

特 集 太陽光発電技術

アモルファスシリコン太陽電池の進歩

Recent Progress of Amorphous Silicon Solar Cells

大 西 三 千 年^{*}・桑 野 幸 徳^{**}
 Michitoshi Ohnishi Yukinori Kuwano

1 はじめに

クリーンで無尽蔵な太陽エネルギーを利用する太陽光発電は、石油に代わる新しいエネルギー源として注目を集めており、その開発の中心課題である太陽電池の低コスト化に、世界各国がしのぎを削っている。我が国においても、昭和49年度から通産省の「サンシャイン計画」がスタートし、太陽電池のコストを昭和60年に400円/W、昭和65年に50~100円/Wと低減することを目標に¹⁾、当初は、単結晶Si太陽電池を中心とした低コスト太陽電池の開発が進められた。そして1980年代になり、アモルファスシリコン(以下a-Siと記す)太陽電池の開発に力が注がれるようになってきている。

a-Siの研究において、1975年のダンディ大学Spearらによる、シラン中のグロー放電で形成したa-Siでは価電子制御が可能であるとの発表²⁾がその後の研究の基礎となっている。その翌1976年、RCAのCarlsonらがa-Siを用いた太陽電池を発表した³⁾。これは、0.005cm²ときわめて小面積であったが、a-Siを用いた最初の太陽電池であり、ガラス基板上的pin型セルで2.4%の変換効率を有していた。さらに、阪大浜川らは、ステンレス基板上的pin型セルの開発を進め、1978年には45%の太陽電池の発表を行なった⁴⁾。

一方、a-Si太陽電池の実用性に着目して研究を進めていた三洋電機桑野らは、1979年、アモルファスの特徴を生かした集積型a-Si太陽電池の発表⁵⁾を行ない、翌1980年、この集積型a-Si太陽電池を内蔵した電卓を世界で初めて商品化した⁶⁾。

さらにその後、a-Si太陽電池の変換効率向上の取組みが各国の研究機関で精力的に行なわれ、RCA Carlsonらによる逆pinセル⁷⁾、大阪大学浜川らによ

るa-SiC:H/a-Si:Hヘテロ接合セル⁸⁾、筆者らによる分離形成方式を用いたセル⁹⁾、三菱電機行本らによる多層構造セル¹⁰⁾の開発等がなされ、変換効率も8%を越えるに至った。そして、現在も熾烈な効率向上の競争がくりひろげられているところである。

本稿では、このa-Si太陽電池の特徴を述べるとともに、その開発をめぐる最近の動きについて概説する。

2 グロー放電による a-Si 太陽電池

2.1 a-Si 太陽電池の製造法

a-Si太陽電池の製造法の一例を図-1に示す。SiH₄(シラン)ガスを真空反応炉中に導入し、電界を印加してグロー放電を行うことによりa-Siを形成する。この時、B₂H₆(ジボラン)を不純物ガスとして添加するとpタイプa-Siが³⁾、PH₃(フォスヒン)を添加す

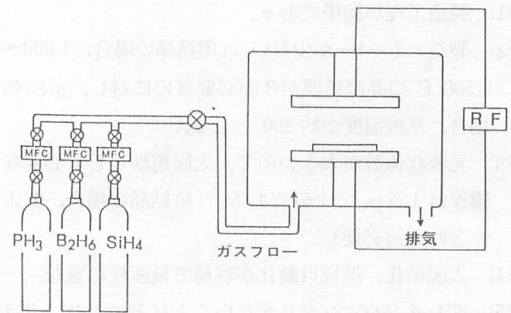


図-1 a-Si 太陽電池形成装置

表 1 基本的反応条件

基板温度	200~400°C
高周波周波数	13.56 MHz
高周波出力	20~50 W
ガス圧	0.4Torr
流量速度	100 cc/min
成長速度	1 μm/hr

^{*} 三洋電機(株)中央研究所桑野研究室主任研究員

〒573 枚方市走谷 1-18-13

^{**} 三洋電機(株)中央研究所桑野研究室室長

るとnタイプ a-Si がそれぞれ形成できる。すなわち、バルブの切替えによって a-Si 太陽電池の基本構成である pin 接合を形成できる。一般的に用いられている基本的反応条件を表 1 に示す。

2.2 グロー放電 a-Si 膜の性質

グロー放電で形成した a-Si 膜の特徴として、まずギャップ中の局在単位密度が他のアモルファス半導体に比べ格段に小さいことがあげられる。一般にアモルファス半導体は、ギャップ中に原子配列の秩序の乱れに由来する高密度の局在単位密度を持ち、そのため価電子制御ができない物質であると考えられていた。しかし、グロー放電で形成した a-Si 膜には水素が10~30%程度含まれており、この水素が Si ネットワークの不飽和結合を終端し、a-Si の欠陥密度を減少させるため、価電子制御が可能となった。このことが、a-Si を用いた太陽電池の実現を可能にしたと言える。

さらにもう一つの特徴は、太陽光に対する光吸収係数が大きいことである。すなわち、図-2に示すように⁴⁾、太陽光のエネルギー分布のピーク付近の波長に対する a-Si の光吸収係数は、単結晶 Si のそれと比較して1桁以上大きいという特徴を持っている。

2.3 a-Si 太陽電池の特徴

以上述べた a-Si 太陽電池の製造法および a-Si膜の性質から、a-Si 太陽電池の特徴として以下の点をあげることができる。

- (1) 製造工程が簡単である。
- (2) 製造エネルギーが少ない。(単結晶の場合、1,000~1,500°C の高温処理が3回必要なのに対し、a-Si の場合、基板温度が約 300°C と低い)
- (3) 光吸収係数が大きいので、太陽電池として必要な膜厚は1 μm で十分である。(単結晶の場合、およそ 300 μm 必要)
- (4) 大面積化、連続自動化が容易で量産性に富む。
- (5) グレインバウンダリがないことなどにより、ガラ

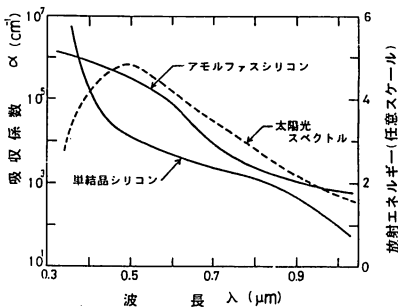


図-2 a-Si および単結晶 Si の吸収係数と太陽光の放射スペクトル

スやステンレス、あるいはプラスチックなどの安価な基板を使用できる。

- (6) 集積型などセル構造の工夫により、一枚の基板上から高い電圧を取り出せる。

以上のことから、a-Si 太陽電池は低コスト太陽電池の有力な候補として注目されるようになった。

3 太陽電池特性向上の取組み

a-Si 太陽電池は、開発の当初、単結晶 Si 太陽電池に比べて効率がかなり低かったことから、研究の力点も効率向上におかれ現在に至っている。一方、大学関係を中心とした a-Si の基礎的な研究も活発に行なわれているが、ここではそれらにふれるのは割愛し、a-Si の形成法の研究による膜質改善や新材料を用いたセル構造の開発など、a-Si 太陽電池特性改善に関連した最近の動きについて述べる。

3.1 膜質改善と新形成技術の研究

a-Si の膜質改善の試みとして、電場の印加法や磁場効果の検討など形成方法の研究や、プラズマ分光法によりグロー放電の解析などの研究が進められている。

形成法の研究では、まず大阪大学浜川らによるクロス電場法¹¹⁾がある。これは、基板と平行に RF 電場を印加してプラズマを発生させ、さらにこれと重畳して DC 電場を垂直に加えるもので、基板表面近傍の励起ラジカルの分布を選択することによって、光導電率やドーピング効率の向上をはかっている。また、広島大広瀬ら¹²⁾は、RF 電場により発生したプラズマに磁場を加えることにより、プラズマとチャンバー壁の相互作用による壁からの汚染を防ぐとともに、プラズマの電子温度、イオン化率を低下させ、光導電性の改善とギャップ中の局在単位密度を減少させている。

RCA Carlson らは、プロキシミティ DC グロー放電法による太陽電池特性の向上を報告している¹³⁾。これは、陰極側にセットされた基板上およそ 1 cm の

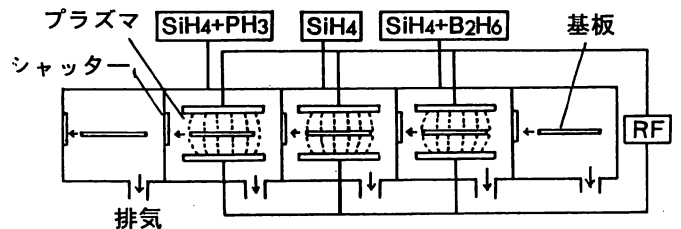


図-3 連続分離形成方式による a-Si 太陽電池製造装置

位置にメッシュ状のスクリーニング電極を設置することにより、励起ラディカルの衝突による膜のダメージを防ぐというもので、従来3%程度であった効率が5%に向上している。

ところで、図-1に示すように、pin a-Si太陽電池をガラスの切替えだけで一つの反応室で形成した場合、前の反応による残留不純物がセル特性に悪影響を及ぼす。これをさけるため、図-3に示すような、p, i, n各層を分離した反応室で連続的に形成する連続分離形成方式が筆者らにより開発された⁹⁾。この方式では、異なったタイプの不純物であるボロンとリンの相互混入を避けることができるとともに、不純物のドーピング量をより精密にコントロールすることが可能であり、a-SiC/a-Siヘテロ接合セルで効率が従来の6.1%から8.15%に向上している。

その他、a-Siの形成法の研究として、反応性スパッタ法、イオンプレーティング法、アーク放電法、レーザー蒸着法など各種の方法が報告されている。これらについてはまだグロー放電法をしのぐ膜質のものは報告されていないが、それぞれ異なった特徴を持っており、今後の発展が待たれる。

3.2 材料およびセル構造の開発

a-Si太陽電池の開発の初期には、ショットキータイプやMIS構造を含め各種の構造が検討されたが、大面積化やセル設計の自由度の観点から、pin接合型が主流となり、最近の高い効率を示すものはほとんどのタイプとなっている。

Carlsonらは、pin型セルの窓側材料であるpタイプa-Si膜の光吸収が大きく、主要なキャリア発生領域であるi層に到達する光の量が減少するのを改善するため、p層に比べ光吸収の少ないワイドバンドギャップのn層を窓側に用いた図-4(b)に示す逆pinセルを開発し、効率を初めて6%以上に向上させた⁷⁾。この1980年の発表は、そのあとに続く変換効率の記録書き換え競争のスタートとなった重要な開発であった。

一方、大阪大浜川らは、 SiH_4 と CH_4 の混合ガスに B_2H_6 を添加してグロー放電で形成したpタイプa-SiC膜が、すぐれた光導電特性を有するワイドバンドギャップ材料であることを見出し、このpタイプa-SiC膜を窓側材料に用いた図-4(e)に示すa-SiC/a-Siヘテロ接合素子を開発した¹⁴⁾。このp-SiCを用いることにより、効率が従来の5.71%から8.04%へと向上した。これにより、それまでステンレス基板を用いたセルに比べ効率の面で劣っていたガラス基板を用

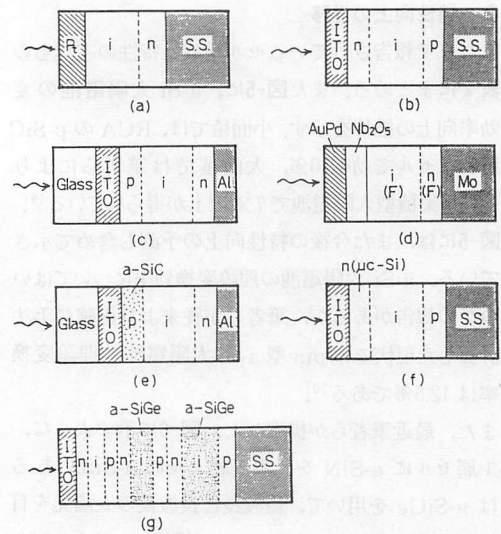


図-4 各種 a-Si 太陽電池の構造

いたセルが、一気にその立場を逆転するとともに、a-Si太陽電池の実用化に拍車をかけたものとして意義深い。

また、材料面では微結晶化膜の開発がある^{15) 16)}。この微結晶化膜は、ある種の条件下、すなわち、高いRFパワーや大きい水素ガス濃度でのグロー放電を行うことによって得られ、直径が100Å程度の微小な結晶を多数含んだものである。太陽電池材料としては、とくにドーパ膜で用いるのが有効で、ワイドバンドギャップ窓材として、あるいは良好な電氣的コンタクトを得るための利用が試みられている。たとえば、図-4(f)は、n層微結晶Si膜を窓側に用いたもので、7.8%の効率が報告されている¹⁷⁾。

また、a-SiGeの研究も進展し、高質な膜が得られており、これを用いて図-4(g)に示す多層構造セルが開発されている。これは、a-Siよりバンドギャップの小さいa-SiGeをバック側のセルに用い、フロント側セルを透過してきた長波長光を有効に利用するもので、8.5%の高い変換効率が得られている¹⁰⁾。

さらに、光照射による影響という観点から、フッ素化a-Siの検討も長く続けられている¹⁸⁾。最近、このフッ素化a-Siを用いたセルの特性改善の動きもあり、詳細なデータの報告が待たれる。

材料面ではその他、a-SiN, a-SiSn, a-SiOなどの新しい材料の研究が進められているが、これらの材料は、光学的バンドギャップの選択、光照射効果への影響の点においてとくに興味深いものがあり、今後の進展を見守っていく必要がある。

3.3 特性向上の推移

これまで報告されているセル構成と特性の主なものを表2にまとめる。また図-5に、a-Si 太陽電池の変換効率向上の推移を示す。小面積では、RCA の p-SiC を用いたセルで効率10%、大面積では筆者らにより10 cm角集積型太陽電池で7%以上が得られている¹⁹⁾。

図-5には、また今後の特性向上の予測も含めて示されている。a-Si 太陽電池の理論変換効率についてはいくつかの報告があるが、筆者らが従来より正確な手法で計算した現状での pin 型 a-Si 太陽電池の理論変換効率は12.5%である²⁰⁾。

また、最近筆者らが提案した、図-6に示すような、第1層セルに a-SiN を、第3層セルに a-SiSn あるいは a-SiGe を用いて、短波長と長波長の太陽光を有効に利用するマルチバンドギャップ構造にすると、24%と高い変換効率が予測されている²¹⁾。このマルチバンドギャップセルは、アモルファスが成分元素の広範囲

な組成での形成が可能で、かつ単結晶の場合に制約となる格子整合の問題がほとんどないというアモルファスの特徴をうまく生かしたもので、単結晶にはない大きな可能性を持つものとして注目される。

4 大面積化の試み—集積型太陽電池—

a-Si 太陽電池の効率向上の努力に加えて、電力用への応用を旨としたセルの大面積化の研究にも大きな力が注がれている。

a-Si はガス反応で形成されること、結晶のようにグレインバウンダリがないなどのため、大面積化が比較的容易で、すでに20 cm角程度の面積太陽電池も試作されている。しかし、変換効率は面積が大きくなるほど減少する傾向にある。これは透明電極などによる直列抵抗による電力損失が主要な原因である²²⁾。

このような点を改善するため、集積型 a-Si 太陽電池が筆者らにより開発された。この集積型 a-Si 太陽電池は、図-7(a)、(b)に示すように、1枚の絶縁基板上に形成された各セルは、金属マスクなどを用いたパターンニングによって、透明電極および裏面電極を通じて隣接するセルとそれぞれ直列に接続されている。これは a-Si がガス反応で形成され薄膜であるという特徴を生かしたもので、ちょうど IC の製造工程と同じようにパターンで形成できることから量産に適しており、しかもドライプロセスでの形成が可能である。また、一枚の基板上から実用的な高い電圧を取り出せるという特徴を持っている。

集積型太陽電池には、上に述べた透明電極と裏面電極の接続部分をどの位置にとるかによって2つのタイプが考えられる。図-7(a)に示すタイプ I は、基板のエッジ部分で各セルを直列接続するもので、a-Si 膜を

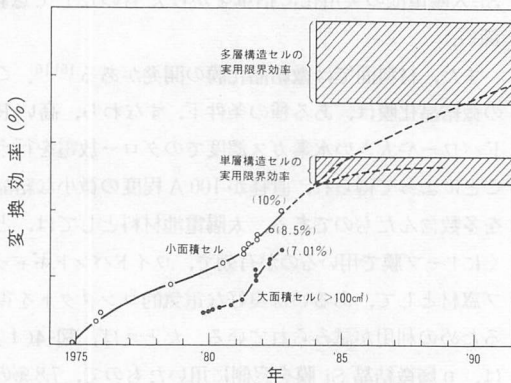


図-5 変換効率の推移と予測

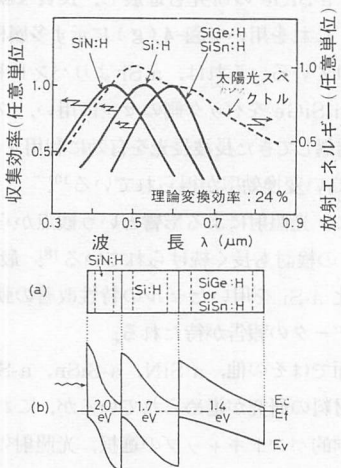
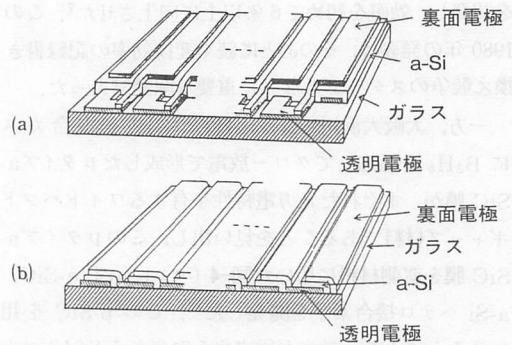


図-6 マルチバンドギャップセル構造とバンドプロフィール



(a) タイプ I (b) タイプ II

図-7 集積型 a-Si 太陽電池の構造

表2 各種 a-Si 太陽電池の光起電力特性

Cell structure	Voc (mV)	Isc (mA/cm ²)	F. F. (%)	η (%)	Pin* (mW/cm ²)	Area (cm)
SnO ₂ / p(SiC)-in/ Al	845	13.03	74.0	8.15	100	0.04
ITO/p(SiC)-i-n(μ c-Si)/Al	867	13.9	67.1	8.1	100	0.033
ITO/p(SiC)-in/Al	880	15.21	60.09	8.04	100	0.033
SnO ₂ /pin/Al	820	11.1	63.1	7.19	80	0.046
	918	11.43	59.7	6.26	100	0.031
ITO/pin/Al	850	11.9	62.5	6.3	100	0.16
ITO/nip/S.S	875	13.0	62.0	6.91	100	0.04
	880	12.3	63.6	6.88	100	0.09
ITO/SnO ₂ /p(SiC)-in	880	14.06	62.38	7.72	100	1.00
ITO/n(μ c-Si)-ip/S.S	860	13.9	65.5	7.8	100	1.2
ITO/p(SiC)-in/Al	7110	12.41	64.8	6.35	100	100.0
ITO/nip/S.S	890	10.9	54	5.2	100	100.0
AuPd/Nb ₂ O ₅ /i(F) \cdot n(F)/Mo	880	13.1	57.0	6.6		0.73
ITO/n(μ c-Si:F:H) \cdot ip	840	9.78	62.1	5.1	100	0.04
ITO/n(F) \cdot i(F) \cdot p(F)/S.S	610	13.2	55.9	4.5	100	0.25
ITO/n(F) \cdot ip/S.S	815	8.35	61.7	4.2	100	0.04
ITO/nip/n-i(SiGe)-p /n i(SiGe)p/S.S	2200	6.74	57	8.5	100	0.09

* 入射光強度

分離する必要がなく、パターンニングが容易であるという特徴を持つ。このタイプ I は比較的低電流用として電卓用などに用いられている。一方、図-7(b)に示すタイプ II は、隣接する各セルの境界部分で直列接続するもので、透明電極の抵抗による電力損失を減少させることができるので、太陽電池の大面积化に適している。

表 2 には、10 cm 角の大面积太陽電池の特性もまとめられている。タイプ II の 10 cm 角集積型太陽電池で効率 7.01% が得られている。

5 信頼性

a-Si 太陽電池を搭載した電卓やウォッチが発売されてからすでに 2 年経過し、通常の電子部品としてはその信頼性に本質的な問題の指摘はない。しかし、電力用としては、屋外曝露という厳しい条件の他、さらに長時間の信頼性の保証が必要である。

このような電力用としての信頼性に対するデータが最近になって報告されてきている²³⁾。図-8 に、a-Si 太陽電池パネルの屋外動作時の出力特性の経時変化を示す。初期の 1 ヶ月間におよそ 10% 程度の特性の低下が見られるが、その後は 1 年以上経過しても安定に特性を維持している。初期の特性の劣化は、光照射が大きな原因と考えられるが、この光照射効果については、最近、i 層へのボロンなどの不純物添加によりこれを減少できるデータも示されており²⁴⁾、今後改善が期待

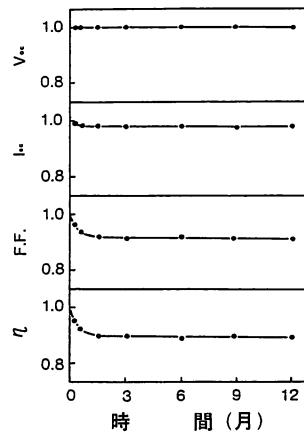


図-8 太陽電池パネルの経時変化

できる。

6 a-Si 太陽電池の応用

a-Si 太陽電池を内蔵した電卓やウォッチが最近急速にそのシェアを拡大しつつある。その理由として、

- (1) a-Si の特徴を生かした集積型太陽電池により、必要な高い電圧を一枚の基板から取り出せる。
- (2) 分光感度特性が蛍光灯のスペクトル分布とほぼ一致し、蛍光灯下で単結晶 Si 太陽電池よりすぐれた特性を示す²⁵⁾。

ことがあげられる。

写 1 に、筆者らによる集積型 a-Si 太陽電池を用い

た電卓、ウォッチ、ラジオ、テープレコーダ、白黒テレビ、充電器等各種応用機器を示す。とくに電卓とウォッチは a-Si 太陽電池を内蔵した製品として世界で最初に商品化されたものである⁶⁾。

さらに、a-Si の新しい応用として、写2に示すアモルファス光センサが筆者らにより開発され、カラーTV自動輝度調整用センサ等への実用化が開始された。

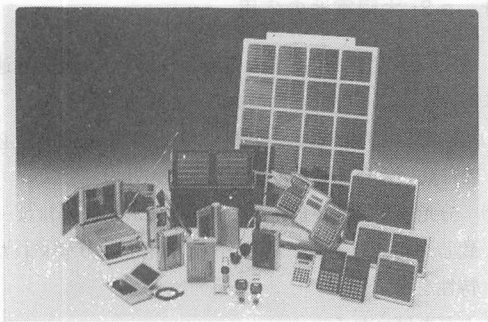
一方、電力用としても開発が急ピッチで進んでいる。写1には、10 cm角集積型 a-Si 太陽電池20枚からなる電力用パネルが示されている。このパネルの出力は、最大11.2 Wである。

写3には、筆者らによる a-Si 太陽電池を用いた世界で最初の実用化モデル住宅を示す。最大発電能力は2 kWで、現在1年半のデータの蓄積がなされている。このモデル住宅には同時に太陽集熱器も併設され、熱エネルギーの利用も行なわれている。

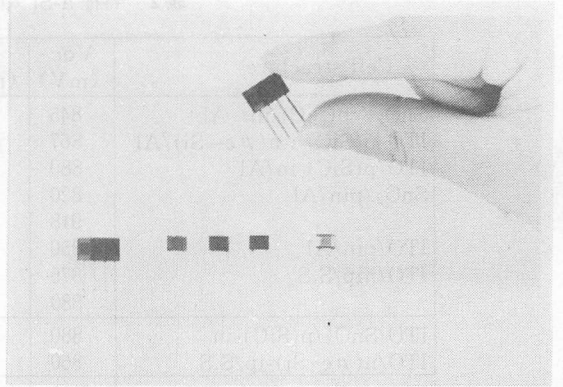
さらに、このような太陽光から電気と熱の両方のエネルギーを取り出すものとして、写4に示すような、a-Si 太陽電池を太陽集熱器に組み込んで一体化したハイブリッド素子が筆者らにより開発された。a-Si 膜は可視領域で吸収係数が大きく、すぐれた選択吸収膜としての役割も果している。この素子の太陽エネルギー総合変換効率は58%と高く、今後が注目される。

7 おわりに

1976年のCarlsonらの発表以来、a-Si太陽電池はごく短い間に大幅な進歩が見られた。これは基礎物性の研究とデバイス技術の開発が有機的にうまく結びついた結果であり、当初の期待通り、低コスト太陽電池の有力な候補として順調に成長してきた。今後は、電力用としての実用化にむけ、太陽電池特性とくに大面積素子での特性向上と信頼性の評価を中心に開発が進められるであろう。



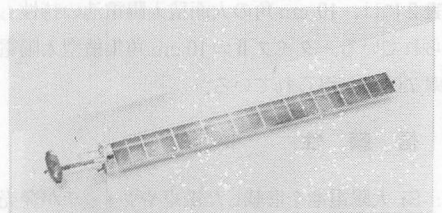
写1 集積型 a-Si 太陽電池を用いた各種応用機器



写2 a-Si 光センサ。左から集積型カラーセンサ、単色カラーセンサ、可視光全スペクトルセンサ。



写3 a-Si 太陽電池パネルを設置した実用化モデル住宅（大阪府守口市、出力2 kW）



写4 a-Si 太陽電池と太陽集熱器とを組合せたハイブリッド素子

本研究の一部は、工業技術院サンシャイン計画の一環として行なわれたもので、関係各位に感謝する。

参考文献

- 1) 浜川圭弘; 80年代太陽光発電の開発, 日刊工業新聞社 (1981) p.145
- 2) W. E. Spear; Solid State Comm., 17 (1975) p.1193
- 3) D. E. Carlson; Appl. Phys. Lett., 28 (1976) p.671
- 4) H. Okamoto, Y. Nitta, T. Adachi and Y. Hamakawa; Proc. Int. Conf. Solid Films & Surfaces, Tokyo, SI-6, B-52 (July, 1978)
- 5) Y. Kuwano, et al; 1st Photovoltaic Sci. & Eng. Conf.

- in Japan (1979) p.55
- 6) Y. Kuwano and M. Ohnishi ; 9 th Inter. Conf. Amorphous and Liquid Semiconductors, Grenoble (1981)
 - 7) D. E. Carlson : Amorphous Si Materials Subcontractor's Review Meeting, Golden, Colorado (1981)
 - 8) 太和田, 津下, 近藤, 岡本, 浜川 ; 応用物理学会(秋季)予稿集 (1981) p.441
 - 9) Y. Kuwano, et al ; 15 th IEEE Photovol. Speci. Conf., Florida (1981)
 - 10) 中村, 佐藤, 行本 ; 応用物理学会 (春季) 予稿集 (1982) p.519
 - 11) H.Okamoto, Y.Nitta, T. Yamaguchi and Y. Hamakawa ; 8th Int. Conf. Amorphous & Liquid Semiconductors, Cambridge, BF 8 (1979)
 - 12) M. Taniguchi, M. Hirose and Y. Osaka ; 8 th Int. Conf. Amorphous & Liquid Semiconductors, Cambridge (1979)
 - 13) D. E. Carlson, R. W. Smith and G. A. Swartz ; The EC-S Fall Meeting, Hallywood, Florida (1980)
 - 14) Y. Tawada, Y. Hamakawa, et al ; Jpn. J. Appl. Phys., Supplement 20-2(1981) p.219
 - 15) A.Matsuda, S. Yamasaki, K. Nakagawa, H. Okushi, K. Tanaka, S.Iijima, M. Matsumura and H. Yamamoto ; Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 19, No.6 (June 1980) L 305
 - 16) T. Hamasaki, H. Kurata, M. Hirose and Y. Osaka ; Appl. Phys. Lett. (Dec.,15, 1980) L 475
 - 17) 内田, 他 : 応用物理学会 (秋季) 予稿集 (1981) p.438
 - 18) A.Madan, S. R. Ovshinsky and E. Benn ; Phil. Mag. B, 40, (1979), p.259
 - 19) Y. Kuwano ; U. S. —Japan Joint Seminar "Technological Applications of Tetrahedral Amorphous Solids "Palo Alto, CA July, 1982
 - 20) Y.Kuwano, S. Tsuda, and M. Ohnishi ; Jpn. J. Appl. Phys. 21 (1982) p.235
 - 21) 津田, 中村, 中嶋, 高浜, 樽井, 西脇, 大西, 桑野 ; 応用物理学会 (春季) 予稿集 (1982) p.516
 - 22) Y. Kuwano, et al ; Jpn. J. Appl. Phys., Supplement 20-2 (1981) p.213
 - 23) Y. Kuwano, S. Nakano, T. Yokoo, H. Shibuya and K. Tsukamoto ; 3rd Photovoltaic Sci. & Eng. Conf. in Japan, 1982
 - 24) 大西, 津田, 渡辺, 中村, 高浜, 榎本, 樽井, 西脇, 桑野 ; 応用物理学会 (秋季) 予稿集 (1982)
 - 25) 桑野, 他 ; 応用電子物性分科会 (1979) p.3

話の泉

太陽エネルギー利用技術前史

太陽エネルギーの利用技術は、意外に古い。それは、他の工学技術のように直線的に進歩したのではなく、らせん階段を昇るように、ゆっくりと進歩している。そこで、太陽エネルギー利用技術の前史を少しひもといてみよう。

- 1780年代(江戸中期, 天明年間) アントン・ラボアジュー(仏)が二重レンズを利用した太陽炉を製作。
- 1875~1882年(明治8~15年) ジョン・エリクソン(米) 太陽熱エンジンの製作。水揚ポンプや圧縮冷凍機の運転に利用。総計5万台を販売。
- 1882年(明治15年) アベル・ピフル(仏) 太

陽熱利用の蒸気エンジンで印刷機を運転。

- 1903年(明治36年) オーブレイ・G・エニース(英) カリフォルニアとアリゾナで太陽追跡装置付き太陽熱利用蒸気エンジンで灌漑用ポンプを設置。
 - 1913年(大正2年) 英・米・独の3国協同でカイロ(エジプト)のナイル河流域に、これまで最大の大熱利用水力ポンプ場を建設。
(残念ながら、第1次大戦のため1914年に中止。1916年に設備は破壊された。)
- (ASTM Standardization news, Vol.10, No.5, pp.12-19(1982年5月号)より抜粋)

(Y)