

EU-PVSECショート速報[化合物薄膜太陽電池関連]

中田時夫 (青山学院大学)

会議名 : 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference

開催期間 : 2009年9月21日 - 25日

開催場所 : Hamburg, ドイツ

*****要 約*****

化合物薄膜太陽電池セッションでは、昭和シェル石油が 30cm角モジュールで変換効率 15.7%、Solibro/Q.Cellsが 0.75cm²の大面积モジュールで 12.3% (開口効率 13.5%) の記録更新があり、大きな注目を集めた。また、各種のバッファ層に関する発表が多く見受けられたが、中でもZSWが報告したZnS/ZnMgOバッファ層は反射防止膜なしで変換効率 18.0%を達成しており、今後の進展が注目される。このほか、高効率フレキシブル太陽電池の発表や、耐熱ガラスの使用による高効率化など興味深い発表が多く見受けられた。

1. はじめに

化合物薄膜太陽電池分野の発表は、開催国のドイツが約半数を占めた。現在、30MW/年以上の製造能力を持つ CIS 系モジュール製造企業 9 社のうち 5 社がドイツ企業であることから、この分野におけるドイツの勢いを感じた。今回は CdTe に関する口頭発表はなく、米国開催の IEEE-PVSC との違いが鮮明であった。日米欧の各国企業から、製造規模の大幅な拡大計画が発表され、CIGS 太陽電池の本格的な市場参入が始まろうとしている。新たな流れとしては、装置製造メーカー 3 社の口頭発表があり、CIGS 太陽電池分野におけるターンキービジネスの開始を印象付けた。

2. プレナリー講演

Solibro/Q-CELLS社のL.Stoltは各国企業のCIGSモジュール開発の動向について概要を紹介し、生産能力 30MW/年以上の企業は 9 社に増加したことを報告した。次に、Solibro社の現状について以下のように紹介した。2008 年に 90MWの第 2 工場を建設し、第 1 工場の 30MWを合わせて 2010 年には 135MWとなる予定である。現在、モジュール効率 (フレームを含めた受光面積 : 119cm×63cm=0.75m²) で世界最高記録となる 12.3% (開口効率で 13.5%) を達成しており、モジュール効率が 14%になれば、0.78 ユーロ/Wp (1.1 \$/Wp) が期待できる。さらに、2010 年第 2 四半期に販売予定のモジュールは 0.9m²で 110 Wpとなると述べた。また、変換効率が 1 %上がれば、販売コストが 10%下がることから、高効率化が可能なCIGS製膜法を選択すべきとの考えを示した。

IRDPE (仏) のD.LincotはCIGS太陽電池におけるCdS代替バッファ層の現状に関するレビュー講演を行った。CdS代替バッファ層材料としては、ZnS系、In₂S₃系、(Zn,Mg)O系が主であるが、中でも、溶液成長 (CBD) 法によるZn(O,S,OH)バッファ層を用いることで、CdSよりも高いモジュール効率が達成され、すでに工業的に利用されていること、このほかの製膜法については、ALD法やILGAR法は研究レベルであるが、有望であること、また、蒸着法はIn₂S₃の高速製膜法として可能性があることと述べた。バッファ層に関しては、安定性、接合形成や接合界面など、未知な部分もある。また、ワイドギャップCIGS太陽電池への適合性や、バッファ層なしのヘテロ接合形成などが今後の課題であるとの考えを示した。

3. フレキシブル太陽電池およびバッファ層

EMPA (スイス) からは、オールドライプロセスに対応した蒸着 In_2S_3 バッファ層を用いたフレキシブルCIGS太陽電池に関する報告があり、ガラス基板上で変換効率 14.1%、ポリイミド上で変換効率 10.1%を得たとのことである。HZB(ドイツ)からは、ステンレス箔上CIGS太陽電池について、高温製膜時にステンレス基板からCIGS薄膜中へ拡散するFeの含有量と変換効率との関係を調べた結果、Feが 20ppm以下であれば問題ないこと、またFeの拡散によるセル特性の低下は、深い準位の欠陥生成によるアクセプタ濃度の低下であり、100nm程度のCrバリア層により防ぐことが出来ることを示した。青学大は、フレキシブル太陽電池のCIGS製膜時における基板温度制御がダブルグレーデッド・バンドギャップ構造を形成するのに重要であることをSIMS分析結果から示し、 $\text{ZnS}(\text{O},\text{OH})$ バッファ層を用い、世界最高レベルとなる 17.9%の変換効率をチタン箔上で、また、CdSバッファ層を用い、ポリイミド箔上で 15.7%を達成した。

HZBはCBD- $\text{Zn}(\text{S},\text{O})$ バッファ層をAVANCIS社のCIGSSe光吸収層に適用し、変換効率 15.9% (0.5cm^2)を、また、Sulfurcell社の CuInS_2 を用いて 8.5%を得た。さらに、 900cm^2 のモジュールに適用し、CIGSSeで 13.2%および CuInS_2 で 7.12%を得たとのことである。ZSWのHariskosは、 ZnS/ZnMgO バッファ層を用い、反射防止膜なしで変換効率 18.0%を達成したことから、変換効率 20%以上が期待できると述べた。 ZnS は溶液成長法で ZnMgO はスパッタリング法で作製している。また、 $30\times 30\text{cm}$ モジュールに適用し、変換効率 12.9%を得ている。HZBはILGAR(Ion Layer Gas Reaction)法による In_2S_3 バッファ層をAVANCIS社のCIGSSe、およびCIS-Solartechnik社とWuerth Solar社のCIGS光吸収層に適用し、それぞれ変換効率 14.7%、11.5%、14.4%を得た。また、大面積化に対応したILGAR装置をStangl社と共同開発し、 $60\text{cm}\times 120\text{cm}$ モジュール用のインライン装置を開発したとのことである。

4. モデリングと特性評価

Ljubljana 大 (スロベニア) の M. Topic は ASPIN というソーラーシミュレーターを用い、CIGS 太陽電池の 2 次元解析を行った。結晶粒界 (GB) が膜厚方向に平行で、GB における価電子帯オフセット ΔE_v が 0.25eV の場合、変換効率は低下しない、これに対して、膜厚方向に垂直な GB が空乏層中にある場合は、変換効率を低下させるとの結果を紹介した。

Univ. Applied Sciences UlmのWalterはZSWとWuerth Solarの共同で、CIGS太陽電池の耐久試験と加速劣化試験を行い、 V_{oc} 、FFの変動はヘテロ接合における電荷分布の変化で説明できること、セル特性の安定化は低照度の光照射で起こるが、電圧印加の方がより効果的であること、さらに長時間のセル短絡状態は避けるべきであると結論した。

ドイツではCIGS太陽電池の高性能化と企業への技術移転を目的としてcomCIGSという組織を立ち上げた。この組織はHZB、独IBM社、Schott社、Jena大、Maintz大の4つの研究機関からなり、計算科学と実験を協力して行う。今回は独IBM社のWindelnからSchott社CIGSが開発した耐熱ガラスを用い、HZBの多段階蒸着法で製膜した結果、結晶学的に非常に均一なCIGS薄膜が形成でき、初期データながら変換効率 19.2%を達成したという。このほか、Stuttgart大からはCIGSモジュールのエレクトロ・ルミネッセンスによる解析結果や、HZBから $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ 太陽電池に関する報告があり、同時蒸着法で変換効率 4.1%を得たとのことである。

5. CIGS 太陽電池モジュールおよび製造装置

5.1 CIGS 太陽電池モジュール

Johanna Solar Technology 社からモジュール製造技術に関する現状報告があった。同社の CIGSSe 製膜プロセスは Cu-Ga-In プリカーサを DC スパッタ法で作製し、Se と S を含むガス中で高温加熱し、セレン化/硫化する。今回、初めて CIGSSe 膜の SIMS デプスプロファイルを示し、Ga が Mo 側に多いことから、グレーデッドバンドギャップ構造であるとしている。一方、S は膜厚方向に対して V 字型に分布しており、意外な結果であった。バッファ層には CBD-CdS を用い、50cm×100cm のモジュールで開口効率 11.6% (61.3W)、平均効率 10.5%を得たとのことである。また、用途拡大のため、赤、青、緑色のカラーモジュールを開発した。

Sulfurcell Solartechnik社はCuInS₂太陽電池モジュールの製造能力を着実に拡大しており、本年 10 月に 75MWラインで最初のCuInS₂モジュールを製造し、65cm×125cmモジュールで最高変換効率 11.9%、平均開口効率で 8.2%を達成した。さらに、CuInS₂にGaを入れたCu(In,Ga)S₂の研究をHZBと共同で進めており平均アパーチャー効率 10%が期待できるとしている。Ga添加により、Cu(InGa)Se₂と同様なダブルグレーデッド・バンドギャップ構造が得られることになると、変換効率の飛躍的な向上が予想され、今後の動向を注視する必要がある。

昭和シェル石油は、30cm×30cmのモジュールで世界最高となる変換効率 15.7%を発表し、大きな注目を集めた。同社はこれまでに 60cm×120cmでモジュール効率 13.1%を報告しているが、これを上回るモジュール効率 14%の見通しが付いたことになる。変換効率が向上した理由は、Cu(In,Ga)(Se,S)₂光吸収層の改善であるとしている。光吸収層の膜質評価にPLマッピング法を用い、変換効率の低い光吸収層では 0.1mm程度の多くの黒点が現れることを見出した。この黒点はSEMやEDXでは認められないことから、バルク内ではなく表面欠陥によるとしている。この表面欠陥の原因やその除去法に関する発表はなかったが、光吸収層/バッファ層の界面特性が変換効率の改善に重要であることを示唆しており、大変興味深い内容であった。

5.2 モジュール製造装置

Centrotherm AG 社 (独) は CIGS 太陽電池モジュールの製造ラインの一括販売を行ういわゆるターンキービジネスを展開している。製造能力は 30/50/100MW である。CIGS 製膜法は Mo/SLG 上にスパッタ法で(Cu-Ga)/In 金属積層膜を作製し、その上に大気圧蒸着法で Se を堆積する。これを高速アニール炉 (RTP) でセレン化し、CIGS 薄膜を得る。2009 年 9 月現在で、小面積セルの変換効率 13%および 30cm×30cm モジュールの変換効率 10.2%が得られている。台湾の SunshinePV 社では、同社の 30MW/年の製造ラインを購入し、試験的な製造を開始した。Beeco 社(米)では最近、リニア蒸発源を開発し、従来のスモークセルと呼ばれる点蒸発源との比較を行った。リニア蒸発源では基板表面までの距離を短縮可能なため、原料使用率が従来の 2 倍の 70%となること、膜厚均一性に優れ、デポダウン方式も可能なため、高温製膜が可能となり、変換効率の向上が期待できるとした。このほか、ターゲットメーカーの Heraeus 社から CuInGa 円筒ターゲットに関する報告があり、In 単体ターゲットよりもスパッタレートが安定するとのことであった。

6. おわりに

今回はドイツ企業の躍進ぶりが目立った会議となった。基礎的分野での発表も多く CIGS 分野の研究者および技術者層の厚さを痛感した。同国では基礎的分野を担う産官学の技術協力が円滑に行われており、ドイツ企業躍進の下支えとなっている。また、CIGS 太陽電池の更なる高性能化と企業への技術移転を目的として、研究組織を立ち上げるなど、将来を見据えた取り組みが印象的であった。