thin Film Tech.のa-Si(300W) International Solar Electric Tech.のCIGSセル(100W)である。これらの宇宙実験を通して、宇宙への適用可能な薄膜セルの技術レベル向上をはかるとの事である。

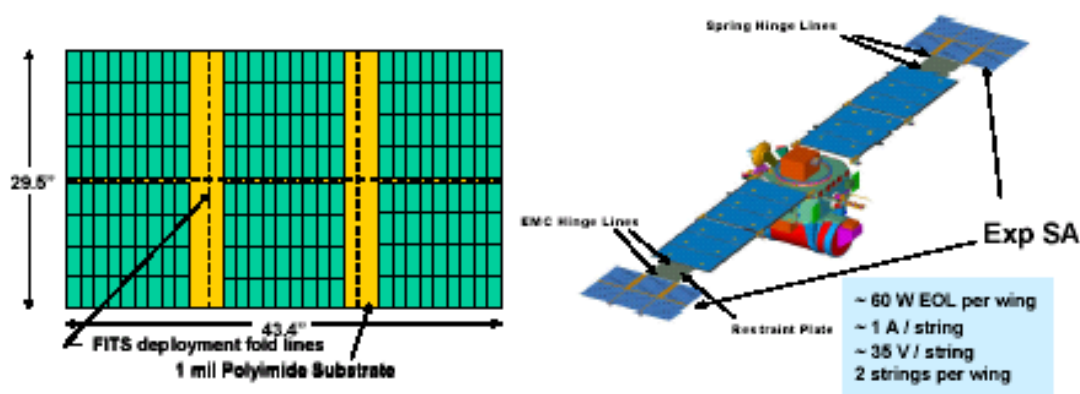


Figure 1: Experimental Solar Array (Exp SA) Fight Experiment on AFRL Roadrunner Mission

図 4 3

(2) M. Eskenazi et al. (Able Engineering), “Preliminary test results for the CellSaver concentrator in geosynchronous earth orbit”

宇宙用の新しい集光型太陽電池アレイ技術 (ABLE EngineeringのCellSaver) を評価するためのフライトが、2004年1月静止衛星軌道に打ち上げられた。ここでは、集光型アレイの設計、地上試験および初期の軌道実験結果が報告されている。集光型アレイは、高価な多接合セルを安価で軽量の集光器で置き換えることにより、コストと重量低減を期待できる。CellSaverは、図44に示すように、低価格な反射板で、近似的に太陽電池の半分を置き換えることにより、太陽電池アレイのコストを低減するよう設計されている。反射集光器の倍率は2倍である。EMCOREのATJ (Advanced Triple-Junction) セルとSpectrolabのITJ (Improved Triple-Junction) セルが評価された。地上で評価試験は終わり、CellSaverは全ての環境試験をパスしている。表8は、地上での評価試験項目、試験条件、試験ハードウェアおよび主な結果の要約を示す。フライト実験には、大面積のEMCORE製26%3接合セルが4セル用いられている。フライト実験では、GEOで15年間、電氣的熱的データが測定される予定である。図45は、集光および非集光セル列の地上および軌道上でのI-V特性を示す。CellSaverは、軌道上でも、非集光に比べて、約1.8倍の性能が得られている。軌道上255日経過後の出力保存率95.4%である。

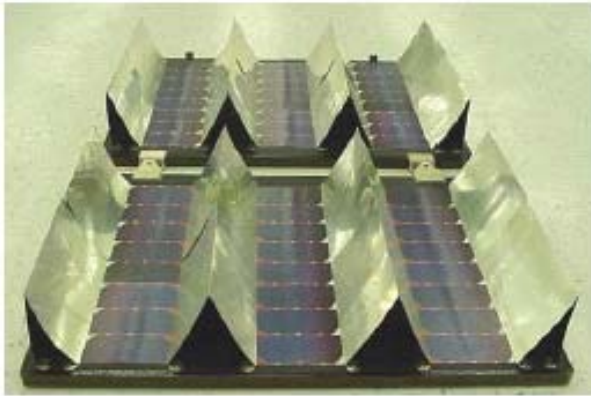


Fig. 1. CellSaver Solar Concentrator Panels.

図 4 4

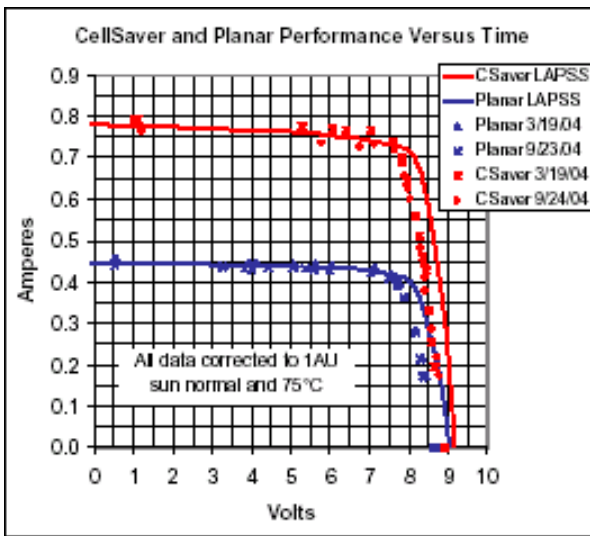


Fig 6. CellSaver and Planar String IV Curves.

図 4 5

表 8

Table 1. Space Qualification Testing Summary.

Test	Environment	Test Article	Key Results
Electrical	AM0 Large Area Pulsed Solar Simulator (LAPSS)	Multiple CellSaver designs with EMCORE, TECSTAR and Spectrolab multi-junction cell strings	BOL Power Boost 89% to 95% of Concentration Ratio Depending on Specific Design
Off-Pointing	AM0 Large Area Pulsed Solar Simulator (LAPSS)	Multiple CellSaver designs with EMCORE, TECSTAR and Spectrolab multi-junction cell strings	Current roll-off follows cosine law for $\alpha < 10^\circ$ (lateral) & $\beta < 25^\circ$ (series dir)
Random Vibration	x, y & z axes at 52gms, 45gms & 87gms respectively	CellSaver panel pair with four 176 mm long CellSavers and a 4-cell string of TEC31	No measurable shape change or reduction in power output
GEO Thermal Cycling	-175° to 120°C 2,000 cycles	Two CellSaver panels, one with 4-cell string of TECSTAR TEC31	Power reduction less than 1% after 2000 cycles (= 20+ years)
LEO Thermal-Vacuum Cycling	-115°C to 135°C 1×10^{-5} Torr 12 cycles	2 panels with 8 CellSavers on each and three 10-cell strings of TEC31 or EMCORE ATJ	No measurable power degradation in any string
LEO Thermal Cycling	-100°C to 120°C 20,000 cycles	2 panels with 8 CellSavers on each and three 10-cell strings of TEC31 or EMCORE ATJ	No measurable reduction of CellSaver performance
Long Term Stowage	Stowed in 11mm gap at ambient for 3 years	Two CellSaver panel pairs with four 176 mm long CellSavers on each	No effect on reflector deployment. 1% power reduction after 16 months
Small Panel Gap	Down to 5 mm panel spacing for 1 minute	Two CellSaver panel pairs with four 176 mm long CellSavers on each	Stowed in 5 mm panel gap without optical or shape degradation
Deployment Cycling	50 stow and deploy cycles	CellSaver panel pair with four 176 mm long CellSavers	No measurable shape change or reduction in power
Deployed Strength	130 g static load applied in x, y & z axes	CellSaver panel pair with four 152 mm long CellSavers	Deployed CellSaver undamaged by 130g static loading in all three axes
Xenon Plume Resistance	Xe ion plume at multiple energies & angles	Reflector material (50mm x 89mm)	Erosion rate of protective coating successfully measured
Humidity	90% RH at 22°C for 60 days	Three CellSaver panels each with two 176 mm CellSavers	No visual defects. P_{mp} degradation approximately 1%
Electrons, Protons & UV Radiation	15 year GEO dose per AEs and AP8 + 5,973 ESH UV	Reflector material (25mm x 76mm)	Solar reflectance reduced 1.8%. No emittance change.

(3) R.P. Raffaelle et al. (RoChester Inst. Tech.), "Wide bandgap space solar cell development"

太陽に近い環境を探索する将来ミッションでPVを使うならば、高温、高光強度および高放射線条件下で機能する太陽電池を開発せねばならない。例えば、金星表面のミッションの平衡温度は約450 だろう。また、図 4 6 に示すSolar Probeミッションの太陽電池アレイの温度は2000 以上に上ろう。太陽に近づけば近づく程、太陽エネルギーよりむしろ原子力や蓄電池で動作するようになるかも知れないけれど。熱設計は、アレイの太陽光束を低減させるために用いられ、金星へのNASAのMESSENGER ミッション用の太陽電池アレイの2/3がミラーで置き換えられ、AM0の10.6倍の光強度下でのアレイの太陽ヒーティングを最小化させる。また、高温で動作する高温用太陽電池の設計も必要である。太陽電池効率は、温度の増加と共に減少するが、開放端電圧 V_{oc} の変化の寄与が大きい。 V_{oc} の温度変

化率は、 E_g のそれと同じと仮定して、効率の温度変化率 $1/\eta(d\eta/dT)$ (η は効率、 T は絶対温度)

の E_g 依存性を求めた。外挿して効率が0になる温度を最高動作温度を定義して、図47に示す。明らかに、広い E_g 材料が、高温動作に必要である。しかし、高光子エネルギーでは、太陽からの光束が減少するから、各温度での最適 E_g が存在する。図48は、300K、300~900の温度での太陽電池変換効率の E_g 依存性を示す。300K、1000Kでは、最適 E_g は、各々、1.5eV、2eVである。高温動作宇宙用太陽電池として、GaP、SiCやGaN材料に関して研究している。高温動作のためには、コンタクトも需要である。例えば、SiCセルは600用設計されているので、コンタクトも、同様の温度で安定でなければならぬ。表面のグリッドコンタクトとして、TiSi₂プロセスが開発されている。CVDで230nm厚のポリSiが堆積され、100nm厚のTiが蒸着される。次いで、熱アニールされ、TiSi₂が形成され、900で動作可能である。裏面コンタクトとして、Tiの代わりにPtを用いた同様なプロセスも開発された。図49は、SiCセルとAM0スペクトル下でのI-V特性を示す。

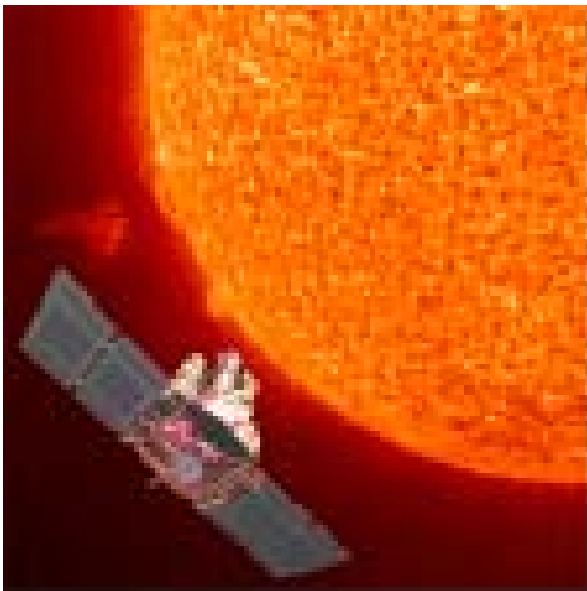


Figure 1: a proposed future mission to investigate the plasma environment near the sun.

図46

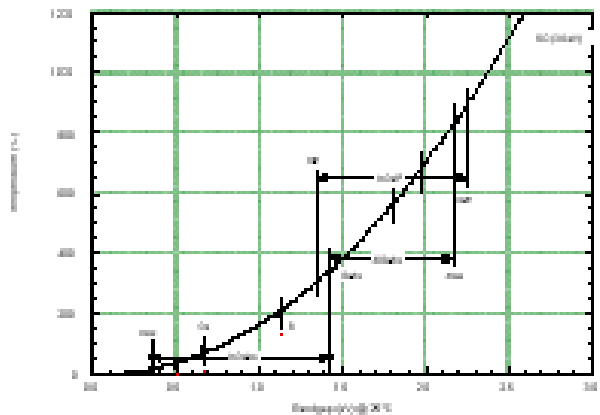


Figure 2: theoretical maximum operating temperature as a function of bandgap.

図47

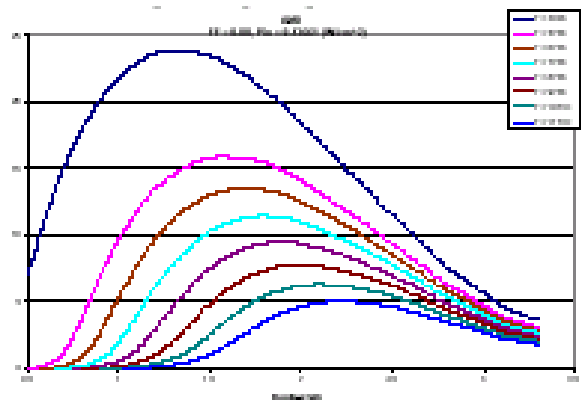


Figure 3: Theoretical performance as a function of bandgap for standard (300 K) operation, and for high temperature operation from 300 to 900 C.

図48

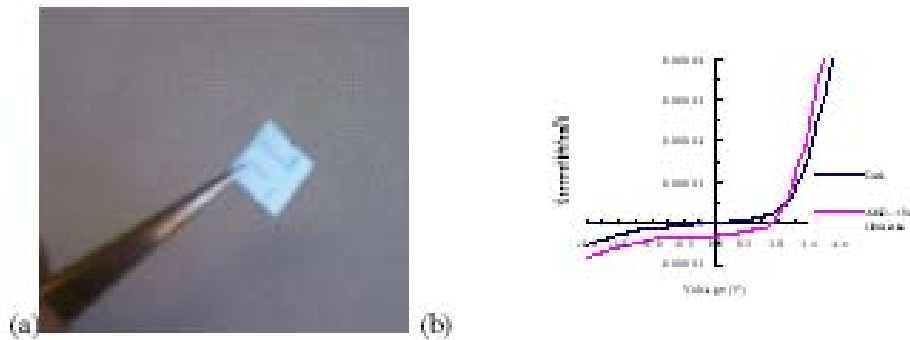


Figure 4. (a) Experimental silicon carbide solar cell with TiSi top grid contact and (b) AM0 current versus voltage photoresponse.

図 4 9

5 . 結晶 Si 太陽電池分野のトピックス

大手結晶Si太陽電池メーカーによる大量生産設備の増強：年産 1 GW の中期目標に向けて
大面積・高効率セル製造の進展：

- ・面積 100.5 cm^2 のHITセルで効率21.5%（三洋）
- ・面積 232 cm^2 の多結晶Siセルで効率17.7%（京セラ）

セル製作プロセスの基礎的理解の進展：

パッシベーション、光劣化、fire throughスクリーン印刷メタリゼーション

プロセスモニタリングやキャラクタリゼーション技術の進展：

フォトルミネッセンス、再結合の画像イメージ法、反射分光、少数キャリア寿命測定

n型ウエハ、Gaドープやヘテロ接合に関する研究

結晶Si太陽電池の理論限界効率28.9%、実現可能効率26%：ヘテロ接合が一つの方向か？

6 . 感想

- 族、集光型および宇宙用セル関係では、結晶Si分野に次ぐ約90件の論文発表があり、IEEE PVSCの伝統を感じた。また、米国では、関連分野の研究の裾野が極めて広いことも再認識した。

特に、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。さらに、欧州では、集光型結晶Si太陽電池の技術開発が再燃されており、日本でも技術開発の強化の必要性を感じる。

今後は、基礎的研究をベースにして、4、5接合化での欧米との切磋琢磨、集光技術のR&Dの強化と実用化、新材料、オンSi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も貢献して行きたい。

（以上）