論説

Paper

低コストプロセスにより作製した集光用 Si 太陽電池

荒木建次^{*1}, 山口真史^{*2}

A Concentrator Si Solar Cell Made by Low-cost Process

Kenji Araki, and Masafumi Yamaguchi

Synopsis

Obviously, concentrator solar cells reduce the total area of cells required, which provides lower system costs. For non-concentrator solar panels, the solar cells represent 80% of the system cost. The use of concentrator cells provides a cost reduction for cells inversely proportional to the concentration ratio. However conventional Si concentrator cells normally require more complex photolithography which increases the cost of manufacture.

In this novel approach a single step photolithography process is described which includes superfine random pyramid texture, with the electrode directly defined onto the textured surface. Additionally, improved electrode design was applied, allowing for operation under non-uniform surface voltage and current density, experienced during high concentrator conditions. This has lead to energy conversion efficiencies in excess of 19%. Experimental results on the conversion efficiency are in good agreement with the results calculated by the proposed equations taking into account of the distributed diode effect at high concentration ratio.

1. 緒 言

化石燃料および資源の枯渇, 二酸化炭素濃度の増大に伴う地球温暖化現象など, われわれを取り巻くエネルギー環境はますます厳しいものとなっている。代表的なエネルギー資源である石油, ウランにしても, 可採年数はそれぞれ 43 年, 66 年¹⁾といわれている。早急にこれらの資源に依存する体質を改めない限り, 長い地球の歴史の中で蓄えられてきたこれらの資源をわれわれの世代で使い尽くし, エネルギー資源の奪い合いなどといった地球的な問題に発展する可能性がある。

太陽光発電は地球に常時降り注いでいる太陽エネルギーから直接発電を行おうとするもので, 排気ガスなど環境に悪影響を及ぼす要素や, 資源の枯渇に対する懸念がない。

しかしながら, 太陽光発電用ソーラーパネルのコストは 1kW あたり 80 万円と, いまだに高値のため, 補助金およ

び電力会社による逆流買電といった優遇政策により需要を支えられているのが現状であり, 発電コストの低減が急務である。加えて近年の生産急増により, 原料価格も数年前のグラムあたり 0.5 円から 4 円にまで高騰している。本格的な太陽光発電普及には, 今後 10 年ですくなくとも一桁以上太陽電池生産量を増大させる必要があり¹⁾, この生産量を長期間支えうる Si 原料確保も重要な課題となる。

集光式太陽光発電は, 安価な光学系により太陽光を集光し, 小面積の太陽電池に照射させるものであり, 上述の太陽電池価格, 太陽電池用 Si 原料逼迫といった 2 問題を同時に解決しうる。たとえば, 反射鏡などで太陽光を 20 倍に集光した場合, 照射される太陽電池の面積は 1/20, つまり太陽電池の個数は 1/20 でよいことになる。これは太陽電池価格も 1/20 まで下がりうることを示しているとともに, 必要な Si 原料も 1/20 となることを示している。したがって, 集光式発電では太陽電池そのものは要素部品のひ

2000 年 8 月 14 日受付

* 1 大同特殊鋼(株)技術開発研究所, 豊田工業大学受託研究員 (Research and Development Lab., Daido Steel Co., Ltd.),

* 2 豊田工業大学 大学院 工学研究科 工博 (Dr., Eng., Graduate School of Engineering, Toyota Technological Institute)

とつに過ぎなくなり、追尾機構、光学系、筐体がキーとなる要素技術と見られ、太陽電池メーカーのみならず、機械メーカーをはじめ異業種の参入も盛んになると見られる。

集光用太陽電池については、発電コストが高くては許容される宇宙用（人工衛星搭載）には、一族化合物²接合・3接合太陽電池による集光式発電システムが既に実用化されている。しかしながら、太陽電池自体の製造コストが高く、地上用として実用化するには少なくとも200倍以上の集光倍率が必要とされているが、この集光倍率に耐える集光光学系、太陽追尾システム、高剛性な架台は実用化されていない。実用的な数十倍程度の集光倍率で太陽電池自体のコストを考えればCz-Si原料に限られる。しかしながら、非集光型Si太陽電池に集光照射しても効率のよい発電を行うことはできない。たとえば、20倍集光を行うとした場合、発生電流も20倍となり、内部抵抗による損失はその自乗である400倍にまで膨らんでしまう。言い換えれば内部抵抗を二桁以上下げなければならない。これは非集光型太陽電池の設計技術および製造技術の単純な延長では達成できないし、後述するように、達成したという報告はない。

これまでも集光型Si太陽電池はいくつか報告されている。しかしながら、Fig.1に示すように50倍以上の高集光・18%以上の高効率を達成した太陽電池は、例えばフォトリソグラフィー回数では3回～8回が必要であり、一枚あたり数百円の価格を要求される太陽電池とは相容れるものではない。フォトリソグラフィーを3回用いたCz-Si太陽電池としては、30倍集光で20%の変換効率が既に得られている(NREL)²⁾。また、微細プロセスを用いない太陽電池では、プリズムレンズを貼り付けるといった2次的

Fig. 1. R & D philosophy.

な光学系を用いない限り、10倍以上の集光倍率での使用は困難である。これは後述するように無次元化電極ピッチが大きくなるため、集光に伴う FF （フィルファクター）が低下し、効率を維持できなくなるためである。これら微細電極を使用しないセルとしては、スクリーン印刷によるSEA³⁾、およびSi表面にレーザーで溝を彫り、穴鍍金を行うことにより電極抵抗の低減化を図った豪州ニューサウスウェールズ大学（UNSW）およびSolarex社のもの⁴⁾が著名であるが、セル単体（プリズムレンズなし）での最大効率およびその際の集光倍率は6倍集光で16.7%、10倍集光で20.1%であり、最大効率が得られる集光倍率は低倍率にとどまっている。本論では、より高い集光倍率での高い変換効率を有するSi太陽電池の低コスト技術について検討し、高集光動作のためにはフォトリソグラフィーによる微細電極形成が不可欠であるものの、その使用は1回のみにとどめ、その他の高コストプロセスは極力省略するといった方針の下に研究開発を行った結果をまとめたものである。

2. デバイス構造

Fig.2に本研究にて開発した太陽電池の構造を示す。

入射面には楕形の微細電極を配置し、 n^+ 層（エミッタ）へ流入した電子を捕獲収集させる構造を採った。この微細楕形電極の配置、幅は太陽電池の内部抵抗に大きく影響することが知られている。特に、高集光で動作させる太陽電池では単なる内部抵抗のみならず、発電電流が n^+ 層（エミッタ）を流入する間での電圧降下により接合電圧の不均一により、いわゆる分布ダイオード効果が発生し、接合の電気特性の劣化^{5)～7)}、および電源としての非理想性の増大（フィルファクター FF の低下）が生じ⁸⁾、効率を大きく下げる原因となることが報告されている。この分布ダイオード効果は電気特性としては見かけのダイオード理想因子の低下として発現することが既に観測されており⁷⁾

Fig. 2. Structure of the cell developed by Toyota Technological Institute and Daido Steel.

等価回路解析から、集光むらが発生した際の内部損失増大が予測されている⁷⁾。逆に、この分布ダイオード効果を積極的に利用しようとする試みも提案されているが⁵⁾、ここでは深く立ち入らない。単純には、櫛のピッチが短いほど内部抵抗が低下し、櫛の幅のピッチに対する比が小さいほど櫛型電極による日射の遮蔽損失が少なくなる。高集光の太陽電池では、仮に日影損失を数%程度に抑えるとした場合、電極幅は数十～数 μm になり、200 μm 幅が限界であるスクリーン印刷による電極形成技術を使うことができず、フォトリソグラフィーの使用は避けられない。しかしながら、その使用回数を 1 回に抑えるとともに、アライメントを不要とすることにより、微細電極形成に伴うコストアップを最小限に抑えることができた。

また、入射面にはピラミッド状のテクスチャーを形成し、その上に SiO_2 薄膜からなる反射防止膜を付与した。このピラミッド状テクスチャーは入射した光を屈折させ、太陽電池厚み方向の光路長を稼ぐことにより、特に吸収係数の低い長波長成分での光電変換効率を高めるとともに、ピラミッド斜面同士での相互反射により実質的に表面反射率を低下させる作用があることが知られている。特に、集光型太陽電池のように集光光学系からの照射に浅い入射角の成分を多く含むような場合には、特に効果的であることが報告されている⁵⁾。

この技術自体は高効率の単結晶 Si 太陽電池に対して実用化されており、0.5% 程度の NaOH 溶液中にて 10 分程度煮沸させることにより、容易に得ることができる¹⁰⁾。しかしながら、この方法により得られるピラミッドの高さは 10 μm 程度であり、先端角がシャープであることもあいまって、フォトリソグラフィーが困難であった。これまでの例としては、微細電極部位と入射面部位とを別々にプロセスするためにアライメントを要するフォトリソグラフィーを 3 回行う必要があった²⁾。

本研究ではピラミッドのサイズを小さくすることにより、テクスチャー面に直接電極を形成できるようにした。このアプローチはドイツ・フラウンホッフ研究所にて非集光高効率 Si 太陽電池へ適用した例がある¹¹⁾。この例ではピラミッドを微細化するのに特殊なエッチング液を使用しただけではなく、電極幅も 20 μm と、集光用太陽電池にとってはやや広めであった。本研究では、独自の前処理を施すことにより、一般的なエッチング液で、平均高さ 1 μm の微細テクスチャーを形成し、アライメントなしのコンタクト露光でのフォトリソグラフィーを可能にした。

表面付近には P の熱拡散により n + 層 (エミッタ) を形

成する。基材の p 型半導体との間で pn 接合を形成し、その内部電界により正負のキャリアを分離し、電圧を発生させる構造を採用した。

なお、入射面、裏面とも表面を 1050 °C で処理した高品質の酸化膜で覆い、電氣的に不活性化させて半導体界面でのキャリア損失を防ぐ構造を採用した。また、この温度で形成された酸化膜により酸素不純物のサイトが安定化し、Cz-Si の光劣化抑止に効果があることが報告されている¹²⁾。集光太陽電池では、この光劣化の速度が速いと推定されるため、効果が期待される。

裏面はその酸化膜に対しランダムに分布するポイントコンタクト窓を通して裏面電極に接続するといった独自構造を採用した。これは裏面電極をミラーとして使用し、ベース層の厚みで吸収されきれなかった長波長領域の入射光を入射面側へ再反射させることにより利用率を高めること、半導体・金属界面の面積をできるだけ少なくして界面起因の損失をできるだけ低減させることを目的としている。

以上、低コストにて高集光動作を実現させるためのデバイス構造上の工夫を述べた。以下、高集光太陽電池の効率を上げるために重要な、入射面側の電極配置について詳述する。

3. 電極の配置

3.1 背景

電極配置に関しては、従来、電極抵抗によるジュール損失と電極が遮蔽する日射量とのバランスから最適化計算を行う手法が一般的であった。この方法は通常、非集光太陽電池に対しては精度よい結果を与えるものの、高集光太陽電池では照射面に発生する表面電位むらを考慮に入れていないため、Si 太陽電池に対しては実際の変換効率よりも低い値を⁵⁾、高い電圧が得られる一族太陽電池では実際の変換効率よりも高い値を与えることが報告されている⁸⁾。本研究ではこれらの欠点を改良した新手法の電極設計方法を開発した。この手法はもとも宇宙用化合物集光太陽電池での集光むらによる変換効率低下を解決する手法として筆者らにより開発されたものであるが⁵⁾、モデルおよび手法自体は一般性が高く、Si 太陽電池にも適用させることができると想定した。

まず、本モデル (分布ダイオードモデル) の概要を述べ、モデルの検証、設計への応用の順に論を進める。

3.2 モデル概要

櫛型電極間の midpoint より電極に向かって X 軸を想定する。エミッタ表面の電流およびベース層を基準とした表面電

位の分布は下記の微分方程式で記述される．

$$\frac{dV}{dX} = -RI \quad (1)$$

$$\frac{dI}{dX} = J(V) \quad (2)$$

ここに、 R はエミッタのシート抵抗、 $J(V)$ はエミッタに流入する電流密度である。 $J(V)$ は接合のダイオード特性により規定される関数であり、これにより、本モデルを分布ダイオードモデルと称している。また、 I, V は位置 X の関数である。

上記連立微分方程式は数値計算により解くことができる。解析解は存在しなかった。しかしながら、物理現象の定量的な解析および設計の目的には、一般的な解析式として表現することが好ましい。そこで、微分方程式を汎用性のある無次元関数化し、その解関数 $f(x, l)$ に太陽電池の基礎特性量を作用させることとした。表面電流 I および電圧 V は以下の方程式で記述された。

$$I(x) = cJ_{sc} f(x, l) \quad (3)$$

$$V(x) = V_{oc0} - \frac{nkT}{q}(x - \ln(c)) - R_{ad}cJ_{sc} f(x, l) \quad (4)$$

$$l = \sqrt{\frac{RJ_{sc}cq}{nkT}}L \quad (5)$$

x は開放電圧との差を熱等価電圧により規格化することにより得られる無次元化電圧、 l は無次元化電極ピッチ、 R はエミッタのシート抵抗、 V_{oc0} は非集光における開放出力電圧、 J_{sc} は非集光時の短絡電流密度、 c は集光倍率、 q は単位電荷、 n はダイオード理想因子、 k はボルツマン定数、 T は動作温度、 L は電極のハーフピッチを示す。 R_{ad} はエミッタ以外の直列抵抗成分を示し、集光倍率 c との積 cR_{ad} は太陽電池の規格化内部抵抗に相当する。 $f(x, l)$ は以下の(6) (7)式で与えられる無次元化微分方程式の解である。この方程式もまた解析解が存在しなかった。しかしながら、無次元化方程式で一般化させてあるため、実用的には数値方程式を解くのではなく、解を数表として与え、Bicubic Spline 関数などで補間することができる。本論ではすべてこの補間法に拠った。

$$\frac{dv}{dx} = -f(x, l) \quad (6)$$

$$\frac{d}{dx} f(x, l) = 1 - \exp(v) \quad (7)$$

なお、(3)、(4) 式では無次元化関数 $f(x, l)$ と太陽電池

の特性量、たとえば V_{oc0} や J_{sc} とが初等関数で結合されている。これは、任意の太陽電池にて特性量を代入すれば同一の基礎方程式で議論できることを示しており、解析手法として有用であることを示していると解釈できる。

以上で、分布ダイオードモデルによる電流・電圧分布を求めることができた。太陽電池の性能にとって重要なのは出力される電力であり、これは(3)、(4)式の $I(x)V(x)$ 積を最大化させる x を求める最適化問題に還元される。

3.3 モデル検証

宇宙用(衛星搭載用) - 族化合物2接合・3接合太陽電池による集光式発電システムでは、高集光領域、集光むらが発生した場合の変換効率低下問題および電流・電圧特性の変化について、本手法に用いられる分布ダイオードモデルが現象を定量的に説明することは、既に筆者らが報告済みである^{8),9)}。集光 Si 太陽電池では出力電圧がこれらの電池の1/3であり、分布ダイオードの作用もこれらと異なっていると予想される。以下、集光 Si 太陽電池への本モデル適用の妥当性について論ずる。特に、設計への応用を考慮し、本手法にて設計された太陽電池の集光照射における変換効率がモデルで予測された値に一致しているか否か、従来からのパワロス計算に基づく設計と比べて、設計精度がどう改善されたかに注目する。

Fig.3 に太陽電池の設計に頻用されているパワロス計算と本手法(分布ダイオードモデル)にて、変換効率を集光倍率の関数として計算し、実際に試作した太陽電池での計測結果と比較した結果を示す。なお、図には分布ダイ

Fig. 3. Comparison of typical resistance models in efficiency trend to concentration ratio.

オード効果によるエミッタ電位の不均一性を考慮に入れないものの等価回路（非線形）を厳密に数値計算で最適化（最大出力を与える動作点を解く）する手法で計算した結果も併せて示す。なお、計算に用いた各部抵抗成分の値は試作太陽電池から計測した値を用いた。本手法（分布ダイオードモデル）によるシミュレーションが動作点付近の効率の値、最大効率を与える集光倍率の2点において最も誤差が小さい。また、従来からの手法では、これまで報告されているように⁵⁾、実際の効率よりも低い値の効率を計算していることが確認された。なお、本実験結果で観察された高集光領域での変換効率の急激な低下によるシミュレーション結果との乖離は、少数キャリアの高注入による接触抵抗の急激な増加によるものと推定する。その根拠は以下の4点であり、よって電極の焼成条件、 $n +$ 層（エミッタ）のP拡散プロファイルを調整することにより回避は可能であると考えられ、モデルの妥当性を失うものではないと考える。

- (1) 試作時のエミッタシート抵抗が低いほど効率が急激に減ずる地点の集光倍率が高いこと。表面ドナー濃度が高いほど擬フェルミ準位のシフトによる金属半導体間の障壁厚み増大による接触抵抗急増発現までの閾値が高いといった現象が関与していると見られる。
- (2) 効率が急激に減じた集光倍率での電流・電圧特性に対し一般最小自乗法による局所的な等価回路パラメータフィッティングを行い、直列抵抗成分を求めたところ、注入電流量が大きいほど等価抵抗が増大していたこと。同様に微分導電率値（ $-dI/dV$ ）も、pn接合の特性とは逆に、注入電流量が大きいほど小さくなっていたこと。注入電流量が多いほど擬フェルミ準位のシフト量が大きくなる現象が関与していると見られる。
- (3) 高集光での少数キャリア注入量から計算された擬フェルミ準位のバンドギャップ中央方向への移動量が、金属半導体間の障壁厚みを増し、トンネル電流量を低下させるのに十分な量であることが計算されたこと。
- (4) 効率低下が生じた集光倍率よりさらに高い集光照射では開放電圧の低下が見られたこと。擬フェルミ準位のシフトによりトンネル確率が低下し、キャリアの外部流出に対する内部再結合の頻度が高まったためと解釈される。

3.4 設計への応用

Fig.4 に電極ピッチを変化させた場合、発電性能がどう変化するかを新手法により計算した結果を等高線図にて示す。この図にて等高線は FF （フィルファクター）を示し、電池の出力電力に対する開放電圧と短絡電流積の比と

Fig. 4. Generalized design chart of grid pitch and resistances.

定義される。工学的には負荷を接続した場合、電源性能に対して実際に出力できる割合を示す。無論、内部損失が小さいほど FF の値は大きくなる。縦軸は無次元化された電極ピッチを示す。図中の式において、横軸は集光倍率で規格化された内部抵抗を示す。この場合の抵抗はエミッタ以外の抵抗、たとえば電極抵抗やベース領域の抵抗、半導体・電極界面の接触抵抗などの総和に相当する。エミッタ部位の抵抗と異なり、これらの抵抗は集中定数回路近似できるため、単純加算した後に集光倍率を掛け合わせて規格化抵抗として表現できた。

通常のSi太陽電池では内部抵抗が無視できる場合 FF は0.8となる。高集光動作にて高い効率を維持するためには FF の低下を0.1程度に抑える必要がある。したがって無次元化電極ピッチとしては2.5以下、規格化抵抗としては $2400 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ 以下に設定すればよいことが示された。また、無次元化電極ピッチを短縮して内部損失低減を図る場合、エミッタシート抵抗よりも電極の物理的ピッチを短縮する方が効果的であることも示された。

一般に、電極ピッチを小さくすれば電極自身による日影損失も増大する。Fig.5 に最適ピッチの計算例を示す。図において電極コンタクト部の幅、高さをそれぞれ $10 \mu\text{m}$ としている。また、鍍金による電極幅の広がりも考慮に入れている。これより、電極ピッチとして $500 \mu\text{m} \sim 1 \text{mm}$ が適当であることが示された。

4. 発電性能

4.1 評価方法

500W 高圧キセノンランプからの白色光をミラーおよびアクロマティックレンズにて平行光に変換し、多層膜フィルターにより直達光太陽光スペクトル（AM1.5D 規格）に

Fig. 5. Grid pitch optimization of Si concentrator cell.

変換した .インテグレーターおよび可変絞りを通して面内均斉度を高めた後 ,再びアクロマティックレンズにより色収差を抑えつつ太陽電池に集光照射させた .発電特性は電圧源をスイープさせながら電池から流出する電流量を計測し ,電流・電圧特性を描き ,その電流電圧積の最大値を発電出力とみなした .豊田工業大学における集光光源の校正その他評価システムの詳細については文献 6) を参照されたい .

4.2 結果

Fig.6 に本手法にて設計された太陽電池の集光度と変換効率との関係を示す .光劣化¹²⁾後の安定効率として ,20倍集光で19.3%の変換効率が得られた .

Fig. 6. Conversion efficiency vs. concentration ratio.

4.3 考察

非集光での変換効率は ,低抵抗化の目的で不純物ドーピング量を多くして欠陥密度を高めている関係上 ,非集光太陽電池と比べて高くない .集光度の高まりとともに変換効率が増大し ,20倍の集光倍率で最大19.3%の発電能力となる .なお ,実用的な Cz-Si 材料を用いた高集光太陽電池としては ,アライメントを要するフォトリソグラフィーを3回使用する高コストプロセス集光太陽電池の変換効率20

%²⁾ が現時点での世界記録である .本研究で得られた変換効率はこれに及ばないが ,低コストプロセスでほぼ匹敵する効率が得られた .

集光時の発電効率の増大は ,古典的な理論によれば ,pn接合が光生成キャリアによって ,より強く逆方向にバイアスされることにより開放電圧が増大することにより説明されることが知られている .加えて ,大量に発生する光生成キャリアが結晶および界面の欠陥準位を埋めて一時的に不活性化作用のため ,動的に欠陥密度の低い状態となり , FF (フィルファクター) が改善されることが推定される .事実 ,非集光時のダイオード理想因子は1.5 ~ 2.0程度であるが ,10倍以上の集光倍率では理想ダイオードがとる値である1.0に一致し ,上記推定を裏付けた .しかしながら ,集光倍率が20倍を超える領域では直列抵抗成分による内部損失の影響が甚大となるため効率は急落する .これは Fig.3 に示されているように ,分布ダイオードモデルでも予想された結果である .加えて ,大量に発生 ,注入されたキャリアが生成する電界の作用でエミッタと櫛型電極とのオーミック接触が崩れはじめて接触抵抗も増大するため ,上記傾向にさらに拍車がかかると考えられる .この要因については ,前章のモデル検証において ,高集光倍率での計算と計測値とのずれを考察する段において詳述した .

本セルの高集光における高い変換効率は分布ダイオードモデルを利用した電極設計による .分布ダイオードモデルが変換効率の集光倍率依存性の実測値に一致することは ,Fig.3 で既に示した .電池単位面積あたりの等価直列抵抗 (電流・電圧特性における動作点周囲の一般最小自乗法による局所的カーブフィッティングにより計算) は $90 \text{ m}\Omega/\text{cm}^2$ であった .分布ダイオードモデルから計算されるエミッタ領域の等価直列抵抗は $37.5 \text{ m}\Omega/\text{cm}^2$ であり ,ベース領域の抵抗 $30 \text{ m}\Omega/\text{cm}^2$ (抵抗率 $0.8 \text{ m}\Omega/\text{cm}$,厚さ 0.38 mm のウエハを使用) ,電極抵抗 $10.6 \text{ m}\Omega/\text{cm}^2$ (接触部電極幅 $8 \mu\text{m}$,最大幅 $18 \mu\text{m}$,高さ $5 \mu\text{m}$) の総和 $78.1 \text{ m}\Omega/\text{cm}^2$ に近い .おそらく誤差の $12 \text{ m}\Omega/\text{cm}^2$ は計測端子の接触抵抗およびワイヤー自体の抵抗によるものと推定している .

今後のプロセス最適化により ,この変換効率はさらに増大すると期待される .さらに ,集光倍率を増大させるためには ,基板そのものの抵抗を含めた低抵抗化が必要である .本構造では裏面の反射率が高いため ,薄くスライスした基板を用いても発生電流の低下がほとんどないと考えられ ,高集光化または波長分離による太陽熱併用システム¹³⁾と併せて Si 資源節約にも大きな効果を及ぼすものと考

えられる。

5 . まとめ

集光型 Si 太陽電池はソーラーパネルコストの大部分を占める太陽電池の個数を大幅に減らすことができ、再生可能な太陽エネルギーによる発電の低コスト化に寄与するものと期待される。また、Si 素材の集光利用は Si 資源そのものの消費量も減らし、近い将来、太陽光発電が本格的に普及した時に懸念される Si 原料の安定確保への貢献も期待される。

本研究においては Fig.2 に示した新しいデバイス構造を採用し、その電極配置に分布ダイオード効果に基づく新手法の設計技術を適用することにより、フォトリソグラフィを1回のみ用いるといった低コストプロセスにもかかわらず、20 倍集光で 19.3% の高い変換効率を得ることができた。

(文 献)

1)NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)ホームページ

ページ <http://www.nedo.go.jp/taiyo/jpn>

2)D. S. Ruby et al.: 23rd IEEE PVSC, (1993), 172

3)R. R. King et al.: 23rd IEEE PVSC, (1993), 167

4)J. H. Wohlgemuth et al.: 22nd IEEE PVSC, (1991), 273

5)K. Araki and M. Yamaguchi: Design consideration on resistance balance, BSF, and AR for concentrator Si cells, 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Glasgow, VD3-32, (May 2000), Proceeding is to be published

6)K. Araki et. al.: Characteristics of GaAs based concentrator cells, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, (2000), to be published

7)K. Araki and M. Yamaguchi: A Si concentrator cell by single photolithography step, Sol. Energy Mater. Sol. Cells,(2000), to be published

8)K. Araki and M. Yamaguchi: Parameter analysis on concentrator cells under non-uniform illumination, 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Glasgow, VA3-11, (May 2000), Proceeding is to be published.

9)K. Araki et. al.: AM0 Concentration Operation of - Compounds Solar Cells, Sep. 2000, Paper No. 401.4, to be presented

10)浜川ら:太陽エネルギー工学 (1994) ,78 [培風館]

11)A. Hubner, C. Hampe, A. G. Aberle: Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 46 (1997), 67

12)S. W. Glunz et al.: 11th PVSEC, Sapporo, 1999, 23-A-2-1, 549

13)K. Araki et al.: Energy flow examination on PV generator system using a cold mirror, 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Glasgow, VC3-28, May 2000, Proceeding to be published.