

最近の研究展望

シリコン太陽電池について

日本電気・研究所 林 一 雄

1. 緒言

我々人類は無限の太陽エネルギーを利用しようといろいろの試みをなして来たが、そのなかで1954年米国のベル研究所によつて発明せられた^{1,2)}シリコン $P-N$ 接合によるシリコン太陽電池は太陽エネルギーを直接電気エネルギーに変換しうるものとして非常に注目を浴びた。

すでに米国及びソ連に於いてはこれを搭載した人工衛星が地球の周囲を回転し、我国に於いても太陽電池を電源とした無人中継局が設置せられ、又太陽エネルギーの変換のみならず、光の検出器としての用途が種々試みられている。

以下太陽電池の概要、特性、応用、経済性等についてのべる。

2. 太陽のエネルギー

地上にそそぐ太陽の輻射エネルギーは地球の大気圏外では 1.4 kw/m^2 であるが、これが大気圏を通過する際 0.29μ 以下の短波長はオゾン層に吸収され、 $0.29 \sim 0.34 \mu$ の紫外線は空気層で弱まり、又 2.0μ 以上の赤外は水蒸気、炭酸ガスに吸収せられて地表での太陽輻射線の分布は Fig. 1 の如くなる。又そのエネルギーは地表で約 1 kw/m^2 である³⁾。

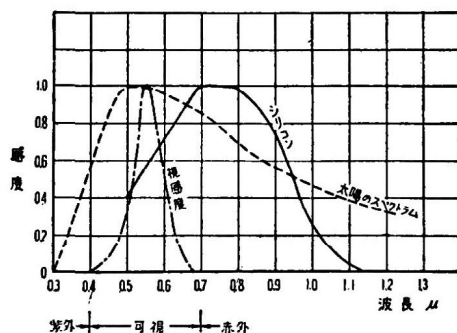


Fig. 1. 波長感度特性

3. 構造、原理

太陽電池の構造は Fig. 2 の如く N 型シリコンの単結晶薄板の表面に $2 \sim 3$ ミクロン程度の極く薄い P 型層が形成された簡単な構造で、その形状は円形と矩形とがある。

$P-N$ 接合部は半導体のエネルギー帯によつて図示す

ると Fig. 3 に示すように、 $P-N$ 接合境面に電気的二重層が出来て P 層が N 層に比して電位が高くなっている。

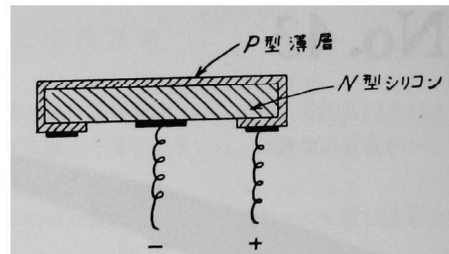


Fig. 2. シリコン太陽電池の構造

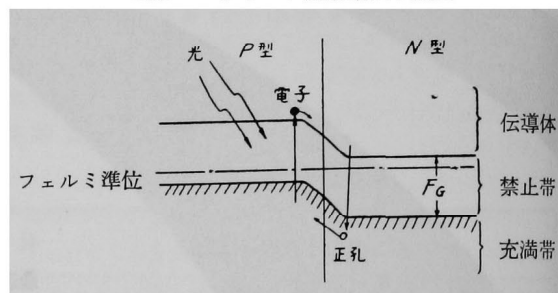


Fig. 3. $P-N$ 接合のエネルギー帯図

太陽電池表面に光が照射せられると、光はその振動数を ν とすると $h\nu$ に相当するエネルギーを有する光量子よりなっているので、 $h\nu$ の値がシリコンの伝導帯の下端と充満帯の上端の間の禁止帯の中 $E_G = 1.1 \text{ eV}$ より大きいと、光量子のエネルギーはシリコンの結晶格子に吸収されて、電子と正孔の対を生じ、これが内部電界によつて N 側の正孔は P 側へ、 P 側の電子は N 側に移つて、 P 側に $+$ 、 N 側に $-$ を発生する。回路に負荷を接続すればこれに電力が得られるわけで、太陽電池の等価回路は Fig. 4 の如く定電流電源 I_G に並列に $P-N$ 接合の接合インピーダンス Z_j が入り、更に直列内部抵抗 R_s と負荷抵抗 R_L が直列に入つた形に置く事が出来る。

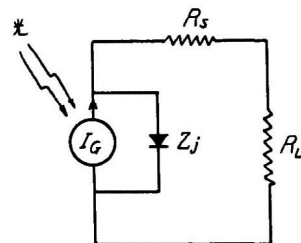


Fig. 4. 太陽電池の等価回路

4. 特性

太陽電池表面に照射された光のうち 1.1 eV 以上のもの

のだけシリコンに吸収せられる起電力に役立つが、それ以下の光は透過して有効でない。

1.1 eV 以上の光でもその一部は表面で反射し、残りは結晶中を指数函数的に減少し、吸収せられたものは電子と正孔の対を生じ、この電子、正孔が $P-N$ 接合部に到達して起電力となるわけである。

Q: キャリヤーの収集効率

r : 表面での反射係数

$e^{-\alpha l}$: 輻射の伝達係数

α : 吸収係数

l : 厚さ

e : 電荷

$n_{pn}(E_G)$: 太陽光線中の有効光子量子数

とすれば、発生する電流 I_G は

$$I_G = Q(1-r)(1-e^{-\alpha l}) \cdot e \cdot n_{pn}(E_G)$$

であらわされる。

シリコン太陽電池表面での光の反射による損失は、シリコンの屈折率は $n \approx 4$ であるから、そのままでは 40% 近くの反射があるが適当な表面処理(薄膜コーティング)を行なうと Fig. 5 に示す如く反射による損失を数%以下にすることが出来る。

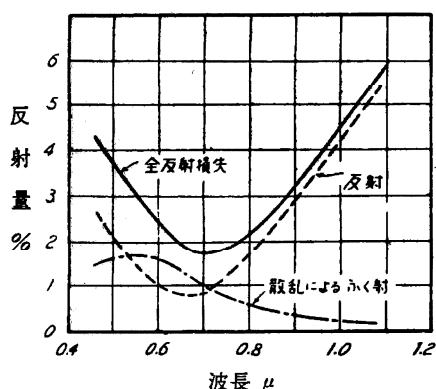


Fig. 5. シリコン太陽電池表面よりの反射量 (M. B. Prince and M. Wolf: J. Brit. I. R. E., Oct. 1958 のデータより)

次にシリコンの吸収係数 α は Fig. 6 に示す如く約 1.2 μ からはじまり短波長になるにしたがい増大していく^{4,5)}。即ち赤外と可視光では約 5 桁近く変化している。

次に Fig. 7 に太陽電池の P 層、及び N 層での波長に対する光子の吸収効率の一例を示す。これより例えば P 層の厚さを薄くすれば吸収効率は短波長の方が伸びてくる。Fig. 7 の波長に対する光子の吸収効率と、

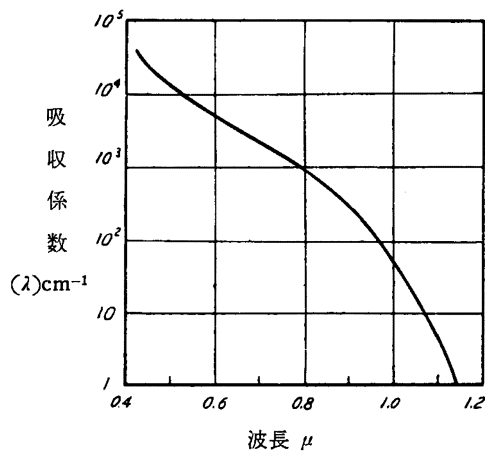


Fig. 6. シリコンの波長と吸収係数との関係

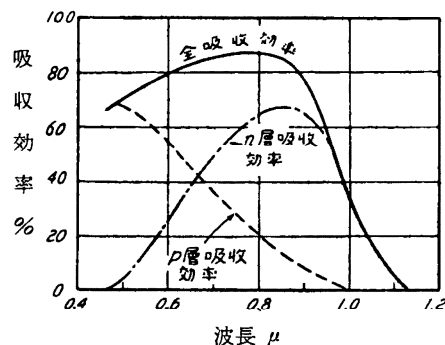


Fig. 7. シリコン太陽電池の波長に対する吸収効率

光子量子数の積から Fig. 1 の如くシリコン太陽電池の波長感度特性を得ることが出来る。

すなわち太陽電池の効率、波長感度特性は表面状態、 P 型層の厚さによって相当左右される。

太陽エネルギーを電気エネルギーに変換する効率は理論的に 23% 近くであるが、反射による光の損失、発生した電子又は正孔が $P-N$ 接合部に達する以前の再結合により消滅する損失、直列内部抵抗 R_s による PR の損失等の為に実際の太陽電池の変換効率は 8~10% 程度で最高 15% 近く迄得られている。すなわち 1 平方メートルの太陽電池より 80~100 W の電力が得られるわけである。

素子一箇当りの開放電圧は 0.4~0.5 V、1 平方センチ当りの短絡電流は 35 mA 程度で、普通の電池の如く直列、並列に接続することによって電圧、電流を増すことが出来る。

又耐久性も半永久的と考えられ、従来のセレン光電池より変換効率も一桁以上高いので、セレンは光の検出器としてのみしか用いられなかったが、シリコン太陽電池

は電源として用いられるようになった。

5. 応用

光の検出用、電源用⁶⁾とその応用は二大別される。

(a) 光検出用

光度計、露出計、日射計、赤外線検出装置、フォトカウンタ、自動点滅装置等。

(b) 電源用

人工衛星、無人中継局、無人気象観測所、トランジスタラジオ、無人灯台、無人標示灯、無人街路灯等。

次に実際に用いられた主な例について少し詳しくのべる。

光の検出器としてはまず露出計が考えられるが、波長感度特性が相当赤外部にずれている為、普通の写真用に用いる場合は当然フィルターを挿入して赤外部をカットして視感度に近づけねばならぬ。しかしセレン光電池に比して耐久性に富み、フィルターを挿入してもセレンより感度が高い為今後相当精度、耐久度を要する方面に用いられるものと思われる。

又自動点滅装置用として屋外の明暗の度に応じて航空標示灯を点滅する日光弁装置で現在太陽電池を用いたものが東京タワーに取付けられている。又自動車のヘッドライトの切換装置に光の検出用としても試作が進められている。

次に電源用として太陽電池を用いたものとして海外では米国及びソ連で人工衛星に搭載されている。ソ連の詳細は判明しないが、米国のヴァンガード人工衛星⁷⁾では直径6.4吋の円球の周囲に6ブロックの太陽電池がとりつけられている。人工衛星用としては特に変換効率の高い10%以上のものが選ばれ、矩形状の18片が1ブロックとなつて一つの窓の中に収容されている。

この6ブロックのシリコン太陽電池は Fig. 8 の如く夫々逆流防止用のシリコンダイオードを経て並列に接続せられている。逆流防止用ダイオードは蓄電池及び太陽光線の当たっている部分の太陽電池より、太陽光線の当たらない陰の部分の太陽電池への電流の逆流を防止している。太陽電池が人工衛星に搭載せられた場合これが破壊する原因として隕石の衝突、宇宙塵の衝突、熱、寒さ、

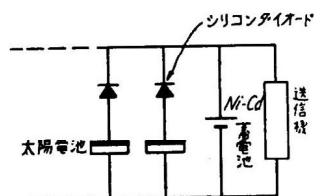


Fig. 8. 人工衛星の電源系統図

X線、 γ 線等が考えられるが機械的損傷がないかぎり、輻射線に対する耐久度は現在のデータでは数年間は無事に動作しうものと思われる。

その他海外に於ては電源用として無人灯台、トランジスタラジオ、森林監視所中継局等に用いられている。

我国に於いては昨年11月日本電気(株)と東北電力が福島県信夫山山頂に太陽電池を電源として無人中継局を設置した。

この中継局の中継機は150 Mcの送受信機2組より構成されており、その消費電力は4.5 Wである。この電力はすべてシリコン太陽電池より供給される。夜間や悪天候に備えて太陽電池出力は一旦Ni-Cd蓄電池に浮動充電される。約1ヵ月間悪天候がつづいても充分機器が動作するように蓄電池容量がもたせてある。

太陽電池最大出力は相当の安全率を見て約70 Wに設計されている。太陽電池は直径約28φの素子4,320ヶが9ヶずつ1ブロックにアクリル樹脂中にモールドされ2m×2.5mの鉄の平面枠にとりつけられて、これが Fig. 9 に示すように局舎上に1年を通じて平均に最も多く太陽エネルギーを吸収しうるように真南に面して $40^{\circ} \pm 7^{\circ}$ の角度をもつて取付けられている。

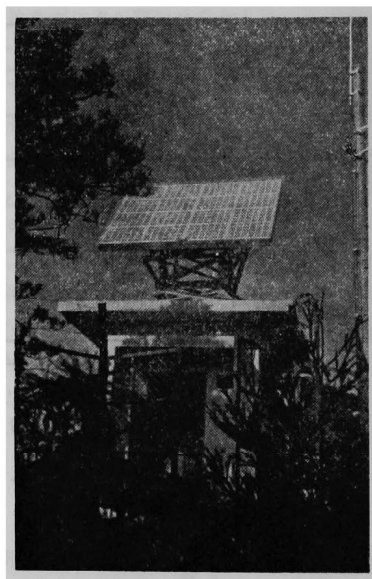


Fig. 9. 信夫山山頂無人中継局外観

6. 太陽電池の問題点

シリコン太陽電池が発明されて今年で5年、その間に急速な発展を遂げ実用化の域に達したが、今後の問題として経済的な点と、新たな技術的改善の二点が残されている。

すなわち経済性の面では太陽電池の価格が現在 1W 当り 4~5 万円であるため電源として用う場合は高価である。これは太陽電池の変換効率の向上, 原料シリコンの価格の低下, 大量生産による生産コストの低下, 等により現在の半分近くに太陽電池価格が下ると電源に乾電池を用いた場合と比較して長期間機器を動作させる場合は太陽電池の方が電源費が安くなる。

更に太陽電池を通信機器の電源に用いた場合, 機器のトランジスタ化による消費電力の減少, 充電用 Ni—Cd 蓄電池の価格の低廉化も太陽電池普及の一助となるであろう。

次に太陽電池の新技術面の開発が今後の興味ある問題として残されている。第 1 に現在の太陽電池は原料にシリコンを用いているが, シリコン以外の金属間化合物に適当なものがないかという点である。現在理論的にはシリコンより僅かよいというものも考えられ InP, GaAs, CdTe 等があげられているが⁸⁾, 実際のものでは電気抵抗が適当なものが得られない, ライフタイムが短い, 単結晶が作りにくい, PN 接合の製造法に問題がある, オーミックコンタクトが完全でない等の点でシリコン太陽電池程の特性が得られていない。

第 2 にシリコン太陽電池がシリコンの単結晶を用いているが, もし電気鍍金, シンター, 蒸着等の技術がシリコンの薄膜をつくる事に役立てば大面積の且つ廉価なシ

リコン太陽電池が容易に得られるようになるかもしれない。

以上の点が今後の太陽電池に残された問題点となると思われる。

文 献

- 1) D. M. Chapin, C. S. Fuller and G. L. Pearson: "The Bell Solar Battery", B.L.R., p. 232 June (1954).
- 2) D. M. Chapin, C. S. Fuller and G. L. Pearson: "New Silicon P—N Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power", J. Appl. Phys., 25, 676 (1954).
- 3) R. J. List: Smithsonian Inst. Misc. Collections 114, 416 (1951).
- 4) H. Y. Fan, M. L. Shepherd and W. Spitzer: *Infra-red absorption and energy-band structure of Ge and Si*, Wiley, New York, 1956.
- 5) R. Braunstein, A. R. Moore and F. Herman: "Intrinsic optical absorption in Ge—Si alloys", Phys. Rev., 109, 695 (1958).
- 6) M. B. Prince: "Silicon Solar Cells", Tele-Tech March 1957.
- 7) L. V. Berkner: "Rockets and Satellites", Pergamon Press, London 1958.
- 8) J. J. Loferski: "Theoretical Considerations for Determining the optimum Semiconductor for Photovoltaic Solar Energy Converters", J. Appl. Phys., 27, 777 (1956).

内 外 ニ ュ ー ス

久保田広幹事 学士院賞受賞

本会幹事久保田広教授(東大生産技研)はさる 5 月 6 日「光学系の映像に関する研究」に対して第 49 回日本学士院賞を授賞された。

これは同教授の光学系の映像理論に関する一連の研究およびその結果の光学機械の応用に対するもので「薄膜の干渉色の色彩論的研究」「現色偏光の干渉色の研究」および「偏光顕微鏡の廻折像に関する研究」がその中心になつている。これらの研究はそれ自身非常に優れた研究であることは言をまたないが更に我が国の光学界の研究の方途を指示し, 薄膜光学, 或は通信理論の光学への導入といった研究の先鞭をつけた研究である事に大きい意義がうかがえる。なお同教授はこれらの研究は研究室或はロチェスター大学光学研の人々の協力によつて完成したものであるでこれらの人々の代表で授賞されたものと考えたいといつておられる。

SPSE (Society of Photographic Scientist and Engineers) の 1959 年 National Conference について

1959 年の National Conference が 10 月 26—30 日 Chicago で開催されます。分野は下記の通りです。

- (1) Photosensitive system
- (2) Procedures and apparatus
- (3) Design of camera and associated equipment
- (4) Photographic optics
- (5) Use of photography for scientific and engineering recording or measurement
- (6) Other photographic apparatus
- (7) Data handling

参加希望者は 7 月 1 日迄にアブストラクト, 9 月 1 日迄に論文を下記に送つて下さい。

Mr. Charles E. Ives, Paper Chairman.

Research Laboratories, Eastman Kodak Company,
Rochester, New York, U.S.A.

なお書式, 会場設備等についての詳細は

千葉大学工学部 田村稔助教授

に問合せて下さい。