

第16回欧州太陽光発電会議（16th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition）報告

2000. 5. 17

山口 真史（豊田工大）

1. 開催月日： 2000年5月1日～5月5日。

2. 開催場所： Scottish Exhibitions & Conference Center（グラスゴー、英国）。

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欧州会議である。今回の会議の組織委員長は H. Scheer、副委員長は B. McNelis だが、実質的には、 B. McNelis、論文委員長の H. Ossenbrink、W I P の P. Helm が中心となって、会議を運営していた。

図1に、国別参加者数を示す。65カ国から1380名の参加者があった。加えて、展示関係で400名の参加があり、欧州会議としても、これまでの最多の参加者であり、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。国別では、①ドイツ320名、②英国176名、③オランダ99名、④米国98名、⑤フランス97名、⑥スペイン82名、⑦イタリア74名、⑧日本70名、⑨スイス55名、⑩ベルギー39名の順であった。

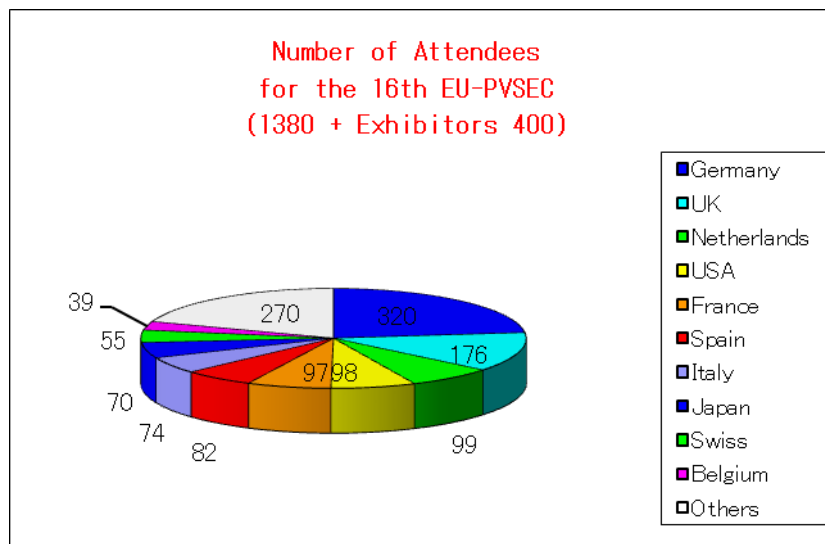


図1 参加者数の国別内訳

発表論文については、1090件のアブストラクト投稿の内、937件が採択され、他にLate News 発表があった。図2には、国別発表論文数を示す。国別では、①ドイツ197件、②英国86件、③スペイン72件、④米国66件、⑤フランス60件、⑤オランダ60件、⑦スイス44件、⑧オーストラリア39件、⑨イタリア32件、⑩日本30件の順であった。札幌でのPVSEC-11から間がないことから、日本からの発表論文や参加者が少ないことは残念であった。

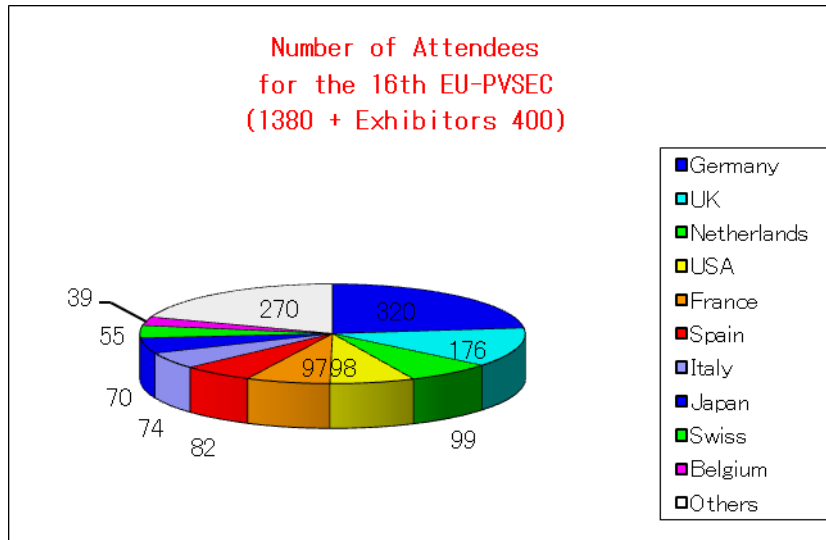


図 2 発表論文数の国別内訳

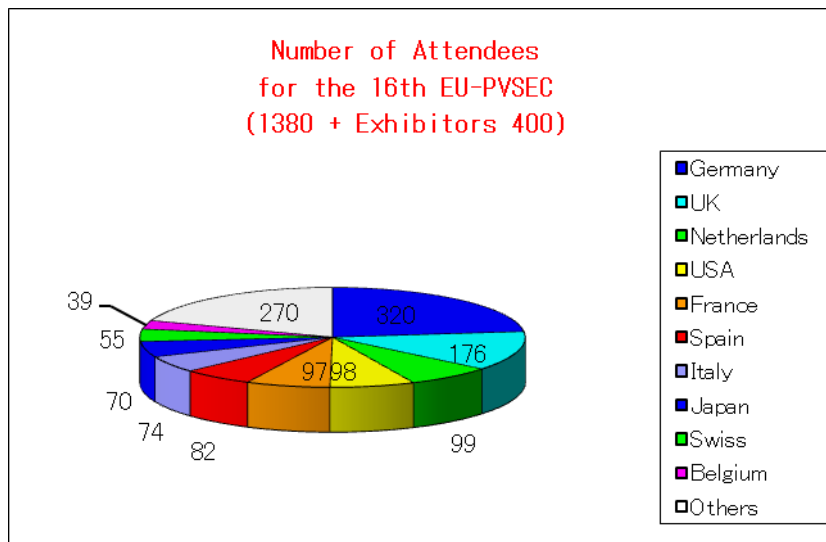


図 3 発表論文数の分野別内訳

図 3 には、分野別発表論文数を示す。分野別では、① P V モジュール等 2 0 9 件 (22.3%)、② 結晶 S i 系 1 9 2 件 (20.5%)、③ 薄膜系 1 9 1 件 (20.4%)、④ 建材一体型 P V システム 9 5 件 (10.1%)、⑤ T P V を含む基礎・新デバイス・材料 8 7 件 (9.3%)、⑥ 普及および国家プロジェクト 8 2 件 (8.8%)、⑦ III - V 族を含む宇宙 4 1 件 (4.4%)、⑧ 途上国開発 4 0 件 (4.3%) の順であった。P V モジュール / 建材一体型 / 普及 / 途上国開発システムをトータルすると、4 2 6 件 (45.5%) で、欧州会議の P V システム寄りの色彩が現れていた。

また、今回の新しい試みとして、① 宇宙用太陽電池およびシステムのセッション、② Lecture、③ 3 パラレルセッション、があったが、Lecture は講演者に論文委員会の意図が伝わらず、総じて、Plenary 講演と大差なく、期待はずれの感があった。

4. III-V族化合物半導体太陽電池及び宇宙用太陽電池分野の主な発表論文の概要

III-V族および宇宙用セル関係は、宇宙セッションでの発表論文41件に加えて、基礎および薄膜セッションでの発表論文を加えると、60件の論文発表があった。国別では、①米国12件、②ドイツ9件、③英国7件、④ロシア6件、④スペイン6件、⑥日本4件の順であった。

4.1 集光形セル

欧米で、III-V族化合物の集光形太陽電池の地上用、宇宙用への実用化に向けて、研究開発が再展開されていることが、今回の会議の印象の一つである。

C. Alogra(Univ. Politech. Madrid)は、LPE成長(Ioffe Phys.-Tech. Inst.)およびMOCVD成長(Energy Environ. Inst.) DH構造GaAs単一接合セル(図4)のAM1.5-Gの1,004倍集光で効率26.2%を得たことを報告した。温度上昇は40°C以下である。高効率集光形セル実現のキーポイントは、①直列抵抗、②ARコーティング、③半導体太陽電池層の成長、である。図5には、MOCVDおよびLPE成長GaAsセルの変換効率の集光度依存性を示す。高効率化には、直列抵抗 $2\sim 3\text{ m}\Omega\text{ cm}^2$ 以下が必要で、表面金属電極設計がなされ、平均 $10^{-4}\Omega\text{ cm}^2$ が得られている。ARコートは、ZnS/TiO₂の二層ARが用いられている。

図4 集光形GaAs単一接合セルの構造

図5 MOCVDおよびLPE成長GaAsセルの変換効率の集光度依存性

表1 集光形太陽光発電システムに関するコスト試算結果

表 1 には、コスト試算結果を示す。10MW_p/年の生産時には、2.74Euros/W_p (0.104Euros/kWh) の価格実現が可能である。2.74Euros/W_pの内訳は、セルが0.56EU/W_p、光学系0.28EU/W_p、モジュール化0.13EU/W_p、冷却系0.16EU/W_p、追尾系0.75/W_p、インバータ等0.20EU、設置費0.11EU/W_p、利益率25%である。1,000MW_p/年の生産時には、0.79Euros/W_p (セル0.12EU/W_p、光学系0.13EU/W_p、モジュール化0.06EU/W_p、冷却系0.07EU/W_p、追尾系0.19/W_p、インバータ等0.06EU、設置費0.02EU/W_p、利益率25%) で、0.033Euros/kWhが可能であるとしている。地上用低コストセルを狙ったもので、短期目標は、GaAs 単一接合セルを用い、3Euros/W_p (0.1Euros/kWh) 以下である。中

期ターゲットは、多接合セルを用い、1 Euro/kWh (0.033Euro/kWh) 以下である。

L. Fraas ら (JX Crystals) は、宇宙用への適用を狙いとして、InGaP/GaAs//GaSbメカニカル・スタックセルの集光アレイに関する検討結果を報告した。彼らは、1989年にGaAs//GaSbメカニカル・スタックセルのAM0の100倍集光で31%の最高効率を実現した。その後、1994年には、NASAのPASP (PV Advanced Space Power) 衛星で、GaAs//GaSbの集光形ミニモジュールの実証試験が行われ、高出力密度、放射線耐性および追尾系の良好動作が確認された。その成果が、1998年に打ち上げられたDeep Space Iの主力電源に2.5kW線焦点集光形アレイ (効率~23%) が用いられることにつながった。

今回は、TECSTAR 製InGaP/GaAs2接合セルとGaSbセルの3接合メカニカル・スタックで、表2に示すように、AM0の15倍集光で効率29.6%が得られている。課題は、2接合セルのトンネル接合で、改良により32%の効率実現は可能であり、目標は35% (AM0の15倍集光) である。モノリシック系における格子不整合の問題がないことで高効率化が可能で生産性が高くリスクが少ないこと、柔軟性など、メカニカル・スタックセルの特徴が強調された。

表2 3接合メカニカル・スタックセルの
AM0集光特性

図6 集光形太陽電池モジュールの構成

V.M. Andreev (Ioffe Phys.-Tech. Inst.) も、GaAs//GaSbメカニカル・スタックセルのフレネルレンズ使用による宇宙用集光形モジュールについて報告した。図6に示すように、2.3cmの短焦点で、集光倍率は約10で2.5cm x 10cm x 10cmのモジュール構成でコンパクトである。GaAs//GaSbメカニカル・スタックセルが用いられ、AM0の6~11倍集光で効率24~25% (25°C) を得、モジュール効率は約21%となっている。GaInP/GaAs2接合セルとGaSbセルのメカニカル・スタック構成で、モジュール効率23~24%、将来的には27%が可能であるとしている。

4. 2 多接合セル

米国、日本からの発表がなく、さびしい印象だったが、欧州、特に、ドイツからの発表が注目された。

A. W. Bett ら (Fraunhofer ISE) は、生産規模の MOCVD 装置 AIXTRON 2600-G3 を用いた $Ga_{0.51}In_{0.49}P/GaAs$ タンデムセルの開発の結果を報告した。目的は、高成長速度、低材料消費の成長方法を開発することにある。p 形 $GaAs$ 6° オフ (100) 基板上に n-on-p 構成の AM0 用に設計された $GaInP/GaAs$ 2 接合セル (図 7) が作製された。報告では、タンデムセル特性に及ぼすトンネル接合層、トップセル厚さの影響が述べられたが、目新しいものではなかった。例えば、報告者らが指摘しているように、トンネルダイオードとして、ワイドギャップの $GaInP/AlGaAs$ が良さそうだと報告であった。また、タンデムセルの光 I-V 特性評価方法として、マルチソースのソーラーシミュレータを用いた方法が提案されている。図 8 に示すように、欧州での最高効率 24.5% (AM0、 1 cm^2)、23.5% (AM0、 8 cm^2)、28.0% (AM1.5G、 1 cm^2) が実現している。今後の高効率化に向け、接合数の増加、 $GaAs$ ボトムセルを $Ga_{1-x}In_xAs$ で置き換え、トンネルダイオードの最適化を検討予定との事である。

図 7 $GaInP/GaAs$ 2 接合セル
の構造

図 8 $GaInP/GaAs$ 2 接合セル
の I-V 特性

F. Dirmroth ら (Fraunhofer ISE) は、宇宙および地上集光用を目指して、ボトムセルの低バンドギャップ化によるタンデムセルの高効率化を検討している。 $Ga_yIn_{1-y}P$ トップセルと $Ga_{1-x}In_xAs$ ボトムセルとの格子不整合系の試みである。 $GaAs$ 6° オフ (100) 基板上に、n-i-p 構成の $Ga_{0.35}In_{0.65}P$ トップセルと $Ga_{0.83}In_{0.17}As$ ボトムセルが C ドープ $Al_{0.3}Ga_{0.7}As/Si$ ドープ $Ga_{0.83}In_{0.17}As$ トンネルダイオードで接続され、ボトムセルには 1445nm 厚の $AlInAs/GaInAs$ の Bragg Reflector が付き、かつ 1500nm 厚の $Ga_{1-x}In_xAs$ の graded バッファ層もある (図 9)。 $Ga_{0.51}In_{0.49}P/Ga_{1-x}In_xAs$ タンデムセル特性に及ぼす In 組成 x の効果が検討され、図 10 に示すように、In 組成 x の増加と共に、ボ

トムセルの分光感度の長波長側への拡大と同時にトップセルの電流整合の増加による I_{sc} の増加があるが、 E_g の低下による V_{oc} と FF の減少及び転位密度の増加があった。ベストの結果は、 $Ga_{0.51}In_{0.49}P/Ga_{0.95}In_{0.05}As$ タンデムセル (4 cm^2) で効率 27.8% (AM1.5G)、26.8% (AM1.5D)、23.3% (AM0) が得られている。また、 $Ga_{0.35}In_{0.65}P/Ga_{0.83}In_{0.17}As$ タンデムセルでは、分光感度の波長帯域が拡大でき、ベストの結果は、 1 cm^2 セルで、効率 27.6% (AM1.5G)、27.0% (AM1.5D)、24.1% (AM0) が得られ、集光に有望であるとしている。実際、フライブルグの屋外で、 0.13 cm^2 セルと prismatic cover による集光特性が評価され、185倍集光で効率 28.3% が得られている。

図9 $Ga_{0.35}In_{0.65}P/Ga_{0.83}In_{0.17}As$ タンデムセルの構造

図10 $Ga_{0.51}In_{0.49}P/Ga_{1-x}In_xAs$ タンデムセルの分光感度特性に及ぼす In 組成 x の効果

4.3 GaAs-on-Si 関係

S.A. Ringel ら (Ohio State Univ.) は、 $GeSi$ 組成傾斜厚膜バッファ層による Si 基板上的 $GaAs$ 太陽電池の最近の状況を報告した。 Si 基板上的 $GaAs$ ヘテロエピ成長層の PL の時間減衰法測定による少数キャリア寿命は 10.5 ns であり、 Ge 基板上的 $GaAs$ の $17.2\sim 19.4\text{ ns}$ に近づいている。 Si 基板上的 $GaAs$ 太陽電池の分光感度特性は、 $GaAs$ や Ge 基板上的ものと遜色はない。今回、AM0用に、 $0.2\text{ cm} \times 0.2\text{ cm}$ の $GaAs\text{-on-Si}$ セルが作製され、ARコートなしで、図11に示すように、 $V_{oc} = 971\text{ mV}$ 、 $J_{sc} = 20.6\text{ mA/cm}^2$ 、 $FF = 70.5\%$ 、 $\eta = 11.4\%$ が得られ、ARコートや直列抵抗の改善により、AM0で効率 18.5%以上が実現できるとしている。

図 1 1 GaAs-on-Siセルの
AM0でのI-V特性

図 1 2 多結晶および単結晶GaSb
TPVセルの特性

4. 4 TPV関係

TPV関係では、8件の報告があった。

O.V. Sulimaら (Fraunhofer ISE) は、小グレインサイズ ($\sim 100\mu\text{m}$) の多結晶GaSb TPVセルが、単結晶GaSb TPVセルと同様の特性であることを示し、多結晶GaSbが、高効率TPVセルに適することを報告した。Teドープn-GaSb多結晶は、NaCl-KCl共晶封止剤を用い、縦型ブリッジマン法で育成した。キャリア濃度は $2\sim 5 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 。n-GaSbへの気相Zn拡散で、接合を形成している。TPVセルの光I-V特性評価が行われ、図12に示すように、多結晶GaSbセルの特性は、単結晶GaSbベストセルより特性は劣るが、数年前のGaSbセルより良いので、単結晶GaSbセルとほとんど変わらぬと言って良いとの事である。 $3\text{A}/\text{cm}^2$ で、 $1\text{W}/\text{cm}^2$ の出力密度を得ている。

4. 5 宇宙用太陽電池の開発

宇宙用InGaP/GaAsタンデムセルの量産化は、これまで、TECSTAR、Spectrolabの米国2社のみであったが、新たにドイツのASEが参入し、年内に出荷を開始するとの事である。J. Hilgarthら (ASE) は、欧州でのGe基板上的高効率InGaP/GaAs 2接合セルの生産性に関して報告した。放射線耐性を考慮して、トップセル層厚を最適するとの報告ではあったが、米国、日本の追試の印象であった。 $4.24 \times 4.1\text{cm}^2$ の400セルで、平均AM0効率23.2%、ベスト24.4%、EOL効率18.5%を得ているとの事である。

なお、ASEの本格参入で、小グループであったEEVの太陽電池グループは、宇宙用化合物太陽電池の研究開発から手を引いたとの情報もあった。

4. 6 基礎研究、評価関係

量子井戸 (MQW) 等低次元構造に関する発表は、7件であった。

D.B. Bushellら (Imperial College) は、図13に示すようなGaAsP/InGaAsの格子歪みバランスの量子井戸構造太陽電池に関して報告し、ようやく、表3に示すような通常のGaAsセルに匹敵する効率20.0%の太陽電池特性を得ている。n⁺-GaAs基板上に2300nm厚のn-GaAs層、1 μm 厚のQWのi層、543nm厚のp-GaAs

s 層、 $p\text{-Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 窓層の順に成長された。74 nm 厚の SiN の AR コーティングがなされ、 $3 \times 3 \text{ mm}$ のセルサイズである。 $\text{GaAs}_{0.94}\text{P}_{0.06}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ QW が、例えば $x = 0.17$ の場合、7.5 nm / 21.5 nm の 20MQW から成る。In 組成 x の増加と共に、再結合が増加するが、分光感度上は x の増加が望ましく、現時点では $x = 0.17$ が最適のようである。今後は、 GaInP/GaAs タンデムセルへの適用を考えており、 $\text{GaAsP}/\text{InGaAs}$ MQW の適用により、相対的に 7% の向上を見込み、AM0 効率 24.6% のものが 26.3% へ改善できるとしている。

表 3 歪みバランス MQW セルおよび通常構造 GaAs セルの AM1.5 での特性

図 13 歪みバランス $\text{GaAsP}/\text{InGaAs}$ MQW 素子の構造とバンド構造

Yamaguchi ら (豊田工大) は、 InGaP/GaAs タンデムセルの放射線耐性とそれを考慮した最適化に関する報告を行った。 InGaP/GaAs タンデムセルの InGaP トップセルは、太陽光や順方向バイアス等の少数キャリア注入により、放射線劣化が回復することは、以前に報告したが、今回、DLTS 法により、 InGaP 中の照射欠陥が少数キャリア注入により回復することを確認した。H2 (0.50 eV) の多数キャリアトラップ中心は、主要な欠陥中心であり、ダブルキャリアパルス DLTS の測定により、再結合中心であることが確認でき、また、少数キャリア注入により欠陥回復が起こっていることがわかった。今後は、こうした効果を含めて、放射線耐性強化素子構造を検討して行く予定である。

5. 感想

従来、欧州 PV 会議では、宇宙用太陽電池セッションはなかったが、今回、新しい試みとして、“Space Cells and Systems Session” を設けたことで、III-V 族セルや宇宙用セルおよびシステムに従事する人々と交流でき、良かったように思う。しかし、NREL、Spectrolab や TECSTAR 等米国からの発表や参加がなく、さびしい印象もあった。また、札幌の PVSEC-11 から本会議のアブストラクト締め切りまで半年ということで、論文の新鮮さにも乏しい印象を持った。

ASE の宇宙用多接合セル製造への参入でもわかるように、 $\text{InGaP}/\text{GaAs}/\text{G}$

e タンデムセルは、宇宙用への実用化が進むことになると考えられる。また、今後は、3、4 接合化の競い合いが進むものと思われるし、集光技術に関する研究開発が欧米で盛んになっていることが、今回の会議の印象の一つでもあった。

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 への挑戦、オン S i 技術や新規薄膜技術でのブレークスルー、宇宙用、地上への実用化と新たな応用分野開拓、等、III-V 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)

Fraunhofer 太陽エネルギーシステム研究所訪問

1. 日時：2000年4月26日（水）10：00～17：00
2. 対応者：Prof. A. Goetzberger（元所長）、Dr. G. Willeke（Solar Cells 部門長）、Dr. A. Bett（次長）、Dr. S. Gluntz（高効率 Si セルグループ長）、Dr. W. Warta（評価グループ長）、Dr. O.V. Salima（III-V 族セル）、Mr. F. Dimroth（III-V 族セル）、Mr. S. Rein（Si セル）

3. Fraunhofer Inst. の概要

Fraunhofer Institute は、ドイツにおける応用研究の指導的機関で、37 の地区に 50 の研究所がある。人員は、9,000 名以上で、その内 1/3 が研究者・技術者である。昨年の研究予算は 14 億ドイツマルク強で、太陽エネルギーシステム研究所の予算は約 2,700 万ドイツマルクであった。同研究所の人員は約 300 名で、パーマネントスタッフは半分であり、太陽電池部門は約 60 名との事であった。

太陽エネルギーシステム研究所は、Solar Cells 部門の他、Thermal and Optical Systems、Energy Technology、Electrical Energy Systems の研究部門がある。

4. 太陽電池部門の最近の成果

(1) タンデムセルは、宇宙用への適用を目的に研究開発を進めている。①例えば、AlGaInP(2.0eV)/GaAs(1.42eV)//GaInAs/GaSb の 4 接合メカニカル・スタックセルで、AM0 効率 45.8% (34.1+11.7) が理論的に可能である。②MOCVD 装置 (AIXTRON 2600-G3) を使い、4 インチ基板 5 枚の成長を行っている。③Ga_{0.51}In_{0.49}P/GaAs 2 接合セル (1cm²) で効率 24.5% (AM0)、28.0% (AM1.5G)、Ga_{0.51}In_{0.49}P/Ga_{0.95}In_{0.05}As 2 接合セル (4cm²) で AM0 効率 23.3%、Ga_{0.35}In_{0.65}P (1.68eV) /Ga_{0.83}In_{0.17}As (1.18eV) 2 接合セル (1cm²) で AM1.5G 効率 27.0%、AM0 効率 24.1% の状況である。

(2) タンデムセルの集光タイプは、地上用への適用を目的に研究開発を進めている。①例えば、GaInP/GaAs 2 接合セルおよび Ga_{0.35}In_{0.65}P/Ga_{0.83}In_{0.17}As 2 接合セルの AM1.5D の 500 倍 (T=315K) で、各々、効率 37~38%、42% が可能であるとしている。また、Ga_{0.35}In_{0.65}P/Ga_{0.83}In_{0.17}As 2 接合セルの AM0 の 500 倍集光 (T=315k) で効率 37~38% が期待できる。②Ga_{0.35}In_{0.65}P/Ga_{0.83}In_{0.17}As 2 接合セル (0.1326cm²) の AM1.5D の 300 倍集光で効率 31.3%、641cm² モジュールの 12 倍集光で 22% を実現している。③GaAs/GaSb メカニカル・スタックセル (0.13cm²) の AM1.5 の 100 倍集光で効率 31.4% を得ている。

(3) 多結晶 GaSb や InGaAsSb の TPV セルに関する研究開発も行っている

5. 感想

Dr. Bett の III-V セルのグループの R & D は着実に進展している。日米に次いでドイツが超高効率太陽電池の R & D をリードする流れにあり、今後共、情報交換を密にして、切磋琢磨をして行きたい。結晶系 Si の日本の大学、国研における R & D が手薄であり、豪、米、独の R & D をキャッチアップする必要がある。(以上)

Imperial College Blackett Lab. 訪問

1. 日時：2000年4月28日(金) 9:30~15:00

2. 応対者：Dr. K.W.J. Barnham (教授)、Dr. B. Ghosh (客員教授、インド Jadavpur 大教授)、Dr. J.P. Connolly (PD 研究員)、Dr. C. Rohr (PD 研究員)、D.B. Bushnell (博士課程学生)

3. Barnham 教授の研究室の状況

Barnham 教授提案の量子井戸構造等低次元構造の太陽電池は、提案時は、単一接合太陽電池でも変換効率 40% が期待できるとして、大きな注目を浴びた。その後、スペイン、オーストラリアや米国での数値計算の結果、絶対効率で 2~3% の向上のメリットが現実的なものと考えられ、研究開発も下火になった。とは言え、彼のグループは、研究室をあげて、上記研究テーマに取り組んでおり、評価すべきものがある。量子井戸構造等低次元構造の太陽電池において、短絡電流の向上は、明らかに期待できるが、課題は、開放端電圧の改善にある。

最近では、GaAs / InGaAs や GaAsP / InGaAs 等、格子不整合系が検討対象になっており、strain-balance の概念の導入により、GaAsP / InGaAs の量子井戸構造を導入した GaAs 単一接合太陽電池において、ようやく、通常の GaAs 太陽電池の特性（効率 20.2%）に匹敵する変換効率（20.0%）を得ている。現在は、この他、この系の特徴を発揮すべく、集光形や TPV に注力している。集光や TPV は、高光強度下での欠陥準位における再結合の飽和が期待でき、格子不整合系の欠点を緩和できる可能性がある。今後も、彼らの動向を見守る必要がある。

(以上)