4 O 回 IEEE 光起電力専門家会議(40th IEEE Photovoltaic Specialists Conference) 報告

2014.6.18 山口真史(豊田工大)

1. 開催月日: 2014年6月8日~13日。

2. 開催場所: Colorado Convention Center (デンバー、米国)。

3. 本会議の概要:米国電気電子学会(IEEE) 主催の太陽光発電会議で、2008 年から、 毎年開催されることとなった。今回の会議の組織委員長は Richard King(Spectrolab) で、プ ログラム委員長は Angele Reinders (Univ. Twente、オランダ) であった。

今回は、46 カ国から約 1,540 名の参加者があった。開催地が、NREL に近いということも あり、前回より約 200 名の参加者増であり、太陽光発電に対する大きな関心が続いている ことも反映していると思われる。図 1 に、国別参加者数を示す。国別では、①米国 935 名、 ②日本 117 名、③ドイツ 84 名、④オーストラリア 43 名、⑤英国 41 名、⑥インド 35 名、 ⑦カナダ 34 名、⑧フランス 31 名、⑨中国 30 名、⑩台湾 23 名、の順であった。



図1 国別参加者数

図2は、国別発表論文件数を示す。45カ国から、招待講演を含めて1029件の論文発表が あった。国別では、①米国511件、②日本79件、③ドイツ73件、④台湾39件、⑤オーストラ リア36件、⑥インド35件、⑦中国30件、⑧英国28件、⑨フランス27件、⑩オランダ18件、 ⑩カナダ18件、の順であった。

図3は、発表論文件数の分野別内訳を示す。分野別では、①結晶Si173件、②薄膜化合物 系(CIGS、CdTeおよびII-VI族)165件、③基礎および新概念149件、④PVシステム94件、⑤ キャラクタリゼーション91件、⑥III-V族および集光75件⑦信頼性68件、⑦モジュール46 件、⑧薄膜Si系53件、⑨モジュール46件、⑩有機系39件、⑪政策および市場38件、⑫宇宙 用34件、の順であった。

Number of Papers to be prsented at the 40th IEEE-PVSC (Denver, USA, June 8-13, 2014) 1029 Papers



図2 国別発表論文件数(資源総合システム㈱提供)

Number of Papers to be prsented at the 40th IEEE-PVSC (Denver, USA, June 8-13, 2014)



図3 発表論文件数の分野別内訳(資源総合システム㈱提供)

4. Cherry Award受賞者と受賞記念講演

Cherry Award ChairであるJ. Olson (NREL) より、William R. Cherry Awardの経緯(表1)、 これまでの受賞者(表2)の説明がなされた。

表1 William R. Cherry Awardの経緯

This award is named in honor of William R. Cherry, a founder of the photovoltaic community. In the 1950's, he was instrumental in establishing solar cells as the ideal power source for space satellites and for recognizing, advocating, and nurturing the use of photovoltaic systems for terrestrial applications. The William R. Cherry award was instituted in 1980, shortly after his death. The purpose of the award is to recognize engineers and scientists who devote a part of their professional life to the advancement of the technology of photovoltaic energy conversion. The nominee must have made significant contributions to the science and/or technology of PV energy conversion, with dissemination by substantial publications and presentations. Professional society activities, promotional and/or organizational efforts and achievements are not considerations in the election for the award.

表2 これまでのWilliam Cherry Awardの受賞者

Dr. Paul Rappaport 1980 Dr. Joseph L. Loferski 1981 Prof. Martin Wolf 1982	Dr. Lawrence L. Kazmerski 1993 Prof. Yoshihiro Hamakawa 1994 Dr. Allen M. Barnett 1996	Dr. Antonio Luque 2006 Dr. Masafumi Yamaguchi 2008 Dr. Stuart Wenham 2009
Dr. Henry W. Brandhorst 1984	Dr. Adolf Goetzberger 1997	Dr. Richard King 2010
Mr. Eugene L. Ralph 1985	Dr. Richard J. Schwartz 1998	Dr. Jerry Olson 2011
Dr. Charles E. Backus 1987	Dr. Christopher R. Wronski 2000	Dr. Sarah Kurtz 2012
Dr. David E. Carlson 1988	Dr. Richard M. Swanson 2002	Dr. Keith Emery 2013
Dr. Martin A. Green 1990	Dr. Ajeet Rohatgi 2003	
Mr. Peter A. Iles 1991	Dr. Timothy J. Coutts 2005	

今回の受賞者は、Ron Sinton(Sinton Instruments)で、QSSPC (Quasi Steady State PhotoConductivity)法による少数キャリア寿命測定装置、Sun-Voc測定装置など、太陽電池 およびモジュールの特性評価装置の開発と普及による太陽電池特性測定技術の向上等、研究開発および太陽電池生産への貢献が評価されたものである。受賞記念講演では、同氏の これまでの研究開発の歩みが紹介された。スタンフォード大学では、ポイントコンタクセルや集光型セルの研究開発にも貢献した。1992年に、Sinton Consulting (その後、Sinton Instrumentsに名称変更)を設立し、受賞理由にある貢献をしてきた。

3

5. 本会議のトピックス

プレーナリおよび招待講演を中心に、本会議のトピックスを紹介する。

5.1 基礎、新材料・デバイス分野:

Ali Javey (UC Berkeley) は、"A direct thin-film path towards low-cost large-area III-V photovoltaics"と題して、プレーナリ講演を行った。III-V族太陽電池に関しては、GaAs単接合太陽電池で、効率28.8%、4接合太陽電池で、44.7%の高効率が得られているが、エピタキシャル成長基板の高価格、原料の低利用効率、長い成長時間、高成長装置価格などが、集光や宇宙応用を制限している。本講演では、上記課題を克服し、広範な地上応用を実現するために、図4に示すような、金属箔上に高品質III-V薄膜のvapor-liquid-solid (VLS) 成長のアプローチを述べた。Mo箔上に、通常のVapor-solid成長プロセスによって得られる粒径より100~1000倍大きい100 μ m~1mmの大きな粒径を有する1-3 μ m厚のInP薄膜の成長を実現している。



Figure 1 | Growth technique and resulting InP films. (a), Schematic view of the thin-film VLS growth technique for planar and textured InP films. (b), 30° tilt view false-color SEM of planar InP film on Mo foil, showing the InP surface, cross-section, and the Mo foil surface. (c), Tilt view false-color SEM image of contoured InP grown via pre-texturing the Indium film.

図 4 (a) VLSプロセス、(b) Mo箔上のVLS成長InP薄膜の走査型電顕(SEM)像、(c)テクスチャInを用いた場合のVLS成長InP薄膜のSEM像(R. Kapadia et al., Scientific Reports 3, 2275 (2013))

図4は、VLSプロセスを示す。電解研磨Mo箔(約25µm厚)上に、電子ビーム蒸着もしく 電析法で、In薄膜(0.2~2µm厚)、次いで、50nm厚のSiOxキャップを電子ビーム蒸着で形 成する。Mo/In/SiOxスタックが、水素中で熱せられ、成長温度450~800℃へ。Inの融点 (157℃)より高く、SiOxキャップ層は、In融液を平坦状に保つ。温度が安定したところで、 燐蒸気が、PH₃ガスもしくは赤燐固体源によって、装置に導入される。燐蒸気がキャップ層 を通して拡散し、液体Inに溶解する。結果として、InP結晶が析出する。図4(b)は、Mo箔 上のVLS成長InP薄膜の走査型電顕(SEM)像を示す。as-grownのInP膜厚は、大ざっぱに、 もとのIn厚の2倍である。図4(c)は、テクスチャInを用いた場合のVLS成長InP薄膜のSEM 像で、光マネージメントを含め、種々のデバイスへの応用が可能としている。

図5に、VLS成長InP薄膜の(a)移動度、キャリア濃度の成長温度依存性、(b)フォトルミ ネッセンス(PL)スペクトル、(C)時間分解PL特性、(d)少数キャリア寿命の成長温度依存 性、を示す。キャリア濃度(5x10¹⁶~1x10¹⁷cm⁻³、図5(a))、電子移動度が500cm²/V-s(図 5(a))、少数キャリア寿命も2.5ns(図5(d)と長い。TCO/Ti02/1~3µm厚のp-InP/Mo 膜/ガラス基板、の構造をターゲットとしているが、InP基板上のITO/Ti02/p-InPセルが作 製され、効率19.2%(Voc=785mV、Jsc=30.5mA/cm²、FF=80.1%)を得ている。1-sun照射 下での特性に関して、単結晶のリファレンスセルの開放端電圧よりわずか40mVだけ低い 930mVの開放端電圧が可能で、効率24.1%(Voc=930mV、Jsc=32mA/cm²、FF=81%)の実現 が期待できるとしている。大ざっぱなコスト分析もなされ、効率12%、15%、20%、25% で、各々、\$1.02/W、\$0.78/W、\$0.59/W、\$0.47/Wと予測している。また、VLS法で、低コ スト基板上への3接合セルの作製も可能としている。本研究は、高効率、低コストのIII-V 太陽電池の新しい道程を適用するものだとまとめた。



Figure 4 | Optoelectronic characterization. (a), Mobility and carrier concentrations as a function of growth temperature obtained from Hall measurements carried out on peeled off InP films. (b), Steady state photoluminescence characterization of a TF-VLS InP film grown at 750°C (red line) and a similarly doped single-crystal wafer as a reference (black line). (c), Representative TRPL curve for a TF-VLS InP sample grown at 750°C. The dashed line represents 1/e of the initial peak intensity. (d), Average time-resolved photoluminescence lifetimes as a function of InP growth temperature. All measurements were performed at room temperature.

図 5 (a)移動度、キャリア濃度の成長温度依存性、(b)フォトルミネッセンス (PL) スペ クトル、(C)時間分解PL特性、(d)少数キャリア寿命の成長温度依存性 (R. Kapadia et al., Scientific Reports 3, 2275 (2013))

5.2 CIGS、CdTe、Ⅱ—VI化合物薄膜セル分野:

CdTeやCIGS系の化合物薄膜セルは、アモルファスSiおよび微結晶Si薄膜セルと共に、低コストの薄膜太陽電池として期待されている。これらの材料は、真空蒸着やスパッタ法などで、わりと簡単に作製でき、多結晶薄膜でありながら、多結晶粒界が少数キャリアのキラーにはなっていなかったり、 不活性化されていたりして、結晶粒径1µmでも高効率が期待できる。

(1) A.N. Tiwari (EMPA) は、"Thin film chalcogenide PV: Progress in research breakthroughs and industrial developments"と題して、CIGS 系と CdTe 系の薄膜 PV に関する Plenary 講演を 行った。CIGS 系のこれまでの最高効率 20.4% (0.5203cm²、Jsc=3508mA/cm²、Voc=0.7363V、 FF=0.789) を報告した。450℃以下の低温プロセスで、フレキシブルポリイミド基板上に成 膜されている。構造は、スパッタ蒸着 ZnO 表面コンタクト層/chemical bath deposition によ る n型 CdS バッファ層/低温共蒸着 p型 CIGS 吸収層/スパッタ蒸着 Mo 裏面コンタクト層 /ポリイミド基板、から成る。Ga グレーデフィングや NaF の post deposition 処理 (PDT) が検討された。NaF-PDT CIGS に KF が導入され、Na と K のイオン交換がなされている。 XPS 測定により、CIGS 表面 (<30nm) には、Cu と Ga が欠乏した層が形成されている事が わかる。これにより、CIGS 表面層は、Cd 拡散が促進され、Cd_{Cu}欠陥の形成、CIGS 表面層 に反転層形成、すなわち、埋め込み n-p 接合形成、が今回の効率向上の鍵と考えている。 図 6 には、CIGS 技術の可能性:ポリ Si 太陽電池との効率向上の進展の比較を示す。タン デム化や集光技術の導入により、効率 25%の可能性があるとしている。図 7 に示すように、 フレキシブルサブモジュールも作製されている。



図6 CIGS 技術の可能性:ポリ Si 太陽電 池との効率向上の進展の比較(Dr. A.N. Tiwari 提供。非公開希望により、28th EU-PVSEC 会議ハイライトより)



図 7 フレキシブル CIGS サブモジュール (Dr. A.N. Tiwari 提供。非公開希望により、 ホームページより)

小面積セルの効率は、ソーラーフロンティアの CIGS セルで 20.9%、CdTe セルで 20.4% であり、最高モジュール効率は、CIGS で 15.7%、CdTe で 17.0%である。表3に、CIGS の高効率セルの効率を示す。ベストの特性を組み合わせると、効率 23.9%が可能で、将来 的には、効率 25%が期待できるとしている。表4は、First Solar による CdTe セルの高効 率化の見通しを示す。低コスト化については、First Solar が、CdTe 太陽電池モジュール で、2013年の平均モジュールコスト\$0.63/W、ベスト\$0.53/Wを実証しており、モジュール コストく\$0.5/W、システムコスト〈\$1/W が見えている。CdTe 太陽電池モジュールの平均効 率は 13.5%で、ベストは、14.2%である。First Solar の年産規模は、2.2GW で、これま で、8GW 以上、設置されているとのことである。CIGS 系では、ソーラーフロンティアの年 産規模は 1GW である。今後は、効率向上、高信頼性と同時に、モジュールコストの低減が 必要である。モジュールコスト \$ 0.38/W 以下に向けた薄膜系のコストダウンのためには、 高スループットなどプロセス改良、ガラス、封止などの改善が必要である。また、コスト 低減には、生産量拡張が有効である。投資と同時に市場拡大が必要であり、BIPV や軽量・ フレキシブルモジュール用適用領域の発掘が望まれる。今後の高効率化のためには、層堆 積、粒界、アルカリ金属(Na、F)効果や重金属(Fe、Ni、Cr)などバルク特性向上、Ga 濃度分布など接合特性、界面欠陥やパッシベーションなど界面特性、ストレス効果、バッ ファ層や透明導電(TCO)膜の光損失低減、TCOの導電率向上、ワイドギャップ材料での 高効率化、などが重要であるとしている。長期的には、多接合化による高効率化(>30%)、 太陽電池の損失メカニズムや大面積モジュールの非一様性の理解等、基礎的理解が重要で あると考えられる

	NREL	ZSW	EMPA	Showa Shell	Potential		
Voc (mV)	691.8	720.4	736.3	686	736.3		
Jsc (mA/cm2)	35.74	36.33	35.08	39.9	39.9		
FF (%)	81.03	76.78	78.9	76.4	81.2		
η (%)	20.0	20.3	20.4	20.92	23.9		

表3 CIGS 太陽電池効率の状況と高効率化の可能性

表4 CdTe太陽電池の効率の現状と高効率化の見通し

	現状	中期見通し	長期見通し
Voc (mV)	872	916	950
Jsc (mA/cm2)	29.5	30.5	31.5
FF (%)	79.5	81.8	83.0
η (%)	20.4	22.8	24.8

閉会式の会議ハイライトで、Solibroから、CIGS セルで、効率 21%が達成されたとの紹介もあった。

CZTSSe(Cu₂ZnSn(S,Se)₄)セルについては、IBMの Hydrazine Solution 法による効率 12.6% の現状である。昭和シェル石油は、溶液法ベースの同上セルで、効率 12.3%の現状である。

(2) H. Sugimoto (昭和シェル石油、ソーラーフロンティア)は、"High efficiency and large volume of CIS-based modules"と題して、招待講演を行った。M. Nakamuraら (昭和シェル石油、ソーラーフロンティア)は、"Recent R&D progress in Solar Frontier's small-sized Cu(InGa)(SeS)₂ solar cells"と題して、高効率化の進展を報告した。今回、バッファ層の最適化、シャントの低減、一様性改善、セル構造の最適化、光学損失の低減、吸収層改良により、図8に示すように、面積0.52cm²のCIGS太陽電池で、、効率20.92% (Voc=686mV、Jsc=39.9mA/cm²、FF=76.4%)の世界最高効率を達成している。今回は、図10に示すように、光損失の解析結果に基づき、ZnO:BのTCO層のドーピング濃度の最適化により高移動度でシート抵抗率を維持しつつ、TCO層の透過率を向上をはかり、Znベースバッファ層の改善により短波長側量子効率の改善もはかられている。また、吸収層のバンドギャップEgの深さ分

布の検討もなされ、低Eg域の拡大により吸収損失の改善がなされ、長波長域の量子効率の改善が図られている。



Fig. 1. Schematic image of our device structure.

図8 CIGS太陽電池の構造

(M. Nakamura et al, Proc. 40th IEEE PVSC (to be published))



Fig. 3. Summary of optical loss calculations



Fig. 2 (a) *J-V* and (b) EQE characteristic comparison between our previous record cell (0.50 cm²) and the new champion cell (0.52 cm²). The measurements were independently conducted under the standard test condition by third parties (AIST and Fraunhofer ISE for 19.7% and 20.9% cells, respectively). The absolute values of the EQE curves were adjusted so that the integral of EQE become the same value as $J_{\rm sc}$ of the *J-V* measurement.

図9 高効率CIGS太陽電池の特性

(M. Nakamura et al, Proc. 40th IEEE PVSC (to be published))

30cmx30cmのミニモジュールでは、2010年の効率15.7%から2011年の17.2%、2012年の17.8%と、 改善がはかられている。これらの研究開発成果が、2011年の150Wモジュール(90cmx120cm、モジュ ール効率12.2%)、2013年の160Wモジュール(モジュール効率13.0%)製造につながっている。2014 年、170Wモジュール(モジュール効率13.9%)、2015年、180Wモジュール(モジュール効率14.7%) の製造を予定している

(3) D.B. Mitzi ら (IBM) は、"Current status and future of earth abundant kesterite photovoltaics"と題 して、CZTSSe (Cu₂ZnSn(S, Se)₄)系太陽電池について、招待講演を行った。CdTe や Cu(In, Ga)Se₂ (CIGS) は、高効率で低コストの薄膜太陽電池として期待され、年産1~2.5GWの生産レベルにある。しかし、 CdTe や CIGS は、高価で資源量に制約がある Te、In や Ga で構成されている。例えば、効率 13%の CIGS セルで TW 生産を行うには、4 万トンの In が必要で、2010 年の In 生産量が 600 トンで、ディス

図10 CIGSセルの光損失解析のまとめ(M. Nakamura et al, Proc. 40th IEEE PVSC (to be published))

プレイ市場での In の需要を考慮すると、年産 10GW 以下の CIGS 生産と危惧される。Cd は、重金属で、 将来、限られた市場のみに制限される危惧がある。CdTe や CIGS に代わる高効率が期待でき、豊富な カルコゲナイド薄膜太陽電池材料として、Cu₂S、FeS₂ (pyrite)、SnS や Cu₂ZnSn(S,Se)₄ (CZTSSe)な どがある。本研究は、CZTSSe に着目したもので、効率 10%以上の CZTSSe 太陽電池実現に向けた取り 組みを述べた。材料的には、1988 年の伊東、中沢(信州大)が早く、太陽電池としては、1996 年の 片桐ら(長岡工業高専)が先駆けである。IBM でも、共蒸着 CZTS 太陽電池から研究開発をスタート し、その後、ナノ粒子とヒドラジン溶液のハイブリッド堆積法を開発し、バンドギャップ Eg 制御の ため、Se 導入を検討し、構成材料組成の最適化により、効率 12.6%を得ている。CdS/CIGS セルとの 特性の違いから、課題は、FF と Voc であり、要因として、直列抵抗や界面障壁や CZTSSe 中の欠陥な どが考えられる。少数キャリア寿命測定では、CZTSSe の 3.1ns に対して、CZTSSe では 10ns である。 CIGS では、 V_{Cu} (0.03eV)の浅いアクセプター欠陥が効果的効いていたが、CZTSSe では、 V_{Cu} よりも、 Cu_{2n} (0.12eV)の深いアクセプター欠陥が効いているようである。

(4) H. Hiroi ら(昭和シェル石油、ソーラーフロンティア)は、"Over 12% efficiency Cu₂ZnSn(SeS)₄ solar cell via hybrid buffer layer"と題して、CZTSeS に関する最近の状況を報告した。前回、スパッタリング堆積法を用い、CdS バッファ層や In₂S₃/CdS ハイブリッドバッファ層および吸収層の改良、TCO(ZnO:B)/In₂S₃/CdS/CZTS(あるいは CZTSSe)Mo/glass 構造の 14cm²のサブモジュールで、各々、効率 9.19%、10.8%を得ていた。

今回、ハイブリッドバッファ層の最適化に より、溶液プロセス CZTSeS 吸収層を用い、 図11に示すように、0.45cm²の小面積セ ルで、効率 12.3%を得た。図12に示す ように、ソーダライム基板上に、DC マグ ネトロンスパッタ Mo 裏面電極、溶液プロ セスによる CZTSeS 吸収層、Chemical Bath Deposition (CBD)による CdS バッファ層、 もしくは、CBD による In_2S_3/CdS のハイブ リッドバッファ層、スパッタリングによる i-Zn0層、 In_2O_3 :Sn(ITO)窓層の順に、堆積 されている。また、PL 解析もなされ、Voc

等太陽電池特性向上の指針としている。

0	&evvpc	Calibration	Cert. # 2893	.01	Technology	and Applic	PV Cert.	Lab # 1002
EO	cency	[%]	1	2.29) ±	-	0.	26
The above DUT Corporation, Qr 95% level of cor- other measurems The performance	has been tested us aoted uncertainties afidence. Measure ents and uncertaint e parameters report	ing the following a are expanded using ment of total ieradia ies are traceable to ed in this certificat	ethods to meet a coverage fac mee is traceable either NIST or e nephronty at	the ISO 170 tor of k = 2 to the Wo The time of 1	25 Standard by and expressed of Chloometric the International he test, and imp	the PV man hth an upper Reference () I System of) by no past of	nt Nev oximat WRR) Units (r future	aport ely orid all Si).
The above DUT Corporation, Q 95% level of cor other measurems The performance performance lev Post-soak (10 Efficency [%]	has been tested us soled uncertainties indexee. Measure ents and uncertaint e parameters report el. inutes of 1 Sun at 12.29 = 0.20	ing the following a are expanded using ment of total irradu ies are traceable to- red in this certificat (Vacua) 5 V ce [V]	nethods to meet g a coverage faic ince is traccable cither NIST or e applaced y at 1 0.4712 ±	the ISO 17 tor of $k = 2$ to the Wo DISC and he time of 1 0.0047	225 Standard by and expressed Matchildmetric the Internationa he test, and imp	the PV tan htt an upper Reference (1 I System of 1 sly no past or 0.01515	nt New oximat WRR) Units (r future	aport ely and all S1). c
The above DUT Corporation, Q 95% level of con- other necessaries performance lev Post-soak (10 m Sfficency [%]	has been tested us soled uncertainties fideore. Measure ents and uncertaint e parameters report el. inutes of 1 Sun at 12.29 # 0.20 5.02 ± 0.11	ing the following a are expanded using ment of total irradu ies are traceable to- ed in this certificat Vue 1) 5 V. ce [V] V_max [V]	ethods to meet a coverage fac mee is traccable cither NIST or e applacety at 0.4712 ± 0.3699 ±	the ISO 17/ for of k = 2 to the We best and he time of 1 0.0047 0.0037	1. sc [A] 1. max [A]	the PV and with an approx Reference () I System of) system of) syn past of 0.01515 0.01358	nt Nev oximat WRR) Units (r future #	aport ely and all S1). 0.00023 0.00025

図11 Newport により認定されたハイ ブリッドバッファ CZTSeS セルの I-V 特性 (H. Hiroi et al, Proc. 40th IEEE PVSC (to

be published))



Fig. 2. Comparison of fabrication process and device structure. 図12 作製プロセスとデバイス構造の 比較(H. Hiroi et al, Proc. 40th IEEE PVSC (to be published))



Fig. 5. Correlation between V_{oc} and E_g on our CZTSeS cells with: CdS and with hybrid buffer layers.

図13 CdS バッファとハイブリッドバ ッファ層による CZTSeS 太陽電池の Voc と エネルギーギャップ Eg との相関の比較 (H. Hiroi et al, Proc. 40th IEEE PVSC (to be published))

図13は、CdSバッファとハイブリッドバッファ層によるCZTSeS太陽電池の開放端電圧 VocとエネルギーギャップEgとの相関の比較を示す。ハイブリッドバッファ層の適用により、 Vocの改善がはかられている。Vocの改善は、バッファ層と吸収層の界面の改善によると考 えられる。吸収層とバッファ層の内部拡散によると考えられる高直列抵抗(Rs)による曲 線因子の劣化が課題であったが、ハイブリッドバッファ層の作製プロセスの最適化により、 Rsの改善がはかられ、効率12.3%の実現につながった。

5.3 III—V族化合物セルおよび集光型太陽電池分野:

最近、多くの企業が、III-Vベースの集光太陽光発電(CPV)システムの商用化を開始している。その主な理由として、次の点があげられる。

①III-V族セルを用いた集光型太陽電池は40%以上の高効率化を実現しており、近い将来、40%以上の高効率モジュールの実現が可能で、非常に効率の良いCPVシステムを提供できる。
 ②PV応用がサイズの上でも成長しており、より大規模なシステムの実現が要望され、CPVシステムが適している。③コスト的にも有効な代替PV技術への関心をもたらしていること。

(1) S. Burroughs (Semprius) は、"Engineering a path forward for low cost concentrator photovoltaic systems" と題して、プレーナリ講演を行った。既に、数社が、1 MW 以上の CPV システム設置に貢献 している。累積 200~300MW の CPV システムが設置されており、図14に示すように、CPV モジュー ル価格も、\$3.5/W から低下傾向にあり、現状では、CPV モジュール価格は、薄膜系や結晶 Si 系と同 等との事である。特に、2500kWh/m²/yr 以上の日射条件の良い地域では、他の PV 技術よりも電力コ スト低減が可能で、8.5 セント/kWh 以下が期待できる。エネルギーペイバックタイムについても、他 の PV 技術に比べて有利であり、1 年以下の実現が可能である。図15に、III-V 族多接合、集光型 太陽電池の高効率化の可能性を示す。5 接合セルの集光動作で、理論効率 70%で、効率 50%の実現

が可能である。研究段階の集光型セルの効率は、44.7%に達し、モジュール効率 32~35%、システ ム効率 26~28%の現状であり、他の太陽電池よりも格段に性能が良い。各機関の高効率化の動向が まとめられたが、後述の発表に譲る。

集光セルの温度係数は、-0.14%/℃と良好で、加速寿命試験で、10⁶時間が保証されている。集光モ ジュールのフィールド実証試験でも、7年間劣化がないとの事である。光学系など、要素技術が言及 された。今回、図16に示すように、集光セルの熱解析結果が報告され、熱放散の観点で、小面積セ ルの有効性が指摘された。環境温度 40℃で、1000 倍集光の場合、1cm セルでは、セル温度が 122℃と なり、セル温度を100℃以下にするには、ヒートシンクが必要である。一方、600µmセルでは、セル 温度は 83℃で、ヒートシンクは必要ない。小面積セルを用いた、集光モジュール(0.266 m²)も試 作され FhG-ISE の屋内評価(25℃)で、効率 35.5%が得られている。



Challenges for CPV - Cost

CPVモジュール価格の低下傾向(Dr.S.Burroughs提供) 図14 Increasing Efficiency by Adding More Junctions



Progress in Photovoltaics: Research and Applications. 2008 ;16:225–233 ² Atwater et al., "Full Spectrum Ultrahigh Efficiency Photovoltaics", IEEE PVSC (2013).

図15 III-V族多接合、集光型太陽電池の高効率化の可能性(Dr.S. Burroughs提供)

Small Cells Enable Distributed Heat Dissipation



図17 集光セルおよびモジュールの効率のロードマップ(Dr.S. Burroughs提供)

図17に、集光セルおよびモジュールの効率のロードマップを示す。現状の実用セル効率41.5%、 モジュール効率33.0%から、2018年頃には、セル効率49.5%、モジュール効率41.8%の実現を期待 している。今後は、技術開発によるさらなる高効率化、スケールアップや高倍集光などによるコスト 低減により、Si PV 並みのモジュールおよびシステムコストの実現を目指す必要がある。電力コスト 5 セント/kWh 以下の実現も可能であるとまとめた。

(2) T. Takamoto ら (シャープ)

は、"Application of InGaP/GaAs/InGaAs triple junction solar cells for space to space use and concentrator photovoltaics"と題して、招待講演 を行った。18に示すように、逆エピ構造格子 不整合系3接合太陽電池の宇宙および集光太 陽光発電応用に向けた取り組みが紹介された。 シャープは、図19に示すように、先に、 InGaP/GaAs/InGaAs3接合太陽電池で37.9% と、3接合セルの非集光動作下での世界最高効 率を達成しているが、今回、電極設計等、直列 抵抗および光損失の低減をはかって、集光下で も世界最高効率を達成したものである。





(Dr. T. Takamoto 提供)

シャープが開発した InGaP/GaAs/InGaAs 3 接合太陽電池の集光特性が、FhG-ISE で測定され、図 2 0 に示すように、250~300 倍集光下で 44.4%の世界最高効率が実現している。

宇宙用セルに関しては、放射線耐性設計がなされ、3 接合の4cm²セル、27.9cm²セルで、各々、AMO 効率 31.5%、30.6%を実現している。熱サイクル試験、高温高湿度試験、逆バイアス試験などがな され、劣化が認められていない。また、K。Shimazakiら(JAXA)の報告でも、2013年9月14日に打 ち上げられた衛星"HISAKI"にも、シャープ開発3 接合セルが搭載され、251 II 経過後も、顕著な劣 化は認められないとの事である。



図19 3 接合セルの非集光下での世界最高 効率 InGaP/GaAs/InGaAs 3 接合太陽電池の I-V 特性 (Dr. T. Takamoto 提供) 図20 InGaP/GaAs/InGaAs3接合セルの集光 特性(Dr. T. Takamoto提供)

(3) F. Dimrothら (FhG-ISE) は、 "Development of high efficiency wafer bonded 4-junction solar cells for concentrator photovoltaic applications" と題して、講演を行った。多接合太陽電池の集光動作により、50%以上の高効率化期待できる。スペクトルスプリッティングやメカニカルスタックは、システム構成上、コスト高になろうとの見解が述べられた。モノリ

シックタンデムが妥当で、格子整合系GaInP/GaInAs/Ge3接合セルが、以前の主流であった が、集光動作でも、効率41.6%程度であった。さらなる高効率化のためには、格子不整合 系やIII-V-N化合物の適用が必要である。格子不整合系は、転位発生が課題であるが、シャ ープは、逆エピ構造InGaP/GaAs/InGaAs3接合セルで、非集光効率37.9%、250~300倍集光 で効率44.4%を達成している。Emcoreは、逆エピ構造InGaP(Eg=1.9eV)/InGaAs(1.4eV) /InGaAs(1.0eV)/InGaAs(0.7eV)4接合セルで、AMO効率34,2%を実現している。III-V-N 系においては、Solar Junctionは、InGaP/GaAs/InGaAsNSb3接合セルの集光動作で効率 44.1%を実現している。

サブセル材料の組み合わせの柔軟性からは、貼り合わせ技術の適用や、オンSi技術の適 用が有効である。Spectrolabは、GaAs基板上のAlInGaP/InGaP/GaAs3接合セルのエピタキ シャル・リフトオフ(ELO)したものとInP基板上のInGaAsP/InGaAs2接合セルの直接ボン ディングによる5接合セルで、AM1.5G効率37.8%、AMO効率35.1%を達成している。

本講演で、FhG-ISE、Soitec、HZB、CEA-Letiの共同開発により、4 接合セルの297倍集光 で、44.7%の世界最高効率を達成した事を発表した。今回、図21に示すように、GaAs基 板上のInGaP/GaAs2接合セル(FhG-ISE製)とInP基板上のInGaAsP/InGaAs2接合セル(HZB 製)とをウエハボンディングで貼り合わせるメカニカルスタック法(Soitec)により、モノ リシック(2端子)4接合セルを実現したものである。格子整合型で、古くから、理想的 構造と言われていたが、2枚の化合物基板を使用することで、高価であることから、本格 的検討はなされてはいなかった。昨今の高効率化の競争の中で陽の目を見たような気がす る。図22は。世界最高効率4接合セル、4接合セルの外部量子効率の波長特性、297 倍集光下での動作特性、を示す。現状の生産段階のセルのAM1.5D集光効率38~40%、AM0 効率29~31%を、中長期的には、AM1.5D集光効率45~50%、AM0効率33~38%としたいと結 んだ。



Wafer-Bonded Four-Junction Solar Cell

図 2 1 4 接合セルの作製プロセス(Dr. F. Dimroth提供)

Wafer-Bonded Four-Junction Solar Cell



図22 世界最高効率4接合セル、外部量子効率の波長特性、297倍集光下での動作特性 (Dr. F. Dimroth提供)

(4) M. Yamaguchi (豊田工大) は、"Potential and present status of III-V/Si tandem solar cells" と題して、III-VオンSiタンデムセルについて、招待講演を行った。本会議では、エリア 1,3,4,7のジョイントセッションが企画され、従来のIII-Vや宇宙の専門家ばかりでなく、 Siの専門家の参入もあり、ブームとなりつつある。III-V/Siタンデムは、III-VとSiの融合 による高効率化、軽量化、低コスト化、放射線耐性が期待できる。講演では、III-V/Siの ヘテロエピ成長の課題のうち、最大の課題は、転位密度低減にあること、転位密度低減の ための熱サイクルアニール、歪超格子挿入、選択成長、厚膜成長、低温成長のアプローチ が紹介された。転位密度の少数キャリア寿命や太陽電池特性への影響に関する考察から、 高効率化のためには、現状の10⁶cm⁻²台から10⁵cm⁻²以下に、転位密度低減が必要である。 GaAs-on-Si単接合セルでは、NTTのヘテロエピ成長、熱サイクルアニール、歪超格子挿入に よるAM1.5G効率20.0%、AMO効率18.2%、FhG-ISEは、ウエハボンディングによる GaInP/GaAs/Si3 接合セルのAM1.5Dの48.3倍集光で、効率27.9%を達成している。また、NTT、 NASDA(現JAXA)によるGaAs-on-Si単接合セルの宇宙実証試験結果も紹介された。1994に打 ち上げられた技術試験衛星(ETS-VI)に、平均AMO効率16.86%の2cmx2cmの50µm、100µm 厚のカバーガラス付きGaAs-on-Si単接合セル48枚が搭載され、宇宙実証試験がなされた。 GaAs-on-Si単接合セルは、GaAs-on-GaAsセルや50µm、100µm厚の薄型Si宇宙セルよりも、 放射線耐性に優れていることが実証された。III-VオンSiタンデムセルは、2、3接合セル で、非集光でも、各々、35%、40%以上の高効率化が期待できる。今後は、転位密度や残 留応力低減による高効率化、作製プロセスや信頼性の向上、宇宙応用に加えて、ソーラー ステーション、自動車応用や農業利用など、広範な展開が期待できると、まとめた。

5.4 結晶Si太陽電池分野:

(1) R. Swanson (Sunpower) は、"Status and future of crystalline silicon PV"と題して、プレ ーナリ講演を行った。薄膜PVが、結晶Si PVにとって代わると予想されていたが、結晶Siの 時代は続く。図23は、結晶Si太陽電池のモジュール価格と累積生産量に関する学習曲線 を示す。2015年に、モジュール価格\$1.12/Wになると予想されていたが、2012年時点で、モ ジュール価格\$0.85/Wである。モジュールコストは、2010年末の\$1.10/Wから2012年末では、 \$0.5/Wと低減されている。コスト低減の内訳は、ポリSi価格45%(\$0.27/W)、他の消耗 品19%(\$0.11/W)、技術開発10%(\$0.06/W)、スケールアップ11%(\$0.06/W)、その他 16%(\$0.09/W)、となっている。図24は、2008年に対する2012年の多結晶Siモジュール の製造コスト配分の変化を示す。2012/2008のコスト比率は、Siが11.70%と最も低く、 wafering28.80%、casting32.60%、モジュール61.60%、セルプロセス75.20%、となって おり、セルプロセスおよびモジュールのコスト低減が必要である。セルプロセスについて は、表面Agの2012/2008のコスト比率が105.80%と最も高く、コスト低減が必要である。モ ジュールについては、A1フレームが89.24%と最も高く、コスト低減が必要である。



図 2 3 結晶Si太陽電池のモジュール価 格と累積生産量に関する学習曲線(Dr. R. Swanson提供)

図25は、市販モジュールおよび Sunpower製モジュールの効率の推移を示 す。今後も、モジュール効率の向上の方向 にあり、さらなるセル効率の向上が必要で ある。結晶Si太陽電池の最近の高効率化の 状況も紹介された。最近、パナソニック/ 三洋は効率25.6%を達成し、15年ぶりに、 世界最高効率を書き換えた。シャープも効 率25.1%を実現し、次いでいる。詳細は、 下記の発表の項を参照されたい。



図 2 4 多結晶Siモジュールの製造コス ト配分の変化(2012/2008)(Dr. R. Swanson 提供)

Efficiency versus year



Swanson提供)

Sunpowerも、図26に示すように、面積121cm²セルのバックコンタクトセルで、効率 25.0%(Voc=730.3mV、Jsc=41.22mA/cm²、FF=82.96%およびVoc=725.6mV、Jsc=41.53mA/cm²、 FF=82.84%)を実現し、次いでいる。信頼性も重要で、図27に示すように、50年モジュ ールを目指したSunpowerの取り組みも紹介された。信頼性の面で、ダブルグラスの有効性 が指摘された。





図26 Sunpowerの効率25.0%のバックコンタクトセルの構造と特性 (Dr. R. Swanson提供)

Improved designs, better reliability



図 2 7 モジュールの信頼性向上(Dr. R. Swanson提供)

結晶Si太陽電池およびモジュールの今後の方向性が、ITRPV(International Technology Roadmap for Photovoltaic)ロードマップに基づいて、議論がなされた。2013年から2024年にわたるセ ル効率向上(22%→26%)、カーフロス低減(137~150 μ m→100~120 μ m)、ウエハ厚低減(160~200 μ m→25~130 μ m)、ダブルグラスモジュール(2%→60%)とフレームレスモジュール(1%→20%) の比率、システム価格(\$1.4/W→\$0.824/W)と電力コスト(1000kWh/kWpで、11.1セント/kWh→6.5 セント/kWh)、などが紹介された。表5は、ITRPV予想と異なるコストシナリオとの比較を示 す。2020年までに、モジュールコスト\$0.46/Wが実現すると予測されている。なお、ロード マップITRPVの2014年版は、www.itrpv.netで入手できる。GTM RESEARCHの"PV TECHNOLOGY AND COST OUTLOOK, 2013-2017"によれば、2017年までに、モジュールコストは、\$0.36/Wに下がると見ており、 技術向上60%、他の消耗品22%、スケールアップ17%、ポリSi 1%と、技術向上の効果は大きいとみ ている。

最後に、結晶Si太陽電池およびモジュールに関して、図28に示すように、今後推進すべき要素技術を示して、まとめた。

	06/ 2012	12/ 2012	12/ 2013	12/ 2014	12/ 2015	12/ 2016	12/ 2017	12/ 2018	12/ 2020	12/ 2021	12/ 2023	12/ 2024
Cum. volume shipped (GW)	92	110	150	200	260	320	380	440	560	630	770	850
Avg. Wp increase 4th edition (period to period)	-	2%	4%	-	4%	-	6%	-	7%	-	7%	-
Cost reduction 4th edition (period to period)	-	1%	5%	-	3%	-	10%	-	10%	-	10%	-
Cost trend 4th edition (Scenario 3) (\$/Wp)	0.83	0.80	0.73	-	0.67	-	0.55	-	0.46	-	0.38	-
Avg. Wp increase (period to period)	-	-	3%	3%	-	3%	-	4%	-	5%	-	5%
Cost reduction (period to period)	-	-	6%	6%	-	8%	-	10%	-	10%	-	10%
ITRPV cost trend	0.83	0.73	0.64	0.58	-	0.52	-	0.45	-	0.38	-	0.33

表5 ITRPV予想と異なるコストシナリオとの比較(ITRPVロードマップ)

Table 3: Comparison of different cost scenarios based on the actual ITRPV predictions.

Opportunities and Issues Going Forward

- Ingot
 - Continuous CZ, larger ingots, FBR, mono-like
- Kerf-less wafering
 - Spalling, epi, laser damage, implant damage
 - Thinner wafers
- Diamond wire sawing, thin wafer handling
- New cell structures
 - N-type, IBC, HIT, PERC-like, top-cell, thin wafer concepts, copper metalization
- Passivation
 - Al₂O₃, selective contacts
- New module concepts
- Glass-glass, frameless, integrated backplane, bifacial, microinverters
- Improved reliability
- Improved failure prediction, Cell cracking, PID, interconnects, encapsulants→50 year module
- Reduced CapEx and improved ROIC

図28 今後の推進すべき要素技術 (Dr. R. Swanson提供)

(2) K. Masukoら(パナソニック)は、"Achievement of more than 25% conversion efficiency with crystalline silicon heterojunction solar cell"と題して、世界最高効率25.6%のLate News 発表を行った。これまで、UNSWのPERLセル(面積4cm²)の効率25.0%(Voc=706mV、

Jsc=42.7mA/cm²、FF=82.83%)が世界最高だったが、15年振りに記録を塗り替え、注目を 浴びた。先に、98µm厚の101.8cm²のヘテロ接合(HIT)セルで効率24.7%(Voc=750mV、 Jsc=39.5mA/cm²、FF=83.2%)を達成している。パッシベーション効果と薄型化等により、 高い開放端電圧Voc=750mVが達成している。24.7%セルの損失分析がなされ、表面電極に よるシャードー損、表面a-SiやTCOの吸収損による光損失が約60%、再結合損失約23%、 抵抗損失約17%となっている。今回、図29に示すように、バックコンタクト構造の適用 をはかり、表面のシャードー損や光吸収損の低減をはかった。a-Si層のパターニング、成 長条件の最適化、エレクトロブレーティングによる約40µ厚の裏面金属電極形成、を検討 した。図30に示すように、表面a-SiとTCOの吸収損低減による短波長域の量子効率の改 善、表面電極のシャードー損の消去により広い波長域での約3%の量子効率の改善がはか られ、77%の光損失の低減がはかられ、Jsc向上につながった。



Figure 1: Structure of crystalline silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contact

図29 ヘテロ接合バックコンタクトセルの構造 (K. Masuko et al, Proc. 40th IEEE PVSC (to be published))



Figure 2: I-V characteristics of 25.6% efficiency solar cell at research level (certified by AIST)

図31 世界最高効率25.6%のヘテロ接 合バックコンタクトセルのI-V特性 (K. Masuko et al, Proc. 40th IEEE PVSC (to be published))



Figure 3: EQE spectra of solar cells with efficiency of 24.7% (dashed line) and 25.6% (solid line)

図30 24.7%セルと今回の25.6%の外 部量子効率の比較(K. Masuko et al, Proc. 40th IEEE PVSC (to be published))

表6 24.7%セルと今回の25.6%の特性 の比較(K. Masuko et al, Proc. 40th IEEE PVSC (to be published))

Table 1: Progress in cell parameters

Year	2013	2014	Improvement
Area [cm ²]	101.8	143.7	
Thickness [µm]	98	150	
Voc [V]	0.750	0.740	-1.3%
Jsc [mA/cm ²]	39.5	41.8	+5.8%
F.F. [%]	83.2	82.7	-0.6%
E _{ff} [%]	24.7	25.6	+3.6%

図31に、世界最高効率25.6%のヘテロ接合バックコンタクトセルのI-V特性を示す。150 μm厚の143.7cm²のヘテロ接合バックコンタクトSi(CZ成長n-Si)セルで、効率25.6% (Voc=740mV、Jsc=41.8mA/cm²、FF=82.7%)の世界最高効率が達成された。表6には、24.6% セルと今回の25.6%の特性の比較を示す。24.7%セルに比べて、Vocが1.3%、FFが0.6%下 がったがが、Jscは5.8%改善され、効率3.6%の向上につながった。効率26%以上の達成が 可能と結んだ。

(3) J. Nakamuraら(シャープ)は、"Development of heterojunction back contact Si solar cells"と題して、世界第二位の効率25.1%に関する成果を発表した。ヘテロバックコンタクト(HBC)セルは、25%以上の高効率化を達成できる構造と期待される。バックコンタクト(BC)構造により、表面電極のシャードー損失の削減による高Jscが、ヘテロ接合により、良好な表面パッシベーションによる高Vocが可能である。シャープでは、2003年から、BCセルの研究開発を開始し、2011年から、生産を開始している。図32は、HBCセルの構造を示す。CZ成長n-Si(100)基板を用いた。片面は、アルカリ処理によるテクスチャ形成、表面クリーニングの後、PE-CVDを用いたa-Si層堆積がなされる。a-Si/c-Si界面特性、a-Si層のパターニングに関して、検討がなされた。I-V特性測定には、図33に示す、SMT (Surface-Mount Technology)が用いられた。図34は、HBCセルのI-V特性を示す。表6には、HBC構造セルの特性を示す。効率25.1%(Voc=736mV、Jsc=41.7mA/cm²、FF=81.9%、Voc=729mV、Jsc=42.0mA/cm²、FF=82.0%)が得られている。さらなる高効率化は、可能と結んだ。



Fig. 1. Structure of HBC cell. 図32 HBCセルの構造(J. Nakamura et al, Proc. 40th IEEE PVSC (to be published))



Fig. 3. IV curve of the HBC structure cell.

図 3 4 HBCセルのI-V特性 (J. Nakamura et al, Proc. 40th IEEE PVSC (to be published))



Fig. 2. Schematic configuration of SMT concept.

図33 SMT (Surface-Mount Technology) のコンセプト (J. Nakamura et al, Proc. 40th IEEE PVSC (to be published))

表	7	HBC構造	皆セル	の特性	E (J. N	akam	ura
et	al,	Proc.	40^{th}	IEEE	PVSC	(to	be
pu	blish	ned))					

Table I	
---------	--

	IV parameters of the HBC structure cell							
No.	$J_{sc}(\text{mA/cm2})$	$V_{oc}(\mathrm{mV})$	F.F.	Efficiency(%)				
1	41.7	736	0.819	25.1				
2	42.0	729	0.820	25.1				
				0				

Note. Aperture area: 19.3mm x 19.3mm (3.713cm²). Measured at AM1.5, 1000W/m², 25°C by JET

5.5 アモルファス、ナノ/マイクロ結晶薄膜Si太陽電池分野:

(1) J. Linら (東京エレクトロン) は、"Blazing new paths to high efficiency amorphous silicon based solar modules" と題して、プレーナリ講演を行った。薄膜Si PVは、大規模PVに適し たものとして期待されていながら、昨今のPV市場の急激な成長に対応できなくなっている。 課題は、言うまでもなく、効率向上、光劣化抑制、コスト低減である。薄膜Si太陽電池お よびモジュールの現状が報告された。表8に、高効率a-Siおよび μ c - Si薄膜Si単接合太 陽電池特性の認定データを示す。a-Siセル、 μ c-Siセルの最高安定化効率は、1cm²程度の 小面積セルで、各々、10.11%、10.97%で、AISTによる。Kanekaは、a-Si/ μ c-Si 2 接合タ ンデムの小面積セル(0.962cm²)、サブモジュール(14.23cm²)の安定化効率、各々、12.3%、 11.7%を以前、達成している。小面積セルの最高安定化効率は、EPFLによる12.6%である。 Hanenergyは、a-Si/ μ c-Si 2 接合タンデムの1245mmx635mmモジュールの初期効率12.8%、 安定化効率11.1%を実現している。TELは、1100mmx1300mmモジュールで、安定化効率11.7% を達成しており、12%以上も可能で、効率13%も期待できるとしている。

`									
		Jsc (mA/cm^2)	Voc (mV)	FF (%)	効率(%)	機関			
	a-Si	16.15	906	69.5	10.11	AIST			
	a-Si	16.75	886	67.8	10.10	TEL Solar			
	μ c-Si	27.44	542	73.8	10.97	AIST			
	μ c-Si	26.55	549	73.3	10.69	EPFL			

表8 高効率 a-Si および µ c - Si 薄膜 Si 単接合太陽電池特性の認定データ

a-Siセルの劣化抑制やバンドギャップの最適化、ARコーティング、表面テクスチャーや light trapping、裏面反射、透明導電膜の光吸収抑制、導電率向上(高移動度IPCVD-ZnO) やナノインプリントグラステクスチャに関する検討が述べられた。高スループットG5の VHF-CVD装置開発(成膜速度2.3nm/secで、uniformity<±8.5%)も紹介された。TELは、 a-Si/µc-Si2接合タンデムの1100mmx1300mmモジュールで、安定化効率11.7%を達成して おり、12%以上も可能で、効率13%も期待できるとしている。現在、安定化効率10.5%の 151Wモジュールが生産されているが、安定化効率11.7%、12.4%、13.1%で、各々、出力 167W、177W、188Wの大出力モジュールの生産が可能としている。当面、roof-tileなど、 roof-top市場、シースルーモジュールを適用対象としているとの事である。

課題は、モジュールの安定化効率15%以上、CVDコスト低減、スループット、yield、 a-Siの光劣化抑制、などである。

5.6 有機太陽電池分野:

J. Nelsonら(Imperial College)は、"Tackling the performance limits of organic heterojunction solar cells" と題して、プレーナリ講演を行った。有機系太陽電池は、大面積化、フレキシブル、カラフル、低コスト化の特徴を有する。最近のOLEDは、有機系太陽電池への関心を押し上 げている。しかし、有機太陽電池は、低分子リゴマー、ポリマーの狭い吸収波長領域、低 移動度、低拡散長により低効率であり、バルクヘテロ接合(BJT)やタンデム化のアプロー チが有効である。これまで、三菱化学は、低分子系で効率11%を実現している。Heliatek は、有機系タンデムで効率10.7%、UCLA/住友化学は、高分子系タンデムで効率10.6%を達

成している。無機系では、Eg/q-Voc=0.4~0.5Vだが、有機系では、低Eg系で、Eg/q-Voc= 0.7V、高Eg系で、Eg/q-Voc=1Vと、大きく、高効率化の障害となっている。

効率20%の可能性もあるが、効率11%程 度の状況である。効率向上のためには、限 界要因を理解することが重要である。低移 動度、光マネージメント、材料へのドーピ ングや構造の一様性の難しさがある。効率 を支配する光吸収、キャリア生成、電荷分 離、キャリア輸送、キャリア再結合過程が 議論された。

その他は、会議のハイライト(図35) を参照されたい。



図35 エリア6のハイライト(Dr.A. Reinders提供)

5.7 宇宙用太陽電池分野:

5.3の「III-V族化合物セルおよび集光型太陽電池分野」の概要および会議のハイライト (図36)を参照されたい。

Highlights Area 7 'Space Technologies'

- A number of joint sessions with Area 1, 3, and 4 were successfully held.
- Studies on growth of III-V on Si (GaP, GaAs, GaAsP, GaPN...) for multijuncton solar cells for space application has resumed.
- InGaP/GaAs/InGaAs IMM triple-junction solar cells with high efficiency of 37.9% (AM1.5G) have been attained. The cell structure is optimized to improve radiation resistance for space use (Takamoto, SHARP).

 Newly developed flexible thin-film IMM-3J space cells were demonstrated by FTSCE-II, and also solar array sheets using the IMM-3J cells are being demonstrated by HISAKI.



図36 エリア7のハイライト(Dr. A. Reinders提供)

PVSC-40. June 13, 2014. Closing Sess

5.8 キャラクタリゼーション:

B. Michiら(FhG-ISE)は、"Luminescence imaging for quantitative solar cell analysis"と題 して、プレーナリ講演を行った。結晶シリコン太陽電池、結晶、モジュールの研究開発や 製造段階で、フォトルミネッセンス(PL)が広範囲に使われるようになっている。本講演 では、多結晶Si太陽電池を例にして、損失解析にPL等イメージング技術が有効であること 示している。①バルク再結合損失(約30%の損失)の解析には、PLイメージングが有効で、 メタステーブル欠陥(Fe_i、BO_i、Cr_i、O_i)のイメージングにも有効で、バルクキャリア寿命 や太陽電池効率との相関も検討されている。また、原料、るつぼの純度やドーパント(伝 導型)の影響も検討されている。②表面再結合損失(約20%の損失)の解析には、吸収深 さは、量子効率、波長依存PL、FS/BS法(表面および裏面評価)が、再光吸収は、エレクト ロルミネッセンス(EL)/PLイメージングが、注入依存性は、飽和電流密度J_{oe}イメージング が、用いられている。今回、FS/BS法が紹介された。実効キャリア寿命が両面で評価され、 Cz-Siや多結晶Siの表面、裏面再結合速度が求められている。③光損失(約40%の損失)の 解析には、spectrally resolved light-beam induced current (SR-LBIC)法が用いられ、 短絡電流密度Jscマッピングがなされ、I-V特性による値との比較もなされている。④直列 抵抗Rs損失(約5%の損失)の解析には、PLイメージングが用いられ、Rsマッピングと暗電 流マッピングができ、曲線因子FF損失に変換されている。I-V特性から求まるFF損失および 効率損失と比較されている。⑤シャント損失(約5%の損失)の解析には、dark lock-in thermography (DLIT)が用いられ、種々の電圧でのDLITイメージと局所I-V特性から得られ る開放端電圧VocおよびFFマッピングとの比較がなされている。全ての損失を評価する完全 な方法はないが、個々の損失を評価する(完全な)方法はあると結んだ。

その他は、会議のハイライト(図37)を参照されたい。

Highlights Area 8 'Characterization methods'

- Luminescent imaging methods are being used extensively to understand quantitatively the spatially resolved recombination, shunt and series. Losses in cells and modules. (Bernard Michl, FhG-ISE and others in oral sessions)
- The efficiency is significantly overestimated for current matched concentrator cells if the the spectrum of the light is not adjusted. The impact on a standard CPV simulator is to make a 42% cell measure above 44% even with no error in the current. (Osterwald, NREL)
- A new word "Carrierographic" was invented (Melnikov)





図37 エリア8のハイライト(Dr. A. Reinders提供)

5.9 モジュール分野:

会議のハイライト(図38)を参照されたい。

Highlights Area 9 'PV Modules and Manufacturing'

- PV Module Temperature Model: First Solar (Billy Hayes) presented a timedependent model that significantly increases the prediction accuracy of annual energy
- Characterization: Brian Zaharatos (CO School of Mines) presented a new powerful method to estimate parameters from noisy I-V Curves:
- First Chinese Session: One presentation on requirements for quality improvenments of EVA (Zhou Shudong) was done in Chinese with translation to English (on stage) provided by Yang Yang
- Power electronics (Micro-inverters, module-level power optimizers and sub-module string MMPT) are making their way into the market, Chris Deline (NREL), Timothy Peshek (Case Western Uni), Mika Nuotio (Empower)



PVSC-40, June 13, 2014, Closing Session 図38 エリア9のハイライト(Dr. A. Reinders提供)

5.10 PVシステム分野:会議のハイライト(図39)を参照されたい。

Highlights Area 10 'PV Systems and Applications'

- An exhaustive FMEA study of PV system dc fault modes and mitigation techniques revealed the best approaches for ensuring that faults don't become fires. (Mark Albers, SunPower)
- Larry Kazmerski wow-ed the audience with personal videos of dust storms and the impact
 of soil/dust accumulation in the Middle East (primarily the Kingdom of Saudi Arabia). Soil
 accumulation rates can top 10% in a month (Larry Kazmerski, NREL)
- Sandia lab is providing crucially needed insights in DC arc-fault detection, which is required by certain codes but plagued with issues in the field. (Ken Armijo and Ben Yang, Sandia National Labs)
- A new draft standard addressing the complex task of system energy performance testing was presented along with a PV power plant case study (Sarah Kurtz, NREL)
- Unique utility curtailment strategies and insightful results from high penetration solar in Tucson AZ. (Daniel Cormode, University of AZ)
- Great progress in PV power forecasting was shown by several presenters (SMUD, University of AZ)
- Area 10's student paper award winner demonstrated an open source PV system model (PV_LIB) with powerful visualization tools and flexibility. It holds great potential for expanded capabilities based on user input. (Rob Andrews, Calama Consulting Inc.)
 - 図39 エリア10のハイライト(Dr. A. Reinders提供)

5.11 市場および政策分野:

(1) G. Uozumiら(NEDO、豊田工大)は、"Overview of research and development projects for solar cells in Japan"と題して、NEDOの太陽電池研究開発プロジェクトの概要に関して講 演を行った。NEDOの概要、研究開発におけるNEDOの役割を述べた後、太陽光発電市場の加 速化には、各国の支援、特に、研究開発の加速化が必要であると述べた。図40は、デー タは古いが、主要国における太陽光発電の単年度および累積導入量と各国のPV関係の予算 (研究開発費を含む)との相関を示す。PVの市場拡大とPVに関する国家予算は、線形関係 にあり、市場拡大ためには、国の支援がまだまだ必要であり、研究開発のさらなる推進が 必要である。経産省および経産省が、日本におけるPV産業の進展や市場拡大に貢献してお り、1990年以来、PVコストは、着実に低減し、2013年度には、累積導入量13.6GWに到達し ている。

Correlation between PV budget and PV system installation



dependent on national government PV budget (sum up from 2000 to 2004)

M. Yamazuchi. T. Schled J. Luther and A. Blakers. ISPRE Report (ICSU)⁴. 図40 主要国における太陽光発電の単年度および累積導入量と各国のPV関係の予算 (研究開発費を含む)との相関(Prof. M. Yamaguchi提供) NED0の太陽光発電技術開発の概要が報告された。図41に、各種太陽電池の最高変換効率の変遷と日本の最近の貢献を示す。NED0のプロジェクトで、シャープの InGaP/GaAs/InGaAs3接合セルの集光下での効率44.4%、非集光下での効率37.9%、シャー プの結晶SiHBTセルの効率25.1%、ソーラーフロンティアのCIGSセル、サブモジュールでの 効率20.9%、17.8%、シャープの色素増感セルで11.9%、産総研のµc-Siセルおよびa-Si セルで、各々、10.97%、10.11%など、世界最高効率あるいは第二位の高効率が実現して いる。この他、パナソニックの結晶SiHBTセルの効率25.6%、三菱化学の有機セルの11.1%、 など、世界最高効率を達成し、日本は、各分野で世界最高の技術力を有していると言える。



Japan has contributed to raise conversion efficiency

図41 各種太陽電池の最高変換効率の変遷と日本の最近の貢献(Mr.G. Uozumi提供)

Highlights Area 11 'PV Deployment'

- Actual results of interconnection applications showed that high voltage was less an issue thanhigh number of distribution protection mitigation strategies that were required for many PV systems (Jimmy Quiroz, Sandia)
- New testing procedures and techniques for evaluating advanced inverters as they are expected to operate in future PV systems: IEEE 1547.1 and UL1741(Andy Hoke, NREL)



図42 エリア11のハイライト(Dr. A. Reinders提供)

5.12 信頼性分野

会議のハイライト(図43)を参照されたい。

Highlights Area 12 'PV Reliability'

- "Bankability" is a term created by the solar industry, and is very important to continued investment in PV. Deutsche Bank's requirements give confidence for the the first couple of years of deployment. A key requirement is < 0.5% of modules with hot spots showing > 10 K temperature differences when viewed at illuminations > 800 W/m². (Felix Holz, Deutsche Bank)
- PID in CdTe modules was characterized as cell shunting across the P1 scribe. It was recommended that the CdS and absorber not be placed in the P1 scribe. (Michelle Propst, Pearl Laboratories)
- Data from almost 50,000 PV systems showed that the vast majority (90%) of the systems performed within 90% of what was estimated. The most frequent causes of low performance included grid connectivity issues and construction delays. (Dirk Jordan, NREL)





PVSC-40, June 13, 2014, Closing Session 図43 エリア12のハイライト(Dr. A. Reinders提供)

6. 感想

15年振りに、パナソニックおよびシャープが、結晶Si太陽電池の世界最高効率を更新 し、その他の分野でも、高効率化が進展し、盛り上がった会議の印象であった。しかし、 今後の太陽光発電の発展や市場拡大のためには、図40に示すように、まだまだ、国の支 援が必要と言える。太陽電池や太陽光発電の高性能化、低コスト化、長寿命化の流れにあ り、技術開発のさらなる強化と産学連携が必要である。幸い、図41に示すように、今回 のシャープのInGaP/GaAs/InGaAs3接合セルの集光下での効率44.4%、非集光下での効率 37.9%、パナソニックおよびシャープの結晶Si HBTセルの効率25.6%、25.1%、ソーラーフ ロンティアのCIGSセル、サブモジュールでの効率20.9%、17.8%、シャープの色素増感セ ルの11.9%、三菱化学の有機セルの11.1%、など、世界最高効率を達成し、日本は、各分 野で世界最高の技術力を有していると言える。経産省(通産省)、NEDOが推進してきたPV に関する研究開発のお陰と言える。今後は、R. Swansonのプレーナリ講演に示されている ように、GTM RESEARCHの "PV TECHNOLOGY AND COST OUTLOOK, 2013-2017"によれば、2017年までに、 モジュールコストは、\$0.36/Wに下がると見ており、技術向上60%、他の消耗品22%、スケールアッ プ17%、ポリSi 1%と、技術向上の効果は大きいとみており、技術開発が、太陽電池モジュール およびシステムの低コスト化にも有効であり、オールジャパンで連携して、総合力で、直 近の壁を打破する必要があろう。

2011年6月から、集光型太陽光発電に関する日欧の共同研究開発が始まり、欧米での集 光型太陽光発電システムの重要性が再認識されており、わが国における超高効率太陽電 池・材料、集光モジュールおよびシステムに関する研究開発の再強化の良い機会となろう。 モジュールやシステムの信頼性やスマートグリッド、系統の安定化、プラグインハイブリ ッド等、システム研究開発の強化も必要であり、自動車応用や農業利用も期待でき、日欧 共同研究開発と同様に、日米共同研究開発も期待したい。

有機・色素系は、性能や信頼性に課題が多く、基礎にたちかえる必要があろう。この分 野も、オールジャパンでの展開を期待したい。

次回の41st IEEE PVSCは、PVSEC-24、30th EU-PVSECの合同会議である「第6回太陽光発 電世界会議」(WCPEC-6)として、2014年11月23日~27日、京都国際会議場で、開催予定 である。また、42nd IEEE PVSCは、2015年6月14日~20日、New Orleansで開催予定である。