

(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
2012 年 8 月 23 日(23.08.2012)



(10) 国際公開番号

WO 2012/111768 A1

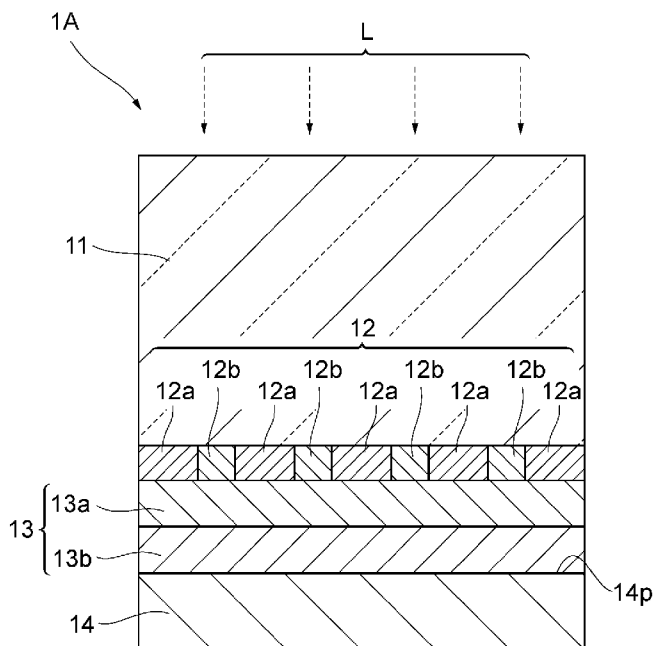
- (51) 国際特許分類:
H01L 31/052 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2012/053701
- (22) 国際出願日: 2012 年 2 月 16 日(16.02.2012)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2011-033577 2011 年 2 月 18 日(18.02.2011) JP
特願 2011-207895 2011 年 9 月 22 日(22.09.2011) JP
- (71) 出願人(米国を除く全ての指定国について): 国立
大学法人北海道大学(NATIONAL UNIVERSITY
CORPORATION HOKKAIDO UNIVERSITY) [JP/JP];
〒0600808 北海道札幌市北区北 8 条西 5 丁目
Hokkaido (JP).
- (72) 発明者; および
- (75) 発明者/出願人(米国についてのみ): 末宗 幾夫
(SUEMUNE Ikuo).
- (74) 代理人: 長谷川 芳樹, 外(HASEGAWA Yoshiki et
al.); 〒1000005 東京都千代田区丸の内二丁目 1 番
1 号丸の内 MY PLAZA (明治安田生命
ビル) 9 階 創英国際特許法律事務所 Tokyo
(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, 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, IS,
JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS,
LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX,
MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT,
QA, RO, RS, RU, RW, 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.
- (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), ユーラシ
ア (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨー
ロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE,
ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC,

[続葉有]

(54) Title: SOLAR CELL

(54) 発明の名称: 太陽電池セル

[図1]



(57) Abstract: This solar cell is provided with: at least one light absorption section (13) that generates a light-generated carrier by absorbing light; and at least one direction-changing layer (12) that changes the direction in which light travels along the main surface (13p) of the light absorption section (13). The direction-changing layer (12) changes the direction in which light travels by converting light that is incident on the direction-changing layer (12) into light having a phase change on the wavefront in the direction along the main surface (13p) of the light absorption section (13).

(57) 要約: 光を吸収して光生成キャリアを発生する少なくとも一つの光吸収部 13 と、光吸収部 13 の主面 13p に沿った方向に光の進行方向を転換する少なくとも一つの方向転換層 12 と、を備えている。方向転換層 12 は、方向転換層 12 に対して入射された光を、光吸収部 13 の主面 13p に沿った方向に波面の位相変化を有する光に変換することにより、光の進行方向を転換する。

WO 2012/111768 A1



MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, 添付公開書類:
TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, — 国際調査報告 (条約第 21 条(3))
ML, MR, NE, SN, TD, TG).

明 細 書

発明の名称：太陽電池セル

技術分野

[0001] 本発明は、太陽電池セルに関する。

背景技術

[0002] 太陽電池は、エネルギー消費量とCO₂排出量とを削減する切り札として期待されている。薄膜シリコン太陽電池は、現在主流である結晶シリコン太陽電池に比べて1/100程度の原料により製造することができる。薄膜シリコン太陽電池を構成する薄膜シリコン層は、結晶シリコンよりも低い温度で形成できるので、太陽電池の製造に必要なエネルギー量を低減できる。薄膜シリコン太陽電池の光吸収効率は、6～10%程度である。

[0003] 太陽電池セルの光吸収効率を高める方法の一つに、バンドギャップの異なる光吸収部を複数積層させる方法がある。このような方法により構成された構造を有する太陽電池セルを、タンデム型構造の太陽電池セルと呼ぶ（非特許文献1～3）。図29は、従来のタンデム型構造の太陽電池の構成を説明するための斜視図である。図29に示されるように、タンデム型構造の太陽電池セル100は、入射光Lが入射されるガラス板111と、透明導電層112と、光吸収部113と、電極114とが積層された構成を有する。光吸収部113は、アモルファスシリコンからなるトップセル層113aと微結晶シリコンからなるボトムセル層113bとを含んでいる。トップセル層113aとボトムセル層113bとは、吸収する光の波長帯域が異なっている。トップセル層113aは、短波長帯域（例えば500nm帯）の光を吸収し、300nm程度の厚さを有している。ボトムセル層113bは、長波長帯域（例えば800nm帯）の光を吸収し、2000nm程度の厚さを有している。

[0004] また、近年、グレーティングカプラが広く利用されている。グレーティングカプラは、光導波路を光部材に光学的に結合させるために用いられる。グ

レーティングカプラは、光導波路の表面に形成されたグレーティングを有する。グレーティングカプラは、光導波路内の光を光導波路外へ出射させ、或いは光導波路外の光を光導波路内に入射させる。グレーティングカプラは、光部材と光導波路との光結合に使用される（特許文献 1～3）。

[0005] 上記光導波路は、一般に屈折率の異なる誘電体からなる。この光導波路は、導波モード及び漏れモードを有することが知られている。導波モードは、光導波路に沿って進むモードである。漏れモードは、光導波路の外部に光が漏れ出すモードである。グレーティングカプラは、グレーティングによって、導波モードと漏れモードとを結合させることにより、導波モードを漏れモードへ変換して光導波路内の光を光導波路外へ出射する。また、グレーティングカプラは、漏れモードを導波モードへ変換して光導波路外から入射される光を光導波路に沿って進む光に変換する。このように導波モード及び漏れモード間において、光の進む状態を変換する機能はモード変換機能と呼ばれる。

[0006] モード変換機能を有する構造を太陽電池セルに適用して、太陽電池セルの光吸収効率を増大させる方法が検討されている。例えば、非特許文献 6 には、 SiO_2 の表面に形成したシリコン層を光導波路とし、シリコン層の表面に金属微粒子を周期的に配列させて、グレーティングカプラと同様の動作をさせる構造が記載されている。この構造を有する太陽電池セルのシミュレーション及び実験結果には、光吸収効率の増大を示すピークがスペクトルに現れている。通常的光導波路において入射光のモードが導波モードへ変換される場合には、入射光の導波モードとグレーティング周期とが位相整合条件を満たす必要があるために、このピークがスペクトルに現れる。入射光の導波モードの位相が、グレーティング周期の位相と揃ったとき、位相条件が満たされている。

[0007] 特許文献 4 及び 5 には、位相整合条件の具体例が記載されている。導波モードでは、波数及び周波数が特定の関係を有する。一般に、この特定の関係は、分散関係と呼ばれる。この分散関係において互いに異なる複数の導波モ

ードが存在する光導波路は、多モード導波路と呼ばれる。導波モード毎にこの位相整合条件が異なるので、スペクトルにおいて、光吸収効率の増大を示す複数の光吸収のピークが観測される。

- [0008] また、回折格子を太陽電池セルに適用して、太陽電池セルの光吸収効率を増大させる方法が検討されている。非特許文献 7，8 に記載された太陽電池セルは、位相回折格子 (Phase Grating) を光吸収部の上に設置している。入射光は、進行方向を変化させるために複数の回折光に変換される。半導体と空気との界面における全反射によって光吸収部における回折光の光路長が長くなるため、光吸収効率が向上する。

先行技術文献

特許文献

- [0009] 特許文献1：特開平 6－3 4 7 6 6 6 号公報
特許文献2：特開平 1 0－2 3 9 7 1 7 号公報
特許文献3：特開平 1 1－2 8 1 8 3 3 号公報
特許文献4：特開平 7－1 6 9 0 8 8 号公報
特許文献5：特開 2 0 0 9－2 8 8 7 1 8 号公報

非特許文献

- [0010] 非特許文献1：M.Hishida et al., Abstract of PVSEC-19, Jeju, Korea, 2009 pp. 122.
非特許文献2：寺川朗 プラズマ C V D 法による薄膜シリコン太陽電池の工業化に向けて J. Plasma Fusion Res. Vol. 86, No. 1, 2010, pp. 17-20.
非特許文献3：外山利彦 プラズマ C V D による高速製膜技術を用いた微結晶 S i 太陽電池の高効率化 J. Plasma Fusion Res. Vol. 86, No. 1, 2010, pp. 21-27.
非特許文献4：産総研ホームページ，[平成 2 3 年 2 月 1 2 日検索]，インターネット，<http://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/about_pv/types/TF-Si.html>
非特許文献5：ウィキペディア，[平成 2 3 年 2 月 1 2 日検索]，インターネット，<<http://ja.wikipedia.org/wiki/太陽電池>>

非特許文献6 : S.H.Lim, et.al., Journal of Applied Physics 105, 073101(2009)

非特許文献7 : K. R. Catchpole, Journal of Applied Physics 102, 013102 (2007)

非特許文献8 : D. Madzharov, et.al., Optics Express 19, A95 (2011)

非特許文献9 : X. Jing et. al., Applied Optics 50, C11 (2011)

発明の概要

発明が解決しようとする課題

- [0011] 太陽電池に使われている媒質、例えば半導体では、一般にエネルギーギャップに対応する波長帯域より長波長側では光吸収効率が低くなる。本来、エネルギーギャップ以下では光吸収は発生しないが、アモルファスシリコンや微結晶シリコンのように結晶の周期性を乱すことによってエネルギーギャップ以下でも光吸収が発生するように工夫されている。
- [0012] 光を吸収する媒質の光吸収係数を $\alpha \text{ cm}^{-1}$ とすると、所定の長さ L を有する光吸収部において光が吸収される割合は $1 - \exp(-\alpha L)$ である。例えば、微結晶シリコンの光吸収係数 α は、波長 800 nm において $\alpha \sim 10000 \text{ cm}^{-1}$ 程度である。これから、厚さが 1000 nm の微結晶シリコンからなる光吸収部では 63% の光が吸収される。また、厚さが 2000 nm の微結晶シリコンからなる光吸収部では 86% の光が吸収される。
- [0013] 従来の高効率タンデム構造型の薄膜シリコン太陽電池は、最大厚さ 300 nm 程度のアモルファスシリコン層からなるトップセル層と、 2000 nm 程度の微結晶シリコン層からなるボトムセル層とを備えている。トップセル層が吸収する光の波長域は、通常 500 nm を中心とする短波長域である。ボトムセル層が吸収する光の波長域は、通常 800 nm を中心とする長波長域である。光を十分に吸収させるためには光吸収部の厚さを厚くする必要がある。 800 nm より長波長側では光吸収係数は小さくなるので、 2000 nm の厚さを有する光吸収部であっても光を吸収する割合は低下する。従って、光吸収部の厚さが薄い場合には光吸収効率を高めることができなかった

。

[0014] 薄膜太陽電池セルの製造に必要な原料の量は、現在主流である結晶シリコン太陽電池の製造に必要な原料の量の約 $1/100$ である。また、低温プロセスによってデバイス製造時のエネルギー消費を低減できることから、低コスト化が期待されている（非特許文献4，5）。しかし、微結晶シリコンからなる 2000 nm の厚さを有する光吸収部は、デバイス製造に長い時間が必要であるので、スループットが低下し、製造コストが上昇する。スループットとは、単位時間あたりの製造能力を示す。そこで、微結晶シリコン層を高速に成膜する技術の開発が行われている。微結晶シリコン層は、タンデム構造型の太陽電池セルに用いられる。しかし、成膜速度を上げると膜の品質が低下し、光から電気への変換効率が低下する（非特許文献2，3）。

[0015] 太陽電池セルの光吸収効率を増大させる方法には、最適設計されたグレーティングカップラによるモード変換を用いる方法がある。この方法では、グレーティングが導波モードに与える影響を小さくすることにより、導波モードの状態がグレーティングの存在しない状態からほとんど変化しない場合を扱う。グレーティングカップラを用いた方法は、1周期のグレーティングだけではモード変換の効率を増大させる効果が小さい。従って、一般的には、数十を超える周期数を有するグレーティングを形成して、特定の光波長帯域におけるモード変換の効率を増大させる。グレーティングカップラを備える太陽電池セルでは、光吸収効率を増大させる効果が特定波長のピークとして観測される。従って、グレーティングカップラを用いる手段では、広い波長帯域において光吸収効率を増大させることが困難である。

[0016] そこで、本発明では、光吸収部の厚さが薄い場合でも光吸収効率を高めることが可能であり、量産性の高い太陽電池セルを提供する。

課題を解決するための手段

[0017] 本発明の一側面に係る太陽電池セルは、光を吸収して光生成キャリアを発生する少なくとも一つの光吸収部と、光吸収部の表面に沿った方向に光の進行方向を転換する少なくとも一つの方向転換層と、を備え、方向転換層は、

方向転換層に対して入射された光を、光吸収部の表面に沿った方向に波面の位相変化を有する光に変換することにより、光の進行方向を転換する。

[0018] 光吸収部において光を好適に吸収するためには所定の光路長を確保する必要がある。この太陽電池セルは、方向転換層を備えている。方向転換層に入射された光は、光吸収部の表面に沿った方向に波面の位相変化を有する光に変換される。光吸収部では、光吸収部の表面に沿った方向に光を吸収するために必要な光路長が確保されている。即ち、光路長を確保するために、光吸収部の厚さを増加させる必要がない。従って、太陽電池セルは、光を吸収するために必要な光路長が確保されるため、光吸収効率を高めることができる。また、太陽電池セルは光吸収部の厚さを薄くすることができる。そして、太陽電池セルは、光吸収部の厚さを薄くすることができるので、光吸収部を形成する時間を短縮することが可能となる。従って、太陽電池セルの量産性を高めることができる。

[0019] 上記太陽電池セルでは、方向転換層は、第1の領域及び第2の領域を含み、第1の領域及び第2の領域は、方向転換層に対して光が入射される側の面である入射面に沿って並設され、第1の領域及び第2の領域は、互いに屈折率が異なってもよい。方向転換層の入射面から方向転換層の内部に光が進行すると、第1の領域を透過した光と、第2の領域を透過した光とでは、光波の波面の位相が互いに相違する。それ故に、方向転換層に入射された光が、光吸収部の表面に沿った方向に波面の位相変化を有する光に変換される。従って、入射された光の進行方向が、光吸収部の表面に沿った方向に転換される。

[0020] 上記太陽電池セルでは、方向転換層は、入射面に直交する方向の厚さが、第1の領域における屈折率、第2の領域における屈折率、及び光の波長に基づいて設定されていてもよい。方向転換層の厚さを好適に設定することができる。

[0021] 上記太陽電池セルでは、第1の領域及び第2の領域は、所定の周期に基づいて入射面に沿って配置されており、所定の周期は、光吸収部における導波

モードと方向転換層に対して入射された光との位相整合条件に基づいて設定されていてもよい。位相整合条件を満足するように位相変化の周期が設定される。それ故に、太陽電池セルに入射された光の位相と、方向転換層により進行方向が転換された光吸収部を伝搬する光の位相とが整合される。それ故に、光吸収部の表面に沿った方向に発生する定在波を効果的に生じる。従って、薄い光吸収部を備える太陽電池セルであっても、光吸収効率をさらに高めることができる。

[0022] 上記太陽電池セルでは、所定の周期は、光吸収部の実効屈折率及び方向転換層に対して入射された光の波長に基づいて設定されてもよい。第1の領域が配置される周期を好適に設定することができる。

[0023] 上記太陽電池セルでは、第1の領域は、導電性を有する電極であってもよい。電極層を追加して設ける必要がないので、太陽電池セル全体の厚さを薄くすることができる。

[0024] 上記太陽電池セルでは、光吸収部を複数備え、複数の光吸収部のそれぞれは光吸収が行われる光の波長帯域が互いに異なり、複数の光吸収部は方向転換層の入射面と反対側の面に接して形成されていてもよい。このタンデム型構造の太陽電池セルは、単一の波長帯域に対応する光吸収部を備える太陽電池セルよりも、さらに光吸収効率を高めることができる。

[0025] 上記太陽電池セルでは、光吸収部を複数備え、複数の光吸収部のそれぞれは光吸収が行われる光の波長帯域が互いに異なり、複数の光吸収部は前方向転換層の入射面に接して形成されていてもよい。この太陽電池セルは、光吸収効率を好適に高めることができる。

[0026] 上記太陽電池セルでは、方向転換層を複数備え、方向転換層のそれぞれは進行方向の転換が行われる光の波長帯域が互いに異なってもよい。この太陽電池セルでは、単一の波長に対応する方向転換層を備える太陽電池セルよりも、広い波長帯域において光の進行方向が転換される。すなわち、この太陽電池セルでは、光吸収部において吸収される光の波長帯域が拡大される。従って、この太陽電池セルは、光吸収効率をさらに高めることができる。

[0027] 上記太陽電池セルでは、第1の領域は、入射面に沿った配列周期を変化させて配置されていてもよい。この太陽電池セルでは、それぞれの配列周期に対応する波長を有する光の進行方向が転換される。すなわち、方向転換層により進行方向が転換される光の波長帯域が拡大される。従って、光吸収効率をさらに高めることができる。

発明の効果

[0028] 本発明の太陽電池セルによれば、光の進行方向を転換することにより従来より薄い光吸収部でも光吸収効率を高め、量産性を高めることができる。

図面の簡単な説明

[0029] [図1]第1実施形態に係る太陽電池セルの構成を説明するための断面図である。

[図2]第1実施形態に係る太陽電池セルにおける方向転換層の構成を説明するための断面図である。

[図3] (a) 部および (b) 部は第1実施形態に係る太陽電池セルの効果を説明するための図である。

[図4]第2実施形態に係る太陽電池セルの構成を説明するための断面図である。

[図5]第2実施形態に係る太陽電池セルの効果を説明するための図である。

[図6]第3実施形態に係る太陽電池セルの構成を説明するための断面図である。

[図7] (a) 部および (b) 部は第3実施形態に係る太陽電池セルの効果を説明するための図である。

[図8] (a) 部および (b) 部は第3実施形態に係る太陽電池セルの効果を説明するための図である。

[図9]第3実施形態に係る太陽電池セルの効果を説明するための図である。

[図10]第4実施形態に係る太陽電池セルの方向転換層の構成を説明するための断面図である。

[図11]第5実施形態に係る太陽電池セルの構成を説明するための断面図であ

る。

[図12]第5実施形態に係る太陽電池セルの効果を説明するための図である。

[図13]第5実施形態に係る太陽電池セルの効果を説明するための図である。

[図14]第6実施形態に係る太陽電池セルの構成を説明するための断面図である。

[図15]第6実施形態に係る太陽電池セルの効果を説明するための図である。

[図16]第7実施形態に係る太陽電池セルの構成を説明するための図である。

[図17]第7実施形態に係る太陽電池セルの解析結果を説明するための図である。

[図18]第7実施形態に係る太陽電池セルの他の解析結果を説明するための図である。

[図19]第7実施形態に係る太陽電池セルの他の解析結果を説明するための図である。

[図20]第7実施形態に係る太陽電池セルの他の解析結果を説明するための図である。

[図21]第7実施形態に係る太陽電池セルの他の解析結果を説明するための図である。

[図22]比較例に係る構造体の光学特性を説明するための図である。

[図23]第8実施形態に係る太陽電池セルの特性の解析結果を説明するための図である。

[図24]第8実施形態に係る太陽電池セルを説明するための図である。

[図25]第8実施形態に係る太陽電池セルの特性を説明するための図である。

[図26]第8実施形態に係る別の太陽電池セルを説明するための図である。

[図27]第8実施形態に係る別の太陽電池セルの特性を説明するための図である。

[図28]第1実施形態に係る太陽電池セルの変形例を説明するための断面図である。

[図29]従来のタンデム型構造の太陽電池の構成を説明するための斜視図であ

る。

[図30] (a) 部は比較例である太陽電池セルの構成を説明するための断面図であり、(b) 部は従来の太陽電池セルの特性を説明するための図である。

発明を実施するための形態

[0030] 以下、添付図面を参照しながら本発明による太陽電池セルの実施の形態を詳細に説明する。なお、図面の説明において同一の要素には同一の符号を付し、重複する説明を省略する。

[0031] <第1実施形態>

図1は、第1実施形態に係る太陽電池セルの構成を説明するための断面図である。図1に示されるように、太陽電池セル1Aは電極14を備えている。電極14の主面14pの上には、光吸収部13、方向転換層12、及びガラス板11がこの順に配置されている。太陽電池セル1Aには、ガラス板11側から入射光Lが入射される。太陽電池セル1Aは、ガラス板11を成長基板として、ガラス板11の上に方向転換層12、光吸収部13及び電極14をこの順に形成されている。

[0032] 電極14は、金属電極であり例えば銀(Ag)からなる。光吸収部13は、光吸収部であるトップセル層13aと光吸収部であるボトムセル層13bとを備えている。トップセル層13aが吸収する光の波長帯域は、ボトムセル層13bが吸収する光の波長帯域と異なっている。光吸収部13では、光が吸収されて、光生成キャリアである電子と正孔とが発生される。ボトムセル層13bは、電極14と接するように形成されている。ボトムセル層13bは、光を吸収して電子と正孔とを生成して外部に電流を取り出すために、p型半導体及びn型半導体からなるpn接合を有している。ボトムセル層13bは、例えば微結晶シリコンからなる。またボトムセル層13bの厚さは、例えば200～2000nmである。トップセル層13aは、方向転換層12と接するように形成されている。トップセル層13aは、光を吸収して電子と正孔とを生成して外部に電流を取り出すために、p型半導体及びn型半導体からなるpn接合を有している。トップセル層13aは、例えばアモ

ルファスシリコンからなる。またトップセル層 13 a の厚さは、例えば 100 ~ 300 nm である。ガラス板 11 は、例えば酸化シリコン (SiO_2) からなる。

[0033] 次に、方向転換層 12 について詳細に説明する。図 2 は、第 1 実施形態に係る太陽電池セル 1 A における方向転換層 12 の構成を説明するための断面図である。図 2 に示されるように、方向転換層 12 は、有限の周期構造を含んでいる。周期構造は、透明導電領域 12 a (第 1 の領域) と半導体領域 12 b (第 2 の領域) とにより構成される。透光性の表面電極である透明導電領域 12 a は、例えば導電性を備える酸化インジウムスズ (ITO: Indium Tin Oxide、より一般的呼称として TCO: Transparent Conductive Oxide) からなる。透明導電領域 12 a は、例えば導電性を備えない酸化シリコン (SiO_2) であってもよい。半導体領域 12 b は、例えばアモルファスシリコンからなる。半導体領域 12 b は、トップセル層 13 a と一体的に形成されていてもよいし、トップセル層 13 a と別材料であってもよい。透明導電領域 12 a は、方向転換層 12 の入射面 12 p に沿って周期的に配置されている。透明導電領域 12 a は配列周期 D に従って周期的に配置される。

[0034] 方向転換層 12 における透明導電領域 12 a の周期的な配置は、一軸方向だけでなく、方向転換層 12 の入射面 12 p に沿った二次元方向に配置してもよい。入射面 12 p 内において周期的な配置の基準となる座標軸は、任意の方向に設定してもよい。

[0035] 複数の周期構造を備える方向転換層 12 は、入射光 L の入射方向に沿って重ね合わせて配置してもよい。これにより、入射光 L が任意の方向から入射する場合であっても、光吸収効率を高めることができる。例えば、入射角が 17° から 35° の光が太陽電池セル 1 A に入射されたときの実験により確認された光吸収効率等の波長依存性と、入射角が 0° の光が太陽電池セル 1 A に入射されたときのシミュレーションにより確認された波長依存性とは、同等の傾向を示すことが確認されている。

[0036] 方向転換層 12 の厚さ h について説明する。方向転換層 12 において進行方向が転換される光の波長が λ であるとき、方向転換層 12 の厚さ h は、式 (2) によって計算される値に近づくように設定される。式 (1) において透明導電領域 12a の屈折率は n_{12a} であり、半導体領域 12b の屈折率は n_{12b} である。

$$2\pi |n_{12b} - n_{12a}| h / \lambda = \pi \text{ (ないしは } \pi \text{ の奇数倍)} \cdots (1)$$

すなわち、

$$h = \lambda / (2 |n_{12b} - n_{12a}|) \text{ (ないしはその奇数倍)} \cdots (2)$$

である。例えば、光の波長 λ が 800 nm であり、半導体領域 12b の屈折率 n_{12b} が 4.23 (実部のみで近似) であり、透明導電領域 12a の屈折率 n_{12a} が 1.85 (実部のみで近似) であるとする、方向転換層 12 の厚さは $h = 168$ nm 程度である。方向転換層 12 の厚さ h は、式 (2) によって計算された値を中心値として、 $\pm 20\%$ 程度の寸法公差が許容される。例えば、方向転換層 12 が 168 nm 程度の厚さ h を有すると仮定したとき、方向転換層 12 の厚さ h の許容範囲は 134 nm ~ 202 nm である。

[0037] 一方、方向転換層 12 の厚さ h が、式 (2) を満足する場合であっても、厚さ h の値が大きくなるに従って、方向転換層 12 を透過した後の光の位相変化が不鮮明になることがある。この現象は、透明導電領域 12a 及び半導体領域 12b を透過するときに生じる光の回折現象に起因する。シミュレーション結果によれば、厚さ h は式 (3)、(4) によって計算される範囲にあることが好ましい。

$$4\pi > 2\pi / \lambda \times n_{12b} \times h > 2\pi / \lambda \times n_{12a} \times h \cdots (3)$$

すなわち、

$$h < 2\lambda / n_{12b} \cdots (4)$$

式 (3)、(4) により示した条件は、周期数が少ない場合に留意すべき点である。従って、方向転換層 12 に設けられた周期数が多い場合には、厚さ h の値に特に制限はない。周期数とは、1 つの透明導電領域 12a 及び 1 つの半導体領域 12b からなる要素を一つの単位とする構造の数である。

[0038] 方向転換層 12 の周期構造について説明する。周期構造における配列周期 D について述べる。配列周期 D は、透明導電領域 12a の入射面 12p に沿った長さ E に、半導体領域 12b の入射面 12p に沿った長さ F を加えた長さである。太陽電池セル 1A のトップセル層 13a とボトムセル層 13b とは、光吸収部 13 を構成する。そのため、方向転換層 12 において進行方向が光吸収部 13 に平行な方向に転換された入射光 L に対しては、損失の大きい光導波路として機能する。光の波長が λ であるとき、導波モードの伝搬係数 β を波数 $(2\pi/\lambda)$ により除した値は、実効屈折率 N_{eff} である。入射光 L が方向転換層 12 に垂直に入射したときの配列周期 D の最適値は、入射光 L の波長 λ と実効屈折率 N_{eff} とに基づいて算出される。より詳細には、配列周期 D の最適値は、導波モードとの位相整合条件を示す式 (5) によって計算される値に近づくように設定される。すなわち、方向転換層 12 に入射された入射光 L と、光吸収部 13 を伝搬する光との位相整合条件に基づいて設定される。位相整合条件に基づいて設定された配列周期 D により、方向転換層 12 を透過した入射光 L に光吸収部 13 に沿った π 位相シフトが発生するため、定在波が有効に形成される。

$$D = \lambda / N_{eff} \text{ の整数倍} \cdots (5)$$

例えば、光の波長 λ が 800 nm であると仮定する。トップセル層 13a の屈折率 n_{13a} が 4.23 (実部のみで近似) であり、トップセル層 13a の厚さが 200 nm であると仮定する。ボトムセル層 13b の屈折率 n_{13b} が 3.71 (実部のみで近似) であり、ボトムセル層 13b の厚さが 200 nm であると仮定する。電極 14 が完全導体と近似できると仮定する。これらの条件によれば、配列周期 D は 220 nm ~ 260 nm 又は 400 nm ~ 450 nm の整数倍の長さ程度である。配列周期 D の上述した数値範囲は、導波モードの実効屈折率の計算において、導波路幅の見積もりに方向転換層 12 を加えた場合と加えない場合との両方を含んでいることに起因している。さらに、配列周期 D の上述した数値範囲は、位相整合させる導波モードによって配列周期 D が変化することに起因している。最適な配列周期 D は、光吸収効

率が最大になるように決定される。方向転換層 12 の配列周期 D は、式 (5) によって計算された値を中心値として、 $\pm 20\%$ 程度の寸法公差が許容される。例えば、方向転換層 12 が 450 nm 程度の配列周期 D を有すると仮定したとき、方向転換層 12 の配列周期 D の許容範囲は $360\text{ nm} \sim 540\text{ nm}$ である。

[0039] 方向転換層 12 の周期構造における周期数について説明する。周期数とは、1つの透明導電領域 12a 及び1つの半導体領域 12b からなる要素を一つの単位とする構造の数である。方向転換層 12 では、透明導電領域 12a 及び半導体領域 12b を透過するときに波面の速度差が生じる。従って、透明導電領域 12a を透過した光と、半導体領域 12b を透過した光とでは、位相差が生じる。すなわち、1つの透明導電領域 12a と1つの半導体領域 12b とを方向転換層 12 が備えていれば、原理的には光の進行方向が転換され得る。シミュレーションによると、例えば周期数が5である方向転換層 12 の領域に光が入射された場合、入射された光の約66%が光吸収部 13 により吸収される。光吸収部 13 の光吸収効率に方向転換層 12 の光吸収効率を加えると、方向転換層 12 及び光吸収部 13 を合わせた領域で95%の入射光が吸収されることがわかった。光吸収効率の目標値が95%よりも低い場合は、周期数が5以下であってもよい。このように、少ない周期数において高い光吸収効率を実現することは、グレーティングカプラを用いた構成では困難である。方向転換層 12 の周期数は5以上でもよく、好ましい上限値は特にない。

[0040] 方向転換層 12 が有する入射光の波長帯域について説明する。方向転換層 12 では、1つの透明導電領域 12a と、1つの半導体領域 12b を備えていれば、原理的には光の進行方向が転換される。シミュレーションによれば、5～6程度の周期数があれば入射光 L の進行方向を転換して、光吸収効率を向上させる効果を得ることができる。この効果より、光吸収効率を向上させることが可能な入射光 L の波長帯域を拡大することができる。例えば、方向転換層 12 が有する周期数が 800 nm の波長を有する入射光 L に対して

最適化されていると仮定する。この方向転換層 12 を備える太陽電池セル 1 A では、入射光 L の波長 λ が 600 nm ~ 1000 nm の範囲において光吸収効率が向上する。

[0041] 本実施形態に係る太陽電池セル 1 A の効果について説明する。光吸収部 13 において光を好適に吸収するためには所定の光路長を確保する必要がある。太陽電池セル 1 A は、方向転換層 12 を備えている。方向転換層 12 に入射された光は、光吸収部 13 の主面 13 p に沿った方向に波面の位相変化を有する光に変換される。光吸収部 13 において、主面 13 p に沿った方向には、光を吸収するために必要な光路長が確保されている。すなわち、光路長を確保するために、光吸収部 13 の厚さを増加させる必要がない。従って、太陽電池セル 1 A は、入射光 L を吸収するために必要な光路長が確保されるため、光吸収効率を高めることができる。また、太陽電池セル 1 A は光吸収部 13 の厚さ h を薄くすることができる。そして、太陽電池セル 1 A は、光吸収部 13 の厚さ h を薄くすることができるので、光吸収部 13 を形成する時間を短縮することが可能となる。従って、太陽電池セル 1 A の量産性を高めることができる。

[0042] 本実施形態に係る太陽電池セル 1 A は、光吸収部 13 の主面 13 p に沿った方向に光の進行方向を転換する方向転換層 12 を備えている。方向転換層 12 は、透明導電領域 12 a である第 1 の領域と、半導体領域 12 b である第 2 の領域とを含んでいる。透明導電領域 12 a と半導体領域 12 b とは、方向転換層 12 に対して光が入射される側の面である入射面 12 p に沿った方向に並設されている。透明導電領域 12 a は半導体領域 12 b とは異なる屈折率を有している。

[0043] 太陽電池セル 1 A に対して、入射光 L が入射される。入射光 L は、光吸収部 13 の主面 13 p に対する入射角がゼロであってもよいし、所定の入射角を有していてもよい。第 1 の領域と第 2 の領域とにより屈折率に変調された方向転換層 12 を光が通過すると、第 1 の領域と第 2 の領域とを透過する光の速度の違いにより波面の位相差が生じる。方向転換層 12 を透過した後の

位相差が π 、すなわち式(2)を満たすように方向転換層12の厚さ h を設定すると、方向転換層12を透過した光は、光吸収部13に平行な方向に配列周期 D で位相が π 変調される。それ故、光吸収部13の主面13pの方向に沿って光の位相が周期的に変化した定在波が光吸収部13内に発生し、光の進行方向は光吸収部13の主面13pに沿った方向に転換される。光吸収部13は、主面13pに沿った方向に方向が転換された光を吸収するための十分な長さ、例えば2000nm以上の長さを有している。従って、従来の太陽電池セル100が備える光吸収部113(図29参照)よりも薄い光吸収部13を備える太陽電池セル1Aであっても、10%以上の高い光吸収効率を得ることができる。

[0044] 従来の太陽電池セルでは、光吸収部に対して垂直に外部から光が入射される。一方、太陽電池セル1Aは、ほぼ垂直に入射する光を光吸収部13に沿って平行に進む光に変換する方向転換層12を提供する。従って、薄い光吸収部13であっても光の進む光路長を実効的に長く確保し、光吸収効率を高めることができる。

[0045] 具体的には、入射した光の波面に沿って屈折率が変化する有限の周期構造を有する方向転換層12を形成し、光が方向転換層12を透過する際に、屈折率の大・小に応じて光速度に変調を与える。方向転換層12を透過した光の波面には、方向転換層12の屈折率の変調に対応する位相変調が与えられる。それ故、位相変調が π になるように方向転換層12の厚さ h を調整することにより、光は光吸収部13に沿った定在波を形成する。従って、入射光Lの進行方向が、光吸収部13の表面に沿った方向に転換される。

[0046] 従来の太陽電池セルでは、光を吸収して生成された電子を正電圧を印加した側の電極に導くと共に、正孔を負電圧を印加した側の電極に導くことにより電流として外部に取り出す。光吸収部の厚さが厚い場合には、電子と正孔とが外部に取り出す前に再結合する確率が増加するので、実効的な光吸収効率が低下する。太陽電池セル1Aは、方向転換層12を備えることにより光吸収部13の厚さを薄くできるので、再結合する確率が低減する。従って、

実効的な光吸収効率をさらに高めることができる。

[0047] 光吸収部 1 3 を構成するボトムセル層 1 3 b の厚さを、従来のタンデム型構造の太陽電池セル 1 0 0 (図 2 9 参照) が備えるボトムセル層 1 1 3 b と比較して $1/10$ 程度に薄くすることができる。それ故、ボトムセル層 1 3 b を形成する成膜時間を短縮することが可能となる。従って、太陽電池セル 1 A の量産性を高めることができる。さらに、太陽電池セル 1 A の製造に必要なエネルギー量及び製造コストを低減させることができる。

[0048] 太陽電池セル 1 A の透明導電領域 1 2 a 及び半導体領域 1 2 b は、所定の周期 D に基づいて配置されている。所定の周期 D は、導波モードと、方向転換層 1 2 に対して入射された入射光との位相整合条件に基づいて設定されている。このように構成することにより、光吸収部 1 3 の主面 1 3 p に沿った方向に発生する定在波を効果的に生じさせることができる。従って、薄い光吸収部 1 3 を備える太陽電池セル 1 A であっても光吸収効率をさらに高めることができる。

[0049] 所定の周期 D は、光吸収部 1 3 の実効屈折率と、方向転換層 1 2 に対して入射された光 L の波長 λ とに基づいて設定される。このように構成することにより、透明導電領域 1 2 a が配置される周期 D を好適に設定することができる。

[0050] 太陽電池セル 1 A の透明導電領域 1 2 a は、導電性を有する電極である。このように構成することにより、電極層を追加して設ける必要がないので、太陽電池セル 1 A の全体の厚さを薄くすることができる。

[0051] 太陽電池セル 1 A の光吸収部 1 3 は複数の光吸収部を備えている。複数の光吸収部であるトップセル層 1 3 a 及びボトムセル層 1 3 b のそれぞれは、吸収する光の波長帯域が互いに異なる。複数の光吸収部からなる光吸収部 1 3 は方向転換層 1 2 の入射面 1 2 p と反対側の面に接して形成されている。このように構成されるタンデム型構造の太陽電池セル 1 A は、単一の波長に対応する光吸収部を備える太陽電池セルよりも、さらに光吸収効率を高めることができる。

[0052] 太陽電池セル 1 A は方向転換層 1 2 とは別のまたは複数の方向転換層（不図示）をさらに備えていてもよい。方向転換層 1 2 とは別の方向転換層のそれぞれは、進行方向の転換が行われる光の波長帯域が互いに異なるように形成される。別の方向転換層は、方向転換層 1 2 の入射面 1 2 p 側の面に接して形成されていてもよいし、入射面 1 2 p の反対側の面に接して形成されていてもよい。トップセル層 1 3 a とボトムセル層 1 3 b との間に形成されていてもよい。光吸収部 1 3 における主面 1 3 p の反対側の面に接して形成されていてもよい。このように構成される太陽電池セルは、単一の波長に対応する方向転換層 1 2 を備える太陽電池セル 1 A よりも、方向が転換される光の波長帯域を拡大することができる。方向が転換された光は、それぞれの波長に応じて複数の光吸収部により吸収される。従って、方向が転換されると共に、光吸収部 1 3 により吸収される光の波長帯域が拡大されるので、光吸収効率をさらに高めることができる。

[0053] 従来技術として知られている、フォトニック結晶、回折格子、及びグレーティングカップラと、太陽電池セル 1 A との相違点等について説明する。

[0054] 太陽電池セル 1 A の方向転換層 1 2 が有する作用は、フォトニック結晶が有する作用と異なる。太陽電池セル 1 A の方向転換層 1 2 が有する作用は、光の波面に沿って周期的な位相差を形成して、光の進行方向を光吸収部 1 3 の主面 1 3 p に沿った方向に転換することである。フォトニック結晶が有する作用は、光の反射に起因する共振により定在波を発生させることである。従って、周期構造を配置したフォトニック結晶が有する作用は、周期構造による反射に基づいて発生する共振作用である。それ故、フォトニックバンドギャップが生じる。

[0055] これに対して、太陽電池セル 1 A の場合には、周期的な媒質を光が透過する際の位相差だけに基づいて光の進行方向が転換される。従って、光の進行方向を転換するために必要な周期数も少なくても良い。太陽電池セル 1 A において、共振現象は本質的な原理ではないため、フォトニック結晶とは原理が異なる。

[0056] 太陽電池セル 1 A の方向転換層 1 2 が有する作用は、回折格子が有する作用と異なる。回折格子は、周期構造を透過して回折された光同士の干渉を発生させる。それ故、回折格子の特性は、回折格子（グレーティング）の周期と、入射光の波長とに基づいている。回折格子を備える太陽電池セルでは、通常、入射光を複数の方向に回折させる。そして、光吸収部において光を吸収させるために、光吸収部の内部において入射光を多重反射させる必要がある。それ故、回折格子を備える太陽電池セルは、光吸収部に接する金属等からなる反射部が必要である。一方、太陽電池セル 1 A は、光吸収部 1 3 の内部において入射光 L を多重反射させる必要はない。従って、太陽電池セル 1 A は、反射部を備えていてもよいし、備えていなくてもよい。

[0057] 回折格子を太陽電池セルへ適用した場合、以下のような課題が指摘されている。回折格子を適用した太陽電池セルへ垂直に光が入射する場合、回折光の進む角度 θ は式（6）で示される。式（6）において、回折格子の周期は D_G であり、光の波長は λ であり、光吸収部の屈折率は n_D であり、回折次数は m である。

$$\theta = \sin^{-1} [m \lambda / (n_D D_G)] \cdots (6)$$

上記非特許文献 8 では、式（6）により、回折格子の周期 D_G が小さいとき、大きな回折次数 m への光の回折が起きなくなり、光吸収効率の低下が起きることが示されている。それ故、回折格子の周期の最適値として 600 nm 程度が示されている。非特許文献 8 に引用された他の報告には、回折格子の周期の最適値として 650 nm ~ 850 nm が示されている。回折格子を適用した太陽電池セルでは、回折格子によって回折した光が、太陽電池セル内で多重反射するように光吸収部に閉じ込める必要がある。それ故、光吸収部の裏面に反射鏡を必要とする。反射鏡により反射された光が表面の同じ回折格子によって再度回折されて、光が外部に出ないようにすることが課題として指摘されている。従って、回折格子を備える太陽電池セルは、光が外部に漏れ出ないようにする反射部を備える必要がある。

[0058] これに対して、太陽電池セル 1 A では反射部を備えていてもよいし、備え

ていなくてもよい。

[0059] 式(6)は、回折格子を透過した光の進行角度を示す一般的な式である。

式(6)において、 D_G を式(5)と同じ形式である $D_G = \lambda / n_D$ とし、 $m = 1$ とすると、 $\theta = 90^\circ$ となる。これは、入射した光が回折格子に対して平行に進む光となることを示す。一方、回折格子から基板(光吸収部)へ入射される光パワーは光電界 E と磁界 H の外積($E \times H$)により与えられる。その全体量は、式(7)に示すように、境界の法線ベクトル n との内積を境界面全体について積分することにより得られる。

[数1]

$$P = \oint_S E \times H \cdot n dS \cdots (7)$$

ここで、 S は境界面を表し、積分記号は境界面全体における積分を表す。式(6)において $\theta = 90^\circ$ であるとは、光電界 E と磁界 H との外積($E \times H$)が境界に水平な方向に向くことを意味する。一方、境界の法線ベクトル n は境界に垂直な方向に向いてるため、両者の内積は零になる。すなわち、 $\theta = 90^\circ$ である状態では、基板側に流れ込む光パワーは零になる。そのため、非特許文献7では $m = 1$ の回折光が法線方向から 25.5° の方向へ進む場合を扱っている。

[0060] これに対して、太陽電池セル1Aでは、光吸収部(光導波路)13の内部において光吸収部13に沿って進む光に対して、式(2)で与えられる周期的な π 位相シフトを与えると共に、 π 位相シフトの周期 D を式(5)の位相整合条件に合わせる、という点において相違する。

[0061] 太陽電池セル1Aにおいて方向転換層12が有する作用は、グレーティングカプラが有する作用と異なっている。一般に太陽電池セルには垂直に光が入射される。屈折率が周期的に変化するグレーティングカプラでは、導波モードと外部から入射する光とが、光導波路に沿って進むに従ってモード変換によって光結合する。それ故、垂直に光が入射された場合、光導波路に結合することなくそのまま透過する光を効率よく抑制することは困難である。

[0062] これに対して、方向転換層12では、厚さ h を式(2)で与えられる値に

設定することにより、透明導電領域（第 1 の領域）12a と半導体領域（第 2 の領域）12b とを透過する光の波面の位相差を π だけ位相変化させる。このような π 位相変化により、方向転換層 12 に対して垂直に入射した光の透過を零にできる。それ故、方向転換層 12 では少ない周期 D で、方向転換層 12 に対して垂直に入射する光の進行方向を、光吸収部 13 に沿って進む方向に効率よく変換できる。 π 位相変化により、方向転換層 12 に対して垂直に入射した光の透過を零にできる点は、非特許文献 9 に理論的に示されている。

[0063] グレーティングカプラの設計では、光導波路の進行方向に沿って、導波モードと入射する光との位相を互いに整合させるように、グレーティングの周期を設定する。位相整合条件を満足させることが、グレーティングカプラの設計における主要な部分である。一方、グレーティングの厚さに対する式（2）のような最適条件は知られていなかった。位相整合条件は、入射光の波長、及び入射光の入射角等により変化する。それ故、グレーティングカプラを効率よく用いるためには、入射光の波長帯域及び入射角が所定の範囲に制限される。グレーティングカプラでは、入射光の偏波の状態により特性が大きく左右される。従って、グレーティングカプラが対応可能な入射光の波長帯域は制限される。グレーティングカプラを適用する光学素子では、入射光がコヒーレントな光であるレーザ光を想定していることが一般的である。一方、太陽電池セルに入射される光は、インコヒーレントである。それ故、グレーティングカプラに多数の周期構造が形成されていても、入射光の位相を導波路を進む光の位相に整合させる作用をもたらす実効的な周期構造の範囲は限定される。

[0064] グレーティングカプラを太陽電池セルへ適用した場合、以下のような課題が指摘されている。グレーティングカプラでは、入射光の入射角と、入射光の波長と、グレーティングの周期との関係が、位相整合条件で定まっている。それ故、光結合の効率が入射光の入射角によって変動するという課題がある。さらに、光結合の効率が入射光の電界方向によって変動するという課題

がある。

[0065] 一方、太陽電池セル 1 A では、1 つの透明導電領域 1 2 a と、1 つの半導体領域 1 2 b を備えていれば、原理的には光の進行方向が転換される。従って、入射光の入射角度の変化が光変換効率に及ぼす影響を抑制することができる。また、入射光の電界方向が光変換効率に及ぼす影響を抑制することができる。すなわち、太陽電池セル 1 A は偏波依存性が緩やかである。

[0066] グレーティングカプラの効率を最大にする条件として位相整合条件がある。この位相整合条件は、入射光と導波モードとグレーティングの周期とが、光導波路の進行方向に互いに位相をそろえる条件である。モード変換する効率を最適にするグレーティング高さの条件は、グレーティングカプラを適用する対象によって変わるため、一般的な最適条件は知られていない。

[0067] グレーティングカプラでは、多数の周期構造を用いて外部光を光導波路に結合させる。グレーティングカプラの太陽電池への応用では、入射光がインコヒーレントであるために、多数の周期が位相をそろえて有効に働かず、光吸収効率を高くできない課題がある。

[0068] 一方、太陽電池セル 1 A では、1 つの透明導電領域 1 2 a と、1 つの半導体領域 1 2 b を備えていれば、原理的には光の進行方向が転換される。従って、方向転換層 1 2 に互いに異なる波長にそれぞれ対応する周期構造を設けることにより、広い変換波長帯域を確保することができる。それ故、入射光がインコヒーレントな光であっても、光吸収効率を高めることができる。

[0069] 太陽電池セル 1 A の作用効果に関する計算結果を示す。はじめに、比較例として従来の形態に係る太陽電池セルを用いて確認を行った。図 30 (a) は、比較例である太陽電池セル 200 の構成を説明するための断面図である。図 30 (b) は、従来の太陽電池セルの特性を説明するための図である。図 30 (b) は、図 30 (a) に示す太陽電池セル 200 に入射光 L を入射したときのシミュレーションの結果である。シミュレーション結果は、電磁界分布の時間変化を示している。

[0070] 電磁界分布の時間変化は、数値計算により解析した。数値計算には、F D

T D (F i n i t e D i f f e r e n c e T i m e D o m a i n) 法を用いた。F D T D 法は電磁界の特性を正確に表現できるマクスウェル一次微分方程式を差分化し、時間領域において解く方法である。F D T D 法の計算結果は正確であると共に、実験結果ともよく一致することが知られている。

[0071] 図30(a)に示されるように、太陽電池セル200は、電極214の上に光吸収部213、透明導電層212、及びガラス板211がこの順に配置されている。太陽電池セル200を製造する場合は、ガラス板211を成長基板として、ガラス板211の上に透明導電層212、光吸収部213及び電極214をこの順に形成する。光吸収部213は、トップセル層213aとボトムセル層213bとを備えている。電極214の屈折率は $0.173 + 5.021i$ に設定した。 i は虚数単位である。トップセル層213aの厚さは200nmに設定し、屈折率は $4.23 + 0.10i$ に設定した。ボトムセル層213bの厚さは200nmに設定し、屈折率は $3.71 + 0.0085i$ に設定した。透明導電層212の厚さは200nmに設定し、屈折率は $1.85 + 0.01i$ に設定した。入射光Lの波長は800nmに設定した。数値計算にあたって、ガラス板211の表面は無反射コーティング等により反射が無視できるものと設定した。

[0072] 図30(b)に示されるように、矢印L201の方向へ進む光は、電極214により反射された反射光と重なり合う。反射光は、矢印L201の方向へ進む光が電極214により反射されて、矢印L201の指し示す方向と逆の方向へ進む光である。矢印L201の方向へ進む光と反射光とが重なりあうと、入射光Lの入射する方向に沿って定在波が生じる。このとき、入射光Lのうちおよそ28%は光吸収部213において吸収された。入射光Lのうちおよそ2%は電極214において吸収された。入射光Lのうちおよそ70%は光吸収部213に吸収されることなく反射された。この結果は、ボトムセル層213bの厚さが200nmであり、一般的なボトムセル層113bの厚さである2000nmに対して $1/10$ であるため、電極214で反射

された光がボトムセル層 2 1 3 b で十分に吸収されずに反射されていることを示している。

[0073] 太陽電池セル 1 A に入射光 L が入射した場合の電磁界分布を F D T D 法により解析した。電極 1 4 の屈折率は $0.173 + 5.021i$ に設定した。トップセル層 1 3 a の厚さは 200 nm に設定し、屈折率は $4.23 + 0.10i$ に設定した。ボトムセル層 1 3 b の厚さは 200 nm に設定し、屈折率は $3.71 + 0.0085i$ に設定した。方向転換層 1 2 の厚さは 200 nm に設定した。透明導電領域 1 2 a の屈折率は $1.85 + 0.01i$ に設定した。入射光 L の波長は 800 nm に設定した。比較例である太陽電池セル 2 0 0 とは、透明導電層 2 1 2 に替えて方向転換層 1 2 を備えている点で相違する。

[0074] 配列周期 D と光吸収部 1 3 の光吸収効率との関係、配列周期 D と光反射率との関係、及び、配列周期 D と金属電極における光吸収効率との関係を確認した。図 3 は第 1 実施形態に係る太陽電池セル 1 A の効果を説明するための図である。図 3 (a) は配列周期 D と光吸収部 1 3 の光吸収効率との関係、配列周期 D と光反射率との関係、及び、配列周期 D と金属電極における光吸収効率との関係を示す。この検討では、方向転換層 1 2 の厚さを 168 nm に設定した。入射光を、入射光 L の磁界成分が入射面 1 2 p に対して横方向、即ち、磁界成分が図 2 に示された入射面 1 2 p の面内にあり、かつ図 3 (a) の紙面に垂直な方向である光波 (TM 波: *T r a n s v e r s e M a g n e t i c w a v e*) として設定した。

[0075] 図 3 (a) において、グラフ G a 1 は光吸収部 1 3 及び方向転換層 1 2 における光吸収効率を示し、グラフ G a 2 は光吸収部 1 3 における光吸収効率を示す。グラフ G a 3 は反射率を示し、グラフ G a 4 は電極 1 4 における光吸収効率を示す。グラフ G a 2 によれば、光吸収部 1 3 における光吸収効率は配列周期 $D \sim 190\text{ nm}$ 、及び $D \sim 440\text{ nm}$ においてピークを示すことが確認された。グラフ G 1 a によれば、光吸収部 1 3 及び方向転換層 1 2 における光吸収効率は、配列周期 $D \sim 230\text{ nm}$ と $D \sim 450\text{ nm}$ とで $\sim 95\%$ の光

吸収効率を示すことが確認された。グラフ G a 3 によれば、反射率は配列周期 $D \sim 230 \text{ nm}$ 及び $D \sim 440 \text{ nm}$ で極小を示すことが確認された。グラフ G a 4 によれば、電極 1 4 における光吸収効率はほぼ 5 % で一定となることが確認された。

[0076] 図 3 (b) は方向転換層 1 2 の厚さ h と光吸収部 1 3 の光吸収効率との関係、方向転換層 1 2 の厚さ h と光反射率との関係、及び、方向転換層 1 2 の厚さ h と金属電極における光吸収効率との関係を示す。この検討では、配列周期 D は 450 nm に設定した。その他の構成は、図 3 (a) と同様である。図 3 (b) において、グラフ G a 5 は光吸収部 1 3 及び方向転換層 1 2 における光吸収効率を示し、グラフ G a 6 は光吸収部 1 3 における光吸収効率を示す。グラフ G a 7 は反射率を示し、グラフ G a 8 は電極 1 4 における光吸収効率を示す。グラフ G a 6 によれば、光吸収部 1 3 の光吸収効率は方向転換層 1 2 の厚さ h が $\sim 170 \text{ nm}$ のときピークを示すことが確認された。グラフ G a 5 によれば、光吸収部 1 3 及び方向転換層 1 2 における光吸収効率は $\sim 95 \%$ の光吸収効率を示すことが確認された。グラフ G a 7 によれば反射率は方向転換層 1 2 の厚さ h が $\sim 170 \text{ nm}$ でほぼ零となる極小を示すことが確認された。以上の結果より、図 3 から確認された結果と、式 (2)、式 (5) の見積もりとは合理的な一致を示すことが確認された。

[0077] <第 2 実施形態>

第 2 実施形態に係る太陽電池セルについて説明する。本実施形態に係る太陽電池セルは光吸収部 2 3 が方向転換層 2 2 の入射面 2 2 p の上に形成されている点で第 1 実施形態に係る太陽電池セル 1 A と相違する。

[0078] 図 4 は第 2 実施形態に係る太陽電池セル 1 B の構成を説明するための断面図である。図 4 に示されるように、太陽電池セル 1 B は基材 2 5 を備えている。基材 2 5 の主面 2 5 p の上には、電極 2 4、方向転換層 2 2、光吸収部 2 3、及び電極 2 1 がこの順に形成されている。

[0079] 基材 2 5 は、例えばポリエチレンナフタレート (PEN: Polyethylene naphthalate) からなる透明なプラスチックシート

である。電極 2 4 は、金属電極であり例えば銀 (A g) からなる。光透過防止用反射膜である電極 2 4 は、電極 2 1 側から入射された入射光 L が太陽電池セル 1 B を透過することを防止すると共に、光を光吸収部 2 3 の方向へ反射する機能を備える。方向転換層 2 2 は、透明導電領域 2 2 a と半導体領域 2 2 b とを備えている。透明導電領域 2 2 a は、例えば導電性を備える酸化インジウムスズ (I T O) からなる。半導体領域 2 2 b は、例えばアモルファスシリコンからなる。光吸収部 2 3 は、アモルファスシリコン等からなるトップセル層 2 3 a と微結晶シリコン等からなるボトムセル層 2 3 b とを含んでいる。半導体領域 2 2 b とボトムセル層 2 3 b とは、一体的に形成されていてもよいし、別の材料で形成されていてもよい。電極 2 1 は、透明導電酸化膜 (T C O) によって好適に形成される。透明導電酸化膜には、例えば導電性を備える酸化インジウムスズ (I T O) 、又は酸化亜鉛 (Z n O) を用いることができる。

[0080] 本実施形態に係る太陽電池セル 1 B のように、方向転換層 2 2 の入射面 2 2 p に接するように光吸収部 2 3 が形成されていても、光吸収効率を高めることができる。また、基材 2 5 として、例えばポリエチレンナフタレートからなる透明なプラスチックシートを用いている。さらに、方向転換層 2 2 を備えていることにより、光吸収部 2 3 の厚さを薄くすることが可能となる。従って、柔軟性を有するフレキシブル太陽電池である太陽電池セル 1 B を形成することができる。

[0081] 太陽電池セル 1 B に入射光 L を入射したときの特性を確認した。太陽電池セル 1 B では、入射光は光吸収部 2 3 と方向転換層 2 2 とを透過し、銀からなる電極 2 4 において反射する。その反射の後、再度方向転換層 2 2 を透過した後に光吸収部 2 3 にあらためて入射する。光吸収部 2 3 における透明導電領域 2 2 a と半導体領域 2 2 b との位相差は式 (8) により示される。

$$4 \pi | n_{22b} - n_{22a} | h / \lambda + (\phi_{Ag[uc-Si]} - \phi_{Ag[ITO]}) = \pi \text{ (又はその奇数倍)} \dots (8)$$

$\phi_{Ag[uc-Si]}$ は半導体領域 2 2 b から電極 2 4 に光が入射して反射する際の位相変

化であり、 $\phi_{\text{Ag[ITO]}}$ は透明導電領域22aから電極24に光が入射して反射する際の位相変化である。式(1)に対応する左辺の第一項が2倍になっているのは、入射及び反射により方向転換層22を光が二回通過するためである。基材25の屈折率は1.7に設定した。電極24の厚さは100nmに設定し、屈折率は $0.173 + 5.021i$ に設定した。方向転換層22の透明導電領域22aの屈折率は $1.85 + 0.01i$ に設定し、領域22bの屈折率は $3.71 + 0.0085i$ に設定し、領域比は $1/2$ に設定した。領域比とは配列周期Dに占める半導体領域22bの幅の割合である。ボトムセル層23bの厚さは200nmに設定し、屈折率は $3.71 + 0.0085i$ に設定した。トップセル層23aの厚さは200nmに設定し、屈折率は $4.23 + 0.10i$ に設定した。電極21の厚さは200nmに設定し、屈折率は $1.85 + 0.01i$ に設定した。入射光Lの波長は800nmに設定した。このとき、位相差が π 又はその3倍、5倍に相当する方向転換層22の厚さhは式(8)より64nm、280nm、496nmと見積もられる。しかし、式(4)の条件から496nmは除外される。

[0082] 方向転換層22の配列周期Dについて述べる。太陽電池セル1Bにおけるトップセル層23aとボトムセル層23bとは、光吸収部23である。一方、方向転換層22において進行方向が光吸収部23に平行な方向に転換された入射光Lに対しては、損失の大きい光導波路として機能する。入射光が方向転換層22に垂直に入射した場合の、配列周期Dの最適値は、式(5)によって示される。例えば、トップセル層23a、ボトムセル層23b、方向転換層22を、これらの平均屈折率を持つ光導波路と近似し、また電極24が完全導体と近似するとき、配列周期Dは230nm～260nm、又は370nm～410nmの整数倍の長さが目安である。値に幅があるのは、導波モードの実効屈折率の計算で、領域に複数の光導波モードが存在するため、どの光導波モードにあわせて設定するか任意性があるためである。

[0083] 図5は第2実施形態に係る太陽電池セル1Bの効果を説明するための図である。図5では、光吸収部23での光吸収効率と方向転換層22の厚さとの

関係、光吸収部 2 3 での光吸収効率に方向転換層 2 2 の光吸収効率を加えたシリコン層全体の光吸収効率と方向転換層 2 2 の厚さとの関係、表面の I T O からなる電極 2 1 での光吸収効率と方向転換層 2 2 の厚さとの関係、銀からなる電極 2 4 の光吸収効率と方向転換層 2 2 の厚さとの関係、及び、太陽電池セル 1 B における光反射率と方向転換層 2 2 の厚さとの関係を示す。この検討では、方向転換層 2 2 の厚さ h を 0 nm から 350 nm まで変化させた。配列周期 D は 370 nm に設定し、領域比は $1/2$ に設定した。領域比とは配列周期 D に占める半導体領域 2 2 b の幅の割合である。入射光 L は、波長 λ を 800 nm に設定し、磁界成分が入射面 2 2 p に対して横向きである光波 (T M 波) に設定した。

[0084] 図 5 において、グラフ G b 1 は光吸収部 2 3 及び方向転換層 2 2 における光吸収効率を示し、グラフ G b 2 は光吸収部 2 3 における光吸収効率を示す。グラフ G b 3 は電極 2 4 における光吸収効率を示し、グラフ G b 4 は I T O からなる電極 2 1 における光吸収効率を示し、グラフ G b 5 は光反射率を示す。グラフ G b 1 及び G b 2 によれば、光吸収率は方向転換層 2 2 の厚さが $\sim 50 \text{ nm}$ 及び $\sim 300 \text{ nm}$ でピークを示すことが確認された。この結果は式 (8) による見積もりとほぼ一致する。即ち、方向転換層 2 2 の厚さが 50 nm の場合には、光吸収部 2 3 における光吸収効率が 89% であり (グラフ G b 2 参照)、方向転換層 2 2 も含めた光吸収効率が 92% である (グラフ G b 1 参照) ことが確認された。グラフ G b 3 によれば銀からなる電極 2 4 での光吸収効率が 2.9% であることが確認された。グラフ G b 4 によれば I T O からなる電極 2 1 の光吸収効率が 4.8% であることが確認された。グラフ G b 5 によれば反射効率は 0.3% であることが確認された。この結果から、方向転換層 2 2 の有効性が確認された。従って、光吸収部 2 3 が方向転換層 2 2 の入射面 2 2 p と接するように形成されている、すなわち方向転換層 2 2 が電極 2 4 と接するように形成されていても、方向転換層 2 2 を備える太陽電池セル 1 B は光吸収効率を高めることができることがわかった。

[0085] <第3実施形態>

第3実施形態に係る太陽電池セルについて説明する。本実施形態に係る太陽電池セルは、金属からなる電極を備えていない点で第1実施形態に係る太陽電池セル1 Aと相違する。

[0086] 図6は、第3実施形態に係る太陽電池セル1 Cの構成を説明するための断面図である。図6に示されるように、太陽電池セル1 Cは基材2 5を備えている。基材2 5の上には、透明導電層2 6、光吸収部2 3、及び方向転換層2 2がこの順に形成されている。これらの構成要素のそれぞれは、第2実施形態に係る太陽電池セル1 Bの構成要素と同様の材料からなる。すなわち、基材2 5は、ポリエチレンナフタレート等からなるプラスチックシートである。透明導電層2 6は、酸化インジウムスズ（ITO）からなる電極層である。光吸収部2 3は、アモルファスシリコン等からなるトップセル層2 3 aと微結晶シリコン等からなるボトムセル層2 3 bとを備えている。方向転換層2 2は、透明導電領域2 2 aと半導体領域2 2 bとを備えている。透明導電領域2 2 aは酸化インジウムスズ（ITO）等からなり、半導体領域2 2 bはアモルファスシリコン等からなる。太陽電池セル1 Cでは、透明導電領域2 2 aが電極の機能を有する。

[0087] 太陽電池セル1 Cに入射光Lが入射した場合の電磁界分布をFDTD法により解析した。基材2 5の屈折率は1.7に設定した。透明導電層2 6の厚さは200 nmに設定し、屈折率は $1.85 + 0.01i$ に設定した。ボトムセル層2 3 bの厚さは200 nmに設定し、屈折率は $3.71 + 0.0085i$ に設定した。トップセル層2 3 aの厚さは0.2 μm に設定し、屈折率は $4.23 + 0.10i$ に設定した。方向転換層2 2の厚さは170 nmに設定した。透明導電領域2 2 aの配列周期Dは変数とし、領域比は1/2に設定し、屈折率は $1.85 + 0.01i$ に設定した。入射光Lの波長は800 nmに設定した。領域比とは配列周期Dに占める半導体領域2 2 bの幅の割合である。

[0088] 図7及び図8は太陽電池セル1 Cの効果を説明するための図であり、太陽

電池セル 1 C に入射光 L を入射したときの電磁界分布の時間変化を示している。図 7 (a) は入射光 L が照射されてから 2.0 フェムト秒経過後であって、光波が $0.6 \mu\text{m}$ だけ進行した様子を示している。図 7 (b) は入射光 L が照射されてから 3.3 フェムト秒経過後であって、光波が $1.0 \mu\text{m}$ だけ進行した様子を示している。図 8 (a) は入射光 L が照射されてから 7.3 フェムト秒経過後であって、光波が $2.2 \mu\text{m}$ だけ進行した様子を示している。図 8 (b) は入射光 L が照射されてから 52.1 フェムト秒経過後であって、光波が $15.8 \mu\text{m}$ だけ進行した様子を示している。

[0089] 図 8 (b) を確認すると、光吸収部 23 の内部において光吸収部 23 の表面に沿った方向に明瞭な定在波が発生していることがわかった。従って、光の進行方向は光吸収部 23 の表面に沿った方向に転換されており、効率よく光を吸収することが可能な状態にあることがわかった。金属からなる電極を備えておらず、該電極からの光学反射がない太陽電池セル 1 C であっても光吸収効率を高めることができることが示された。

[0090] 配列周期 D の最適値は、式 (5) によって示されている。方向転換層 22 及び光吸収部 23 を光導波路として計算すると、配列周期 D は $230 \text{ nm} \sim 240 \text{ nm}$ 、 $270 \text{ nm} \sim 290 \text{ nm}$ 、 $\sim 330 \text{ nm}$ 、 $410 \text{ nm} \sim 420 \text{ nm}$ の整数倍の長さが目安である。値に幅があるのは、導波モードの実効屈折率の計算で、領域に複数の光導波モードが存在するため、どの光導波モードにあわせて設定するか任意性があるためである。

[0091] 太陽電池セル 1 C に入射光 L を入射したときの特性を確認した。図 9 は、太陽電池セル 1 C の効果を説明するための図である。グラフ G c 1 は透明導電領域 22 a の配列周期 D と光吸収部 23 における光吸収効率との関係を示している。グラフ G c 2 は透明導電領域 22 a の配列周期 D と光反射率との関係を示している。グラフ G c 3 は透明導電領域 22 a の配列周期 D と光透過率の関係を示している。光吸収効率の主なピークは $\sim 330 \text{ nm}$ 付近に観察され、式 (5) で計算される最適値とほぼ一致した。グラフ G c 1、グラフ G c 2、グラフ G c 3 と破線で結ばれた周期 0 の点に描いた 3 つの点は、図

6の実施形態で方向転換層22がない場合の光吸収効率を示している。方向転換層22がない場合とは、方向転換層22を均一な透明導電層に置き換えた場合である。これらの3つの点は、太陽電池セル1Cは、金属電極を備えていないため、入射光の50%が吸収されずにそのまま透過してしまうことを示している。光吸収部23における光吸収効率は31%である。

[0092] グラフGc1によれば、配列周期Dを変化させると、光吸収部23における光吸収効率が変わることがわかった。金属からなる電極を備えていない太陽電池セル1Cであっても、方向転換層22を備えることにより光吸収効率を高めることができることがわかった。

[0093] <第4実施形態>

第4実施形態に係る太陽電池セルについて説明する。本実施形態に係る太陽電池セルは、透明導電領域を配置する周期が一定でない点で第1実施形態に係る太陽電池セル1Aと相違する。

[0094] 図10は第4実施形態に係る太陽電池セルの方向転換層32の構成を説明するための断面図である。図10は、第4実施形態に係る太陽電池セルの一部を拡大した断面を示す。

[0095] 本実施形態に係る太陽電池セルは、透明導電領域32aを備えている。透明導電領域32aは、互いに異なる配列周期D1～D3に従って配置されている。図10に示されるように、配列周期D2は配列周期D1よりも大きく、配列周期D3は配列周期D2よりも大きく設定されている。

[0096] 配列周期Dと入射する光の波長 λ とは、式(5)及び図9に示す例のように好適な関係がある。それ故、透明導電領域32aを配置する配列周期Dを配列周期D1～D3のように変化させることにより、それぞれの配列周期D1～D3に対応する波長 λ の光の進行方向を転換することが可能となる。従って、方向転換層32により進行方向が転換される光の波長帯域が拡大されるので、光吸収効率をより高めることができる。

[0097] 本実施形態に係る太陽電池セルの方向転換層32が備える透明導電領域32aは、3つの配列周期D1～D3に従って配置されている。方向転換層3

2では、3つ以上の互いに異なる配列周期に従って透明導電領域32aが配置されてもよい。透明導電領域32aは不規則に変化する配列周期Dに従って配列されてもよい。すなわち、透明導電領域32a及び半導体領域32bは、それぞれの幅や形状が2次元面内において不規則に変化してもよい。このような構造を有する方向転換層により発生する定在波では、光の強い部分と弱い部分とが不規則に存在するが、方向転換層としての機能を損なうものではない。このような構造を有する方向転換層は容易に製造することができる。

[0098] <第5実施形態>

第5実施形態に係る太陽電池セルについて説明する。本実施形態に係る太陽電池セルは、第1の領域が球状の形状である点で第1実施形態に係る太陽電池セル1Aと相違する。

[0099] 図11は太陽電池セル1Dの構成を説明するための断面図である。図11に示されるように、太陽電池セル1Dは電極44を備えている。電極44の主面44pの上には、光吸収部43、方向転換層42、透明導電層45、及びガラス板41がこの順に形成されている。方向転換層42は、有限の周期構造を含んでいる。この周期構造は、半導体領域42dと球状の形状である微粒子42cとにより構成されている。透光性の電極である透明導電層45は、例えば導電性を備える酸化インジウムスズ（ITO）等からなる。微粒子42cは例えば酸化シリコン（SiO₂）或いはポリスチレン微粒子のいずれか一つからなる。半導体領域42dは例えばアモルファスシリコンからなる。光吸収部43は、例えばアモルファスシリコンからなるトップセル層43aと例えば微結晶シリコン等からなるボトムセル層43bとを含んでいる。ガラス板41は、例えば酸化シリコン（SiO₂）からなる。半導体領域42dは、トップセル層43aと一体的に形成されていてもよいし、トップセル層43aと別材料であってもよい。

[0100] 図11に示される太陽電池セル1Dでは、所定の直径を有する第1の領域（微粒子42c）を敷き詰めるように配置する。太陽電池セル1Dの広い領

域にサブミクロンレベルのパターニングを行うことが困難である場合がある。この場合に微粒子42cを配置する方法として、クーロン力を用いて配置する方法がある。この方法によれば、イオン化された微粒子42cが透明導電層45を備える基板の主面45p上にクーロン力により配置される。互いに接する微粒子42cは、クーロン反発力により二層にならないように調整される。

[0101] 微粒子42cをディップコーティングにより配置する方法がある。微粒子42cを含む溶液にガラス板41と透明導電層45とを備える基板を浸漬する。そして、所定の速度で該基板を溶液の液面に対して垂直に引き上げる。そうすると、溶液の表面張力が微粒子42cに作用し、溶液中の微粒子42cが透明導電層45の主面45pに均一に配置される。ディップコーティングによる方法では、例えば直径150～5000nmの酸化シリコン球を配置することができる。

[0102] 太陽電池セル1Dに入射光Lが入射した場合の電磁界分布をFDTD法により解析した。電極44の屈折率は $0.173 + 5.021i$ に設定した。トップセル層43aの厚さは200nmに設定し、屈折率は $4.23 + 0.10i$ (i は純虚数)に設定した。ボトムセル層43bの厚さは200nmに設定し、屈折率は $3.71 + 0.0085i$ に設定した。微粒子42cの直径は320nmに設定し、屈折率は1.45に設定した。透明導電層45の厚さは200nmに設定し、屈折率は $1.85 + 0.01i$ に設定した。ガラス板41の屈折率は1.45に設定した。入射光Lの波長は800nmに設定した。

[0103] 図12は太陽電池セル1Dの効果を説明するための図であり、入射光Lが照射されてから52.7フェムト秒経過後であって、光波が $15.97\mu\text{m}$ だけ進行した様子を示す。領域L1はガラス板41を示す領域であり、領域L2は透明導電層45を示す領域であり、領域L3は方向転換層42とトップセル層43aとを含む領域を示す領域である。領域L4はボトムセル層43bを示す領域であり、領域L5は電極44を示す領域である。

[0104] 図12を確認すると、光吸収部43の内部において光吸収部43の主面43pに沿った方向に明瞭な定在波が発生していることがわかった。これにより、光の進行方向は主面43pに沿った方向に転換されており、効率よく光を吸収することが可能な状態にあることがわかった。従って、球状の第1の領域であっても光変換効率を高めることができることが示された。

[0105] 微粒子42cの直径と光吸収効率との関係、及び微粒子42cの直径と光反射率との関係を確認した。図13は太陽電池セル1Dの効果を説明するための図である。グラフGd1は微粒子42cの直径と光吸収部43の光吸収効率との関係を示す。グラフGd2は微粒子42cの直径と太陽電池セル1Dの主面41pからの光反射率との関係を示す。図13のグラフGd1を確認すると、微粒子の直径が320nmのときに最も光吸収効率が高まることがわかった。このときの光吸収効率は81.7%であり、光反射率は6.4%であった。図13の微粒子42cの直径が0の点は微粒子42cによる方向転換層42がない場合を意味する。光吸収部43での光吸収効率は26%にとどまり、67%は吸収されずに反射されてしまうことを示している。

[0106] 第5実施形態では入射光Lの波長は800nmに設定した。太陽電池セル1Dにおいて光吸収効率が向上される範囲は800nmに限定されることはない。シミュレーションによれば、入射光Lの中心波長が800nmとして設計されたとき、700nm～1000nmの波長帯域において光吸収効率が向上されることがわかった。

[0107] <第6実施形態>

図14は第6実施形態に係る太陽電池セルの構成を説明するための断面図である。本実施形態の太陽電池セルは、銀からなる電極を備えていない点及び第1の領域が球状の形状である点で上述した第1実施形態に係る太陽電池セル1Aと相違する。

[0108] 図14に示されるように、太陽電池セル1Eは基材48を備えている。基材48の表面の上には、透明導電層47、光吸収部43、方向転換層42、及び透明導電層46がこの順に形成されている。方向転換層42は有限の周

期構造を含んでいる。この周期構造は、半導体領域 4 2 d と球状の形状である微粒子 4 2 c とにより構成されている。透光性の電極である透明導電層 4 6, 4 7 は、例えば導電性を備える酸化インジウムスズ (ITO) 等からなる。微粒子 4 2 c は、例えば酸化シリコン (SiO_2) 或いはポリスチレン微粒子等のいずれか一つからなる。半導体領域 4 2 d は例えばアモルファスシリコンからなる。光吸収部 4 3 は、例えばアモルファスシリコンからなるトップセル層 4 3 a と例えば微結晶シリコン等からなるボトムセル層 4 3 b とを含んでいる。基材 4 8 は、ポリエチレンナフタレート等からなるプラスチックシートである。半導体領域 4 2 d は、トップセル層 4 3 a と一体的に形成されていてもよいし、トップセル層 4 3 a と別材料であってもよい。

[0109] 太陽電池セル 1 E に入射した入射光 L の波長と光吸収効率との関係を解析した。基材 4 8 の屈折率は 1.7 に設定した。透明導電層 4 6, 4 7 の厚さは 200 nm に設定し、屈折率は $1.85 + 0.01i$ に設定した。トップセル層 4 3 a の厚さは 200 nm に設定し、屈折率は $4.23 + 0.10i$ (i は純虚数) に設定した。ボトムセル層 4 3 b の厚さは 200 nm に設定し、屈折率は $3.71 + 0.0085i$ に設定した。入射光 L の波長を変化させる際には、それに応じてそれぞれの屈折率も変化させる必要があるが、波長 800 nm における方向転換層 4 2 の光吸収効率を増大させる効果を検討する観点から、波長 800 nm における屈折率の値で近似した。微粒子 4 2 c の直径は 400 nm に設定し、屈折率は 1.45 に設定した。

[0110] 図 15 は太陽電池セル 1 E の効果を説明するための図である。グラフ Ge 1 は方向転換層 4 2 が直径 400 nm の微粒子 4 2 c を含むときの特性である。グラフ Ge 2 は方向転換層 4 2 が微粒子 4 2 c を含まないときの特性である。グラフ Ge 1 を確認すると、方向転換層 4 2 が微粒子 4 2 c を含むことにより光吸収効率を高めることができることがわかった。

[0111] 例えば、波長が 750 nm の場合、微粒子 4 2 c を含まないときの光吸収効率は 23% であり、微粒子 4 2 c を含むときの光吸収効率は 48% である。波長が 800 nm の場合、微粒子 4 2 c を含まないときの光吸収効率は 3

0%であり、微粒子42cを含むときの光吸収効率は58%である。波長が850nmの場合、微粒子42cを含まないときの光吸収効率は13%であり、微粒子42cを含むときの光吸収効率は45%である。波長が900nmの場合、微粒子42cを含まないときの光吸収効率は12%であり、微粒子42cを含むときの光吸収効率は42%である。このように、太陽電池セル1Eが微粒子42cを含む方向転換層42を備えることにより、750nm~900nmの波長帯域において光吸収効率を12%~30%から42%~58%へ25%~30%程度高めることができることがわかった。

[0112] 光吸収部43の波長帯域に応じて微粒子42cの直径を最適化すれば、それぞれの波長帯域において同様に光吸収効率の改善が可能である。例えば、上述した解析では微粒子42cの直径は入射光Lの波長800nmに最適化されている。そのため、太陽電池セル1Eが、トップセル層43aが吸収する光の波長帯域に含まれる波長500nmに最適化された直径を有する微粒子42cを含む方向転換層をさらに備えることにより、光吸収効率を好適に高めることができる。

[0113] 太陽電池セル1Eのように、反射の大きい銀からなる電極を備えない太陽電池セルであっても、方向転換層42を備えることにより光吸収効率を高めることができる。また、銀からなる電極を必要としないので、太陽電池セル1Eを製造するときの材料コストを低減することができる。

[0114] 上述したように、グレーティングカプラによるモード変換では、グレーティングが導波モードに与える影響が小さく、且つ、導波モードが明確に定義できる状態を扱うことが一般的である。これに対し、方向転換層12を有する太陽電池セル1A~1Eでは、方向転換層12に接触する光吸収部13が方向転換層12と強く結合した状態であり、且つ光吸収効率が大きく、導波モードが明確には定義できない状態を扱う。この強く結合した状態の具体的な意味は、方向転換層12の第1の領域と第2の領域を通過した入射光Lの位相が相互に位相差を持つように方向転換層12によりシフトされることである。即ち、入射光Lが方向転換層12を透過して光吸収部13に到達した

段階において、入射光 L の位相が光吸収部に沿った方向に大きな変化を受けることを意味する。

[0115] <第7実施形態>

次に、本発明の第7実施形態について説明する。第7実施形態に係る太陽電池セルは、方向転換層の第1の領域が空気領域である点で太陽電池セル1Aと相違する。図16は、第7実施形態に係る太陽電池セル50の構成を説明するための図である。太陽電池セル50は、ガラス基板51、光吸収部52及び方向転換層53を備える。光吸収部52は、微結晶シリコン層52a及びアモルファスシリコン層52bを含む。方向転換層53は、空気領域（第1の領域）53a及び半導体領域（第2の領域）53bを含む。ガラス基板51上に微結晶シリコン層52aが設けられ、微結晶シリコン層52a上にアモルファスシリコン層52bが設けられている。さらに、アモルファスシリコン層52b上に、方向転換層53が設けられている。

[0116] 図17は、太陽電池セル50の解析結果を説明するための図である。図17は、配列周期 D と光吸収部の光吸収効率との関係、配列周期 D と光吸収部の光吸収効率に方向転換層の光吸収効率も含めた光吸収効率との関係、配列周期 D と光反射率との関係、及び、配列周期 D と光透過率との関係を示している。グラフGf1は光吸収部52及び方向転換層53における合計光吸収効率であり、グラフGf2は光吸収部52における光吸収効率である。そしてグラフGf3は光反射率であり、グラフGf4は光透過率である。この解析では、太陽電池セル50の各パラメータは、以下のように設定された。すなわち、ガラス基板51は酸化シリコン(SiO_2)からなり、屈折率 n が1.45である。微結晶シリコン層52aは、厚さが200nmに設定され、屈折率が $n + ik = 3.71 + 0.01i$ に設定された。アモルファスシリコン層52bは、厚さが200nmに設定され、屈折率が $n + ik = 4.23 + 0.10i$ に設定された。方向転換層53では、屈折率が n_{53a} 、 n_{53b} と変調されている。この方向転換層53を通過した光の位相ずれは式(9)により示されるので、方向転換層53の厚さ h は式(9)を満たす値に近づく

くように設定される。ここで、 n_{53a} は空気領域53aの屈折率である。 n_{53b} は半導体領域53bの屈折率である。空気領域53aの屈折率 n_{53a} と半導体領域53bの屈折率 n_{53b} とは、共に実部で近似されている。

$$2\pi |n_{53a} - n_{53b}| h / \lambda = \pi \text{ (ないしは } \pi \text{ の奇数倍)} \cdots (9)$$

従って、光の波長が800nmであるとする、方向転換層53の厚さ h は125nmに設定される。なお、方向転換層53の半導体領域53bはアモルファスシリコンからなる。また、方向転換層53の厚さ h は、式(9)で計算された値を中心値として、 $\pm 20\%$ 程度の寸法公差が許容される。

[0117] また、配列周期 D の最適値は、式(5)によって計算される値に近づくように設定される。例えば、TM偏波光が入射する場合、配列周期 D は290nm～300nm又は470nm～490nmの整数倍の長さ程度である。値に幅があるのは、導波モードの実効屈折率の計算で、領域に複数の光導波モードが存在するため、どの光導波モードにあわせて設定するかに任意性があるためである。なお、方向転換層53の配列周期 D は、式(5)によって計算された値を中心値として、 $\pm 20\%$ 程度の寸法公差が許容される。グラフGf1及びグラフGf2を確認すると光吸収部52の光吸収効率は、配列周期 $D \sim 290\text{nm}$ 、 $\sim 500\text{nm}$ でピークを示す。光吸収部52の光吸収効率は、方向転換層53の光吸収効率も含めると配列周期 $D \sim 290\text{nm}$ において $\sim 90\%$ である。

[0118] 図18は太陽電池セル50の解析結果を説明するための図である。図18は、太陽電池セル50に光ビームLBを照射したときの電磁界分布の時間変化を示している。図18の実施例では、空気領域53aの幅E4(図16参照)は150nmである。半導体領域53bの幅E5(図16参照)は150nmである。方向転換層53の配列周期 D_4 は300nmである。この太陽電池セル50に対して、方向転換層53側から光ビームLBが照射される。図18(a)は、光ビームLBが照射されてから54.7フェムト秒後の電磁界分布を示している。なお、図18(a)において、領域L6は方向転換層53を示す領域である。領域L7はアモルファスシリコン層52bを示

す領域である。領域L 8は微結晶シリコン層5 2 aを示す領域である。即ち、領域L 9は光吸収部5 2を示す領域である。この解析では、図1 6に示された方向転換層5 3の周期数が8に設定されている。即ち、方向転換層5 3は8つの半導体領域5 3 bを有している。光ビームL Bは、周期数が5の領域の幅E 6と同じ幅の範囲に照射される。光ビームL Bの波長は8 0 0 n mである。図1 8 (a)を参照すると、方向転換層5 3 (領域L 6)を透過した直後のアモルファスシリコン層5 2 b内 (領域L 7)において、アモルファスシリコン層5 2 bに対して水平な方向に光ビームL Bの位相が周期的に π だけ変化している。即ち、光ビームL Bの伝搬方向が、アモルファスシリコン層5 2 bに対して垂直な方向 (縦方向) から水平な方向 (横方向) に変化している。また、アモルファスシリコン層5 2 b内において光ビームL Bが横方向へ2 μ m程度進行すると、電磁界分布の減衰が顕著となっている。これはアモルファスシリコン層5 2 bの光吸収効率が大きく、光導波モードが明確に定義できない状態であることを示している。なお、アモルファスシリコン層5 2 bの平均光吸収係数は4 3 0 0 c m⁻¹である。

[0119] 図1 8の(a)に示された解析結果では、照射された光ビームL Bの4. 5%がガラス基板5 1へ透過された。そして、6. 6%が空気側に反射され、8 8. 9%が光吸収部5 2において吸収された。光ビームL Bを9 0%程度の比較的高い効率で光吸収させるためには、式(9)に基づいて、光吸収部5 2に対する光透過率及び光反射率を最小にすることと、光吸収効率を最大にすることが必要である。さらに、すべてのエネルギー和が入射ポインティングパワーと一致することを確認して、F D T Dによる厳密計算に基づいて方向転換層5 3が設計されることが必要である。これらの条件をグレーティングカプラのモード変換の概念だけに基づく設計手法を用いて満足させることは困難である。これに対して、方向転換層を備える太陽電池セルの設計は、光吸収効率を向上させるための設計が容易であることが理解される。

[0120] ここで、図1 8 (a)において、仮に方向転換層5 3がグレーティングカプラと同様の機能を果たしていると仮定した場合について検討する。光ビー

ムLBが照射されていない領域E7に空気領域53a及び半導体領域53bを含む周期構造が形成されていると、漏れモードへの結合によって、光吸収部52から光ビームLBの照射側及びガラス基板51側への光の漏れが生じると考えられる。この予想を確認するための検討を行った。すなわち、光ビームLBが照射されていない領域E7にも周期構造を形成した太陽電池セルについて、光ビームLBの照射側及びガラス基板51側へ光が漏れる現象の有無について確認した。

[0121] 図18(b)では、光ビームLBが入射されてから54.7フェムト秒後の電磁界分布を示している。この解析では、図16に示された方向転換層53の光ビームLBが入射される面の全領域に、周期構造が設けられている。光ビームLBは、周期数が5の領域の幅E6と同じ幅の範囲に照射された。光ビームLBの波長は800nmである。図18(b)を参照すると、光吸収部52を示す領域L9から電磁界が外に漏れる現象は確認されなかった。これは、光進行方向を変える方向転換層53には、グレーティングカプラのような漏れモードが関与していないことを示している。即ち、方向転換層53では式(9)の π 位相シフトによって、通常のグレーティングカプラとは異なる作用が働いていることを示している。なお、方向転換層53は光吸収部52と強く結合しているので、光吸収部52に沿って進む光は方向転換層53の周期構造によって反射される。

[0122] 図18(b)に示された解析結果では、ガラス基板51への光透過率は4.2%であった。図18(a)の場合と比較してガラス基板51への光透過率は微減した。光ビームLBの照射側への光反射率は7.0%であった。図18(a)の場合と比較して光ビームLBの照射側への光反射率は増加した。光吸収部52における光吸収効率は87.1%であった。図18(a)の場合と比較して光吸収部52における光吸収効率は減少した。この光ビームLBの照射側への光反射率の増加は、光ビームLBが照射されている領域で生じている。光入射領域以外の領域E7における漏れモードの影響は少ない。むしろ、光ビームLBが光吸収部52に沿って進む光に変換された後、非

励起領域における表面の周期構造により反射を受け、光が入射する領域に戻り、入射光に対して反対に進む反射光が増加していることを示している。これは、方向転換層 53 が備える周期構造と光吸収部 52 とが強く結合した状態では、グレーティングを摂動として扱うグレーティングカプラとは著しく異なる状況が生じていることを示す。従って、方向転換層を備える太陽電池セルの設計は、グレーティングカプラの概念を適用した構造の設計と比較して、光吸収効率を向上させるための設計が容易であることがさらに理解される。

[0123] 図 19 は、太陽電池セル 50 の他の解析結果を説明するための図である。図 19 は、光吸収部 52 における光吸収効率、光反射率及び光透過率の波長依存性を示す。グラフ G g 1 は光吸収部 52 と方向転換層 53 との合計光吸収効率を示す。グラフ G g 2 は光吸収部 52 における光吸収効率を示す。グラフ G g 3 は光反射率を示す。グラフ G g 4 は光透過率を示す。なお、グラフ G g 2 は光吸収部 52 における光吸収効率を示す。グラフ G g 1 は光吸収部 52 の光吸収効率に方向転換層 53 における光吸収効率を加えた合計光吸収効率である。図 19 において 600 nm よりも長い波長帯域で確認される周期的な特性の変化は、光吸収部 52 内における多重反射によるものである。また、600 nm より短い波長帯域で周期的な変化が生じていないのは、光吸収部 52 の光吸収係数が 10^5 cm^{-1} 以上と非常に大きく且つ方向転換層 53 を有するので、光吸収部 52 内の光吸収が増大して多重反射が生じないためである。

[0124] また、照射される光の波長が 800 nm として設計した方向転換層 53 では、およそ 650 nm から 950 nm 程度の波長帯域において、光吸収部 52 における光吸収効率が増大する。この波長帯域では式 (9) に基づいて計算した位相差は $1.24\pi \sim 0.85\pi$ である。これは、光吸収部 52 に沿った周期的な位相変化が、 π から 15% ~ 25% 程度変化しても、方向転換層 53 が有効に機能することを示している。

[0125] 図 20 は第 7 実施形態に係る太陽電池セル 50 の他の解析結果を説明する

ための図である。図2は、方向転換層53の厚さ h と光吸収効率との関係、方向転換層53の厚さ h と光反射率との関係、及び方向転換層53の厚さ h と光透過率との関係を示している。ここでは、方向転換層53は、空気領域53aと半導体領域53bとを備えている。半導体領域53bの屈折率は $4.23 + 0.10i$ に設定した。このような方向転換層53は、光吸収部52を介してガラス基板51の上に設けられている。また、方向転換層53における空気領域53a及び半導体領域53bの配列周期 D は 300 nm に設定した。また、入射光は、TM波であり、周期数が5の領域の幅と同じ範囲に照射した。グラフGh1、Gh2は光吸収効率を示し、グラフGh3は光反射率を示し、グラフGh4は光透過率を示す。なお、グラフGh1は光吸収部52における光吸収効率を示す。グラフGh2は光吸収部52の光吸収効率に方向転換層53における光吸収効率を加えた合計光吸収効率である。

[0126] グラフGh1、Gh2を確認すると、厚さ h が 125 nm であるとき、光吸収効率が最大になった。このとき、空気領域53aを透過した入射光と、半導体領域53bを透過した入射光との位相差は π であった。この結果により、方向転換層53の厚さ h を式(2)又は式(9)から得られる値に設定することにより、入射光を光吸収部52の主面に沿った方向に波面の位相差 π を有する光に変換することができることがわかった。なお、厚さ h が 125 nm よりも大きい領域では、方向転換層53において吸収される光が増加した。そのために、厚さ h が 125 nm よりも大きい領域において、光吸収効率が減少する程度が緩やかになった。

[0127] 図21は第7実施形態に係る太陽電池セル50の他の解析結果を説明するための図である。図21は、方向転換層53の周期数と光吸収効率との関係、方向転換層53の周期数と光反射率との関係、及び、方向転換層53の周期数と光透過率との関係を示している。入射光はTM波に設定した。入射光は、方向転換層53の上方 200 nm の位置から方向転換層53に照射された。さらに、入射光が照射される幅は、周期数が1～12の領域の幅と同じになるように設定された。グラフGi1、Gi2は光吸収効率を示す。グラ

フ $G_i 3$ は光反射率を示す。グラフ $G_i 4$ は光透過率を示す。なお、グラフ $G_i 1$ は光吸収部 52 における光吸収効率を示す。グラフ $G_i 2$ は光吸収部 52 の光吸収効率に方向転換層 53 における光吸収効率を加えた合計光吸収効率を示す。

[0128] グラフ $G_i 1$ 、 $G_i 2$ を確認すると、入射光の幅が、周期数が 6 の領域の幅を超えると光吸収効率は飽和する傾向を示した。これは、光吸収部 52 における光のコヒーレント長さが、周期数が 6 の領域の幅と同じ略長さであり、この程度の周期数であっても定在波の形成に寄与していることを示している。即ち、方向転換層 53 では、周期数が 5 ～ 6 程度の幅が 1 つの単位となって定在波の形成に寄与している。この効果によれば、例えば方向転換層 53 の全領域の一部に不完全な部分が形成されているときであっても、入射光の進行方向を転換し、太陽電池セル 50 の光吸収効率を向上させることができる。また、太陽電池セル 50 に入射する入射光はインコヒーレントであり、位相の揃った平面波として入射する入射光の幅は限定される。このような入射光であっても、方向転換層 53 を形成することにより、太陽電池セル 50 の光吸収効率をさらに向上させることができる。なお、アモルファスシリコン及び微結晶シリコンを含む光吸収部 52 における平均の光吸収係数は $\alpha = 4300 \text{ cm}^{-1}$ である。これによれば、光吸収部 52 の内部において光強度が $e^{-\alpha L} = e^{-1} = 0.37$ に減少する長さ L は $2.3 \mu\text{m}$ である。これは導波モードのコヒーレンス長さが $2 \mu\text{m}$ 程度に短くなった状態である。光吸収部 52 では光が吸収されるために、導波モードが短い距離で減衰し、導波モードの伝搬係数 β に広がりが生じる。なお、伝搬係数 β を波数 ($2\pi/\lambda$) により除した値は実効屈折率 N_{eff} である。

[0129] <第 8 実施形態>

次に、第 8 実施形態について説明する。第 8 実施形態に係る太陽電池セルは、ガラス基板 51、ガラス基板 51 上に形成された 1 層の光吸収部 52 であるシリコン薄膜、及び方向転換層 53 からなる。従って、第 8 実施形態に係る太陽電池セルは、光吸収部 52 が 1 層のシリコン薄膜層からなる点で、

第7実施形態に係る太陽電池セル50と相違する。すなわち、本実施形態の太陽電池セルは、光吸収部52を構成するシリコン薄膜の光入射面上に、方向転換層53を構成する周期構造を有する。

[0130] そして、方向転換層53を有する第8実施形態に係る太陽電池セルの特性の解析を、方向転換層53を持たない比較例と比較しつつ行った。

[0131] まず、ガラス基板上にシリコン薄膜のみを形成した比較例における光学特性をFDTDを用いて解析した。図22(a)は、比較例の解析結果を説明するための図であり、光吸収効率、光反射率及び光透過率を計算により解析した結果を示す。グラフGj1は光吸収効率を示す。グラフGj2は光反射率を示す。グラフGj3は光透過率を示す。なお、この比較例におけるシリコン薄膜の厚さは425nmである。図22(a)を確認すると、500nmから600nmまでの波長帯域では入射光のおよそ40%が反射され、入射光のおよそ60%程度がシリコン薄膜において吸収された。さらに、600nm以上の波長帯域における光多重反射による周期的な特性変化が確認された。

[0132] 次に、方向転換層を有しない同様な比較例に係る構造体を製作し、光吸収効率、光反射率、及び光透過率を評価した。構造体は、シリコン薄膜をガラス基板上にスパッタ法により形成することにより製造した。このシリコン薄膜の厚さは500nmである。成膜条件は、圧力が1.4mTorrであり、アルゴンガスの流量が1分間あたり13cc(13sccm)であり、RFパワーが450Wである。なお、シリコン薄膜の成膜には、スパッタ法の他に、プラズマCVD法を用いることもできる。

[0133] 図22(b)は、このようにして製造した比較例の光学的特性を説明するための図であり、光吸収効率、光反射率及び光透過率を測定した結果を示す。グラフGj4は光吸収効率を示す。グラフGj5は光反射率を示す。グラフGj6は光透過率を示す。図22(b)を参照すると、500nmから600nmまでの波長帯域では入射光のおよそ40%が反射され、入射光のおよそ60%がシリコン薄膜において吸収された。一方、600nm以上の波

長帯域では、光吸収効率が減少した。これは、シリコン薄膜内での光多重反射による周期的な特性変化を示しており、図22(a)の特性とよく一致している。

[0134] これに対して、図23は、第8実施形態に係る太陽電池セルの特性を説明するための図である。図23(a)は、太陽電池セルに対してTM波が入射されたときの特性の計算結果を示す。図23(b)は、太陽電池セルに対してTE波が入射されたときの特性の計算結果を示す。グラフGk1、Gk4は光吸収効率を示す。グラフGk2、Gk5は光反射率を示す。グラフGk3、Gk6は光透過率を示す。この計算においては、方向転換層53の厚さを式(9)に基づいて145nmに設定した。この厚さは、スパッタ法により作製された実物のシリコン薄膜の屈折率を実測した値により設定した。詳細には、実測したシリコン薄膜の屈折率は、波長800nmにおいて $3.767 + 0.052i$ であった。また、方向転換層53の配列周期を450nmに設定し、領域比を0.5に設定し、空気領域53aの下におけるシリコン薄膜の厚さを355nmに設定した。ここで、領域比は配列周期に占める半導体領域53bの幅の割合である。

[0135] 図23(a)及び図23(b)を参照すると、比較例の場合(図22(a))と比べて、方向転換層を有する第8実施形態に係る太陽電池セルは、光吸収効率が増大していることがわかった。特に、図23(a)に示すTM波では600nm以下の短い波長帯域で吸収が増大していた。一方、図23(b)に示すTE波では600nmより長い波長帯域における光吸収効率が増大していた。なお、図23(a)及び図23(b)に示された偏波依存性は、方向転換層そのものの特有の性質ではない。方向転換層の設計の仕方によって偏波特性が逆転する場合もある。

[0136] さらに、本実施形態に係る太陽電池セルを実際に製作して特性を評価した。図24は評価に使用した太陽電池セルを説明するための図である。図24は、方向転換層の周期構造を観察した写真である。この写真は、表面走査型電子顕微鏡を用いて光ビームLBの照射方向から周期構造を観察して得た。

この場合、シリコン薄膜を深さ方向に141nmだけエッチングして、方向転換層の周期構造を形成した。この周期構造の形成には、 CF_4/Ar 混合ガスを用いたICP-RIEエッチング法を用いた。方向転換層53の配列周期D5は440nmに設定し、領域比は0.34に設定した。領域比は配列周期に占める半導体領域53bの幅の割合である。なお、半導体領域53bの幅E8は150nmであり、エッチングされた溝である空気領域53aの幅E9は290nmである。

[0137] 図25は、図24に示された太陽電池セルの光学的特性の測定結果を示す図である。図25(a)はTM波による評価結果を示す。図25(b)はTE波による評価結果を示す。グラフGm1, Gm4は光吸収効率を示す。グラフGm2, Gm5は光反射率を示す。グラフGm3, Gm6は光透過率を示す。なお、図25(a)及び図25(b)において、900nm付近の波長帯域に確認される不規則な変動は、測定系の雑音である。

[0138] 図25(a)を参照すると、TM波の評価結果は図23(a)に示された解析結果と全体的な傾向が一致した。特に、光吸収効率が600nmの波長帯域から長い波長帯域側へと比較的ゆるやかに減衰する傾向が良く対応していた。また、比較例に係る測定結果である図22(b)と比較すると、方向転換層を有する第8実施形態に係る太陽電池セルの光吸収効率が、方向転換層を有しない比較例の光吸収効率を上回ることが確認された。さらに、図25(b)を参照すると、TE波の評価結果は図23(b)の解析結果と光吸収効率、光反射率及び光透過率の全体的な傾向が一致した。特に光吸収効率が700nm~800nmの波長帯域において増大する傾向が良く対応していた。また、図25(b)と、比較例に係る測定結果である図22(b)とを比較すると、方向転換層を有する第8実施形態に係る太陽電池セルの光吸収効率が、方向転換層を有しない比較例の光吸収効率を上回ることが確認された。このように、方向転換層を備えることにより太陽電池セルの光吸収効率を高めることができることがわかった。

[0139] 図25(a)と図25(b)とを比較すると、方向転換層を備えることに

より光吸収効率が増大される割合は、偏波によらず同程度の割合であった。これにより、偏波によらず、方向転換層の効果を好適に奏することができることがわかった。

[0140] さらに、別のサイズの方向転換層を有する太陽電池セルを製作して特性を評価した。この太陽電池セルは方向転換層の領域比が0.65であり、配列周期Dが480nmである点で、図24に示す太陽電池セルと相違する。図26は評価に使用した太陽電池セルを説明するための図である。図26は、方向転換層の周期構造を観察した写真である。この写真は、表面走査型電子顕微鏡を用いて光ビームLBの照射方向から周期構造を観察して得た。この場合、シリコン薄膜を深さ方向に141nmだけエッチングして、方向転換層53の周期構造を形成した。この周期構造の形成には、 Cl_2/Ar 混合ガスを用いたICP-RIEエッチング法を用いた。配列周期Dは480nmに設定され、領域比は0.65に設定した。なお、半導体領域53bの幅E10は310nmであり、エッチングされた溝である空気領域53aの幅E11は170nmである。

[0141] 図27は、図26に示された太陽電池セルの光学的特性の測定結果を示す図である。図27(a)はTM波による評価結果を示す。図27(b)はTE波による評価結果を示す。グラフGn1, Gn4は光吸収効率を示す。グラフGn2, Gn5は光反射率を示す。グラフGn3, Gn6は光透過率を示す。図27の(a)及び図27(b)を参照すると、TM波及びTE波の評価結果は、図23(a)及び図23(b)に示された解析結果と全体的な傾向が一致した。また、図27(a)及び(b)と、比較例に係る測定結果である図22(b)とを比較すると、方向転換層を有する第8実施形態に係る太陽電池セルの光吸収効率が、方向転換層を有しない比較例の光吸収効率を上回ることが確認された。さらに、領域比が0.34から0.65へ大きくなることにより、長い波長帯域側の光吸収効率が図25に比較して増大することがわかった。

[0142] <第1変形例>

本発明による太陽電池セルは、上述した実施形態及び実施例に限られるものではなく、他に様々な変形が可能である。上述した第1実施形態には、光吸収部13を構成するトップセル層13aとボトムセル層13bとは互いに接するように形成されている構成が例示されている。図28は第1実施形態に係る太陽電池セルの変形例を説明するための断面図である。図28に示されるように、本発明の太陽電池セル1Fはトップセル層13aとボトムセル層13bとの間に透明導電層15を備えていてもよい。

[0143] <第2変形例>

本発明に係る太陽電池セルが備える方向転換層は、太陽電池セル以外の光デバイスにも適用することができる。例えば、光検出器、フォトダイオードのような光吸収を基本とする光デバイスに適用することにより、光デバイスの効率を高めることができる。

[0144] <第3変形例>

本発明に係る太陽電池セルが備える方向転換層は、薄膜シリコン太陽電池セル以外の各種太陽電池セルに適用することができる。例えば、有機系薄膜太陽電池セル、色素増感太陽電池セル、及び各種の化合物半導体太陽電池セル等に適用することにより、光吸収効率を高めることができる。

[0145] <第4変形例>

本発明に係る太陽電池セルが備える方向転換層は、屈折率が互いに異なる第1の領域と第2の領域とを備えている構成が例示されている。方向転換層の屈折率は、上述したように方向転換層の入射面に沿って不連続に変化する場合だけでなく、連続的かつ周期的に変化していてもよい。例えば、このような構成を有する方向転換層は、半導体に不純物を拡散させる方法により製造することができる。

産業上の利用可能性

[0146] 本発明の太陽電池セルによれば、光の進行方向を転換することにより従来より薄い光吸収部でも光吸収効率を高め、量産性を高めることができる。

符号の説明

[0147] 1 A～1 F, 5 0, 1 0 0, 2 0 0…太陽電池セル、1 1, 4 1, 1 1 1, 2 1 1…ガラス板、1 2, 2 2, 3 2, 4 2, 5 3…方向転換層、1 2 a, 2 2 a, 3 2 a…透明導電領域、5 3 a…空気領域、1 2 b, 2 2 b, 3 2 b, 4 2 b, 5 3 b…半導体領域、1 2 p, 2 2 p 入射面、1 3, 2 3, 3 3, 4 3, 1 1 3, 2 1 3, 5 2…光吸収部、1 3 a, 2 3 a, 4 3 a, 1 1 3 a, 2 1 3 a…トップセル層、1 3 b, 2 3 b, 4 3 b, 1 1 3 b, 2 1 3 b…ボトムセル層、1 3 p, 1 4 p, 2 5 p, 4 1 p, 4 3 p, 4 4 p, 4 5 p…主面、1 4, 2 1, 2 4, 4 4, 1 1 4, 2 1 4…電極、1 5, 2 6, 4 5, 4 6, 4 7, 1 1 2, 2 1 2…透明導電層、2 5, 4 8…基材、4 2 c…微粒子、D, D 1, D 2, D 3, D 4, D 5, D 6…周期、G 1～G n 6…グラフ、L…入射光、L 1～L 6…領域、 n_{12a} , n_{12b} , n_{13a} , n_{13b} …屈折率、 λ …波長。

請求の範囲

- [請求項1] 光を吸収して光生成キャリアを発生する少なくとも一つの光吸収部と、
前記光吸収部の表面に沿った方向に前記光の進行方向を転換する少なくとも一つの方向転換層と、を備え、
前記方向転換層は、前記方向転換層に対して入射された前記光を、前記光吸収部の表面に沿った方向に波面の位相変化を有する光に変換することにより、前記光の進行方向を転換する太陽電池セル。
- [請求項2] 前記方向転換層は、第1の領域及び第2の領域を含み、
前記第1の領域及び前記第2の領域は、前記方向転換層に対して前記光が入射される側の面である入射面に沿って並設され、
前記第1の領域及び前記第2の領域は、互いに屈折率が異なる請求項1に記載の太陽電池セル。
- [請求項3] 前記方向転換層は、前記入射面に直交する方向の厚さが、前記第1の領域における屈折率、前記第2の領域における屈折率、及び前記光の波長に基づいて設定される請求項2に記載の太陽電池セル。
- [請求項4] 前記第1の領域及び第2の領域は、所定の周期に基づいて前記入射面に沿って配置されており、
前記所定の周期は、前記光吸収部における導波モードと前記方向転換層に対して入射された前記光との位相整合条件に基づいて設定される請求項2又は3に記載の太陽電池セル。
- [請求項5] 前記所定の周期は、前記光吸収部の実効屈折率及び前記方向転換層に対して入射された前記光の波長に基づいて設定される請求項4に記載の太陽電池セル。
- [請求項6] 前記第1の領域は導電性を有する電極である請求項2～請求項5のいずれか一項に記載の太陽電池セル。
- [請求項7] 前記光吸収部を複数備え、
前記複数の光吸収部のそれぞれは光吸収が行われる前記光の波長域

が互いに異なり、

前記複数の光吸収部は前記方向転換層の前記入射面と反対側の面に接して形成された請求項 2 ～請求項 6 のいずれか一項に記載の太陽電池セル。

[請求項 8]

前記光吸収部を複数備え、

前記複数の光吸収部のそれぞれは光吸収が行われる前記光の波長域が互いに異なり、

前記複数の光吸収部は前記方向転換層の前記入射面に接して形成された請求項 2 ～請求項 6 のいずれか一項に記載の太陽電池セル。

[請求項 9]

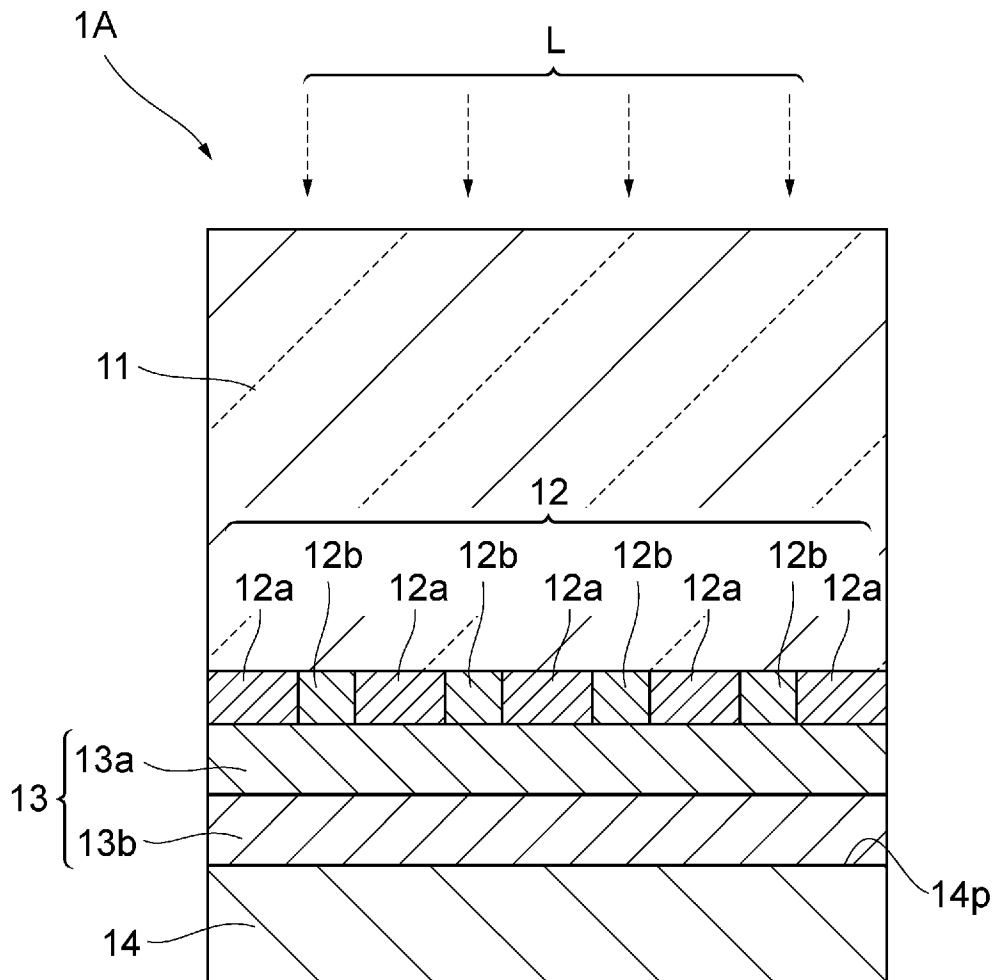
前記方向転換層を複数備え、

前記方向転換層のそれぞれは進行方向の転換が行われる光の波長域が互いに異なる請求項 7 または請求項 8 に記載の太陽電池セル。

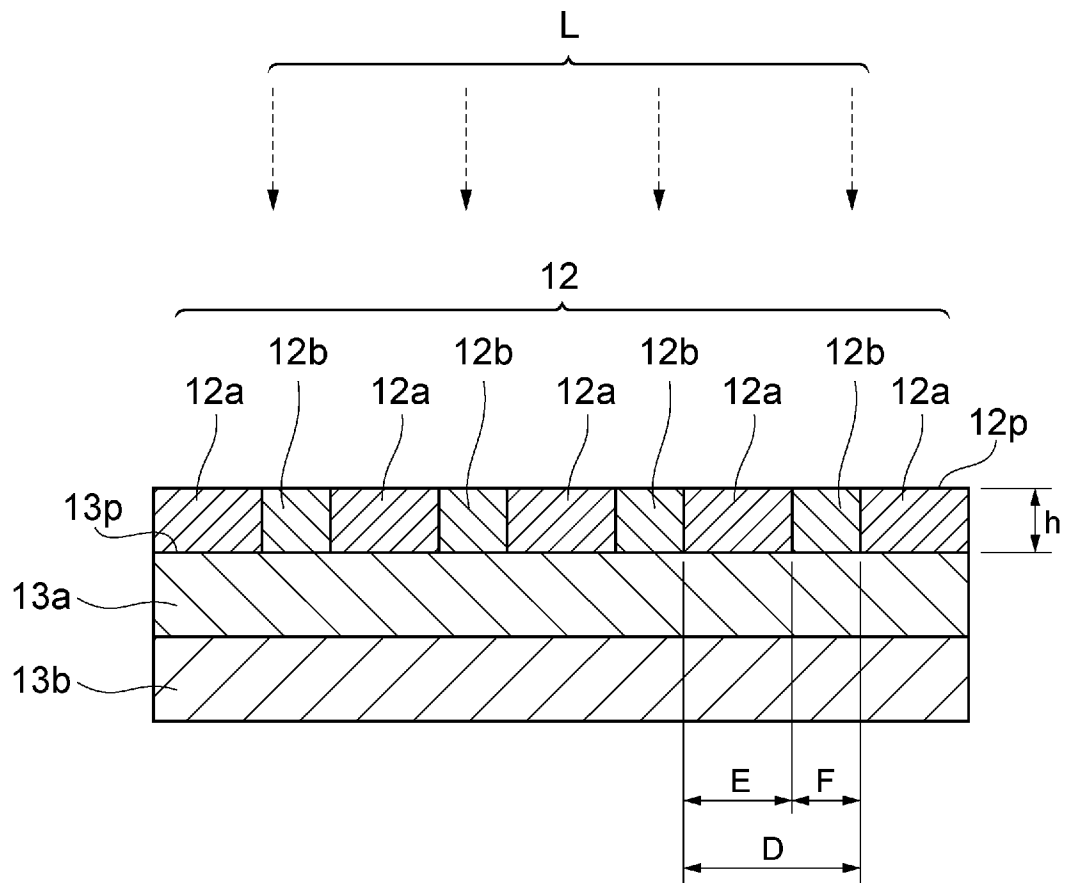
[請求項 10]

前記第 1 の領域は、前記入射面に沿った配列周期を変化させて配置された請求項 2 ～ 9 のいずれか一項に記載の太陽電池セル。

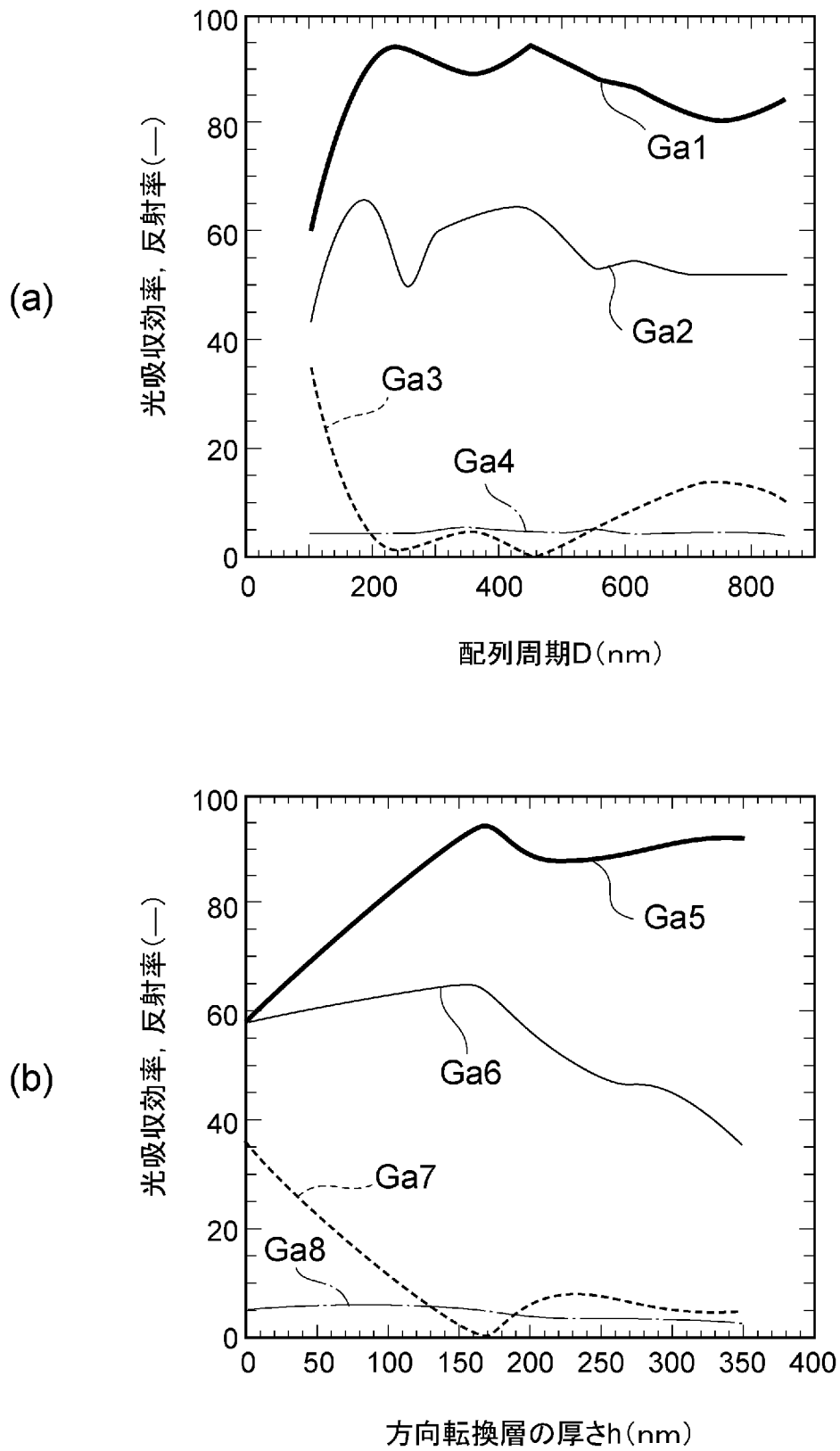
[図1]



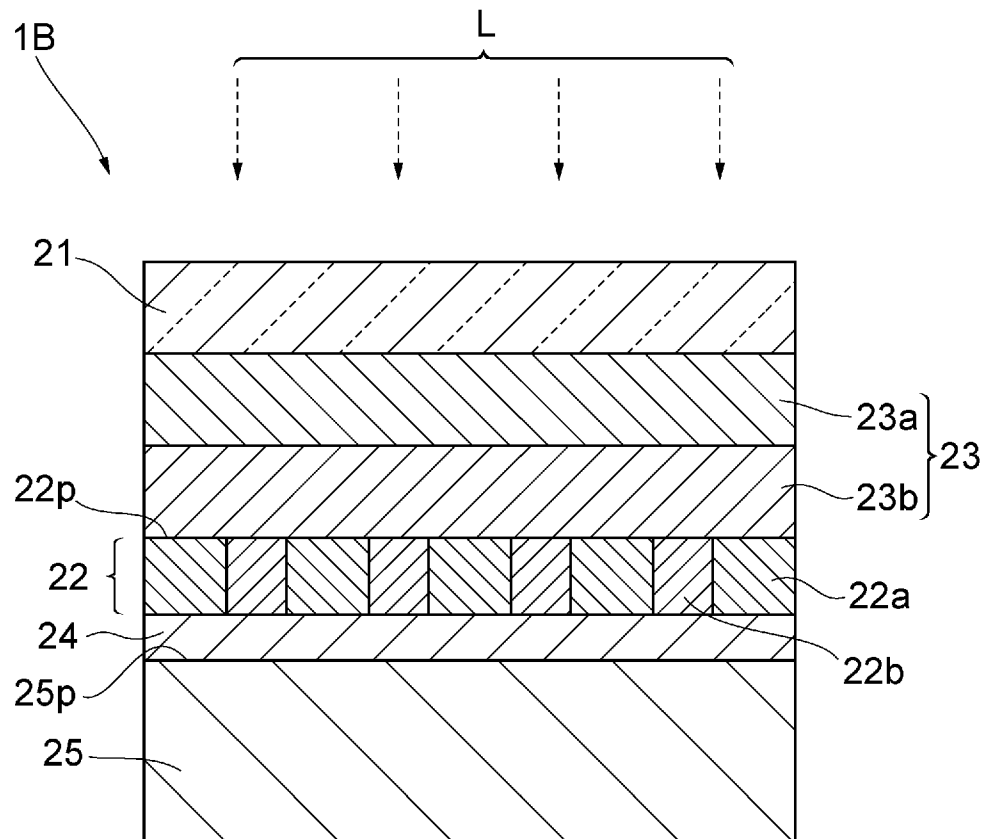
[図2]



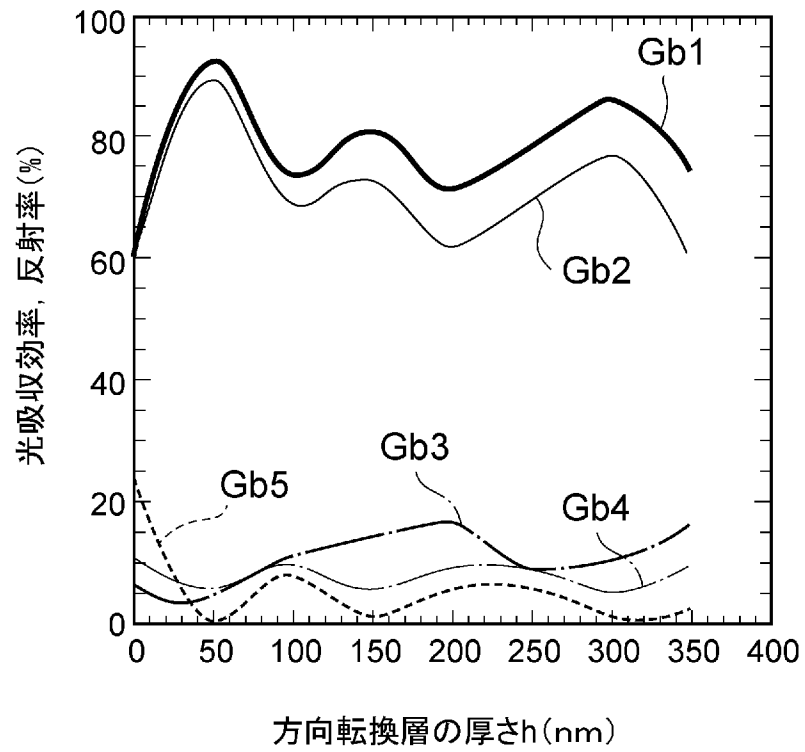
[図3]



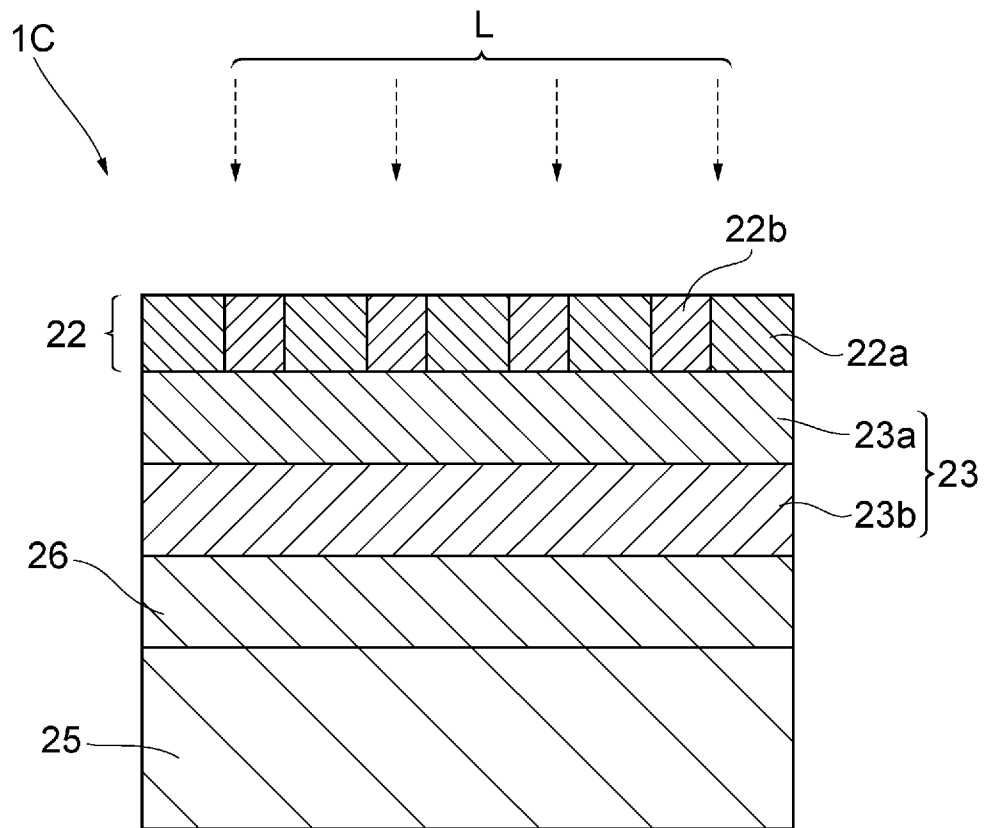
[図4]



[図5]

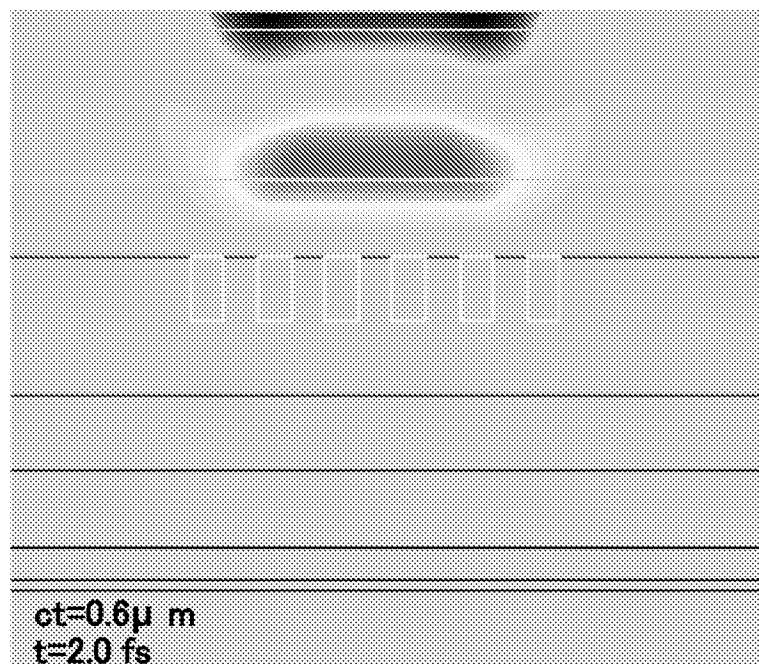


[図6]

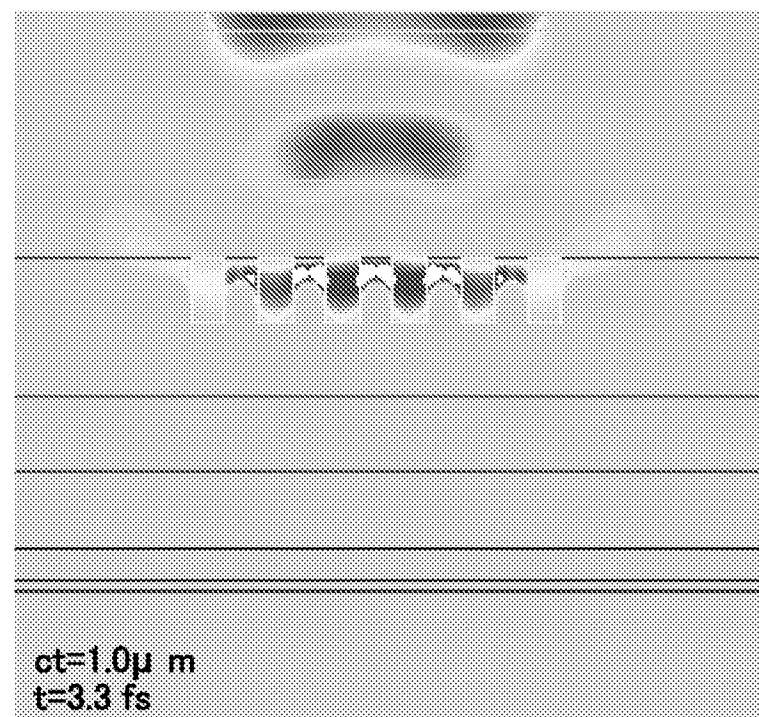


[図7]

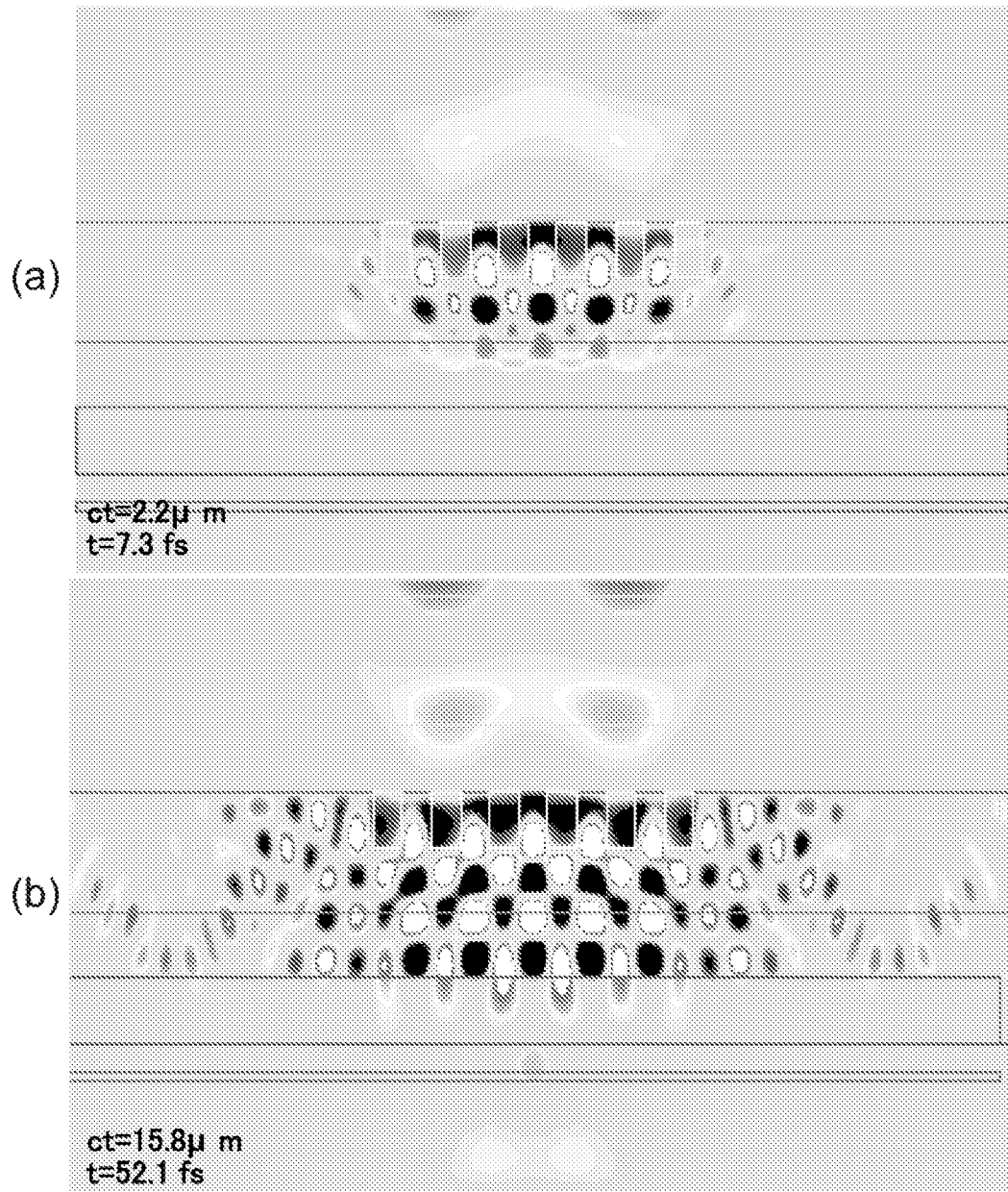
(a)



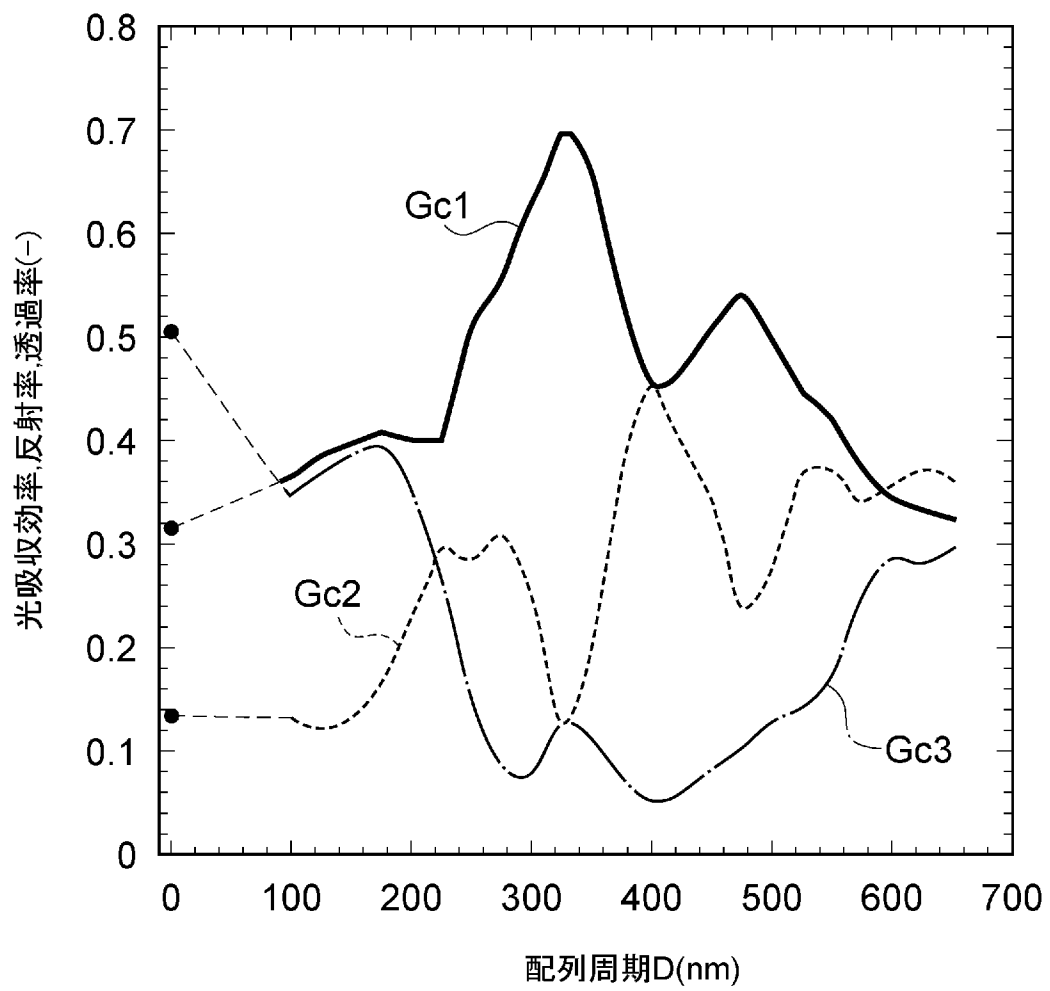
(b)



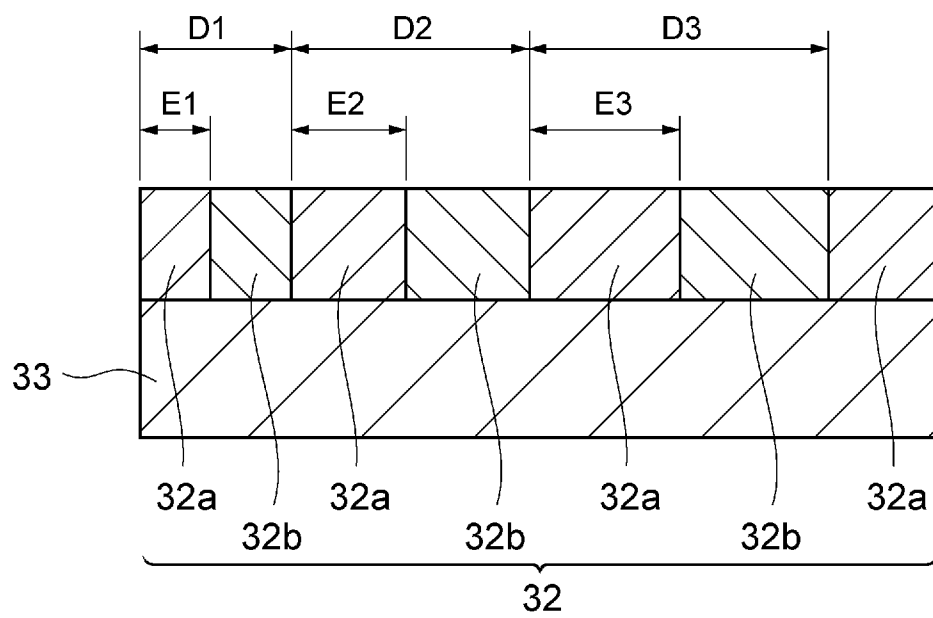
[図8]



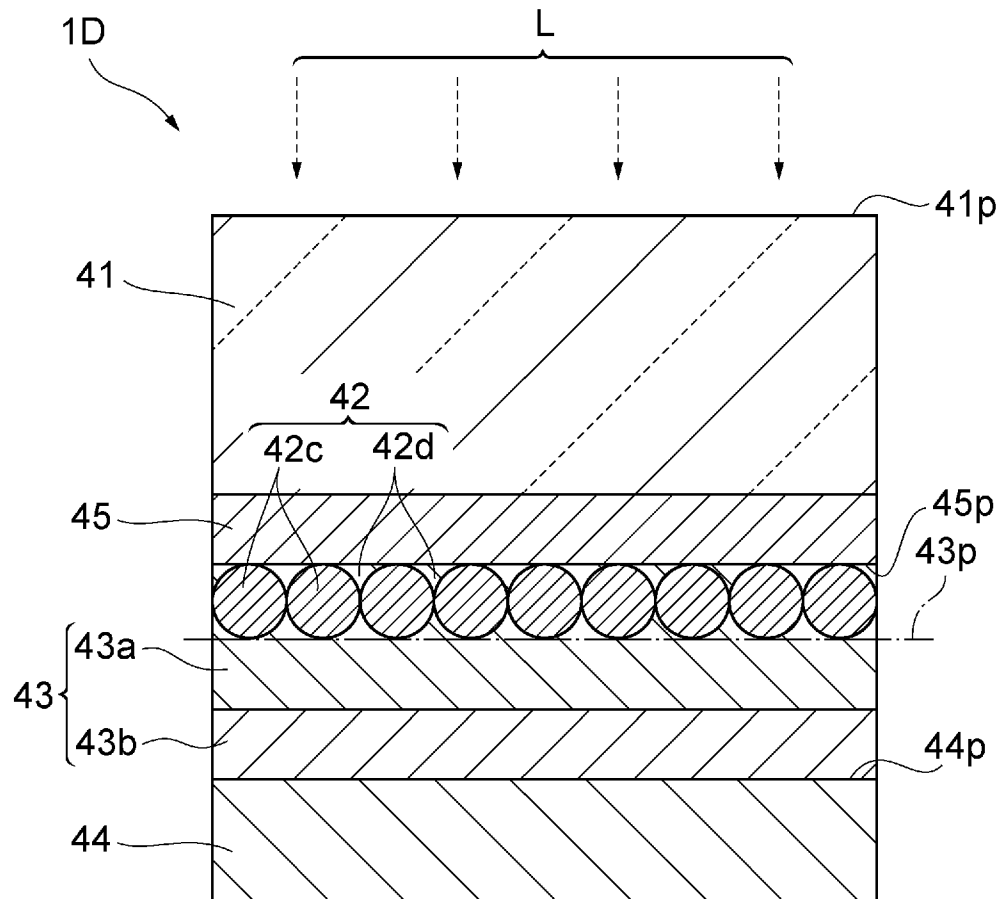
[図9]



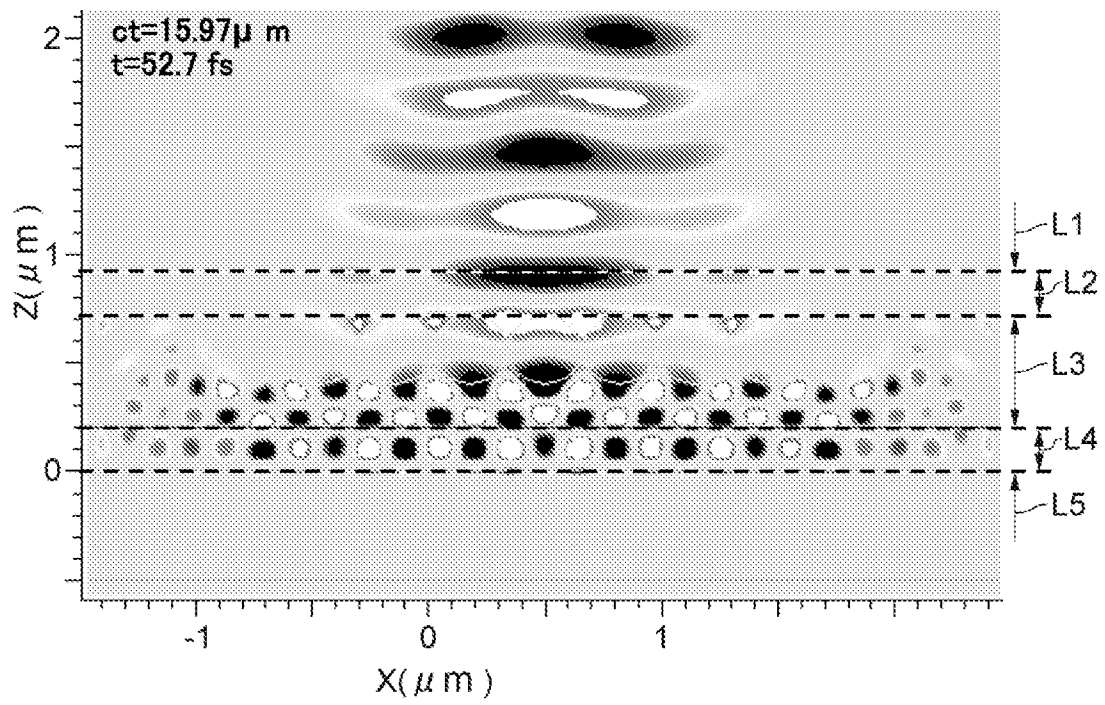
[図10]



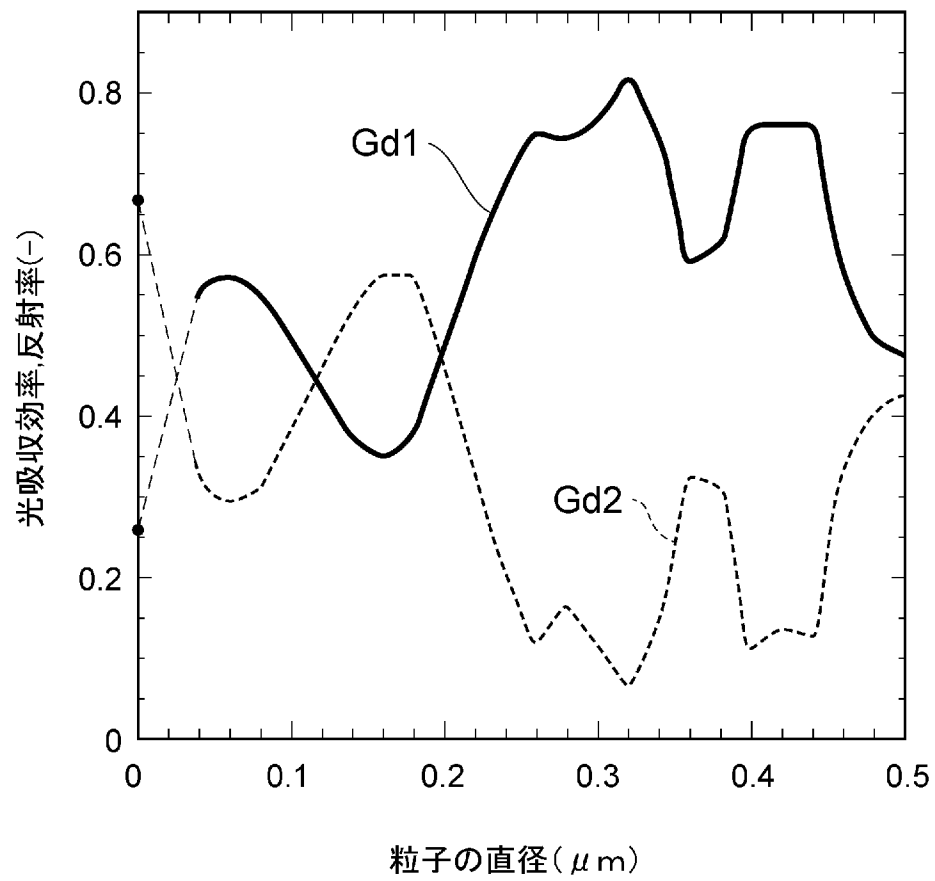
[図11]



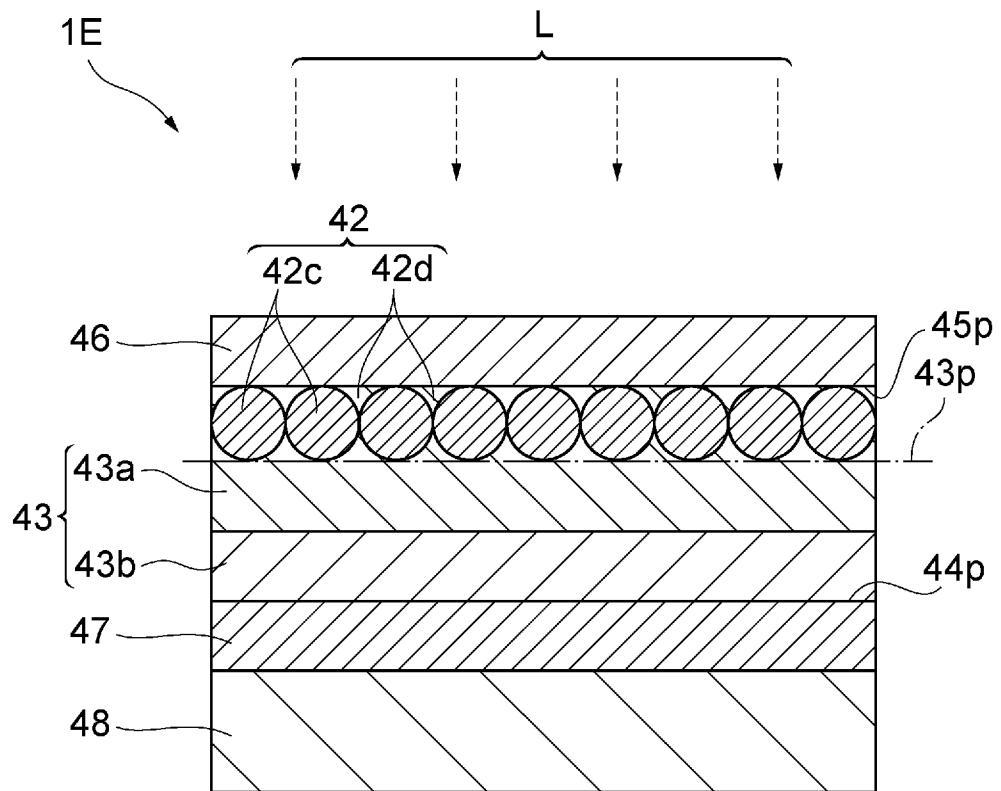
[図12]



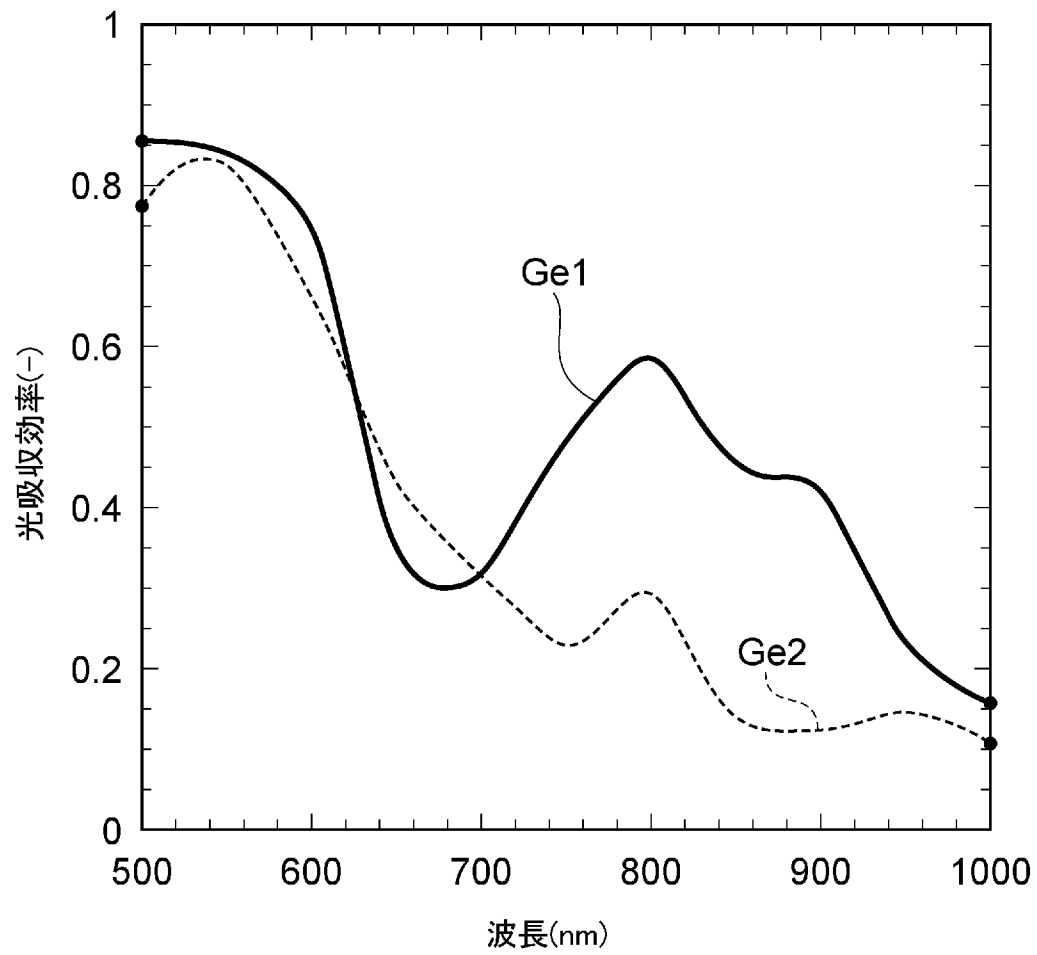
[図13]



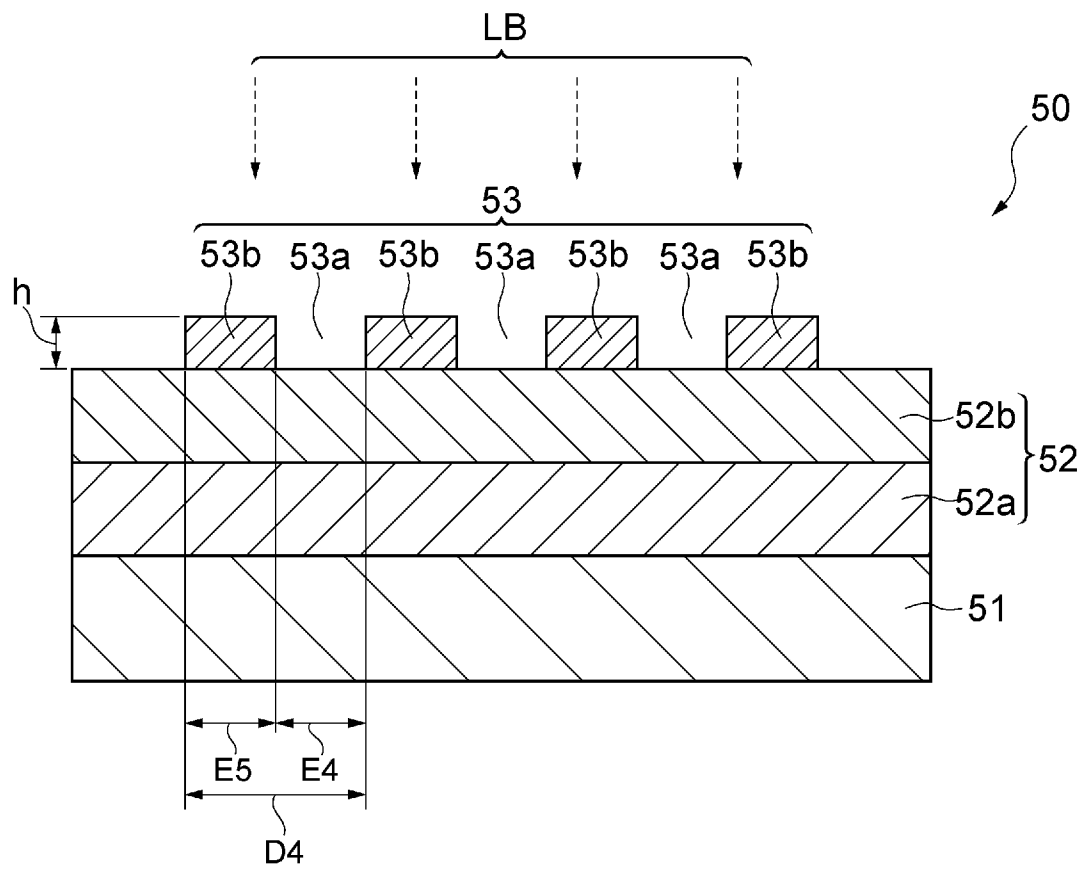
[図14]



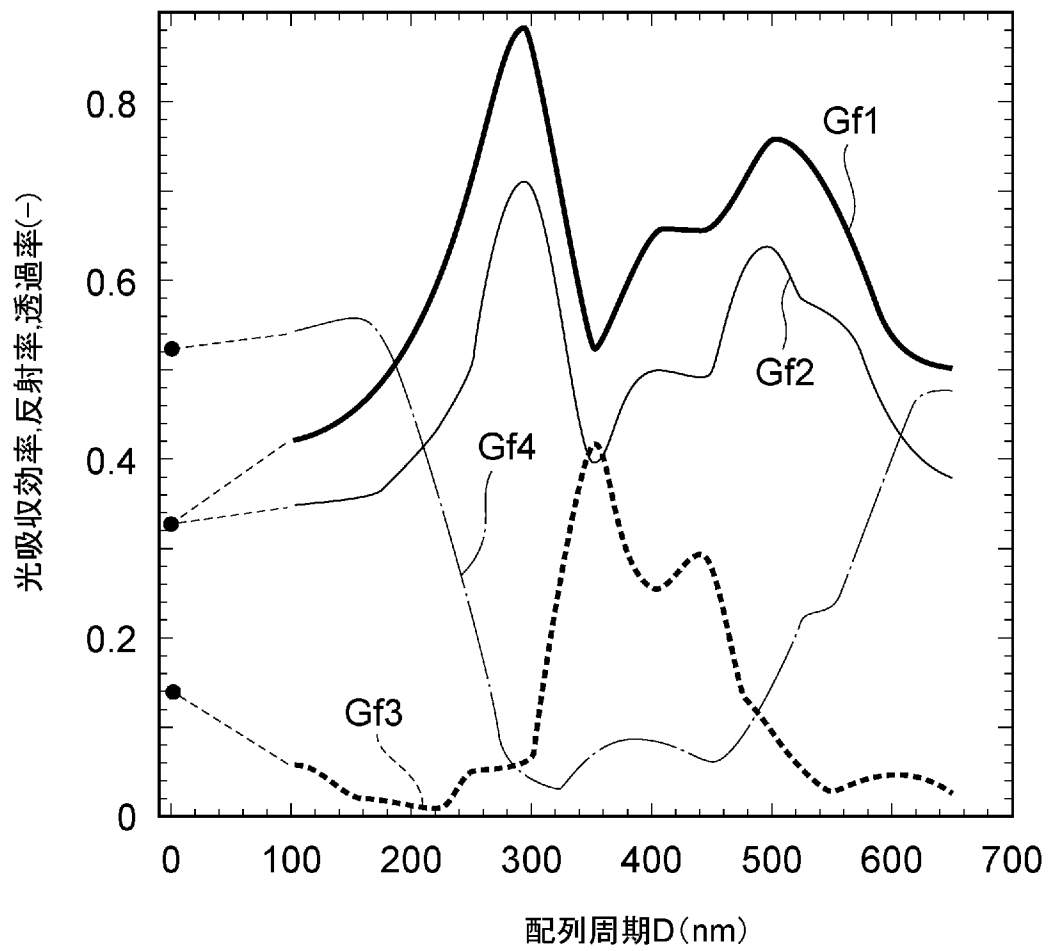
[図15]



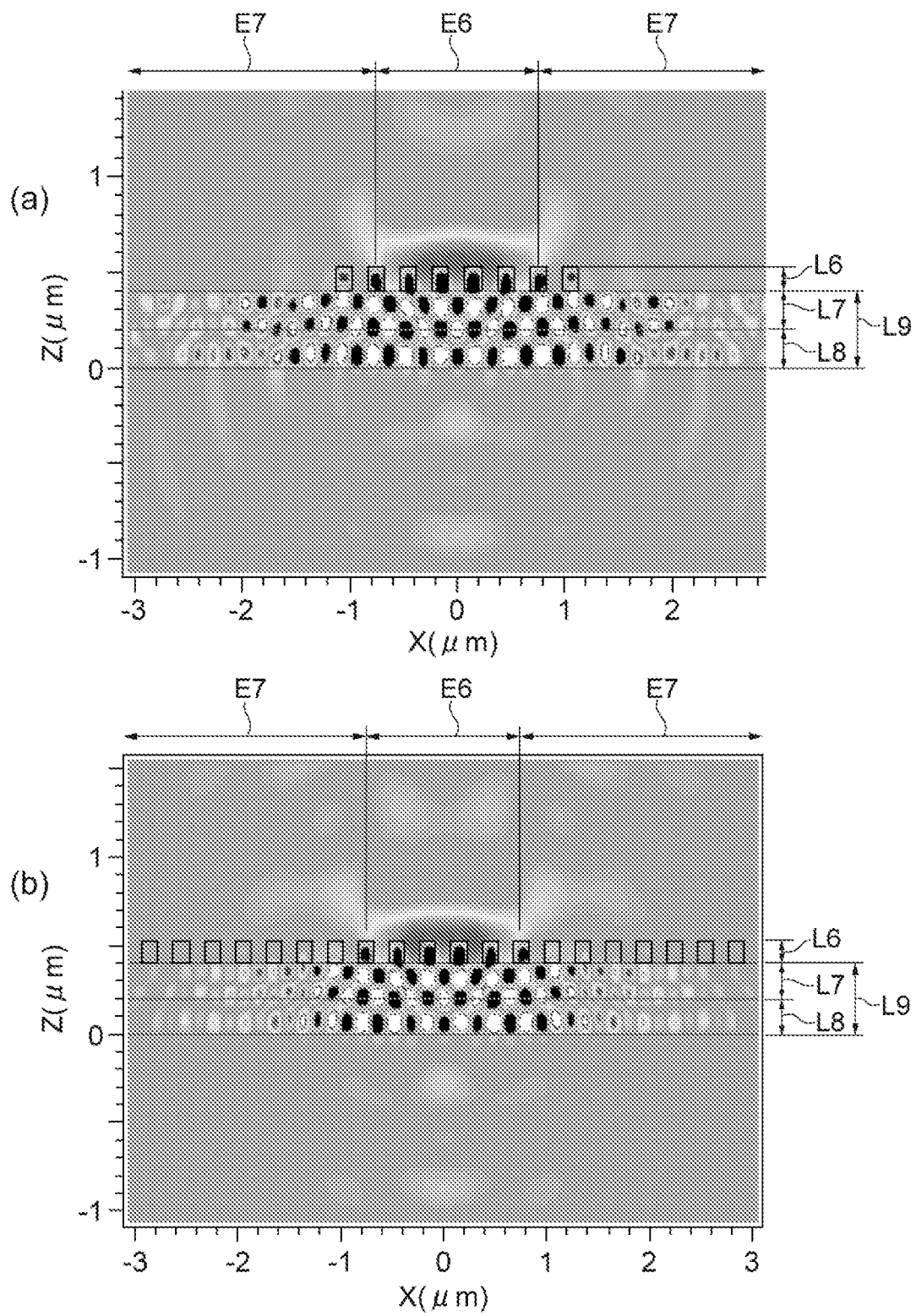
[図16]



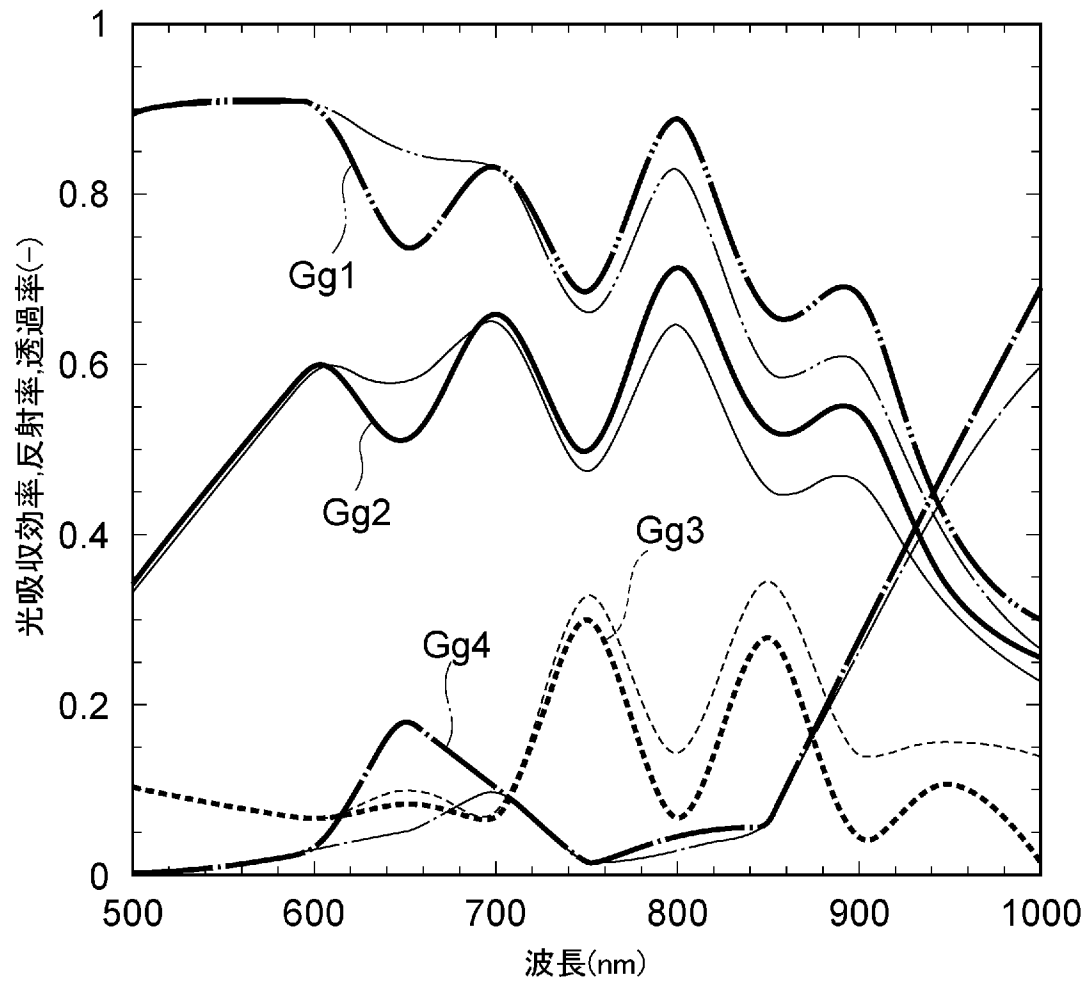
[図17]



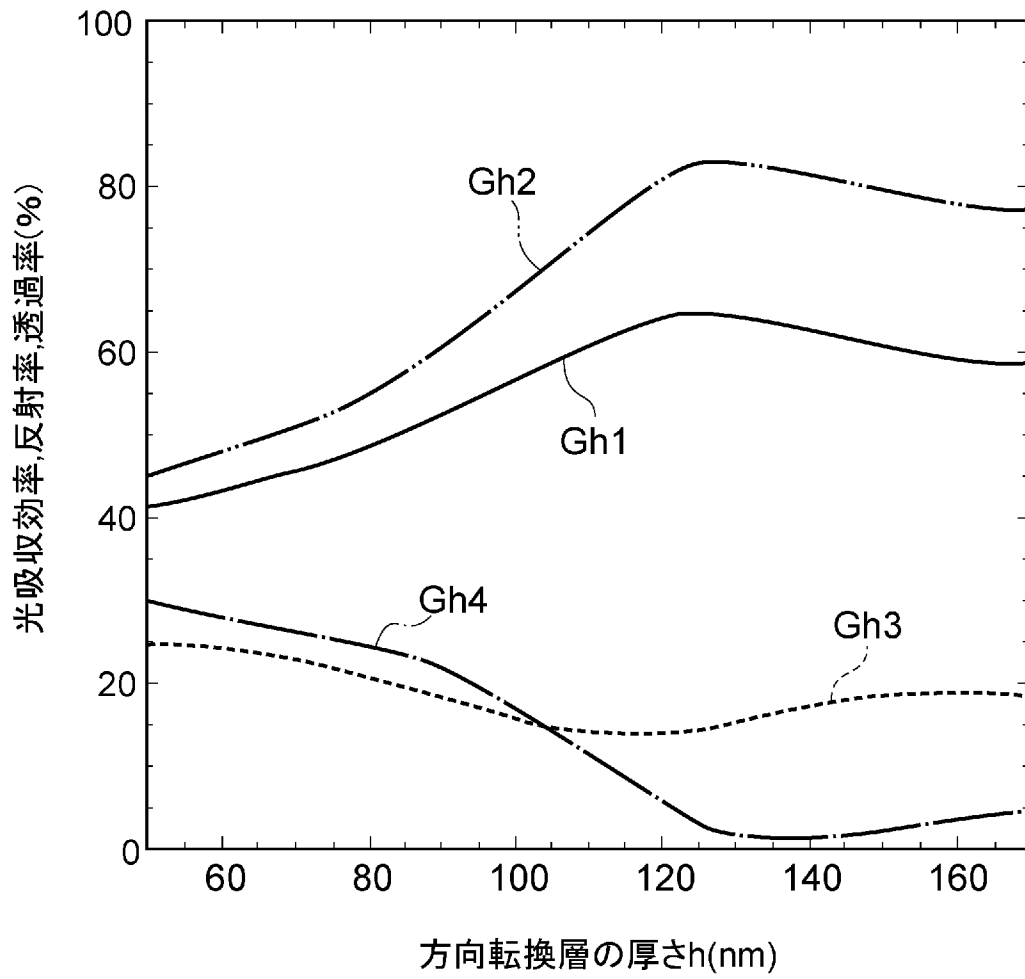
[図18]



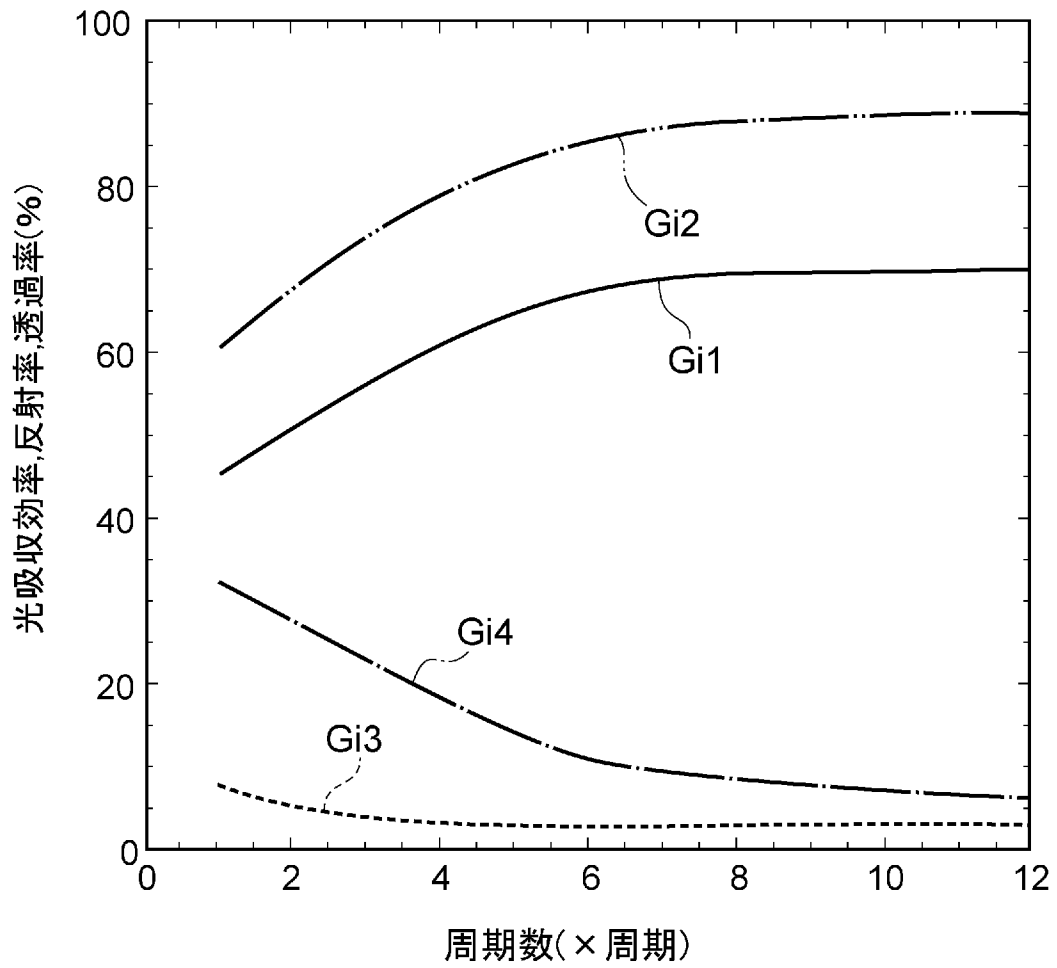
[図19]



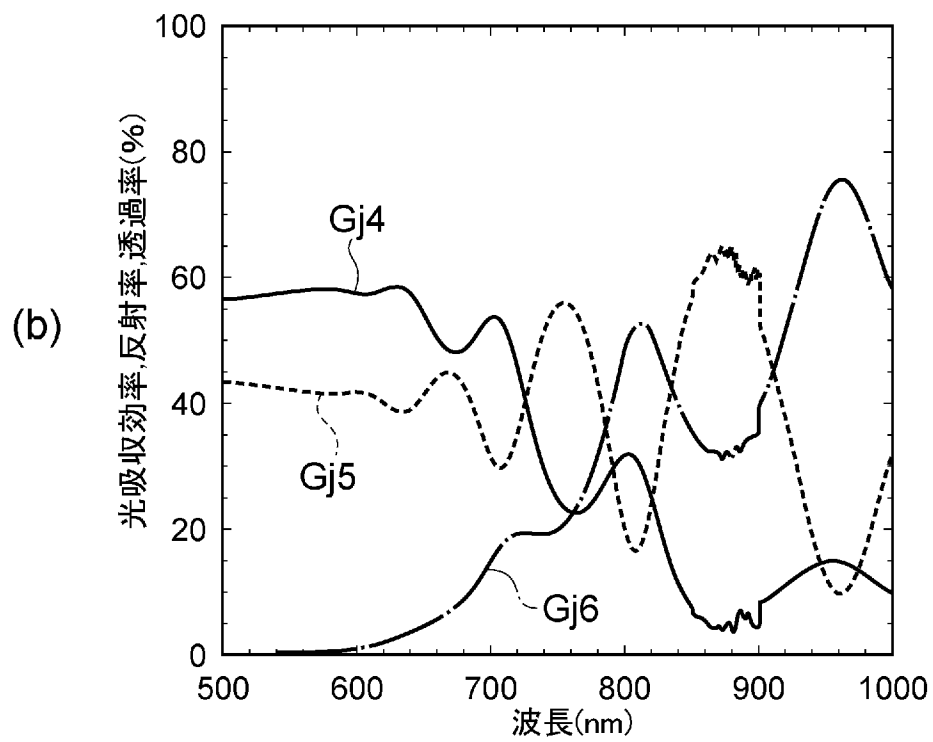
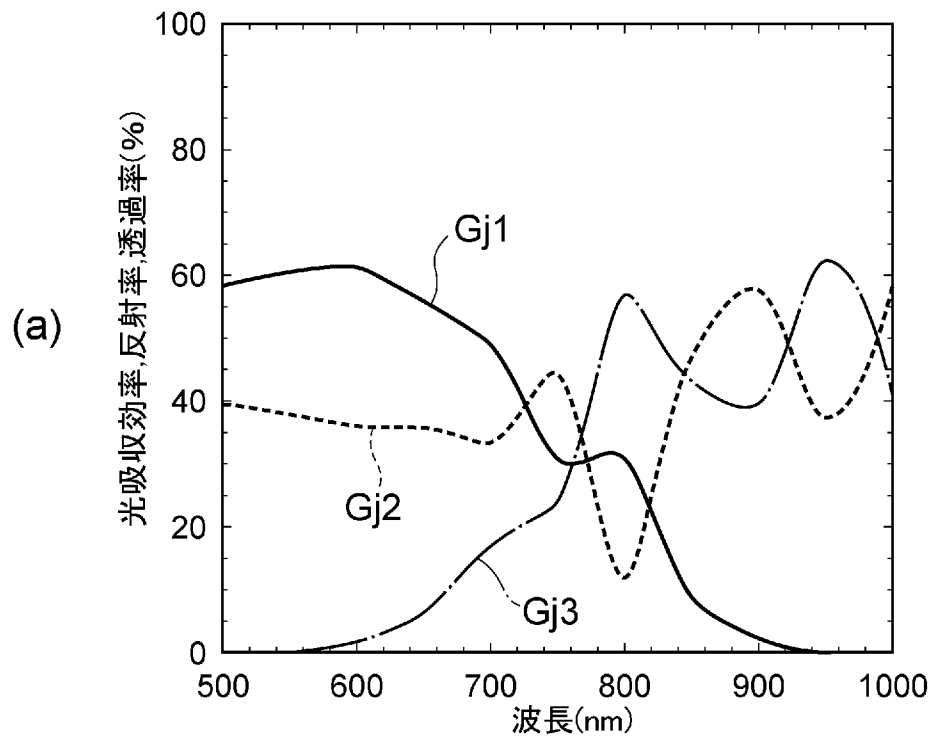
[図20]



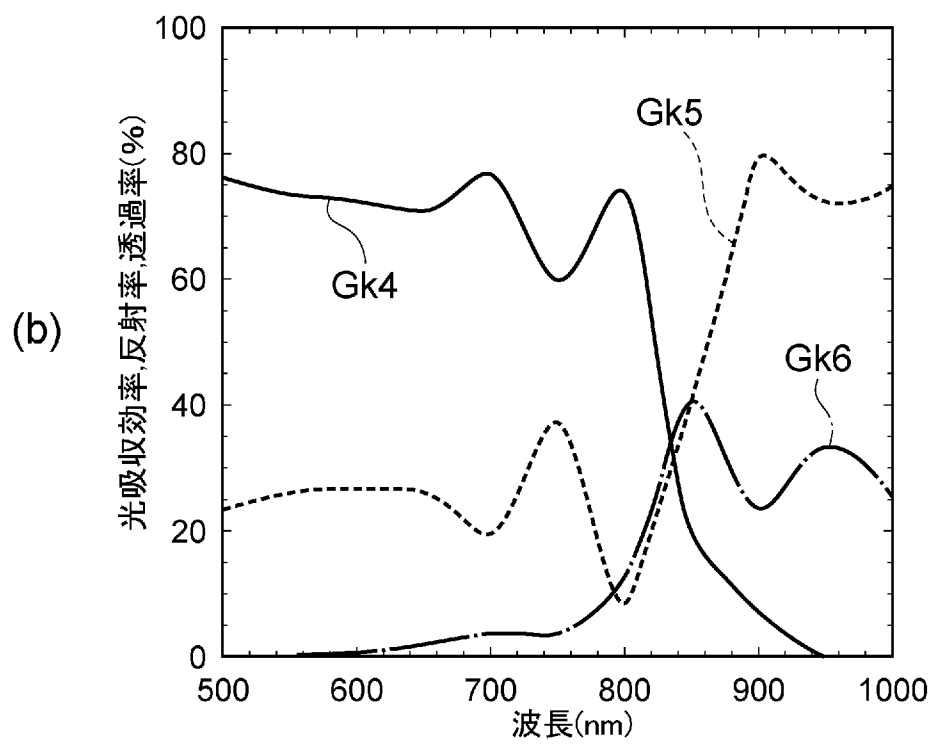
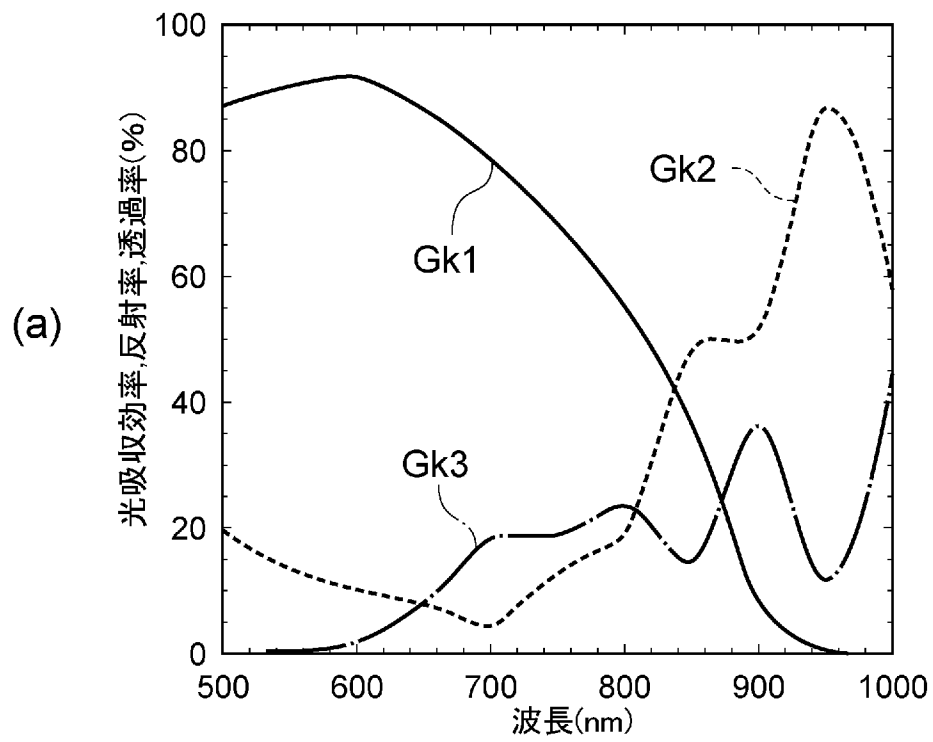
[図21]



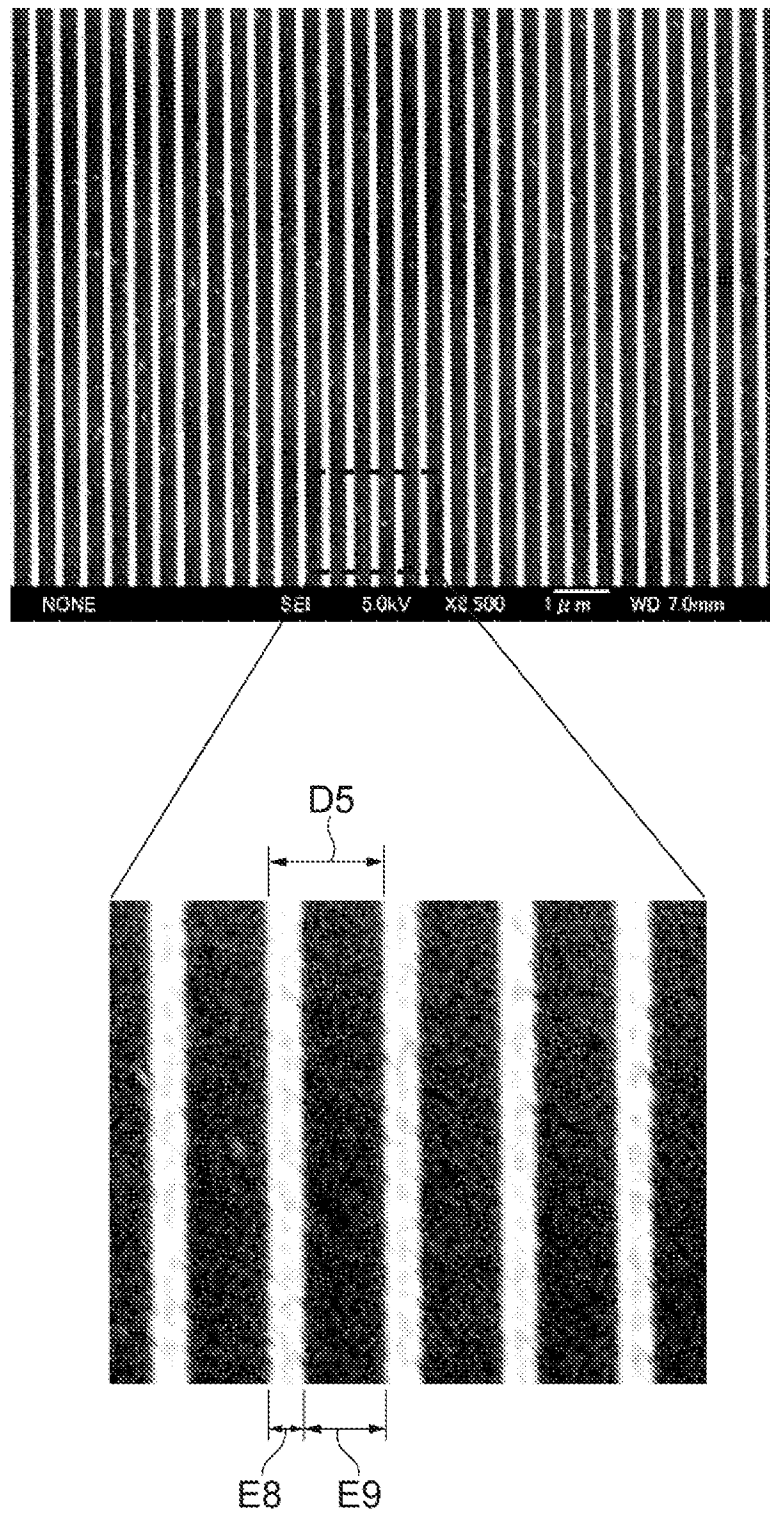
[図22]



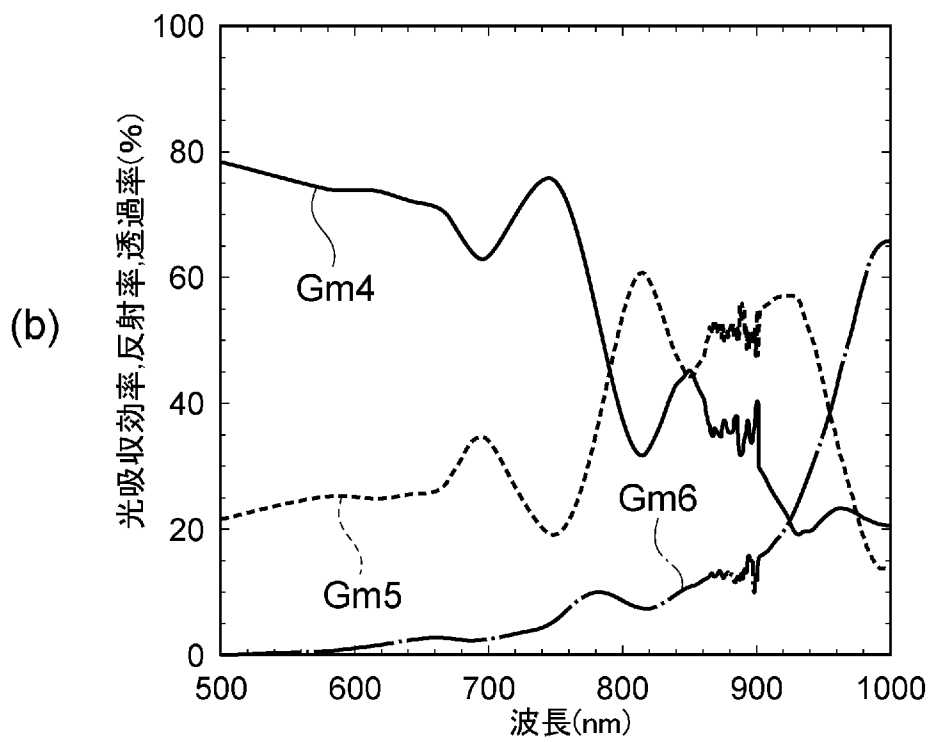
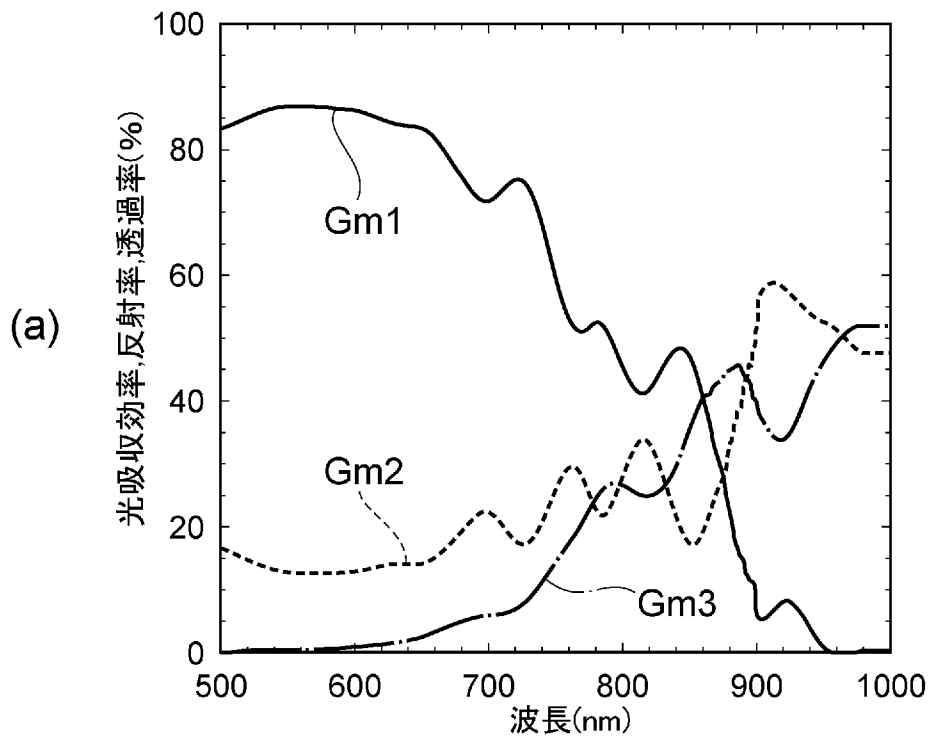
[図23]



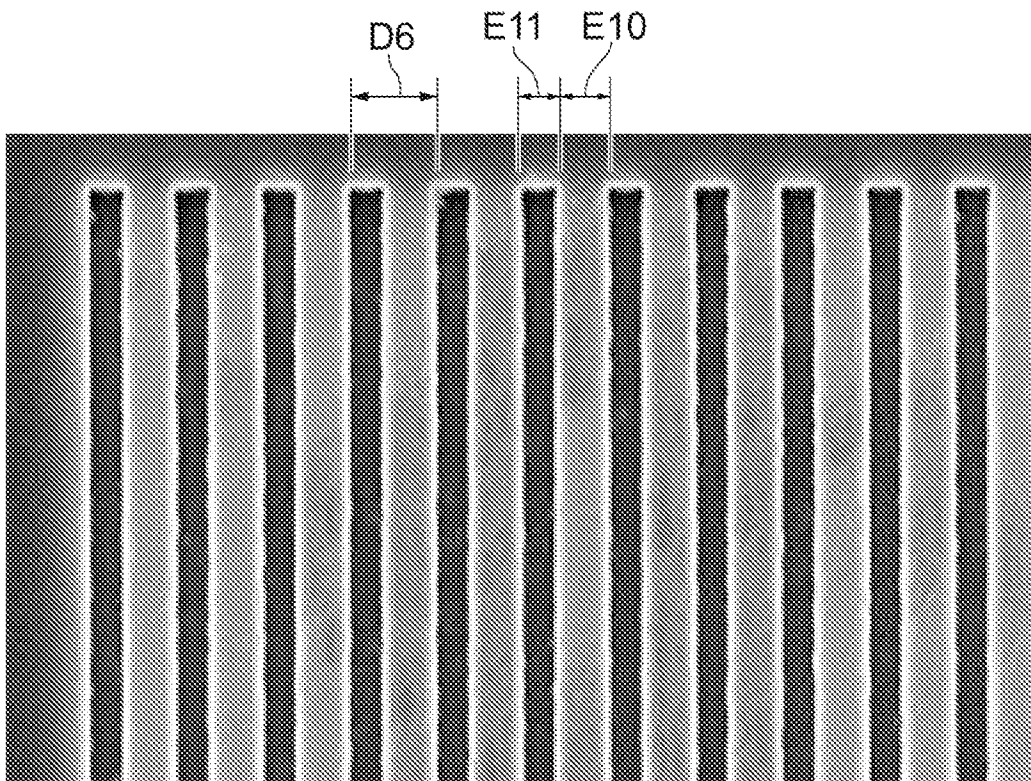
[図24]



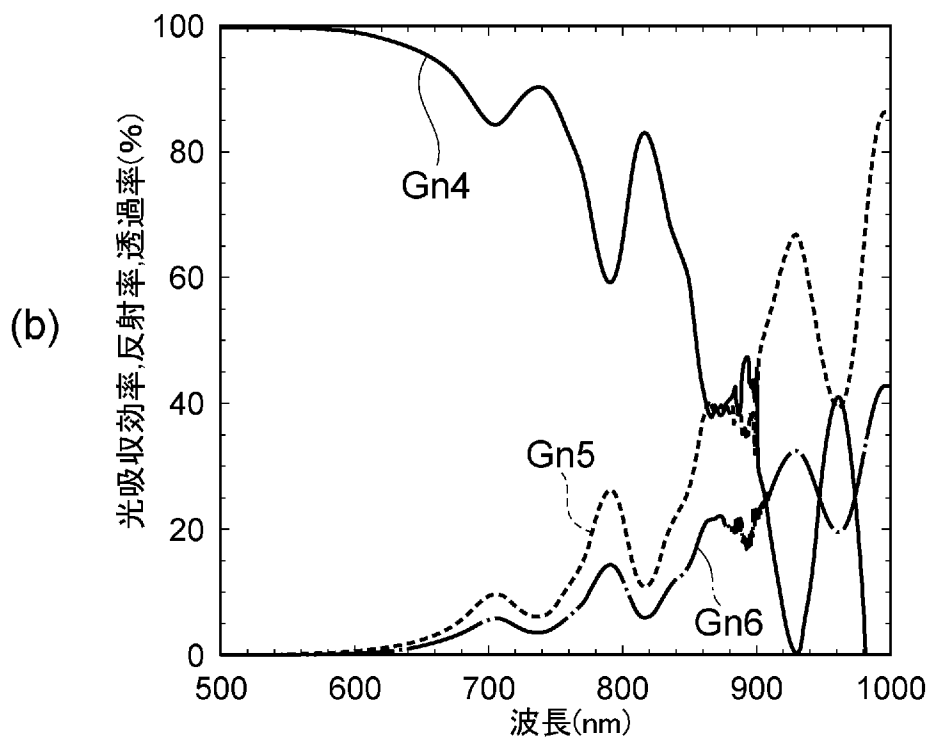
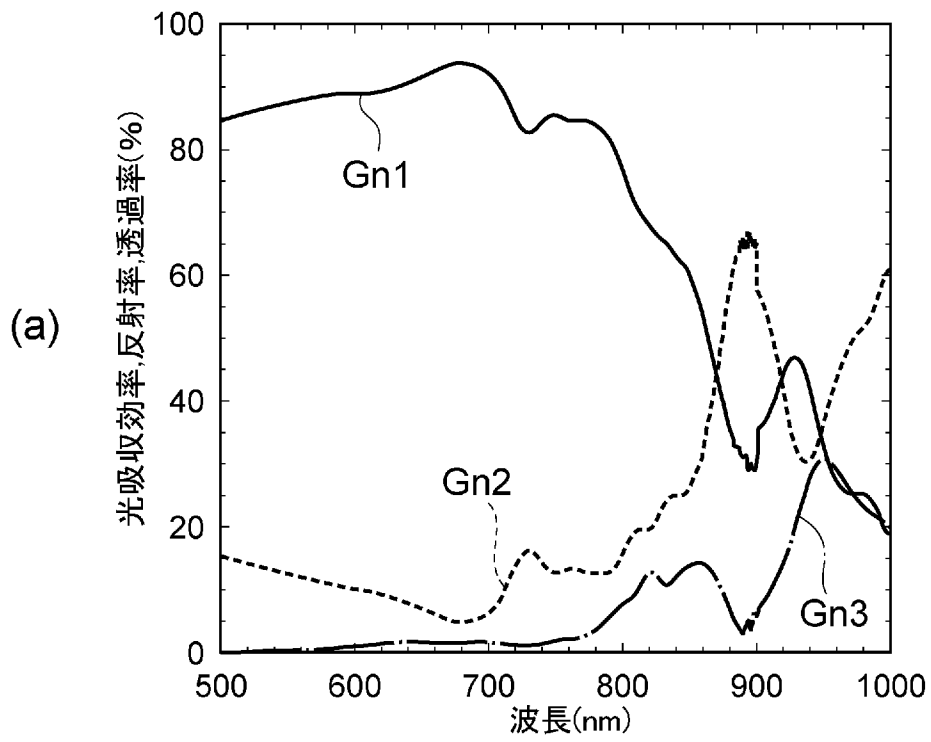
[図25]



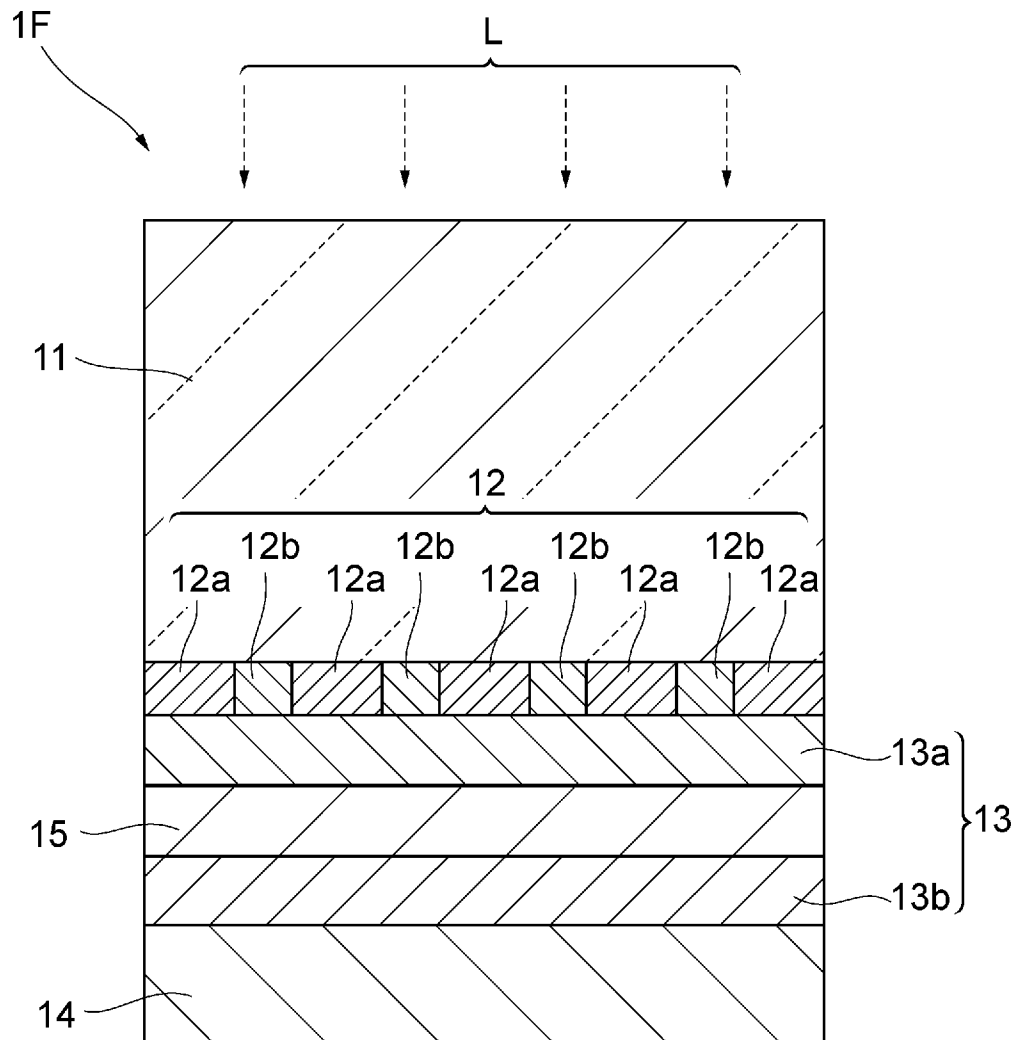
[図26]



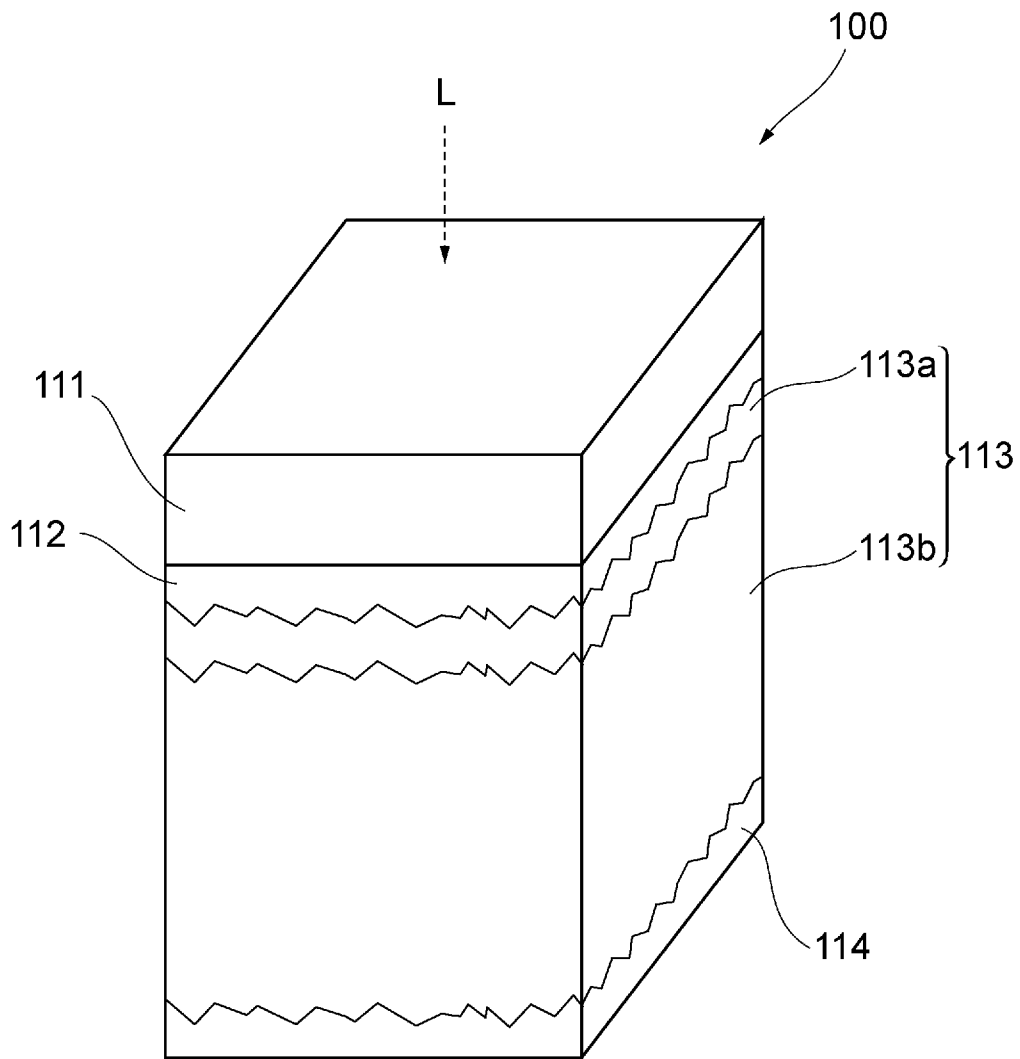
[図27]



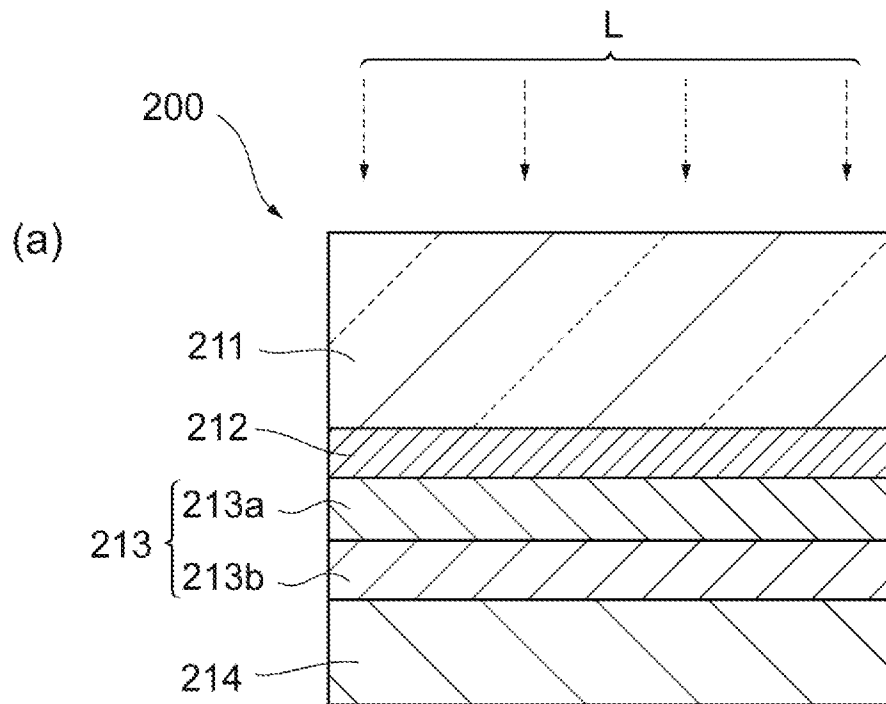
[図28]



[図29]



[図30]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2012/053701

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H01L31/052(2006.01) 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)

H01L31/00-31/20

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	1996-2012
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2012	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2012

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

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	JP 2010-199418 A (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)), 09 September 2010 (09.09.2010), (Family: none)	1-10
Y	WO 2007/121082 A2 (Massachusetts Institute of Technology), 25 October 2007 (25.10.2007), & US 2007/0235072 A1 & EP 2018668 A & JP 2009-533875 A	1-10
Y	JP 2006-171026 A (Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.), 29 June 2006 (29.06.2006), & US 2007/0235072 A1 & EP 2018668 A & JP 2009-533875 A	1-10



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
28 March, 2012 (28.03.12)

Date of mailing of the international search report
10 April, 2012 (10.04.12)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2012/053701

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	S. Zanotto, "Efficiency of thin-films silicon solar cells with a photonic pattern", Proceedings of SPIE, 7713, 12 April 2010, 771309	1-10
A	K. R. Catchpole, "A conceptual model of the diffuse transmittance of lamellar diffraction gratings on solar cells", Journal of Applied Physics, Vol.102, No.1, published online 2 July 2007, 013102	1-10
P,A	D. Madzharov, "Influence of front and back grating on light trapping in microcrystalline thin-film silicon solar cells", Optics Express, Vol. 19, Issue S2 (14 March 2011), p.A95-A107	1-10

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（I P C））
Int.Cl. H01L31/052(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. H01L31/00-31/20

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

日本国実用新案公報	1 9 2 2 - 1 9 9 6 年
日本国公開実用新案公報	1 9 7 1 - 2 0 1 2 年
日本国実用新案登録公報	1 9 9 6 - 2 0 1 2 年
日本国登録実用新案公報	1 9 9 4 - 2 0 1 2 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）

C. 関連すると認められる文献

引用文献の 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 請求項の番号
X	JP 2010-199418 A (産業技術総合研究所) 2010.09.09, (ファミリーなし)	1-10
Y	WO 2007/121082 A2 (Massachusetts Institute of Technology) 2007.10.25, & US 2007/0235072 A1 & EP 2018668 A & JP 2009-533875 A	1-10
Y	JP 2006-171026 A (三菱重工業) 2006.06.29, & US 2007/0235072 A1 & EP 2018668 A & JP 2009-533875 A	1-10

☒ C 欄の続きにも文献が列挙されている。

☐ 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

「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

「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

「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）

「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献

「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「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

「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

「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

「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

2 8 . 0 3 . 2 0 1 2

国際調査報告の発送日

1 0 . 0 4 . 2 0 1 2

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（I S A / J P）

郵便番号 1 0 0 - 8 9 1 5

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）

濱田 聖司

2 K

9 2 0 7

電話番号 0 3 - 3 5 8 1 - 1 1 0 1 内線 3 2 5 5

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の 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 請求項の番号
Y	S. Zanotto, "Efficiency of thin-films silicon solar cells with a photonic pattern", Proceedings of SPIE, 7713, 12 April 2010, 771309	1-10
A	K. R. Catchpole, "A conceptual model of the diffuse transmittance of lamellar diffraction gratings on solar cells", Journal of Applied Physics, Vol.102, No.1, published online 2 July 2007, 013102	1-10
P A	D. Madzharov, "Influence of front and back grating on light trapping in microcrystalline thin-film silicon solar cells", Optics Express, Vol. 19, Issue S2 (14 March 2011), p.A95-A107	1-10