

(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5日(05.02.2015)



(10) 国際公開番号

WO 2015/016264 A1

- (51) 国際特許分類:
H01L 31/054 (2014.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2014/070071
- (22) 国際出願日: 2014年7月30日(30.07.2014)
- (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 2013-161806 2013年8月2日(02.08.2013) JP
特願 2013-170654 2013年8月20日(20.08.2013) JP
- (71) 出願人: シャープ株式会社(SHARP KABUSHIKI KAISHA) [JP/JP]; 〒5458522 大阪府大阪市阿倍野区長池町2番2号 Osaka (JP). 国立大学法人京都大学(KYOTO UNIVERSITY) [JP/JP]; 〒6068501 京都府京都市左京区吉田本町3番地1 Kyoto (JP).
- (72) 発明者: 重田 博昭(SHIGETA, Hiroaki). 野田 進(NODA, Susumu). 田中 良典(TANAKA, Yoshinori). 石▲崎▼ 賢司(ISHIZAKI, Kenji). デ ソイサメーナカ(DE ZOYSA, Menaka). 川本 洋輔(KAWAMOTO, Yosuke).
- (74) 代理人: 特許業務法人HARAKENZO WORLD PATENT & TRADEMA

R K (HARAKENZO WORLD PATENT & TRADE-MARK); 〒5300041 大阪府大阪市北区天神橋2丁目北2番6号 大和南森町ビル Osaka (JP).

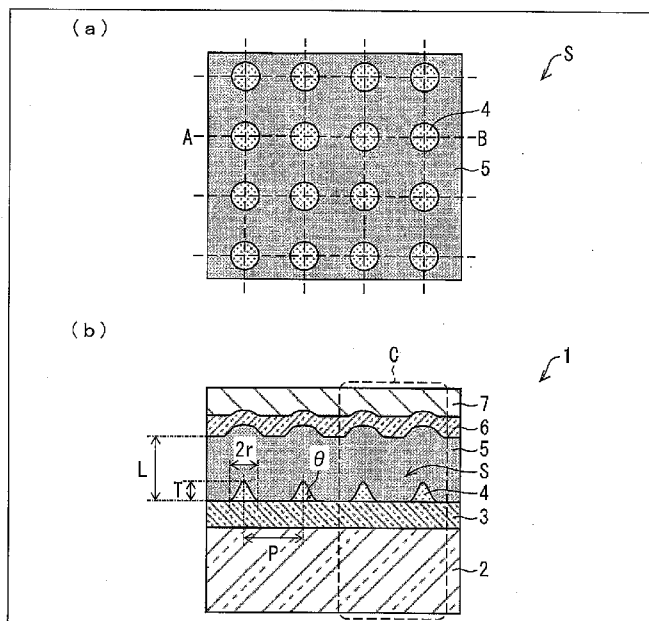
- (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, 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.
- (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, 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, 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).

[続葉有]

(54) Title: PHOTOELECTRIC CONVERSION ELEMENT AND PHOTOELECTRIC CONVERSION SYSTEM

(54) 発明の名称: 光電変換素子および光電変換システム

図 1



(57) Abstract: In order to provide a photoelectric conversion element having higher photoelectric conversion efficiency than realized in the past, the present invention is provided with tapered protruding parts so that different-refractive-index regions (4) are formed in a photonic crystal (S) in correspondence with a plurality of lattice points of a square lattice parallel to the in-plane direction of a photoelectric conversion layer (5), and that the different-refractive-index regions (4) are formed in a tapering shape from the light-receiving-surface side of the photoelectric conversion layer to a tip positioned inside the photoelectric conversion layer.

(57) 要約: 従来よりも光電変換効率を高めた光電変換素子を提供するために、フォトリソグラフィ (S) において、異屈折率領域 (4) が、光電変換層 (5) の面内方向に平行な正方格子の複数の格子点に対応して形成されており、異屈折率領域が光電変換層の受光面側から上記光電変換層の内部に位置する先端までテーパ状に形成されているテーパ状突起部を備えている。



規則 4.17 に規定する申立て:

添付公開書類:

- 不利にならない開示又は新規性喪失の例外に
関する申立て (規則 4.17(v))
- 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

明 細 書

発明の名称：光電変換素子および光電変換システム

技術分野

[0001] 本発明はフォトニック結晶構造を備えた光電変換素子に関する。

背景技術

[0002] 太陽電池は、入射した光のエネルギーを電流に変換するための、半導体から成る光電変換層を有している。入射光は、光電変換層に吸収され、そのエネルギーによって光電変換層の半導体内の電子が価電子帯から伝導帯に励起されることにより、電流に変換される。ここで、入射光が光電変換層に吸収されることなく通過すると、光電変換の効率が低下する。そのため、太陽電池では、光電変換層における入射光の吸収効率と電子への変換効率を高めることが重要となる。

[0003] 太陽電池などの光電変換素子において、非結晶質シリコン（a-Si）、微結晶シリコン（ μ c-Si）、炭化シリコン（SiC）などから形成されている光電変換層よりも屈折率の低い透明材質により形成されているフォトニック結晶構造を用いて、光電変換層における入射光の吸収効率を高める試みがなされている。

[0004] その一例として、複数の柱形状の構造物（ナノロッド）を光電変換層内に、二次元的かつ周期的に配置したフォトニック結晶構造が知られている。

[0005] 下掲の特許文献1においては、例えば円柱状のナノロッド、および断面が台形である円錐台状のナノロッドが開示されている。後者のナノロッドは、半導体層の光入射面側の表面に形成されている上面の面積の方が、半導体層の内部に形成されている下面の面積より大きくなるように形成されている。

先行技術文献

特許文献

[0006] 特許文献1：国際公開第2011/083693号（2011年7月14日公開）

特許文献2：国際公開第2012-141141号（2012年10月18日公開）

発明の概要

発明が解決しようとする課題

- [0007] しかしながら、上述のような従来技術は、フォトニック結晶構造を構成するナノロッドの形状に起因する以下のような問題点が存在する。
- [0008] 図19は、従来のフォトニック結晶構造を備えた光電変換素子の一例を示す図である。図19の(a)は、従来のフォトニック結晶構造を備えた光電変換素子の断面図である。図19の(b)は、図19の(a)におけるABの断面図である。図19の(c)は、図19の(a)における領域C100の拡大図である。
- [0009] 図19の(a)に示すように、光電変換素子101は、光入射側から順に積層された、透明基板102、透明導電膜103（第1透明導電膜）、ナノロッド104、光電変換層105、透明導電膜106（第2透明導電膜）および金属電極107を備えている。
- [0010] なお、透明基板102から金属電極107に向かう方向を下から上へ向かう方向と定義し、以下の説明における上下の位置関係を定めることにする。
- [0011] ナノロッド104は、 SiO_2 、 SiN などの透明誘電体によって形成されており、フォトニック結晶構造S100を形成している。
- [0012] また、図19の(a)および(b)に示すように、光電変換層105内においては、主に、ナノロッド104間において空隙100が存在している。
- [0013] 上記の空隙100が発生するメカニズムを説明する。chemical vapor deposition (CVD) による結晶成長のためには、結晶核が最初に形成される必要がある。上記の結晶核は、ナノロッド104の側壁のような垂直壁には形成されない。
- [0014] 図19の(c)に示すように、光電変換層105の成膜時において、光電変換層105は、隣り合うナノロッド104の各上部から成長し、互いに近づく方向である矢印Y101およびY103の方向に成長する。一方、光電変換層105は、ナノロッド104が形成されている透明導電膜103の界面において、ナノロッド104が形成されていない領域からも矢印Y102

の方向に成長する。

[0015] 矢印Y101～Y103に沿って、各々の領域の光電変換層105は同じ成長速度で成長する。隣り合うナノロッド104間の距離が短い場合、矢印Y102の方向に成長する光電変換層105の成長が不十分な状態で、矢印Y101およびY103の方向に成長する光電変換層105同士が衝突する。したがって、矢印Y102の方向に成長する光電変換層105の成長は阻害される。その結果、空隙100が発生し、そのまま残存する。

[0016] なお、特許文献1における断面が台形であるナノロッドにおいても、上記説明と同様の理由で光電変換層に空隙が生じる。

[0017] また、ナノロッド104がSiO₂に代表される誘電体であり、特に、光電変換層105をプラズマCVDにより成膜する場合、ナノロッド104がチャージアップを起こして水素ラジカルを集中させる。集中した水素ラジカルは $\mu\text{c-Si}$ をナノロッド104に集中させる。この $\mu\text{c-Si}$ のナノロッド104への集中も空隙100の発生を促している。

[0018] この空隙100は、光電変換素子101の短絡電流(J_{sc})の減少、開放電圧(V_{oc})の低下およびフィルファクター(FF)の低下の原因となる。特に光電変換素子が開放状態(電流0)の場合、光電変換層105に溜まるはずのキャリアが空隙100に次々にトラップされる。つまり、空隙100がキャリアの移動および外への取出しを阻害し、開放電圧を低下させる再結合中心となる。よって、光電変換素子の光電変換効率の低下をまねくという第1の問題が生じる。

[0019] また、図20の(a)は、上掲の特許文献2に開示されている太陽電池が備えているフォトリソニック結晶構造の平面図を示している。図20の(a)に示すように、隣接するナノロッド200の配置間隔(ピッチ)が等間隔になるようにナノロッド200が配置されている。隣接するナノロッド200の配置間隔の値を、ピッチ p と呼び、また格子定数 p (nm)とも呼ぶ。このように、複数のナノロッド200が、単一の周期で2次元的に配列された、単一周期構造であることも、ピッチ p が小さい場合($100\text{nm} \leq p < 45$

0 nm) に、問題点を有する。つまり、ピッチ p が小さい場合には、図 20 の (b) に示すように、光の吸収波長帯域のうち、特に、光吸収率が小さくなる傾向のある波長 600 nm から分光感度の末端に近い 1200 nm までの長波長域において、連続的な光吸収増強効果を得ることができないという第 2 の問題がある。言い換えれば、上記の長波長域では、離散的な光吸収増強効果しか得ることができない。

[0020] 一方で、ピッチ p が大きくなる ($p \geq 450$ nm) と単一格子状であっても、同一平面内に周期構造が複数存在する状態と同等になるため、離散的な光吸収という問題が起こらない。これは、ピッチ p が一般的な光のモードの考え方における共振器長であることから、光の共振器における、一般的なモードの考え方で説明できる。すなわち、共振器長が長くなる (ピッチが大きくなる) と、モードが増え、増えたモードに対応する光が共振できるようになるために、複数の波長の光に対して、光吸収量の増大の効果を得られることになる。

[0021] 以上の考察に基づき、フォトリック結晶のある場合とない場合とを比較するために、フォトリック結晶がある場合の波長 500 ~ 1200 nm までの光吸収量の平均をフォトリック結晶のない場合の波長 500 ~ 1200 nm までの光吸収量の平均で割った比率を用いる。前記比率を本発明では、平均光吸収量の比率と呼ぶ。グラフの縦軸に平均光吸収量の比率をとり、横軸にピッチ p の値をとってプロットすると図 20 の (c) のようになる。なお、フォトリック結晶のない場合の光吸収率を 1.0 とする。

[0022] グラフ G1 は、単一周期の格子状配列の場合を示している。グラフ G2 は、2 種類の異なるピッチの周期構造を持つ格子が同一平面に配列している場合を示している。グラフ G3 は、3 種類の異なるピッチの周期構造を持つ格子が同一平面に配列している場合を示している。グラフ G4 は、4 種類の異なるピッチの周期構造を持つ格子が同一平面に配列している場合を示している。

[0023] このグラフから、ピッチ p が小さい場合 ($100 \text{ nm} \leq p < 450 \text{ nm}$)

には、複数種類のピッチを持つ周期構造を同一平面内に配列させると、平均光吸収量を増大させる効果があることがわかる。また、ピッチ p が大きくなる ($p \geq 450 \text{ nm}$) とその効果がなく、平均光吸収量は単一周期の格子状配列の場合と同様になることもわかる。

[0024] ピッチ P が小さい場合 ($100 \text{ nm} \leq p < 450 \text{ nm}$) には、離散的な光吸収しか得られないという問題点は、屈折率差を持った構造体が2次元平面中で等間隔に形成されていると、共振効果を得られる入射光の波長に限界があることに起因している。

[0025] このような小さいピッチ ($100 \text{ nm} \leq p < 450 \text{ nm}$) における、単一周期構造のフォトニック結晶が持つ上記第2の問題点の解決策の1つとして、2重周期構造を持つフォトニック結晶が提案されている。図21の(a)は2重周期構造を持つフォトニック結晶S9の平面図を示している。また、図21の(b)は上記フォトニック結晶S9が形成された光電変換層(2重構造)の光吸収率、およびフォトニック結晶が形成されていない光電変換層(フラット構造)の光吸収率を示す図である。

[0026] 図21の(a)に示すように、フォトニック結晶S9は、半径の小さなナノロッド250と半径の大きなナノロッド251とによって構成されている。上記ナノロッド250は、基本的に、格子定数 p となる正方格子構造を形成しているが、正方格子の最小単位を構成する4つの格子点のうちの1つが、上記ナノロッド251によって置き換わっている。一方、ナノロッド251は、格子定数 $2p$ となる正方格子構造を形成している。したがって、フォトニック結晶S9は、径および格子定数の異なる2種類のナノロッドによって形成された2重周期構造を持っている。

[0027] これにより、図21の(b)に示すように、1つのフォトニック結晶において、2種類の波長の光を共振させることができるので、吸収することのできる光の波長帯域が増え、光の吸収率を向上させることができる。

[0028] しかしながら、2重周期構造のフォトニック結晶S9にも解決すべき課題が残されている。すなわち、フォトニック結晶S9では、単位構造を形成す

る断面の小さいナノロッド250の一部が、断面の大きいナノロッド251に置き換わっているので、ナノロッドの置き換えりが、それぞれのナノロッドが形成している単位構造に影響を与えて光の漏れを生じさせる。よって、光閉じ込めの効果が弱められ、図21の(b)に示す共振のピーク波長におけるそれぞれの光吸収率を減じるという第3の問題が生じる。

[0029] 本発明は、上記の各問題点を解決するためになされたものであって、その目的は、従来よりも高い光電変換効率を示す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

[0030] 上記の課題を解決するために、本発明の一態様に係る光電変換素子は、

- (1) 光電変換層を形成する材質の屈折率とは屈折率の異なる異屈折率領域を形成したフォトリソニック結晶が、上記光電変換層に形成された光電変換素子であって、
- (2) 上記異屈折率領域が、上記光電変換層の面内方向に平行な正方格子の複数の格子点に対応して形成されており、
- (3) 上記異屈折率領域が、上記光電変換層の受光面側から上記光電変換層の内部に位置する先端までテーパ状に形成されているテーパ状突起部を備えている。

発明の効果

[0031] 本発明の一態様によれば、異屈折率領域が、光電変換層の受光面側から上記光電変換層の内部に向かってテーパ状に形成されているテーパ状突起部を備えているため、フォトリソニック結晶間の光電変換層の成膜障害、すなわち欠陥の形成を抑制できる。よって、光電変換層で発生したキャリアが欠陥によって消失する不具合が抑制されるので、光電変換効率を向上させる効果を奏する。

[0032] また、本発明の一態様によれば、フォトリソニック結晶構造の共振効果の大きさ(Q値)を従来のフォトリソニック結晶構造よりも小さくすることができる。

[0033] よって、光電変換層の材料において吸収の大きな(共振効果の大きさを表

すQ値が小さい) 波長域に対して、従来のフォトニック結晶の構造に比べて光(もしくは光子)の取り込み量を増大させ、光電変換層の光吸収量を向上させる効果を奏する。

図面の簡単な説明

[0034] [図1]本発明の実施形態1に係る光電変換素子を示す図である。(a)は、実施形態1における光電変換層内のフォトニック結晶構造を示す平面図である。(b)は、実施形態1に係る光電変換素子の全体構成を概略的に示す断面図である。

[図2]本発明の実施形態1に係る異屈折率領域の形状に依存した光電変換層の成膜の方向を示す図である。(a)は、図1の(b)のCの領域を示す拡大図である。(b)は実施形態1に係る理想的な光電変換層の膜厚を示す図である。(c)は実施形態1に係る理想的な異屈折率領域の形状を示す図である。

[図3](a)から(d)は、本発明の実施形態1に係る異屈折率領域の光電変換層の面内方向に垂直な面における断面形状を示す断面図である。

[図4](a)から(d)は、本発明の実施形態1に係る光電変換素子の形成フローを示す図である。

[図5]Scanning Electron Microscope(SEM)によって撮影したフォトニック結晶構造を有する光電変換素子の光電変換層の断面形状を示す断面図である。(a)は、本発明の実施例1に係る光電変換層の断面形状を示す断面図である。(b)は、本発明の実施例1の比較例に用いた従来の光電変換層の断面形状を示す断面図である。

[図6]本発明の実施形態2に係る光電変換素子を示す図である。(a)は、本発明の実施形態3に係る光電変換素子の全体構成を概略的に示す断面図である。(b)は、(a)の領域Zの拡大図である。(c)は、(a)の領域Zの他の例を示す拡大図である。

[図7]本発明の実施形態3に係る光電変換素子の全体構成を概略的に示す断面図である。

[図8]本発明の実施形態4に係る光電変換素子の全体構成を概略的に示す断面図である。

[図9]本発明の実施形態5に係る光電変換素子の全体構成を概略的に示す断面図である。

[図10]本発明の実施形態6に係る光電変換層内のフォトニック結晶構造を示す平面図である。

[図11]本発明の実施形態6の変形例1に係るフォトニック結晶構造の単位構造を示す平面図である。

[図12](a)は、本発明の実施形態7の比較例に用いた従来のフォトニック結晶構造を示す平面図である。(b)は、本発明の実施形態7に用いたフォトニック結晶構造の単位構造を示す平面図である。(c)は、本発明に係る光電変換素子および従来の光電変換素子の光吸収率の波長特性を示した図である。

[図13](a)は、本発明の実施形態8に係る太陽電池の構成を示す断面図である。(b)は、(a)で示すCD線に沿った断面図である。

[図14](a)～(e)は、本発明の実施形態8に係る太陽電池の形成フローを示す図である。

[図15]本発明の実施形態9に係る太陽電池の構成を示す断面図である。

[図16]本発明の実施形態9に係る太陽電池の形成フローを示す図である。

[図17]本発明の実施形態10に係る太陽電池の構成を示す断面図である。

[図18]本発明の実施形態10に係る太陽電池の形成フローを示す図である。

[図19]従来技術に係るフォトニック結晶構造を備えた光電変換素子を示す図である。(a)は、従来のフォトニック結晶構造を備えた光電変換素子を示す断面図である。(b)は、(a)におけるABの断面図である。(c)は、(a)における領域C100の拡大図である。

[図20](a)は従来技術に係る太陽電池を示す図である。(b)は、従来技術に係る光電変換層の光吸収率の波長特性を示す図である。(c)は、(b)の波長特性とは異なる方法で求めた他の波長特性を示す図である。

[図21] (a) は他の従来技術に係るフォトニック結晶を示す平面図である。

(b) は、他の従来技術に係る光電変換層の光吸収率の波長特性を示す図である。

[図22] 本発明の実施形態 1 1 に係る光電変換モジュールの構成の一例を示す概略図である。

[図23] 本発明の実施形態 1 2 に係る太陽光発電システムの構成の一例を示す概略図である。

[図24] 本発明の実施形態 1 2 に係る光電変換モジュールアレイの構成の一例を示す概略図である。

[図25] 実施形態 1 2 に係る上記太陽光発電システムの変形例の構成の一例を示す概略図である。

[図26] 実施形態 1 3 に係る大規模太陽光発電システムの構成の一例を示す概略図である。

[図27] 実施形態 1 3 に係る大規模太陽光発電システムの変形例を示す概略図である。

発明を実施するための形態

[0035] 〔実施形態 1〕

以下、本発明の一実施形態について、図 1 ～図 5 に基づいて説明すれば、以下のとおりである。ただし、本実施形態およびその他の実施形態に記載されている構成部品の寸法、材質、形状、その相対配置などは、特に特定の記載がない限り、この発明の範囲をそのみに限定する趣旨ではなく、単なる説明例に過ぎない。

[0036] (光電変換素子の構成)

図 1 は、本実施形態の光電変換素子 1 を示す図である。

[0037] 図 1 の (b) は、本実施形態の光電変換素子 1 の全体構成を概略的に示す断面図である。

[0038] 図 1 の (b) に示すように、光電変換素子 1 は、光入射側から順に積層された、ガラス基板 2、透明導電膜 3 (第 1 透明導電膜)、異屈折率領域 4、

光電変換層 5、透明導電膜（第 2 透明導電膜） 6 及び電極用金属層 7 を備えている。

[0039] なお、ガラス基板 2 から電極用金属層 7 に向かう方向を下から上へ向かう方向と定義し、以下の説明における上下の位置関係を定めることにする。

[0040] 光電変換層 5 は、透明導電膜 3 および透明導電膜 6 によって挟まれている。光電変換層 5 内には、後述のようにフォトリソグラフィ構造 S が形成されている。

[0041] ガラス基板 2 は、ガラスを素材としている。

[0042] 透明導電膜 3 および 6 は透明な導電膜であり、材料としては SnO_2 、インジウム・亜鉛酸化物（IZO）、ITO（Indium-Tin-Oxide）であってもよく、導電性を付与された透明な有機材料（例えば、ポリカーボネートやアクリルなど）であってもよい。

[0043] なお、透明導電膜 3 および 6 の屈折率は、光電変換層 5 の屈折率より小さい。これにより、高屈折率のコアを、低屈折率のクラッドで被覆した光ファイバと同じ原理で、光電変換層 5 の表面に垂直な方向に伝播し、漏れ出ようとする光を閉じ込めることができ、光電変換層 5 による光の吸収率をさらに向上させることができる。

[0044] 異屈折率領域 4 は、光電変換層 5 の形成材料の屈折率と異なる屈折率（例えば小さい屈折率）を持つ SiO_2 、 SiN 、SOG（Spin-on Glass）材料、有機樹脂（アクリル、ポリカーボネートなど）などの透明誘電体により構成されている。

[0045] 光電変換層 5 の構造は、特に限定されないが、copper、indium、gallium、(di)selenide（CIGS）材料、シリコン材料（結晶シリコン（c-Si）、非結晶質シリコン（a-Si）、微結晶シリコン（ $\mu\text{c-Si}$ ）、 SiSn 、 SiC など）、In、Ga および Zn の酸化物半導体、化合物半導体（ InGaP 、 InGaAs ）などが成膜されている。また、i 型半導体層（いわゆる、真性半導体層）を p 型半導体層と n 型半導体層とで挟んだ pin 縦型構造を採用してもよい。本実施形態において

は、光入射側から順に積層された pin (a-Si 、 $\mu\text{c-Si}$ 、 SiC などから形成されている) 縦型構造からなる光電変換層 5 について例示する。

[0046] 電極用金属層 7 の材料としては、光反射率が高く、電気伝導度が大きな材料、例えば、 Ag 、 Al などを選択できる。

[0047] (フォトリック結晶構造の構成)

図 1 の (a) は、本実施形態における光電変換層内のフォトリック結晶構造を示す平面図である。

[0048] 本実施形態に係る異屈折率領域 4 の形状は、光電変換層 5 の面内方向に平行な断面において円形 (真円形状) であるが、楕円形状、多角形状 (三角形、四角形、六角形、八角形など) であってもよい。

[0049] フォトリック結晶構造 S は、複数の異屈折率領域 4 を備えている。複数の異屈折率領域 4 は、光電変換層 5 の面内方向に平行な正方格子の格子点に対応して、周期的に形成されている。

[0050] また、各異屈折率領域 4 の中心位置は、隣りあう異屈折率領域 4 が重ならないことを条件として、上記格子点を起点としてランダムにずれていてもよい。

[0051] 上記の構成によれば、2次元フォトリック結晶には、周期性がある程度保持されつつ乱れ (ランダムネス) が導入された屈折率分布が形成される。そのため、2次元フォトリック結晶内における波長毎の光の共振強度分布は、格子点の基本的な周期性に対応した複数の波長においてピークを有する形状を呈するものの、そのランダムネスによって、それらのピークトップの高さが低くなる一方、幅が広がるため、ピークトップからある程度離れた波長では共振強度が大きくなる。すなわち、ランダムネスが無い場合よりも、波長による結晶内での光の共振強度分布の変化が小さくなる。よって、光電変換効率を高めることができる。

[0052] (異屈折率領域の詳細な形状)

図 1 の (b) に示すように、異屈折率領域 4 は、光電変換層 5 の受光面側から光電変換層 5 の内部に位置する先端までテーパ状に形成されている。

したがって、異屈折率領域4をテーパ状突起（テーパ状突起部）と呼ぶことができる。

[0053] より詳細に説明すると、異屈折率領域4は、光電変換層5の受光面側に位置する基部と、光電変換層5の内部に位置する先端とを備えている。後で、図3および図6を参照してテーパ状突起部の各種具体例について説明するが、図3および図6に示すテーパ状突起部の形状から、次のことが言える。すなわち、異屈折率領域4は、上記基部から先端に至る範囲の少なくとも途中位置から先端まで、テーパ状に形成されており、当該基部から先端に至る範囲の全体が、テーパ状に形成されていてもよい。

[0054] ここで、テーパ状とは、構造物の径、幅、厚みなどが、先細りになっている形状を意味している。

[0055] 光電変換層5の面内方向に垂直な断面におけるテーパの二次元形状は、一次関数、二次関数、指数関数、双曲線関数など、各種関数のいずれか、あるいは各種関数の任意の組み合わせによって表すことができる。また、テーパの二次元形状は、楕円および真円の一部であってもよく、突起の内側へ窪む形状、または突起の外側へ膨らむ形状のいずれであってもよい。ただし、結晶の欠陥を少なくするには、突起の内側へ窪む形状が好ましい。その理由は後述する。

[0056] テーパ状突起の頂部は、鋭く尖っていてもよいし、丸みがあってもよい。

[0057] 次に、本実施形態に係る異屈折率領域4の詳細な形状の一例について図1の（b）を用いて説明する。光電変換層5の受光面側の界面、すなわち光電変換層5と透明導電膜3との界面において、当該界面の面内方向に平行に切った異屈折率領域4の断面を、異屈折率領域4の底面とした場合、隣り合う異屈折率領域4の底面の中心間の距離（ピッチ） P が600nmである。また、光電変換層5の上記界面を基準とした上記異屈折率領域4の高さ T が150nmである。また、異屈折率領域4の底面の直径 $2r$ が350nmである。

- [0058] なお、本実施形態においては、光電変換層5の膜厚は $1\mu\text{m}$ より薄く形成されている。
- [0059] 異屈折率領域4の上記ピッチ P 、高さ T 、底面の直径 $2r$ は、特に上記の数値に限定されない。例えば、ピッチ P は、*Fine Difference Time Domain (FDTD)*法を用いた計算機シミュレーションにおいて、フォトリソグラフィによる共振効果を得ることができる 100nm 以上、かつ、光電変換素子に適する可視光の波長($300\sim 1200\text{nm}$)において、フォトリソグラフィの共振効果を得られるおおよその限界値である 2000nm 以下が好ましい。なお、ピッチ P の 100nm および 2000nm は、それぞれ、フォトリソグラフィのない場合よりも光吸収量が増大する下限の条件および上限の条件を示している。
- [0060] また、高さ T は、*FDTD*法を用いた計算機シミュレーションにおいてフォトリソグラフィによる光閉じ込め効果が実用に足るレベルで得られる 100nm 以上、かつ、異屈折率領域4を光電変換層5内に形成するための構造的な限界である光電変換層の厚み L 以下が好ましい。
- [0061] また、底面の直径 $2r$ は、*FDTD*法を用いた計算機シミュレーションにおいてフォトリソグラフィによる光閉じ込め効果が、 50nm 以上、かつ、隣り合う異屈折率領域4と重なり合わない距離であるピッチ P よりも短いことが好ましい。なお、直径 $2r$ の 50nm は、フォトリソグラフィのない場合に比べて光吸収量が増大する最低条件である。
- [0062] なお、上記底面の形状が多角形または楕円形の場合、上記 $2R$ を上記多角形の外接円の直径、または上記楕円形の長径または短径としてもよい。
- [0063] また、異屈折率領域4の傾斜面と底面との角度 θ は、異屈折率領域4の高さ T およびピッチ P の上記条件を満たすことができる 5.7° 以上かつ $(\arctan(L/50\text{nm})/\pi)\times 180^\circ$ 以下であることが好ましい。ここで π は円周率のことである。
- [0064] ここで、異屈折率領域4の傾斜面と底面との角度 θ の最小値最大値について詳しく説明する。

[0065] 異屈折率領域4のピッチが最大値(2000nm)であり、異屈折率領域4の底面の直径2rが最大値(1000nm)、かつ、フォトニック結晶の高さが最小値(100nm)の場合において、異屈折率領域4の傾斜面と底面との角度 θ は最小値となる。上記条件を満たす異屈折率領域4の傾斜面と底面との角度 θ の値は、 $\arctan(100\text{nm}/1000\text{nm}/\pi) \times 180^\circ = 5.7^\circ$ となる。

[0066] また、異屈折率領域4のピッチが最小値(100nm)であり、異屈折率領域4の底面の直径2rが最小値(50nm)、かつ、フォトニック結晶の高さが最大値(光電変換層の厚みL)の場合において、異屈折率領域4の傾斜面と底面との角度 θ は最大値となる。上記条件を満たす異屈折率領域4の傾斜面と底面との角度 θ の値は、円周率を π として、 $(\arctan(L/50)/\pi) \times 180^\circ$ となる。なお、厚みLは、従来薄膜シリコン太陽電池に用いられている厚みとして使用されている1000nm以下が好ましい。

[0067] (異屈折率領域の形状による光電変換層の成長)

次に、図2を用いて本実施形態に係る異屈折率領域4の形状による光電変換層5の成長について説明する。なお、以下の説明では、光電変換層5と透明導電膜3との界面のことを透明導電膜3の界面と略称することがある。

[0068] 図2は、異屈折率領域4の形状による光電変換層5の成長を示す図であり、(a)は、図1の(b)のCで示す領域の拡大図であり、(b)は本実施形態に係る理想的な光電変換層5の膜厚を示す図であり、(c)は本実施形態に係る理想的な異屈折率領域4の形状を示す図である。

[0069] 図2の(a)に示すように、光電変換層5の成膜時において、光電変換層5は異屈折率領域4上から、異屈折率領域4の表面の接線に対し垂直な方向に成長する。このため、隣り合う異屈折率領域4同士では、互いの中間位置へ近寄る方向である矢印Y1およびY3の方向などに成長する。一方、光電変換層5は、異屈折率領域4が形成されている透明導電膜3の界面において、異屈折率領域4が形成されていない領域からも、上記界面に垂直な方向である矢印Y2の方向に成長する。

[0070] 本実施形態に係る光電変換素子 1 の光電変換層 5 の成膜時において、隣り合う異屈折率領域 4 上から矢印 Y 1 および Y 3 の方向に近づくように成長する光電変換層 5 と、透明導電膜 3 の上記界面から矢印 Y 2 の方向に成長する光電変換層 5 とが、異屈折率領域 4 がテーパ状に形成されているために同じタイミングで衝突することができる。

[0071] また、異屈折率領域 4 がテーパ状突起部を備えた構成では、光電変換層 5 をプラズマ CVD により成膜する場合、チャージアップを起こしにくくなり、水素ラジカルの集中が起きにくくなる。

[0072] したがって、従来のフォトニック結晶構造を有する光電変換素子にみられるような、光電変換層 5 の空隙の発生すなわち欠陥の形成を抑制できる。

[0073] 矢印 Y 1 ~ Y 3 に沿って成長する光電変換層 5 の衝突位置は、図 2 の (b) に示すように模式化することができる。すなわち、異屈折率領域 4 の形状を例えば円錐とし、隣り合う 2 つの異屈折率領域 4 の頂点を通り、隣り合う 2 つの異屈折率領域 4 の間の透明導電膜 3 の界面に接点を有する円弧を考える。上記接点は、2 つの円錐の中心線の間中に位置する。矢印 Y 1 ~ Y 3 に沿って成長する光電変換層 5 の成長速度が等しい場合、この円弧の中心点 O において、異屈折率領域 4 上から矢印 Y 1 および Y 3 の方向に成長する光電変換層 5 と、透明導電膜 3 の界面から矢印 Y 2 の方向に成長する光電変換層 5 とが衝突する。

[0074] 各領域から成長する光電変換層 5 同士の衝突後において、上記中心点 O の上に引き続き形成される光電変換層 5 には、欠陥ができやすい。したがって、光電変換層 5 の膜厚 L 2 は、隣り合う 2 つの異屈折率領域 4 の頂点を通り、その間の透明導電膜 3 の界面に接点を有する円弧の半径に相当する高さの位置まで、光電変換層 5 を形成するのがよい。

[0075] したがって、光電変換層 5 の欠陥を最小限に防止する異屈折率領域 4 の形状としては、図 2 の (c) に示すように、光電変換層 5 の面内方向に垂直な断面において、透明導電膜 3 の界面に接する同一の半径をもつ複数の円弧と透明導電膜 3 の界面とによって形成される形状を有する異屈折率領域 4 の形

状が挙げられる。

[0076] 上記の構成によると、異屈折率領域4が、光電変換層5の受光面側から光電変換層5の内部に位置する先端までテーパー状に形成されているテーパー状突起部を備えているため、フォトリソニック結晶構造Sにおいて生じるフォトリソニック結晶間の光電変換層5の成膜阻害、すなわち欠陥の形成を抑制できる。よって、光電変換層5で発生したキャリアが欠陥によって消失する不具合が抑制されるので、光電変換素子1の光電変換効率を向上させることができる。

[0077] また、上記の構成によると、フォトリソニック結晶構造Sの共振効果の大きさ（Q値）を従来のフォトリソニック結晶構造よりも小さくすることができる。よって、フォトリソニック結晶構造Sによる共振効果の大きさを光電変換層5の媒質の光吸収（もしくは光子の取り込み）による共振効果の大きさに近似させることができ、特に光電変換層5の材料において吸収の大きな（共振効果の大きさを表すQ値が小さい）波長域に対して、従来のフォトリソニック結晶の構造に比べて光電変換層5の光吸収量を向上させることができる。

[0078] 詳細に説明すると、光が物質に入射した場合、光が吸収される状態は、光子が一定の時間でエネルギーを失うことに相当する。これは、共振器において、共振器内に光が入射し、一定時間に出ていくことと同じである。屈折率を n 、光の波長を λ 、光の吸収係数を α として、光が吸収されときの共振効果の大きさを表すQ値は、 $Q = 2\pi n / (\lambda \alpha)$ と表される。

[0079] 例えば、波長 λ が800nmにおける微結晶シリコン（ $\mu c-Si$ ）の吸収係数 α はおおよそ1200であり、屈折率 n をおおよそ3.6とすると、 $\mu c-Si$ の共振効果の大きさ $Q\alpha$ は、 $Q\alpha = 235.6$ である。

[0080] 一方、従来のフォトリソニック結晶構造のQ値は、数百万程度である。従来のフォトリソニック結晶構造のQ値よりも小さいQ値を有するフォトリソニック結晶構造が実現できれば、フォトリソニック結晶のQ値を上記の $Q\alpha$ により近似させることができ、光電変換層の光吸収量を吸収係数と厚みにより決定されていた量よりも向上させることができる。

[0081] 正方格子状に配置された異屈折率領域から構成されているフォトニック結晶構造のQ値は、例えば、三角格子状に配置された異屈折率領域から構成されているフォトニック結晶構造のQ値よりも小さい値を有する。また、異屈折率領域が、光電変換層の受光面側から上記光電変換層の内部に向かってテーパ状に形成されているテーパ状突起部を備えていることによって、フォトニック結晶構造のQ値をさらに小さくすることができる。

[0082] よって、上記の本実施形態の構成によって、従来のフォトニック結晶の構造に比べて光電変換層5の光吸収量を向上させることができるので、光電変換素子1の光電変換効率を向上させることができる。

[0083] (異屈折率領域の種々の形状)

次に図3を用いて、本実施形態に係る異屈折率領域4の種々の形状を例示する。図3の(a)から(d)は、光電変換層5の面内方向に垂直な面における異屈折率領域4の断面を示している。

[0084] 図3の(a)から(d)に示すように、異屈折率領域4、4a、4bおよび4cは、透明導電膜3上に形成されている。

[0085] 図3の(a)に示すように、異屈折率領域4は、テーパ形状の一例として、頂部が鋭角な頂点となった円錐形状に形成されている。一方で、図3の(b)に示す異屈折率領域4aは、異屈折率領域4aの頂部が一定の曲率を持った略円錐形状に形成されている。この場合、異屈折率領域4aの頂部が一定の曲率をもっているため、異屈折率領域4aの上に積層されている層(例えば、光入射側から順に積層されたpin縦型構造からなる光電変換層5の場合においては、p型半導体層)の段切れを防止することができる。

[0086] なお、段切れとは、異屈折率領域4aの頂部が、光電変換層5に覆われず、光電変換層5内に食い込んだ状態をいう。この状態では、異屈折率領域4aの頂部がi型半導体層に直接触れやすくなる。このように、i型半導体層が直接フォトニック結晶構造に接すると、特にフィルファクター(FF)が低下するので、光電変換素子1の光電変換効率の低下をまねく。

[0087] また、図3の(c)に示すように、異屈折率領域4bは、図3の(a)に

示す異屈折率領域4の傾斜面が外側へ膨らむドーム形状に形成されている。一方で、図3の(d)に示すように、異屈折率領域4cは図3の(b)に示す異屈折率領域4aの傾斜面が異屈折率領域4cの内側へ窪む略円錐形状に形成されている。

[0088] なお、上述したように、光電変換層5の欠陥を最小限に防止する異屈折率領域4の形状としては、図2の(c)に示すように、光電変換層5の面内方向に垂直な断面において、透明導電膜3の界面に接する同一の半径をもつ複数の円弧と透明導電膜3の界面とによって形成される形状が好ましい。したがって、異屈折率領域4cのように傾斜面が外側へ膨らむ形状よりも異屈折率領域4dのように傾斜面が内側へ窪む形状が好ましい。

[0089] (光電変換素子の形成方法)

図4の(a)から(d)は、本実施形態に係る光電変換素子1の形成フローを示している。図4の(a)に示すようにガラス基板2上に透明導電膜3を成膜し、その上にSiO₂等の透明誘電体層40を成膜する。

[0090] 次に、図4の(b)に示すように、透明誘電体層40上にレジスト8を塗布し、electron beam (EB) またはステッパーなどにてレジスト8の表面にパターンを形成する。その後、CF₄などのガスを用いたReactive Ion Etching (RIE)、Inductive Coupled Plasma (ICP) などによって、透明誘電体層40を上記のパターン通りに切り出す。

[0091] 次に、図4の(c)に示すように、レジスト8を剥離した後、O₂プラズマなどのエッチング速度の緩やかなガスを用いたRIE、ICPなどによって、透明誘電体層40に対してエッチングを行う。このようにして、下から上へ向かう方向にテーパ状の異屈折率領域4を透明誘電体層40から形成することによって、フォトニック結晶構造Sを形成する。

[0092] 次に、図4の(d)に示すように、異屈折率領域4または透明導電膜3の上に、光電変換層5、透明導電膜6、電極用金属層7を、上記記載の順番によって成膜する。

[0093] 以上の工程によって、フォトニック結晶構造Sを備えた光電変換素子1を作製することができる。

[0094] 〔実施例1〕

(光電変換層における空隙)

次に、本実施例に係る光電変換素子の光電変換層における、空隙について図5を用いて説明する。

[0095] 図5の(a)は、本実施例のフォトニック結晶構造を有する光電変換素子の光電変換層をScanning Electron Microscope (SEM)によって撮影した断面図である。図5の(b)は、本実施例の比較例に用いた従来のフォトニック結晶構造を有する光電変換素子の光電変換層の断面図である。

[0096] 図5の(a)に示すように、本実施例に係る光電変換素子は、 SiO_2 によって形成されているテーパ状の異屈折率領域(SiO_2 cone)上に、光電変換層として微結晶シリコン膜($\mu\text{c-Si}$)が積層されている。図5の(a)によると本実施例に係る光電変換素子の光電変換層において、空隙は確認されなかった。

[0097] 一方、図5の(b)に示すように、従来の光電変換素子は、 SiO_2 によって形成されているロッド状(円柱状)の異屈折率領域(SiO_2 rod)上に、光電変換層として微結晶シリコン膜($\mu\text{c-Si}$)が積層されている。上記のロッド状(円柱状)の異屈折率領域は、光電変換層の面内方向に対して垂直な側壁を有している。図5の(b)によると、従来の光電変換素子の光電変換層においては、隣り合う異屈折率領域間に空隙が確認された。この空隙が発生するメカニズムについては、図19を参照して既に説明した。

[0098] 上記の結果より、異屈折率領域4をテーパ状に形成することによって、光電変換層5の空隙をなくし、光電変換層5の不整合面を低減することが可能となることが分かった。すなわち、異屈折率領域4をテーパ状に形成することによって、光電変換効率を従来より向上させることができるフォトニック結晶構造Sを有する光電変換素子1を形成することができる。

[0099] 〔実施形態２〕

（異屈折率領域がテーパ状突起部であり柱部から形成されている（五角形の断面））

本発明のさらに他の実施形態について、図６に基づいて説明すれば、以下のとおりである。なお、説明の便宜上、前記実施形態にて説明した部材と同じ機能を有する部材については、同じ符号を付記し、その説明を省略する。

[0100] （光電変換素子の構成）

図６は、本実施形態に係る光電変換素子１aを示す図である。

[0101] 図６の（a）は、本実施形態の光電変換素子１aの全体構成を概略的に示す断面図である。

[0102] 図６の（a）に示すように、光電変換素子１aは、光入射側から順に積層された、ガラス基板２、透明導電膜３（第１透明導電膜）、異屈折率領域４f、光電変換層５、透明導電膜（第２透明導電膜）６及び電極用金属層７を備えている。

[0103] なお、ガラス基板２から電極用金属層７に向かう方向を下から上へ向かう方向と定義し、以下の説明における上下の位置関係を定めることにする。

[0104] 光電変換層５は、透明導電膜３および透明導電膜６によって挟まれている。光電変換層５内には、フォトリソニック結晶構造Ｓ２が形成されている。

[0105] 異屈折率領域４fは、前記異屈折率領域４と同様に、 SiO_2 、 SiN 、 SiOG （ Spin-on Glass ）材料、有機樹脂（アクリル、ポリカーボネートなど）などの透明誘電体により構成されている。

[0106] （フォトリソニック結晶構造の構成）

本実施形態に係る異屈折率領域４fの形状は、図１の（a）で示す異屈折率領域４と同様に、光電変換層５の面内方向に平行な断面において円形（真円形状）であるが、楕円形状、多角形状（三角形、四角形、六角形、八角形など）であってもよい。

[0107] フォトリソニック結晶構造Ｓ２は、複数の異屈折率領域４fを備えている。複数の異屈折率領域４fは、光電変換層５の面内方向に平行な正方格子の格子

点に対応して、透明導電膜 3 の上面に周期的に形成されている。また、実施形態 1 で説明したように、各異屈折率領域 4 f の中心位置は、隣りあう異屈折率領域 4 f が重ならないことを条件として、上記格子点を起点としてランダムにずれていてもよい。

[0108] (異屈折率領域の形状)

次に図 6 の (b) を用いて、本実施形態に係る異屈折率領域 4 f の形状を例示する。図 6 の (b) は、図 6 の (a) の領域 Z の拡大図であり、光電変換層 5 の面内方向に対し垂直な異屈折率領域 4 f の断面図を示している。

[0109] 図 6 の (b) に示すように異屈折率領域 4 f は、光電変換層 5 の受光面側の界面、すなわち光電変換層 5 と透明導電膜 3 との界面に形成されている。上記異屈折率領域 4 f は、テーパ状突起部 4 1 f および側面が傾斜を持たない柱部 4 2 f から形成されている。テーパ状突起部 4 1 f は、頂部が鋭角な頂点となった形状に形成されている。異屈折率領域 4 f は、受光面側から上記柱部 4 2 f および上記テーパ状突起部 4 1 f の順に形成されている。

[0110] 上記の構成によると、異屈折率領域 4 f が、光電変換層 5 の受光面側から上記光電変換層 5 の内部に向かってテーパ状に形成されているテーパ状突起部 4 1 f を備えているため、フォトリソニック結晶構造 S 2 において生じるフォトリソニック結晶間の光電変換層 5 の成膜阻害、すなわち欠陥の形成を抑制できる。

[0111] さらに、異屈折率領域 4 f がテーパ状突起部 4 1 f を有していることから従来のフォトリソニック結晶を備えた光電変換層に比べ、光の取り込み量を増大させるので、光吸収量を増大させることができ、かつ、異屈折率領域が対面する面同士が傾斜をもたない柱部 4 2 f (光電変換層 5 の面内方向に対して垂直な部分) を備えていることによって、フォトリソニック結晶の大きな光閉じ込め効果を得ることができる。したがって、光電変換素子 1 a の光電変換効率を向上させることができる。

[0112] 図 6 の (c) は、図 6 の (a) の領域 Z の他の例を示す拡大図であり、光

電変換層 5 の面内方向に対し垂直な異屈折率領域 4 g の断面図を示している。

[0113] 図 6 の (c) に示すように異屈折率領域 4 g は、光電変換層 5 の受光面側の界面に形成されている。上記異屈折率領域 4 g は、テーパー状突起部 4 1 g および側面が傾斜を持たない柱部 4 2 g から形成されている。テーパー状突起部 4 1 g は、頂部が一定の曲率をもって形成されている。異屈折率領域 4 g は、受光面側から上記柱部 4 2 g および上記テーパー状突起部 4 1 g の順に形成されている。

[0114] 上記の構成によると、テーパー状突起部 4 1 g の頂点が一定の曲率をもっているため、異屈折率領域 4 f の上に積層されている層（例えば、光入射側から順に積層された p i n 縦型構造からなる光電変換層 5 の場合においては、p 型半導体層）の段切れを防止することができる。これによる光電変換効率向上の効果が、異屈折率領域 4 f の上記効果にプラスされる。

[0115] (光電変換素子の詳細な構造)

次に、本実施形態に係る光電変換素子 1 a の詳細な構造の一例について図 6 の (a) を用いて説明する。光電変換層 5 の受光面側の界面において、当該界面の面内方向に平行に切った異屈折率領域 4 f (または 4 g) の断面を、異屈折率領域 4 f (または 4 g) の底面とした場合、隣り合う異屈折率領域 4 f (または 4 g) の底面の中心間の距離 (ピッチ) を $P1$ とする。また、光電変換層 5 の上記界面を基準とした上記異屈折率領域 4 f (または 4 g) の高さを $T1$ とする。また、異屈折率領域 4 f (または 4 g) の底面の直径を $2r1$ とする。なお、異屈折率領域 4 f の高さ $T1$ は、テーパー状突起部 4 1 f の高さ $T11$ および柱部 4 2 g の高さ $T12$ の合計である。

[0116] ピッチ $P1$ は、例えば、*Fine Difference Time Domain* (FDTD) 法を用いた計算機シミュレーションにおいて、フォトリソニック結晶による共振効果を得ることができる 100 nm 以上、かつ、光電変換素子に適する可視光の波長 ($300\sim1200\text{ nm}$) において、フォトリソニック結晶の共振効果を得られるおおよその限界値である 2000 nm 以

下が好ましい。

[0117] また、高さT 1は、F D T Dを用いた計算機シミュレーションにおいてフォトニック結晶による光閉じ込め効果が実用に足るレベルで得られる100nm以上、かつ、異屈折率領域4を光電変換層5内に形成できる光電変換層の厚みL 1以下が好ましい。

[0118] また、底面の直径 $2r_1$ は、FDTDを用いた計算機シミュレーションにおいてフォトニック結晶による光閉じ込め効果が実用に足るレベルで得られる 50 nm 以上、かつ、隣り合う異屈折率領域 $4f$ と重なり合わない距離であるピッチ P_1 よりも短いことが好ましい。

[0119] また、図6の(b)に示すように、テーパ状突起部41fと柱部42fとの境界における、光電変換層5の面内方向に平行な横断面を考えた場合、テーパ状突起部41fの傾斜面と、当該横断面とが形成する角度 θ_1 が、異屈折率領域4fの高さT1およびピッチP1の上記条件を満たすことができる範囲は、実施形態1で説明した導出方法によって求めることができる。

[0120] [実施形態3]

(透明導電膜によって覆われている異屈折率領域)

本発明のさらに他の実施形態について、図7に基づいて説明すれば、以下のとおりである。なお、説明の便宜上、前記実施形態にて説明した部材と同じ機能を有する部材については、同じ符号を付記し、その説明を省略する。

[0121] (光電変換素子の構成)

図 7 は、本実施形態に係る光電変換素子 1 b の全体構成を概略的に示す断面図である。

[0122] 図7に示すように、光電変換素子1bは、光入射側から順に積層された、ガラス基板2、透明導電膜3（第1透明導電膜）、異屈折率領域4、透明導電膜9（第3透明導電膜）、光電変換層5、透明導電膜（第2透明導電膜）6及び電極用金属層7を備えている。

[0123] 光電変換層 5 は、透明導電膜 3 および透明導電膜 6 によって挟まれている。光電変換層 5 内には、後述のようにフォトリソグラフィによってフォトニック結晶構造 S 3 が形成され

ている。

[0124] 異屈折率領域 4 と光電変換層 5 との境界において、異屈折率領域 4 は、透明導電膜 9 によって覆われている。言い換えると、上記境界において、光電変換層 5 の受光面側の界面全体にわたる透明導電膜 9 によって、透明導電膜 3 上に離散的に配置された複数の異屈折率領域 4 が覆われている。したがって、透明導電膜 9 は、隣り合う異屈折率領域 4 の間に存在する透明導電膜 3 も覆っている。

[0125] 透明導電膜 9 は、異屈折率領域 4 の光入射側の反対側の面において、実施形態 1 と同様に透明誘電体によって形成されている異屈折率領域 4 の全体を覆うように成膜されている。透明導電膜 9 は、 SnO_2 、インジウム・亜鉛酸化物 (IZO)、ITO (Indium-Tin-Oxide) であってもよく、導電性を付与された透明な有機材料（例えば、ポリカーボネートやアクリルなど）であってもよい。透明導電膜 9 の膜厚は、シート抵抗が $10 \Omega / \text{cm}^2$ 以下となるように調整されている。

[0126] フォトニック結晶構造 S3 の構造として、複数の異屈折率領域 4 が、光電変換層 5 の面内方向に平行な正方格子の格子点に対応して、周期的に形成されている。また、各異屈折率領域 4 の中心位置は、隣りあう異屈折率領域 4 が重ならないことを条件として、上記格子点を起点としてランダムにずれていてもよい。

[0127] また、異屈折率領域 4 の形状については、実施形態 1 で説明したテーパ状突起として形成されていてもよいし、実施形態 3 で説明した柱部およびテーパ状突起部から構成されていてもよい。

[0128] 上記の構成によると、透明導電膜 9 は、光電変換層 5 から電流を取り出す陽電極および陰電極の一方としての役割を担うことができる。したがって、光電変換層 5 の受光面側に位置し、誘電体によって形成されている異屈折率領域 4 が原因として生じる光電変換素子 1 b からの電流の取り出しの低下を、防止することができる。

[0129] [実施形態 4]

(透明導電膜によって形成されている異屈折率領域)

本発明の他の実施形態について、図8に基づいて説明すれば、以下のとおりである。なお、説明の便宜上、前記実施形態にて説明した部材と同じ機能を有する部材については、同じ符号を付記し、その説明を省略する。

[0130] (光電変換素子の構成)

図8は、本実施形態に係る光電変換素子1cの全体構成を概略的に示す断面図である。

[0131] 図8に示すように、光電変換素子1cは、光入射側から順に積層された、ガラス基板2、透明導電膜3(第1透明導電膜)、異屈折率領域4h、光電変換層5、透明導電膜(第2透明導電膜)6及び電極用金属層7を備えている。光電変換層5は、透明導電膜3および透明導電膜6によって挟まれている。光電変換層5内には、フォトリソグラフィ構造S4が形成されている。

[0132] 異屈折率領域4hは透明な導電膜から形成されており、材料としてはSnO₂、インジウム・亜鉛酸化物(IZO)、ITO(Indium-Tin-Oxide)であってもよく、導電性を付与された透明な有機材料(例えば、ポリカーボネートやアクリルなど)であってもよい。

[0133] また、エッチングなどによって透明導電膜3を彫ることにより異屈折率領域4hを形成してもよい。本実施形態においては、透明導電膜3をエッチングすることによって異屈折率領域4hを形成している例を示している。異屈折率領域4hの構成に関する各種数値の一例は以下のとおりである。

[0134] 光電変換層5の受光面側の界面において、当該界面の面内方向に平行に切った異屈折率領域4hの断面を、異屈折率領域4hの底面とした場合、隣り合う異屈折率領域4hの底面の中心間の距離(ピッチ)が450nmである。また、光電変換層5の面内方向に垂直な断面において、光電変換層5の受光面側の界面を基準とした上記異屈折率領域4hの高さが100nmである。また、異屈折率領域4hの底面の直径が200nmである。また、本実施形態においては、光電変換層5の膜厚が400nmに形成されている。

[0135] フォトリソグラフィ構造S4の構造は、複数の異屈折率領域4hが、光電変

換層 5 の面内方向に平行な正方格子の格子点に対応して、周期的に形成されている。また、各異屈折率領域 4 h の中心位置は、隣りあう異屈折率領域 4 h が重ならないことを条件として、上記格子点を起点としてランダムにずれていてもよい。

[0136] また、異屈折率領域 4 h の形状については、実施形態 1 で説明したテーパ状突起として形成されていてもよいし、実施形態 2 で説明した柱部およびテーパ状突起部から構成されていてもよい。

[0137] 上記の構成によると、異屈折率領域 4 h が透明導電膜で形成されているため、異屈折率領域 4 h が誘電体によって形成されている場合において存在する光電変換層 5 と透明導電膜 3 とが絶縁されている箇所がなくなる。上記の絶縁箇所は、光電変換素子 1 c からの電流取り出しを低下させることがある。上記の構成においては、上記の絶縁箇所が存在しないため電流の取り出しを向上させることができる。

[0138] 〔実施形態 5〕

（透明導電膜によって覆われており、透明誘電体をエッチングすることによって形成されている異屈折率領域）

本発明の他の実施形態について、図 9 に基づいて説明すれば、以下のとおりである。なお、説明の便宜上、前記実施形態にて説明した部材と同じ機能を有する部材については、同じ符号を付記し、その説明を省略する。

[0139] （光電変換素子の構成）

図 9 は、本実施形態に係る光電変換素子 1 d の全体構成を概略的に示す断面図である。

[0140] 図 9 に示すように、光電変換素子 1 d は、光入射側から順に積層された、ガラス基板 2、透明誘電体 10、異屈折率領域 4 i、透明導電膜 9（第 3 透明導電膜）、光電変換層 5、透明導電膜（第 2 透明導電膜）6 及び電極用金属層 7 を備えている。

[0141] 光電変換層 5 は、透明誘電体 10 および透明導電膜 6 によって挟まれている。光電変換層 5 内には、フォトリソ法によるフォトニック結晶構造 S 5 が形成されている。

[0142] 異屈折率領域 4 i は透明誘電体から形成されており、材料としては SiO_2 、 SiN 、 SOG (Spin-on Glass) 材料、有機樹脂（アクリル、ポリカーボネートなど）などの透明誘電体により構成されている。

[0143] また、エッチングなどによって透明誘電体 10 を彫ることにより異屈折率領域 4 i を形成してもよい。本実施形態においては、透明誘電体 10 をエッチングすることによって異屈折率領域 4 i を形成している例を示している。

[0144] 透明導電膜 9 は、異屈折率領域 4 i の光入射側の反対側の面において異屈折率領域 4 i の全体を覆うように成膜されている。透明導電膜 9 は、 SnO_2 、インジウム・亜鉛酸化物 (IZO)、 ITO (Indium-Tin-Oxide) であってもよく、導電性を付与された透明な有機材料（例えば、ポリカーボネートやアクリルなど）であってもよい。透明導電膜 9 の膜厚は、シート抵抗が $10 \Omega / \text{cm}^2$ 以下となるように調整されている。

[0145] フォトニック結晶構造 S 5 の構造には、前記各実施形態において説明した構造を当てはめることができる。

[0146] 上記の構成によると、透明導電膜 9 は、光電変換層 5 から電流を取り出す陽電極および陰電極の一方としての役割を担うことができる。したがって、光電変換素子 1 d からの電流取り出しを向上させることができる。

[0147] 〔実施形態 6〕

（複数の二次元構造を含むフォトニック結晶構造）

本発明の他の実施形態について、図 10 に基づいて説明すれば、以下のとおりである。なお、説明の便宜上、前記実施形態にて説明した部材と同じ機能を有する部材については、同じ符号を付記し、その説明を省略する。

[0148] 図 10 は、本実施形態における光電変換層 5 内のフォトニック結晶構造 S 8 の構造を示す平面図である。なお、図 10 に示すフォトニック結晶構造 S 8 は、後述の図 13 (b) に示すフォトニック結晶構造を 1 単位として、4 単位分を配列したものに等しい。

[0149] この時の格子定数 p は、 $100 \text{ nm} \leq p < 450 \text{ nm}$ の範囲である。

[0150] 本実施形態に係る異屈折率領域 4 j、4 k、4 l および 4 m の形状は、実

施形態 1 で説明したテーパ状突起として形成されていてもよいし、実施形態 3 で説明した柱部およびテーパ状突起部から構成されていてもよい。

[0151] また、本実施形態に係る異屈折率領域 4 j、4 k、4 l および 4 m の形状は、光電変換層 5 の面内方向に平行な断面において円形（真円形状）である。しかし、これらの形状は互いに同一である必要はなく、光の吸収向上が可能となる波長を増やすように、楕円形状、多角形状（三角形、四角形、六角形、八角形など）などから各形状を選択することができる。

[0152] 異屈折率領域 4 j、4 k、4 l および 4 m は、光電変換層 5 の面内方向に平行な格子（例えば正方格子）の格子点に対応して形成されている。また、異屈折率領域 4 j、4 k、4 l および 4 m は、上記面内方向に平行な断面において異なる大きさを備えている。さらに、異屈折率領域 4 j、4 k、4 l および 4 m は、上記面内方向において、断面の大きさの違いに応じた複数種類の固有の二次元構造を形成するように、断面の大きさごとに多点配置されている。例えば、図 10 に示すように、異屈折率領域 4 k は、正方形を形成する格子点に対応して配置された二次元構造を形成している。

[0153] また、異屈折率領域 4 m は、異屈折率領域 4 k が形成する正方形の中心に位置する格子点に対応して配置された二次元構造を形成している。

[0154] 異屈折率領域 4 l は、上記正方形の中心を、異屈折率領域 4 k および 4 m の各二次元構造と共有し、4 k が形成する上記正方形の各辺の midpoint に配置された十字型の二次元構造を形成している。異屈折率領域 4 j は、上記正方形の中心を、異屈折率領域 4 k、4 l および 4 m の各二次元構造と共有し、上記正方形の外周を取り巻く八角形を形成する格子点に対応して配置された二次元構造を形成している。

[0155] 断面の大きさの違いに応じた複数種類の上記二次元構造が組み合わさって、単位構造を形成している。

[0156] 上記単位構造は、繰り返し形成されることによって周期構造を形成している。本実施形態では、上記単位構造が、二次元的、かつ周期的に繰り返し形成されている。

[0157] 上記の構成に加えて、上記単位構造内においては、上記３種類以上の二次元構造の二次元形状は、互いに異なっており、任意の基準点に対して互いに拡大縮小しても相似形にはならない形状を備えている。より詳しく説明すると、任意の基準点に対して、ある二次元構造を形成している各異屈折率領域 4 j、4 k、4 l および 4 m の中心を同一比率で拡大縮小しても、他の二次元構造の形状に重なることがない（形状が比例変換されない）。なお、任意の基準点に対して、上記中心を同一比率で拡大縮小する図形変換には、回転による図形変換を含まない。

[0158] また、各異屈折率領域 4 j、4 k、4 l および 4 m の中心位置は、隣り合う異屈折率領域 4 j、4 k、4 l および 4 m が重ならないことを条件として、上記格子点を起点としてランダムにずれていてもよい。

[0159] 上記の構成によれば、光電変換層 5 の面内方向において、フォトニック結晶構造 S 6 に互いに異なる形状の複数の二次元構造が配置されることによって、フォトニック結晶構造 S 6 と入射光とが相互作用（干渉および共振）し、光吸収増大効果が得られる入射光の波長を増やすことが可能となる。よって、連続した波長に対して光吸収を増大させることができる。

[0160] （実施形態 6 の変形例）

次に、本発明に係るフォトニック結晶構造の変形例について説明する。なお、説明の便宜上、前記実施形態にて説明した部材と同じ機能を有する部材については、同じ符号を付記し、その説明を省略する。

[0161] 図 11 は、本変形例に係るフォトニック結晶構造 S 7 の単位構造を示す平面図である。

[0162] 本変形例のフォトニック結晶構造 S 7 は、光電変換層 11 の面内方向に平行な断面において異なる大きさを備えている異屈折率領域 6 a、6 b、6 c、6 d、6 e、6 f および 6 g を備えている。図 11 に示すように、光電変換層 11 の面内方向に平行な断面において異屈折率領域 6 a～6 g の各形状（平面形状）は 3 以上の角数の多角形である。また、異屈折率領域 6 a～6 g の各断面の形状は、互いに異形である。

[0163] 異屈折率領域 6 a ~ 6 g は、上記面内方向において、断面の大きさの違いに応じた複数種類の固有の二次元構造を形成するように、断面の大きさごとに多点配置され、格子点に対応して配置された二次元構造を形成している。

[0164] 断面の大きさの違いに応じた複数種類の上記二次元構造が組み合わさって、図 1 1 に示すように、単位構造を形成している。

[0165] 〔実施形態 7〕

(光電変換素子における光吸収率)

次に、本発明に係る光電変換素子における光電変換層の光吸収率について説明する。

[0166] 本実施形態では、格子定数 p を格子定数 a に置き換えて説明する。この時の格子定数 a は、 $100\text{ nm} \leq a < 450\text{ nm}$ の範囲である。

[0167] 図 1 2 の (a) は、本実施形態の比較例に用いた従来のフォトニック結晶構造を示す平面図である。図 1 2 の (b) は、本実施形態に係るフォトニック結晶構造の単位構造を示す平面図である。

[0168] 従来のフォトニック結晶構造は、図 1 2 の (a) に示ように、格子定数 a が 275 nm である正方格子のすべての格子点上に、異屈折率領域 6 1 が光電変換層の面内方向に平行な断面において $0.4a$ である半径 $R5$ を備えて形成されている。

[0169] したがって、従来のフォトニック結晶構造は単一周期構造を形成している。

[0170] 一方、本実施形態に係るフォトニック結晶構造は、図 1 2 の (b) に示すように、格子定数 a が 275 nm である正方格子の格子点上に、前記光電変換層 1 1 の面内方向に平行な断面において $0.3a$ 、 $0.4a$ および $0.7a$ をそれぞれ半径 $R6$ 、半径 $R7$ および半径 $R8$ として備えた異屈折率領域 6 が形成されている。

[0171] 本実施形態に係るフォトニック結晶構造は、光電変換層 1 1 の面内方向に平行な断面において以下の 3 種類の二次元構造を含む単位構造を形成している。

- [0172] 半径 R_6 の異屈折率領域 6 は、同一の半径を備えた異屈折率領域 6 と、1 辺の長さが $2a$ の正方形の二次元構造を形成している。
- [0173] 半径 R_7 の異屈折率領域 6 は、同一の半径を備えた異屈折率領域 6 と、上記正方形の中心および上記正方形の各辺の midpoint に配置された十字形の二次元構造を形成している。
- [0174] 半径 R_8 の異屈折率領域 6 は、同一の半径を備えた異屈折率領域 6 と、上記正方形の外周を取り巻く八角形を形成する格子点に対応して配置された二次元構造を形成している。
- [0175] 上記の従来のフォトニック (PC) 結晶構造、本実施形態に係るフォトニック結晶構造 (本発明の PC 構造) およびフォトニック結晶構造を備えない (フラット構造) 光電変換素子の光吸収率を、*Fine Difference Time Domain (FDTD)* 法を用いた計算機シミュレーションによって調べた。
- [0176] 図 12 の (c) は、上記 3 つの光電変換素子の光吸収率の波長特性を示した図である。
- [0177] 図 12 の (c) によると、従来のフォトニック結晶構造はフラット構造に比べて光吸収の増大を示した。しかし、本実施形態に係るフォトニック結晶構造は、特に、 600 nm 以上の長波長域側において、従来のフォトニック結晶構造よりも高い効果を示した。
- [0178] 例えば、約 1000 nm の波長において、本実施形態に係るフォトニック結晶構造は従来のフォトニック結晶構造よりも 8 倍程度高い光吸収率を示した。
- [0179] 〔実施形態 8〕
- 本発明の他の実施形態について、図 13 および 14 に基づいて説明すれば、以下のとおりである。なお、説明の便宜上、前記実施形態にて説明した部材と同じ機能を有する部材については、同じ符号を付記し、その説明を省略する。
- [0180] (太陽電池の構成)

本実施形態に係る太陽電池 10 は、結晶シリコンに非結晶質シリコンを成膜したヘテロ接合結晶シリコン太陽電池であり、光電変換層において、受光面の反対側の裏面近傍に前記フォトリソニック結晶構造 S8 を備えている。

[0181] 以下に太陽電池 10 の詳細を説明する。

[0182] 図 13 の (a) は、本実施形態に係る太陽電池 10 の構成を示す断面図である。

[0183] 図 13 の (a) に示すように、太陽電池 10 は、表面電極 21 を備えているとともに、光入射側から順に積層された、反射防止膜 (anti reflective coating (ARC)) 9、透明導電膜 3、光電変換層 17、透明導電膜 4 および裏面電極 22 を備えている。光電変換層 17 は、光入射側から順に、第 1 非結晶質シリコン半導体層 171、結晶シリコン基板 172 (n 型または p 型半導体)、第 2 非結晶質シリコン半導体層 173 (i 型および p 型層、または、i 型および n 型層) の積層によって構成されている。

[0184] 結晶シリコン基板 172 には、受光面側にテクスチャー構造が形成されている。結晶シリコン基板 172 の上記テクスチャー構造上に、反射防止膜 9、透明導電膜 3 および第 1 非結晶質シリコン半導体層 171 が順に成膜されている。

[0185] さらに、結晶シリコン基板 172 の上記テクスチャー構造側の一部には、表面電極 21 が備わっている。表面電極 21 が備わっている領域においては、反射防止膜 9 が存在しておらず、透明導電膜 3 の上に表面電極 21 が透明導電膜 3 と接触して設けられている。

[0186] 反射防止膜 9 の材質としては、SiN、SiO₂ などを用いることができる。また、太陽電池 10 は反射防止膜 9 を必要に応じて備えていればよく、反射防止膜 9 を備えていなくてもよい。

[0187] また、結晶シリコン基板 172 の受光面とは反対側の裏面に、実施形態 6 で詳しく説明したフォトリソニック結晶構造 S8 を形成するための凹凸構造が形成されている。結晶シリコン基板 172 の裏面における上記凹凸構造は、結晶シリコン基板 172 の裏面に成膜された第 2 非結晶質シリコン半導体層 1

73に転写されている。さらに、第2非結晶質シリコン半導体層173に対して透明導電膜4が成膜されていることによって、第2非結晶質シリコン半導体層173と透明導電膜4との屈折率差を持った凹凸構造、すなわち上記フォトリソグラフィ結晶構造Sが形成されている。これにより、第2非結晶質シリコン半導体層173内における光閉じ込め効果が得られる。

[0188] さらに、結晶シリコン基板172と第2非結晶質シリコン半導体層173との屈折率差によっても、フォトリソグラフィ結晶構造が形成され、光電変換層17内で光閉じ込め効果が得られる。

[0189] 図13の(b)は、図13の(a)で示すCD線に沿った断面図であり、結晶質シリコン半導体層173と透明導電膜4とによって形成されたフォトリソグラフィ結晶構造S8を示している。

[0190] 第1非結晶質シリコン半導体層171は、i型半導体およびn型半導体の積層構造、または、i型半導体およびp型半導体の積層構造によって構成されている。

[0191] 結晶シリコン基板172は、n型半導体またはp型半導体によって構成されている。

[0192] 第2非結晶質シリコン半導体層173は、i型半導体およびn型半導体の積層構造、i型半導体およびp型半導体の積層構造によって構成されている。

[0193] 第1非結晶質シリコン半導体層171がi型半導体およびn型半導体の積層構造によって構成されている場合、第2非結晶質シリコン半導体層173はi型半導体およびp型半導体の積層構造によって構成される。

[0194] また、第1非結晶質シリコン半導体層171がi型半導体およびp型半導体の積層構造によって構成されている場合、第2非結晶質シリコン半導体層173はi型半導体およびn型半導体の積層構造によって構成される。

[0195] 透明導電膜4の材質としては、ITO (Indium-Tin-Oxide)、ZnOなどであってもよい。

[0196] 表面電極21の材質としては、Ag、Al、Mo、Cu、Ti及びその加

工物、積層構造物を用いることができる。

[0197] 裏面電極22の材質としては、Ag、Al、Mo、Cu、Tiおよびその加工物、積層構造物などを用いることができる。

[0198] 上記の構成によると、結晶シリコンを用いることで、光を電気に変換する量子効率を向上させる効果を奏する。

[0199] また、ヘテロ接合太陽電池では、光入射面とは反対側の裏面側に μm オーダーの凹凸構造を形成した場合には、特性劣化が懸念される。しかし、本発明の構造は、光入射面とは反対側の裏面側に nm オーダーの凹凸構造を持つフォトリソ結晶構造を形成したことによって、凹凸が比較的小さいことから、特性劣化を防ぐ効果を奏する。

[0200] したがって、上記2つの効果によって、薄膜シリコンを用いた太陽電池よりも多くの電流を取り出せるので、光電変換効率を向上させる効果を奏する。

[0201] (太陽電池の形成方法)

図14の(a)～(e)は、本実施形態に係る太陽電池10の形成フローを示している。

[0202] 図14の(a)に示すように、結晶シリコン基板172にテクスチャー構造を形成し、テクスチャー構造側を受光面とする。

[0203] 次に、図14の(b)に示すように、結晶シリコン基板172の受光面とは反対の面に、レジストを用いてelectron beam (EB)またはステッパーなどにてフォトリソ結晶構造を形成するための凹凸構造を形成する。

[0204] 次に、図14の(c)に示すように、結晶シリコン基板172の受光面とは反対の面に第2非結晶質シリコン半導体層173を成膜する。これによって、第2非結晶質シリコン半導体層173に、上記凹凸構造が転写される。

[0205] 次に、図14の(d)に示すように、結晶シリコン基板172の受光面に、第1非結晶質シリコン半導体層171、透明導電膜3および反射防止膜9を、結晶シリコン基板172の受光面から、上記記載の順番によって成膜す

る。

[0206] 次に、受光面に表面電極 2 1 を形成し、受光面とは反対の面に透明導電膜 4 および裏面電極 2 2 を成膜する。

[0207] 以上の工程によって、フォトリソグラフィ構造 S 8 を備えたヘテロ接合結晶シリコン型の太陽電池 1 0 を作製することができる。

[0208] [実施形態 9]

本発明の他の実施形態について、図 1 5 および 1 6 に基づいて説明すれば、以下のとおりである。なお、説明の便宜上、前記実施形態にて説明した部材と同じ機能を有する部材については、同じ符号を付記し、その説明を省略する。

[0209] (太陽電池の構成)

本実施形態に係る太陽電池 1 0 a は、電極間のコンタクト（電力の取出し）を受光面の反対側の面でおこなうヘテロ接合バックコンタクト結晶シリコン太陽電池である。さらに本実施形態に係る太陽電池 1 0 a は、光電変換層において、受光面の反対側の裏面近傍に前記フォトリソグラフィ構造 S 8 を備えている。

[0210] 以下に太陽電池 1 0 a の詳細を説明する。

[0211] 図 1 5 は、本実施形態に係る太陽電池 1 0 a の構成を示す断面図である。

[0212] 図 1 5 に示すように、太陽電池 1 0 a は、光入射側から順に積層された、反射防止膜（anti reflective coating (A R C)）9、光電変換層 1 8、透明導電膜 4 および裏面電極 2 3 を備えている。光電変換層 1 8 は、光入射側から順に、第 1 非結晶質シリコン半導体層 1 8 1、結晶シリコン基板 1 8 2（n 型または p 型半導体）、第 2 非結晶質シリコン半導体層 1 8 3 および 1 8 4（i 型および p 型層、または、i 型および n 型層）の積層によって構成されている。

[0213] 結晶シリコン基板 1 8 2 には、受光面側にテクスチャー構造が形成されている。結晶シリコン基板 1 8 2 の上記テクスチャー構造上に、反射防止膜 9、透明導電膜 3 および第 1 非結晶質シリコン半導体層 1 8 1 が順に成膜され

ている。

[0214] また、結晶シリコン基板 182 の受光面とは反対側の表面に、第 2 非結晶質シリコン半導体層 183 および第 2 非結晶質シリコン半導体層 184 が成膜されている。第 2 非結晶質シリコン半導体層 183 および第 2 非結晶質シリコン半導体層 184 は積層構造の同一階層に成膜されており、第 2 非結晶質シリコン半導体層 183 および第 2 非結晶質シリコン半導体層 184 との間には、間隔が設けられている。第 2 非結晶質シリコン半導体層 183 および第 2 非結晶質シリコン半導体層 184 の結晶シリコン基板 182 と接していない側において、透明導電膜 4 および裏面電極 23 がこの順によって成膜されている。

[0215] また、結晶シリコン基板 182 の受光面とは反対側の裏面に、実施形態 6 で詳しく説明したフォトリソニック結晶構造 S8 を形成するための凹凸構造が形成されている。結晶シリコン基板 182 の裏面における上記凹凸構造は、結晶シリコン基板 182 の裏面に成膜された第 2 非結晶質シリコン半導体層 183 および 184 に転写されている。さらに、第 2 非結晶質シリコン半導体層 183 および 184 に対して透明導電膜 4 が成膜されていることによって、第 2 非結晶質シリコン半導体層 183 および 184 と透明導電膜 4 との屈折率差を持った凹凸構造、すなわち上記フォトリソニック結晶構造 S が形成されている。これにより、第 2 非結晶質シリコン半導体層 183 および 184 内における光閉じ込め効果が得られる。

[0216] 第 1 非結晶質シリコン半導体層 181 は、i 型半導体および n 型半導体の積層構造、または、i 型半導体および p 型半導体の積層構造によって構成されている。

[0217] 結晶シリコン基板 182 は、n 型半導体または p 型半導体によって構成されている。

[0218] 第 2 非結晶質シリコン半導体層 183 が i 型および p 型半導体の積層で構成される場合、第 2 非結晶質シリコン半導体層 184 は i 型および n 型半導体の積層となる。また、第 2 非結晶質シリコン半導体層 183 が i 型および

n型半導体の積層で構成される場合、第2非結晶質シリコン半導体層184はi型およびp型半導体の積層となる。

[0219] 裏面電極23の材質としては、Ag、Al、Mo、Cu、Tiおよびその加工物、積層構造物などを用いることができる。

[0220] 上記の構成によると、表面に電極がないことから、外部からの光の取り込み量を向上させることができ、フォトリソグラフィ構造の光の吸収効果によって、さらなる光吸収が可能となることから、光電変換効率を増大させる効果を奏する。

[0221] よって、従来の太陽電池より電流を取り出せることで光電変換効率を向上することができる。

[0222] (太陽電池の形成方法)

図16は、本実施形態に係る太陽電池10aの形成フローを示している。

[0223] 図14の(c)に示す構造を形成後、図16の(a)に示すように、レジスト30を用いて第2非結晶質シリコン半導体層184の一部をエッチングした後、レジスト30を剥離する。

[0224] 次に、図16の(b)に示すように、第2非結晶質シリコン半導体層183を成膜する。

[0225] これによって、第2非結晶質シリコン半導体積層183に、上記凹凸構造が転写される。

[0226] 第2非結晶質シリコン半導体層184がi型およびp型半導体の積層で構成される場合、第2非結晶質シリコン半導体層183はi型およびn型半導体の積層となる。

[0227] また、第2非結晶質シリコン半導体層184がi型およびn型半導体の積層で構成される場合、第2非結晶質シリコン半導体層183はi型およびp型半導体の積層となる。

[0228] 次に、図16の(c)に示すように、第2非結晶質シリコン半導体層183の一部にレジスト30を形成する。レジスト30は、第2非結晶質シリコン半導体層183および184が積層されている領域、ならびに、上記領域

から所定の距離 L までを避けるように形成する。その後、第2非結晶質シリコン半導体層183をエッチングする。この結果、レジスト30によって被覆された第2非結晶質シリコン半導体層183以外の第2非結晶質シリコン半導体層183が除去される。

[0229] 次に、図16の(d)に示すように、レジスト30を剥離する。

[0230] 次に、図16の(e)に示すように、結晶シリコン基板182の受光面に第1非結晶質シリコン半導体層181および反射防止膜9を成膜する。結晶シリコン基板182の受光面から、上記記載の順番によって成膜する。

[0231] 次に、受光面とは反対の面の第2非結晶質シリコン半導体層183および184の成膜領域に透明導電膜4および裏面電極23を成膜する。

[0232] 以上の工程によって、フォトリソ結晶構造S8を備えたヘテロ接合結晶シリコン型の太陽電池10aを作製することができる。

[0233] [実施形態10]

本発明の他の実施形態について、図17および18に基づいて説明すれば、以下のとおりである。なお、説明の便宜上、前記実施形態にて説明した部材と同じ機能を有する部材については、同じ符号を付記し、その説明を省略する。

[0234] (太陽電池の構成)

本実施形態に係る太陽電池10bは、電極間のコンタクト（電力の取出し）を受光面の反対側の面でおこなうヘテロ接合バックコンタクト結晶シリコン太陽電池である。さらに、太陽電池10bは、光電変換層において、受光面の反対側にフォトリソ結晶構造Sを備える。また、受光面の反対側の面に成膜された第2非結晶質シリコン半導体層193および194の一部（数 μm の長さ程度）が重なり合っている。

[0235] 以下に太陽電池10bの詳細を説明する。

[0236] 図17は、本実施形態に係る太陽電池10bの構成を示す断面図である。

[0237] 図17に示すように、太陽電池10bは、光入射側から順に積層された、反射防止膜9、光電変換層19、透明導電膜4および裏面電極23を備えて

いる。光電変換層 19 は、光入射側から順に、第 1 非結晶質シリコン半導体層 191、結晶シリコン基板 192（n 型または p 型半導体）、第 2 非結晶質シリコン半導体層 193 および 194（i 型および p 型層、または、i 型および n 型層）の積層によって構成されている。

[0238] 結晶シリコン基板 192 には、受光面側にテクスチャー構造が形成されている。結晶シリコン基板 192 の上記テクスチャー構造側上に、反射防止膜 9 および第 1 非結晶質シリコン半導体層 191 が順に成膜されている。

[0239] また、結晶シリコン基板 192 の受光面とは反対側の表面に、第 2 非結晶質シリコン半導体層 193 および第 2 非結晶質シリコン半導体層 194 が成膜されている。

[0240] 第 2 非結晶質シリコン半導体層 193 および第 2 非結晶質シリコン半導体層 194 は積層構造の同一階層に成膜されており、第 2 非結晶質シリコン半導体層 193 および 194 の一部（数 μm の長さ程度）が重なり合っている。第 2 非結晶質シリコン半導体層 193 および 194 の重なりは、どちらが上になってもよい。

[0241] 第 2 非結晶質シリコン半導体層 193 および 194 の結晶シリコン基板 182 と接していない側において、透明導電膜 4 が成膜されている。透明導電膜 4 は、第 2 非結晶質シリコン半導体層 193 および 194 の一部（数 μm の長さ程度）が重なっている領域付近の所定の領域において成膜されていない。透明導電膜 4 の第 2 非結晶質シリコン半導体層 193 および 194 側には、裏面電極 23 が成膜されている。

[0242] また、結晶シリコン基板 192 の受光面とは反対側の裏面に、実施形態 1 で詳しく説明したフォトリソニック結晶構造 S が、凹凸構造として形成されている。

[0243] また、第 2 非結晶質シリコン半導体層 193 および 194 内においても、実施形態 6 で詳しく説明したフォトリソニック結晶構造 S8 を形成するための凹凸構造が形成されている。結晶シリコン基板 192 の裏面における上記凹凸構造は、結晶シリコン基板 192 の裏面に成膜された第 2 非結晶質シリコン

半導体層 193 および 194 に転写されている。さらに、第 2 非結晶質シリコン半導体層 193 および 194 に対して透明導電膜 4 が成膜されていることによって、第 2 非結晶質シリコン半導体層 193 および 194 と透明導電膜 4 との屈折率差を持った凹凸構造、すなわち上記フォトニック結晶構造 S8 が形成されている。これにより、第 2 非結晶質シリコン半導体層 193 および 194 内における光閉じ込め効果が得られる。

[0244] 第 1 非結晶質シリコン半導体層 191 は、i 型半導体および n 型半導体の積層構造、または、i 型半導体および p 型半導体の積層構造によって構成されている。

[0245] 結晶シリコン基板 192 は、n 型半導体または p 型半導体によって構成されている。

[0246] 第 2 非結晶質シリコン半導体層 193 が i 型および p 型半導体の積層で構成される場合、第 2 非結晶質シリコン半導体層 194 は i 型および n 型半導体の積層となる。また、第 2 非結晶質シリコン半導体層 193 が i 型および n 型半導体の積層で構成される場合、第 2 非結晶質シリコン半導体層 194 は i 型および p 型半導体の積層となる。

[0247] 上記の構成によると、光電変換層 19 における受光面の反対側の面のパッシベーション性を向上させることができ、電流および電圧を向上させる効果を奏する。

[0248] (太陽電池の形成方法)

図 18 は、本実施形態に係る太陽電池 10b の形成フローを示している。

[0249] 図 16 の (b) に示す構造を形成後、図 18 の (a) に示すように、レジスト 30 を用いて第 2 非結晶質シリコン半導体層 193 をエッチングする。第 2 非結晶質シリコン半導体層 193 上において、レジスト 30 は第 2 非結晶質シリコン半導体層 194 と重なりがない領域および上記重なりのない領域に隣接している第 2 非結晶質シリコン半導体層 194 と重なりがある領域の一部に形成する。

[0250] 次に、図 18 の (b) に示すように、レジストを剥離する。

[0251] 次に、図 18 の (c) に示すように、結晶シリコン基板 192 の受光面に第 1 非結晶質シリコン半導体層 191 および反射防止膜 9 を成膜する。結晶シリコン基板 192 の受光面から上記記載の順番によって成膜する。

[0252] 次に、受光面とは反対の面の第 2 非結晶質シリコン半導体層 193 および 194 領域に透明導電膜 4 を成膜する。透明導電膜 4 は、第 2 非結晶質シリコン半導体層 193 および 194 が重なっている領域付近の所定の領域において成膜されない。

[0253] 次に、透明導電膜 4 上に裏面電極 23 を成膜する。

[0254] 以上の工程によって、フォトリソ結晶構造 S8 を備えたヘテロ接合バックコンタクト結晶シリコン型の太陽電池 10a を作製することができる。

[0255] [実施形態 11]

本発明の実施形態 11 について、図 22 に基づいて説明すれば、以下のとおりである。なお、説明の便宜上、実施形態 1 ～ 10 にて説明した部材と同じ機能を有する部材については、同じ符号を付記し、その説明を省略する。

[0256] 本実施形態において説明する光電変換モジュール 1000 は、実施形態 1 ～ 10 にて説明した光電変換素子 1、1a ～ 1d のうち少なくとも一つを備えている。

[0257] 実施形態 1 ～ 10 に記載の光電変換素子は高い変換効率を有するため、当該光電変換素子を備える光電変換モジュール 1000 も高い変換効率を有することができる。

[0258] (光電変換モジュールの構造)

図 22 は、本実施形態に係る光電変換モジュールの構成の一例を示す概略図である。図 22 に示すように、光電変換モジュール 1000 は、上記光電変換素子 1、1a ～ 1d のうち少なくとも一つを備えた複数の光電変換素子 1001 と、カバー 1002 と、出力端子 1013・1014 とを備えている。

[0259] 複数の光電変換素子 1001 はアレイ状に配列され直列に接続されている。図 22 には光電変換素子 1001 を直列に接続する配列を図示しているが

、配列および接続方式はこれに限定されず、並列に接続して配列してもよいし、直列と並列とを組み合わせた配列としてもよい。複数の光電変換素子 1001 の各々には、実施形態 1～10 の光電変換素子のいずれか 1 つが用いられる。なお、光電変換モジュール 1000 は、複数の光電変換素子 1001 のうち少なくとも 1 つが実施形態 1～10 の光電変換素子の何れかからなる限り、残りの光電変換素子は、上記の説明に限定されず如何なる構成をも採ることができる。また、光電変換モジュール 1000 に含まれる光電変換素子 1001 の数は 2 以上の任意の整数とすることができる。

[0260] カバー 1002 は耐候性のカバーから構成されており、複数の光電変換素子 1001 を覆う。カバー 1002 は、例えば、光電変換素子 1001 の受光面側に設けられた透明基材（例えばガラス等）と、光電変換素子 1001 の受光面側とは反対の裏面側に設けられた裏面基材（例えば、ガラス、樹脂シート等）と、上記透明基材と上記裏面基材との間の隙間を埋める封止材（例えば EVA ; Ethylene-Vinyl Acetate 等）を含む。

[0261] 出力端子 1013 は、直列に接続された複数の光電変換素子 1001 のうちのいずれか、例えば一方端に配置される光電変換素子 1001 に接続される。

[0262] 出力端子 1014 は、直列に接続された複数の光電変換素子 1001 のうちのいずれか、例えば他方端に配置される光電変換素子 1001 に接続される。

[0263] [実施形態 12]

本発明の実施形態 12 について、図 23 に基づいて説明すれば、以下のとおりである。なお、説明の便宜上、実施形態 1～11 にて説明した部材と同じ機能を有する部材については、同じ符号を付記し、その説明を省略する。

[0264] 本実施形態において説明する太陽光発電システム（光電変換システム）2000 は、実施形態 1～10 にて説明した光電変換素子 1、1a～1d のうち少なくとも一つを備える。

[0265] 実施形態 1～10 に記載の光電変換素子は高い変換効率を有するため、当

該光電変換素子を備える太陽光発電システム２０００も高い変換効率を有することができる。なお、太陽光発電システムとは、光電変換モジュールが出力する電力を適宜変換して、商用電力系統または電気機器等に供給する装置である。

[0266] (太陽光発電システムの構造)

図２３は、本実施形態に係る太陽光発電システムの構成の一例を示す概略図である。図２３に示すように、太陽光発電システム２０００は、光電変換モジュールアレイ２００１と、接続箱２００２と、パワーコンディショナ２００３と、分電盤２００４と、電力メータ２００５とを備える。後述するように光電変換モジュールアレイ２００１は複数の光電変換モジュール１０００（図２２および実施形態１１参照）から構成される。本発明の光電変換素子は高い変換効率を有するため、これを備える本発明の太陽光発電システムも高い変換効率を有することができる。

[0267] 太陽光発電システム２０００には、一般に「ホーム・エネルギー・マネジメント・システム（ＨＥＭＳ：Home Energy Management System）」、「ビルディング・エネルギー・マネージメント・システム（ＢＥＭＳ：Building Energy Management System）」等と呼ばれる機能を付加することができる。これにより太陽光発電システム２０００の発電量の監視、太陽光発電システム２０００に接続される各電気機器類の消費電力量の監視・制御等を行うことで、エネルギー消費量を削減することができる。

[0268] 接続箱２００２は光電変換モジュールアレイ２００１に接続される。パワーコンディショナ２００３は接続箱２００２に接続される。分電盤２００４はパワーコンディショナ２００３および電気機器類２０１１に接続される。電力メータ２００５は分電盤２００４および商用電力系統に接続される。

[0269] 図２５は、実施形態１２に係る太陽光発電システムの変形例の構成の一例を示す概略図である。図２５に示すように、パワーコンディショナ２００３には蓄電池２１００が接続されていてもよい。この場合、日照量の変動による太陽光発電システム２０００の出力変動を抑制することができると共に、

日照のない時間帯であっても蓄電池 2100 に蓄電された電力を太陽光発電システム 2000 は供給することができる。蓄電池 2100 はパワーコンディショナ 2003 に内蔵されていてもよい。

[0270] (太陽光発電システムの動作)

太陽光発電システム 2000 の動作を説明する。光電変換モジュールアレイ 2001 は太陽光を電気に変換して直流電力を発電し、直流電力を接続箱 2002 へ供給する。

[0271] 接続箱 2002 は光電変換モジュールアレイ 2001 が発電した直流電力を受け、直流電力をパワーコンディショナ 2003 へ供給する。

[0272] パワーコンディショナ 2003 は接続箱 2002 から受けた直流電力を交流電力に変換して分電盤 2004 へ供給する。

[0273] なお、接続箱 2002 から受けた直流電力の一部または全部を交流電力に変換せずに、直流電力のままで分電盤 2004 へ供給してもよい。また、図 25 に示すようにパワーコンディショナ 2003 に蓄電池 2100 が接続されている場合（または、蓄電池 2100 がパワーコンディショナ 2003 に内蔵されている場合）、パワーコンディショナ 2003 は接続箱 2002 から受けた直流電力の一部または全部を適切に電力変換して、蓄電池 2100 に蓄電することができる。蓄電池 2100 に蓄電された電力は、光電変換モジュールの発電量や電気機器類 2011 の電力消費量の状況に応じて適宜パワーコンディショナ 2003 側に供給され、適切に電力変換されて分電盤 2004 へ供給される。

[0274] 分電盤 2004 はパワーコンディショナ 2003 から受けた電力および電力メータ 2005 を介して受けた商用電力の少なくともいずれかを電気機器類 2011 へ供給する。また分電盤 2004 はパワーコンディショナ 2003 から受けた交流電力が電気機器類 2011 の消費電力よりも多いとき、パワーコンディショナ 2003 から受けた交流電力を電気機器類 2011 へ供給する。そして余った交流電力を電力メータ 2005 を介して商用電力系統へ供給する。

[0275] また、分電盤 2004 は、パワーコンディショナ 2003 から受けた交流電力が電気機器類 2011 の消費電力よりも少ないとき、商用電力系統から受けた交流電力およびパワーコンディショナ 2003 から受けた交流電力を電気機器類 2011 へ供給する。

[0276] 電力メータ 2005 は、商用電力系統から分電盤 2004 へ向かう方向の電力を計測するとともに、分電盤 2004 から商用電力系統へ向かう方向の電力を計測する。

[0277] (光電変換モジュールアレイの構造)

光電変換モジュールアレイ 2001 について説明する。図 24 は、図 23 または図 25 に示す光電変換モジュールアレイ 2001 の構成の一例を表す概略図である。図 24 に示すように、光電変換モジュールアレイ 2001 は、複数の光電変換モジュール 1000 と出力端子 2013, 2014 とを含む。

[0278] 複数の光電変換モジュール 1000 はアレイ状に配列され直列に接続されている。図 24 には光電変換モジュール 1000 を直列に接続する配列を図示しているが、配列および接続方式はこれに限定されず、並列に接続して配列してもよいし、直列と並列とを組み合わせた配列としてもよい。なお、光電変換モジュールアレイ 2001 に含まれる光電変換モジュール 1000 の数は 2 以上の任意の整数とすることができる。

[0279] 出力端子 2013 は、直列に接続された複数の光電変換モジュール 1000 の一方端に位置する光電変換モジュール 1000 に接続される。

[0280] 出力端子 2014 は、直列に接続された複数の光電変換モジュール 1000 の他方端に位置する光電変換モジュール 1000 に接続される。

[0281] なお、以上の説明はあくまでも一例であり、本実施形態の太陽光発電システムは、光電変換モジュール 1000 を構成する複数の光電変換素子 1001 のうち、少なくとも一つが実施形態 1～10 に記載の光電変換素子の何れかからなる限り、残りの光電変換素子は上記の説明に限定されず如何なる構成をも採ることができる。

[0282] 〔実施形態 13〕

本発明の実施形態 13 について、図 26 に基づいて説明すれば、以下のとおりである。なお、説明の便宜上、実施形態 1～12 にて説明した部材と同じ機能を有する部材については、同じ符号を付記し、その説明を省略する。

[0283] 本実施形態において説明する太陽光発電システム（光電変換システム）4000 は、実施形態 12 にて説明した太陽光発電システム 2000（図 23）より大規模な太陽光発電システムである。実施形態 1～10 に記載の光電変換素子は高い変換効率を有するため、当該光電変換素子を備える太陽光発電システム 4000 も高い変換効率を有することができる。

[0284] （大規模太陽光発電システムの構造）

図 26 は、本実施形態に係る太陽光発電システムの構成の一例を示す概略図である。図 26 に示すように、太陽光発電システム 4000 は、複数のサブシステム 4001 と、複数のパワーコンディショナ 4003 と、変圧器 4004 とを備えている。本発明の光電変換素子は高い変換効率を有するため、これを備える本発明の太陽光発電システム 4000 も高い変換効率を有することができる。

[0285] 複数のパワーコンディショナ 4003 は、それぞれサブシステム 4001 に接続される。太陽光発電システム 4000 において、パワーコンディショナ 4003 およびそれに接続されるサブシステム 4001 の数は 2 以上の任意の整数とすることができる。

[0286] 図 27 は、実施形態 13 に係る太陽光発電システムの変形例の構成の一例を示す概略図である。図 27 に示すようにパワーコンディショナ 4003 には蓄電池 4100 が接続されていてもよい。この場合、日照量の変動による太陽光発電システム 4000 の出力変動を抑制できると共に、日照のない時間帯であっても蓄電池 4100 に蓄電された電力を太陽光発電システム 4000 は供給することができる。また、蓄電池 4100 はパワーコンディショナ 4003 に内蔵されていてもよい。

[0287] 変圧器 4004 は、複数のパワーコンディショナ 4003 および商用電力

系統に接続される。

[0288] 複数のサブシステム4001の各々は、複数のモジュールシステム3000から構成される。サブシステム4001内のモジュールシステム3000の数は2以上の任意の整数とすることができる。

[0289] 複数のモジュールシステム3000（図26）の各々は、複数の光電変換モジュールアレイ2001と、複数の接続箱3002と、集電箱（接続箱）3004とを含む。モジュールシステム3000内の接続箱3002およびそれに接続される光電変換モジュールアレイ2001の数は2以上の任意の整数とすることができる。

[0290] 集電箱3004は複数の接続箱3002に接続される。またパワーコンディショナ4003はサブシステム4001内の複数の集電箱3004に接続される。

[0291] （大規模太陽光発電システムの動作）

太陽光発電システム4000の動作を説明する。モジュールシステム3000の複数の光電変換モジュールアレイ2001は、太陽光を電気に変換して直流電力を発電し、直流電力を接続箱3002を介して集電箱3004へ供給する。サブシステム4001内の複数の集電箱3004は、直流電力をパワーコンディショナ4003へ供給する。さらに複数のパワーコンディショナ4003は、直流電力を交流電力に変換して、交流電力を変圧器4004へ供給する。

[0292] なお、図27に示すようにパワーコンディショナ4003に蓄電池4100が接続されている場合（または、蓄電池4100がパワーコンディショナ4003に内蔵される場合）、パワーコンディショナ4003は集電箱3004から受けた直流電力の一部または全部を適切に電力変換して、蓄電池4100に蓄電することができる。蓄電池4100に蓄電された電力は、サブシステム4001の発電量に応じて適宜パワーコンディショナ4003側に供給され、適切に電力変換されて変圧器4004へ供給される。

[0293] 変圧器4004は複数のパワーコンディショナ4003から受けた交流電

力の電圧レベルを変換して商用電力系統へ供給する。

[0294] なお、太陽光発電システム4000は、実施形態1～10に記載の光電変換素子のうち少なくとも一つを備えるものであればよく、太陽光発電システム4000に含まれる全ての光電変換素子が実施形態1～10に記載の光電変換素子である必要はない。

[0295] たとえば、あるサブシステム4001に含まれる光電変換素子の全てが実施形態1～10の光電変換素子の何れかであり、別のサブシステム4001に含まれる光電変換素子の一部もしくは全部が、実施形態1～10に記載の光電変換素子でない場合等もあり得る。

[0296] 本発明は上述した各実施形態に限定されるものではなく、請求項に示した範囲で種々の変更が可能であり、異なる実施形態にそれぞれ開示された技術的手段を適宜組み合わせて得られる実施形態についても本発明の技術的範囲に含まれる。さらに、各実施形態にそれぞれ開示された技術的手段を組み合わせることにより、新しい技術的特徴を形成することができる。

[0297] [まとめ]

本発明の態様1に係る光電変換素子(1、1a～1d)は、光電変換層(5)を形成する材質の屈折率とは屈折率の異なる異屈折率領域(4、4a～4m)を形成したフォトニック結晶(S、S2～S4、S6)が、上記光電変換層に形成された光電変換素子であって、上記異屈折率領域が、上記光電変換層の面内方向に平行な正方格子の複数の格子点に対応して形成されており、上記異屈折率領域が、上記光電変換層の受光面側から上記光電変換層の内部に位置する先端までテーパ状に形成されているテーパ状突起部を備えている。

[0298] 上記の構成によると、異屈折率領域が、光電変換層の受光面側から上記光電変換層の内部に位置する先端までテーパ状に形成されているテーパ状突起部を備えているという第一の構成のため、フォトニック結晶構造において生じるフォトニック結晶間の光電変換層の成膜阻害、すなわち欠陥の形成を抑制できる。よって、光電変換層で発生したキャリアが欠陥によって消失

する不具合が抑制されるので、光電変換素子の光電変換効率を向上させることができる。

[0299] また、上記の構成によると、上記第一の構成に加えて、上記異屈折率領域が、上記光電変換層の面内方向に平行な正方格子の複数の格子点に対応して形成されているという第二の構成のため、フォトリック結晶構造の共振効果の大きさ（Q値）を従来のフォトリック結晶構造よりも小さくすることができる。

[0300] よって、フォトリック結晶構造による共振効果の大きさを光電変換層の媒質の光吸収による共振効果の大きさに近似させることができ、特に光電変換層の材料において吸収の大きな（共振効果の大きさを表すQ値が小さい）波長域に対して、従来のフォトリック結晶の構造に比べて光の取り込み量を増大させ、光電変換層の光吸収量を向上させることができる。

[0301] 本発明の態様2に係る光電変換素子は、上記態様1において、上記異屈折率領域の断面であって、上記光電変換層の受光面側の界面において、当該界面の面内方向に平行な断面を、上記異屈折率領域の底面とした場合、上記底面の形状は円形、多角形または楕円形であり、上記異屈折率領域は、隣り合う上記異屈折率領域の底面の中心間の距離であるピッチ（P、P1）が、100nm以上かつ2000nm以下であり、上記光電変換層の上記界面を基準とした上記異屈折率領域の高さ（T、T1）が100nm以上かつ上記光電変換層の厚み（L、L1）以下であり、上記底面の直径、または上記多角形の外接円の直径、または上記楕円形の長径または短径（2r、2r1）が、50nm以上かつ上記ピッチよりも短く、上記光電変換層の厚みがLの場合、上記テーパ状突起部の傾斜面と上記底面との角度（ θ 、 θ_1 ）が 5.7° 以上かつ $(\arctan(L/50)/\pi) \times 180^\circ$ 以下であることが好ましい。

[0302] 上記の構成によれば、隣り合う上記異屈折率領域の底面の中心間の距離であるピッチが、100nm以上であるため、フォトリック結晶による共振効果を得ることができる。

- [0303] 例えば、Fine Difference Time Domain (FDTD) 法を用いた計算機シミュレーションにおいては、上記ピッチが100nmよりも小さい場合、フォトリック結晶による共振効果を得ることができない。
- [0304] また、上記ピッチが、2000nm以下であるため、太陽電池に適する可視光の波長において、フォトリック結晶による共振効果を得ることができる。
- [0305] さらに、上記異屈折率領域の高さが100nm以上であるため、フォトリック結晶による光閉じ込め効果が得られ、フォトリック結晶がない場合に比べて光吸収量が増大することになる。例えば、FDTDを用いた計算機シミュレーションにおいては、上記屈折率領域の高さが100nmよりも低い場合、フォトリック結晶がない場合と同等程度の光吸収量となる。また、上記異屈折率領域の高さが上記光電変換層の厚み以下であるので、異屈折率領域を光電変換層内に形成できる。すなわち、光電変換層の厚みは、異屈折率領域を光電変換層内に形成するための構造的な限界である。
- [0306] さらに、上記異屈折率領域の底面の直径が、50nm以上であるために、フォトリック結晶による光閉じ込め効果が得られる。
- [0307] 例えば、FDTDを用いた計算機シミュレーションにおいては、上記屈折率領域の底面の直径が50nmよりも短い場合、フォトリック結晶がない場合と同等程度の光吸収量となる。また、上記異屈折率領域の底面の直径が上記隣り合う上記ピッチよりも短いため、隣り合う異屈折率領域と重なり合わない。よって、隣り合う異屈折率領域が重なり合うことによって共振効果が減衰し、上記光電変換層における光吸収の効果が弱まることを防止することができる。
- [0308] さらに、上記光電変換層の厚みがLの場合、上記テーパ状突起部の傾斜面と上記底部との角度が 5.7° 以上かつ $(\arctan(L/50)/\pi) \times 180^\circ$ 以下であるため、上記異屈折率領域の高さおよびピッチの上記条件を満たすことができる。

- [0309] 本発明の態様3に係る光電変換素子では、上記態様1または2において、上記異屈折率領域は上記光電変換層の受光面側の界面に形成されており、上記異屈折率領域は上記テーパ状突起部のみから形成されてもよい。
- [0310] 本発明の態様4に係る光電変換素子では、上記態様1または2において、上記異屈折率領域は上記光電変換層の受光面側の界面に形成されており、上記異屈折率領域は上記テーパ状突起部（41f、41g）および側面が傾斜を持たない柱部（42f、42g）から形成されており、上記異屈折率領域は、受光面側から上記柱部および上記テーパ状突起部の順に備えていることが好ましい。
- [0311] 上記の構成によると、異屈折率領域がテーパ状突起部を有していることから従来のフォトリソニック結晶を備えた光電変換層に比べ、光の取り込み量を増大させるので、光吸収量を増大させることができ、かつ、異屈折率領域が、対面する面同士が傾斜をもたない柱部を備えたことによって、フォトリソニック結晶の大きな光閉じ込め効果を得ることができ、欠陥が少なくなるため、電子の取り出しの向上にもつながる。したがって、光電変換素子の光電変換効率を向上させることができる。
- [0312] 本発明の態様5に係る光電変換素子は、上記態様1から4において、上記異屈折率領域が誘電体（40）によって形成されており、さらに、上記異屈折率領域と上記光電変換層との境界において、上記異屈折率領域が透明導電膜（9）によって覆われていることが好ましい。
- [0313] 上記の構成によると、透明導電膜は、光電変換層から電流を取り出す陽電極および陰電極の一方としての役割を担うことができる。したがって、光電変換層の受光面側に位置し、誘電体によって形成されている異屈折率領域が原因として生じる光電変換素子からの電流の取り出しの低下を、防止することができる。
- [0314] 本発明の態様6に係る光電変換素子は、上記態様1または2において、上記正方格子の格子定数 p は、 $100\text{ nm} \leq p < 450\text{ nm}$ であり、上記異屈折率領域は、上記光電変換層の面内方向に平行な断面において少なくとも3

種類以上の大きさを備えており、上記複数の異屈折率領域は、上記面内方向において、断面の大きさの違いに応じた複数種類の固有の二次元構造を形成するように、断面の大きさごとに多点配置され、さらに、上記複数種類の固有の二次元構造の組み合わせによって単位構造が形成されており、上記単位構造内において、上記複数種類の固有の二次元構造は、任意の基準点に対して互いに拡大縮小しても相似形にはならない形状を備え、上記単位構造が繰り返して形成された周期構造を備えている。

[0315] 上記の構成によれば、光電変換層の面内方向において、フォトニック結晶に互いに異なる形状の複数の二次元構造が配置されることによって、フォトニック結晶と入射光とが相互作用（干渉および共振）し、光吸収増大効果が得られる入射光の波長を増やすことが可能となる。よって、連続した波長に対して光吸収を増大させる効果を奏する。

[0316] なお、上記異屈折率領域が、複数の格子点に対応して形成されているとは、異屈折率領域の中心が、格子点と一致していても、一致していなくてもよいことを意味している。

[0317] 上記異屈折率領域の断面（光電変換層の面内方向に平行な断面）の大きさは、3種類以上に分けられる。同じ大きさを持つ複数の異屈折率領域の断面は、上記面内方向において、複数の格子点に対応して配置（多点配置）され、断面の大きさごとに固有の二次元構造を形成している。

[0318] したがって、断面の大きさに応じた3種類以上の二次元構造が形成され、上記フォトニック結晶には、これらの二次元構造の組み合わせによる単位構造が形成されているとともに、上記単位構造が周期的に形成されている。

[0319] また、上記3種類以上の二次元構造の二次元形状は、互いに異なっている。互いに異なっているとは、任意の基準点に対して、ある二次元構造を形成している各異屈折率領域の中心を同一比率で拡大縮小しても、他の二次元構造の形状に重なることがない（形状が比例変換されない）との意味である。なお、任意の基準点に対して、上記中心を同一比率で拡大縮小する図形変換には、回転による図形変換を含まない。

- [0320] 本発明の態様7に係る光電変換素子は、上記態様6において、1つの大きさの断面を備えた上記異屈折率領域が形成している上記固有の二次元構造に含まれた上記多点配置の一部が、他の大きさの断面を備えた上記異屈折率領域によって置き換わっていないことが好ましい。
- [0321] 上記の構成によれば、異なる大きさの例えば2つの異屈折率領域が同一の格子点へ配置されることを回避できる。したがって、ある二次元構造を形成する異屈折率領域が、異なる断面の大きさを備える異屈折率領域によって置き換わることはない。よって、種類の異なる二次元構造同士が光閉じ込めの効果を減少させる影響を小さくすることができるので、光閉じ込めの効果の減少を防止する効果を奏する。
- [0322] 本発明の態様8に係る光電変換システム(2000)は、上記態様1～6のいずれかに記載の光電変換素子(1、1a～1d)を少なくとも1つ含む複数の光電変換素子(1001)がアレイ状に配されており、当該複数の光電変換素子を覆うカバー(1002)と、上記複数の光電変換素子の何れかに接続されている出力端子(1013、1014)とを備えた光電変換モジュール(1000)と、上記光電変換モジュールから供給される電力を受けるパワーコンディショナ(2003)とを備えることが好ましい。これにより、光電変換の効率が高い光電変換システムを得ることができる。
- [0323] 本発明の態様9に係る光電変換システム(4000)は、上記態様1～6のいずれかに記載の光電変換素子(1、1a～1d)を少なくとも1つ含む複数の光電変換素子(1001)がアレイ状に配されており、当該複数の光電変換素子を覆うカバー(1002)と、上記複数の光電変換素子の何れかに接続されている出力端子(1013、1014)とを備えた光電変換モジュール(1000)と、上記光電変換モジュールがアレイ状に複数枚配された光電変換モジュールアレイ(2001)と、上記光電変換モジュールアレイから供給される電力を受けるパワーコンディショナ(4003)とを備えることが好ましい。これにより、光電変換の効率が高い光電変換システムを得ることができる。

[0324] 本発明は上述した各実施形態に限定されるものではなく、請求項に示した範囲で種々の変更が可能であり、異なる実施形態にそれぞれ開示された技術的手段を適宜組み合わせて得られる実施形態についても本発明の技術的範囲に含まれる。さらに、各実施形態にそれぞれ開示された技術的手段を組み合わせることにより、新しい技術的特徴を形成することができる。

産業上の利用可能性

[0325] 本発明は、光電変換素子および光電変換素子の製造方法に利用することができる。

符号の説明

[0326]	1、1 a～1 d	光電変換素子
	4、4 a～4 m	異屈折率領域
	5	光電変換層
	3、6、9	透明導電膜
	10、40	誘電体
	41 f、41 g	テーパー状突起部
	42 f、42 g	柱部
	2 r、2 r 1	直径
	L、L 1	光電変換層の厚み
	P、P 1	異屈折率領域の底面の中心間の距離（ピッチ）
	S、S 1～S 6	フォトリソニック結晶構造（フォトリソニック結晶）
	T、T 1	異屈折率領域の高さ
	θ 、 θ 1	角度
	1000	光電変換モジュール
	1001	光電変換素子
	1002	カバー
	1013、1014	出力端子
	2000	光電変換システム
	2003、4003	パワーコンディショナ

4 0 0 0 光電変換システム

請求の範囲

[請求項1] 光電変換層を形成する材質の屈折率とは屈折率の異なる異屈折率領域を形成したフォトリソニック結晶が、上記光電変換層に形成された光電変換素子であって、

上記異屈折率領域が、上記光電変換層の面内方向に平行な正方格子の複数の格子点に対応して形成されており、

上記異屈折率領域が、上記光電変換層の受光面側から上記光電変換層の内部に位置する先端までテーパ状に形成されているテーパ状突起部を備えたことを特徴とする光電変換素子。

[請求項2] 上記異屈折率領域の断面であって、上記光電変換層の受光面側の界面において、当該界面の面内方向に平行な断面を、上記異屈折率領域の底面とした場合、

上記底面の形状は円形、多角形または楕円形であり、

上記異屈折率領域は、隣り合う上記異屈折率領域の底面の中心間の距離であるピッチが、 100 nm 以上かつ 2000 nm 以下であり、

上記光電変換層の上記界面を基準とした上記異屈折率領域の高さが 100 nm 以上かつ上記光電変換層の厚み以下であり、

上記底面の直径、または上記多角形の外接円の直径、または上記楕円形の長径または短径が、 50 nm 以上かつ上記ピッチよりも短く、

上記光電変換層の厚みが L の場合、上記テーパ状突起部の傾斜面と上記底面との角度が 5.7° 以上かつ $(\arctan(L/50)/\pi) \times 180^\circ$ 以下であることを特徴とする請求項1に記載の光電変換素子。

[請求項3] 上記正方格子の格子定数 p は、 $100\text{ nm} \leq p < 450\text{ nm}$ であり、

上記異屈折率領域は、上記光電変換層の面内方向に平行な断面にお

いて少なくとも3種類以上の大きさを備えており、

上記複数の異屈折率領域は、上記面内方向において、断面の大きさの違いに応じた複数種類の固有の二次元構造を形成するように、断面の大きさごとに多点配置され、

さらに、上記複数種類の固有の二次元構造の組み合わせによって単位構造が形成されており、

上記単位構造内において、上記複数種類の固有の二次元構造は、任意の基準点に対して互いに拡張しても相似形にはならない形状を備え、

上記単位構造が繰り返し形成された周期構造を備えていることを特徴とする請求項1および2に記載の光電変換素子。

[請求項4] 1つの大きさの断面を備えた上記異屈折率領域が形成している上記固有の二次元構造に含まれた上記多点配置の一部が、他の大きさの断面を備えた上記異屈折率領域によって置き換わっていないことを特徴とする請求項3に記載の光電変換素子。

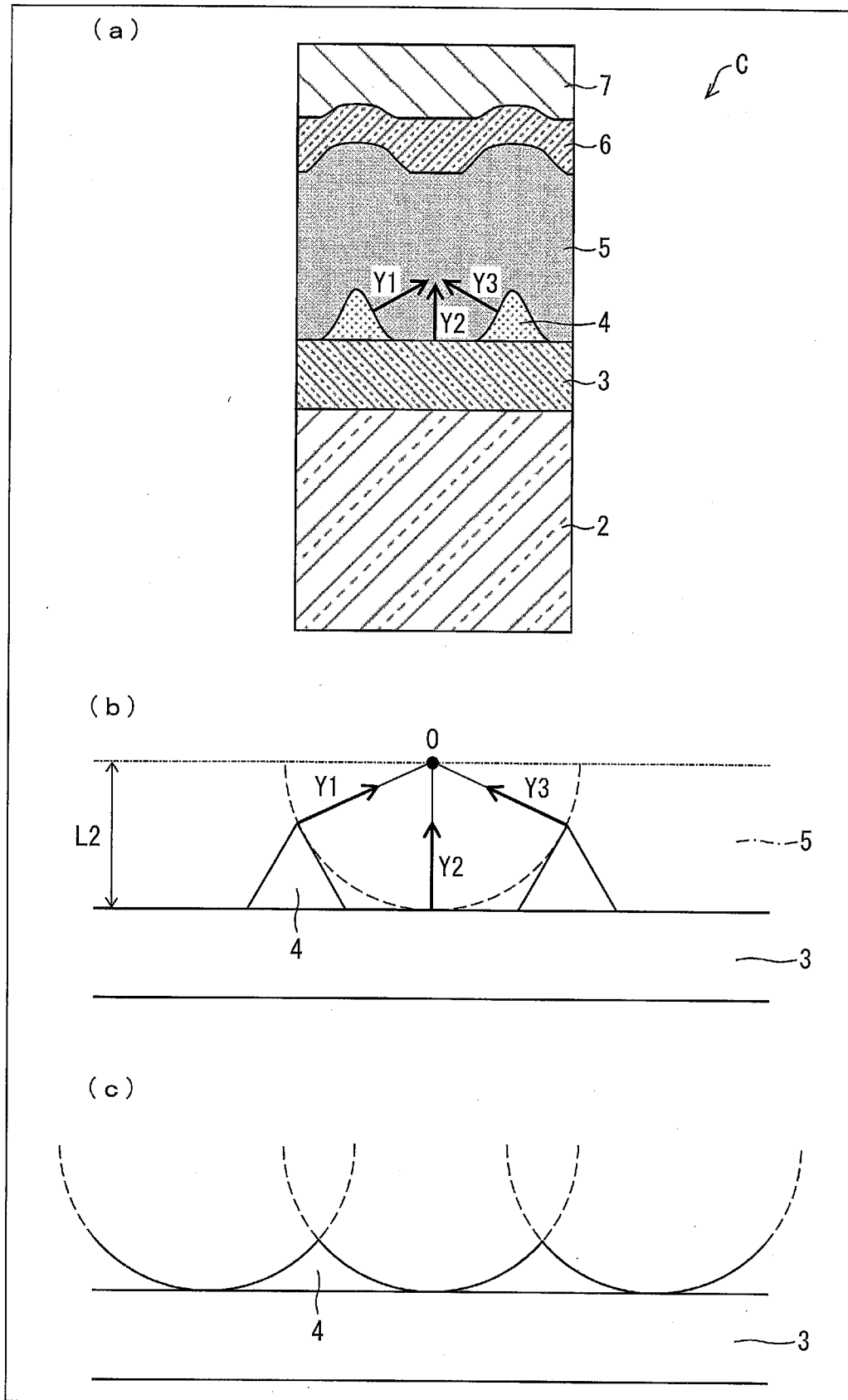
[請求項5] 請求項1～4の何れか1項に記載の光電変換素子を少なくとも1つ含む複数の光電変換素子がアレイ状に配されており、当該複数の光電変換素子を覆うカバーと、上記複数の光電変換素子の何れかに接続されている出力端子とを備えた光電変換モジュールと、

上記光電変換モジュールがアレイ状に複数枚配された光電変換モジュールアレイと、

上記光電変換モジュールアレイから供給される電力を受けるパワーコンディショナとを備えたことを特徴とする光電変換システム。

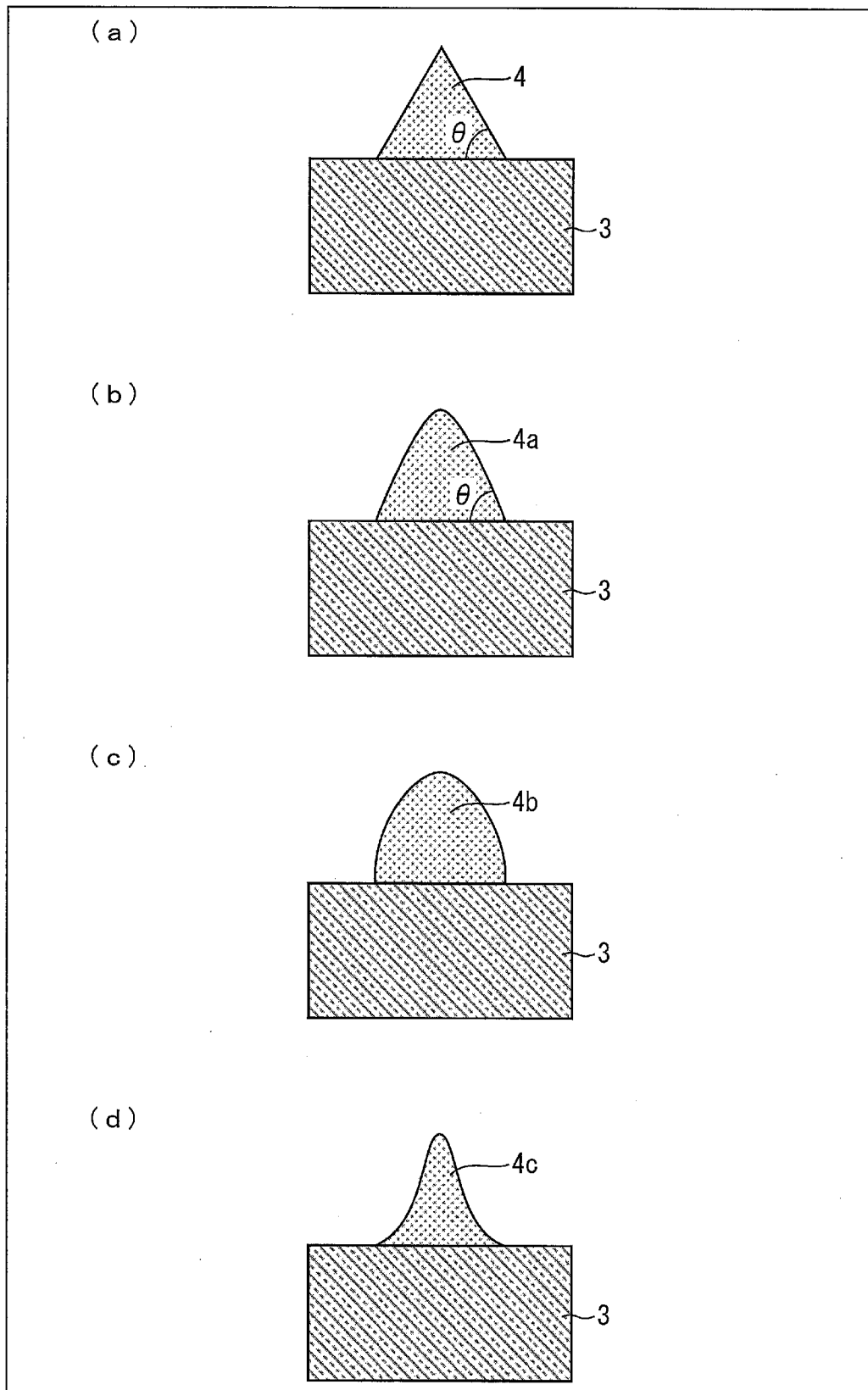
[図2]

図 2



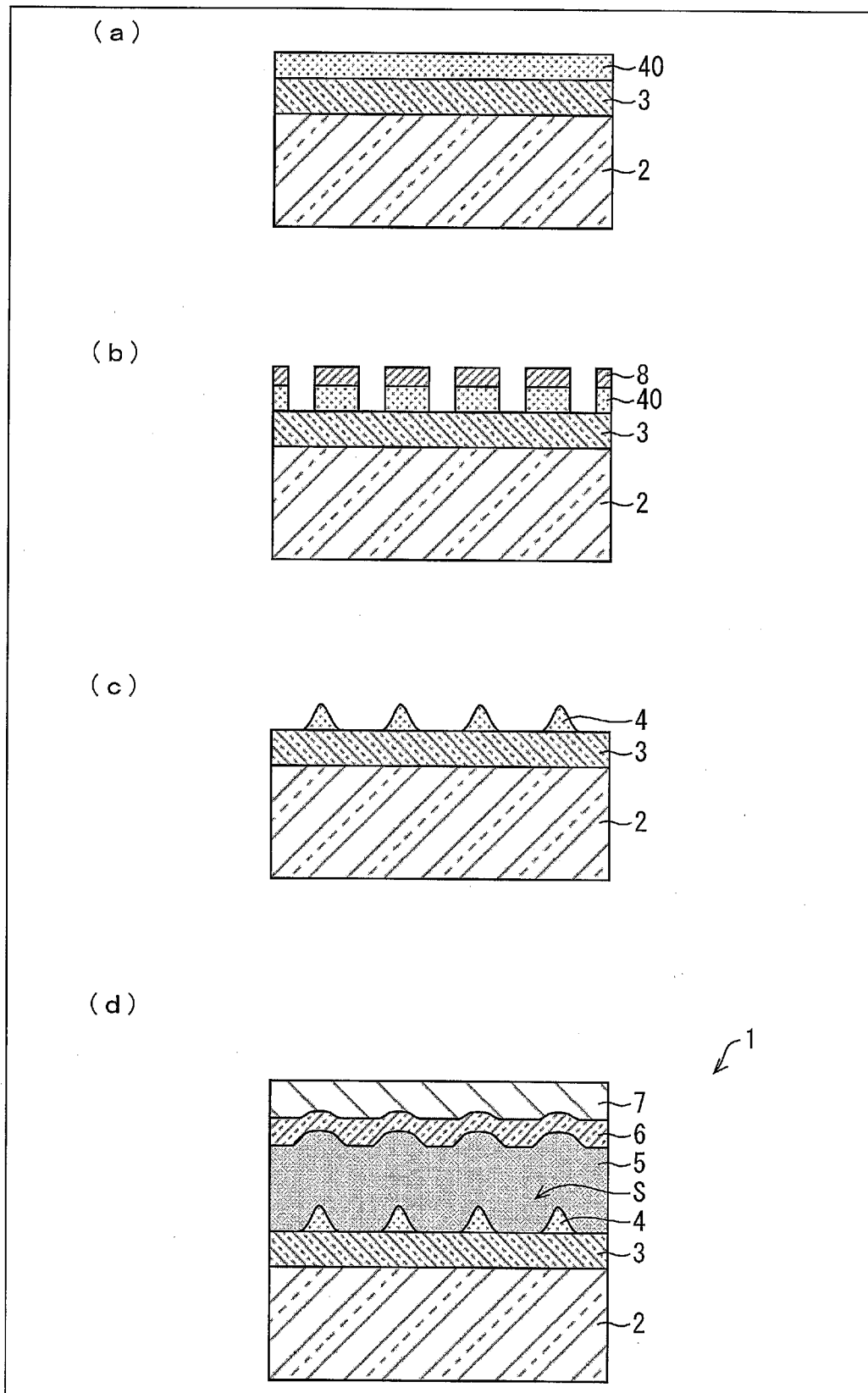
[図3]

図 3



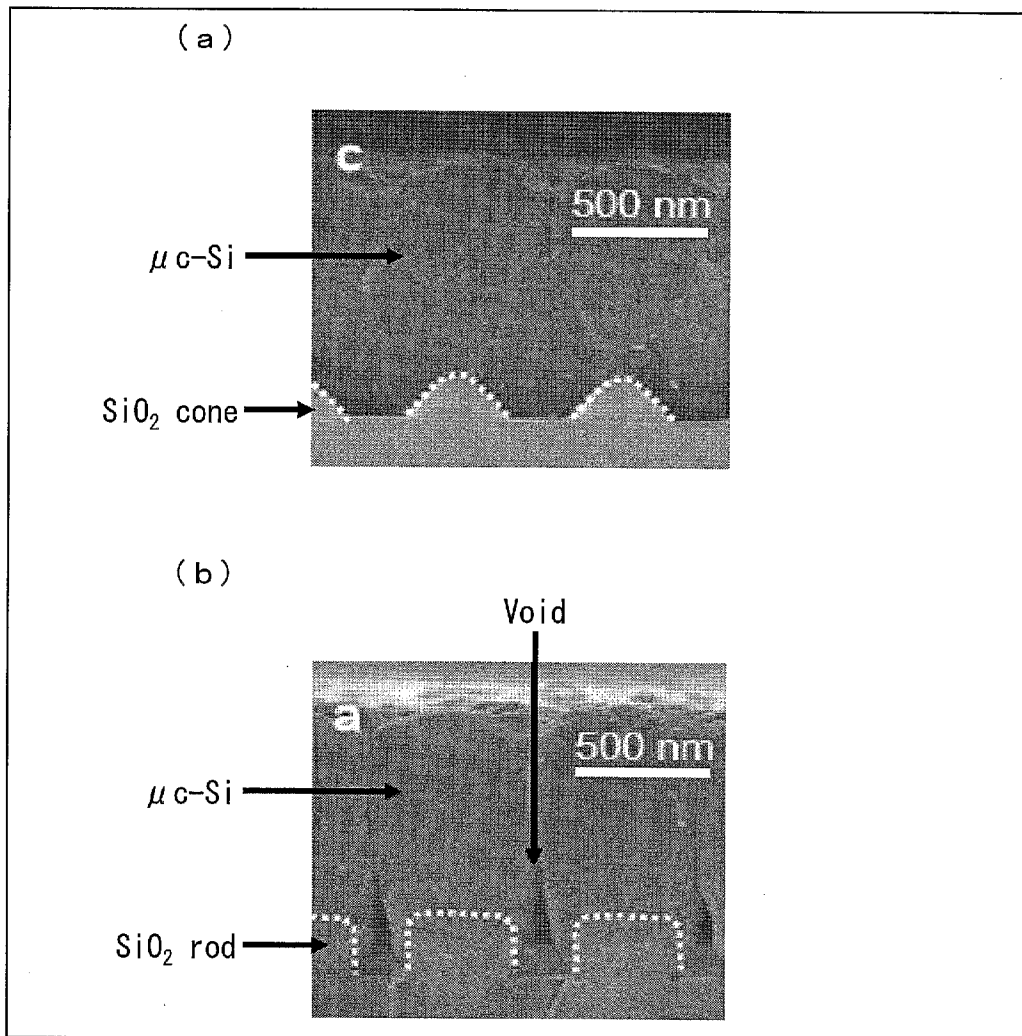
[図4]

図 4



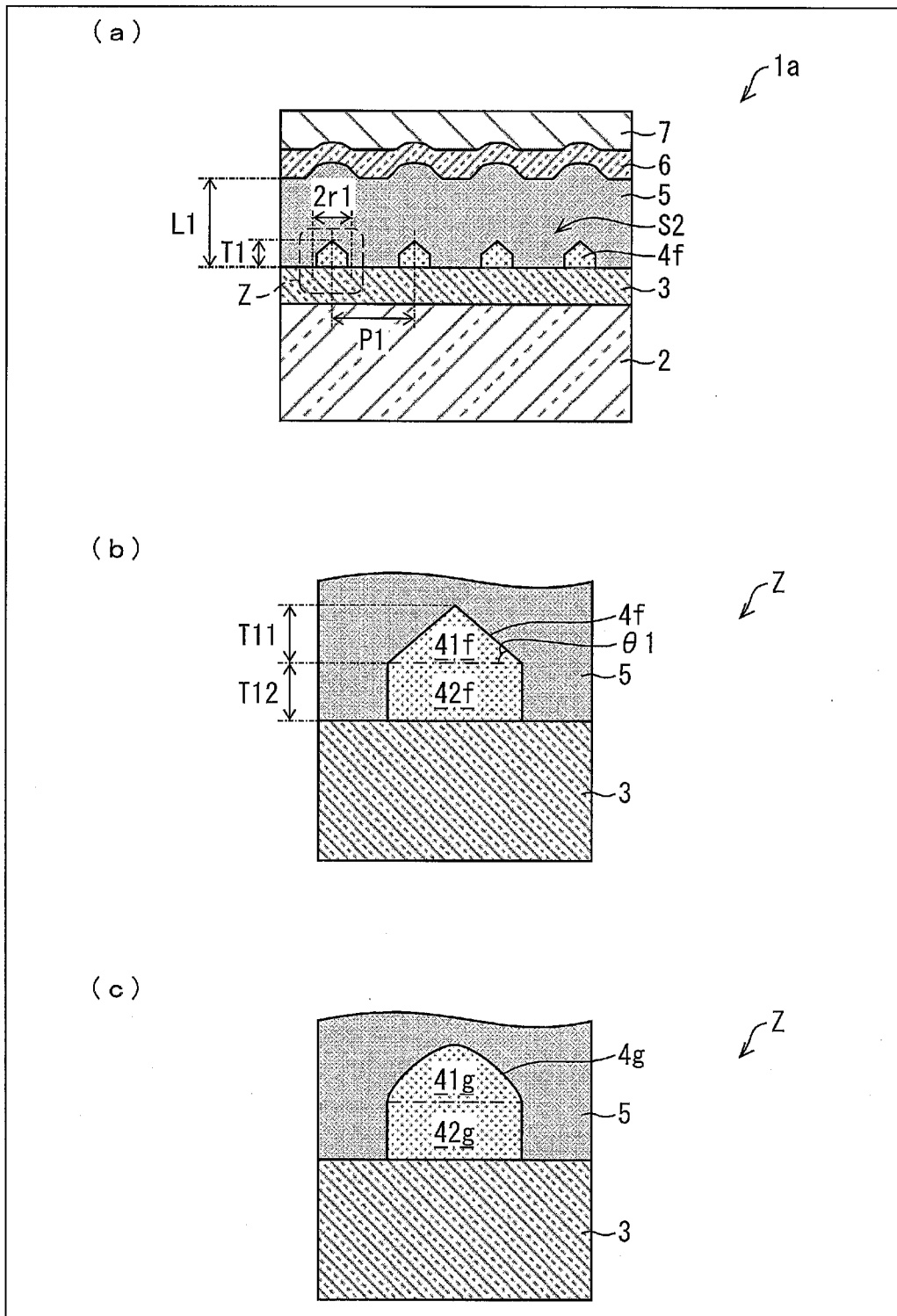
[図5]

図 5



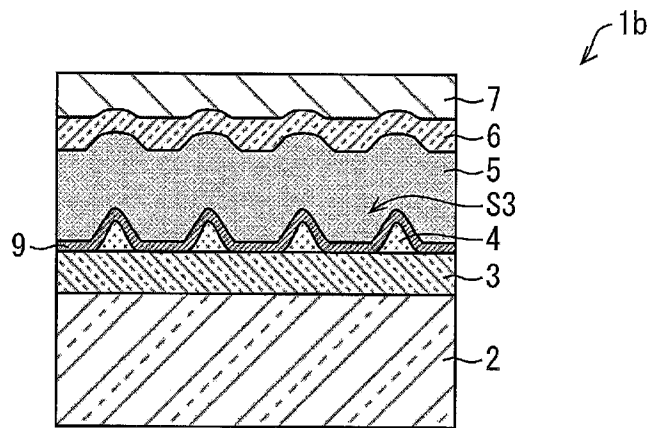
[図6]

図 6



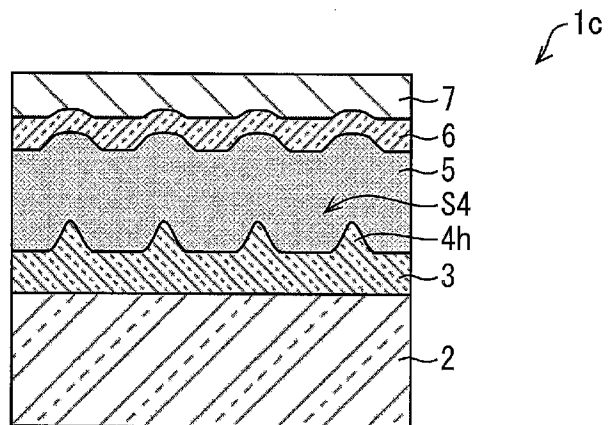
[図7]

図 7



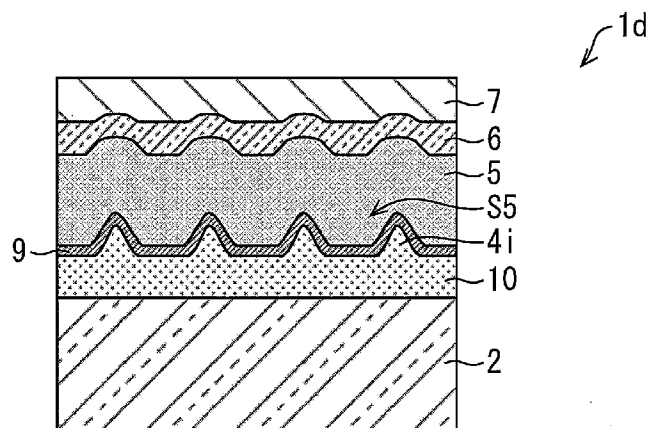
[図8]

図 8



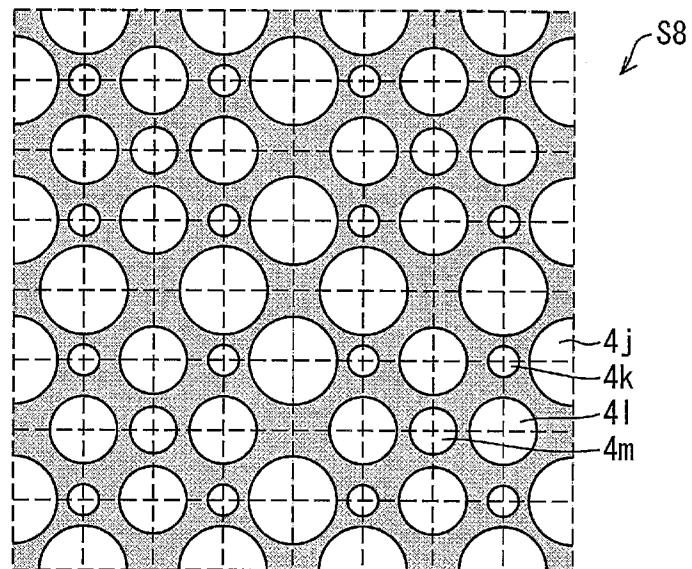
[図9]

図 9



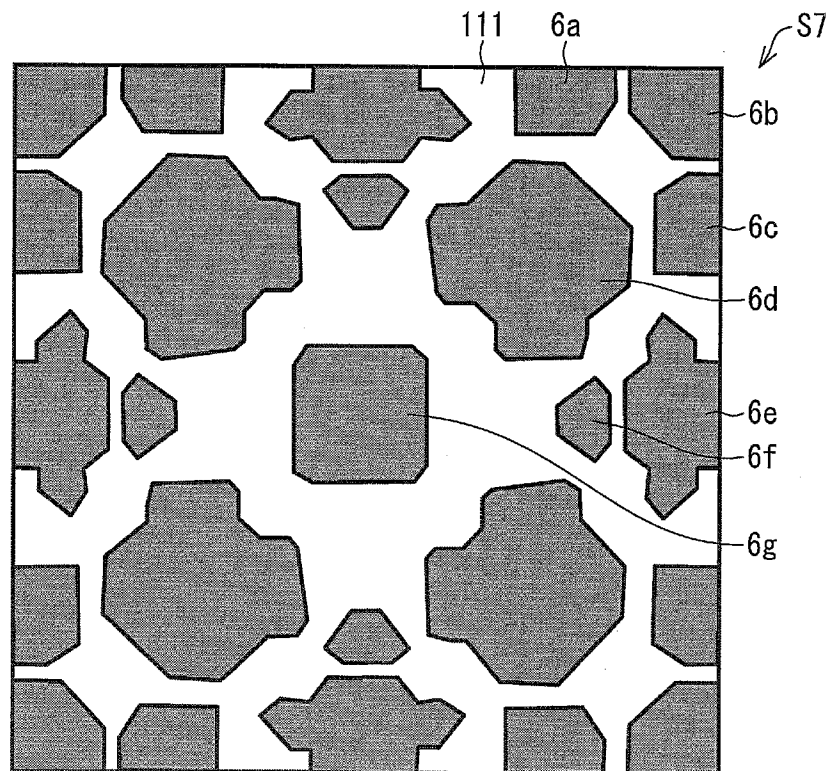
[図10]

図 10



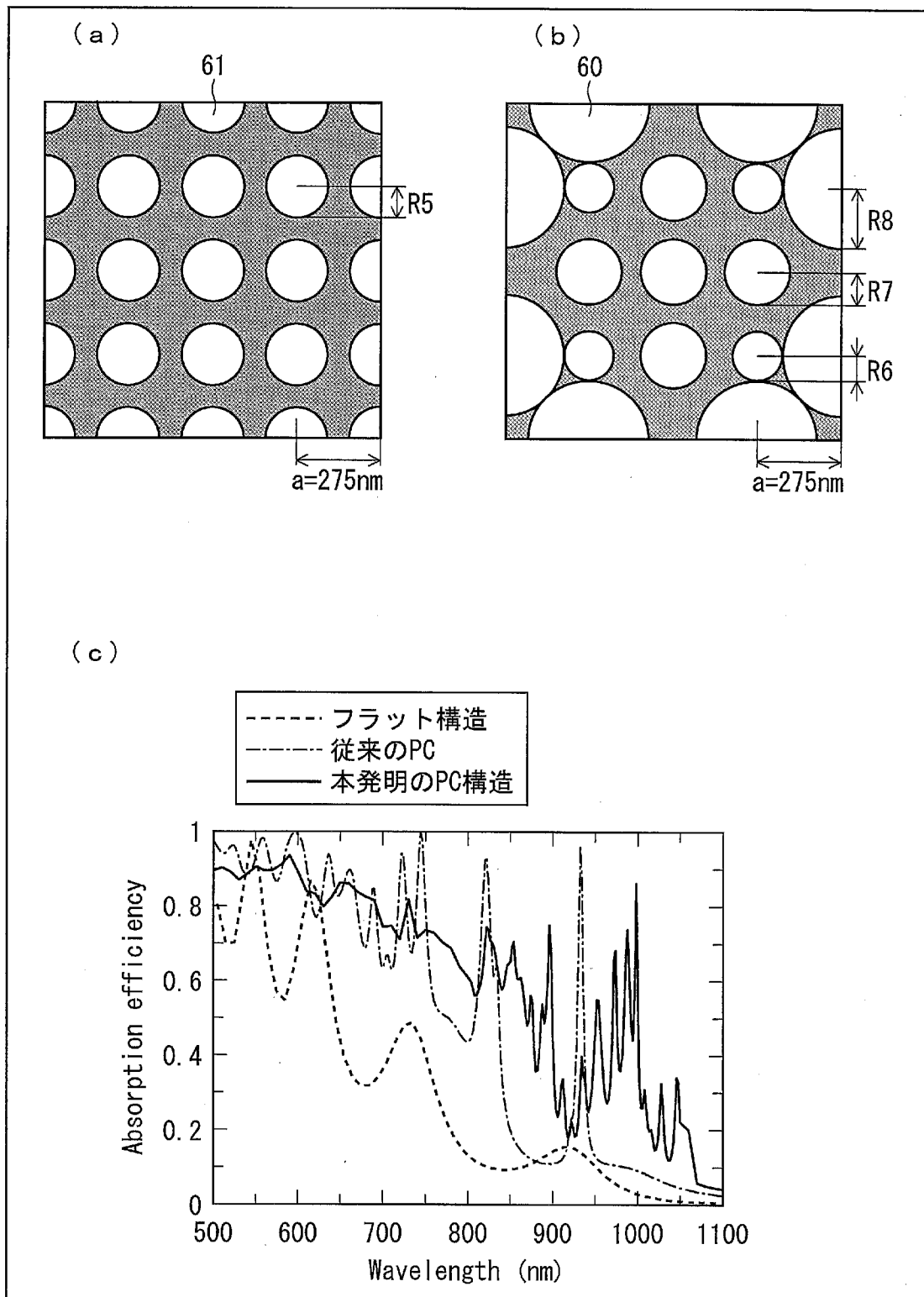
[図11]

図 11



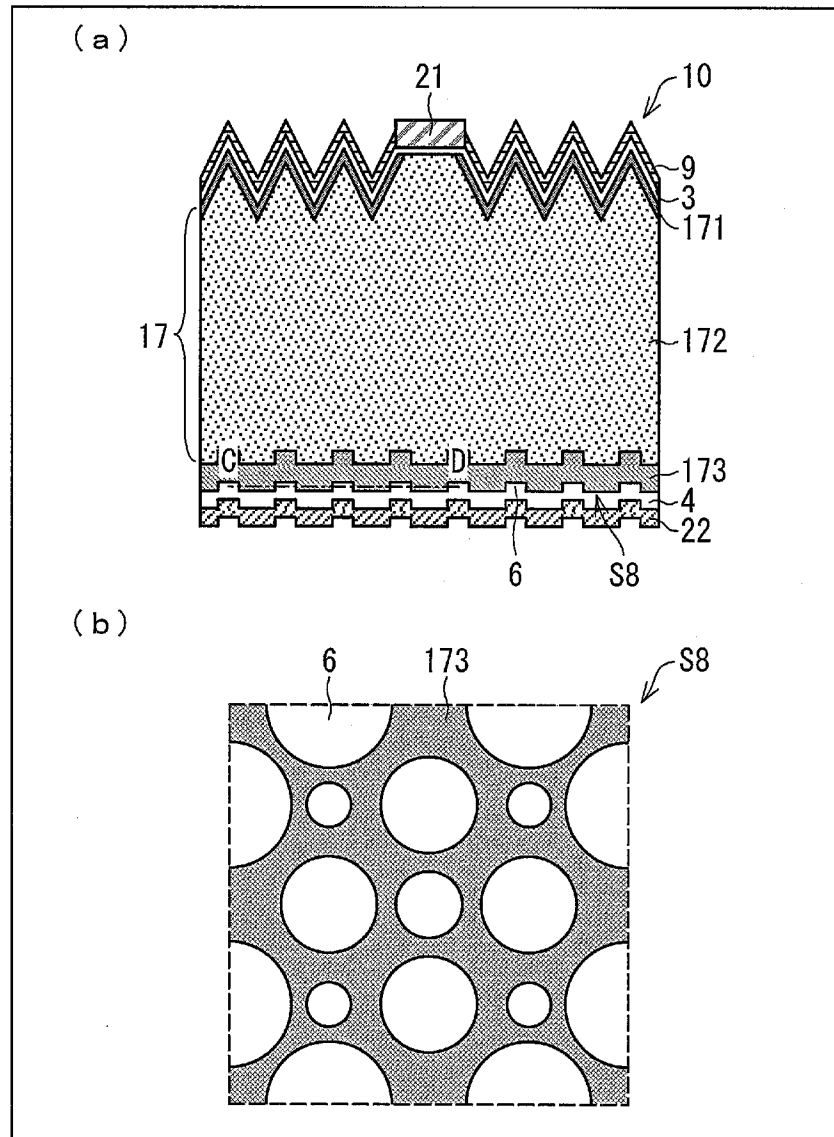
[図12]

図 12



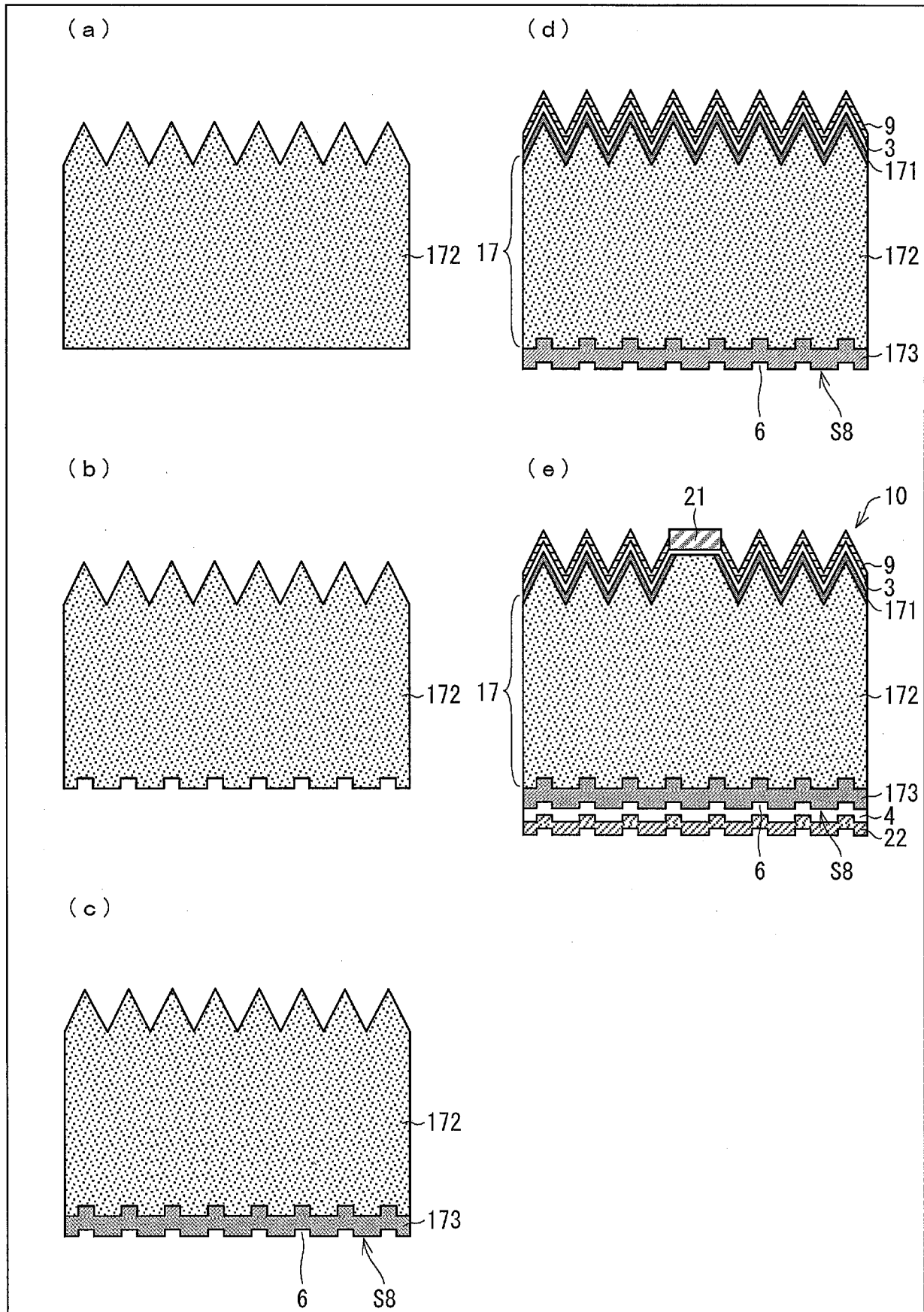
[図13]

図 13



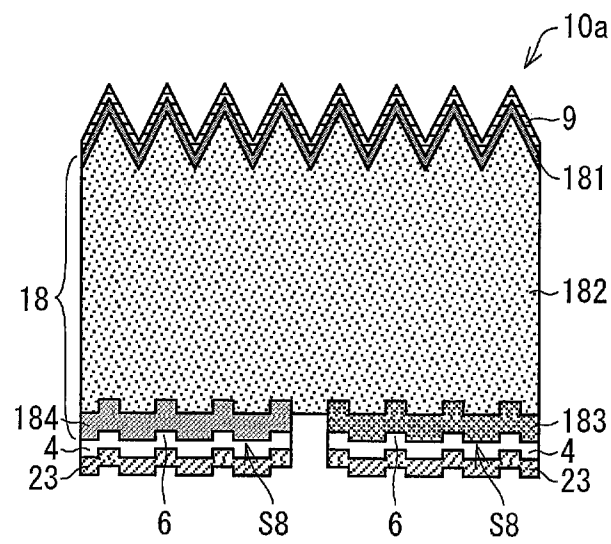
[図14]

図 14



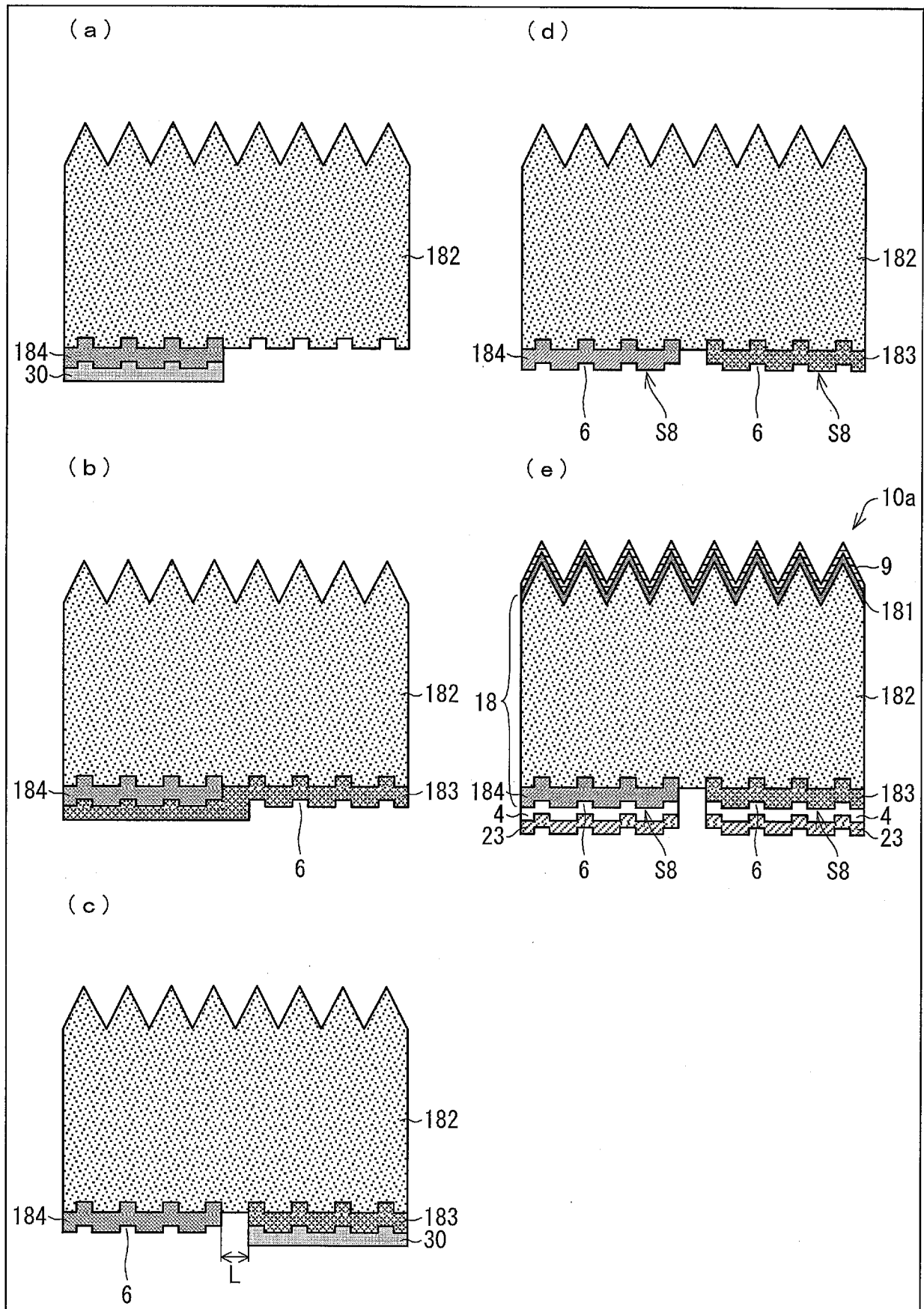
[図15]

図 15



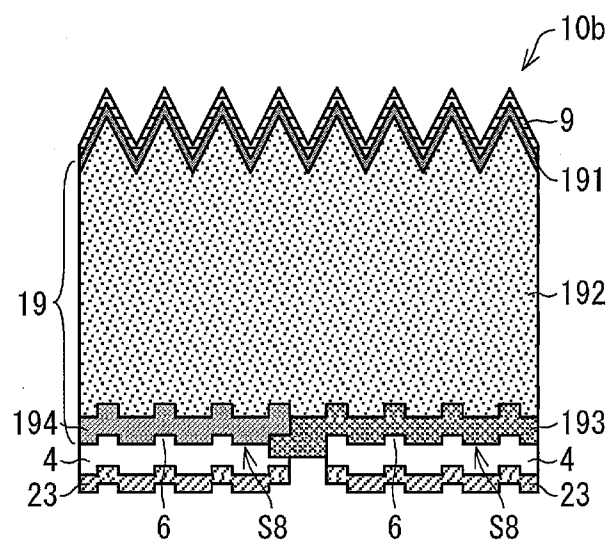
[図16]

図 16



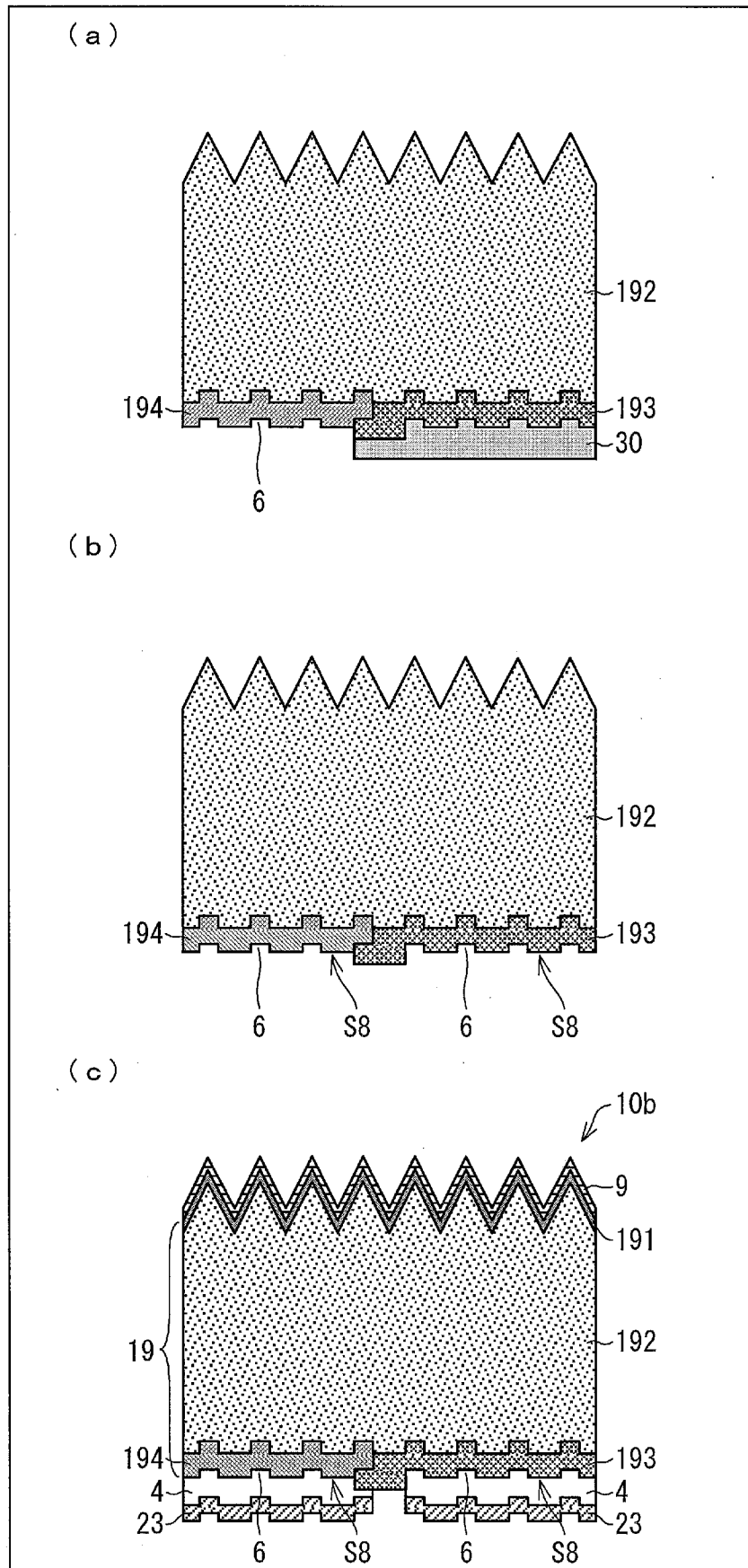
[図17]

図 17



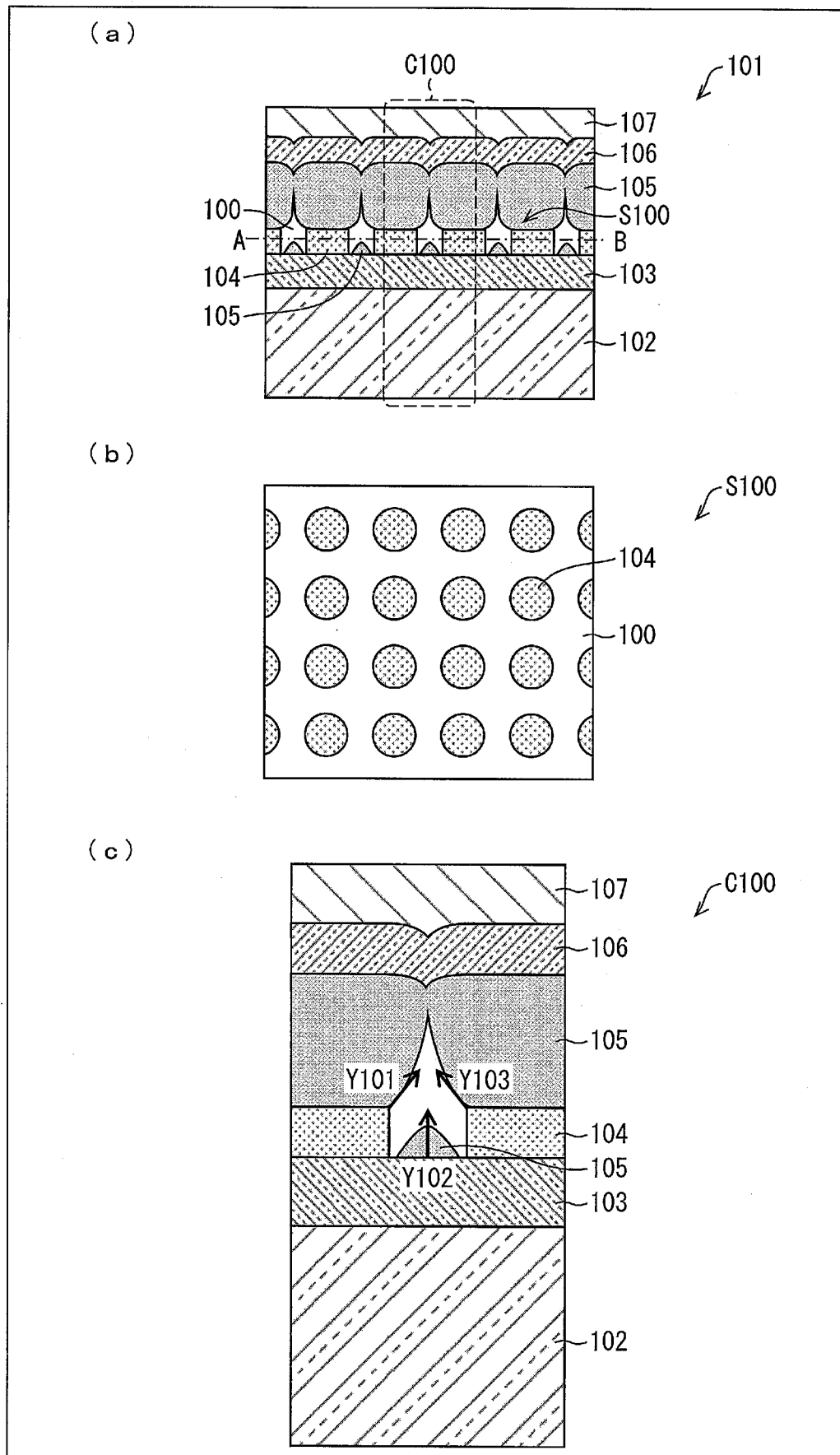
[図18]

図 18



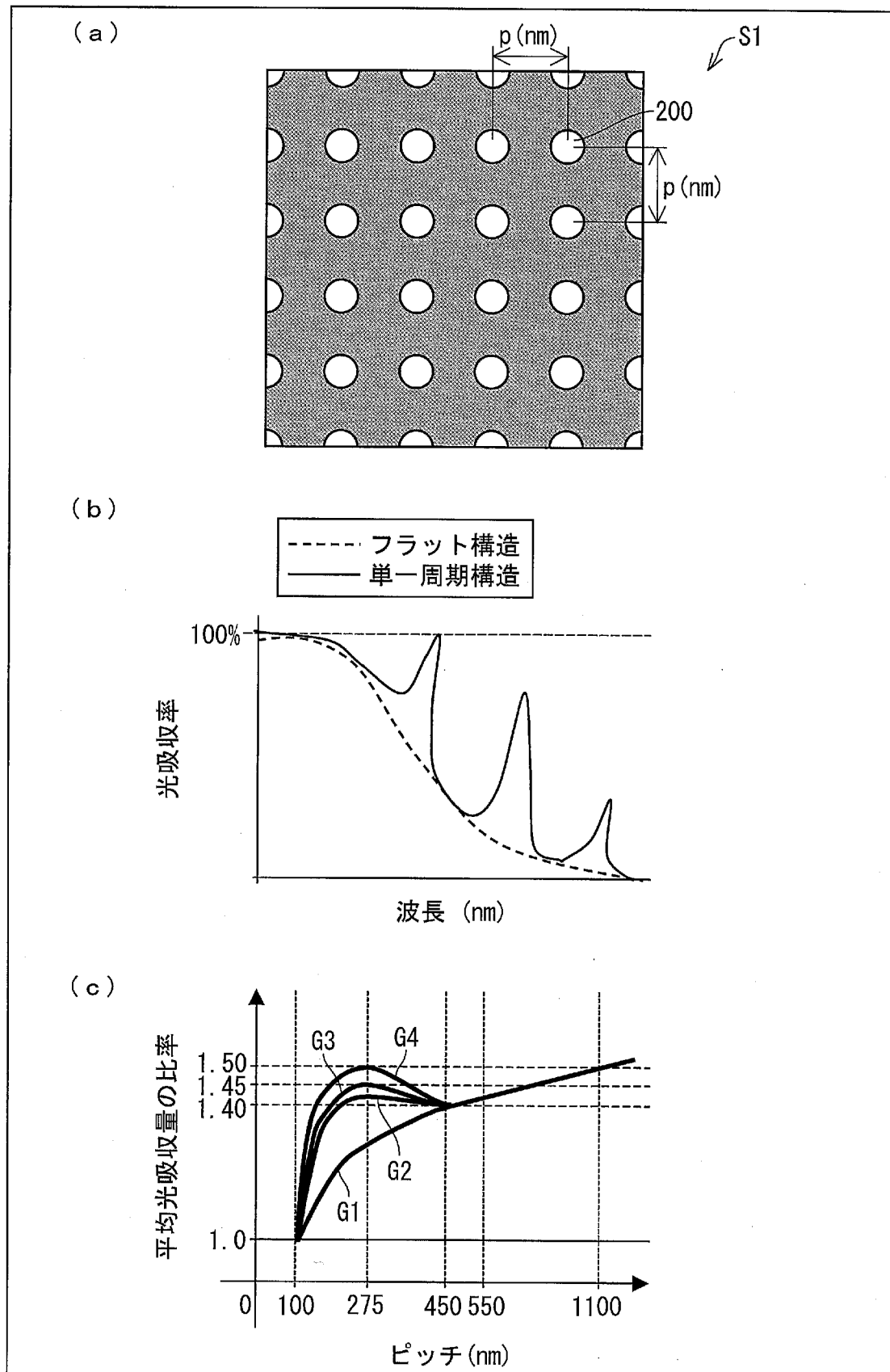
[図19]

図 19



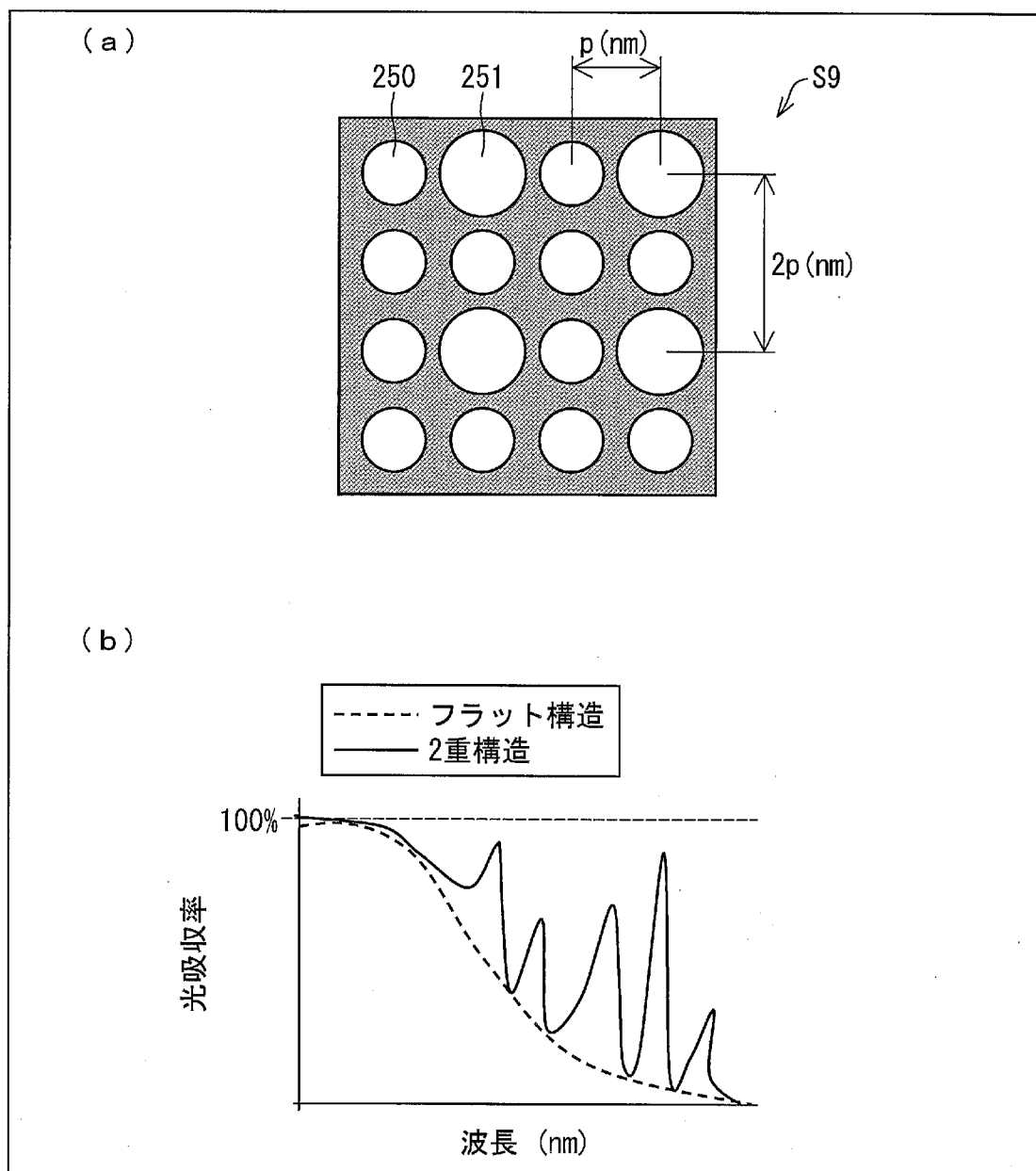
[図20]

図 20



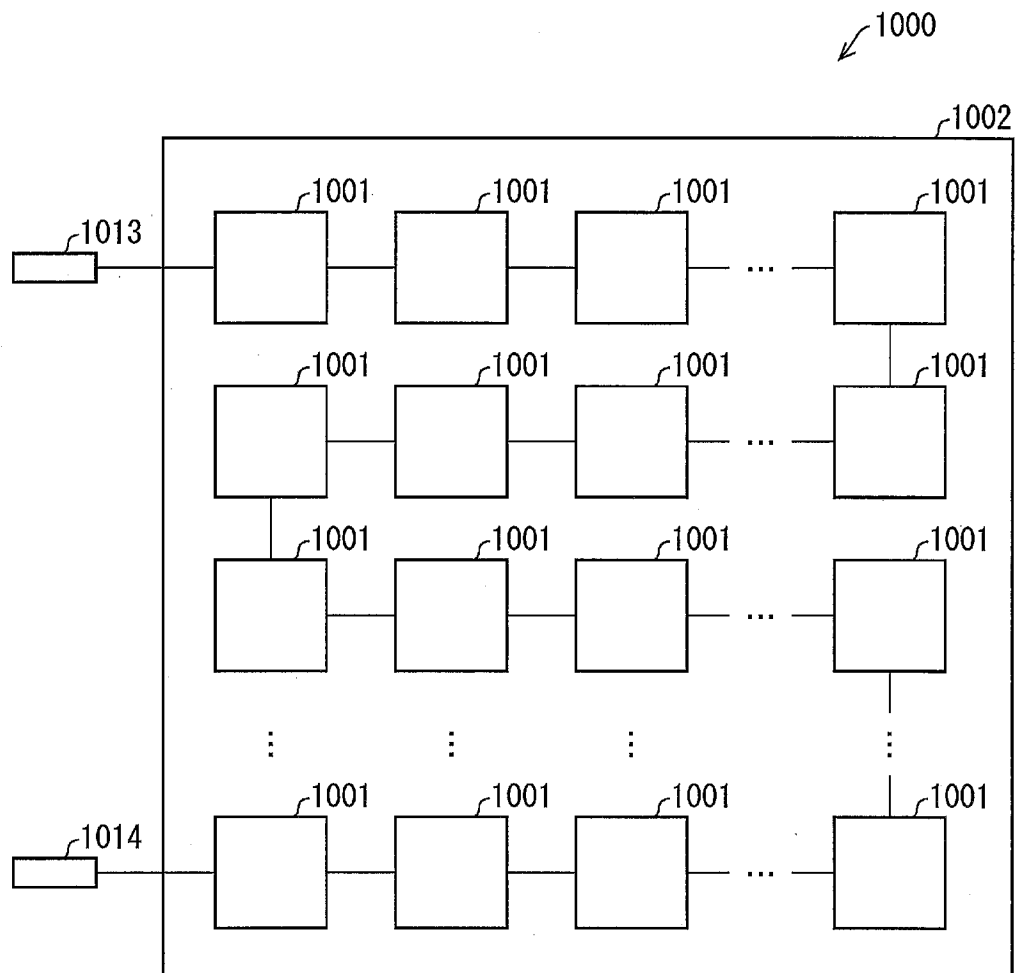
[図21]

図 21



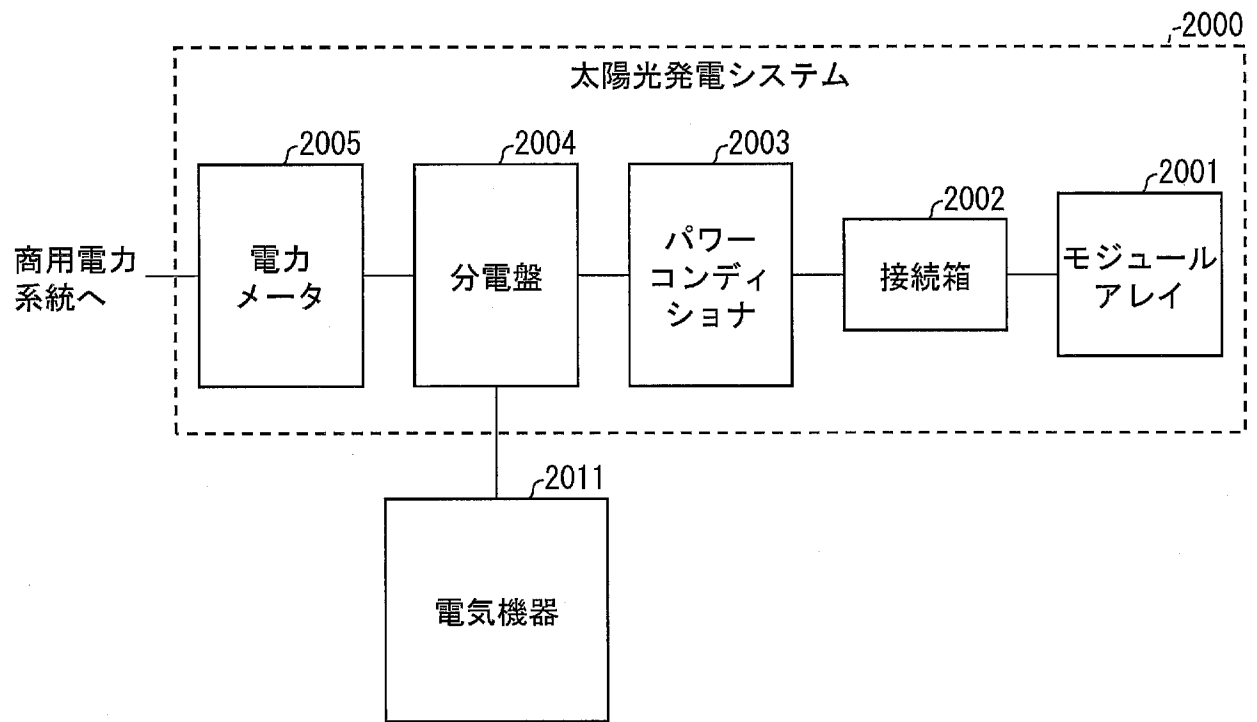
[図22]

図 22



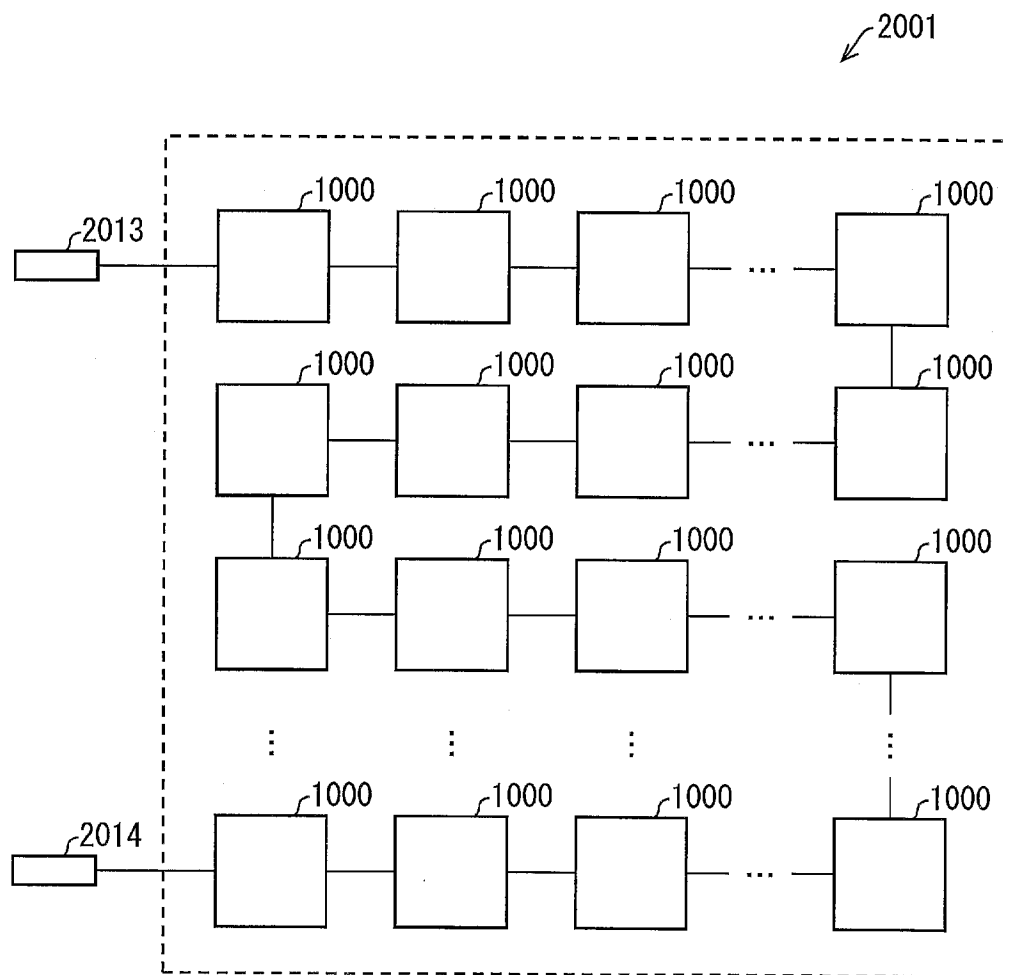
[図23]

図 23



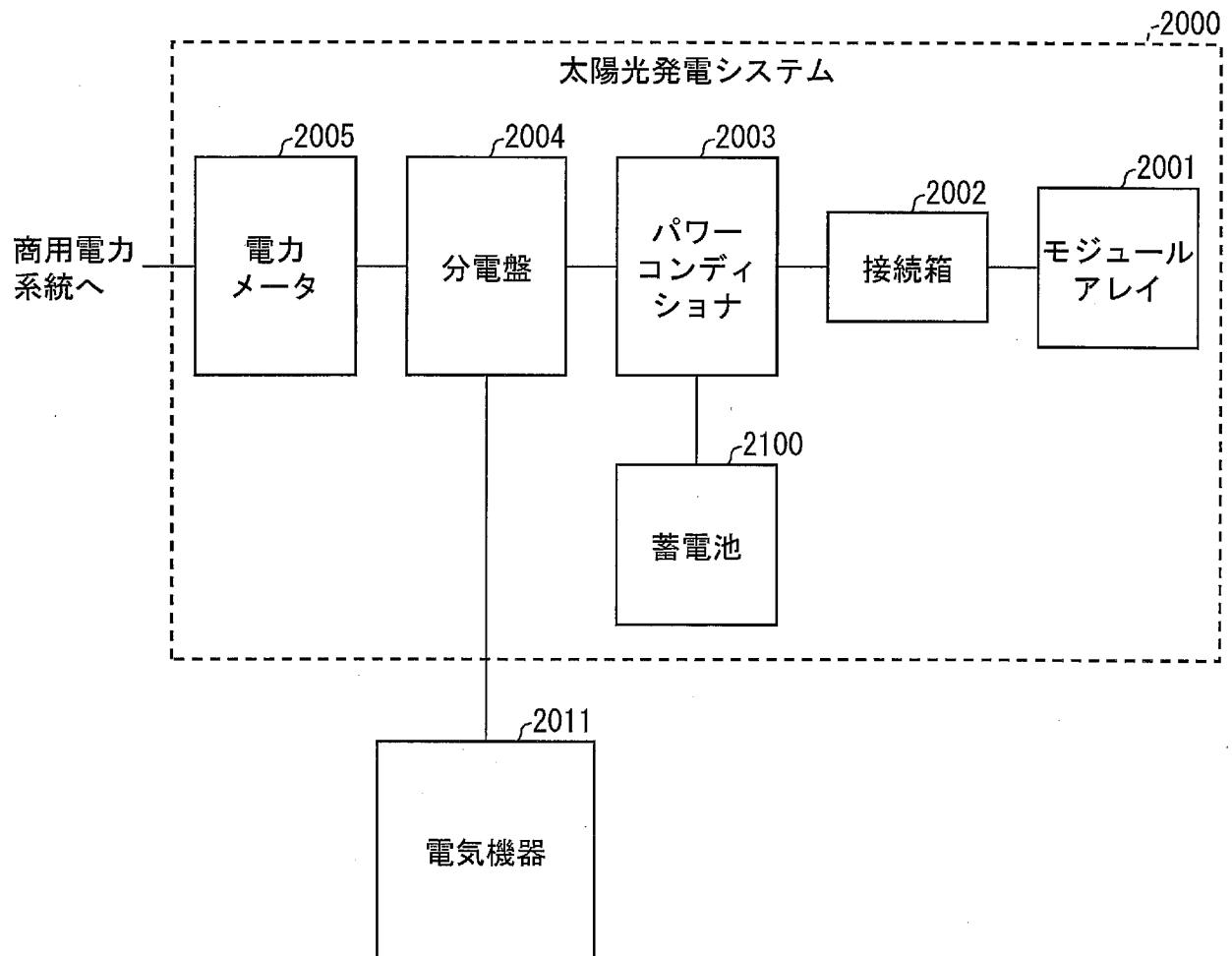
[図24]

図 24



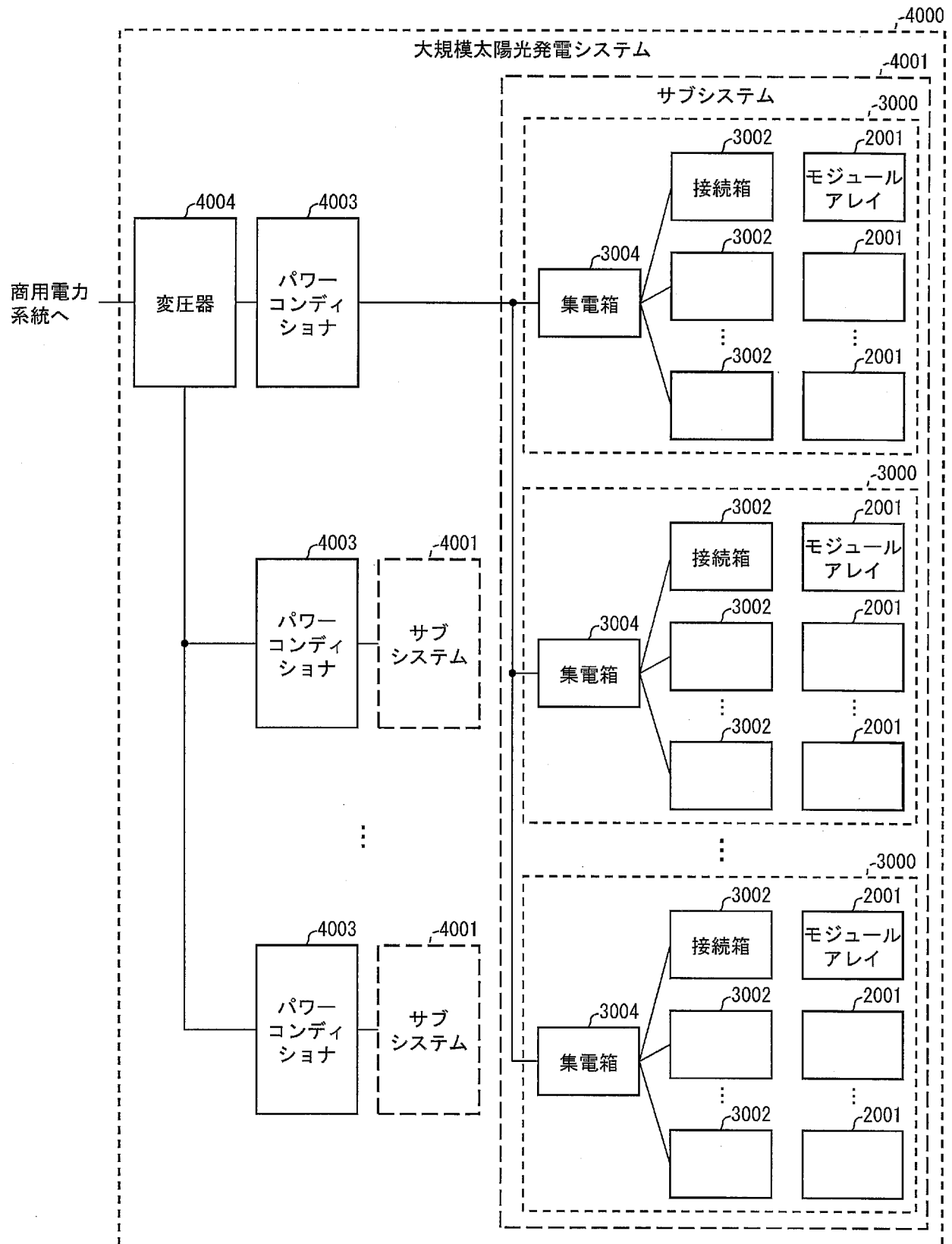
[図25]

図 25



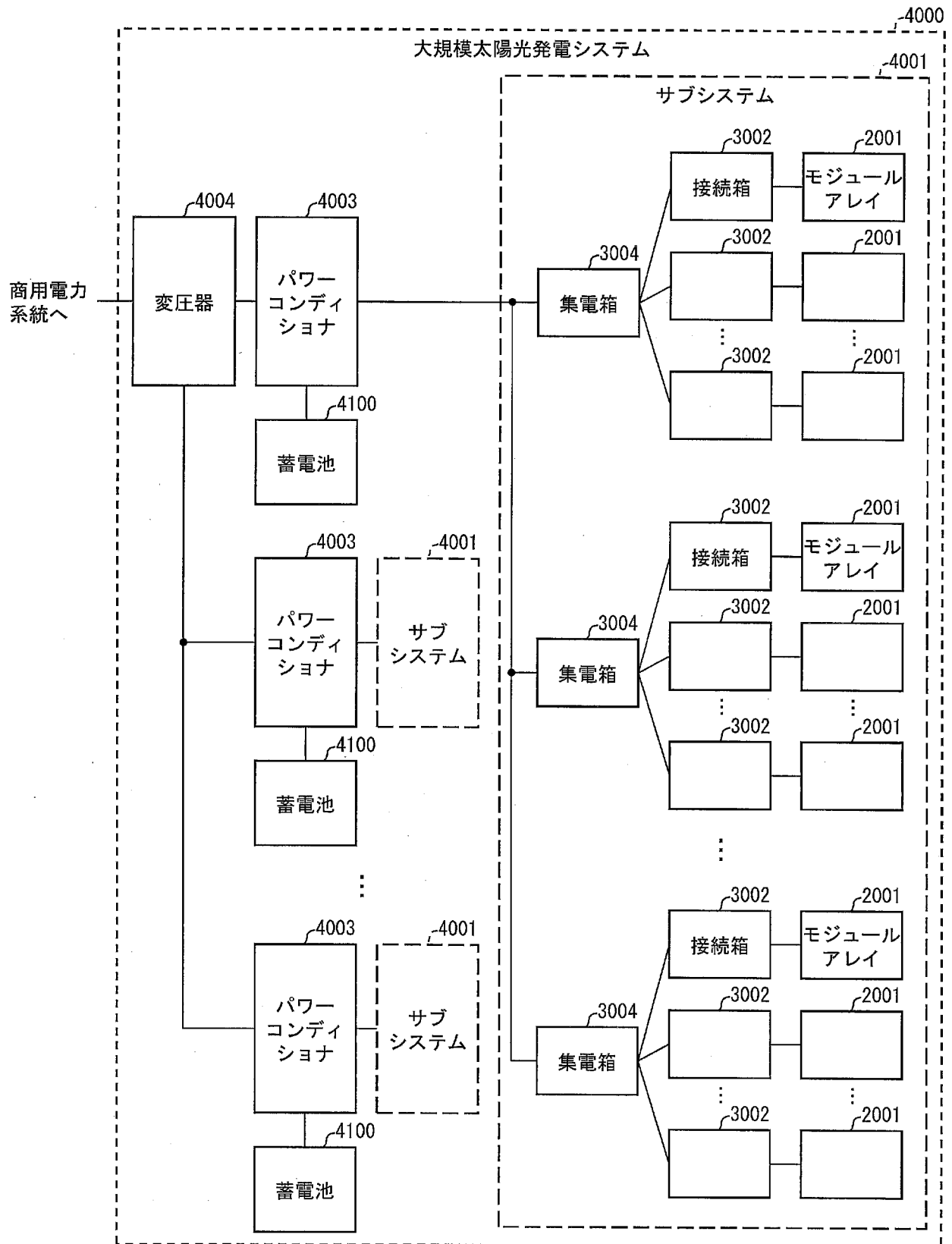
[図26]

図 26



[図27]

図 27



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2014/070071

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H01L31/054(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

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.
X Y	WO 2011/163522 A2 (SOLARITY, INC.), 29 December 2011 (29.12.2011), paragraphs [00035], [00045]; fig. 17(a) to (b) & US 2013/0092210 A1	1-2, 5 3-4
P, X P, Y	JP 2013-157567 A (Kyoto University), 15 August 2013 (15.08.2013), paragraph [0052]; fig. 1 (Family: none)	1-2, 5 3-4
P, X P, Y	JP 2013-156585 A (Kyoto University), 15 August 2013 (15.08.2013), paragraph [0054]; fig. 1 (Family: none)	1-2, 5 3-4

☒ 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 September, 2014 (10.09.14)

Date of mailing of the international search report
22 September, 2014 (22.09.14)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2014/070071

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
P, X P, Y	DE ZOYSA Menaka et al., "18a-A3-7 Formation of Microcrystalline Silicon on Photonic Crystals", 2013 Nen Dai 74 Kai The Japan Society of Applied Physics Shuki Gakujutsu Koenkai 'Koen Yokoshu', [DVD-ROM], 31 August 2013 (31.08.2013)	1-2, 5 3-4
Y	Yoshinori TANAKA et al., "13p-B1-15 Optimization of Photonic Crystal Effect for Enhancement of Optical Absorption in Photovoltaic Devices (VI) ~ Cho Koshi Kozo no Donyu ~", 2012 Nen Shuki Dai 73 Kai Extended Abstracts; the Japan Society of Applied Physics, [DVD-ROM], 27 August 2012 (27.08.2012)	3-4
Y	Yosuke KAWAMOTO et al., "29a-C1-2 Enhancing Light-Trapping by Photonic Superlattice and Sensitivity Analysis for Topology Optimization", 2013 Nen Dai 60 Kai JSAP Spring Meeting 'Koen Yokoshu', [DVD-ROM], 11 March 2013 (11.03.2013)	3-4
P, Y	Y.TANAKA, et al., Enhancement of broadband optical absorption in photovoltaic devices by band-edge effect of photonic crystals, Optics Express, 2013.08.26, Vol.21, No.17, P.20111-20118	3-4
A	J. ZHU, et al., Nanodome Solar Cells with Efficient Light Management and Self-Cleaning, Nano Letters, 2010, Vol.10, p.1979-1984	1-5

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. H01L31/054 (2014.01) 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. H01L31/054

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	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2014年
日本国実用新案登録公報	1996-2014年
日本国登録実用新案公報	1994-2014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）

JSTPlus/JMEDPlus/JST7580 (JDreamIII)

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 Y	WO 2011/163522 A2 (SOLARITY, INC.) 2011.12.29, 段落 [00035], [00045], 第17 (a) - (b) 図 & US 2013/0092210 A1	1-2, 5 3-4
P, X P, Y	JP 2013-157567 A (国立大学法人京都大学) 2013.08.15, 段落【0052】、【図1】（ファミリーなし）	1-2, 5 3-4
P, X P, Y	JP 2013-156585 A (国立大学法人京都大学) 2013.08.15, 段落【0054】、【図1】（ファミリーなし）	1-2, 5 3-4

☒ 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

10.09.2014

国際調査報告の発送日

22.09.2014

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100-8915

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）

和田 将彦

2 K

3313

電話番号 03-3581-1101 内線 3255

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
P, X P, Y	DE ZOYSA Menaka, 外8名, 18a-A3-7 フォトニック結晶上への微結晶シリコン形成に関する検討, 2013年 第74回応用物理学会秋季学術講演会「講演予稿集」, [DVD-ROM], 2013.08.31	1-2, 5 3-4
Y	田中 良典, 外5名, 13p-B1-15 光起電力素子の光電変換効率増大に向けたフォトニック結晶共振作用の最適化(VI) ～超格子構造の導入～, 2012年秋季 第73回応用物理学会学術講演会「講演予稿集」, [DVD-ROM], 2012.08.27	3-4
Y	川本 洋輔, 外6名, 29a-C1-2 光トラップ効率増大に向けたフォトニック結晶構造の検討(A) フォトニック超格子構造とトポロジー最適化に基づくアプローチ, 2013年 第60回応用物理学会春季学術講演会「講演予稿集」, [DVD-ROM], 2013.03.11	3-4
P, Y	Y. TANAKA, et al., Enhancement of broadband optical absorption in photovoltaic devices by band-edge effect of photonic crystals, Optics Express, 2013.08.26, Vol.21, No.17, P.20111-20118	3-4
A	J. ZHU, et al., Nanodome Solar Cells with Efficient Light Management and Self-Cleaning, Nano Letters, 2010, Vol.10, p.1979-1984	1-5