

マルチバンドギャップ太陽電池シミュレーション

SIMULATION FOR MULTI-JUNCTION SOLAR CELLS

脇坂 健一郎*
Kenichiro WAKISAKA

龜田 正明*
Masaaki KAMEDA

松山 隆夫*
Takao MATSUYAMA

田中 誠*
Makoto TANAKA

白玖 久雄*
Hisao HAKU

樽井 久樹*
Hisaki TARUI

中村 昇*
Noboru NAKAMURA

上妻 信一*
Shinichi KOZUMA

西脇 秀則*
Hidenori NISHIWAKI

津田 信哉*
Shinya TSUDA

中野 昭一*
Shoichi NAKANO

桑野 幸徳*
Yukinori KUWANO

Abstract

For further improvement of conversion efficiency in amorphous silicon (a-Si) solar cells, a multi-junction solar cells have been gathered much attention. In this study, we simulated a multi-junction solar cell with crystalline silicon (optical bandgap is 1.1 eV) for a narrow bandgap material of the bottom cell. From our results, it is found that a new type of amorphous silicon/crystalline silicon multi-junction solar cells has high conversion efficiency up to 17%. The present result also provides a guide for further improvement in the characterisitic of a-Si:H films for the front cell and crystalline silicon for the bottom cell.

Key Words : amorphous silicon, crystalline silicon, solar cell, simulation, multi-junction, high efficiency, bandgap

1. 緒言

1975年、英國ダンディー大学の Spear 教授等のグループによってアモルファスシリコン(a-Si)のp/n制御が成功⁽¹⁾して以来、a-Si材料は、太陽電池、センサー、トランジスターなどの分野で広く応用開発がなされてきた。中でも、太陽電池の分野では、1980年、筆者等により世界で初めて工業化され、電卓用電源に応用された⁽²⁾。その後、a-Siの特徴を生かした応用商品が次々に開発され、生産量も大幅に増大してきている。高効率化の取り組みにおいても、超高真空対応の分離形成法『スーパーチャンバ』⁽³⁾やp型のドーピングガス『トリメチルボロン(B(CH₃)₃)』⁽⁴⁾の開発を始めとし、基礎研究の分野において

も目覚ましい発展を遂げてきた。そして最近では、10cm角の実用レベルのセルサイズで、11.1%の変換効率が筆者等により達成されている⁽⁵⁾。

このように急速に変換効率が向上してきたa-Si系太陽電池ではあるが、さらなる変換効率の向上を目指して様々な取り組みがなされている。その一つとして、a-Siとナローバンドギャップ材料との積層による長波長光の有効利用が考えられる。ナローバンドギャップ材料としては、a-SiGe⁽⁶⁾, CuInSe₂⁽⁷⁾さらに結晶系Si⁽⁸⁾などの検討がなされてきている。この分野においては、いろいろな性質の材料を積層するため、最適な太陽電池設計が容易ではない。そこで、計算機を用いた最適設計に関する研究が以前から取り組まれてきている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。しかしながらこれまで、光学的観点からのアプローチはほとんどなされておらず、今後のa-Si太陽電池の高効率化の指針を得るためにには、光学的特性に注目した正確な太陽電池設計が重

原稿受付 平成3年12月13日

*三洋電機(株) 機能材料研究所
〒573 枚方市走谷1-18-13

要と考えられる。そこで、本報告においては、a-Si 太陽電池の高効率化の一環としてマルチバンドギャップタンデム構造を取り上げ、そのナローバンドギャップ材料として結晶系 Si を対象に考え、Si/Si 系 タンデム構造太陽電池のモデリングを行った。Si 材料は、資源量、公害の点からも有利な材料であり、これまでの大まかなシミュレーション結果から、光学的バンドギャップ (E_{opt}) 1.1 eV と 1.7 eV の組み合わせのタンデムセルが最高の効率が得られると見積られている⁽¹⁾。この組み合わせが、今回モデリングの対象とした Si/Si 系タンデム構造である。さらに、結晶系 Si は、薄膜 polycrystalline-Si などに代表される将来の超高効率薄膜太陽電池材料の有力候補の一つとして、現在、研究開発が盛んに行われている材料でもある⁽¹⁾⁽²⁾。特に薄膜である a-Si と、薄膜 polycrystalline-Si を組み合わせたタンデムセルは、材料コスト、製造エネルギー、製造工程等が少なく低コスト且つ、高効率太陽電池として非常に有望な太陽電池である。したがって、この Si/Si 系マルチバンドギャップタンデム構造太陽電池のモデリングを行なうことは将来的に大変有意義である。

今回の計算においては、マルチジャンクションタンデム構造太陽電池の最適設計のうち、光学的设计の観点から、結晶系 Si をボトムセルに用いた場合のトップセル a-Si 層に要求される特性に着目して検討を行った。

2. 結果及び考察

2-1 計算の前提条件

モデリングに用いた太陽電池構造を図 1 に示す。電気的に 2 つの発電層が直列に接合した 2 端子セル構造と、電気的には各発電層個別に出力を取り出す構造の 4 端子セル構造のそれぞれについて検討を行った。

結晶系 Si の光学的バンドギャップ E_{opt} を 1.1 eV と仮定し、a-Si 層側の種々の特性をパラメータとして計算を行った。入射光は、AM 1.5, グローバルとし、入射光に対して、図 2 に示すように、太陽電池各構成部分における多重反射の効果を含め、且つ、透明電極 (TCO) / a-Si 界面での TCO のテクスチャの効果を含めた光吸收を以下のように仮定した⁽³⁾。

垂直に対する角度 θ 、厚さ d の膜中を透過する光は、 $d/\cos \theta$ の有効拡散長を有する。したがって、

光散乱面の凹凸がランダム分布と仮定すると、散乱光は、 $I = I_0 \cdot \cos \theta$ のランバート則に従い、膜の有効吸収量 A_{eff} は、

$$A_{eff} = \int_{\theta=0}^{\pi/2} A(\theta) \cdot \frac{dP(\theta)}{P_i} \quad (1)$$

と書き表すことができる。ここで、

$$A(\theta) = (1 - e^{-\alpha d \cos \theta}) \quad (2)$$

α は膜の光吸収係数、 $dP(\theta)/P_i$ は、角度 θ における散乱した入射光 P_i の割合で、

$$\frac{dP(\theta)}{P_i} = 2 \sin \theta \cdot \cos \theta \cdot d\theta \quad (3)$$

となる。また、a-Si の光吸収係数を次のように仮定した。

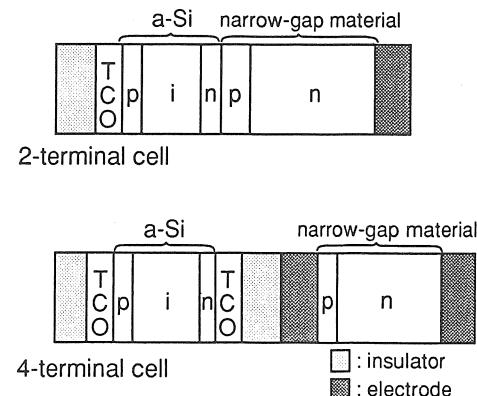


図 1 計算に用いたマルチバンドギャップタンデム構太陽電池

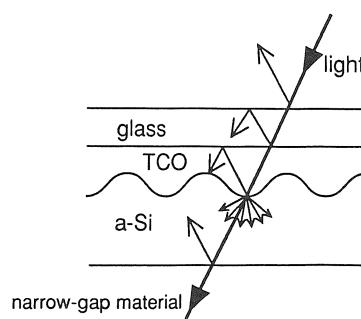


図 2 計算に用いた光の散乱及び反射のモデル

散乱光
膜の

(1)

(2)

走査に

(3)

に仮

al

構

 $h\nu > E_{opt}$ において

$$\alpha h\nu = B (h\nu - E_{opt})^2 \quad (4)$$

 $h\nu < E_{opt}$ においては

$$\alpha = \alpha_0 \exp\left(-\frac{E_{opt} - h\nu}{E_{ch}}\right) \quad (5)$$

ここで、 $h\nu$ ：フォトンエネルギー、 E_{opt} ：光学的バンドギャップ、 α ：光吸収係数、 α_0 ：定数、 B ：定数（B値）、 E_{ch} ： $a-Si$ バンド端の特性エネルギーである。

以下に、計算の条件をまとめると。

まず、計算の前提として、 $a-Si$ の光吸収係数は

$$\alpha h\nu = B (h\nu - E_{opt})^2$$

を仮定している。計算の条件としては、

(1) $a-Si$ 膜の光学的特性（屈折率、B値、 E_{ch} ）をパラメータ

(2) 多重反射の効果を含めた光吸収を考慮

(3) 結晶系 Si の光吸収係数は、実測のデータを使用

を用いた。なお、その他の仮定したパラメータについては表1に示す。すなわち、 $a-Si$ セルの電気的特性は現状のセル特性を反映させるため、 V_{oc} は E_{opt} に依存し、F.F.は膜厚に依存するという実験データを使用しており、 I_{sc} は内部収集効率を100%と仮定して計算を行った。さらに、結晶系 Si の V_{oc} 、F.F.は現状のキャストpoly-Siの値を用い、 I_{sc} については $a-Si$ と同様に内部収集効率を100%と仮定している。これらの条件に基づき、図1に示す2端子及び4端子セルについて計算を行った。

2-2 $a-Si$ トップセルに要求される特性

2-2-1 $a-Si$ 側 i 層バンドギャップの影響

タンデム構造太陽電池特性に大きく影響を与えると考えられるトップセル $a-Si$ 層のバンドギャップの影響について、まず検討を行った。

$a-Si$ 側の i 層のバンドギャップを変化させたときの2端子セルと4端子セルの変換効率の変化について、図3に示す。ここで、計算に用いた主な層の屈折率は、 $a-Si = 3.5$ 、結晶系 $Si = 3.6$ 、絶縁膜

=1.5と仮定した。これらは、いずれも一般的な値である。

その結果、4端子セルでは、電流律速による効果、すなわち、 $a-Si$ 層と結晶系 Si 層とを直列に接続することにより、セル全体の電流値が各部分の発生電流の小さい方に律速される効果がないために、 $a-Si$ 層の i 層のバンドギャップの変化に対し、変換効率はやや単調減少の傾向にあるものの、大きな変化はない。これに対して、2端子セルでは、 $a-Si$ 側 i 層バンドギャップに対し、最適点を有する曲線を描き、

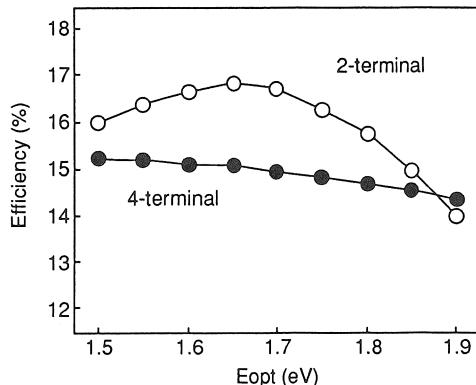
表1 計算に用いたパラメータ（1）

(a) $a-Si$

E_{opt}	$p : 2.0\text{eV}$ $i, n : 1.5 \sim 1.9\text{eV}$
V_{oc}	depend on E_{opt} (i layer) (0.9V at 1.7eV)
F.F.	depend on thickness
I_{sc}	inner collection eff. : 100%

(b) refractive index

a-Si	3.5
TCO	2.0
SiO_2	1.5
Anti-reflection coating material	1.0 ~ 2.0
narrow-gap material	3.6

図3 2端子及び4端子セル変換効率の $a-Si$ （トップセル） i 層バンドギャップ依存性

最適点の a-Si (トップセル) i 層バンドギャップは、1.7 eV 付近であった。また、ここで注目すべき点は、2 端子セルが 4 端子セルを上まわっている点である。これは、光学的観点でのセル構造の差が現れたものと考えられる。すなわち、4 端子セルでは、直列にセルが接続されていないために a-Si 層と、結晶系 Si 層との間に、透光性絶縁膜を挿入しており、そこでの屈折率の差による光の損失が無視できなくなつて、図 3 における 2 端子セルの最適点での変換効率と 4 端子セルでの変換効率の差となって現れているものと考えられる。このような結果は、これまでの報告では得られていない重要な知見である。

そこで、4 端子セルにおける a-Si 側より入射した光の長波長光成分が透過し、ナローバンドギャップ材料である結晶系 Si 側へ入射する部分を、2 つの発電層を光学的に接合する部分としてとらえ、この光学的接合部分の屈折率依存性の結果を示したのが、図 4 である。ここでは、SiO₂ の屈折率を 1.5 とし、絶縁型 ARC (Anti-reflection coating) の屈折率を 1.0 から 3.0 付近まで変化させた。絶縁型 ARC はシリコンオイル等を想定している。図から明らかなように、絶縁型 ARC の屈折率が増大するにつれて 4 端子セルの変換効率は向上している。この結果からも、4 端子セルにおいて光学的接合部分での光損失がマルチバンドギャップセルの特性に重要であることがわかった。

2-2-2 テクスチャの効果

次に、テクスチャの効果について検討を行った。a-Si 層のバンドギャップを横軸にとって、a-Si 側の i 層膜の光吸収に関与する特性 (B 値、バンド端の特性エネルギー (E_{ch})) とテクスチャの有無が、変換効率に与える影響についての計算結果を、図 5 に示す。図中、実線で示される B 値が 900 [eV · cm]⁻¹、E_{ch} が 50 meV という a-Si 膜の光学的特性は、極めて標準的な a-Si 膜である。また、この実線の例は、テクスチャ構造を用いない一般的な a-Si トップセルの例である。

この図において、a-Si 膜の i 層バンドギャップの変化に対して、4 端子セルでは変換効率はほとんど変化しないことがわかる。更に、4 端子セルにおいては、一定の B 値、E_{ch} の条件下テクスチャの効果が認められ、そして、B 値及び E_{ch} が向上すると変換効率も向上することがわかる。すなわち、4 端子セルにおいては、a-Si 層の i 層膜の B 値、E_{ch} 及びテクス

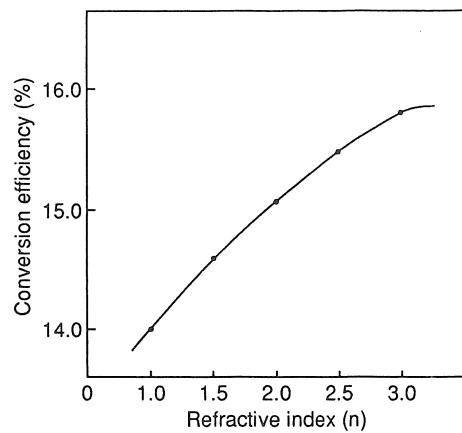
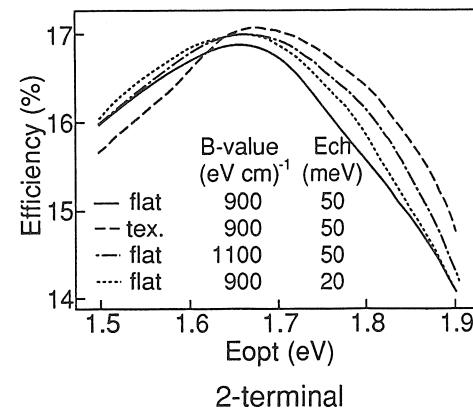
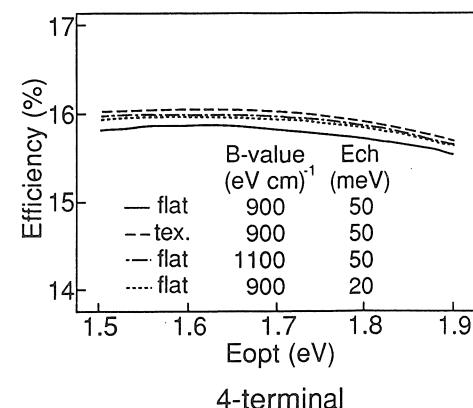


図 4 4 端子セルにおける変換効率の光学的接合部の屈折率依存性



2-terminal



4-terminal

図 5 2 端子及び 4 端子セル変換効率と a-Si (トップセル) i 層の光学的特性 (B 値、E_{ch}) およびテクスチャとの関係

チャの効果に対して、それぞれ寄与が認められる。したがって、4端子セルでは、これらのa-Si膜特性の効果はa-Si側での変換効率の向上として、全体の変換効率向上へ寄与する。

これに対し、2端子セルでは、4端子セルの場合と異なる結果が得られた。2端子セルにおいては、a-Si側i層のバンドギャップ変化に対して、a-Si膜のi層特性(B値、 E_{ch})、テクスチャ効果の効率への寄与が変化している。すなわち、i層バンドギャップ1.65eVにピークを有する曲線になっている。テクスチャの効果については、i層バンドギャップが、1.65eV以上において顕著にその効果が現れていることから、長波長光成分に対しては、テクスチャ効果が大きく影響することを示している。また、i層のB値および E_{ch} の向上についても、バンドギャップ1.8eV以上において大きいこともわかる。ここで、テクスチャ有りの2端子セルでa-Siセルのバンドギャップが小さい場合に変換効率が低下しているのは、テクスチャにより見かけ上のp層膜厚が増え、p層での光の吸収が増加したことによるものと考えられる。

2-3 ナローバンド材料膜特性とマルチバンドギャップ太陽電池特性

次に、結晶系Siの膜特性(少数キャリアの拡散長)がマルチバンドギャップ太陽電池の変換効率に与える影響について検討を行った。

計算の前提としては、結晶系Siで且つ階段型pn接合を仮定した。さらに計算の条件は、

- (1) 少数キャリア拡散長をパラメータ
- (2) a-Si側の特性(屈折率、B値、 E_{ch})は固定
- (3) 多重反射の効果を含めた光吸収を考慮
- (4) 光吸収係数は前節同様に実測のデータ

である。以下にその時の基本式⁽¹⁴⁾と、表2に用いたパラメータの主なものを示す。

p層、空乏層、n層の厚さをそれぞれ d_p 、W、 d_n とする。

(I) p層

p層の表面に単位時間、単位面積当たり波長λのフォトンがF個入射したとすると、少数キャリア(電子)連続の方程式は

$$F \cdot \alpha \cdot \exp(-\alpha x) = 0 \quad (6)$$

表2 計算に用いたパラメータ(2)

Narrow-gap material(c-Si)

Opt	1.1eV
Diffusion length of minority carrier : L	1~200 μm
Junction depth	0.5 μm
Thickness : d	d=3L

となる。ここで、 D_n : 電子の拡散定数、 α : 波長 λ における光吸収係数、 Δn_p : 過剰少数キャリア(電子)濃度、 τ_n : 電子のライフタイムである。

短絡電流(電子電流) j_{SCn} の式は、

$$j_{SCn} = I_p (\lambda, L, d_p) \quad (7)$$

で与えられる。ここで、 I_p : p層発生電流、L: 少数キャリアの拡散長($L = (D \tau)^{1/2}$)である。

(II) 空乏層

空乏層内には、空間電荷による強い内蔵電荷があるため、少数キャリアの再結合はほとんど無視できる。従って、空乏層内で励起されるキャリアによる光電流は、

$$j_{dep} = I_{dep} (\lambda, W) \quad (8)$$

となる。ここで、 I_{dep} : 空乏層発生光電流、W: 空乏層の厚さである。

(III) n層

n層における少数キャリア連続の式は、

$$D_p \frac{d^2 \Delta p_n}{dx^2} - \frac{\Delta p_n}{\tau_p} + F \cdot \exp[-\alpha(d_p + W)] \times \alpha \cdot \exp(-\alpha x) = 0 \quad (9)$$

となる。ここで、 D_p : 正孔の拡散定数、 Δp_n : 過剰少数キャリア(正孔)濃度、 τ_p : 正孔のライフタイムである。

正孔電流 j_{SCp} は

$$j_{SCP} = I_n (\lambda, L, d_n) \quad (10)$$

となる。 I_n : n層発生光電流, d_n : n層の厚さである。

以上より、全短絡光電流は、(7), (8), (10)式の和として求められる。

$$I(\lambda, L, d) = I_p + I_{dep} + I_n \quad (11)$$

これを積分して

$$I_{sc}(L, d) = \int I(\lambda, L, d) d\lambda \quad (12)$$

となる。ここで、 λ : 波長, L : 少数キャリアの拡散長, d : 膜厚である。

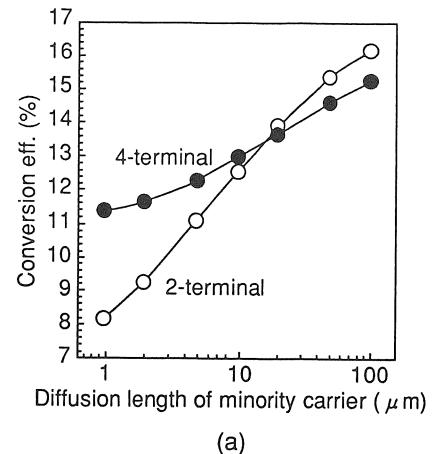
また、結晶系 Si 層部分の開放電圧 V_{oc} は

$$V_{oc} = \frac{n k T}{q} \ell_n \{ (I_{sc}/I_0) + 1 \} \quad (13)$$

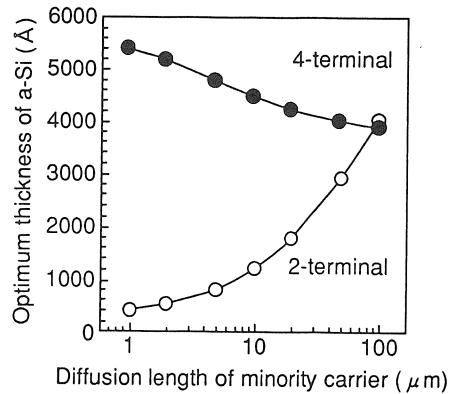
と仮定した。ここで、 n : 電子密度, k : ボルツマン定数, T : 絶対温度, q : 電子の電荷量, I_{sc} : 短絡電流, I_0 : p/n 接合の逆方向飽和電流である。

以上の仮定に基づき、a-Si 層の膜厚をパラメータとして最適化を行い、2端子セル及び4端子セルでの結晶系 Si 層の少数キャリア拡散長を横軸に、これに対する変換効率変化を図 6 (a) に、a-Si 層の最適膜厚の少数キャリア拡散長に対する変化を図 6 (b) に示す。本研究においては、a-Si/薄膜 poly-Si タンデム構造開発指針を得ることを目的としているため、現状の結晶系バルク (厚膜) Si 中の少数キャリア拡散長は 100 μm 以上⁽¹⁵⁾ なので、ここでは特に、100 μm 以下の領域に注目した。

図 6 (a) より、少数キャリア拡散長の小さい領域 (< 10 μm) では、4端子セルが有利であり、少数キャリア拡散長の大きい領域 (> 10 μm) では、2端子セルが有利であることがわかる。次に、図 6 (b) より、4端子セルでは、最適膜厚に大きな変化はなく a-Si 層自身の最適膜厚程度のものであるが、これに対し、2端子セルでは、電流律速があるために、少数キャリア拡散長に大きく依存した最適膜厚を示している。ただし、本報告においては、a-Si の光吸収係数を式 (4) に基づき計算を行っているが、最近 a



(a)



(b)

図 6 結晶系 Si (ボトムセル) 中の少数キャリア拡散長と変換効率および a-Si 層最適膜厚の関係

a-Si の光吸収係数のより精密な導出法が見い出されている⁽¹⁶⁾。この報告によれば、式 (4) は、a-Si 層の長波長側の光吸収係数を過小評価している可能性がある。そのため、実際の a-Si 層の最適膜厚は図 6 よりやや薄くなる傾向にあることが考えられる。

3.まとめ

アモルファスシリコン太陽電池の高効率化の一環として、a-Si/結晶 Si 系新材料によるマルチバンドギャップ太陽電池のモデリングを行い、a-Si 層に要求される特性に着目して、2端子セル構造、4端子セル構造の双方について計算機シミュレーションを行った。その結果、以下のような定量的光学設計の指針を得た。

- (1) 2端子セルにおいては、第1層のa-Si膜1層のバンドギャップ1.7eVに最適点をもち1.7eV以上で顕著にテクスチャの効果が現れる。
- (2) 4端子セルにおいては、光学的接合部の屈折率が重要である。
- (3) マルチバンドギャップセルの第2層の少数キャリア拡散長が、 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以下では4端子セルが、 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以上では2端子セルの方が変換効率が高い。
- (15) 電気学会編：太陽電池ハンドブック、コロナ社(1985)207.
- (16) Y.Hishikawa,N.Nakamura,S.Tsuda,S.Nakano,Y.Kishi and Y.Kuwano: Jpn.J.Appl.Phys.,30(1991)1008.

謝辞

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、NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）から委託され実施したもので、関係各位に感謝する。

参考文献

- (1) W.E.Spear and P.G.LeComber:Solid State Commun.,17(1975)1193.
- (2) Y.Kuwano and M.Ohnishi:Proc. 9th International Conference on Amorphous and Liquid Semiconductors(1981)1155.
- (3) S.Tsuda,T.Takahama,M.Isomura,H.Tarui,Y.Nakashima,Y.Hishikawa, N.Nakamura,T.Matsuoka,H.Nishiwaki,S.Nakano,M.Ohnishi and Y.Kuwano: Jpn.J.Appl.Phys.,26(1987)33.
- (4) H.Tarui,T.Matsuyama,S.Okamoto,H.Dohjoh,Y.Hishikawa,N.Nakamura, S.Tsuda,S.Nakano,M.Ohnishi and Y.Kuwano:ibid,28(1989)2436.
- (5) K.Wakisaka,H.Haku,M.Taguchi,K.Sayama,S.Tsuge,H.Dohjoh, Y.Hishikawa,M.Isomura,N.Nakamura,S.Tsuda,N.Nakano,Y.Kishi and Y. Kuwano:to 22nd IEEE Photovoltaic Specialist Conf.(1991)1254.
- (6) H.Haku,K.Sayama,Y.Nakashima,T.Takahama,M.Isomura,H.Tarui, Y.Hishikawa,S.Tsuda,S.Nakano,M.Ohnishi and Y.Kuwano: Jpn.J.Appl. Phys.,26(1987)1978.
- (7) K.Mitchel,R.Potter,J.Ermer,R.Wieting,G.Eberspacher, D.P.Tanner,K. Knapp and R.Gay:Proc. 19th IEEE Photovoltaic Specialists Conf.(1987) 13.
- (8) H.Takakura,K.Miyagi,T.Kanata,H.Okamoto and Y.Hamakawa: Proc.4th Int'l PVSEC(1989)403.
- (9) S.Yamanaka,M.Konagai and K.Takahashi:Jpn.J.Appl.Phys., 28(1989) 1178.
- (10) Y.Hamakawa,Y.Matsumoto,M.Okuyama,H.Takakura and H.Okamoto: Proc. 7th E.C. Photovoltaic Energy Conf.(1986)572.
- (11) T.Matsuyama,K.Wakisaka,M.Kameda,M.Tanaka,T.Matsuoka, S.Tsuda,S. Nakano,Y.Kishi and Y.Kuwano:Jpn.J.Appl.Phys., 29(1990)2327.
- (12) K.Wakisaka,M.Taguchi,T.Sawada,M.Tanaka,T.Matsuoka, T.Matsuoka, S.Tsuda,N.Nakano,Y.Kishi and Y.Kuwano 22nd IEEE Photovoltaic Specialist Conf. (1991)887.
- (13) H.Schade and Z.E.Smith:J.Appl.Phys.,57(1985)568.
- (14) 高橋,浜川,後川:太陽光発電,森北出版(1980)59