

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関  
国際事務局

(43) 国際公開日  
2015年2月26日(26.02.2015)



(10) 国際公開番号

WO 2015/025601 A1

- (51) 国際特許分類:  
H01L 31/054 (2014.01) H01L 31/056 (2014.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2014/066119
- (22) 国際出願日: 2014年6月18日(18.06.2014)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:  
特願 2013-169385 2013年8月19日(19.08.2013) JP
- (71) 出願人: 株式会社豊田中央研究所 (KABUSHIKI KAISHA TOYOTA CHUO KENKYUSHO) [JP/JP]; 〒4801192 愛知県長久手市横道4-1番地の1 Aichi (JP).
- (72) 発明者: 竹田 康彦 (TAKEDA, Yasuhiko); 〒4801192 愛知県長久手市横道4-1番地の1 株式会社豊田中央研究所内 Aichi (JP). 飯塚 英男 (IIZUKA, Hideo); 〒4801192 愛知県長久手市横道4-1番地の1 株式会社豊田中央研究所内 Ai-

chi (JP). 水野 真太郎 (MIZUNO, Shintaro); 〒4801192 愛知県長久手市横道4-1番地の1 株式会社豊田中央研究所内 Aichi (JP). 長谷川 和男 (HASEGAWA, Kazuo); 〒4801192 愛知県長久手市横道4-1番地の1 株式会社豊田中央研究所内 Aichi (JP). 市川 正 (ICHIKAWA, Tadashi); 〒4801192 愛知県長久手市横道4-1番地の1 株式会社豊田中央研究所内 Aichi (JP). 伊藤 博 (ITO, Hiroshi); 〒4801192 愛知県長久手市横道4-1番地の1 株式会社豊田中央研究所内 Aichi (JP).

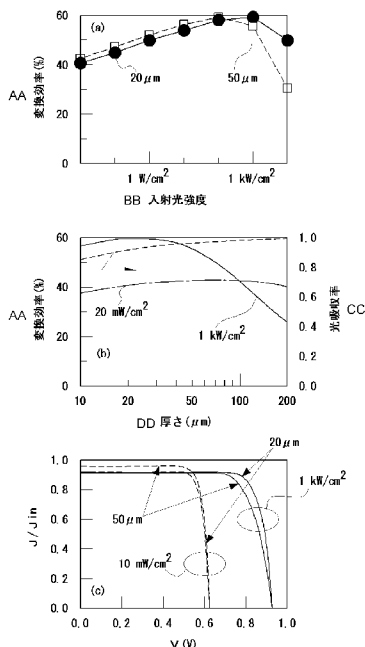
(74) 代理人: 畠山 文夫 (HATAKEYAMA, Fumio); 〒4880821 愛知県尾張旭市長坂町南山2-8-4 7番地2-5 アンダンテ特許事務所内 Aichi (JP).

(81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS,

[続葉有]

(54) Title: PHOTOELECTRIC CONVERSION ELEMENT

(54) 発明の名称: 光電変換素子



AA Conversion efficiency  
BB Input light intensity  
CC Light absorption rate  
DD Thickness

(57) Abstract: The photoelectric conversion element is provided with a light-absorbing member comprising a light-absorbing material capable of absorbing monochromatic light at wavelength  $\lambda_0$  and generating a carrier, and a substantially collimated light beam comprising the monochromatic light is used as the input light. The photoelectric conversion element has a band-pass filter formed on the side wherefrom the input light comprising the monochromatic light enters with an incident angle  $\theta$ , the band-pass filter having a function of transmitting selectively light of wavelength  $\lambda_0$  at least. In addition, the light-absorbing member is provided with a diffuse reflective surface on the back side thereof.

(57) 要約: 光電変換素子は、波長  $\lambda_0$  の単色光を吸収して、キャリアを発生させることが可能な光吸収材料からなる光吸収部材を備え、入射光として前記単色光からなる略平行光線が用いられる。前記光電変換素子は、前記単色光からなる入射光が入射角  $\theta$  で入射する面にバンドパスフィルターが形成されており、前記バンドパスフィルターは、少なくとも波長  $\lambda_0$  の光を選択的に透過させる機能を持つ。さらに、前記光吸収部材は、その裏面に、拡散反射面を備えている。



LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

パ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

(84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーロ  
シア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ

添付公開書類:

— 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

## 明 細 書

**発明の名称：**光電変換素子

### 技術分野

[0001] 本発明は、光電変換素子に関し、さらに詳しくは、単色光の照射に適した高効率の光電変換素子に関する。

### 背景技術

[0002] 太陽光を単色化して光電変換材料に照射するシステムが検討されている。また、移動体などへの、あるいは、高電磁ノイズ環境下での給電技術としても、レーザー光（単色光）と光電変換素子の組み合わせが利用されている（非特許文献1、2）。

このような単色光を照射する用途にも、通常の太陽電池（白色光用）が用いられている。この場合、単色光の光子エネルギーよりもやや小さなバンドギャップを持つ材料を用いた太陽電池が選択されるだけであり、格別の工夫はされていない。

[0003] 白色光用の太陽電池に単色光を照射した場合、単色光を電力に変換する効率が低い。一方、単色光照射用に特化した工夫を行えば、効率を向上できる可能性がある。しかしながら、単色光照射用に適した光電変換素子が提案された例は、従来にはない。

### 先行技術文献

#### 非特許文献

[0004] 非特許文献1：河島、電気学会誌、129、422（2009）

非特許文献2：Y.Tanaka et al., Opt.Rev. 16, 257(2009)

### 発明の概要

#### 発明が解決しようとする課題

[0005] 本発明が解決しようとする課題は、単色光の照射に適した高効率の光電変換素子を提供することにある。

#### 課題を解決するための手段

[0006] 上記課題を解決するために本発明に係る光電変換素子は、以下の構成を備えている。

(1) 前記光電変換素子は、波長 $\lambda_0$ の単色光を吸収して、キャリアを発生させることが可能な光吸収材料からなる光吸収部材を備え、入射光として前記単色光からなる略平行光線が用いられる。

(2) 前記光電変換素子は、前記入射光が入射角 $\theta$ で入射する面にバンドパスフィルターが形成されており、

前記バンドパスフィルターは、少なくとも波長 $\lambda_0$ の光を選択的に透過させる機能を持つ。

(3) 前記光吸収部材は、その裏面に拡散反射面を備えている。

### 発明の効果

[0007] バンドパスフィルターは、従来、白色光の中から特定波長の光を抽出するために用いられていた。このバンドパスフィルターを光電変換素子の受光面の上に設け、受光面に向かって単色光を入射すると、バンドパスフィルターは、入射光を遮ることなく、裏面からの反射光を再び光吸収部材内部に反射する。これにより、光吸収部材を薄型化しても高い光吸収率が確保される。また、材料の低減、タクトタイムの短縮が可能となり、コストを削減することができる。

[0008] さらに、光吸収部材を小型化、薄型化することにより、高い光吸収率と、低い内部抵抗を両立させることができる。その結果、入射光強度が大きい場合でも、抵抗損失が抑えられ、高い変換効率が得られる。

### 図面の簡単な説明

[0009] [図1]太陽電池の等価回路を示す図である。

[図2] Si 太陽電池 (図 2 (a)、参考文献 1)、III-V 族化合物太陽電池 (図 2 (b)、参考文献 2) に疑似太陽光を照射したときの変換効率の集光倍率依存性を示す図である。

[図3] CIGS マイクロ太陽電池 (直径  $18\ \mu\text{m}$ ) に白色光を入射したときの変換効率の計算結果 (参考文献 3) を示す図である。

[図4]表面テクスチャーと裏面拡散反射構造を備えた通常のSi太陽電池に波長1064nmの単色光を入射した時の入射光強度と変換効率との関係(図4(a))、Siウェハの厚さと変換効率及び光吸収率との関係(図4(b))、並びに、電圧Vと電流密度Jとの関係(図4(c))を示す図である。

[0010] [図5]図5(c)は、周期凹凸構造を持つAg電極のSEM像、図5(d)は、これを用いたアモルファスSi太陽電池の断面SEM像、図5(a)は、太陽電池の外部量子スペクトル(参考文献5)である。

[図6]太陽電池の断面と光の伝搬方向の模式図である。

[図7]バンドパスフィルターの積層構造の模式図である。全層数は、図7(a)の場合は $2(m_1 + m_2) + 1$ 、図7(b)の場合は $2(m_1 + m_2) + 2$ である。

[図8]垂直入射光に対する透過スペクトルの計算結果である。

[0011] [図9]図9(a)は、Siの厚さと光吸収率との関係を示す図である。図9(b)は、伝搬角 $\theta$ と表面反射率 $R_B(\theta)$ との関係を示す図である。

[図10]表面に全層数14層( $m_1 = m_2 = 3$ )のバンドパスフィルターが、裏面に拡散反射構造が形成されたSi太陽電池に波長1064nmの単色光を入射した時の入射光強度と変換効率との関係(図10(a))、Siの厚さと変換効率及び光吸収率との関係(図10(b))、並びに、電圧Vと電流密度Jとの関係(図10(c))を示す図である。

[図11] $\Delta\lambda/\lambda_0$ 、 $\Delta\theta$ 、 $\Delta n_{AR}/n_{AR0}$ 、 $\Delta d_{AR}/d_{AR0}$ 、 $\Delta d_{L4}/d_{L40}$ 、 $\Delta d_{H4}/d_{H40}$ 、又は、 $\Delta d_{L2}/d_{L20}$ と変換効率との関係を示す図である。

[図12]図12(a)は、全反射率と変換効率との関係を示す図である。図12(b)は、拡散反射率/全反射率と、変換効率との関係を示す図である。

## 発明を実施するための形態

[0012] 以下に、本発明の一実施の形態について詳細に説明する。

### [1. 光電変換素子]

本発明に係る光電変換素子は、以下の構成を備えている。

(1) 前記光電変換素子は、波長 $\lambda_0$ の単色光を吸収して、キャリアを発生さ

せることが可能な光吸収材料からなる光吸収部材を備え、入射光として前記単色光からなる略平行光線が用いられる。

(2) 前記光電変換素子は、前記入射光が入射角  $\theta$  で入射する面にバンドパスフィルターが形成されており、

前記バンドパスフィルターは、少なくとも波長  $\lambda_0$  の光を選択的に透過させる機能を持つ。

(3) 前記光吸収部材は、その裏面に拡散反射面を備えている。

[0013] [1. 1. 入射光]

本発明において、入射光は、波長  $\lambda_0$  の単色光からなる。すなわち、本発明に係る光電変換素子は、単色光照射用の光電変換素子である。

「波長  $\lambda_0$  の単色光」とは、中心波長が  $\lambda_0$  であり、かつ、中心波長  $\lambda_0$  に対するスペクトルの半値半幅 ( $\Delta\lambda/2$ ) の比 ( $=\Delta\lambda/2\lambda_0$ ) が 0.04 以下である光をいう。

[0014] 本発明において、入射光は、受光面（入射光が入射する面）に向かって略平行に入射する略平行光線からなる。

「略平行光線」とは、光の進行方向を示す角の分布  $\beta$  が  $2.3^\circ$  以下である光をいう。 $\beta$  は、小さいほど良い。高い変換効率を得るためには、入射光は、 $\beta \div 0$  の平行光線が好ましい。

[0015] 本発明において、入射光は、入射角  $\theta$  で受光面に入射する。

「入射角  $\theta$ 」とは、受光面の法線方向と、入射光の入射方向とのなす角をいう。

「入射光の入射方向」とは、入射光の平均的な進行方向をいう。例えば、入射光が平行光線 ( $\beta = 0$ ) である場合は、入射方向とは、入射光に平行な方向をいう。また、例えば、入射光の進行方向が頂角： $2\beta$  ( $\beta \neq 0$ ) の円錐形状内にある場合、入射方向とは、円錐の中心軸に平行な方向をいう。

[0016] [1. 2. 光吸収材料、光吸収部材]

光電変換素子は、波長  $\lambda_0$  の単色光を吸収して、キャリアを発生させることが可能な光吸収材料からなる光吸収部材を備えている。

本発明において、光吸収材料は、特に限定されるものではなく、種々の材料を用いることができる。光吸収材料としては、例えば、

- (1) 結晶Si、微結晶Si、アモルファスSi、
  - (2)  $\text{CuI}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$  (CIGS)、 $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  (CZTS)、 $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  (CZTSe) などの硫化物系又はセレン化物系化合物半導体、
  - (3)  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y$ 系化合物半導体 ( $0 \leq x \leq 1$ 、 $0 \leq y \leq 1$ )、 $\text{In}_{1-x-y}\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{As}$  ( $0 \leq x \leq 1$ 、 $0 \leq y \leq 1$ ) 系化合物半導体などのIII-V族化合物半導体、
- などがある。

[0017] 光吸収部材の形状や大きさは、特に限定されるものではなく、目的に応じて任意に選択することができる。

例えば、光吸収部材は、自立可能な厚さを有する板又は厚膜であっても良く、あるいは、基板上に形成された薄膜であっても良い。

また、光電変換素子は、光電変換要素が光吸収部材のみからなるもの（例えば、Si太陽電池）でも良く、あるいは、光電変換要素が薄膜状の光吸収部材（光吸収層）とその他の層の積層体からなるもの（例えば、光吸収層がCIGSやCZTSからなる薄膜太陽電池）でも良い。

[0018] 光吸収部材は、特に、厚さ $100\mu\text{m}$ 以下、面内方向のサイズが $100\mu\text{m}$ 以下であるSiウェハが好ましい。

Siウェハの厚さは、さらに好ましくは、 $50\mu\text{m}$ 以下、さらに好ましくは、 $20\mu\text{m}$ 以下である。

Siウェハの面内方向のサイズは、さらに好ましくは、 $50\mu\text{m}$ 以下、さらに好ましくは、 $20\mu\text{m}$ 以下である。

ここで、「面内方向のサイズ」とは、光吸収部材の受光面に外接する最小の外接円の直径をいう。

[0019] [1. 3. バンドパスフィルター]

[1. 3. 1. 定義]

本発明に係る光電変換素子は、前記単色光が入射角 $\theta$ で入射する面（受光面）にバンドパスフィルターが形成されている。

「バンドパスフィルター」とは、少なくとも波長 $\lambda_0$ の光を選択的に透過させる機能を持つものをいう。バンドパスフィルターは、通常、白色光の中から、特定の波長を持つ光を抽出するために用いられている。本発明において、バンドパスフィルターは、入射光（単色光）をそのまま透過させ、かつ、裏面からの反射光を再び光吸収部材内部に反射させるために用いられる。この点が従来とは異なる。

[0020] バンドパスフィルターは、光電変換素子の受光面側に設けられる。

光電変換要素が光吸収部材のみからなる光電変換素子の場合（例えば、Si太陽電池の場合）、バンドパスフィルターは、光吸収部材の表面に形成される。

一方、光電変換要素が光吸収層と他の層の積層体からなる光電変換素子の場合（例えば、薄膜太陽電池の場合）、バンドパスフィルターは、積層体の最上面に形成される。

[0021] [1. 3. 2. 中心波長 $\lambda$ ]

バンドパスフィルターを透過することが可能な光の波長は、所定の幅（透過帯域）を持つ。

「中心波長 $\lambda$ 」とは、バンドパスフィルターを透過することが可能な光の波長の中央値をいう。

「少なくとも波長 $\lambda_0$ の光を選択的に透過する」とは、バンドパスフィルターの中心波長 $\lambda$ が、必ずしも入射光の中心波長 $\lambda_0$ に完全に一致している必要はないことを意味する。しかしながら、波長 $\lambda$ と波長 $\lambda_0$ との差が大きくなると、バンドパスフィルターを透過する光子の数が減少し、変換効率が低下する。

高い変換効率を得るためには、バンドパスフィルターの中心波長 $\lambda$ は、 $0.97 \times \lambda_0$ 以上 $1.039 \times \lambda_0$ 以下が好ましい。中心波長 $\lambda$ は、さらに好ましくは、 $0.98 \times \lambda_0$ 以上 $1.025 \times \lambda_0$ 以下、さらに好ましくは、 $0.9$

$9 \times \lambda_0$ 以上  $1.01 \times \lambda_0$ 以下である。

[0022] [1. 3. 3. 構造]

バンドパスフィルターの構造は、上述した機能を奏するものである限りにおいて、特に限定されない。バンドパスフィルターとしては、例えば、

- (a)  $(L4/H4)^{m1}L2(H4/L4)^{m2}$ の積層構造を持つもの、
  - (b)  $AR/(L4/H4)^{m1}L2(H4/L4)^{m2}$ の積層構造を持つもの、
  - (c)  $(H4/L4)^{m1}H2(L4/H4)^{m2}$ の積層構造を持つもの、
  - (d)  $AR/(H4/L4)^{m1}H2(L4/H4)^{m2}$ の積層構造を持つもの、
- などがある。

[0023] 但し、

「AR」は、屈折率が $n_{AR}$ である材料からなる反射防止層、

「L4」は、屈折率が $n_{L4}$ である低屈折材料（A）からなる低屈折率層（A））、

「L2」は、屈折率が $n_{L2}$ である低屈折材料（B）からなる低屈折率層（B））、

「H4」は、屈折率が $n_{H4}$  ( $> n_{L4}$ ,  $> n_{L2}$ ) である高屈折材料（A）からなる高屈折率層（A）、

「H2」は、屈折率が $n_{H2}$  ( $> n_{L4}$ ,  $> n_{L2}$ ) である高屈折材料（B）からなる高屈折率層（B）、

$m_1$ 、 $m_2$ は、それぞれ、1以上の整数。

[0024] 「L4」、「L2」は、それぞれ、その光学厚さ（＝屈折率 $n$ ×実厚さ $d$ ）が $\lambda_0/4$ 又は $\lambda_0/2$ に比例する層を表す。入射角 $\theta$ の場合、バンドパスフィルターを構成する各層の光学厚さ $nd$ の条件は、 $nd = (1 - \sin^2 \theta / n^2)^{1/2} \times (\lambda_0/4 \text{ or } \lambda_0/2)$ となる。この点は、「H4」、「H2」も同様である。

「 $(L4/H4)^{m1}$ 」は、「 $L4/H4$ 」の積層単位が $m_1$ 回繰り返されることを表す。前半の繰り返し数 $m_1$ と後半の繰り返し数 $m_2$ は、同一であっても良く、あるいは、異なっても良い。

「 $(L4/H4)^{m1}L2(H4/L4)^{m2}$ 」は、 $(L4/H4)^{m1}$ の積層構造と、 $(H4/L4)^{m2}$ の積層構造の間にL2層が挿入されていることを表す。

「AR／」は、バンドパスフィルターの最表面（光の入射側）に反射防止層が形成されていることを表す。

[0025] L4を構成する低屈折材料（A）と、L2を構成する低屈折率材料（B）は、後述する条件を満たす限りにおいて、同一材料であっても良く、あるいは、異なる材料であっても良い。さらに、積層構造中に含まれる個々のL4は、後述する条件を満たす限りにおいて、同一材料であっても良く、あるいは、異なる材料であっても良い。

同様に、H4を構成する高屈折率材料（A）と、H2を構成する高屈折率材料（B）は、後述する条件を満たす限りにおいて、同一材料であっても良く、あるいは、異なる材料であっても良い。さらに、積層構造中に含まれる個々のH4は、後述する条件を満たす限りにおいて、同一材料であっても良く、あるいは、異なる材料であっても良い。

[0026] バンドパスフィルターは、特に、積層構造（a）又は積層構造（b）を備えているものが好ましい。これらの積層構造を備えたバンドパスフィルターは、他の積層構造を備えたバンドパスフィルターに比べて高い変換効率が得られる。

[0027] バンドパスフィルターを構成する各層の厚さ（実厚さ） $d$ には、理想的な厚さ（実厚さ） $d_0$ が存在する。各層の厚さ $d$ は、必ずしも理想的な厚さ $d_0$ と完全に同一である必要はない。しかしながら、厚さ $d$ と理想的な厚さ $d_0$ との差が大きくなると、変換効率が低下する。従って、厚さ $d$ は、理想的な厚さ $d_0$ に近いのが好ましい。

[0028] 例えば、上述した積層構造（a）又は積層構造（b）を備えたバンドパスフィルターの場合、低屈折率層（A）の厚さ $d_{L4}$ 、低屈折率層（B）の厚さ $d_{L2}$ 、及び、高屈折率層（A）の厚さ $d_{H4}$ は、それぞれ、以下の関係を満たしているのが好ましい。

[0029] すなわち、低屈折率層（A）の厚さ $d_{L4}$ は、 $0.75 \times d_{L40}$ 以上 $1.20 \times d_{L40}$ 以下が好ましい。厚さ $d_{L4}$ は、さらに好ましくは、 $0.85 \times d_{L40}$ 以上 $1.10 \times d_{L40}$ 以下、さらに好ましくは、 $0.92 \times d_{L40}$ 以上 $1.06 \times d_{L40}$ 以下である。

但し、 $d_{L40}$ は、低屈折率層（A）の理想的な厚さ（実厚さ）であり、 $d_{L40} = (1 - \sin^2 \theta / n_{L4}^2)^{1/2} \times (\lambda_0 / 4) \times (1 / n_{L4})$ で表される。

[0030] また、低屈折率層（B）の厚さ $d_{L2}$ は、 $0.926 \times d_{L20}$ 以上 $1.058 \times d_{L20}$ 以下が好ましい。厚さ $d_{L2}$ は、さらに好ましくは、 $0.95 \times d_{L20}$ 以上 $1.03 \times d_{L20}$ 以下、さらに好ましくは、 $0.97 \times d_{L20}$ 以上 $1.02 \times d_{L20}$ 以下である。

但し、 $d_{L20}$ は、低屈折率層（B）の理想的な厚さ（実厚さ）であり、 $d_{L20} = (1 - \sin^2 \theta / n_{L2}^2)^{1/2} \times (\lambda_0 / 2) \times (1 / n_{L2})$ で表される。

[0031] また、高屈折率層（A）の厚さ $d_{H4}$ は、 $0.87 \times d_{H40}$ 以上 $1.10 \times d_{H40}$ 以下が好ましい。厚さ $d_{H4}$ は、さらに好ましくは、 $0.92 \times d_{H40}$ 以上 $1.05 \times d_{H40}$ 以下、さらに好ましくは、 $0.96 \times d_{H40}$ 以上 $1.02 \times d_{H40}$ 以下である。

但し、 $d_{H40}$ は、高屈折率層（A）の理想的な厚さ（実厚さ）であり、 $d_{H40} = (1 - \sin^2 \theta / n_{H4}^2)^{1/2} \times (\lambda_0 / 4) \times (1 / n_{H4})$ で表される。

[0032] 積層構造（b）又は積層構造（d）を備えたバンドパスフィルタにおいて、反射防止層の屈折率 $n_{AR}$ 及び厚さ（実厚さ） $d_{AR}$ は、特に限定されない。すなわち、反射防止層は、少なくとも光を透過する材料からなる層であればよい。

[0033] また、積層構造（b）を備えたバンドパスフィルタにおいて、さらに高い変換効率を得るためには、反射防止層の屈折率 $n_{AR}$ 及び厚さ $d_{AR}$ は、それぞれ、以下の関係を満たしているのが好ましい。

[0034] すなわち、反射防止層の屈折率 $n_{AR}$ は、 $0.60 \times n_{pv}^{1/2}$ 以上が好ましい。屈折率 $n_{AR}$ は、さらに好ましくは、 $0.7 \times n_{pv}^{1/2}$ 以上 $1.8 \times n_{pv}^{1/2}$ 以下、さらに好ましくは、 $0.8 \times n_{pv}^{1/2}$ 以上 $1.5 \times n_{pv}^{1/2}$ 以下である。

但し、 $n_{pv}$ は、前記光吸収材料の屈折率である。

[0035] また、反射防止層の厚さ  $d_{AR}$  は、 $1.70 \times d_{AR0}$  以下が好ましい。厚さ  $d_{AR}$  は、さらに好ましくは、 $0.4 \times d_{AR0}$  以上  $1.4 \times d_{AR0}$  以下、さらに好ましくは、 $0.7 \times d_{AR0}$  以上  $1.2 \times d_{AR0}$  以下である。

但し、 $d_{AR0}$  は、反射防止層の理想的な厚さ（実厚さ）であり、 $d_{AR0} = (1 - \sin^2 \theta / n_{AR}^2)^{1/2} \times (\lambda_0 / 4) \times (1 / n_{AR})$  で表される。

[0036] [1. 3. 4. 材料]

バンドパスフィルタを構成する各層の材料は、特に限定されるものではなく、目的に応じて種々の材料を用いることができる。

低屈折率材料としては、例えば、 $MgF_2$ （波長  $1064\text{ nm}$  の屈折率：約  $1.36$ ）、 $SiO_2$ （波長  $1064\text{ nm}$  の屈折率：約  $1.43$ ）などがある。

高屈折率材料としては、例えば、 $ZnS$ （波長  $1064\text{ nm}$  の屈折率：約  $2.29$ ）、 $TiO_2$ （波長  $1064\text{ nm}$  の屈折率：約  $2.25$ ）などがある。

反射防止層の材料としては、例えば、 $Y_2O_3$ （波長  $1064\text{ nm}$  での屈折率：約  $1.73$ ）、 $TiO_2-SiO_2$  などの複合酸化物などがある。

[0037] [1. 4. 拡散反射面]

光吸収部材は、その裏面に、拡散反射面を備えている。拡散反射面は、光吸収部材で吸収しきれなかった入射光を反射させるためのものである。拡散反射面の構造は、特に限定されないが、光吸収部材の裏面に形成された微細な凹凸構造が好ましい。凹凸構造の形状や周期を最適化すると、反射率が向上する。

[0038] 高い変換効率を得るためには、拡散反射面の全反射率は、 $93\%$  以上が好ましい。全反射率は、さらに好ましくは、 $95\%$  以上、さらに好ましくは、 $96\%$  以上、さらに好ましくは、 $97\%$  以上である。

ここで、「全反射率（％）」とは、正反射率と拡散反射率の合計をいう。

「正反射率（％）」とは、入射光を  $100$  とした時、正反射として反射す

る光の割合をいう。

「拡散反射率 (%)」とは、入射光を 100 とした時、正反射以外の反射光の割合をいう。

[0039] また、拡散反射面は、「拡散反射率  $\times$  100 / 全反射率」で表される指標が 49 % 以上であるものが好ましい。

前記指標は、拡散反射率の相対割合を表す。例えば、入射角  $\theta$  が  $0^\circ$  (垂直入射) である場合、拡散反射面で正反射し、かつ、光吸収部材で吸収しきれなかった光は、そのままバンドパスフィルターを透過する。そのため、拡散反射率が相対的に低い場合には、高い変換効率は得られない。

これに対し、前記指標が 49 % 以上となるように拡散反射面の形状を最適化すると、拡散反射面で反射された光が、バンドパスフィルターで再度反射される確率が高くなる。その結果、高い変換効率が得られる。前記指標は、さらに好ましくは、60 % 以上、さらに好ましくは、70 % 以上である。

[0040] [2. 作用]

バンドパスフィルターは、従来、白色光の中から特定波長の光を抽出するために用いられていた。このバンドパスフィルターを光電変換素子の受光面の上に設け、受光面に向かって単色光を照射すると、バンドパスフィルターは、入射光を遮ることなく、裏面からの反射光を再び光吸収部材内部に反射する。これにより、光吸収部材を薄型化しても高い光吸収率が確保される。また、材料の低減、タクトタイムの短縮が可能となり、コストを削減することができる。

[0041] さらに、光吸収部材を小型化、薄型化することにより、高い光吸収率と、低い内部抵抗を両立させることができる。その結果、入射光強度が大きい場合でも、抵抗損失が抑えられ、高い変換効率が得られる。

[0042] 以下に、太陽光励起レーザーと組み合わせる Si 太陽電池の具体的な構造を設計する。

(1) 通常、厚さ  $200\ \mu\text{m}$  程度のウェハが用いられるところを、 $20\ \mu\text{m}$  程度に薄型化し、かつ面内方向のサイズをやはり数  $10\ \mu\text{m}$  以下にまで微少

化することにより、太陽電池内部の直列抵抗を低減すること、

(2) 単色光垂直入射であることを利用し、表面にバンドパスフィルターを形成することにより、 $20\text{ }\mu\text{m}$ 程度の薄型ウェハであっても入射光を十分に吸収できること、及び、

(3) その結果、高い変換効率が得られること、を示す。

また、移動体などへの、あるいは高電磁ノイズ環境下での給電技術としても、レーザー光と太陽電池の組み合わせが利用されている。これに用いられる太陽電池にも、以下の結果は適用される。

[0043] [2. 1. 入射光強度の影響]

太陽電池の等価回路を図1に示す。図1中、 $J$ 、 $J_{ph}$ 、 $V$ は、それぞれ、出力電流密度、光誘起電流密度、出力電圧である。 $R_s$ 、 $R_{sh}$ は、それぞれ、直列抵抗、並列抵抗である。この電流密度 $J$ と電圧 $V$ の関係は、(1)式で表される。

[数1]

$$J = J_{ph} - J_0 \left\{ \exp \left( \frac{q(V + R_s J)}{n k_B T_{RT}} \right) - 1 \right\} - \frac{V + R_s J}{R_{sh}} \quad (1)$$

[0044] 但し、 $J_{ph}$ 、 $J_0$ 、 $n$ は、それぞれ、光誘起電流密度、逆方向飽和電流密度、理想因子である。 $k_B$ 、 $T_{RT}$ は、それぞれ、ボルツマン定数、室温である。 $J_0$ は、近似的には入射光強度や $V$ によらない一定値であると見なせる。そのため、入射光強度が大きくなれば、 $J_{ph}$ に対する逆方向電流の影響が相対的に小さくなるので、変換効率が向上する。しかし、同時に直列抵抗 $R_s$ による損失も増大するため、変換効率は最大となった後、逆に低下する。

[0045] 図2は、Si太陽電池(図2(a)、参考文献1)、III-V族化合物太陽電池(図2(b)、参考文献2)に疑似太陽光を照射したときの変換効率の集光倍率依存性のデータである。Siの場合は、せいぜい100倍で変換効

率が最大となり、その後徐々に低下してしまう。III-V族化合物の場合も、数100倍まで変換効率が向上するが、その後低下する。

[参考文献1] M. Castro et al., Solar Energy Mater. Solar Cells 92, 1697(2008)

[参考文献2] R. R. King et al., Prog. Photovolt.: Res. Appl. 20, 801(2012)

[0046] Si太陽電池は、通常、ドーパント濃度 $10^{16} \sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 程度のp型ウェハの表面に、ドーパント濃度 $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 程度、厚さ $0.3 \mu\text{m}$ 程度のn型層を形成して作製される。p型ウェハの厚さは $200 \mu\text{m}$ 、比抵抗は $1 \sim 0.1 \Omega \text{ cm}$ 程度であるため、ウェハの厚さ方向の抵抗が問題となる。n型層は厚さが $0.3 \mu\text{m}$ 程度と薄いため、厚さ方向の抵抗は問題とならないが、シート抵抗が $10 \sim 100 \Omega$ であるため、サイズによっては面内方向の抵抗が影響を及ぼすおそれがある。

[0047] n型層の面内方向の抵抗については、太陽電池の直径を数 $10 \mu\text{m}$ に抑えたマイクロ太陽電池が提案されており、入射光強度 $1 \sim 10 \text{ kW/cm}^2$ まではその影響を受けずに、入射光強度の増大に伴って変換効率が向上することが見い出されている(図3)(参考文献3、4)。図3中、Rは、太陽電池のシート抵抗値である。

太陽光を直接照射する場合、レンズなどを用いて数 $10 \mu\text{m}$ の太陽電池上に集光することは現実的ではないが、光ファイバーを用いた太陽光励起レーザーの場合、これとの接続は容易である。

[参考文献3] M. Paire et al., J. Appl. Phys. 108, 034907(2010)

[参考文献4] M. Paire et al., Appl. Phys. Lett. 98, 264102(2011)

[0048] 一方、p型ウェハの厚さ方向の抵抗については、ウェハを薄くすれば抵抗値は小さくなるが、入射光波長( $1064 \text{ nm}$ )がSiの吸収端に近いので、光を十分に吸収できなくなる恐れがある。そこで、太陽電池のシミュレーターPC1Dを用いて、ウェハ厚さと光吸収率、変換効率の関係、及び厚さ方向の抵抗の影響を調べた。

通常の太陽電池と同様に、表面に深さ  $3\ \mu\text{m}$  のテクスチャー（透過率：1）、裏面に拡散反射構造（反射率：1）を設定した。非集光で用いられる場合には、比抵抗が  $1\ \Omega\ \text{cm}$  程度の p 型ウェハが用いられるが、入射光強度が大きい場合には、より比抵抗が小さい  $0.1 \sim 0.2\ \Omega\ \text{cm}$  の方が高い変換効率を得ることができる。そこで、計算の際には  $0.1\ \Omega\ \text{cm}$  の値を用いた。n 型層のシート抵抗は、通常の値である  $50\ \Omega$  に設定した。バルク再結合寿命は、典型値である  $1000\ \mu\text{s}$  とした。

[0049] ウェハが薄い場合には、表面再結合速度が変換効率に大きく影響する。従来の熱酸化膜によるパッシベーションの場合には  $10^5 \sim 10^6\ \text{cm/s}$  であるのに対し、近年、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  や i 型アモルファス Si を用いたパッシベーションにより、 $10\ \text{cm/s}$  を下回る値が実現された。そこで、今回の計算には  $10\ \text{cm/s}$  の値を用いた。

電極との接触抵抗は、実質的にゼロとなるような値を設定した。並列抵抗もゼロに設定した。その他のパラメーターは、PC1D のデフォルト値を用いた。この条件下、厚さ  $200\ \mu\text{m}$  の太陽電池に AM1.5G  $1\ \text{sun}$  光を照射したときの変換効率は、22.5% である。

[0050] 表面テクスチャーと裏面拡散反射構造を備えた通常の Si 太陽電池に波長  $1064\ \text{nm}$  の単色光を照射したときの特性の計算結果を図4に示す。図4（a）は、入射光強度と変換効率の関係を示す図である。図4（b）は、Si ウェハの厚さと変換効率及び光吸収率との関係を示す図である。図4（c）は、電流密度  $V$  と電流密度  $J$  との関係を示す図である。図4（c）中、電流密度  $J$  は、入射光子数を電流値に換算した値（入射光強度  $10\ \text{mW/cm}^2$  のとき  $8.582\ \text{mA/cm}^2$ ）により規格化されている。

[0051] 図4（a）は、変換効率の入射光強度依存性を、2通りの厚さについて比較したものである。厚さ  $200\ \mu\text{m}$  の場合は、入射光強度  $1\ \text{W/cm}^2$  で変換効率は最大となり、その後低下する。一方、厚さが  $50\ \mu\text{m}$  の場合は、 $R_s$  が小さいため、より高強度まで変換効率が向上するものの、光が十分に吸収されないため、効率は低い値に留まる。

[0052] 光吸収率のウェハ厚さ依存性は、変換効率と共に図4（b）に示されている。小さい入射光強度の場合は、変換効率は光吸収率と同様に厚さの単調増加関数である。

一方、入射光強度が  $1 \text{ kW/cm}^2$  の場合は、厚さ  $30 \mu\text{m}$  辺りから直列抵抗の影響により飽和傾向となり、 $75 \mu\text{m}$  で最大（30.3%）となった後に減少する。

[0053] 図4は、厚さ  $200 \mu\text{m}$  及び  $50 \mu\text{m}$  の太陽電池の J-V 特性である。ただし、J は、入射光子数を電流値に換算した値（入射光強度  $10 \text{ mW/cm}^2$  のときに  $8.582 \text{ mA/cm}^2$ ）により規格化されている。これより、入射光強度が  $1 \text{ kW/cm}^2$  の場合は、厚さ  $50 \mu\text{m}$  であっても直列抵抗の影響が著しいことがわかる。

従って、入射光強度が大きい場合にも高い変換効率を得るためには、先ずウェハを薄くして  $R_s$  を小さくすることが必須である。ただし、従来の表面テクスチャーと裏面の拡散反射構造の場合には、光を十分に吸収できないため、より効果的な光閉じこめ構造が必要である。

[0054] [2. 2. バンドパスフィルターの光閉じ込め効果]

通常の太陽電池に用いられる表面、あるいは裏面テクスチャーに加えて、最近、プラズモン共鳴やフォトリソニックバンドを利用した光閉じ込め構造が多数提案されている。図5は、その一例である（参考文献5）。図5（a）中、 $500 \text{ nm}$ 、 $700 \text{ nm}$  は、Ag 凹凸構造の周期を表す。また、図5（a）には、比較のため平板電極（flat）、及び旭硝子製テクスチャー付透明電極（Asahi）の場合の結果も示されている。

[参考文献5] V. E. Ferry et al., Opt. Express 18, A237(2010)

[0055] サブストレート型アモルファス Si 太陽電池において、周期的な凹凸をもつ Ag 電極が用いられている。その外部量子効率、平板構造のものよりは高いものの、薄膜 Si 太陽電池に標準的に用いられる旭硝子製テクスチャー付透明電極の場合と大差ない。このように、白色光であり、かつ入射方向が時々刻々変化する太陽光に対する光閉じ込めは容易ではない。そこで、今の

用途の特徴である、単色光垂直入射を活用した光閉じ込め方法を考える。

[0056] 太陽電池の表面、裏面共に平滑であり、それぞれ理想的な反射防止（表面）及び反射（裏面）構造が形成されている場合、太陽電池に垂直に入射した光は裏面で反射され、再び表面を透過して外部へ伝搬する。従って、光吸収率  $A$  は、 $A = T_F (1 - \exp(-2\alpha d))$  である。ただし、表面の理想的な反射防止構造を仮定しているため、表面の透過率  $T_F$  は 1 である。太陽電池の厚さ  $d$  が光吸収係数  $\alpha$ （Si の場合、波長 1064 nm で  $9.6528 \text{ cm}^{-1}$  である）の逆数に近いかわそれよりも小さい場合、入射光は十分に吸収されずにその一部が外部へ漏れてしまう。

[0057] 次に、裏面が拡散反射面である場合を考える。この場合、太陽電池材料の屈折率  $n_{pv}$ （Si の場合、波長 1064 nm で 3.55 である）は、空気のそれよりも大きいので、臨界角  $\theta_c = \arcsin(1/n_{pv})$  よりも小さい角度で反射され、表面へ向かって伝搬する光（伝搬角  $\theta$ ）は再び表面を透過し外部へ伝搬する。しかし、大きい角度の場合は表面で全反射され、再び裏面へ向かう（図 6 参照）。従って、 $A$  は、（2）式のように表せる。

[数2]

$$\begin{aligned} A &= T_F (1 - a_0 (a_{ex} + a_{in} (a_{ex} + a_{in} (a_{ex} + \dots)))) \\ &= T_F \left( 1 + \frac{a_0 a_{ex}}{1 - a_{in}} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

[0058] ここで、

$a_0$  は垂直入射光が表面を透過した後、裏面に到達したときの相対強度、

$a_{ex}$  は裏面にて反射された光のうちの、表面を透過する成分の相対強度、

$a_{in}$  は裏面にて反射された光のうちの、表面で反射されて再び裏面に到達する成分の相対強度であり、（3）～（5）式で表せる。

[数3]

$$a_0 = \exp(-\alpha d) \quad (3)$$

$$a_{\text{ex}} = \frac{\int_0^{\theta_c} d\theta \sin \theta \cos \theta \exp\left(-\frac{\alpha d}{\cos \theta}\right)}{\int_0^{\pi/2} d\theta \sin \theta \cos \theta} \quad (4)$$

$$a_{\text{in}} = \frac{\int_{\theta_c}^{\pi/2} d\theta \sin \theta \cos \theta \exp\left(-\frac{2\alpha d}{\cos \theta}\right)}{\int_0^{\pi/2} d\theta \sin \theta \cos \theta} \quad (5)$$

[0059]  $\alpha d \ll 1$ 、 $n_{\text{pv}} \gg 1$ の極限では、 $A$ は、(6)式となり、実効的な光路長が  $4 n_{\text{pv}}^2$ 倍となるYablonovitch limitが導かれる。

[数4]

$$A \cong T_F \left( 1 - 4 n_{\text{pv}}^2 \alpha d \right) \quad (6)$$

[0060] 今、光の入射方向は垂直に限定されているので、裏面で反射されて再び表面へ向かう光のうち、垂直に進行する成分は透過、斜め方向に進行する成分は反射されるような工夫を表面に施せば、太陽電池内部から外部への伝搬を抑制することができるので、 $A$ は大きくなる。太陽電池内部から表面へ向かう光の表面での反射率を  $R_B(\theta)$  ( $R_B(\theta > \theta_c) = 1$ ) とすると、 $a_{\text{ex}}$ 、 $a_{\text{in}}$ は、(7)式、(8)式のように表される。

[数5]

$$a_{\text{ex}} = \frac{\int_0^{\theta_c} d\theta \sin \theta \cos \theta (1 - R_B(\theta)) \exp\left(-\frac{\alpha d}{\cos \theta}\right)}{\int_0^{\pi/2} d\theta \sin \theta \cos \theta} \quad (7)$$

$$a_{\text{in}} = \frac{\int_0^{\theta_c} d\theta \sin \theta \cos \theta R_B(\theta) \exp\left(-\frac{2\alpha d}{\cos \theta}\right) + \int_{\theta_c}^{\pi/2} d\theta \sin \theta \cos \theta \exp\left(-\frac{2\alpha d}{\cos \theta}\right)}{\int_0^{\pi/2} d\theta \sin \theta \cos \theta} \quad (8)$$

[0061] 垂直入射光の透過率  $T_F$  は1に近い値が必要であるので、 $R_B(\theta = 0) \div 1$ は必須である。即ち、太陽電池の裏面で反射された光の内、垂直に近い方向に

進行する成分の外部への伝搬は避けられない。一方、斜め方向に進行する光の、表面に垂直な方向の位相変化は、波長がより長い光のそれと等価である。従って、太陽電池表面に、波長 $\lambda_0$ の垂直入射光を透過し、これよりも長波長の垂直入射光を反射するようなフィルター、即ちバンドパスフィルターあるいは長波長カットフィルターを形成すれば良い。

[0062] この技術を太陽光（白色光）入射に対して用いる場合は、先に述べたように $T_F \approx 1$ が要求されるので、カットできる波長は太陽電池材料の吸収端よりも長い部分のみである。従って、長波長カットフィルターによる光閉じ込め効果は吸収端付近の光に限られるので、その効果は僅かである。

[0063] [2. 3. バンドパスフィルターの設計]

屈折率の異なる2種類の材料の薄膜を交互に積層することにより、種々の機能を持つ光学フィルターを形成することができる。高屈折率材料、低屈折率材料にそれぞれ $ZnS$ （屈折率：2.29）、 $MgF_2$ （屈折率：1.36）を用いることを想定する。太陽電池材料である $Si$ の屈折率は、先に述べたように $n_{pv} = 3.55$ である。これらの条件下でのバンドパスフィルター及び長波長カットフィルターの最適構造を考える。

[0064] バンドパスフィルターの基本構造は、光学厚さ（厚さとその材料の屈折率とをかけた値）が $\lambda_0/2$ の膜を、厚さ $\lambda_0/4$ の高／低屈折率材料の交互積層膜により挟んだものである。これを屈折率：1.5のガラス基板上に形成する場合、積層順が $(L4/H4)^{m1}L2/(H4/L4)^{m2}/$ ガラス基板よりも、図7（a）に示されるような $(H4/L4)^{m1}H2/(L4/H4)^{m2}/$ ガラス基板の方が、バンド幅が狭くなることが知られている。ここで、 $L4$ 、 $H4$ はそれぞれ低屈折率、高屈折率材料の光学厚さ $\lambda_0/4$ の層を表す。 $(L4/H4)^m$ は $L4/H4$ が $m$ 回繰り返して積層されていることを表す。

[0065] この積層構造の垂直入射光に対する透過スペクトルを転送行列法により計算した結果を図8（a）に示す。ここで、各材料の屈折率の波長依存性は無視し、波長1064nmでの値をそのまま用いた。

これらを太陽電池の表面に形成した場合、太陽電池材料の屈折率が大きい

ため、バンドパスフィルターの機能は得られるものの、透過率の尖頭値が低くなる（図8（b））。そこで、最表面に反射防止（AR）のための層を形成するのが好ましい。屈折率 $n_s$ の下地の上に、屈折率 $n_{AR} = n_s^{1/2}$ 、厚さ $\lambda_0 / n_{AR} / 4$ の層を形成すれば反射率をゼロにすることができる。

[0066] 今の場合、バンドパス層の上に反射防止層を形成するが、その場合も屈折率 $n_{AR} = n_{pv}^{1/2} = 1.884$ 、厚さ $\lambda_0 / n_{AR} / 4$ の層を用いれば、反射率をゼロにできることを確認した。この屈折率の値は、 $TiO_2-SiO_2$ 、 $ZrO_2-SiO_2$ 、 $Nb_2O_3-SiO_2$ などの複合酸化物を用いることにより実現することができる。このときは、図8（c）、（d）に示されるように、 $AR / (L4 / H4)^{m1} L2 / (H4 / L4)^{m2}$  / 太陽電池（図7（b））の積層順の方がバンド幅が狭くなる。

[0067] 長波長カットフィルターの基本構造も（ $H4 / L4 /$ ）の繰り返し積層である。ただし、（ $H4 / L4 /$ ）のみであると透過帯域に現れるリップルが著しいため、通常、表面及び基板との界面に光学厚さ $\lambda_0 / 8$ の層が形成される。この場合についても同様の計算を行い、図8（e）に示される $L8 / (H4 / L4)^m H8$  / 太陽電池の構造が最も高性能であることを確認した。ただし、同じ積層数のバンドパスフィルター（図8（d））よりも透過／反射の変化がなだらかであるため、バンドパスフィルターよりも光閉じ込め効果が小さいことがわかった。

## 実施例

[0068] （実施例1）

$Si$  太陽電池表面に図7（b）の構造のバンドパスフィルターを形成したときの特性を調べた。図9（a）は、光吸収率 $A$ を $Si$ の厚さの関数として計算した結果である。比較のために、通常用いられる（[2.1.] 参照）表面テクスチャー構造と理想的な反射防止構造についての結果も併せて示す。

[0069] 全層数が6の場合であっても大きな閉じ込め効果が現れており、通常の太陽電池に比べて光吸収率が向上する。更に、全層数が増大するにつれて効果

はより強くなる。太陽電池裏面で反射された光の表面反射率  $R_s(\theta)$  は、図 9 (b) に示される通り、全層数が増大すると、より小さい  $\theta$  で 1 に近い値となる。即ち、全反射の臨界角  $\theta_c$  が小さくなるのと等価である。

[0070] [2. 1.] で述べたように、光強度が大きい場合にも高い変換効率を得るためには、Si ウェハを薄くすることが必須である。表面に全層数 14 のバンドパスフィルターを形成すれば、厚さ  $20\ \mu\text{m}$  でも 92% の光吸収率が得られることがわかる。但し、これ以上層数を増やしても、その効果は小さい。

[0071] 図 9 (a) に示される光吸収率の値を用いて、[2. 1.] と同様にして PC1D を用いて太陽電池の特性を計算した結果を図 10 に示す。厚さ  $50\ \mu\text{m}$  の場合、光閉じ込め効果により、先に示した通常の Si 太陽電池 (図 4) よりも高い変換効率を得られる。

入射光強度  $100\text{ W}/\text{cm}^2$  までは入射光強度の増大に伴い変換効率が向上することは、先に示した通常の Si 太陽電池の場合と同様である。厚さ  $20\ \mu\text{m}$  の場合は、太陽電池の直列抵抗  $R_s$  が小さいので、より大きい入射光強度 ( $1\text{ kW}/\text{cm}^2$ ) で変換効率が最大となり、また  $1\text{ kW}/\text{cm}^2$  以上のときには  $50\ \mu\text{m}$  のものよりも高い値が得られる。

[0072] 図 10 (b) からわかるように、入射光強度が弱い場合には変換効率は光吸収率に支配されており、Si 厚さの増大に伴って向上する。一方、入射光強度が  $1\text{ kW}/\text{cm}^2$  のときには、Si 厚さが増大すると光吸収率が高くなるものの  $R_s$  の影響が大きくなるので、厚さ  $20\ \mu\text{m}$  で変換効率は最大となる。このときの値 59.5% は、通常の Si 太陽電池の最高値 30.3% ( $75\ \mu\text{m}$ ) のほぼ 2 倍の値である。 $R_s$  の影響は、図 10 (c) に示される J-V 特性にも表れている。

[0073] このような薄型太陽電池は、Si ウェハに水素イオンを注入して脆弱化した後に剥離する Smart Cut 技術や、Si 薄板の両面にそれぞれ  $p^+$ / $n^+$  層と電極を形成した後に短冊形状の薄片を切り出す Silver 技術により作製することができる。

## [0074] (実施例 2)

変換効率に及ぼす各種パラメータの揺らぎの影響を検討した。入射光強度は  $1 \text{ kW/cm}^2$  とし、 $S_i$  厚さは変換効率が最大となる  $20 \mu\text{m}$  とした。合計層数は 6 ( $m_1 = m_2 = 1$ ) とした。

図 11 に、結果を示す。図 11 中、細線 (変換効率: 30.3%) は、通常の表面テクスチャーが形成されている場合に変換効率が最大となる  $S_i$  厚さ  $75 \mu\text{m}$  の結果である。図 11 より、以下のことがわかる。

[0075] (1)  $\Delta\lambda/\lambda_0$  が  $-3.0\% \sim +3.9\%$  のときに、変換効率は 30% 以上となる (図 11 (a))。図 11 (a) より、入射光の波長  $\lambda_0$  (又は、バンドパスフィルターを透過可能な光の中心波長  $\lambda$ ) が理想的な値から若干ずれても、ずれが所定の範囲内であれば、高い変換効率を得られることがわかる。

(2)  $\Delta\theta$  が  $23^\circ$  以下のときに、変換効率は 30% 以上となる (図 11 (b))。図 11 (b) より、入射光が垂直入射する平行光線でない場合であっても、入射角  $\theta$  のずれ又は平行光線からのずれが所定の範囲内であれば、高い変換効率を得られることがわかる。

[0076] (3)  $\Delta n_{AR}/n_{AR0} = 0$  のときに、変換効率は最大となる (図 11 (c))。図 11 (c) より、 $n_{AR}$  が理想的な値 ( $= n_{pv}^{1/2}$ ) からずれても、変換効率に与える影響は小さいことがわかる。また、高い変換効率を得るためには、 $\Delta n_{AR}/n_{AR0}$  は、 $-30\% \sim +80\%$  の範囲が好ましいことがわかる。

(4)  $\Delta d_{AR}/d_{AR0} = 0$  のときに、変換効率は最大となる (図 11 (d))。図 11 (d) より、 $d_{AR}$  が理想的な値からずれても、変換効率に与える影響は小さいことがわかる。また、高い変換効率を得るためには、 $\Delta d_{AR}/d_{AR0}$  は、 $-60\% \sim +40\%$  の範囲が好ましいことがわかる。

[0077] (5)  $\Delta d_{L4}/d_{L40}$  が  $-25\% \sim +20\%$  のときに、変換効率は 30% 以上となる (図 11 (e))。  $\Delta d_{H4}/d_{H40}$  が  $-13\% \sim +10\%$  のときに、変換効率は 30% 以上となる (図 11 (f))。さらに、 $\Delta d_{L2}/d_{L20}$  が  $-7.4\% \sim +5.8\%$  のときに、変換効率は 30% 以上となる (図 11 (g))。図

11 (e) ~ 図 11 (g) より、バンドパスフィルタを構成する各層の厚さが理想的な値から若干ずれても、ずれが所定の範囲内であれば、高い変換効率が得られることがわかる。

[0078] (実施例 3)

変換効率に及ぼす拡散反射層の機能の影響を検討した。入射光強度は  $1 \text{ kW/cm}^2$  とし、 $S_i$  厚さは変換効率が最大となる  $20 \mu\text{m}$  とした。合計層数は 14 ( $m_1 = m_2 = 3$ ) とした。

図 12 に、結果を示す。図 12 中、細線 (変換効率: 30.3%) は、通常の表面テクスチャーが形成されている場合に変換効率が最大となる  $S_i$  厚さ  $75 \mu\text{m}$  の結果である。図 12 より、以下のことがわかる。

[0079] (1) 全反射率が 0.93 以上のときに、変換効率は 30% 以上となる。

(2) 拡散反射率/全反射率で表される指標が 0.49 以上のときに、変換効率は 30% 以上となる。

[0080] 以上、本発明の実施の形態について詳細に説明したが、本発明は上記実施の形態に何ら限定されるものではなく、本発明の要旨を逸脱しない範囲で種々の改変が可能である。

### 産業上の利用可能性

[0081] 本発明に係る光電変換素子は、太陽電池、光導電セル、フォトダイオード、フォトトランジスタなどに用いることができる。

## 請求の範囲

- [請求項1]           以下の構成を備えた光電変換素子。
- (1) 前記光電変換素子は、波長 $\lambda_0$ の単色光を吸収して、キャリアを発生させることが可能な光吸収材料からなる光吸収部材を備え、入射光として前記単色光からなる略平行光線が用いられる。
- (2) 前記光電変換素子は、前記入射光が入射角 $\theta$ で入射する面にバンドパスフィルターが形成されており、
- 前記バンドパスフィルターは、少なくとも波長 $\lambda_0$ の光を選択的に透過させる機能を持つ。
- (3) 前記光吸収部材は、その裏面に拡散反射面を備えている。
- [請求項2]           前記バンドパスフィルターを透過可能な光の中心波長 $\lambda$ は、 $0.97 \times \lambda_0$ 以上 $1.039 \times \lambda_0$ 以下である請求項1に記載の光電変換素子。
- [請求項3]           前記入射角 $\theta$ は、 $0^\circ \pm 2.3^\circ$ である請求項1又は2に記載の光電変換素子。
- [請求項4]           以下の構成をさらに備えた請求項1から3までのいずれか1項に記載の光電変換素子。
- (4) 前記バンドパスフィルターは、 $(L4/H4)^{m1}L2(H4/L4)^{m2}$ の積層構造を持つ。
- 但し、
- 「L4」は、屈折率が $n_{L4}$ である低屈折材料(A)からなる低屈折率層(A)、
- 「L2」は、屈折率が $n_{L2}$ である低屈折材料(B)からなる低屈折率層(B)。
- 「H4」は、屈折率が $n_{H4}$  ( $> n_{L4}$ 、 $> n_{L2}$ )である高屈折材料(A)からなる高屈折率層(A)。
- $m_1$ 、 $m_2$ は、それぞれ、1以上の整数。
- (5) 前記低屈折率層(A)の厚さ $d_{L4}$ は、 $0.75 \times d_{L40}$ 以上 $1.$

$2.0 \times d_{L40}$ 以下であり、

前記低屈折率層（B）の厚さ  $d_{L2}$  は、 $0.926 \times d_{L20}$  以上  $1.058 \times d_{L20}$  以下であり、

前記高屈折率層（A）の厚さ  $d_{H4}$  は、 $0.87 \times d_{H40}$  以上  $1.10 \times d_{H40}$  以下である。

但し、

$$d_{L40} = (1 - \sin^2 \theta / n_{L4}^2)^{1/2} \times (\lambda_0 / 4) \times (1 / n_{L4}),$$

$$d_{L20} = (1 - \sin^2 \theta / n_{L2}^2)^{1/2} \times (\lambda_0 / 2) \times (1 / n_{L2}),$$

$$d_{H40} = (1 - \sin^2 \theta / n_{H4}^2)^{1/2} \times (\lambda_0 / 4) \times (1 / n_{H4}).$$

[請求項5] 前記バンドパスフィルタは、最表面に反射防止層（AR）をさらに備えている請求項4に記載の光電変換素子。

[請求項6] 前記反射防止層の屈折率  $n_{AR}$  は、 $0.60 \times n_{pv}^{1/2}$  以上であり、  
前記反射防止層の厚さ  $d_{AR}$  は、 $1.70 \times d_{AR0}$  以下である  
請求項5に記載の光電変換素子。

但し、

$n_{pv}$  は、前記光吸収材料の屈折率、

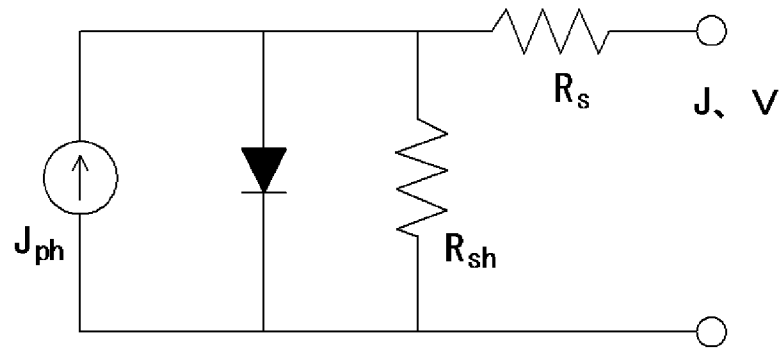
$$d_{AR0} = (1 - \sin^2 \theta / n_{AR}^2)^{1/2} \times (\lambda_0 / 4) \times (1 / n_{AR}).$$

[請求項7] 前記光吸収部材は、厚さ  $100 \mu m$  以下、面内方向のサイズが  $100 \mu m$  以下であるSiウェハからなる請求項1から6までのいずれか1項に記載の光電変換素子。

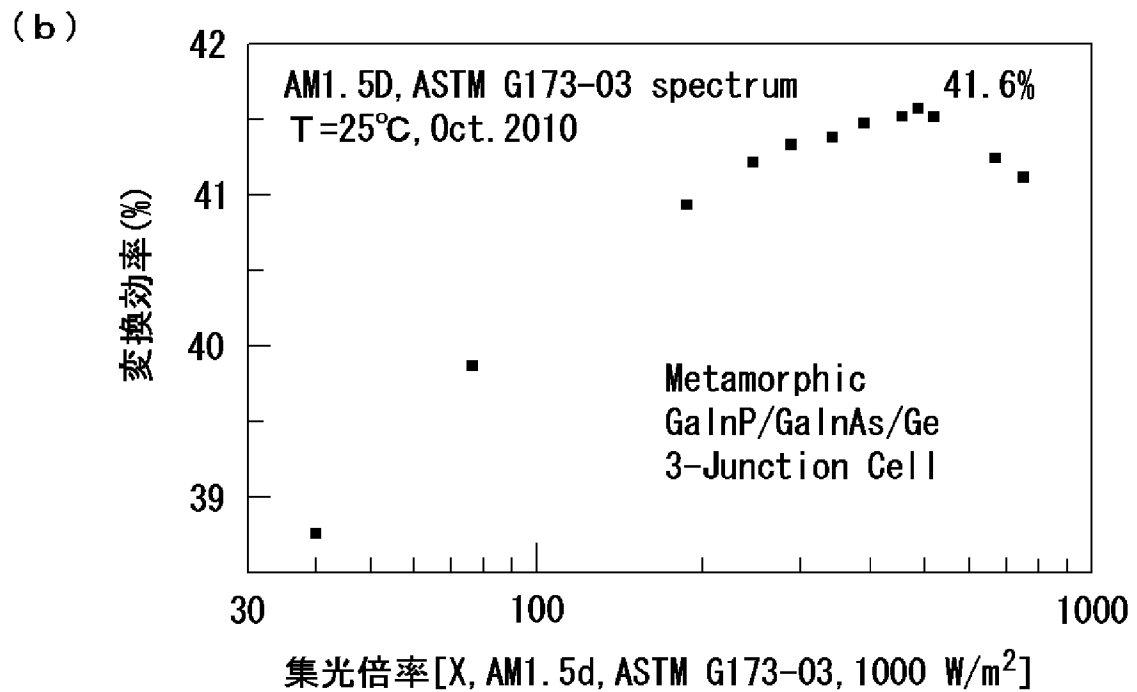
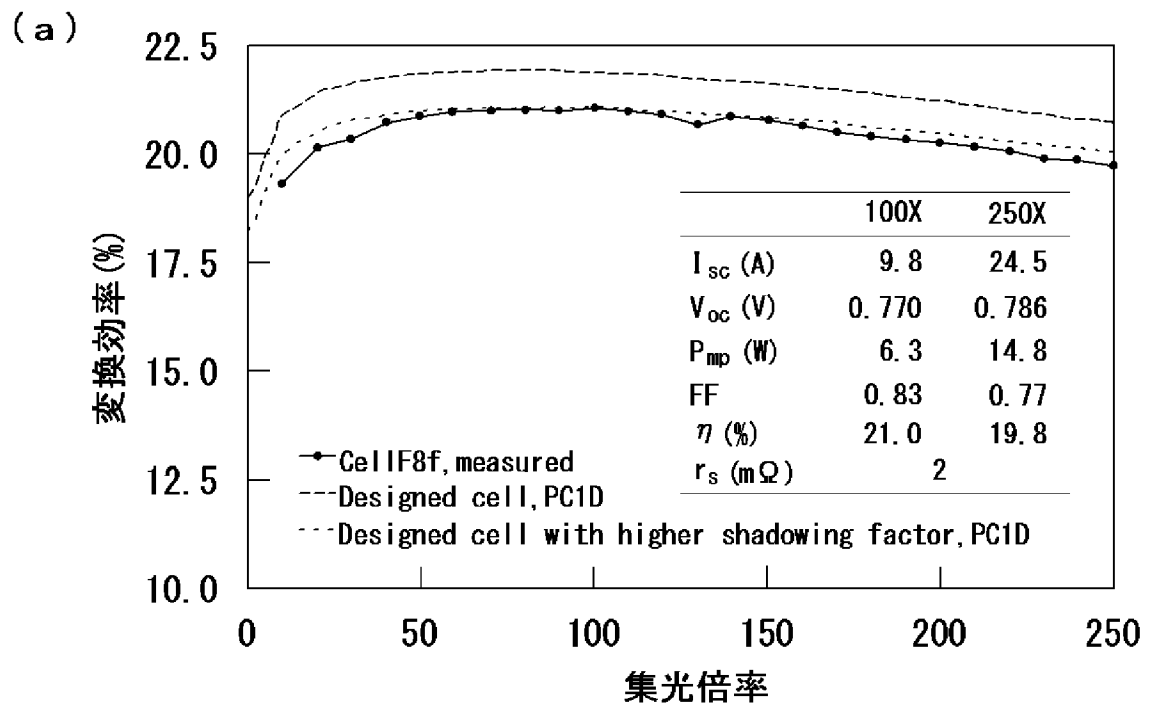
[請求項8] 前記拡散反射面は、全反射率が93%以上である請求項1から7までのいずれか1項に記載の光電変換素子。

[請求項9] 前記拡散反射面は、「拡散反射率  $\times 100$  / 全反射率」で表される指標が49%以上である請求項1から8までのいずれか1項に記載の光電変換素子。

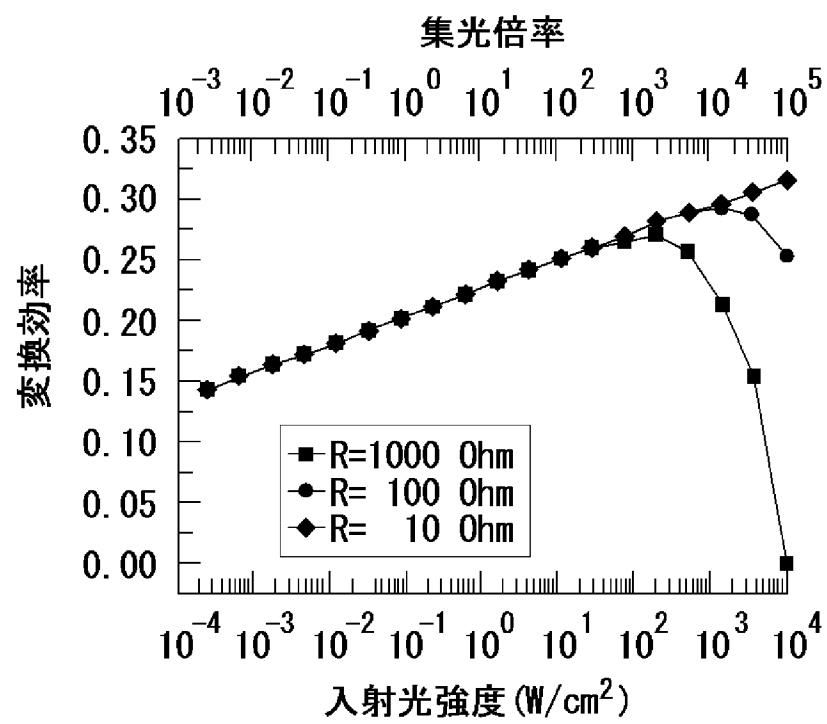
[図1]



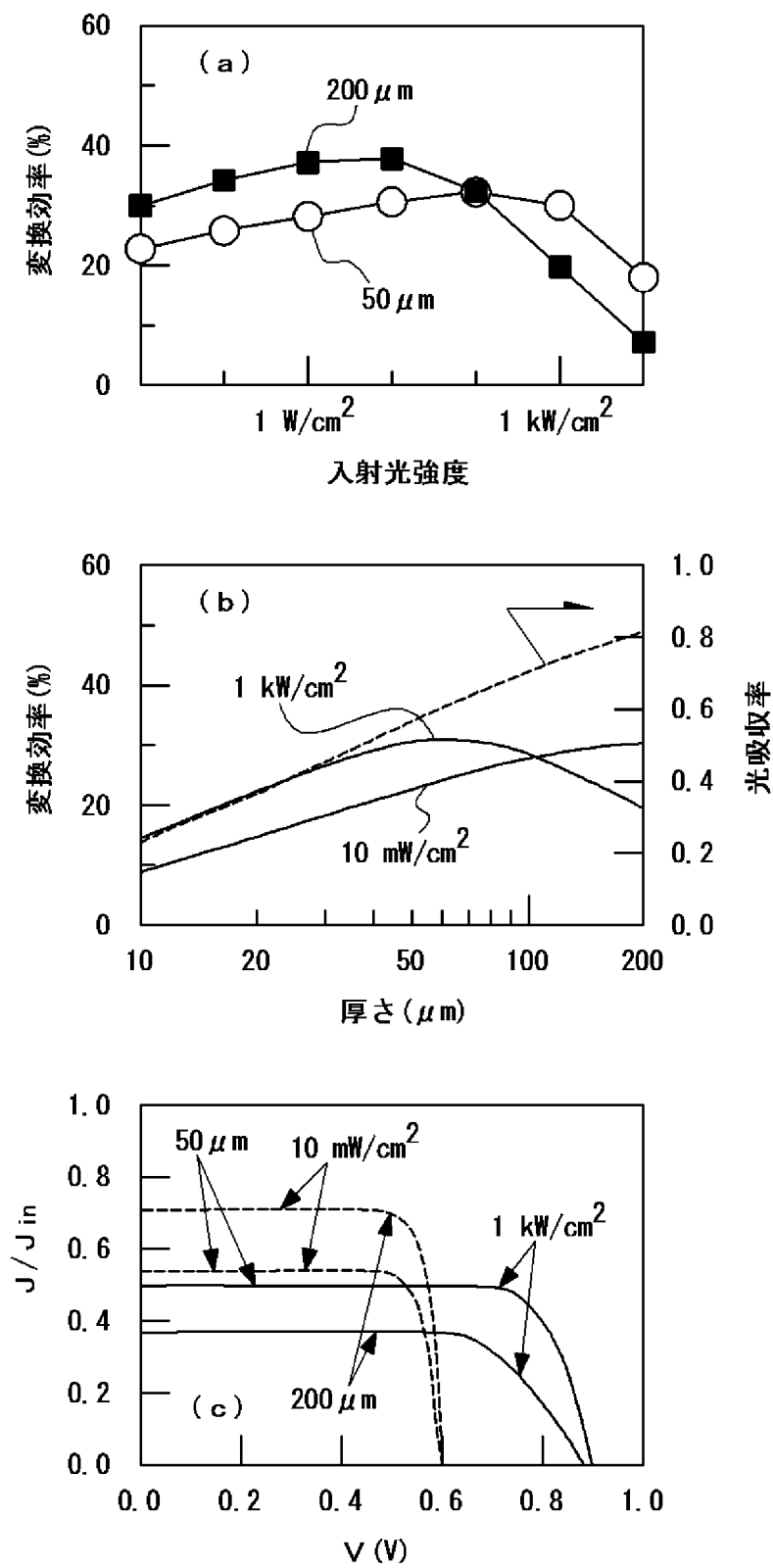
[図2]



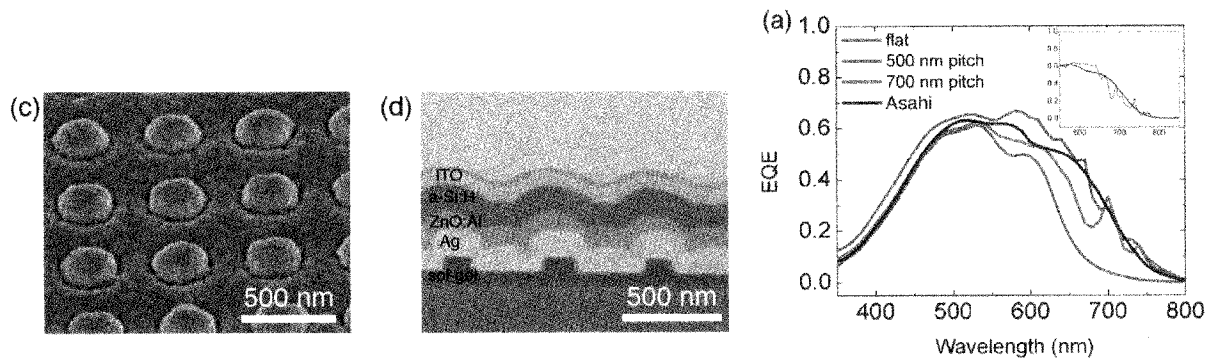
[図3]



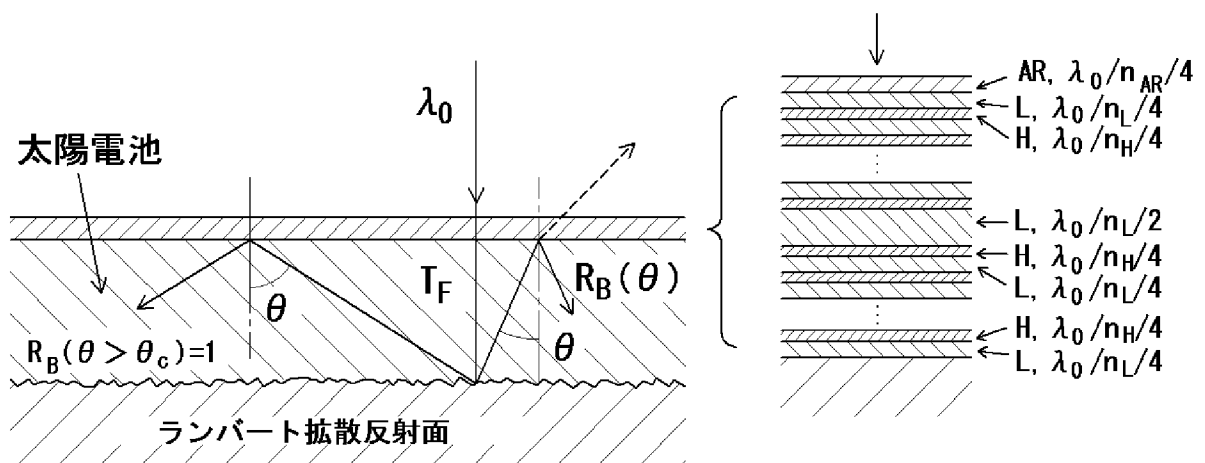
[図4]



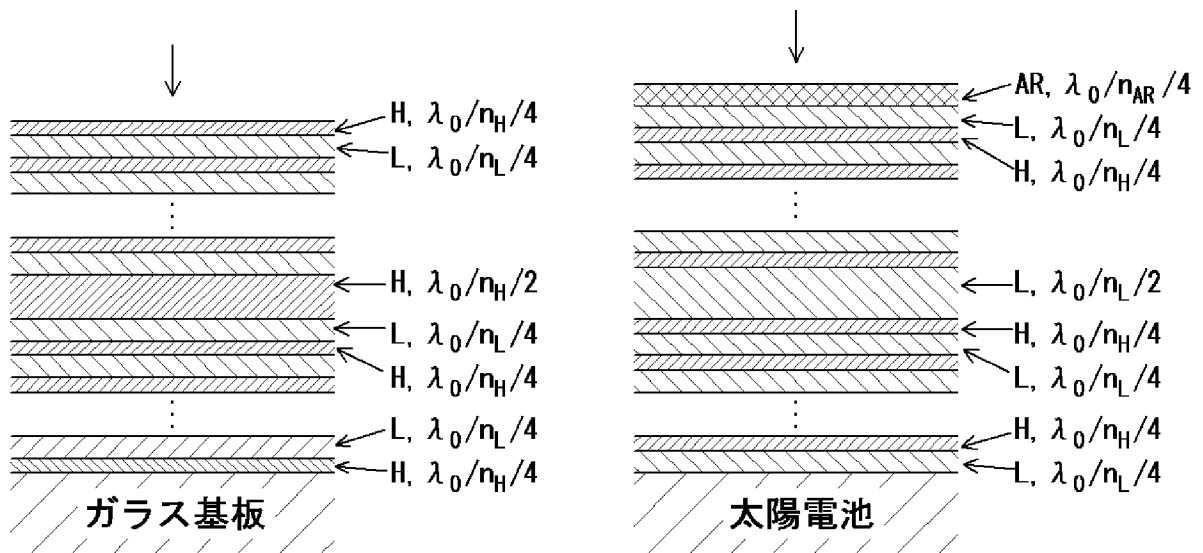
[図5]



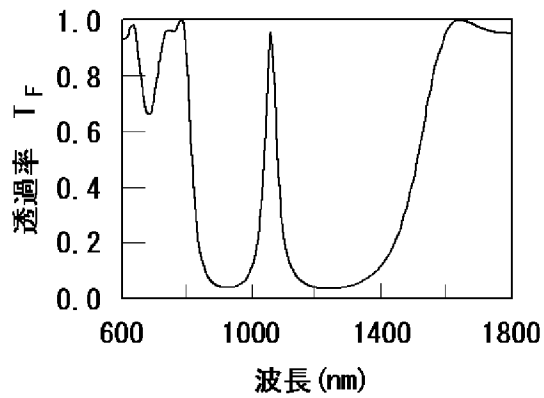
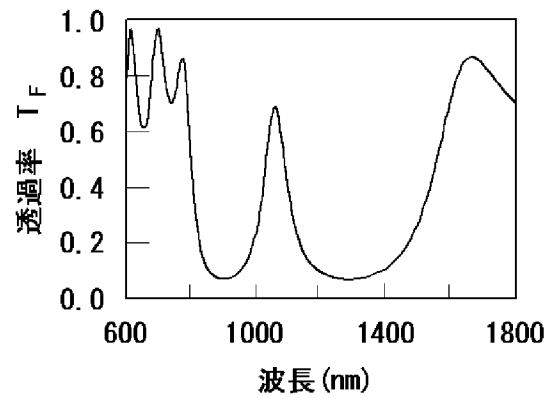
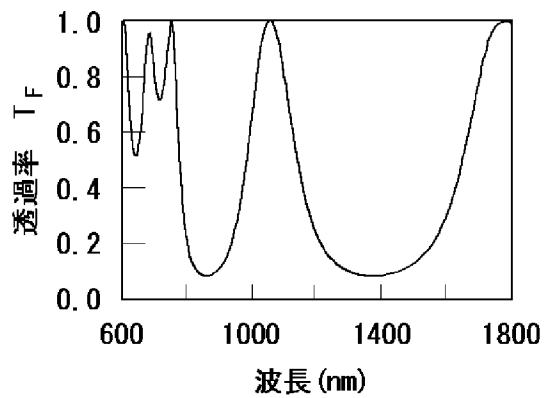
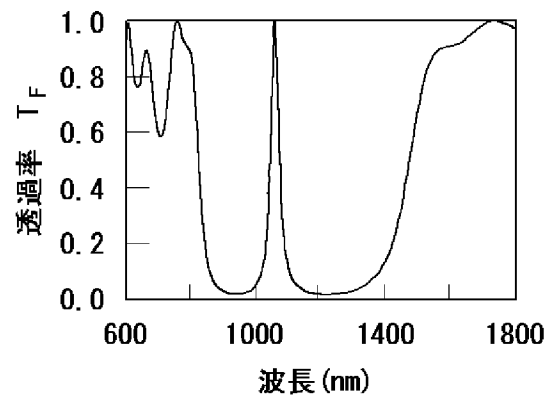
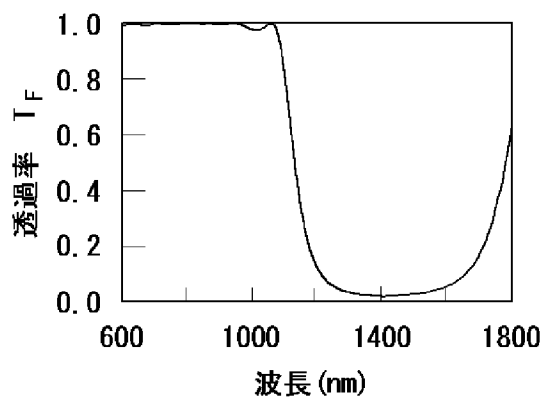
[図6]



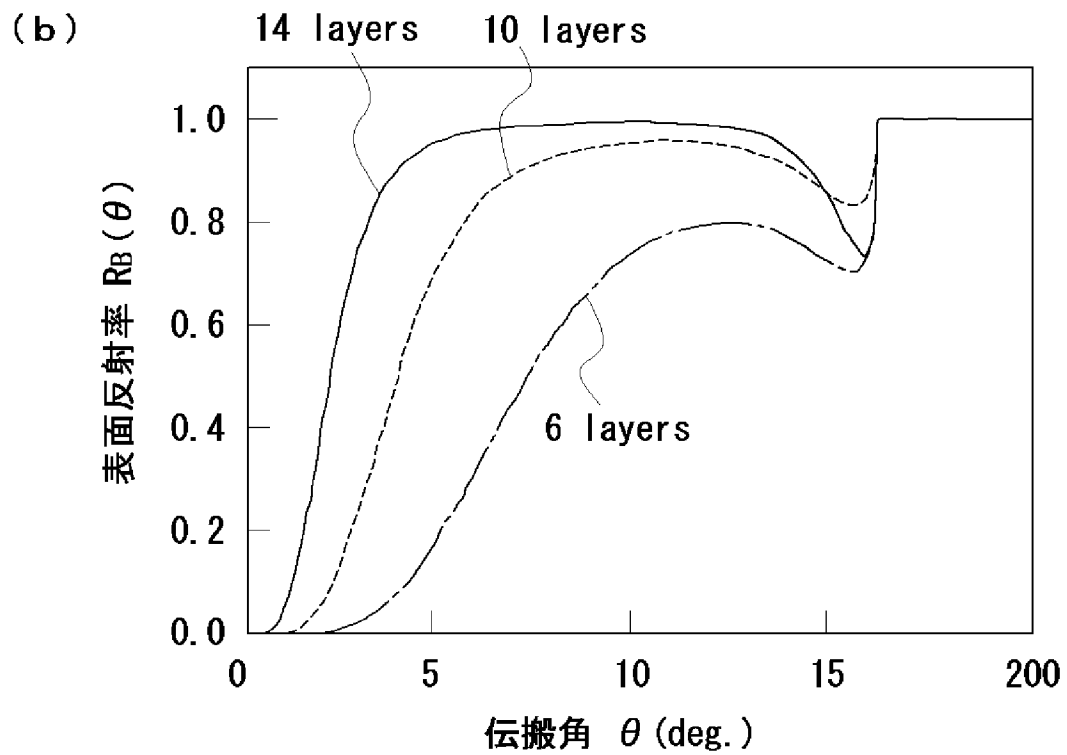
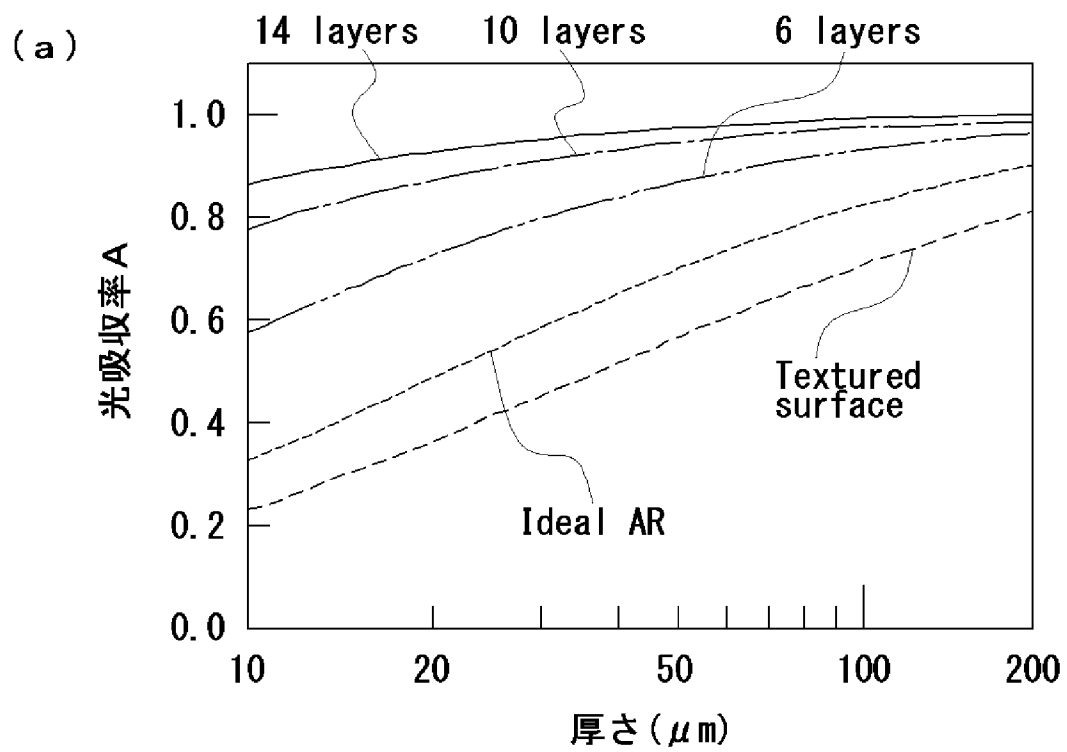
[図7]

(a)  $(H4/L4/)^{m1} H2/ (L4/H4/)^{m2} / \text{ガラス基板}$ (b)  $AR/ (L4/H4/)^{m1} L2/ (H4/L4/)^{m2} / \text{太陽電池}$

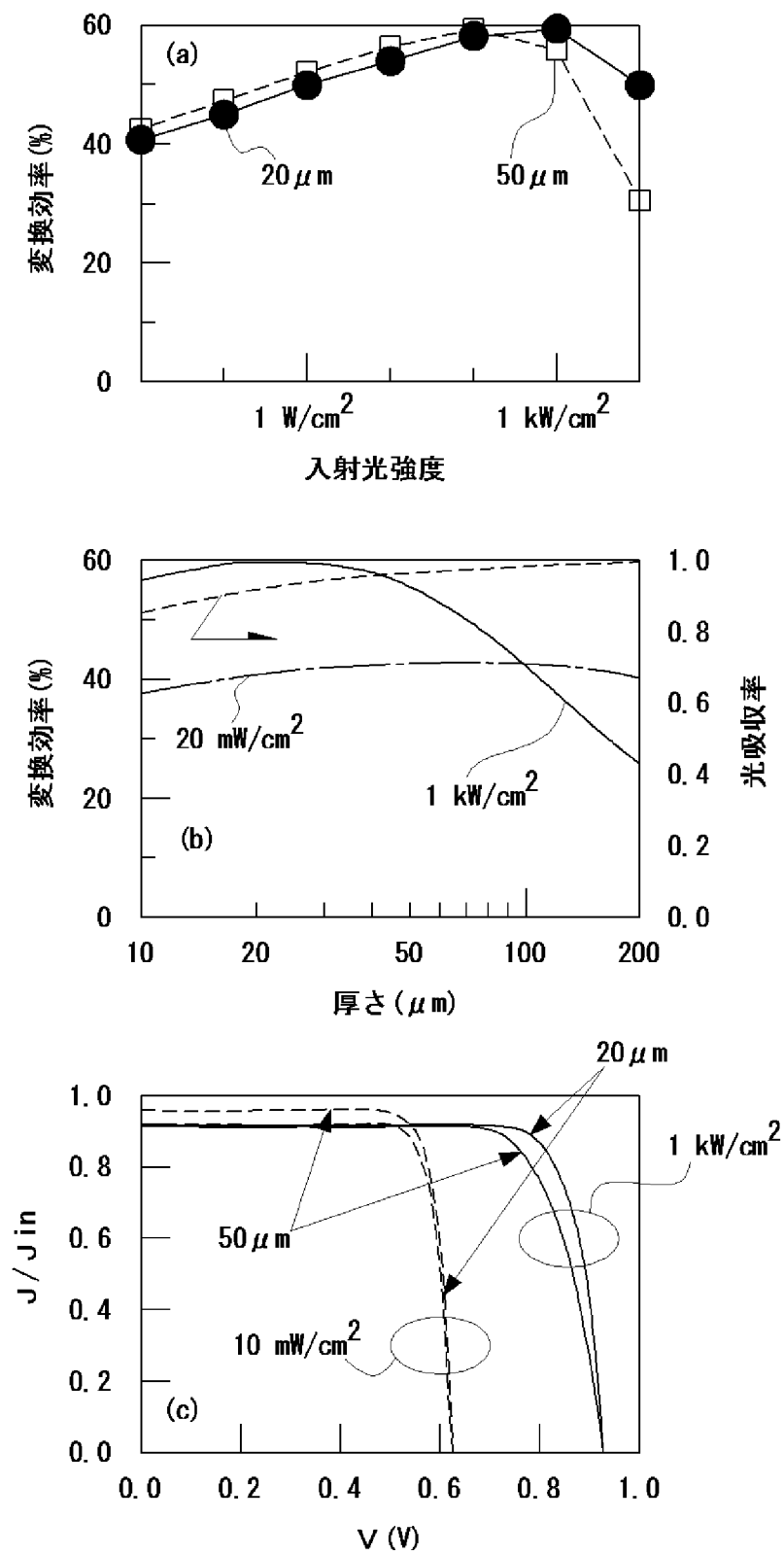
[図8]

(a)  $(H4/L4/)^2 H2 / (L4/H4/)^2$  / ガラス基板(b)  $(H4/L4/)^2 H2 / (L4/H4/)^2$  / 太陽電池(c)  $AR / (H4/L4/)^2 H2 / (L4/H4/)^2$  / 太陽電池(d)  $AR / (L4/H4/)^2 L2 / (H4/L4/)^2$  / 太陽電池(e)  $L8 / (H4/L4/)^4 H8$  / 太陽電池

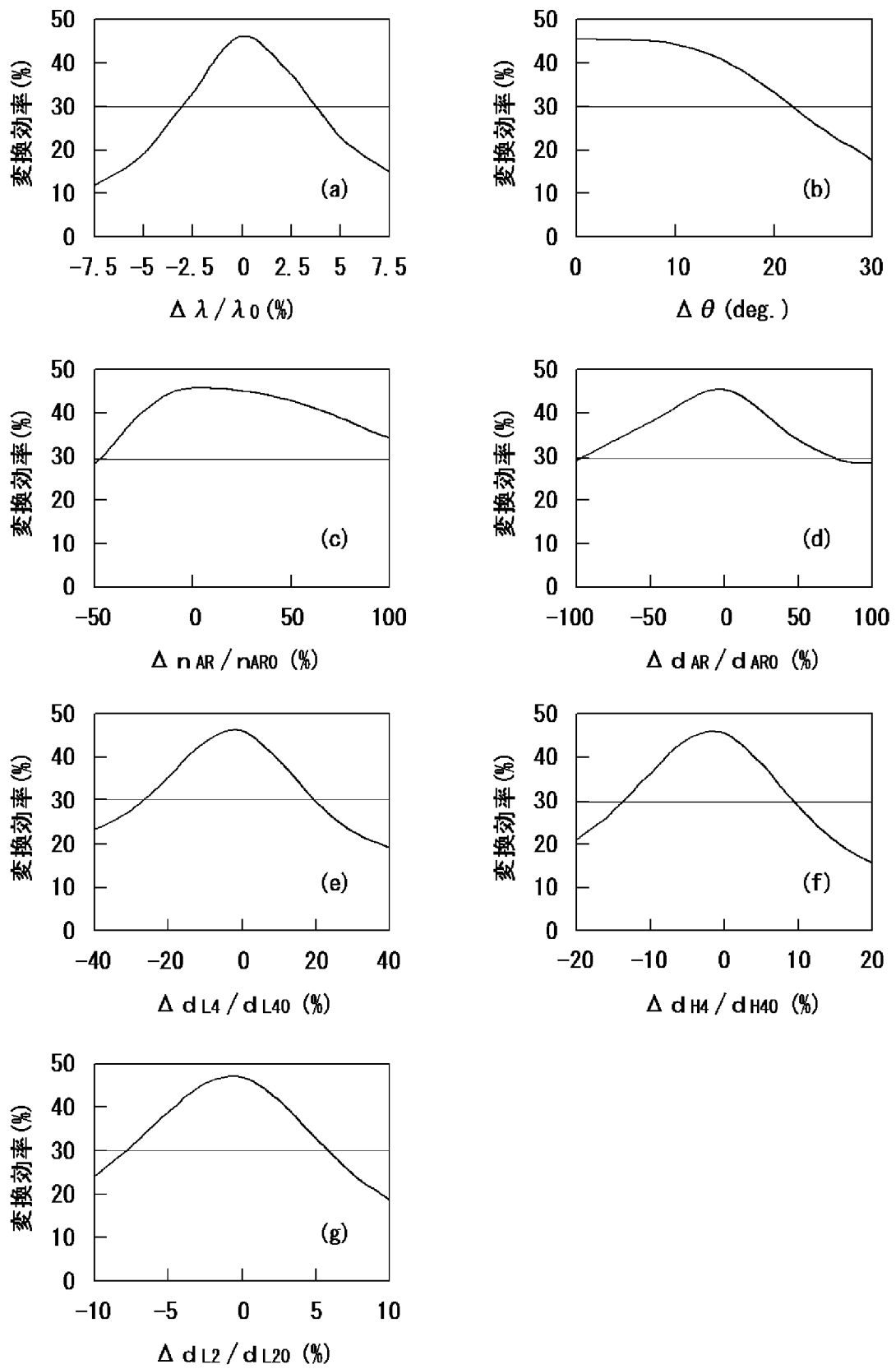
[図9]



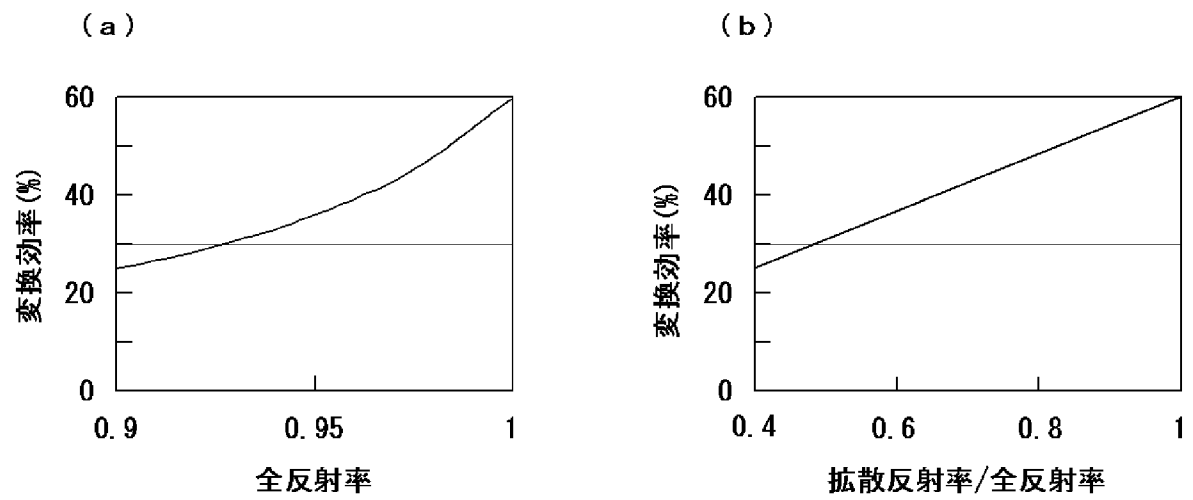
[図10]



[図11]



[図12]



# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2014/066119

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H01L31/054(2014.01)i, H01L31/056(2014.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H01L31/054, H01L31/056, G02B5/20-5/28

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2014  
Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2014 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2014

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

JSTPlus/JMEDPlus/JST7580 (JDreamIII)

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages                                                                                                             | Relevant to claim No. |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| A         | Nobuki KAWASHIMA, "Supecial issue: Wireless energy transfer 4 Laser Energy Transmission", The Journal of the Institute of Electrical Engineers of Japan, 2009, vol.129, no.7, pages 422 to 425 | 1-9                   |
| A         | Yosuke TANAKA, et al., Power Line Monitoring System Using Fiber Optic Power Supply, OPTICAL REVIEW, 2009, Vol.16, No.3, P.257-261                                                              | 1-9                   |



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

\* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance  
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date  
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)  
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means  
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention  
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone  
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art  
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search  
10 July, 2014 (10.07.14)

Date of mailing of the international search report  
22 July, 2014 (22.07.14)

Name and mailing address of the ISA/  
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2014/066119

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages                                                                                                                                                                      | Relevant to claim No. |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| A         | JP 2009-158960 A (Simmonds Precision Products, Inc.),<br>16 July 2009 (16.07.2009),<br>entire text; all drawings<br>& JP 2012-235686 A & US 2009/0166509 A1<br>& EP 2075848 A2 & CN 101483382 A<br>& RU 2008151862 A & BRA PI0805643<br>& CA 2645392 A1 | 1-9                   |
| A         | JP 2012-511827 A (Koninklijke Philips Electronics N.V.),<br>24 May 2012 (24.05.2012),<br>claim 4<br>& US 2011/0240120 A1 & EP 2377160 A1<br>& WO 2010/067296 A1 & TW 201034215 A<br>& CN 102246314 A & KR 10-2011-0098942 A<br>& RU 2011128696 A        | 1-9                   |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                   |                                                                     |             |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------|
| A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（I P C））<br>Int.Cl. H01L31/054(2014.01)i, H01L31/056(2014.01)i                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                   |                                                                     |             |
| B. 調査を行った分野<br>調査を行った最小限資料（国際特許分類（I P C））<br>Int.Cl. H01L31/054, H01L31/056, G02B5/20-5/28                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                   |                                                                     |             |
| 最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの<br>日本国実用新案公報 1 9 2 2 - 1 9 9 6 年<br>日本国公開実用新案公報 1 9 7 1 - 2 0 1 4 年<br>日本国実用新案登録公報 1 9 9 6 - 2 0 1 4 年<br>日本国登録実用新案公報 1 9 9 4 - 2 0 1 4 年                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                   |                                                                     |             |
| 国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）<br>JSTPlus/JMEDPlus/JST7580(JDreamIII)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                   |                                                                     |             |
| C. 関連すると認められる文献                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                   |                                                                     |             |
| 引用文献の<br>カテゴリー*                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示                                                                                                 | 関連する<br>請求項の番号                                                      |             |
| A                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 河島信樹, 特集 ワイヤレス・エネルギー伝送技術4 レーザによる伝送技術, 電気学会誌, 2009, Vol.129, No.7, P.422-425                                                       | 1-9                                                                 |             |
| A                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Yosuke TANAKA, et al., Power Line Monitoring System Using Fiber Optic Power Supply, OPTICAL REVIEW, 2009, Vol.16, No.3, P.257-261 | 1-9                                                                 |             |
| <input checked="" type="checkbox"/> C 欄の続きにも文献が列挙されている。 <input type="checkbox"/> パテントファミリーに関する別紙を参照。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                   |                                                                     |             |
| * 引用文献のカテゴリー<br>「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの<br>「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの<br>「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）<br>「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献<br>「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願日の後に公表された文献<br>「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの<br>「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの<br>「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの<br>「&」同一パテントファミリー文献 |                                                                                                                                   |                                                                     |             |
| 国際調査を完了した日<br>1 0 . 0 7 . 2 0 1 4                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                   | 国際調査報告の発送日<br>2 2 . 0 7 . 2 0 1 4                                   |             |
| 国際調査機関の名称及びあて先<br>日本国特許庁（I S A / J P）<br>郵便番号1 0 0 - 8 9 1 5<br>東京都千代田区霞が関三丁目4番3号                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                   | 特許庁審査官（権限のある職員）<br>和田 将彦<br>電話番号 0 3 - 3 5 8 1 - 1 1 0 1 内線 3 2 5 5 | 2 K 3 3 1 3 |

| C (続き) . 関連すると認められる文献 |                                                                                                                                                                                                                  |                |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| 引用文献の<br>カテゴリ*        | 引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示                                                                                                                                                                                | 関連する<br>請求項の番号 |
| A                     | JP 2009-158960 A (シモンズ プレシジョン プロダクツ, インク.)<br>2009.07.16, 全文, 全図 & JP 2012-235686 A & US 2009/0166509 A1<br>& EP 2075848 A2 & CN 101483382 A & RU 2008151862 A & BRA PI0805643<br>& CA 2645392 A1                | 1-9            |
| A                     | JP 2012-511827 A (コーニンクレッカ フィリップス エレクトロ<br>ニクス エヌ ヴィ) 2012.05.24, 請求項4 & US 2011/0240120 A1<br>& EP 2377160 A1 & WO 2010/067296 A1 & TW 201034215 A & CN 102246314<br>A & KR 10-2011-0098942 A & RU 2011128696 A | 1-9            |