

## HIT 太陽電池の特性改善についての検討

岡崎健伍<sup>\*1</sup>・中村 勲<sup>\*2</sup>・磯村雅夫<sup>\*3</sup>

### Improvement of Heterojunction with Intrinsic Thin Layer (HIT) Solar Cells Studied by Optical Simulation

by

Kengo OKAZAKI, Isao NAKAMURA and Masao ISOMURA

( Received on September 30 , 2006 & accepted on January 24 , 2007 )

#### Abstract

We have developed an optical simulation method to predict the performance of heterojunction with intrinsic thin layer (HIT) solar cells. In this simulation, the energies of reflected and absorbed light in each layer are calculated using the wave equations of electromagnetic waves. The HIT solar cells have combined structures with thin and thick layers. Therefore, we have developed a simulation technique, in which interference effects occur only in thin layers and average intensity is considered in thick layers. The simulation predicts the amount of absorbed light in each layer of the HIT solar cells. The results show that TiO<sub>2</sub> antireflective (AR) layers enhance the current density by about 1.3 mA/cm<sup>2</sup>, and that one of the problems of HIT solar cells is the optical absorption in p, i and n-type amorphous silicon (a-Si) layers. In accordance with the simulation results, we have developed wide-gap hydrogenated a-Si by reactive sputtering using Ar-H<sub>2</sub> mixture gases. The simulation predicted that the current density of HIT solar cells can be improved by 1.5 mA/cm<sup>2</sup> using the developed a-Si, compared with using the conventional wide-gap a-Si.

*Keywords: Solar cells, Silicon, Optical simulation, Magnetron sputtering, Absorption coefficient*

#### 1. 緒言

地球環境保全、原油価格高騰が問題となる中、クリーンで無尽蔵な太陽エネルギーが注目されている。そこで太陽エネルギーを電気エネルギーに直接変換できる太陽電池が期待されている。その中で高効率太陽電池として、三洋電機株式会社が開発を進めている単結晶 Si (c-Si) と非晶質 Si (a-Si) のヘテロ接合を有する Heterojunction with intrinsic thin layer (HIT) 太陽電池が注目されている<sup>1)</sup>。HIT 太陽電池の構造図を Fig.1 に示す。HIT 太陽電池は、n 型 c-Si ウエハーの両面に a-Si と Transparent conductive oxide (TCO) を成膜し、その上に櫛形集電極を設置した表裏対称構造をしている。そのため、セルの表裏面にかかるストレスが均一になる利点がある。また、一般的な結晶太陽電池では、pn 接合形成に 800°C 以上の高温プロセスが必要なのに対し、HIT 太陽電池では、200°C 以下

での低温プロセスで製造が可能のため、熱ダメージに起因するウエハーの反りや割れを抑制できるため基板の薄膜化に有利である。

HIT 太陽電池の特長は、エネルギーギャップの大きい a-Si と c-Si とで形成された接合部に電位障壁を持ったヘテロ界面を形成すること、及び両層間にドーパントを含まない i 型 a-Si の挿入でドーパントの相互混入による接合部での不要な不純物準位を抑制することで、光誘起キャリアの逆拡散による再結合を防ぐことにある。これらの特長は、発電層である n 型 c-Si で発生した光誘起キャリアの拡散による電荷分離を促進するため、高い開放電圧の発生に寄与している。

本研究では、HIT 太陽電池の更なる高効率化のための特性改善を検討するために HIT 太陽電池の特長である、厚膜層と薄膜層を組み合わせた構造に適用できる光学シミュレーション法の開発を行った。またシミュレーションの結果を踏まえ、a-Si 層の光吸収による発生電流値の低減を抑制するため、従来にない低吸収ワイドギャップ a-Si の作製を試み、その効果

\*1 工学研究科電気電子システム工学専攻修士課程

\*2 電気電子工学科特定研究員

\*3 電気電子工学科教授

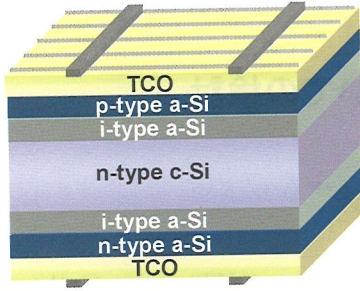


Fig.1 The Structure of HIT solar cells

について検討を行った。

## 2. 光学シミュレーション

HIT 太陽電池は、厚膜層であるガラス層と結晶 Si ウエハー、薄膜層である TCO と p, i 及び n 型 a-Si が積層した構造をもっている。薄膜層では、光の干渉を考慮することは非常に重要であるのに対し、厚膜層では光の干渉を考慮するとシミュレーション結果に光の干渉が過度に起こってしまうという問題がある。そのため、厚膜層では光の干渉を考えずに平均化した値を算出する事が重要となる。そこで、厚膜層と薄膜層の両方の長を考慮することのできるシミュレーション法の開発を行った。

### 2.1 薄膜層のシミュレーション手法

本シミュレーションでは、光の伝播による位相変化、減衰及び界面での多重反射を考慮するために、複素屈折率を用いたフレネル係数及び、光の電界の波動方程式を解くことで各膜中の光吸収量を求める。Fig.2 に示す三層の薄膜モデルを例に用いて、透過、反射、各層の光吸収量を任意の光波長において求める手法について具体的に説明する。尚、この三層の薄膜モデルは Fig.1 に示す HIT 構造の表面側の TCO、p 型 a-Si と i 型 a-Si の薄膜層と裏面側の i 型 a-Si、n 型 a-Si と TCO の薄膜層に対応した計算である。

この三層薄膜モデルの左方から電界強度  $E_0$  の光が入射したと仮定し、各界面を出た光の電界強度を  $E_1, E_2, E_3, E_4, E_5, E_6, E_7, E_8$  とする。ここで、 $d$  は各層の膜厚、 $\bar{n}$  は各層の複素屈折率である。複素屈折率  $\bar{n}$  は実数部の屈折率  $n$  と消衰係数  $k$  により、 $\bar{n} = n - ik$  と表せる。

各界面に入射した光はフレネル係数を用いることで反射光の電界振幅強度及び透過光の電界振幅強度を求めることができる。以下に界面に対し垂直に光が入射した時の各界面でのフレネル係数を示す。透過のフレネル係数は  $t_{i\pm}$ 、反射のフレネル係数は  $r_{i\pm}$  で表され、符号は各界面での光の入射方向を示し、左から入射した場合は正、右から入射した場合は負で表した。

[反射のフレネル係数(振幅反射率)]

$$r_{1\pm} = \pm \frac{\bar{n}_0 - \bar{n}_1}{\bar{n}_0 + \bar{n}_1} \dots (1) \quad r_{2\pm} = \pm \frac{\bar{n}_1 - \bar{n}_2}{\bar{n}_1 + \bar{n}_2} \dots (2)$$

$$r_{3\pm} = \pm \frac{\bar{n}_2 - \bar{n}_3}{\bar{n}_2 + \bar{n}_3} \dots (3) \quad r_{4\pm} = \pm \frac{\bar{n}_3 - \bar{n}_4}{\bar{n}_3 + \bar{n}_4} \dots (4)$$

[透過のフレネル係数(振幅透過率)]

$$t_{1+} = \frac{2\bar{n}_0}{\bar{n}_0 + \bar{n}_1} \dots (5) \quad t_{2+} = \frac{2\bar{n}_1}{\bar{n}_1 + \bar{n}_2} \dots (6)$$

$$t_{3+} = \frac{2\bar{n}_2}{\bar{n}_2 + \bar{n}_3} \dots (7) \quad t_{4+} = \frac{2\bar{n}_3}{\bar{n}_3 + \bar{n}_4} \dots (8)$$

$$t_{1-} = \frac{2\bar{n}_1}{\bar{n}_0 + \bar{n}_1} \dots (9) \quad t_{2-} = \frac{2\bar{n}_2}{\bar{n}_1 + \bar{n}_2} \dots (10)$$

$$t_{3-} = \frac{2\bar{n}_3}{\bar{n}_2 + \bar{n}_3} \dots (11) \quad t_{4-} = \frac{2\bar{n}_4}{\bar{n}_3 + \bar{n}_4} \dots (12)$$

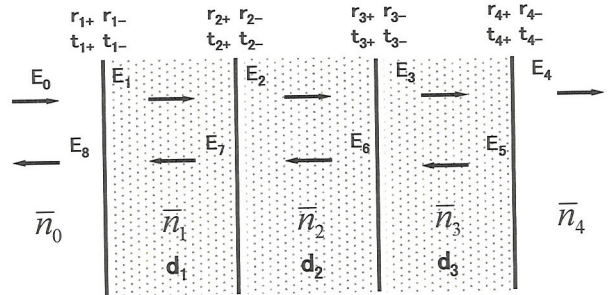


Fig. 2 A model of three-layers thin films

また、光が膜中を距離  $x$  だけ進行するとき、電界強度の位相変化と減衰は、 $\exp(-i\frac{2\pi\bar{n}}{\lambda}x)$  で表される。ここで、 $\lambda$  は光の波長である。

次に  $E_1$  を例にその他の電界との関係について考えると、 $E_1$  は透過した  $E_0$  と反射した  $E_7$  を合わせたものであると考えられる。透過してきた  $E_0$  は  $t_{1+} \cdot E_0$ 、また反射してきた  $E_7$  は反射と  $d_1$  の距離を進行してきた際に変化した位相の変化と減衰を考慮し

$$r_{1-} \cdot \exp(-i\frac{2\pi\bar{n}_1}{\lambda}d_1)E_7 \text{ となる。}$$

よって、 $E_1$  は次式で表わせる

$$E_1 = t_{1+} \cdot E_0 + r_{1-} \cdot \exp(-i\frac{2\pi\bar{n}_1}{\lambda}d_1)E_7 \dots (13)$$

同様にして  $E_2 \sim E_8$  は以下のように表せる。

$$\begin{aligned}
 E_2 &= t_{2+} \cdot \exp(-i \frac{2\pi\bar{n}_1}{\lambda} d_1) E_1 \\
 &\quad + r_{2-} \cdot \exp(-i \frac{2\pi\bar{n}_2}{\lambda} d_2) E_6 \\
 E_3 &= t_{3+} \cdot \exp(-i \frac{2\pi\bar{n}_2}{\lambda} d_2) E_2 \\
 &\quad + r_{3-} \cdot \exp(-i \frac{2\pi\bar{n}_3}{\lambda} d_3) E_5 \\
 E_4 &= t_{4+} \cdot \exp(-i \frac{2\pi\bar{n}_3}{\lambda} d_3) E_3 \\
 E_5 &= r_{4+} \cdot \exp(-i \frac{2\pi\bar{n}_3}{\lambda} d_3) E_3 \\
 E_6 &= t_{3-} \cdot \exp(-i \frac{2\pi\bar{n}_3}{\lambda} d_3) E_5 \\
 &\quad + r_{3+} \cdot \exp(-i \frac{2\pi\bar{n}_2}{\lambda} d_2) E_2 \\
 E_7 &= t_{2-} \cdot \exp(-i \frac{2\pi\bar{n}_2}{\lambda} d_2) E_6 \\
 &\quad + r_{2+} \cdot \exp(-i \frac{2\pi\bar{n}_1}{\lambda} d_1) E_1 \\
 E_8 &= t_{1-} \cdot \exp(-i \frac{2\pi\bar{n}_1}{\lambda} d_1) E_7 + r_{1+} \cdot E_0
 \end{aligned} \quad \dots (14)$$

これらの式を  $E_1 \sim E_8$  を項とした連立方程式として整理すると、以下ようになる。計算を簡略化するために、入射光  $= E_0$  を 1 とした。

$$\begin{aligned}
 -t_{1+} &= -E_1 + r_{1-} \cdot \exp(-i \frac{2\pi\bar{n}_1}{\lambda} d_1) E_7 \\
 0 &= -E_2 + t_{2+} \cdot \exp(-i \frac{2\pi\bar{n}_1}{\lambda} d_1) E_1 \\
 &\quad + r_{2-} \cdot \exp(-i \frac{2\pi\bar{n}_2}{\lambda} d_2) E_6 \\
 0 &= -E_3 + t_{3+} \cdot \exp(-i \frac{2\pi\bar{n}_2}{\lambda} d_2) E_2 \\
 &\quad + r_{3-} \cdot \exp(-i \frac{2\pi\bar{n}_3}{\lambda} d_3) E_5 \\
 0 &= -E_4 + t_{4+} \cdot \exp(-i \frac{2\pi\bar{n}_3}{\lambda} d_3) E_3 \\
 0 &= -E_5 + r_{4+} \cdot \exp(-i \frac{2\pi\bar{n}_3}{\lambda} d_3) E_3
 \end{aligned} \quad \dots (15)$$

$$\begin{aligned}
 0 &= -E_6 + t_{3-} \cdot \exp(-i \frac{2\pi\bar{n}_3}{\lambda} d_3) E_5 \\
 &\quad + r_{3+} \cdot \exp(-i \frac{2\pi\bar{n}_2}{\lambda} d_2) E_2 \\
 0 &= -E_7 + t_{2-} \cdot \exp(-i \frac{2\pi\bar{n}_2}{\lambda} d_2) E_6 \\
 &\quad + r_{2+} \cdot \exp(-i \frac{2\pi\bar{n}_1}{\lambda} d_1) E_1 \\
 -r_{1+} &= -E_8 + t_{1-} \cdot \exp(-i \frac{2\pi\bar{n}_1}{\lambda} d_1) E_7
 \end{aligned}$$

以上の連立方程式を  $\alpha_{11} \sim \alpha_{88}$  を成分とする行列式に変換すると、各成分はそれぞれ以下のとおりとなる。

$$\begin{aligned}
 \alpha_{11} &= -1 \\
 \alpha_{17} &= r_{1-} \cdot \exp(-i \frac{2\pi\bar{n}_1}{\lambda} d_1) \\
 \alpha_{21} &= t_{2+} \cdot \exp(-i \frac{2\pi\bar{n}_1}{\lambda} d_1) \\
 \alpha_{22} &= -1 \\
 \alpha_{26} &= r_{2-} \cdot \exp(-i \frac{2\pi\bar{n}_2}{\lambda} d_2) \\
 \alpha_{32} &= t_{3+} \cdot \exp(-i \frac{2\pi\bar{n}_2}{\lambda} d_2) \\
 \alpha_{33} &= -1 \\
 \alpha_{35} &= r_{3-} \cdot \exp(-i \frac{2\pi\bar{n}_3}{\lambda} d_3) \\
 \alpha_{43} &= t_{4+} \cdot \exp(-i \frac{2\pi\bar{n}_3}{\lambda} d_3) \\
 \alpha_{44} &= -1 \\
 \alpha_{53} &= r_{4+} \cdot \exp(-i \frac{2\pi\bar{n}_3}{\lambda} d_3) \\
 \alpha_{55} &= -1 \\
 \alpha_{62} &= r_{3+} \cdot \exp(-i \frac{2\pi\bar{n}_2}{\lambda} d_2) \\
 \alpha_{65} &= t_{3-} \cdot \exp(-i \frac{2\pi\bar{n}_3}{\lambda} d_3) \\
 \alpha_{66} &= -1 \\
 \alpha_{71} &= r_{2+} \cdot \exp(-i \frac{2\pi\bar{n}_1}{\lambda} d_1)
 \end{aligned} \quad \dots (16)$$

$$\alpha_{76} = t_{2-} \cdot \exp(-i \frac{2\pi\bar{n}_2}{\lambda} d_2)$$

$$\alpha_{77} = -1$$

$$\alpha_{87} = t_{1-} \cdot \exp(-i \frac{2\pi\bar{n}_1}{\lambda} d_1)$$

$$\alpha_{88} = -1$$

上記以外の成分はすべて0となる。これらの成分を用いると連立方程式は以下の行列式で表される。

$$\begin{pmatrix} -t_{1+} \\ 0 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ -r_{1+} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \cdot & \cdot & \alpha_{18} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \alpha_{31} & \cdot & \alpha_{33} & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \alpha_{81} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \alpha_{88} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ E_8 \end{pmatrix} \quad \dots(17)$$

この行列式を  $H=A \cdot E$  とし、 $A$  の逆行列  $A^{-1}$  を以下のように両辺に掛けることで、 $E_1 \sim E_8$  を求めることができる。

$$H = A \cdot E \quad \dots(18)$$

$$A^{-1} \cdot H = A^{-1} \cdot A \cdot E \quad \dots(19)$$

$$A^{-1} \cdot H = E \quad \dots(20)$$

尚、この行列式の計算及び逆行列の計算は HTBASIC を用いて行った。

計算から導き出された  $E_1 \sim E_8$  は光の電界強度であるので、光強度を議論するために単位時間に伝搬される光強度に変換しなければならない。光強度はポインティングベクトル  $E \times H$  で与えられる。また、ここで扱う値はすべて入射光を1とした時の比であることから各  $E_i$  による光強度  $I_i$  は

$$I_i = \text{Re} \left( \frac{\bar{n}_j}{\bar{n}_0} \right) \cdot |E_i|^2 \quad \dots(21)$$

で表すことができる。 $\bar{n}_j$  は  $E_i$  が伝搬している媒質の複素屈折率である。

透過光の光強度  $I_4$  は、透過した電界強度  $E_4$  と複素屈折率  $\bar{n}_4$  より以下のように表される。

$$I_4 = \text{Re} \left( \frac{\bar{n}_4}{\bar{n}_0} \right) \cdot |E_4|^2 \quad \dots(22)$$

同様に反射の光強度  $I_8$  は以下ようになる。

$$I_8 = |E_8|^2 \quad \dots(23)$$

また、各層の光吸収量は膜中を伝搬する光強度の減衰量であるので、光強度の伝搬前後の差により求めることができる。消衰係数  $k$  は振幅強度の減衰を表しており、 $\exp(-\frac{2\pi k}{\lambda})$  で表すことができる。従って、光強度即ち、ポインティングベクトルの減衰は  $\exp(-\frac{4\pi k}{\lambda})$  で与えられる。

そのため、1層目の光吸収量は  $I_1$  と  $I_7$  の減衰であるので以下のようになる。

[1層目の光吸収量]

$$\begin{aligned} &= I_1 - I_1 \exp\left(-\frac{4\pi k_1 d_1}{\lambda}\right) + I_7 - I_7 \exp\left(-\frac{4\pi k_1 d_1}{\lambda}\right) \\ &= (I_1 + I_7) \cdot \left\{1 - \exp\left(-\frac{4\pi k_1 d_1}{\lambda}\right)\right\} \\ &= \text{Re} \left( \frac{\bar{n}_1}{\bar{n}_0} \right) \cdot (|E_1|^2 + |E_7|^2) \cdot \left\{1 - \exp\left(-\frac{4\pi k_1 d_1}{\lambda}\right)\right\} \end{aligned} \quad \dots(24)$$

同様に2層目、3層目の光吸収量は以下のように表せる。

[2層目の光吸収量]

$$\begin{aligned} &= (I_2 + I_6) \cdot \left\{1 - \exp\left(-\frac{4\pi k_2 d_2}{\lambda}\right)\right\} \\ &= \text{Re} \left( \frac{\bar{n}_2}{\bar{n}_0} \right) \cdot (|E_2|^2 + |E_6|^2) \cdot \left\{1 - \exp\left(-\frac{4\pi k_2 d_2}{\lambda}\right)\right\} \end{aligned} \quad \dots(25)$$

[3層目の光吸収量]

$$\begin{aligned} &= (I_3 + I_5) \cdot \left\{1 - \exp\left(-\frac{4\pi k_3 d_3}{\lambda}\right)\right\} \\ &= \text{Re} \left( \frac{\bar{n}_3}{\bar{n}_0} \right) \cdot (|E_3|^2 + |E_5|^2) \cdot \left\{1 - \exp\left(-\frac{4\pi k_3 d_3}{\lambda}\right)\right\} \end{aligned} \quad \dots(26)$$

太陽電池内に吸収される光の光子数は、各層の光吸収量を光子エネルギーで割る事で求められる。太陽電池の短絡状態の量子効率ほぼ1であるため、光子数=電子数と考える事ができ、電子数(光子数)に電子の電荷をかける事で各層の発生電流値を求める事ができる。

## 2.2 厚膜層と薄膜層の組み合わせ手法

Fig.3 に示す様な薄膜層にガラスの厚膜層が設置されているモデルを例に用いて厚膜層と薄膜層を組み合わせる手法について説明する。厚膜層では、過度に生じる光の干渉効果を避けるため、光の減衰のみ考える必要がある。各界面での光のエネルギー反射率、エネルギー透過率は次式で表すことがで

きる。ここで、薄膜層の結果を反映させるため、2.1 項で算出した反射と透過の結果を薄膜層部のそれぞれ反射率  $R_2$ 、透過率  $T_2$ として用いる。

エネルギー反射率

$$R_1 = \left| \frac{\bar{n}_0 - \bar{n}_{1g}}{\bar{n}_0 + \bar{n}_{1g}} \right|^2 \quad \dots (27)$$

$$R_2 = \text{薄膜層部の反射率} \quad \dots (28)$$

エネルギー透過率

$$T_1 = \text{Re} \left( \frac{\bar{n}_{1g}}{\bar{n}_0} \right) \left| \frac{2\bar{n}_0}{\bar{n}_0 + \bar{n}_{1g}} \right|^2 \quad \dots (29)$$

$$T_2 = \text{薄膜層部の透過率} \quad \dots (30)$$

厚膜層では、光の干渉を考慮しないため、消衰係数  $k$  のみを使用する。

$$I_1 = T_1 \cdot I_0 + R_1 \cdot \exp\left(-\frac{4\pi k_{1g}}{\lambda} d_{1g}\right) I_3 \quad \dots (31)$$

$$I_2 = T_2 \cdot \exp\left(-\frac{4\pi k_{1g}}{\lambda} d_{1g}\right) I_1 \quad \dots (32)$$

$$I_3 = R_2 \cdot \exp\left(-\frac{4\pi k_{1g}}{\lambda} d_{1g}\right) I_1 \quad \dots (33)$$

$$I_4 = R_1 \cdot I_0 + T_1 \cdot \exp\left(-\frac{4\pi k_{1g}}{\lambda} d_{1g}\right) I_3 \quad \dots (34)$$

2.1 項と同様に行列表を用いて(31)~(34)の連立方程式を解くことで各光強度を求めることができる。また、厚膜層の光吸収量は、 $I_1$  と  $I_3$  の光強度の減衰の和となるため、次式で表すことができる。

[厚膜層の光吸収量]

$$\begin{aligned} &= I_1 - I_1 \exp\left(\frac{-4\pi k_{1g} d_{1g}}{\lambda}\right) + I_3 - I_3 \exp\left(\frac{-4\pi k_{1g} d_{1g}}{\lambda}\right) \\ &= (I_1 + I_3) \cdot \left\{ 1 - \exp\left(\frac{-4\pi k_{1g} d_{1g}}{\lambda}\right) \right\} \quad \dots (35) \end{aligned}$$

この手法を使用することで干渉を含んだ薄膜層の結果を厚膜層との組み合わせ構造における光吸収量の算出に反映することができる。

尚、薄膜層での光吸収量は、厚膜層との組み合わせ構造の計算結果である  $I_1$  が厚膜中を伝搬した後の光強度、即ち

$I_1 \exp\left(\frac{-4\pi k_{1g} d_{1g}}{\lambda}\right)$  を薄膜層の入射光に用いる必要がある。

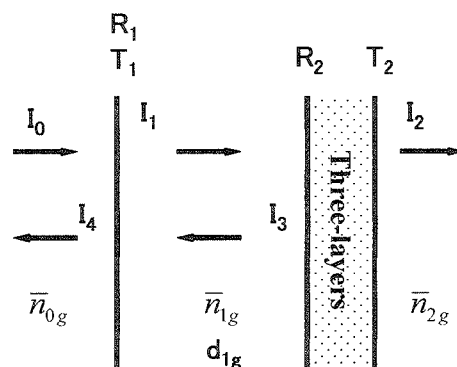


Fig.3 A model of thick layer covered by thin films

### 3. HIT 太陽電池の性能予測

開発したシミュレーション法を用いて、HIT 太陽電池の性能予測を行った。性能予測に使用した太陽電池の構造図を Fig.4 に示す。

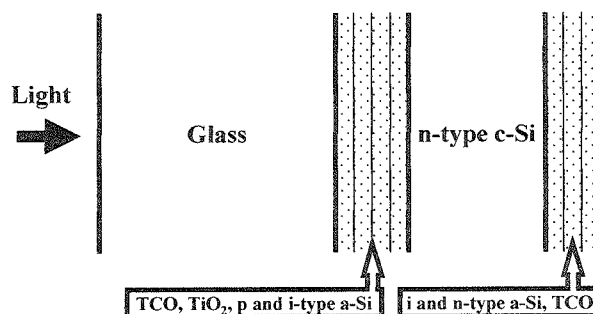


Fig.4 The structural of HIT solar cells used in the simulation.

HIT 太陽電池のガラスと n 型 c-Si を厚膜層とし、TCO, TiO<sub>2</sub> と p, i 及び n 型 a-Si を薄膜層として扱い、厚膜層を 2 層、薄膜層を 7 層になる様に同原理を拡張した。反射防止膜として、TCO と p 型 a-Si の間に TiO<sub>2</sub> を設置した。p 及び n 型 a-Si の膜厚と i 型 a-Si の膜厚をそれぞれ、HIT 太陽電池に最適とされている 5nm と 4nm とし、複素屈折率などの物性値は文献値<sup>2)</sup>を用いた。またガラス、TiO<sub>2</sub> と n 型 c-Si の物性値についても文献値<sup>3)</sup>を用い、ガラスの膜厚を 3mm、n 型 c-Si の膜厚を 150 μm とした。TCO は、我々が作製した ZnO の測定値を使用し、膜厚を 100nm とした。光子数は、全天日射 : AM1.5、100mW/cm<sup>2</sup> の光強度より算出した。

Fig.5 に本手法により求めた HIT 太陽電池の反射率及び各層の光吸収率を示す。反射率と発電層である n 型 c-Si の光吸収率については比較のため反射防止膜である TiO<sub>2</sub> 層を設置しない場合の結果を点線で示す。この時の n 型 c-Si の光吸



収率より換算される発生電流値を Table1 に示す。TiO<sub>2</sub> 層を設置することで約 1.3 mA/cm<sup>2</sup> の向上、即ち 4.2% の改善が可能であり、この時の TiO<sub>2</sub> 層の最適膜厚は、60nm である。Fig.5 から分かるように特に短波長領域での反射が低減されており、TiO<sub>2</sub> 層の干渉による反射防止膜として効果が反映した結果である。

p, i 及び n 型 a-Si 層の吸収は、合計で 1.4 mA/cm<sup>2</sup> に相当する。この結果は、短波長領域での a-Si 層の光吸収が発電層の発生電流値低減につながっており、特性改善のための課題のひとつである事を示している。

また、短波長領域で TCO の光吸収量が大きな値を占めているが、TCO の吸収は、0.39 mA/cm<sup>2</sup> にすぎない値である。これは、短波長では太陽光スペクトルの成分が少ない事と光子エネルギーが大きいため光強度に対する光子数が少なくなる事に起因している。

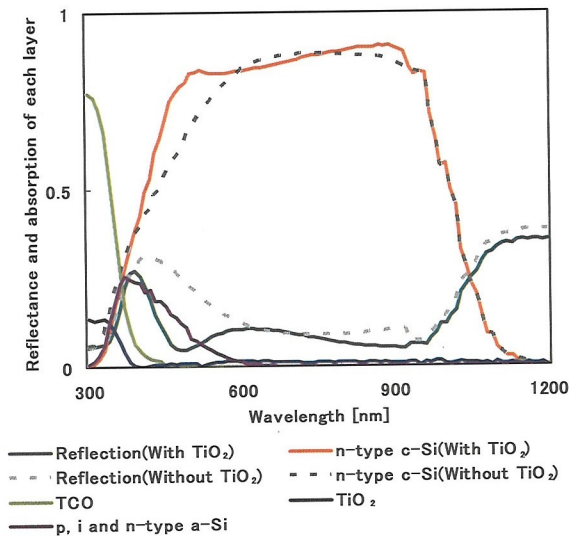


Fig.5 Reflectance and absorption of each layer in the HIT solar cells calculated by our simulation

Table 1. Effects of TiO<sub>2</sub> AR layers in HIT solar cells calculated by the simulation

	With the TiO <sub>2</sub> AR layer of 60nm	Without TiO <sub>2</sub> AR layers
Current density [mA/cm <sup>2</sup> ]	31.97	30.69

#### 4. 低吸収ワイドギャップ a-Si の作製

我々が開発した光学シミュレーション法を用いた性能予測の結果、HIT 太陽電池の更なる高効率化を目指すためには、a-Si 層の光吸収を低減させる事が重要であることが明らかになった。そこで、反応性スパッタリング法を用いて、低吸収ワイド

ドギャップ a-Si の作製を試み、シミュレーションにより、その効果を検証した。

#### 4.1 実験方法

Ar と H<sub>2</sub> の混合ガスを使用した反応性スパッタリング法により、コーニング 7059 ガラス基板上に a-Si 膜の成膜を行った。基板温度を 100℃、チャンバー内圧力を 1Pa~50Pa、RF 電力を 30W~200W、ガス流量比を H<sub>2</sub>/(Ar+H<sub>2</sub>)=0~1 と変化させて実験を行った。反応性スパッタリング法は、特殊材料ガスを使用しないため安全なプロセスであり且つ大面積化が容易な将来性のある手法である。使用した実験装置の構造図を Fig.6 に示す。試料の光吸収スペクトルは分光光度計により測定した透過率、反射率より算出した<sup>4)</sup>。

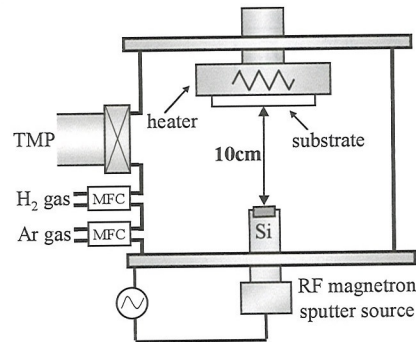


Fig.6 The structural of reactive sputtering system

#### 4.2 ガス流量比に対する依存性

Fig.7 (a) に基板温度 100℃、チャンバー内圧力 5Pa、RF 電力 100W を一定として、ガス流量比を変化させた時の光吸収係数の結果を示す。点線で示しているものは、現状報告されている最も光吸収の少ない a-Si の文献値<sup>2)</sup>である。水素ガスを添加させたものは、Ar ガスのみで成膜を行ったものと比較し、光吸収係数が大幅に低い値を示した。その中でもガス流量比=0.2 の条件が最も低吸収になった。これらの値は、報告されている低吸収 a-Si の値を大きく下回るもので HIT 太陽電池への応用による特性改善が期待できる。

Fig.7 (b) に同試料の光学ギャップを示す。光学ギャップは、縦軸: (αhv)<sup>1/3</sup>、横軸: hv のグラフに値をプロットし求めた。点線で示しているものは文献値<sup>2)</sup>の光学ギャップである。光吸収係数の結果と同様に、ガス流量比=0.2 の時が最も大きい光学ギャップを示している。

水素ガスを添加した反応性スパッタでは、プラズマ中の水素の一部が水素ラジカルや水素イオンの状態で存在している。ターゲットからスパッタされた Si 粒子は水素ラジカルや水素イオンと反応し、シラン系ラジカルを形成しながら基板に到達するものだと考えられる。そのため、水素ガスを添加したものは、膜中の水素含有量が増加し、低吸収になったと考えられる。ま

た、ガス流量比=0.8 に比べ 0.2 の時の方が低い吸収を示した理由としては、水素系ラジカル密度が過剰に増加すると、膜表面の水素と反応し、水素の脱離反応を増加させてしまうためだと考えられる。

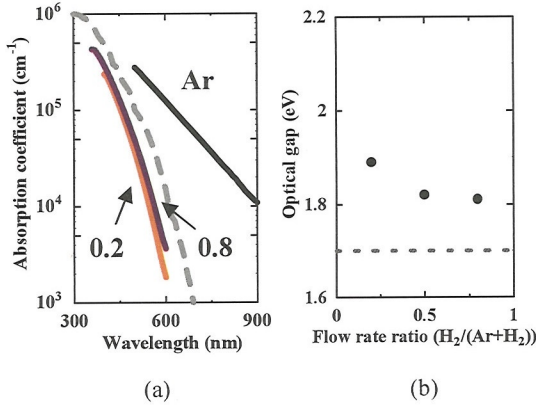


Fig.7 Absorption coefficients, (a) and optical gap, (b) of a-Si films prepared at several hydrogen flow ratios (H<sub>2</sub>/(Ar+H<sub>2</sub>))

#### 4.3 チャンバー内圧力に対する依存性

次に基板温度 100℃、RF 電力 100W、ガス流量比=0.2 一定として、チャンバー内圧力の最適化を行った。Fig.8 (a)に圧力変化に対する光吸収係数の値を示す。チャンバー内圧力の低下に比例し、光吸収係数が低い値を示している。また、Fig.8 (b)に示している光学ギャップにおいても同様の傾向を示している。チャンバー内圧力を低下させるとプラズマ電位が増大するため、水素イオンの運動エネルギーが増加し、膜中により多くの水素イオンが打ち込まれたため低吸収になったものだと考えられる。

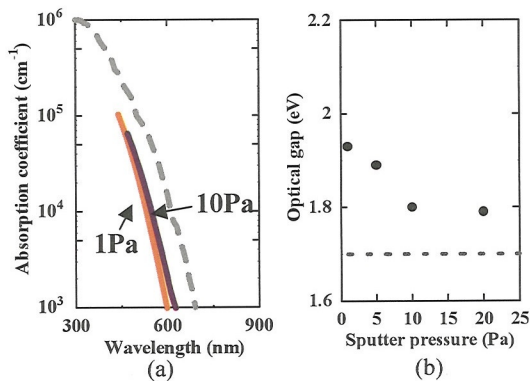


Fig.8 Absorption coefficients, (a) and optical gap, (b) of a-Si films prepared at several sputtering pressure

#### 4.4 RF 電力に対する依存性

さらに基板温度 100℃、チャンパー内圧力 1Pa、ガス流量比 =0.2 一定として、RF 電力の最適化を行った。Fig.9 (a)に RF 電力変化させた時の光吸収係数の結果を示す。RF 電力の低下と共に光吸収係数も低い値を示している。Fig.9 (b)より、30W の時に最も広い 2eV の光学ギャップを持つ低吸収ワイドギャップ a-Si を作製することができた。これは、低電力で成膜を行う事で成膜速度が低下し、成膜表面が適度に長く水素ラジカルに曝されるため水素をより多く取り込めたためだと考えられる。

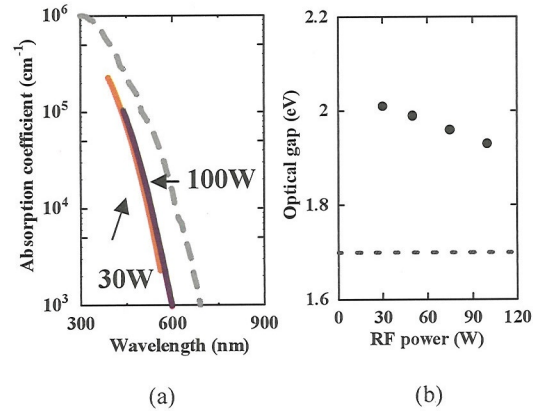


Fig.9 Absorption coefficients, (a) and optical gap, (b) of a-Si films prepared at several RF powers

#### 4.5 低吸収ワイドギャップ a-Si による HIT 太陽電池の特性改善

今回開発した最も光吸収の少ない基板温度 100℃、チャンパー内圧力 1Pa、ガス流量比=0.2、RF 電力 30W の条件で作製した a-Si を用いて、HIT 太陽電池のシミュレーションを行った。その他の条件は、3 章と同様の条件を用いた。

Fig.10 にシミュレーションの結果を示す。点線に文献値<sup>2)</sup>を用いた場合の結果を示し、実線に今回開発した低吸収ワイドギャップ a-Si を用いた場合の結果を示す。文献値<sup>2)</sup>を用いた場合と比較し、短波長領域で a-Si 層の吸収量が減少しているため、短波長領域での n 型 c-Si の量子効率が改善されている。この時の n 型 c-Si の発生電流値は、33.45 mA/cm<sup>2</sup> となり、文献値を用いた場合と比較し、約 1.5 mA/cm<sup>2</sup> の向上、即ち 4.6% に改善が見込まれた。以上の結果より、HIT 太陽電池の更なる高効率化を目指す上で a-Si 層の吸収量を低減させることが重要であること、我々が開発した反応性スパッタリングによる低吸収ワイドギャップ a-Si が有効であることが確認できた。

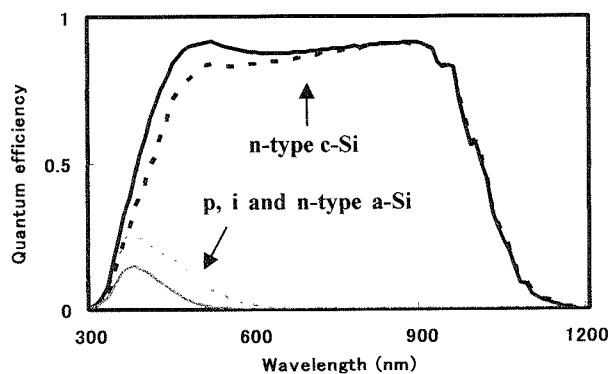


Fig.10 The simulation result of HIT solar cells using our developed wide gap a-Si

### 5. 結言

本研究では、HIT 太陽電池の特性改善を検討するために HIT 太陽電池の構造に適應できる光学シミュレーション法の開発を行った。また、シミュレーションの結果を踏まえ、a-Si 層の光吸収による発生電流値の低下を抑制するため、従来にない低吸収ワイドギャップ a-Si の作製を行い、その効果について同シミュレーションによって検討を行ったものであり、その内容を以下にまとめる。

1. HIT 太陽電池の特長である厚膜と薄膜を組み合わせた構造に適應できる光学シミュレーション法を開発することが出来た。

2. 今回開発したシミュレーション法は、光の干渉、光の多重反射を正確に考慮できるため、HIT 太陽電池のみでなく、新規に薄膜太陽電池を開発する際の効率化にも貢献することが期待される。

3. HIT 太陽電池の性能予測の結果、反射防止膜として最適膜厚の  $\text{TiO}_2$  層を設置する事で発生電流値が約  $1.3 \text{ mA/cm}^2$  向上し、4.2%改善できることがわかった。また、短波長領域での a-Si 層の光吸収が発電層からの発生電流値低下の一因となっていることがわかった。

4. HIT 太陽電池の更なる高効率化のために水素を使用した反応性スパッタリング法を用いて、低吸収ワイドギャップ a-Si の作製を試みた。基板温度  $100^\circ\text{C}$ 、ガス流量比  $\text{H}_2/(\text{Ar}+\text{H}_2)=0.2$ 、チャンバー内圧力  $1\text{Pa}$ 、RF 電力  $30\text{W}$  の条件で成膜することで、膜中の水素含有量を増加させることができ、 $2\text{eV}$  の光学ギャップを有する低吸収ワイドギャップ a-Si を作製することが出来た

5. 作製した低吸収 a-Si の物性値を用いて HIT 太陽電池の性能予測を行った結果、現在報告されている最も光吸収の少ない a-Si を用いた場合と比較し、発生電流値が  $1.5 \text{ mA/cm}^2$  向上し、従来に比べ 4.6%に改善する事がわかった。

### 謝辞

本研究に関し大変有益なアドバイスを頂きました独立行政法人産業技術総合研究所の菱川善博氏、またシミュレーション作成の際の多大な協力に対し工学部 電気工学科 2004 年度卒業の藤原学君に心から感謝致します。

### 参考文献

1. 川本訓裕、中谷志穂美、荻原龍蔵、中井拓夫、馬場俊明 SANYO TECHNICAL REVIEW. 34 (2002) pp.111-117.
2. S. Okamoto, Y. Hishikawa, S. Tsuge, M. Sasaki, K. Ninomiya, M. Nishikuni and S. Tsuda, Jpn. J. Appl. Phys. 33 (1994) pp.1773-1777.
3. Edward D. Palik 「Handbook of optical constants of solids」 Academic Press, Orlando (1985) pp.547-569, pp.749-763, pp.795-804.
4. Y. Hishikawa, N. Nakamura, S. Tsuda, S. Nakano, Y. Kishi and Y. Kuwano Jpn. J. Appl. Phys. 30 (1991) pp.1008-1014.
5. 浜川圭弘、桑野幸徳著「太陽エネルギー工学 太陽電池」培風館 (1995) pp.1-12.
6. 吉田貞史、矢島弘義著「薄膜・光デバイス」東京大学出版会 (1994) pp.4-23.