

(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 10 月 22 日(22.10.2015)



(10) 国際公開番号  
**WO 2015/159348 A1**

- (51) 国際特許分類:  
**C25B 3/04** (2006.01) **C25B 9/00** (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2014/060628
- (22) 国際出願日: 2014 年 4 月 14 日(14.04.2014)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (71) 出願人: 富士通株式会社 (FUJITSU LIMITED) [JP/JP]; 〒2118588 神奈川県川崎市中原区上小田中 4 丁目 1 番 1 号 Kanagawa (JP).
- (72) 発明者: 岡本 直哉 (OKAMOTO, Naoya); 〒2118588 神奈川県川崎市中原区上小田中 4 丁目 1 番 1 号 富士通株式会社内 Kanagawa (JP).
- (74) 代理人: 伊東 忠重, 外 (ITOH, Tadashige 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) 16 階 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, 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), ユーロパ (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ユーロッパ (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).

添付公開書類:

- 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

(54) Title: PHOTOSYNTHETIC APPARATUS

(54) 発明の名称: 光合成装置

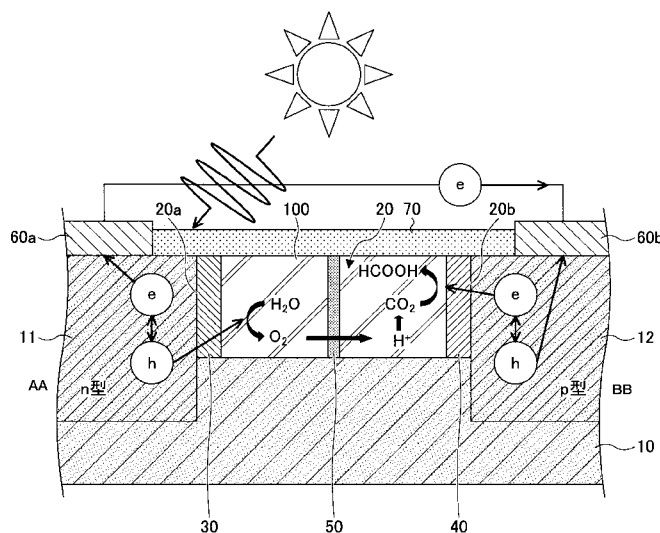


FIG. 3:  
AA n-type  
BB p-type

(57) Abstract: This photosynthetic apparatus is characterized by comprising: a groove portion that is formed in a semiconductor substrate; a first conductivity type region that is formed on one lateral surface of the groove portion in the semiconductor substrate; a second conductivity type region that is formed on the other lateral surface of the groove portion in the semiconductor substrate; an oxidation electrode that is formed in contact with the first conductivity type region on one lateral surface of the groove portion; a reduction electrode that is formed in contact with the second conductivity type region on the other lateral surface of the groove portion; and a proton partition membrane that is formed in the central part of the groove portion. This photosynthetic apparatus is also characterized in that: water containing carbon dioxide is supplied to the groove portion; and oxygen and hydrogen ions are produced from the water at the oxidation electrode by irradiating the oxidation electrode or the reduction electrode with light, and the thus-produced hydrogen ions permeate through the proton partition membrane and react with carbon dioxide at the reduction electrode, thereby producing formic acid.

(57) 要約:

[続葉有]



---

半導体基板に形成された溝部と、前記半導体基板において、前記溝部の一方の側面に形成された第1の導電型領域と、前記半導体基板において、前記溝部の他方の側面に形成された第2の導電型領域と、前記溝部の一方の側面における前記第1の導電型領域に接して形成された酸化電極と、前記溝部の他方の側面における前記第2の導電型領域に接して形成された還元電極と、前記溝部の中央部分に形成されるプロトン隔壁膜と、を有し、前記溝部には二酸化炭素の含まれた水が供給されており、前記酸化電極または前記還元電極に光を照射することにより、前記酸化電極において、水より酸素と水素イオンが生成され、生成された水素イオンは、前記プロトン隔壁膜を透過し、前記還元電極において、二酸化炭素と反応してギ酸を生成することを特徴とする。

## 明 細 書

発明の名称：光合成装置

技術分野

[0001] 本発明は、光合成装置に関するものである。

背景技術

[0002] 現在、温室効果ガスである二酸化炭素（ $\text{CO}_2$ ）は、年に 2 p p m のペースで増加しており、地球温暖化は深刻な状況にあるとされている。このまま二酸化炭素の濃度が増え続けると、西暦 2050 年には、15%～34% の生物種が絶滅することが予測されている。このような地球温暖化に影響を及ぼす二酸化炭素の増加は、主に、北米、EU、日本等の先進国及び中国等において発生しており、二酸化炭素を大量に発生させている国の責任は、重いとされている。このような状況においては、二酸化炭素の排出量の低減を行うとともに、排出された二酸化炭素を吸収するためには、地球の陸地の 1/3 程度の面積を緑化しないと、2050 年までに、二酸化炭素の濃度を現状のレベルまでにすることは困難とされている。

[0003] この問題を解決する方法として、人工光合成が期待されている。図 1 は、このような人工光合成を行うための光合成装置である人工光合成システムを示す。この人工光合成システムは、二酸化炭素を含む水 910 の入れられた水槽 920 内に、 $\text{H}_2\text{O}$  酸化電極 930 と  $\text{CO}_2$  還元電極 940 とが設置されており、 $\text{H}_2\text{O}$  酸化電極 930 と  $\text{CO}_2$  還元電極 940 との間にはプロトン隔壁膜 950 が設けられている。 $\text{H}_2\text{O}$  酸化電極 930 及び  $\text{CO}_2$  還元電極 940 に、太陽光等の光を照射することにより、 $\text{H}_2\text{O}$  酸化電極 930 において、 $\text{H}_2\text{O}$  より  $\text{O}_2$  と  $\text{H}^+$ （水素イオン）が生成される。生成された  $\text{H}^+$  は、プロトン隔壁膜 950 を通り、 $\text{CO}_2$  還元電極 940 において、 $\text{CO}_2$  と反応してギ酸（ $\text{HCOOH}$ ）が生成される。尚、 $\text{CO}_2$  還元電極 940 において、 $\text{CO}_2$  を還元するためには、高エネルギーの電子が必要となるため、 $\text{CO}_2$  還元電極 940 における伝導帯は、 $\text{H}_2\text{O}$  酸化電極 930 における伝導帯よりも高くな

る材料により形成されていることが必須となる。

[0004] 例えば、非特許文献1においては、 $\text{H}_2\text{O}$ 酸化電極930が白金担持二酸化チタン ( $\text{TiO}_2/\text{Pt}$ )、 $\text{CO}_2$ 還元電極940が $\text{InP}$ 、 $\text{GaP}$ 、窒素ドープ $\text{Ta}_2\text{O}_5$ 等のp型半導体材料とルテニウム複合ポリマーにより形成されているものが開示されている。また、プロトン隔壁膜950は、Nafion117 (DuPont社製) により形成されている。一方、非特許文献2においては、 $\text{H}_2\text{O}$ 酸化電極930を $\text{NiO}/\text{AlGaIn}/\text{n}^+\text{-GaIn}$ 、 $\text{CO}_2$ 還元電極940をCuプレートにより形成されているものが開示されている。この場合、 $\text{CO}_2$ 還元電極940自身は光により励起されないが、 $\text{H}_2\text{O}$ 酸化電極930において光励起された電子が、 $\text{CO}_2$ 還元電極940に輸送される仕組みとなっている。

## 先行技術文献

### 非特許文献

- [0005] 非特許文献1: Sato他 J. Am. Chem. Soc. 133 (2011) 15240-15243.  
非特許文献2: Yotsuhashi他 Appl. Phys. Lett. 100 (2012) 243904.

## 発明の概要

### 発明が解決しようとする課題

[0006] しかしながら、図1に示される人工光合成システムでは、照射される太陽光等の光が水槽920のガラスや水槽920内に入れている水910により吸収され、光の強度が減衰し、効率が悪いという問題があった。また、図1に示される人工光合成システムは、重量が重く、面積当たりの効率も低く、設置場所も限定される等の問題があった。

[0007] 図2(a)に示されるように、図1に示される人工光合成システムにおける水槽920を複数設置した場合について考える。水槽920は厚さが10mmのガラスにより形成されており、水が入られる内側の幅が72.5mmとなるように形成されており、 $\text{H}_2\text{O}$ 酸化電極930及び $\text{CO}_2$ 還元電極940は水槽920の壁から10mm離れた位置に配置されている。よって、

H<sub>2</sub>O酸化電極930とCO<sub>2</sub>還元電極940との間隔は、約52.5mmとなるように配置されている。

[0008] 水槽920の中央におけるH<sub>2</sub>O酸化電極930とCO<sub>2</sub>還元電極940の間には、プロトン隔壁膜950が形成されている。複数の水槽920は、隣接する水槽920において水が入れている領域の間隔が、約52.5mmとなるように設置されており、水槽920と水槽920との間は空間になっている。H<sub>2</sub>O酸化電極930及びCO<sub>2</sub>還元電極940は、3インチウエハにより形成されており、55°の角度で太陽光が入射した場合であっても、H<sub>2</sub>O酸化電極930及びCO<sub>2</sub>還元電極940が相互の影にならないように配置されている。

[0009] 図2(b)は、光の波長と水の透過率との関係を示すものであり、具体的には、光の波長と、厚さ10mmの石英ガラスと10mmの水を透過した光の透過率及び厚さ10mmの石英ガラスと100mmの水を透過した光の透過率との関係を示すものである。図2(b)に示されるように、光の波長が0.7μmよりも長波長領域においては、急激に透過率が低下している。尚、図2(c)は、太陽光スペクトルであり、地上で検出される太陽光の波長と強度の関係を示す。

[0010] 図2(b)に基づき、図2(a)に示すように水槽920を配置した場合において、波長が0.3μm~1.1μmの光が、55°の角度で入射した場合におけるH<sub>2</sub>O酸化電極930及びCO<sub>2</sub>還元電極940に到達する光の強度を計算した。この結果、H<sub>2</sub>O酸化電極930の受光領域においては46%まで光が減衰し、CO<sub>2</sub>還元電極940においては35%~50%まで光が減衰し、平均で約44%まで光が減衰する。更に、H<sub>2</sub>O酸化電極930及びCO<sub>2</sub>還元電極940の大きさが大きくなると、H<sub>2</sub>O酸化電極930及びCO<sub>2</sub>還元電極940の水槽920の底面の近傍の領域に到達する光は更に減衰し、水槽920を配置する間隔も広くする必要がある。よって、図1に示される構造の人工光合成システムにおいては、設置面積が広がってしまう。

[0011] このため、人工光合成を行う光合成装置において、太陽光を効率よく用い

ることができ、設置面積を狭くすることのできる光合成装置が求められている。

### 課題を解決するための手段

[0012] 本実施の形態の一観点によれば、半導体基板に形成された溝部と、前記半導体基板において、前記溝部の一方の側面に形成された第1の導電型領域と、前記半導体基板において、前記溝部の他方の側面に形成された第2の導電型領域と、前記溝部の一方の側面における前記第1の導電型領域に接して形成された酸化電極と、前記溝部の他方の側面における前記第2の導電型領域に接して形成された還元電極と、前記溝部の中央部分に形成されるプロトン隔壁膜と、を有し、前記溝部には二酸化炭素の含まれた水が供給されており、前記酸化電極または前記還元電極に光を照射することにより、前記酸化電極において、水より酸素と水素イオンが生成され、生成された水素イオンは、前記プロトン隔壁膜を透過し、前記還元電極において、二酸化炭素と反応してギ酸を生成することを特徴とする。

### 発明の効果

[0013] 開示の光合成装置によれば、人工光合成を行う光合成装置において、太陽光を効率よく用いることができ、設置面積を狭くすることができる。

### 図面の簡単な説明

[0014] [図1]光合成装置の構造図

[図2]図1に示される光合成装置の説明図

[図3]第1の実施の形態における光合成装置の構造図

[図4]第1の実施の形態における光合成装置の説明図

[図5]図1に示す光合成装置と第1の実施の形態における光合成装置との特性比較図

[図6]第1の実施の形態における光合成装置の製造方法の工程図(1)

[図7]第1の実施の形態における光合成装置の製造方法の工程図(2)

[図8]第1の実施の形態における光合成装置の製造方法の工程図(3)

[図9]第1の実施の形態における光合成装置の製造方法の工程図(4)

- [図10]第1の実施の形態における光合成装置の製造方法の工程図(5)
- [図11]第1の実施の形態における光合成装置の製造方法の工程図(6)
- [図12]第1の実施の形態における光合成装置の製造方法の工程図(7)
- [図13]第1の実施の形態における光合成装置の製造方法の工程図(8)
- [図14]第1の実施の形態における光合成装置の製造方法の工程図(9)
- [図15]第1の実施の形態における光合成装置の製造方法の工程図(10)
- [図16]第1の実施の形態における光合成装置の製造方法の工程図(11)
- [図17]第2の実施の形態における光合成装置の製造方法の工程図(1)
- [図18]第2の実施の形態における光合成装置の製造方法の工程図(2)
- [図19]第2の実施の形態における光合成装置の製造方法の工程図(3)
- [図20]第2の実施の形態における光合成装置の製造方法の工程図(4)
- [図21]第2の実施の形態における光合成装置の製造方法の工程図(5)
- [図22]第2の実施の形態における光合成装置の製造方法の工程図(6)
- [図23]第2の実施の形態における光合成装置の製造方法の工程図(7)
- [図24]第2の実施の形態における光合成装置の構造図
- [図25]第3の実施の形態における光合成装置の構造図
- [図26]第3の実施の形態における光合成装置の製造方法の工程図(1)
- [図27]第3の実施の形態における光合成装置の製造方法の工程図(2)
- [図28]第4の実施の形態における光合成装置の構造図
- [図29]第4の実施の形態における光合成装置の説明図
- [図30]第4の実施の形態における光合成装置の製造方法の工程図(1)
- [図31]第4の実施の形態における光合成装置の製造方法の工程図(2)
- [図32]第5の実施の形態における光合成装置の構造図
- [図33]第5の実施の形態における光合成装置の製造方法の工程図(1)
- [図34]第5の実施の形態における光合成装置の製造方法の工程図(2)
- [図35]第6の実施の形態における光合成装置の構造図
- [図36]第7の実施の形態における二酸化炭素吸収システムの説明図
- [図37]第8の実施の形態における冷却システムの説明図

[図38]第9の実施の形態におけるゼロエミッション型データセンタの説明図

[図39]第10の実施の形態における地球冷却システムの説明図

[図40]第11の実施の形態における二酸化炭素濃度の制御システムの説明図

[図41]第11の実施の形態における他の二酸化炭素濃度の制御システムの説明図

[図42]第12の実施の形態における都市環境ネットワークシステムの説明図

### 発明を実施するための形態

[0015] 実施するための形態について、以下に説明する。尚、同じ部材等については、同一の符号を付して説明を省略する。

[0016] 〔第1の実施の形態〕

ところで、図2(c)に示されるように、太陽光スペクトルでは、波長が $0.3\mu\text{m}\sim 1.1\mu\text{m}$ の光の強度が高い。この波長領域は、Si、GaAs、GaN等の半導体材料のバンドギャップと一致する領域であるため、これらの半導体材料を用いて光合成装置を作製することが可能である。

[0017] (光合成装置)

次に、本実施の形態における光合成装置について、図3に基づき説明する。図3は、本実施の形態における光合成装置の断面図である。本実施の形態における光合成装置は、Si(シリコン)により形成された半導体基板10の表面に、溝部20が形成されている。溝部20には、二酸化炭素を含む水100が供給されており、溝部20は、二酸化炭素を含む水100を流す流路となるマイクロチャネル水槽となっている。本実施の形態においては、溝部20は、幅が約 $95\mu\text{m}$ 、深さが約 $10\mu\text{m}$ となる溝により形成されている。溝部20は、溝部20の底面と両側の側面20a、20bに囲まれた領域であり、溝部20における一方の側面20aと他方の側面20bは対向している。

[0018] 溝部20における一方の側面20aには、半導体材料にn型となる不純物元素であるP(リン)をドーピングすることにより、n型領域11が形成されており、溝部20の一方の側面20aにおけるn型領域11に接して $\text{H}_2\text{O}$ 酸化

電極 30 が形成されている。溝部 20 における他方の側面 20b には、半導体材料に p 型となる不純物元素である Al（アルミニウム）をドーピングすることにより、p 型領域 12 が形成されており、溝部 20 の他方の側面 20b における p 型領域 12 に接して CO<sub>2</sub>還元電極 40 が形成されている。尚、n 型領域 11 の上には一方の配線電極 60a が形成されており、p 型領域 12 の上には他方の配線電極 60b が形成されている。

[0019] プロトン隔壁膜 50 は、プロトンを透過する膜であり、溝部 20 の中央部分に形成されており、H<sub>2</sub>O酸化電極 30 と CO<sub>2</sub>還元電極 40 との間に、溝部 20 に沿って溝部 20 を 2 分するように形成されている。従って、プロトン隔壁膜 50 は、二酸化炭素を含む水 100 が流れる方向に沿って形成されている。また、溝部 20 には、溝部 20 を覆うように表面カバー膜 70 が形成されており、溝部 20 に供給される二酸化炭素を含む水 100 は、表面カバー膜 70 に覆われている溝部 20 を流れる。尚、H<sub>2</sub>O酸化電極 30 または CO<sub>2</sub>還元電極 40 のうちのいずれか一方には、太陽光等の光が照射されるように形成されている。

[0020] 本実施の形態における光合成装置においては、H<sub>2</sub>O酸化電極 30 に、太陽光等の光を照射することにより、H<sub>2</sub>O酸化電極 30 において、H<sub>2</sub>Oから O<sub>2</sub> と H<sup>+</sup>（水素イオン）生成される。生成された H<sup>+</sup>は、プロトン隔壁膜 50 を通り、CO<sub>2</sub>還元電極 40 において、CO<sub>2</sub>と反応してギ酸（HCOOH）が生成される。

[0021] 図 4 は、半導体基板 10 である Si の 3 インチウエハの表面に、本実施の形態における光合成装置を形成するための溝部 20 を複数形成した構造のものである。図 4 に示される光合成装置においては、半導体基板 10 の表面に形成される溝部 20 は、溝部 20 が形成される領域と形成されない領域とが、1 : 1 になるように形成されている。尚、図 4 に示される光合成装置においては、n 型領域 11、p 型領域 12、一方の配線電極 60a、他方の配線電極 60b 等は省略されている。

[0022] 本実施の形態における光合成装置は、太陽光等の光が半導体基板 10 の表

面照射されるが、太陽光等の光は、減衰することなく、半導体基板 10 の表面に 100% の強度で到達する。しかしながら、図 4 に示されるように、半導体基板 10 における太陽光等の光の受光面は、約半分となるため、受光率としては実質的には 50% となる。従って、本実施の形態における光合成装置においては、複数の光合成装置が形成されている半導体基板 10 を密に並べて配置した場合であっても、相互に太陽光等の光を遮ることはなく、高密度に配置することが可能である。また、本実施の形態における光合成装置は、薄く、軽量であるため、設置場所の選択肢を広げることができる。

[0023] 図 5 (a) に基づき、図 1 に示す構造の光合成装置及び図 3 に示す構造の本実施の形態における光合成装置における受光率について説明する。前述したように、図 1 に示す構造の光合成装置においては、 $H_2O$ 酸化電極 930 及び  $CO_2$ 還元電極 940 を 3 インチウェハにより形成した場合の受光率は約 44% である。これに対し、図 3 に示す構造の本実施の形態における光合成装置においては、Si の 3 インチウェハに複数の溝部 20 を形成した場合の受光率は約 50% である。従って、図 3 に示す構造の本実施の形態における光合成装置は、図 1 に示す構造の光合成装置に比べて、受光率を約 6% 向上させることができる。

[0024] 次に、図 5 (b) に基づき、図 1 に示す構造の光合成装置と図 3 に示す構造の本実施の形態における光合成装置における長さについて説明する。前述したように、図 1 に示す構造の光合成装置において、複数の水槽 920 を設置する場合、水槽 920 同士を所定の間隔以上の間隔で設置しないと、 $H_2O$ 酸化電極 930 及び  $CO_2$ 還元電極 940 が相互に影となり、効率が低下してしまう。例えば、太陽光等の光が  $55^\circ$  の角度で入射した場合において、 $H_2O$ 酸化電極 930 及び  $CO_2$ 還元電極 940 が相互に影となることなく、一列に水槽 920 を 100 機設置した場合の長さは、約 12.5 m となる。これに対し、図 3 に示す構造の本実施の形態における光合成装置においては、3 インチウェハに形成されているものを一列に 100 枚設置した場合の長さは、約 7.5 m となる。よって、図 3 に示す構造の本実施の形態における光合

成装置は、図 1 に示す構造の光合成装置よりも、複数の光合成装置を設置した場合の長さを約 40% 短くすることができ、光合成装置を高密度に設置することができる。

[0025] (光合成装置の製造方法)

次に、本実施の形態における光合成装置の製造方法について、図 6～図 16 に基づき説明する。本実施の形態における光合成装置は、pn 接合型の光合成装置である。

[0026] 最初に、図 6 (a) に示すように、Si により形成された半導体基板 10 の上に、溝部 20 が形成される領域に開口部 81a を有するレジストパターン 81 を形成する。具体的には、半導体基板 10 の表面にフォトリソを塗布し、露光装置による露光、現像を行うことにより、溝部 20 が形成される領域に開口部 81a を有するレジストパターン 81 を形成する。この際、溝部 20 の中央部分において、後述するプロトン隔壁膜 50 を支持するためのプロトン隔壁支持部 51 が形成される領域の上にも、レジストパターン 81 を形成する。

[0027] 次に、図 6 (b) に示すように、レジストパターン 81 の開口部 81a における半導体基板 10 の一部を除去することにより、溝部 20 を形成する。具体的には、レジストパターン 81 の開口部 81a における半導体基板 10 の一部を RIE (Reactive Ion Etching) 等により除去することにより、溝部 20 を形成する。この際、このように形成された溝部 20 の中央部分には、溝部 20 に沿ってプロトン隔壁膜 50 を支持するためのプロトン隔壁支持部 51 も形成される。このように形成される溝部 20 は、幅 W1 が  $95\ \mu\text{m}$ 、深さ D1 が  $10\ \mu\text{m}$  である。また、プロトン隔壁支持部 51 は、溝部 20 の中央部分に、幅 W2 が  $10\ \mu\text{m}$  で、溝部 20 に沿って形成されている。隣接するプロトン隔壁支持部 51 は、プロトン隔壁支持部 51 における溝部 20 に沿った方向の長さは  $30\ \mu\text{m}$  であり、隣接するプロトン隔壁支持部 51 同士の間隔が  $10\ \mu\text{m}$  となるように形成されている。

[0028] 次に、図 7 (a) に示すように、レジストパターン 81 を有機溶剤等によ

り除去した後、半導体基板 10 において、n 型領域 11 が形成される部分に開口部 82 a を有するレジストパターン 82 を形成し、開口部 82 a における半導体基板に P をイオン注入する。具体的には、レジストパターン 81 を有機溶剤等により除去した後、再びフォトリソを塗布し、露光装置による露光、現像を行うことにより、半導体基板 10 において、n 型領域 11 が形成される部分に開口部 82 a を有するレジストパターン 82 を形成する。この後、レジストパターン 82 の開口部 82 a における半導体基板 10 に、n 型となる不純物元素である P をイオン注入する。本実施の形態においては、溝部 20 の一方の側面 20 a の全体において n 型領域 11 が形成されるように、半導体基板 10 に P をイオン注入する際には、斜め方向よりイオン注入する。

[0029] 次に、図 7 (b) に示すように、レジストパターン 82 を有機溶剤等により除去した後、半導体基板 10 において、p 型領域 12 が形成される部分に開口部 83 a を有するレジストパターン 83 を形成し、開口部 83 a における半導体基板に A1 をイオン注入する。具体的には、レジストパターン 82 を有機溶剤等により除去した後、再びフォトリソを塗布し、露光装置による露光、現像を行うことにより、半導体基板 10 において、p 型領域 12 が形成される部分に開口部 83 a を有するレジストパターン 83 を形成する。この後、レジストパターン 83 の開口部 83 a における半導体基板 10 に、p 型となる不純物元素である A1 をイオン注入する。本実施の形態においては、溝部 20 の他方の側面 20 b の全体において p 型領域 12 が形成されるように、半導体基板 10 に A1 をイオン注入する際には、斜め方向よりイオン注入する。

[0030] 次に、図 8 に示すように、レジストパターン 83 を除去し活性化アニールを行うことにより、n 型領域 11 及び p 型領域 12 を活性化させる。これにより、半導体基板 10 に溝部 20 が形成され、溝部 20 の一方の側面 20 a には n 型領域 11 が形成され、他方の側面 20 b には p 型領域 12 が形成される。また、溝部 20 の中央部分には、溝部 20 に沿って、プロトン隔壁支

持部 51 が形成される。尚、図 8 (a) は、この工程における上面図であり、図 8 (b) は、図 8 (a) における一点鎖線 8A-8B において切断した断面図である。

[0031] 次に、図 9 (a) に示すように、配線電極 60a、60b が形成される領域に開口部 84a を有するレジストパターン 84 を形成した後、真空蒸着により Al 膜 60f を成膜する。具体的には、溝部 20 が形成されている面にフォトリソを塗布し、露光装置による露光、現像を行うことにより、配線電極 60a、60b が形成される領域に開口部 84a を有するレジストパターン 84 を形成する。この後、真空蒸着により Al 膜 60f を成膜する。

[0032] 次に、図 9 (b) に示すように、有機溶剤等に浸漬させることにより、レジストパターン 84 の上に成膜されている Al 膜 60f をレジストパターン 84 とともにリフトオフにより除去する。これにより、レジストパターン 84 の開口部 84a において残存する Al 膜 60f により配線電極 60a、60b が形成される。配線電極 60a、60b は、隣接する n 型領域 11 と p 型領域 12 とを接続するように、隣接する n 型領域 11 と p 型領域 12 との上に一体に形成してもよい。

[0033] 次に、図 10 (a) に示すように、 $H_2O$  酸化電極 30 が形成される領域に開口部 85a を有するレジストパターン 85 を形成した後、スパッタリングにより  $TiO_2/Pt$  膜 30f を成膜する。具体的には、溝部 20 が形成されている面にフォトリソを塗布し、露光装置による露光、現像を行うことにより、 $H_2O$  酸化電極 30 が形成される領域に開口部 85a を有するレジストパターン 85 を形成する。この後、スパッタリングにより  $TiO_2/Pt$  膜 30f を成膜する。

[0034] 次に、図 10 (b) に示すように、リフトオフによって  $TiO_2/Pt$  膜 30f により  $H_2O$  酸化電極 30 を形成し、 $CO_2$  還元電極 40 が形成される領域に開口部 86a を有するレジストパターン 86 を形成した後、スパッタリングにより Cu 膜 40f を成膜する。具体的には、 $TiO_2/Pt$  膜 30f が成膜されたものを有機溶剤等に浸漬させることにより、レジストパターン 8

5の上に成膜された $\text{TiO}_2/\text{Pt}$ 膜30fをレジストパターン85とともにリフトオフにより除去する。これにより、残存する $\text{TiO}_2/\text{Pt}$ 膜30fにより、 $\text{H}_2\text{O}$ 酸化電極30が形成される。このように形成される $\text{H}_2\text{O}$ 酸化電極30は、溝部20の一方の側面20aにおいて、n型領域11と接するように形成される。この後、再び溝部20が形成されている面にフォトリソを塗布し、露光装置による露光、現像を行うことにより、 $\text{CO}_2$ 還元電極40が形成される領域に開口部86aを有するレジストパターン86を形成する。この後、スパッタリングによりCu膜40fを成膜する。

[0035] 次に、図11(a)に示すように、有機溶剤等に浸漬させることにより、レジストパターン86の上に成膜されたCu膜40fをレジストパターン86とともにリフトオフにより除去する。これにより、残存するCu膜40fにより、 $\text{CO}_2$ 還元電極40が形成される。このように形成される $\text{CO}_2$ 還元電極40は、溝部20の他方の側面20bにおいて、p型領域12と接するように形成される。

[0036] 次に、図11(b)に示すように、溝部20が形成されている面に、スプレーコーティング等による塗布とキュアを繰り返し行うことにより、プロトン隔壁膜50を成膜する。このように、プロトン隔壁膜50を成膜することにより、隣接するプロトン隔壁支持部51とプロトン隔壁支持部51との間は、プロトン隔壁膜50により埋められる。プロトン隔壁膜50を形成する材料としては、 $\text{SiO}_2-\text{P}_2\text{O}_5$ やNafion117 (DuPont社製) 等を用いることができる。また、プロトン隔壁膜50の成膜方法は、スプレーコーティング以外の方法であってもよく、例えば、CVD (chemical vapor deposition) 等であってもよい。

[0037] 次に、図12(a)に示すように、プロトン隔壁支持部51の上、及びプロトン隔壁支持部51とプロトン隔壁支持部51との間のプロトン隔壁膜50の上に、レジストパターン87を形成する。具体的には、プロトン隔壁膜50の上にフォトリソを塗布し、露光装置による露光、現像を行う。これにより、プロトン隔壁支持部51の上、及びプロトン隔壁支持部51とプ

ロトン隔壁支持部 51 との間のプロトン隔壁膜 50 の上に、レジストパターン 87 を形成する。

[0038] 次に、図 12 (b) に示すように、レジストパターン 87 が形成されていない領域におけるプロトン隔壁膜 50 を R I E 等により除去する。これにより、 $H_2O$ 酸化電極 30 及び  $CO_2$ 還元電極 40 の表面を露出させる。

[0039] 次に、図 13 に示すように、レジストパターン 87 を有機溶剤等により除去する。これにより、プロトン隔壁支持部 51 とプロトン隔壁支持部 51 との間、及び、プロトン隔壁支持部 51 の周囲においてプロトン隔壁膜 50 が形成される。尚、図 13 (a) は、この工程における上面図であり、図 13 (b) は、図 13 (a) における一点鎖線 13A-13B において切断した断面図である。

[0040] 次に、図 14 (a) に示すように、溶解性ポリマー 88 をスピンコート等により塗布することにより、溝部 20 を溶解性ポリマー 88 により埋める。溶解性ポリマー 88 としては、PMGI (Polymethylglutarimide)、PVA (polyvinyl alcohol) 等を用いてもよい。

[0041] 次に、図 14 (b) に示すように、酸素アッシングに半導体基板 10 の表面が露出するまで、エッチバックすることにより、溶解性ポリマー 88 の一部を除去する。

[0042] 次に、図 15 (a) に示すように、半導体基板 10 及び溶解性ポリマー 88 の上に、表面カバー膜 70 を形成する。表面カバー膜 70 は、 $SiO_2$ 膜、 $SiN$ 膜、シリカ系ポーラス膜により形成されており、スピンコートによる塗布とキュアを繰り返し行う方法、または、CVD により形成する。

[0043] 次に、図 15 (b) に示すように、残存している溶解性ポリマー 88 を溶解することにより除去する。具体的には、溶解性ポリマー 88 が PMGI により形成されている場合には、ピロリドン等の有機溶剤により、PVA により形成されている場合には、温水により溶かし除去する。これにより本実施の形態における光合成装置が作製される。

[0044] このように作製された本実施の形態における光合成装置は、図 16 に示さ

れるように、半導体基板 10 に形成された溝部 20 に、二酸化炭素を含む水 100 を供給し流し、太陽光等の光を照射することにより、光合成装置として機能させることができる。尚、図 16 (a) は、本実施の形態における光合成装置における表面カバー膜 70 を透過した上面図であり、図 16 (b) は、図 16 (a) における一点鎖線 16 A - 16 B において切断した断面図である。

[0045]     〔第 2 の実施の形態〕

次に、第 2 の実施の形態について説明する。ところで、第 1 の実施の形態における光合成装置は、半導体材料として Si を用いたが、太陽電池等と同様に、Si は間接遷移型半導体のため太陽光エネルギー変換効率が悪い。これに対し、GaAs、InP、GaN 等の直接遷移型半導体は、太陽光エネルギー変換効率が、Si よりも優れている。半導体材料として Si を用いた場合には、pn 接合を形成する際にイオン注入を用いたが、半導体材料として GaAs、InP、GaN 等を用いる場合には、再成長により pn 接合を形成する。

[0046]     （光合成装置の製造方法）

次に、本実施の形態における光合成装置の製造方法について、図 17 ～ 図 24 に基づき説明する。本実施の形態における光合成装置は、一例として、半導体材料として GaN を用いた pn 接合型の光合成装置である。

[0047]     最初に、図 17 (a) に示すように、Si により形成された半導体基板 10 の上に、GaN 層 111、p-GaN 層 112 をエピタキシャル成長させることにより順次積層して形成する。エピタキシャル成長法としては、MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition: 有機金属気相成長) または PAMBE (Plasma assisted molecular beam epitaxy: プラズマアシスト分子線エピタキシー) 等が挙げられる。本実施の形態においては、形成される GaN 層 111 の膜厚は約 1  $\mu$ m であり、p-GaN 層 112 の膜厚は約 10  $\mu$ m である。

[0048]     次に、図 17 (b) に示すように、p-GaN 層 112 の上に、ハードマ

スク181を形成する。このハードマスク181は、SiNにより形成されており、p-GaN領域としてp-GaN層112が残る領域の上に形成される。具体的には、p-GaN層112の上に、プラズマCVDによりSiN膜を成膜し、成膜されたSiN膜の上にフォトリソを塗布し、露光装置による露光、現像を行う。これにより、ハードマスク181が形成される領域の上に、不図示のレジストパターンを形成する。この後、不図示のレジストパターンが形成されていない領域におけるSiN膜をドライエッチングにより除去することにより、SiNからなるハードマスク181を形成する。この後、不図示のレジストパターンは、有機溶剤等により除去する。

[0049] 次に、図18(a)に示すように、ハードマスク181が形成されていない領域におけるp-GaN層112をRIE等により除去し、GaN層111の表面を露出させることにより、開口部112aを形成する。

[0050] 次に、図18(b)に示すように、p-GaN層112の開口部112aにおけるGaN層111の上に、n-GaNをエピタキシャル成長させることによりn-GaN層113を形成する。n-GaN層113を形成する際のエピタキシャル成長させる方法としては、MOCVDまたはPAMBE等が挙げられる。尚、SiNにより形成されているハードマスク181は、アモルファスであるため、SiNにより形成されたハードマスク181の上に、n-GaNが堆積することはない。

[0051] 次に、図19(a)に示すように、ハードマスク181を除去した後、p-GaN層112及びn-GaN層113の上に、溝部120が形成される領域に開口部182aを有するレジストパターン182を形成する。具体的には、SiNにより形成されているハードマスク181をフッ酸等を用いてウェットエッチングにより除去した後、p-GaN層112及びn-GaN層113の上に、フォトリソを塗布し、露光装置による露光、現像を行う。これにより、溝部120が形成される領域に開口部182aを有するレジストパターン182を形成する。この際、溝部120の中央部分において、後述するプロトン隔壁膜150を支持するためのプロトン隔壁支持部15

1 が形成される領域の上にも、レジストパターン 182 が形成される。

[0052] 次に、図 19 (b) に示すように、レジストパターン 182 の開口部 182a における n-GaN 層 113 を除去し、GaN 層 111 の表面を露出させることにより、溝部 120 を形成する。具体的には、レジストパターン 182 の開口部 182a における n-GaN 層 113 を RIE 等によるドライエッチングにより除去することにより、溝部 120 を形成する。更に、このように形成された溝部 120 の中央部分には、溝部 120 に沿ってプロトン隔壁膜 150 を支持するためのプロトン隔壁支持部 151 が形成される。このように形成される溝部 120 は、幅 W1 が  $95\ \mu\text{m}$ 、深さ D1 が  $10\ \mu\text{m}$  である。また、プロトン隔壁支持部 151 は、溝部 120 の中央に、幅 W2 が  $10\ \mu\text{m}$  で、溝部 120 に沿って形成されている。プロトン隔壁支持部 151 は、プロトン隔壁支持部 151 における溝部 120 に沿った方向の長さは  $30\ \mu\text{m}$  であり、隣接するプロトン隔壁支持部 151 同士の間隔が  $10\ \mu\text{m}$  となるように形成されている。尚、本実施の形態においては、溝部 120 の一方の側面 120a において残存している n-GaN 層 113 により n 型領域が形成され、他方の側面 120b において残存している p-GaN 層 112 により p 型領域が形成される。

[0053] 次に、図 20 (a) に示すように、レジストパターン 182 を有機溶剤等により除去した後、第 1 の配線電極 161 が形成される領域に開口部 183a を有するレジストパターン 183 を形成し、Ti/Al 膜 161f を成膜する。具体的には、レジストパターン 182 を有機溶剤等により除去した後、再びフォトリソを塗布し、露光装置による露光、現像を行うことにより、第 1 の配線電極 161 が形成される領域に開口部 183a を有するレジストパターン 183 を形成する。この後、第 1 の配線電極 161 を形成するための Ti/Al 膜 161f を真空蒸着により成膜する。

[0054] 次に、図 20 (b) に示すように、Ti/Al 膜 161f により第 1 の配線電極 161 を形成した後、第 2 の配線電極 162 が形成される領域に開口部 184a を有するレジストパターン 184 を形成し、Ni/Au 膜 162

fを成膜する。具体的には、Ti/A膜161fを成膜した後、有機溶剤等に浸漬させることにより、レジストパターン183の上に成膜されたTi/A膜161fをレジストパターン183とともにリフトオフにより除去する。これにより、残存するTi/A膜161fにより、第1の配線電極161が形成される。このように形成される第1の配線電極161は、n型領域となるn-GaN層113の上に形成される。この後、再びフォトリソを塗布し、露光装置による露光、現像を行うことにより、第2の配線電極162が形成される領域に開口部184aを有するレジストパターン184を形成する。この後、第2の配線電極162を形成するためのNi/Au膜162fを真空蒸着により成膜する。

[0055] 次に、図21(a)に示すように、有機溶剤等に浸漬させることにより、レジストパターン184の上に成膜されたNi/Au膜162fをレジストパターン184とともにリフトオフにより除去する。これにより、残存するNi/Au膜162fにより、第2の配線電極162が形成される。このように形成される第2の配線電極162は、p-GaN層112及び第1の配線電極161の上に形成される。この後、オーミックコンタクトをとるために、ラピッドサーマルアニール(RTA)を行う。

[0056] 次に、図21(b)に示すように、溝部120の一方の側面120aにおけるn型領域となるn-GaN層113に接するH<sub>2</sub>O酸化電極130を形成する。具体的には、溝部120が形成されている面にフォトリソを塗布し、露光装置による露光、現像を行うことにより、H<sub>2</sub>O酸化電極130が形成される領域に開口部を有する不図示のレジストパターンを形成する。この後、スパッタリングによりTiO<sub>2</sub>/Pt膜を成膜した後、有機溶剤等に浸漬させることにより、レジストパターンの上に成膜されたTiO<sub>2</sub>/Pt膜をレジストパターンとともにリフトオフにより除去する。これにより、残存するTiO<sub>2</sub>/Pt膜により、H<sub>2</sub>O酸化電極130が形成される。このように形成されるH<sub>2</sub>O酸化電極130は、溝部120の一方の側面120aにおいて、n型領域となるn-GaN層113と接するように形成される。

[0057] 次に、図22(a)に示すように、溝部120の他方の側面120bにおけるp型領域となるp-GaN層112に接するCO<sub>2</sub>還元電極140を形成する。具体的には、溝部120が形成されている面にフォトリソを塗布し、露光装置による露光、現像を行うことにより、CO<sub>2</sub>還元電極140が形成される領域に開口部を有する不図示のリソパターンを形成する。この後、スパッタリングによりCu膜を成膜した後、有機溶剤等に浸漬させることにより、リソパターンの上に成膜されたCu膜をリソパターンとともにリフトオフにより除去する。これにより、残存するCu膜により、CO<sub>2</sub>還元電極140が形成される。このように形成されるCO<sub>2</sub>還元電極140は、溝部120の他方の側面120bにおいて、p型領域となるp-GaN層112と接するように形成される。

[0058] 次に、図22(b)に示すように、溝部120が形成されている面に、スプレーコーティング等による塗布とキュアを繰り返し行うことにより、プロトン隔壁膜150を成膜する。このように、プロトン隔壁膜150を成膜することにより、隣接するプロトン隔壁支持部151とプロトン隔壁支持部151との間は、プロトン隔壁膜150により埋められる。プロトン隔壁膜150を形成する材料としては、SiO<sub>2</sub>-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>やNafion117 (DuPont社製)等を用いることができる。また、プロトン隔壁膜150の成膜方法は、スプレーコーティング以外の方法であってもよく、例えば、CVD等であってもよい。

[0059] 次に、図23(a)に示すように、プロトン隔壁支持部151とプロトン隔壁支持部151との間、及び、プロトン隔壁支持部151の周囲にプロトン隔壁膜150を形成する。具体的には、プロトン隔壁膜150の上にフォトリソを塗布し、露光装置による露光、現像を行う。これにより、プロトン隔壁支持部151の上及びプロトン隔壁支持部151とプロトン隔壁支持部151との間のプロトン隔壁膜150の上に、不図示のリソパターンを形成する。この後、不図示のリソパターンが形成されていない領域におけるプロトン隔壁膜150をRIE等により除去し、H<sub>2</sub>O酸化電極13

O及びCO<sub>2</sub>還元電極140の表面を露出させる。この後、不図示のレジストパターンを有機溶剤等により除去する。これにより、プロトン隔壁支持部151とプロトン隔壁支持部151との間、及び、プロトン隔壁支持部151の周囲にプロトン隔壁膜150が形成される。

[0060] 次に、図23(b)に示すように、溝部120を覆う表面カバー膜170を形成する。具体的には、溶解性ポリマーをスピンコート等により塗布することにより、溝部120を不図示の溶解性ポリマーにより埋める。溶解性ポリマーとしては、PMGI、PVA等を用いてもよい。この後、酸素アッシングにより、エッチバックすることにより、溶解性ポリマーを一部除去した後、p-GaN層112、n-GaN層113及び溶解性ポリマーの上に、表面カバー膜170を形成する。表面カバー膜170は、SiO<sub>2</sub>膜、SiN膜、シリカ系ポーラス膜により形成されており、スピンコートによる塗布とキュアを繰り返し行う方法、または、CVDにより形成する。この後、残存している不図示の溶解性ポリマーを溶解して除去する。具体的には、溶解性ポリマーがPMGIにより形成されている場合には、ピロリドン等の有機溶剤により、PVAにより形成されている場合には、温水により溶かし除去する。これにより本実施の形態における光合成装置が作製される。

[0061] このように作製された本実施の形態における光合成装置は、図24に示されるように、溝部120に、二酸化炭素を含む水100を供給し流し、太陽光等の光を照射することにより、光合成装置として機能させることができる。尚、図24(a)は、本実施の形態における光合成装置における表面カバー膜170を透過した上面図であり、図24(b)は、図24(a)における一点鎖線24A-24Bにおいて切断した断面図である。

[0062] 本実施の形態における光合成装置は、太陽光エネルギー変換効率を一層高めることができる。

[0063] [第3の実施の形態]

次に、第3の実施の形態について説明する。本実施の形態における光合成装置は、タンデム接合型の光合成装置であり、n型領域及びp型領域が、バ

ンドギャップの異なる複数の半導体層を積層することにより形成されている光合成装置である。

[0064] 図25に基づき、本実施の形態における光合成装置について説明する。尚、図25(a)は、本実施の形態における光合成装置における表面カバー膜170を透過した上面図であり、図25(b)は、図25(a)における一点鎖線25A-25Bにおいて切断した断面図である。

[0065] (光合成装置)

本実施の形態は、半導体基板110の上にGa<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub>層111を形成し、Ga<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub>層111の上に形成される溝部120の両側に、バンドギャップの異なる材料を積層することにより形成されたn型領域210とp型領域220とが形成されている光合成装置である。具体的には、n型領域210は積層されたn-InGa<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub>層211、n-Ga<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub>層212、n-AlGa<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub>層213により形成されており、p型領域220は積層されたp-InGa<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub>層221、p-Ga<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub>層222、p-AlGa<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub>層223により形成されている。

[0066] 溝部120の一方の側面120aに形成されるH<sub>2</sub>O酸化電極130は、溝部120の一方の側面120aにおいてn型領域210を形成しているn-InGa<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub>層211、n-Ga<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub>層212、n-AlGa<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub>層213と接して形成されている。また、溝部120の他方の側面120bに形成されるCO<sub>2</sub>還元電極140は、溝部120の他方の側面120bにおいてp型領域220を形成しているp-InGa<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub>層221、p-Ga<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub>層222、p-AlGa<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub>層223と接して形成されている。

[0067] (光合成装置の製造方法)

本実施の形態の製造方法は、Ga<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub>層111の上に、n-InGa<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub>層211、n-Ga<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub>層212、n-AlGa<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub>層213及びp-InGa<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub>層221、p-Ga<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub>層222、p-AlGa<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub>層223を形成することを除き、第2の実施の形態と同様である。

[0068] 具体的には、最初に、図26(a)に示すように、半導体基板110の上に、Ga<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub>層111、p-InGa<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub>層221、p-Ga<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub>層222、p-

A l G a N 層 2 2 3 をエピタキシャル成長により順次積層して形成する。尚、半導体基板 1 1 0 は S i により形成されている。エピタキシャル成長させる方法としては、M O C V D または P A M B E 等が挙げられる。本実施の形態においては、形成される G a N 層 1 1 1 の膜厚は約  $1 \mu\text{m}$  であり、p - l n G a N 層 2 2 1 の膜厚は約  $3.3 \mu\text{m}$  であり、p - G a N 層 2 2 2 の膜厚は約  $3.3 \mu\text{m}$  であり、p - A l G a N 層 2 2 3 の膜厚は約  $3.3 \mu\text{m}$  である。

[0069] 次に、図 2 6 ( b ) に示すように、p - A l G a N 層 2 2 3 の上に、ハードマスク 1 8 1 を形成する。このハードマスク 1 8 1 は、S i N により形成されており、p - l n G a N 層 2 2 1、p - G a N 層 2 2 2、p - A l G a N 層 2 2 3 により p 型領域 2 2 0 が形成される領域の上に形成される。具体的には、p - A l G a N 層 2 2 3 の上に、プラズマ C V D により S i N 膜を成膜し、成膜された S i N 膜の上にフォトリソを塗布し、露光装置による露光、現像を行う。これにより、ハードマスク 1 8 1 が形成される領域の上に、不図示のレジストパターンを形成する。この後、不図示のレジストパターンが形成されていない領域における S i N 膜をドライエッチングにより除去することにより、S i N からなるハードマスク 1 8 1 を形成する。この後、不図示のレジストパターンは、有機溶剤等により除去する。

[0070] 次に、図 2 7 ( a ) に示すように、ハードマスク 1 8 1 が形成されていない領域における p - l n G a N 層 2 2 1、p - G a N 層 2 2 2、p - A l G a N 層 2 2 3 を R I E 等により除去する。これにより、G a N 層 1 1 1 の表面を露出させることにより、開口部 2 2 0 a を形成し、残存する p - l n G a N 層 2 2 1、p - G a N 層 2 2 2、p - A l G a N 層 2 2 3 により p 型領域 2 2 0 が形成される。

[0071] 次に、図 2 7 ( b ) に示すように、開口部 2 2 0 a における G a N 層 1 1 1 の上に、エピタキシャル成長により、n - l n G a N 層 2 1 1、n - G a N 層 2 1 2、n - A l G a N 層 2 1 3 を形成する。n - l n G a N 層 2 1 1、n - G a N 層 2 1 2、n - A l G a N 層 2 1 3 をエピタキシャル成長させ

る方法としては、MOCVDまたはPAMBE等が挙げられる。尚、SiNにより形成されているハードマスク181は、アモルファスであるため、SiNにより形成されたハードマスク181の上においてエピタキシャル成長することはない。

[0072] この後、第2の実施の形態と同様の方法により、ハードマスク181を除去した後、 $n$ -InGa $N$ 層211、 $n$ -Ga $N$ 層212、 $n$ -AlGa $N$ 層213の一部を除去することにより、溝部120を形成する。これにより、残存する $n$ -InGa $N$ 層211、 $n$ -Ga $N$ 層212、 $n$ -AlGa $N$ 層213により $n$ 型領域210を形成する。これ以降、第2の実施の形態と同様の工程を行うことにより、本実施の形態における光合成装置を製造することができる。

[0073] 本実施の形態における光合成装置は、 $n$ 型領域210及び $p$ 型領域220がバンドギャップの異なる複数の半導体層を積層することにより形成されているため、太陽光エネルギー変換効率を高めることができる。

[0074] 尚、本実施の形態においては、 $n$ 型領域210及び $p$ 型領域220が、 $n$ 型及び $p$ 型のInGa $N$ 層、Ga $N$ 層、AlGa $N$ 層の3層を積層することにより形成されている光合成装置について説明した。しかしながら、本実施の形態における光合成装置は、 $n$ 型領域210及び $p$ 型領域220が、 $n$ 型及び $p$ 型のInGaAs層、GaAs層、InGaP層の3層を積層することにより形成した光合成装置であってもよい。また、 $n$ 型領域210及び $p$ 型領域220が、バンドギャップの異なる2層の半導体層と積層したものであってもよく、更には、バンドギャップの異なる4層以上の半導体層を積層したものであってもよい。

[0075] 尚、上記以外の内容については、第2の実施の形態と同様である。

[0076] [第4の実施の形態]

次に、第4の実施の形態について説明する。ところで、Ga $N$ 系窒化物半導体においては、 $p$ 型にするために不純物元素として、Mg（マグネシウム）をドーピングしているが、活性化率が数%で極めて低く、不活性なMgは再結

合中心となるため、太陽光等の光のエネルギーの変換効率が低下する場合がある。よって、本実施の形態における光合成装置は、p型領域を形成することなく、GaNにおける分極効果を利用した光合成装置である。

[0077] (光合成装置)

本実施の形態における光合成装置を図28及び図29に基づき説明する。尚、図28(a)は、本実施の形態における光合成装置における表面カバー膜170を透過した上面図であり、図28(b)は、図28(a)における一点鎖線28A-28Bにおいて切断した断面図である。

[0078] 本実施の形態は、基板301としてGaN基板が用いられており、基板301の上にGaN層302が形成されており、GaN層302の上には、GaN層302の上に形成されたGaN層の一部を除去することにより、溝部120が形成されている。また、溝部120の両側は、GaNにより、第1の半導体領域310となる第1のGaN領域及び第2の半導体領域320となる第2のGaN領域が形成されている。

[0079] 溝部120の一方の側面120aには、溝部120の一方の側面120aにおける第1の半導体領域310となる第1のGaN領域に接するH<sub>2</sub>O酸化電極130が形成されている。溝部120の他方の側面120bには、溝部120の他方の側面120bにおける第2の半導体領域320となる第2のGaN領域に接するCO<sub>2</sub>還元電極140が形成されている。また、溝部120を形成している側面とは反対側の側面となる第1の半導体領域310となる第1のGaN領域と第2の半導体領域320となる第2のGaN領域の間には、第3の半導体領域330となるAlGaN領域が形成されている。本実施の形態においては、第3の半導体領域330は、第1の半導体領域310及び第2の半導体領域320を形成している半導体材料よりもバンドギャップの広い半導体材料により形成されている。これにより、第1の半導体領域310と第3の半導体領域330の界面近傍における第1の半導体領域310に2DEG (two-dimensional electron gas: 2次元電子ガス) が生成される。また、第2の半導体領域320と第3の半導体領域330の界面近

傍における第2の半導体領域320に2DHG (two dimensional hole gas : 2次元ホールガス) が生成される。尚、本実施の形態においては、第1の半導体領域310及び第2の半導体領域320、第3の半導体領域330はGaNを含む材料により形成されている。

[0080] 本実施の形態においては、溝部120の一方の側面120aは、C軸方向に沿って成長した第3の半導体領域330と第1の半導体領域310によるAlGaN/GaNヘテロ構造が形成されており、第1の半導体領域310の(000-1)N極性面となっている。よって、H<sub>2</sub>O酸化電極130は、GaNの(000-1)N極性面に接して形成されている。また、溝部120の他方の側面120bは、C軸方向に沿って成長した第3の半導体領域330と第2の半導体領域320によるAlGaN/GaNヘテロ構造が形成されており、第2の半導体領域320の(0001)Ga極性面となっている。よって、CO<sub>2</sub>還元電極140は、GaNの(0001)Ga極性面に接して形成されている。

[0081] ウルツ鉱型GaN結晶は、自発分極、ピエゾ分極の特性を有している。従って、図29に示されるように、この分極電荷により、第3の半導体領域330と第1の半導体領域310との界面となる(0001)Ga極性面上に成長したAlGaN/GaN界面には正の固定電荷が発生する。また、第3の半導体領域330と第2の半導体領域320との界面となる(000-1)N極性面上に成長したAlGaN/GaN界面には負の固定電荷が発生する。このため、(000-1)N極性面上に成長したAlGaN/GaNにおけるエネルギーレベルは、(0001)Ga極性面上に成長したAlGaN/GaNよりも高くすることができる。これにより、高エネルギーの電子を発生させることができ、二酸化炭素の還元効率を高めることができる。

[0082] 尚、本実施の形態においては、第1の半導体領域310となる第1のGaN領域及び第2の半導体領域320となる第2のGaN領域は、後述するように、溝部120を形成する際に、残存しているGaN層303により形成されている。また、プロトン隔壁膜150を支持するためのプロトン隔壁支

持部151も溝部120の中央部分において残存しているGa<sub>2</sub>N層303により形成されている。

[0083] (光合成装置の製造方法)

次に、本実施の形態における光合成装置の製造方法について説明する。

[0084] 最初に、図30(a)に示すように、基板301となるGa<sub>2</sub>N基板の上に、Ga<sub>2</sub>N層302及びGa<sub>2</sub>N層303を順にエピタキシャル成長により形成する。本実施の形態においては、基板301には、m面(1-100)Ga<sub>2</sub>N基板を用いる。エピタキシャル成長させる方法としては、MOCVDまたはPAMBE等が挙げられる。本実施の形態においては、形成されるGa<sub>2</sub>N層302の膜厚は約1μmであり、Ga<sub>2</sub>N層303の膜厚は約10μmである。尚、本実施の形態においては、Ga<sub>2</sub>N層302を第1の半導体層と記載し、Ga<sub>2</sub>N層303を第2の半導体層と記載する場合がある。

[0085] 次に、図30(b)に示すように、Ga<sub>2</sub>N層303の上に、ハードマスク381を形成する。このハードマスク381は、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>により形成されており、AlGa<sub>2</sub>N領域が形成される領域に開口部381aを有している。具体的には、Ga<sub>2</sub>N層303の上に、プラズマCVDによりSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>膜を成膜し、成膜されたSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>膜の上にフォトリソを塗布し、露光装置による露光、現像を行うことにより、ハードマスク381が形成される領域の上に、不図示のレジストパターンを形成する。この後、レジストパターンが形成されていない領域におけるSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>膜をドライエッチングにより除去することにより、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>からなるハードマスク381を形成する。この後、不図示のレジストパターンは、有機溶剤等により除去する。

[0086] 次に、図31(a)に示すように、ハードマスク381の開口部381aにおける第2のGa<sub>2</sub>N層303をRIE等により除去する。これにより、Ga<sub>2</sub>N層111の表面を露出させることにより、開口部303aを形成する。

[0087] 次に、図31(b)に示すように、開口部303aにおけるGa<sub>2</sub>N層302の上に、第3の半導体領域330となるAlGa<sub>2</sub>N領域をエピタキシャル成長により形成する。これにより、開口部303aにおけるGa<sub>2</sub>N層303

のGa極性面領域には、AlGa<sub>0.3</sub>N/GaN界面に2DEGが発生し、Ga<sub>0.3</sub>N層303のN極性面領域には、AlGa<sub>0.3</sub>N/GaN界面に2DHGが発生する。

[0088] この後、第2の実施の形態と同様の方法により、ハードマスク381を除去した後、Ga<sub>0.3</sub>N層303の一部を除去し、溝部120を形成する。これにより、残存するGa<sub>0.3</sub>N層303により、第1の半導体領域310となる第1のGa<sub>0.3</sub>N領域及び第2の半導体領域320となる第2のGa<sub>0.3</sub>N領域を形成する。このようにして、図28に示されるように、溝部120の一方の側面120aには、第1の半導体領域310となる第1のGa<sub>0.3</sub>N領域が形成され、溝部120の他方の側面120bには、第2の半導体領域320となる第2のGa<sub>0.3</sub>N領域が形成される。溝部120を形成する際には、AlGa<sub>0.3</sub>N/GaN界面と溝部120の一方の側面120aとの距離、及び、AlGa<sub>0.3</sub>N/GaN界面と溝部120の他方の側面120bとの距離が1μm以下となるように形成する。

[0089] この後、第2の実施の形態と同様の工程を行うことにより、本実施の形態における光合成装置を製造することができる。尚、Ti/Alにより形成される第1の配線電極161は、第1の半導体領域310となる第1のGa<sub>0.3</sub>N領域と第3の半導体領域330となるAlGa<sub>0.3</sub>N領域との界面に形成する。また、Ni/Auにより形成される第2の配線電極162は、第2の半導体領域320となる第2のGa<sub>0.3</sub>N領域と第3の半導体領域330となるAlGa<sub>0.3</sub>N領域との界面に形成する。第1の配線電極161及び第2の配線電極162は、成膜した後、オーミックコンタクトさせるためにラピッドサーマルアニールを行う。

[0090] 本実施の形態における光合成装置は、p型の不純物元素として活性化しにくいMgを用いることなく、Ga<sub>0.3</sub>N系窒化物半導体材料を用いて光合成装置を作製することができるため、太陽光エネルギー変換効率を高めることができる。

[0091] 本実施の形態における説明では、基板301に、m面Ga<sub>0.3</sub>N基板を用いた

場合について説明したが、GaN基板は高価であるため、安価な基板、例えば、Si基板の上に、m面またはa面GaNEピタキシャル層が形成された基板を用いてもよい。また、基板301には、m面SiC、 $\gamma$ -LiAlO<sub>2</sub> (100)、m面ZnO、m面サファイア、パターン加工されたa面サファイア基板、パターン加工されたSi (112) 等を用いてもよい。また、同じIII-V化合物半導体により形成されたm面AlN基板を用いてもよい。

[0092] 更に、表面がm面となるGaNEピタキシャル層以外にも、m面と同じ非極性a面GaNEピタキシャル層もc面と直交関係にあるため、表面にa面GaNEピタキシャル層が形成されている基板を用いても、本実施の形態と同様の効果を得ることができる。尚、a面GaNEピタキシャル層を成長させることのできる基板としては、例えば、r面サファイア、LiGaO<sub>2</sub> (010)、a面SiC、a面GaN、a面AlN、a面ZnO等が挙げられる。

[0093] また、基板301の表面が、m面、a面の非極性面となる場合だけではなく、その他の面も利用することが可能であり、このため、基板301にオフ角をつけたものを用いてもよい。

[0094] [第5の実施の形態]

次に、第5の実施の形態について説明する。本実施の形態は、第4の実施の形態における第1の半導体領域及び第2の半導体領域がバンドギャップの異なる複数の半導体層を積層することにより形成した構造の光合成装置である。

[0095] (光合成装置)

本実施の形態における光合成装置について、図32に基づき説明する。尚、図32(a)は、本実施の形態における光合成装置における表面カバー膜170を透過した上面図であり、図32(b)は、図32(a)における一点鎖線32A-32Bにおいて切断した断面図である。

[0096] 本実施の形態における光合成装置は、基板301としてGaN基板が用いられており、基板301の上にGaN層302が形成されており、GaN層

302の上には、溝部120が形成されている。溝部120の一方の側面120aには、InGa<sub>N</sub>層411、Ga<sub>N</sub>層412、AlGa<sub>N</sub>層413が積層された第1の半導体領域410が形成されている。H<sub>2</sub>O酸化電極130は、溝部120の一方の側面120aにおける第1の半導体領域410に接して形成されている。また、溝部120の他方の側面120bには、InGa<sub>N</sub>層421、Ga<sub>N</sub>層422、AlGa<sub>N</sub>層423が積層された第2の半導体領域420が形成されている。CO<sub>2</sub>還元電極140は、溝部120の他方の側面120bにおける第2の半導体領域420に接して形成されている。また、溝部120を除く第1の半導体領域410と第2の半導体領域420の間には、AlGa<sub>N</sub>により第3の半導体領域330が形成されている。本実施の形態においては、第3の半導体領域330は、第1の半導体領域410及び第2の半導体領域420を形成している半導体材料よりもバンドギャップの広い半導体材料により形成されている。

[0097] 本実施の形態においては、第3の半導体領域330を形成しているAlGa<sub>N</sub>におけるAl組成比は、第1の半導体領域410におけるAlGa<sub>N</sub>層413、第2の半導体領域420におけるAlGa<sub>N</sub>層423におけるAl組成比よりも高い。例えば、第3の半導体領域330はAl<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>Nにより形成されており、第1の半導体領域410におけるAlGa<sub>N</sub>層413及び第2の半導体領域420におけるAlGa<sub>N</sub>層423はAl<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>Nにより形成されている。これにより、第1の半導体領域410と第3の半導体領域330の界面近傍における第1の半導体領域410に2DHGが生成され、第2の半導体領域420と第3の半導体領域330の界面近傍における第2の半導体領域420に2DEGが生成される。尚、本実施の形態においては、第1の半導体領域410及び第2の半導体領域420、第3の半導体領域330はGa<sub>N</sub>を含む材料により形成されている。

[0098] 尚、本実施の形態においては、プロトン隔壁膜150を支持するためのプロトン隔壁支持部151は、後述するように、溝部120を形成する際に、残存しているInGa<sub>N</sub>層401、Ga<sub>N</sub>層402、AlGa<sub>N</sub>層403に

より形成されている。

[0099] (光合成装置の製造方法)

次に、本実施の形態における光合成装置の製造方法について説明する。

[0100] 最初に、図33(a)に示すように、基板301であるGa<sub>2</sub>N基板の上に、Ga<sub>2</sub>N層302、InGa<sub>2</sub>N層401、Ga<sub>2</sub>N層402、AlGa<sub>2</sub>N層403をエピタキシャル成長により形成する。本実施の形態においては、基板301には、m面(1-100)Ga<sub>2</sub>N基板を用いる。エピタキシャル成長させる方法としては、MOCVDまたはPAMBE等が挙げられる。本実施の形態においては、Ga<sub>2</sub>N層302の膜厚は約1μmであり、InGa<sub>2</sub>N層401の膜厚は約3.3μmであり、Ga<sub>2</sub>N層402の膜厚は約3.3μmであり、AlGa<sub>2</sub>N層403の膜厚は約3.3μmである。

[0101] 次に、図33(b)に示すように、AlGa<sub>2</sub>N層403の上に、ハードマスク381を形成する。このハードマスク381は、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>により形成されており、第3の半導体領域330となるAlGa<sub>2</sub>N領域が形成される領域に開口部381aを有している。具体的には、AlGa<sub>2</sub>N層403の上に、プラズマCVDによりSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>膜を成膜し、成膜されたSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>膜の上にフォトリソを塗布し、露光装置による露光、現像を行う。これにより、ハードマスク381が形成される領域の上に、不図示のレジストパターンを形成する。この後、不図示のレジストパターンが形成されていない領域におけるSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>膜をドライエッチングにより除去することにより、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>からなるハードマスク381を形成する。この後、不図示のレジストパターンは、有機溶剤等により除去する。

[0102] 次に、図34(a)に示すように、ハードマスク381の開口部381aにおけるInGa<sub>2</sub>N層401、Ga<sub>2</sub>N層402、AlGa<sub>2</sub>N層403をRIE等により除去する。これにより、Ga<sub>2</sub>N層302の表面を露出させて、開口部403aを形成する。

[0103] 次に、図34(b)に示すように、開口部403aにおけるGa<sub>2</sub>N層302の上に、AlGa<sub>2</sub>Nをエピタキシャル成長させることにより、第3の半導

体領域 330 となる AlGaIn 領域を形成する。これにより、開口部 403a における InGaIn 層 401、GaIn 層 402、AlGaIn 層 403 の Ga 極性面領域には、第 3 の半導体領域 330 となる AlGaIn 領域との界面近傍に 2DEG が生成される。開口部 403a における InGaIn 層 401、GaIn 層 402、AlGaIn 層 403 の N 極性面領域には、第 3 の半導体領域 330 となる AlGaIn 領域との界面近傍に 2DHG が生成される。

[0104] この後、第 2 の実施の形態等と同様の方法により、ハードマスク 381 を除去した後、InGaIn 層 401、GaIn 層 402、AlGaIn 層 403 に溝部 120 を形成することにより、第 1 の半導体領域 410 及び第 2 の半導体領域 420 が形成される。このように形成される第 1 の半導体領域 410 は、InGaIn 層 411、GaIn 層 412、AlGaIn 層 413 により形成されており、第 2 の半導体領域 420 は、InGaIn 層 421、GaIn 層 422、AlGaIn 層 423 により形成されている。尚、InGaIn 層 411、GaIn 層 412、AlGaIn 層 413、InGaIn 層 421、GaIn 層 422、AlGaIn 層 423 は、溝部 120 を形成する際に、残存している InGaIn 層 401、GaIn 層 402、AlGaIn 層 403 により形成される。

[0105] 本実施の形態においては、図 32 に示されるように、溝部 120 の一方の側面 120a は、第 1 の半導体領域 410 により形成されており、他方の側面 120b は、第 2 の半導体領域 420 により形成されている。更に、第 1 の半導体領域 410 と第 2 の半導体領域 420 との間には、第 3 の半導体領域 330 となる AlGaIn 領域が形成されている。溝部 120 を形成する際には、第 1 の半導体領域 410 と第 3 の半導体領域 330 の界面、及び第 2 の半導体領域 420 と第 3 の半導体領域 330 の界面と、溝部 120 の一方の側面 120a 及び他方の側面 120b との距離が 1  $\mu$ m 以下となるように形成する。

[0106] この後、第 4 の実施の形態と同様の工程を行うことにより、本実施の形態における光合成装置を製造することができる。尚、Ti/Al により形成さ

れる第1の配線電極161は、第1の半導体領域410と第3の半導体領域330との界面に形成し、Ni/Auにより形成される第2の配線電極162は、第2の半導体領域420と第3の半導体領域330との界面に形成する。第1の配線電極161及び第2の配線電極162は、成膜した後、オーミックコンタクトさせるためにラピッドサーマルアニールを行う。

[0107] 尚、上記以外の内容については、第4の実施の形態と同様である。

[0108] [第6の実施の形態]

次に、第6の実施の形態について説明する。本実施の形態は、図35に示されるように、第2の実施の形態における光合成装置において、溝部120と半導体基板110の裏面を接続する貫通孔121が形成されている構造の光合成装置である。尚、図35(a)は、本実施の形態における光合成装置における表面カバー膜170を透過した上面図であり、図35(b)は、図35(a)における一点鎖線35A-35Bにおいて切断した断面図である。

[0109] 貫通孔121は、ドライエッチングまたはウェットエッチングにより、溝部120が形成されている領域における半導体基板110及びGaN層111を除去し、貫通させることにより形成する。このように、半導体基板110の裏面と溝部120とを接続する貫通孔121を形成することにより、二酸化炭素を含んだ水100を半導体基板110の裏面から溝部120に、貫通孔121における毛細管現象等により、供給することができる。

[0110] また、本実施の形態においては、表面カバー膜170は、シリカ系ポーラス膜により形成されている。シリカ系ポーラス膜は膜質が粗であるため、溝部120を流れる水の一部をシリカ系ポーラス膜を介し蒸発させることができる。よって、本実施の形態における光合成装置は、二酸化炭素の吸収のみならず、冷却機能も有している。

[0111] 尚、上記以外の内容については、第2の実施の形態と同様である。また、本実施の形態は、第1、第3から第5の実施の形態にも適用することが可能である。

[0112] [第7の実施の形態]

次に、第7の実施の形態について説明する。本実施の形態は、第1～第6の実施の形態における光合成装置がユニット化されている光合成ユニットを用いた二酸化炭素吸収システムである。本実施の形態における二酸化炭素吸収システムは、図36に示されるように、第1～第6の実施の形態における光合成装置がユニット化されている光合成ユニット510、二酸化炭素溶解槽520、送水ポンプ530、炭素固定化装置540等を有している。

[0113] 本実施の形態における二酸化炭素吸収システムでは、水が入れられている二酸化炭素溶解槽520に、大気導入口522より大気を導入し、大気中に含まれる二酸化炭素を二酸化炭素溶解槽520に入れられている水に溶解させる。この際、二酸化炭素溶解槽520における余分な大気は、排気口523より二酸化炭素溶解槽520の外に排気される。尚、室温における二酸化炭素の溶解度は、 $1\text{ cm}^3$ の水に対し約 $0.08\text{ cm}^3$ である。

[0114] 二酸化炭素溶解槽520において二酸化炭素が溶解された水は、二酸化炭素溶解槽520に接続されている送水ポンプ530により、光合成ユニット510に送られる。本実施の形態においては、送水ポンプ530により、二酸化炭素吸収システム内における水を循環させることができる。また、本実施の形態においては、送水ポンプ530と光合成ユニット510との間には、pHメータ531が設置されており、光合成ユニット510に供給される水のpHを測定することにより、水に含まれる二酸化炭素の濃度を測定することができる。

[0115] 光合成ユニット510においては、供給された水に含まれる二酸化炭素よりギ酸が生成され、ギ酸の含まれた水が炭素固定化装置540に送られる。本実施の形態においては、光合成ユニット510と炭素固定化装置540との間には、pHメータ532が設置されており、炭素固定化装置540に供給される水のpHを測定することにより、水に含まれるギ酸の濃度を測定することができる。炭素固定化装置540の内部には、例えば、ギ酸をメタン、エタノール等の貯蔵可能な化学物質に変換することのできる触媒や薬品が設置されており、ギ酸の含まれた水よりギ酸を除去することができる。炭素

固定化装置 540 における触媒や薬品により、ギ酸から変換されたメタン、エタノール等の貯蔵可能な化学物質は、炭素固定化装置 540 の内部に蓄えられる。炭素固定化装置 540 においてギ酸が除去された水は、炭素固定化装置 540 より、二酸化炭素溶解槽 520 に送られる。

[0116] 本実施の形態における二酸化炭素吸収システムにおいては、上記のように、大気中に含まれる二酸化炭素を吸収することができる。

[0117] 〔第 8 の実施の形態〕

次に、第 8 の実施の形態について説明する。本実施の形態は、第 1 ～ 第 6 の実施の形態における光合成装置がユニット化されている光合成ユニット 510 を用いた冷却システムである。第 1 ～ 第 6 の実施の形態における光合成装置は、植物と同様の水の蒸散作用があるため、蒸発熱による冷却効果を有している。よって、本実施の形態における冷却システムは、第 1 ～ 第 6 の実施の形態における光合成装置がユニット化されている光合成ユニット 510 と太陽電池がユニット化されている太陽光パネル 550 とを有しており、住居の屋根等に設置されている。本実施の形態においては、光合成ユニット 510 に水を供給する際に必要な不図示の送水ポンプを駆動するための電力は、太陽光パネル 550 において発電された電力が用いられる。このため、本実施の形態における冷却システムは、他のエネルギー源を頼ることのない自立したシステムである。本実施の形態における冷却システムは、住居のみならず、自然や冷却を必要とする施設等においても用いることができる。

[0118] 〔第 9 の実施の形態〕

次に、第 9 の実施の形態について説明する。本実施の形態は、第 1 ～ 第 6 の実施の形態における光合成装置がユニット化されている光合成ユニット 510 を工場やデータセンタに設置したものである。本実施の形態においては、図 38 に示すように、光合成ユニット 510 と太陽電池がユニット化されている太陽光パネル 550 をデータセンタの屋上に設置することにより、ゼロエミッション型データセンタにすることができる。

[0119] ビッグデータを取り扱うデータセンタにおいては、大量の電力を使用する

ことから、高効率電源や空調システムの改善などを行うことにより、二酸化炭素の排出量をできる限り削減することの検討がなされている。しかしながら、完全に二酸化炭素の排出量をゼロにすることは極めて困難である。

[0120] このため、本実施の形態においては、光合成ユニット 510 と太陽光パネル 550 をデータセンタの屋上に設置する。本実施の形態においては、光合成ユニット 510 に水を供給する際に必要な不図示の送水ポンプを駆動するための電力は、太陽光パネル 550 において発電された電力が用いられる。このため、他のエネルギー源を頼ることのない自立したシステムとなる。これにより、データセンタにおいて使用した電力に相当する分の二酸化炭素を光合成ユニット 510 で吸収することにより、ゼロエミッション型データセンタにすることができる。本実施の形態においては、データセンタについて説明したが、本実施の形態は、データセンタ以外にも電力を使用するあらゆる産業施設に適用することができる。

[0121] [第 10 の実施の形態]

次に、第 10 の実施の形態について説明する。本実施の形態は、第 1 ～ 第 6 の実施の形態における光合成装置がユニット化されている光合成ユニット 510 を地球の地面等に設置した地球冷却システムである。

[0122] 本実施の形態は、図 39 に示すように、地球の地面等に第 1 ～ 第 6 の実施の形態における光合成装置がユニット化されている光合成ユニット 510 と太陽光パネル 550 を多数設置したものである。本実施の形態においては、光合成ユニット 510 に水を供給する際に必要な不図示の送水ポンプを駆動するための電力は、太陽光パネル 550 において発電された電力が用いられる。このため、本実施の形態における冷却システムは、他のエネルギー源を頼ることなく自立したシステムである。これにより、地球規模での二酸化炭素の削減することができ、地球温暖化を抑制することができる。

[0123] [第 11 の実施の形態]

次に、第 11 の実施の形態について説明する。本実施の形態は、密閉された空間における二酸化炭素濃度の制御システムである。具体的には、満員電

車や体育館等の密閉空間に人が存在していると、人の呼吸により密閉空間における二酸化炭素の濃度が高くなり、気分が悪くなったり、熱中症や過呼吸を発症する場合がある。

[0124] 本実施の形態は、例えば、図40に示すように、第1～第6の実施の形態における光合成装置がユニット化されている光合成ユニット510と太陽光パネル550を電車の屋根に設置し、電車の車内に二酸化炭素濃度センサ560を設置したものである。これにより、二酸化炭素濃度センサ560において検出された電車の車内の二酸化炭素濃度に応じて、光合成ユニット510により電車の車内の空気より二酸化炭素を除去し酸素を供給することにより、電車の車内の二酸化炭素濃度を所定の値に保つことができる。このようにして、電車の車内の空間を快適にすることができる。

[0125] また、本実施の形態は、図41に示すように、光合成ユニット510と太陽光パネル550を体育館の屋根に設置し、体育館内に二酸化炭素濃度センサ560を設置したものであってもよい。これにより、二酸化炭素濃度センサ560において検出された体育館内の二酸化炭素濃度に応じて、光合成ユニット510により体育館内の空気より二酸化炭素を除去し酸素を供給することにより、体育館内の二酸化炭素濃度を所定の値に保つことができる。このようにして、体育館内の空間を快適にすることができる。

[0126] 本実施の形態においては、光合成ユニット510に水を供給する際に必要な不図示の送水ポンプを駆動するための電力は、太陽光パネル550において発電された電力が用いられる。このため、本実施の形態における冷却システムは、他のエネルギー源を頼ることのない自立したシステムである。

[0127] 〔第12の実施の形態〕

次に、第12の実施の形態について説明する。本実施の形態は、第1～第6の実施の形態における光合成装置がユニット化されている光合成ユニット510を用いた都市環境ネットワークシステムである。都市部における二酸化炭素の濃度は農村部と比べて高く、このことを一つの要因としてヒートアイランド現象によるゲリラ豪雨等の異常気象がもたらされている。また、都

市部は緑化についても面積が限られている。

[0128] 本実施の形態においては、図42に示されるように、光合成ユニット510と二酸化炭素濃度センサとを装備した環境測定局570をビル、工場、住居に配置し、環境測定局570を破線で示されるような無線ネットワークで繋ぐ。これにより、都市部における二酸化炭素濃度を低減することや、制御することができる。環境測定局570には、PM<sub>2.5</sub>等の大気汚染物質やNO<sub>x</sub>等を測定するセンサーを含んでもよい。これにより、都市部における二酸化炭素濃度を削減し、異常気象を抑制することができる。

[0129] 以上、実施の形態について詳述したが、特定の実施形態に限定されるものではなく、特許請求の範囲に記載された範囲内において、種々の変形及び変更が可能である。

### 符号の説明

|        |     |                      |
|--------|-----|----------------------|
| [0130] | 10  | 半導体基板                |
|        | 11  | n型領域                 |
|        | 12  | p型領域                 |
|        | 20  | 溝部                   |
|        | 20a | 一方の側面                |
|        | 20b | 他方の側面                |
|        | 30  | H <sub>2</sub> O酸化電極 |
|        | 40  | CO <sub>2</sub> 還元電極 |
|        | 50  | プロトン隔壁膜              |
|        | 51  | プロトン隔壁支持部            |
|        | 60a | 配線電極                 |
|        | 60b | 配線電極                 |
|        | 70  | 表面カバー膜               |
|        | 100 | 水                    |
|        | 110 | 半導体基板                |
|        | 111 | GaN層                 |

|         |                      |
|---------|----------------------|
| 1 1 2   | p-GaN層 (p型領域)        |
| 1 1 3   | n-GaN層 (n型領域)        |
| 1 2 0   | 溝部                   |
| 1 2 0 a | 一方の側面                |
| 1 2 0 b | 他方の側面                |
| 1 2 1   | 貫通孔                  |
| 1 3 0   | H <sub>2</sub> O酸化電極 |
| 1 4 0   | CO <sub>2</sub> 還元電極 |
| 1 5 0   | プロトン隔壁膜              |
| 1 5 1   | プロトン隔壁支持部            |
| 1 6 1   | 第1の配線電極              |
| 1 6 2   | 第2の配線電極              |
| 1 7 0   | 表面カバー膜               |
| 2 1 0   | n型領域                 |
| 2 1 1   | n-InGaN層             |
| 2 1 2   | n-GaN層               |
| 2 1 3   | n-AlGaN層             |
| 2 2 0   | p型領域                 |
| 2 2 1   | p-InGaN層             |
| 2 2 2   | p-GaN層               |
| 2 2 3   | p-AlGaN層             |
| 3 1 0   | 第1の半導体領域 (第1のGaN領域)  |
| 3 2 0   | 第2の半導体領域 (第2のGaN領域)  |
| 3 3 0   | 第3の半導体領域 (AlGaN領域)   |
| 4 1 0   | 第1の半導体領域             |
| 4 1 1   | InGaN層               |
| 4 1 2   | GaN層                 |
| 4 1 3   | AlGaN層               |

|       |             |
|-------|-------------|
| 4 2 0 | 第 2 の半導体領域  |
| 4 2 1 | I n G a N 層 |
| 4 2 2 | G a N 層     |
| 4 2 3 | A l G a N 層 |

## 請求の範囲

[請求項1]

半導体基板に形成された溝部と、

前記半導体基板において、前記溝部の一方の側面に形成された第1の導電型領域と、

前記半導体基板において、前記溝部の他方の側面に形成された第2の導電型領域と、

前記溝部の一方の側面における前記第1の導電型領域に接して形成された酸化電極と、

前記溝部の他方の側面における前記第2の導電型領域に接して形成された還元電極と、

前記溝部の中央部分に形成されるプロトン隔壁膜と、

を有し、

前記溝部には二酸化炭素の含まれた水が供給されており、

前記酸化電極または前記還元電極に光を照射することにより、前記酸化電極において、水より酸素と水素イオンが生成され、生成された水素イオンは、前記プロトン隔壁膜を透過し、前記還元電極において、二酸化炭素と反応してギ酸を生成することを特徴とする光合成装置。

【請求項2】 前記半導体基板はシリコン基板であることを特徴とする請求項1に記載の光合成装置。

[請求項3]

基板の上に形成された半導体層と、  
前記半導体層に形成された溝部と、  
前記溝部の一方の側面に形成された第1の導電型領域と、  
前記溝部の他方の側面に形成された第2の導電型領域と、  
前記溝部の一方の側面における前記第1の導電型領域に接して形成された酸化電極と、  
前記溝部の他方の側面における前記第2の導電型領域に接して形成された還元電極と、

前記溝部の中央部分に形成されるプロトン隔壁膜と、  
を有し、  
前記溝部には二酸化炭素の含まれた水が供給されており、  
前記酸化電極または前記還元電極に光を照射することにより、前記酸化電極において、水より酸素と水素イオンが生成され、生成された水素イオンは、前記プロトン隔壁膜を透過し、前記還元電極において、二酸化炭素と反応してギ酸を生成することを特徴とする光合成装置。

[請求項4] 前記第1の導電型領域及び前記第2の導電型領域は、Ga<sub>2</sub>Nを含む材料により形成されていることを特徴とする請求項3に記載の光合成装置。

[請求項5] 前記第1の導電型領域は、バンドギャップの異なる複数の半導体層を積層することにより形成されており、

前記第2の導電型領域は、バンドギャップの異なる複数の半導体層を積層することにより形成されていることを特徴とする請求項3または4に記載の光合成装置。

[請求項6] 前記第1の導電型はn型であって、前記第2の導電型はp型であることを特徴とする請求項1から5のいずれかに記載の光合成装置。

[請求項7] 基板の上の半導体層に形成された溝部と、  
前記溝部の一方の側面に形成された第1の半導体領域と、  
前記溝部の他方の側面に形成された第2の半導体領域と、  
前記第1の半導体領域及び前記第2の半導体領域に接して形成された第3の半導体領域と、  
前記溝部の一方の側面における前記第1の半導体領域に接して形成される酸化電極と、  
前記溝部の他方の側面における前記第2の半導体領域に接して形成される還元電極と、  
前記溝部の中央部分に形成されるプロトン隔壁膜と、

を有し、

前記第3の半導体領域は、前記第1の半導体領域及び前記第2の半導体領域を形成している半導体材料よりもバンドギャップの広い半導体材料により形成されており、

前記第1の半導体領域と前記第3の半導体領域との界面には、2次元電子ガスが生成され、

前記第2の半導体領域と前記第3の半導体領域との界面には、2次元ホールガスが生成されるものであって、

前記溝部には二酸化炭素の含まれた水が供給されており、

前記酸化電極または前記還元電極に光を照射することにより、前記酸化電極において、水より酸素と水素イオンが生成され、生成された水素イオンは、前記プロトン隔壁膜を透過し、前記還元電極において、二酸化炭素と反応してギ酸を生成することを特徴とする光合成装置。

[請求項8] 前記第1の半導体領域は、バンドギャップの異なる複数の半導体層を積層することにより形成されており、

前記第2の半導体領域は、バンドギャップの異なる複数の半導体層を積層することにより形成されていることを特徴とする請求項7に記載の光合成装置。

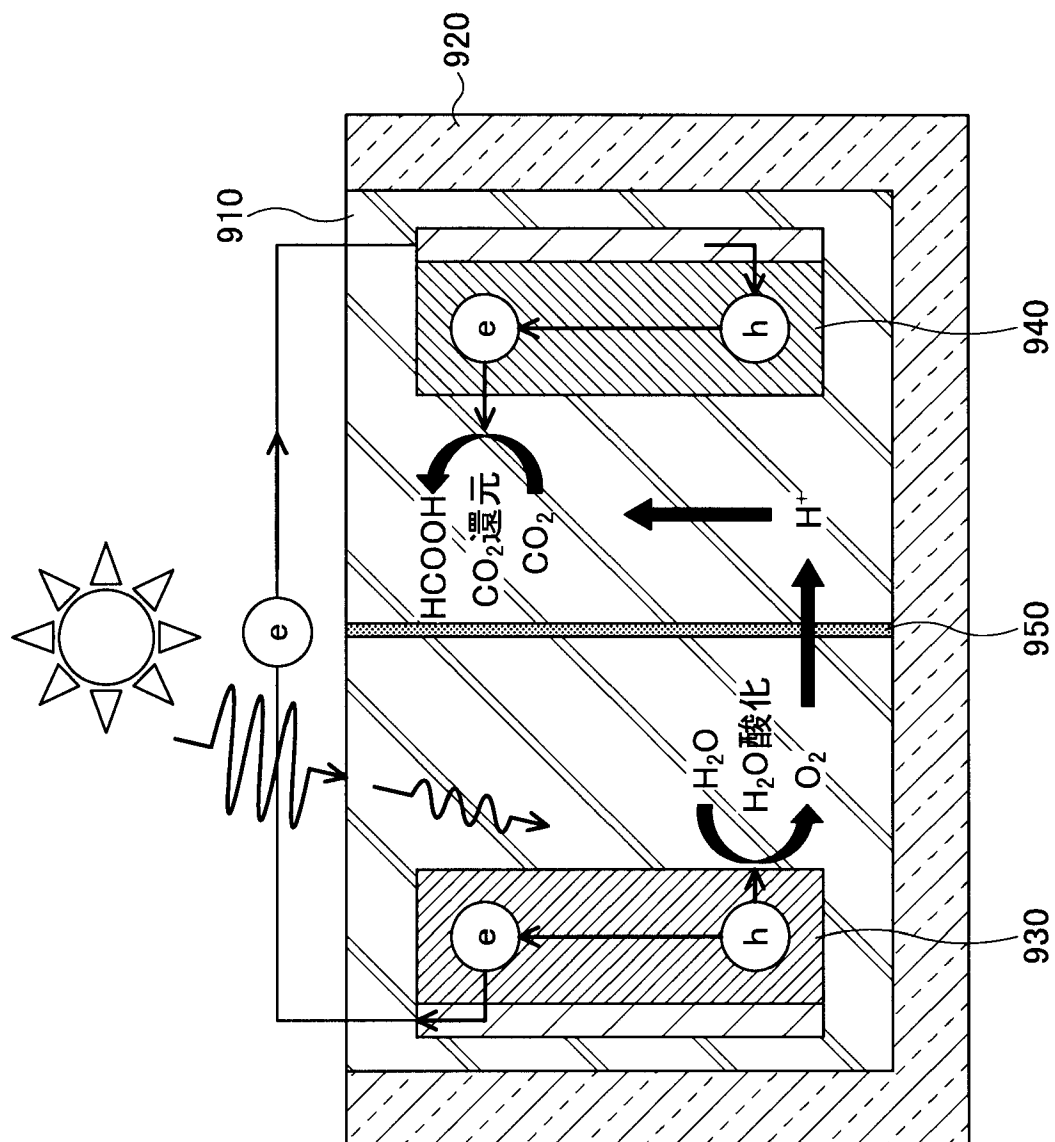
[請求項9] 前記第1の半導体領域及び前記第2の半導体領域は、Ga<sub>2</sub>Nを含む材料により形成されており、

前記第3の半導体領域は、AlGa<sub>2</sub>Nを含む材料により形成されていることを特徴とする請求項7または8に記載の光合成装置。

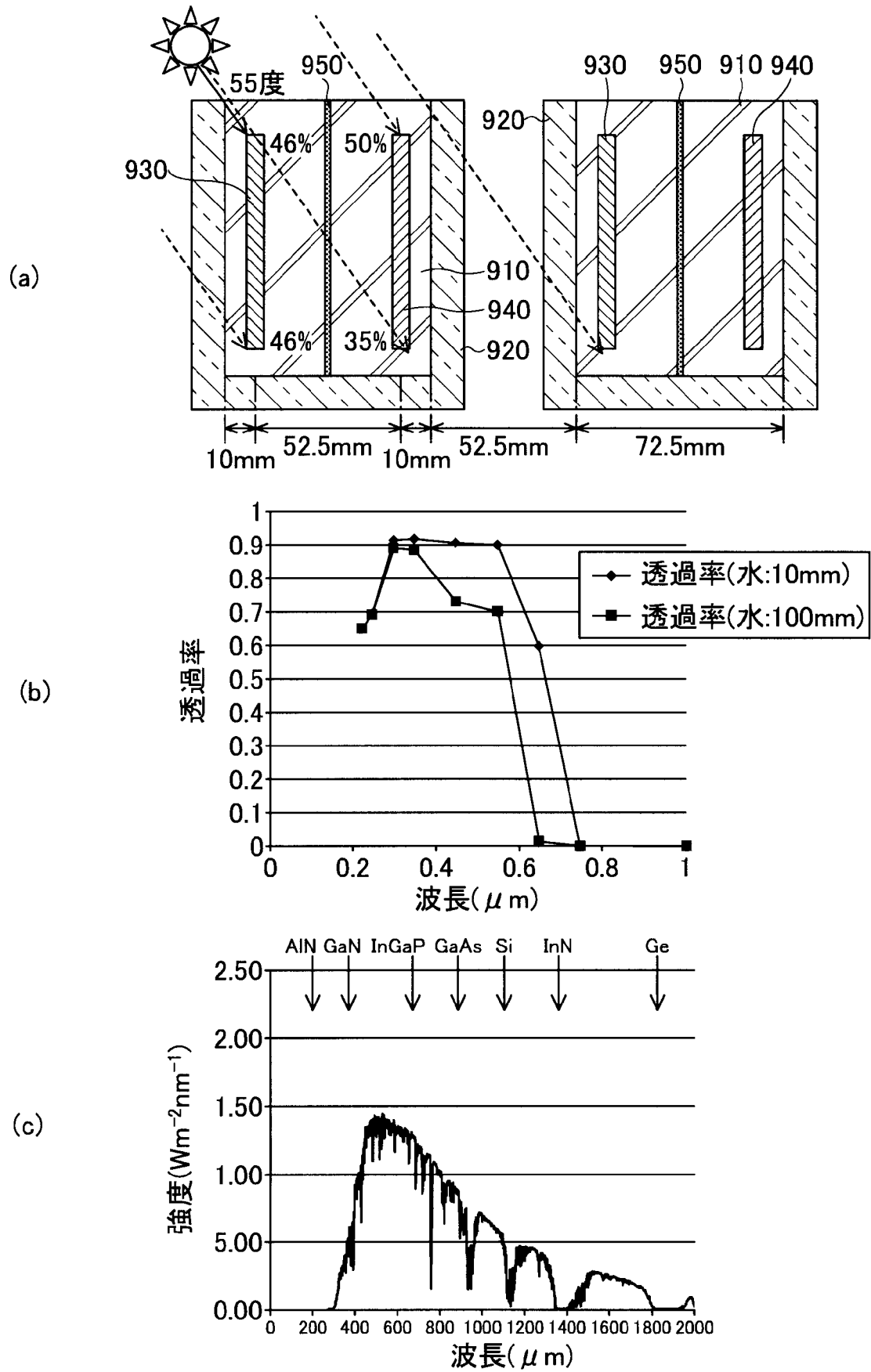
[請求項10] 前記溝部と前記基板の裏面との間には、前記基板を貫通する貫通孔が設けられており、

前記二酸化炭素の含まれた水は、前記基板の裏面より、前記貫通孔を介し、前記溝部に供給されることを特徴とする請求項7から9のいずれかに記載の光合成装置。

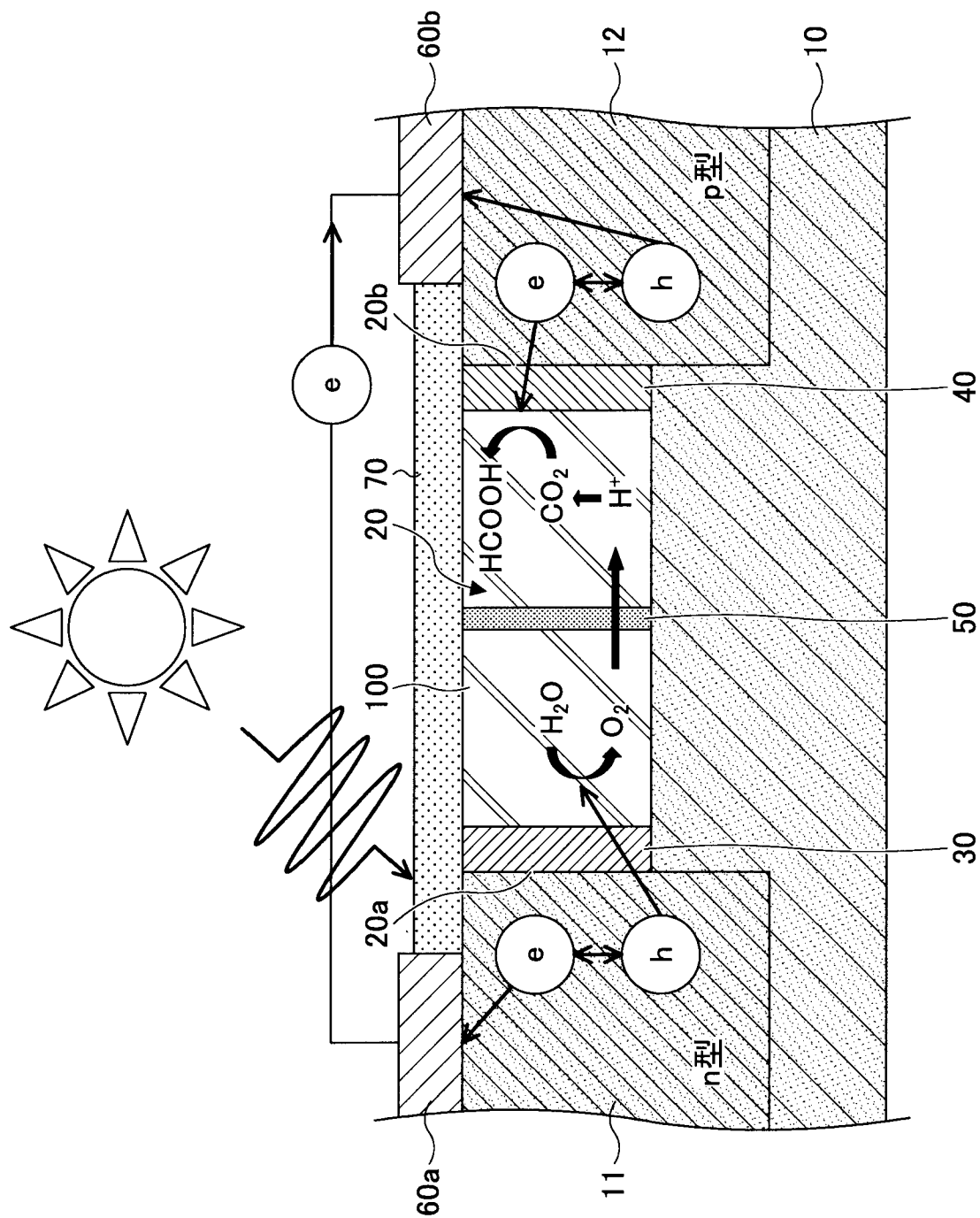
[図1]



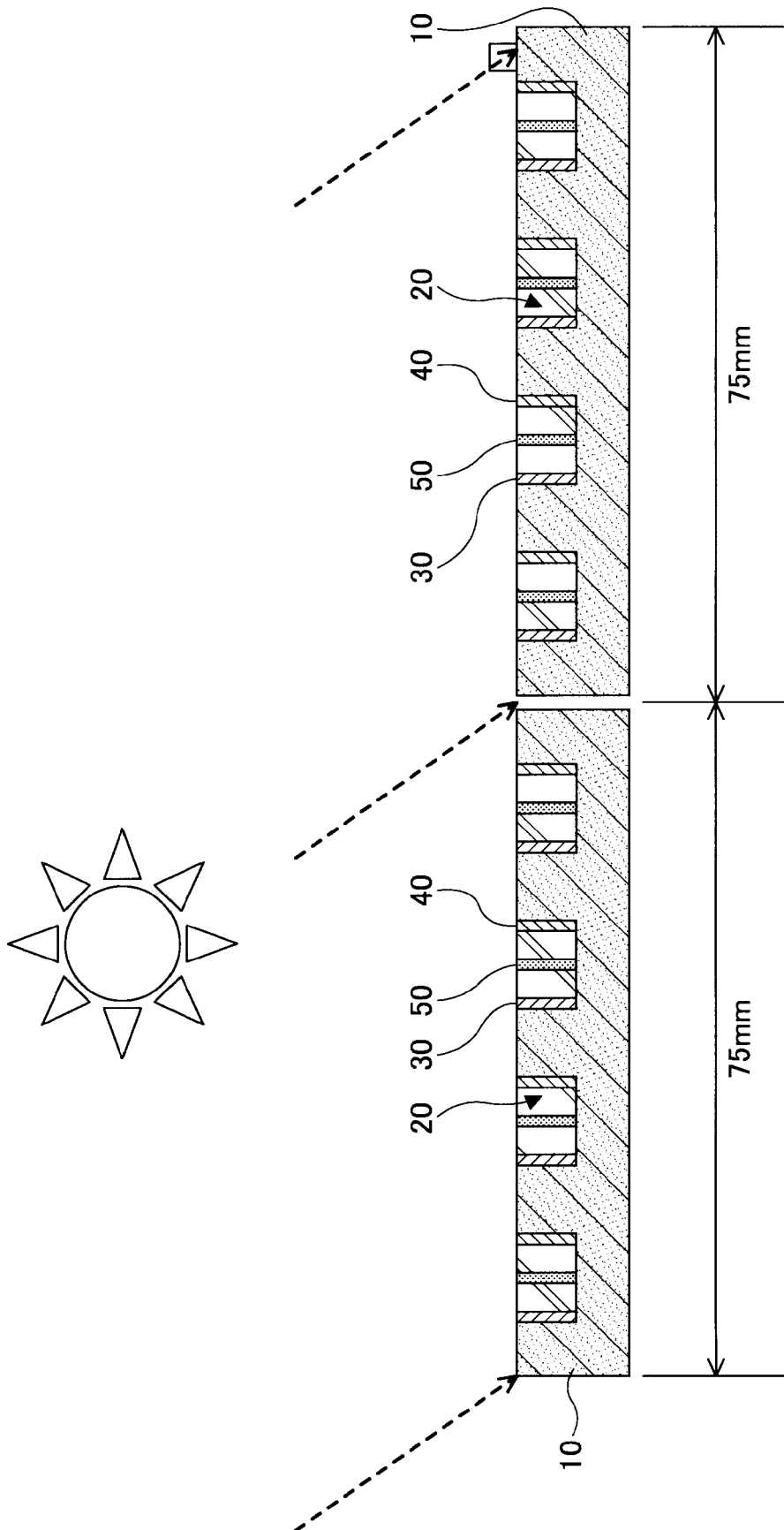
[図2]



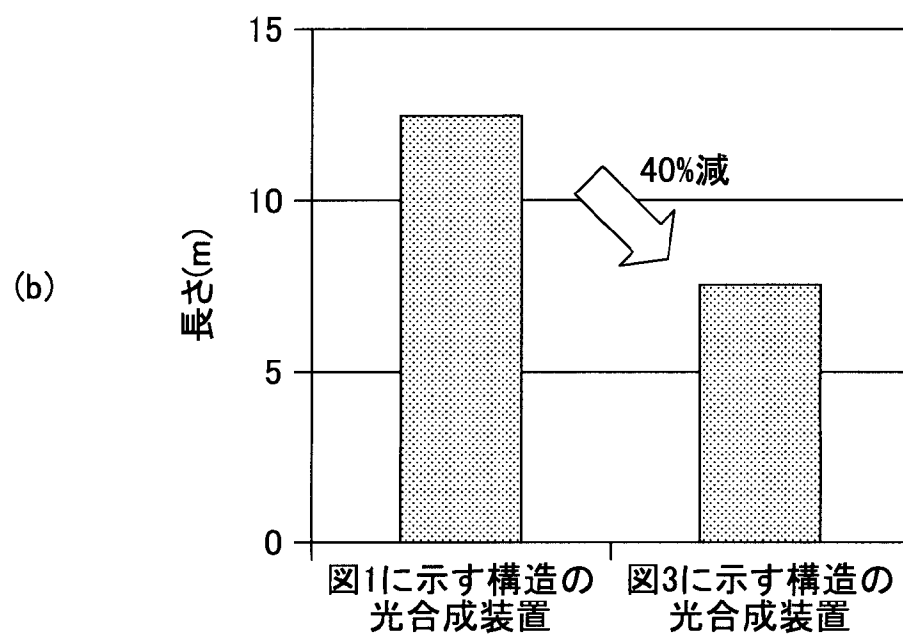
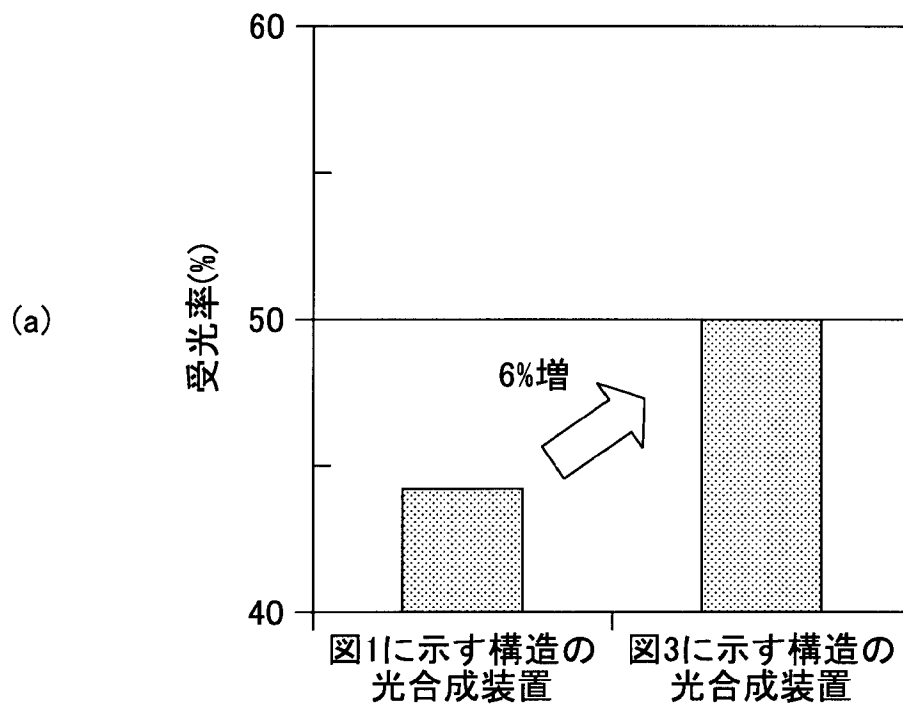
[図3]



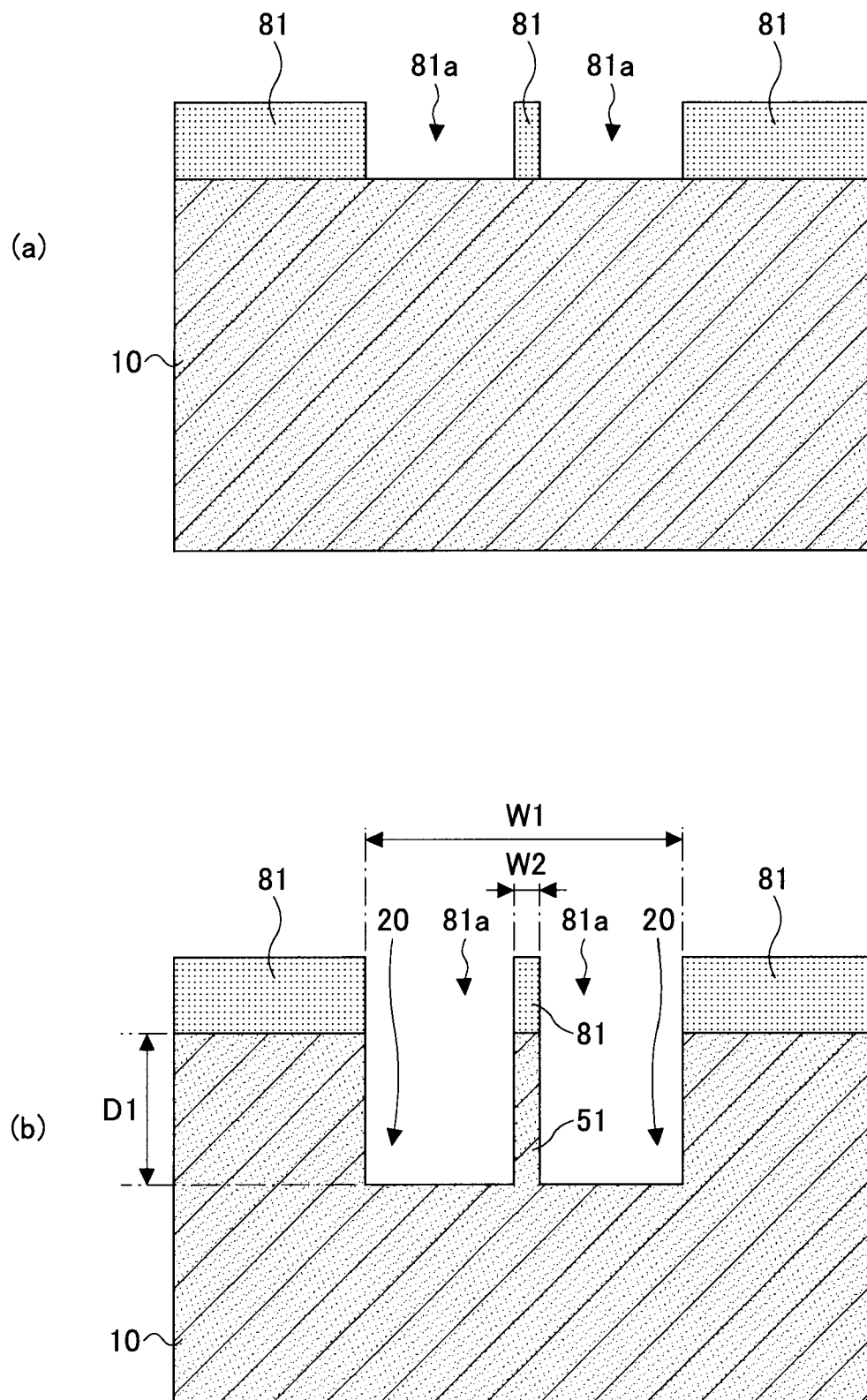
[図4]



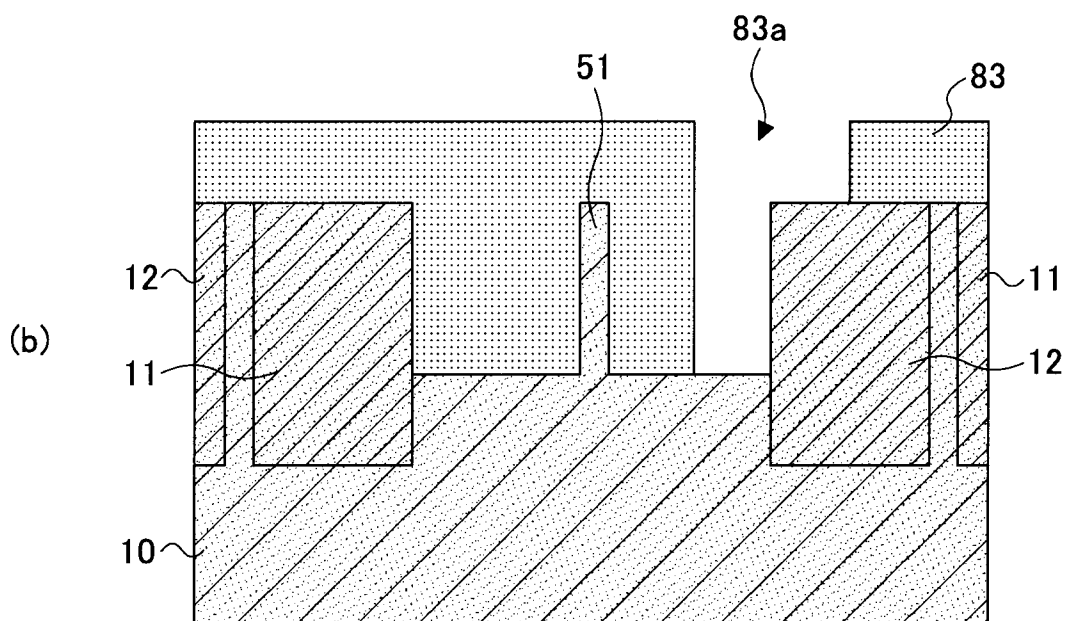
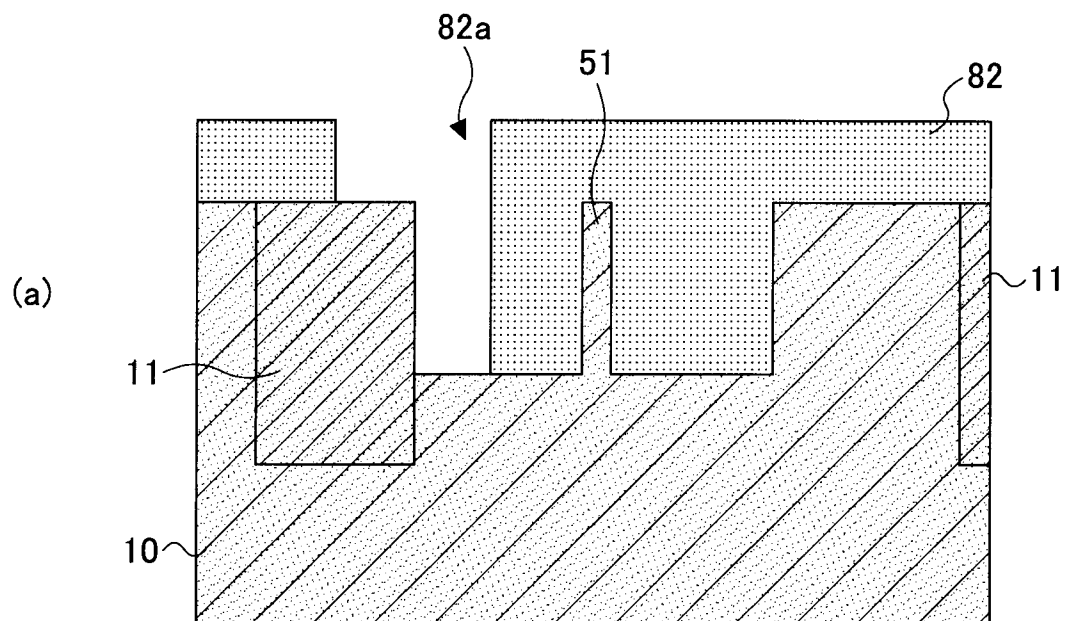
[図5]



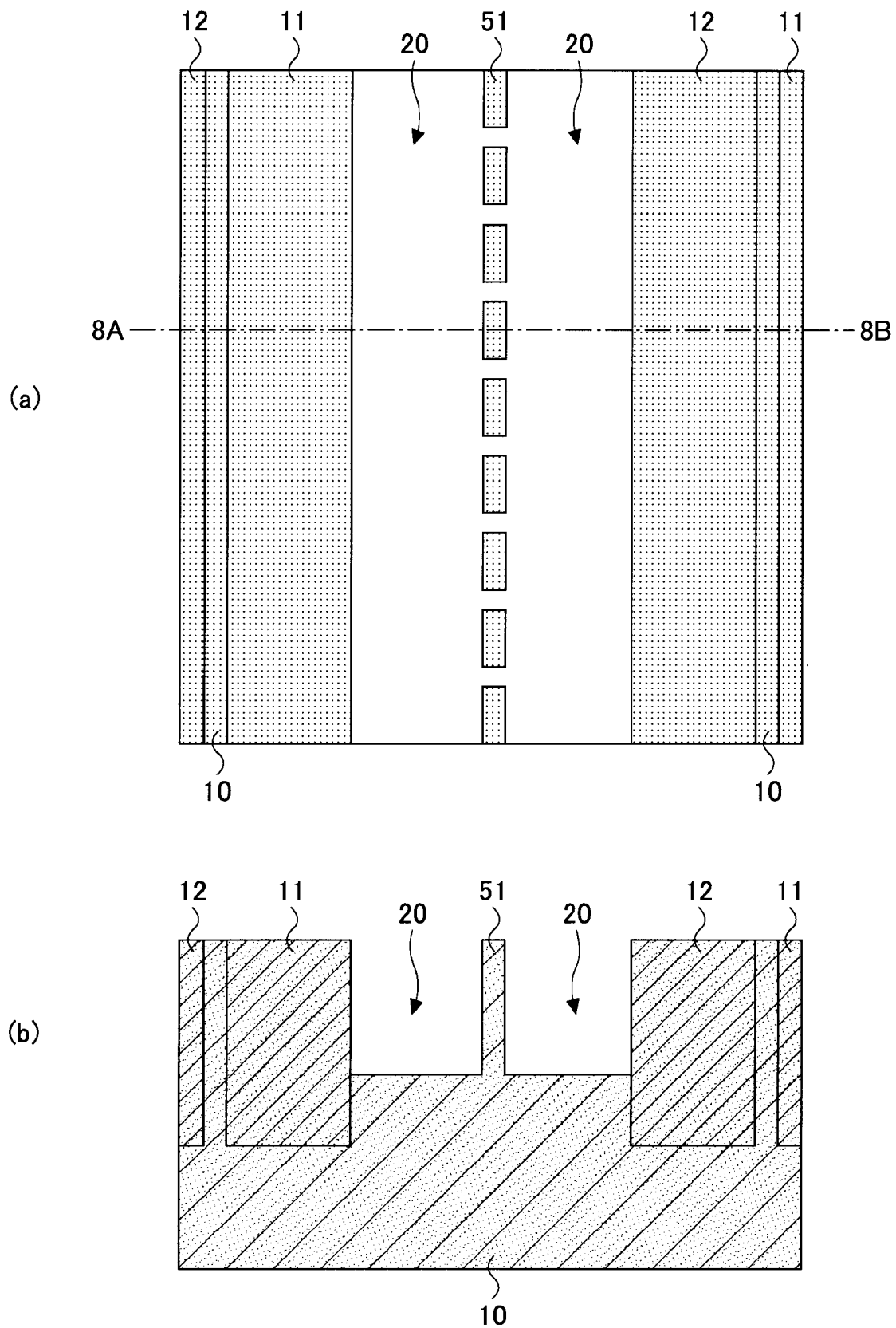
[図6]



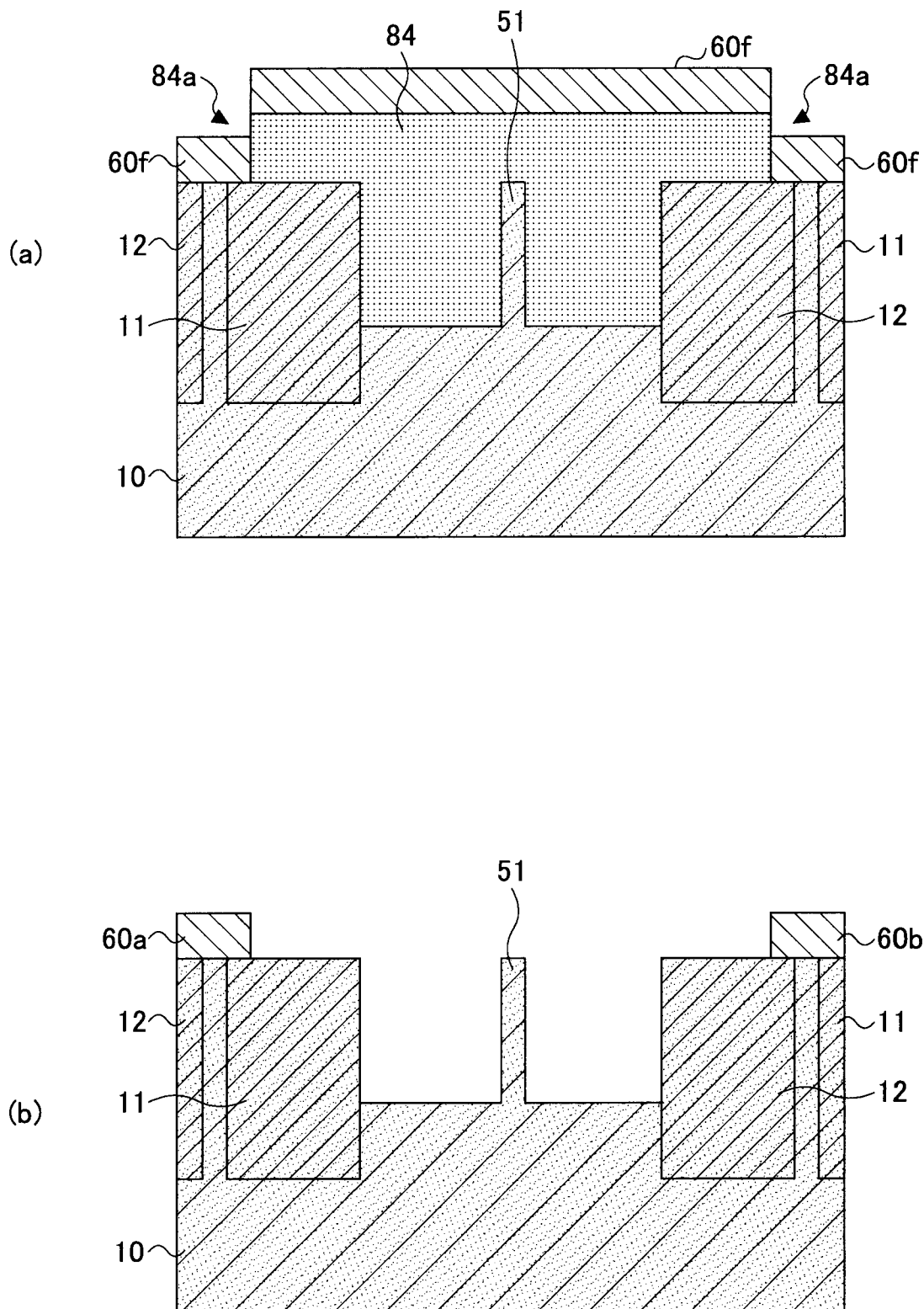
[図7]



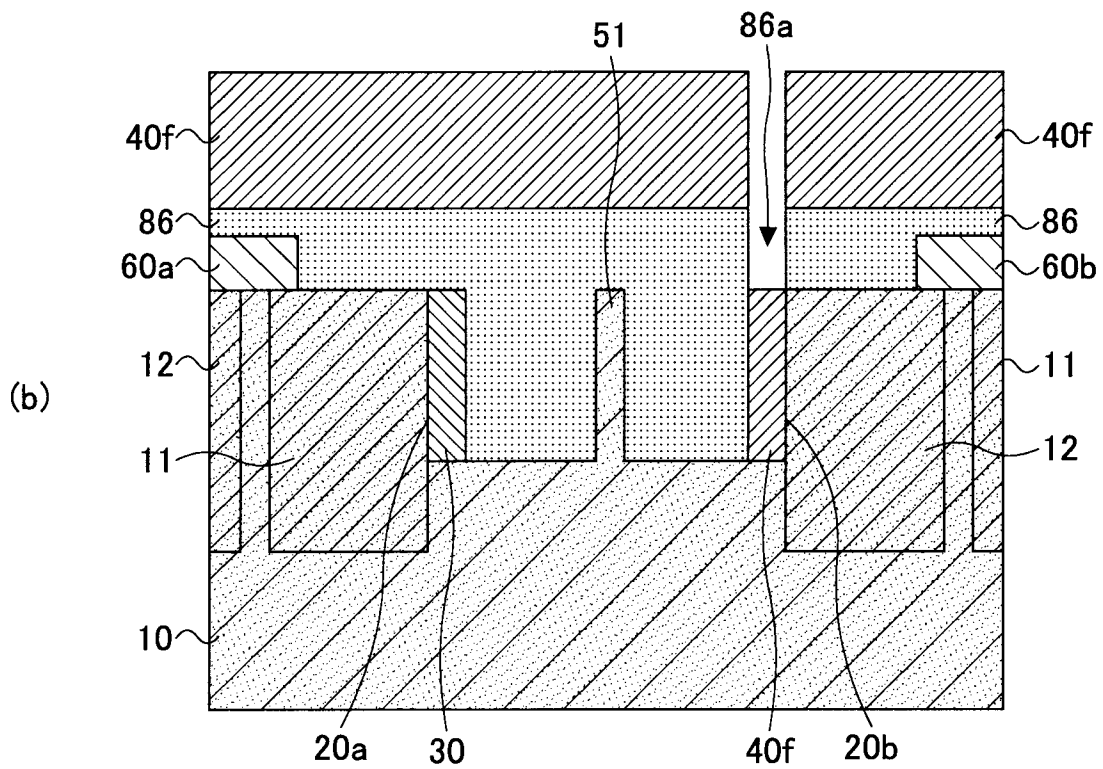
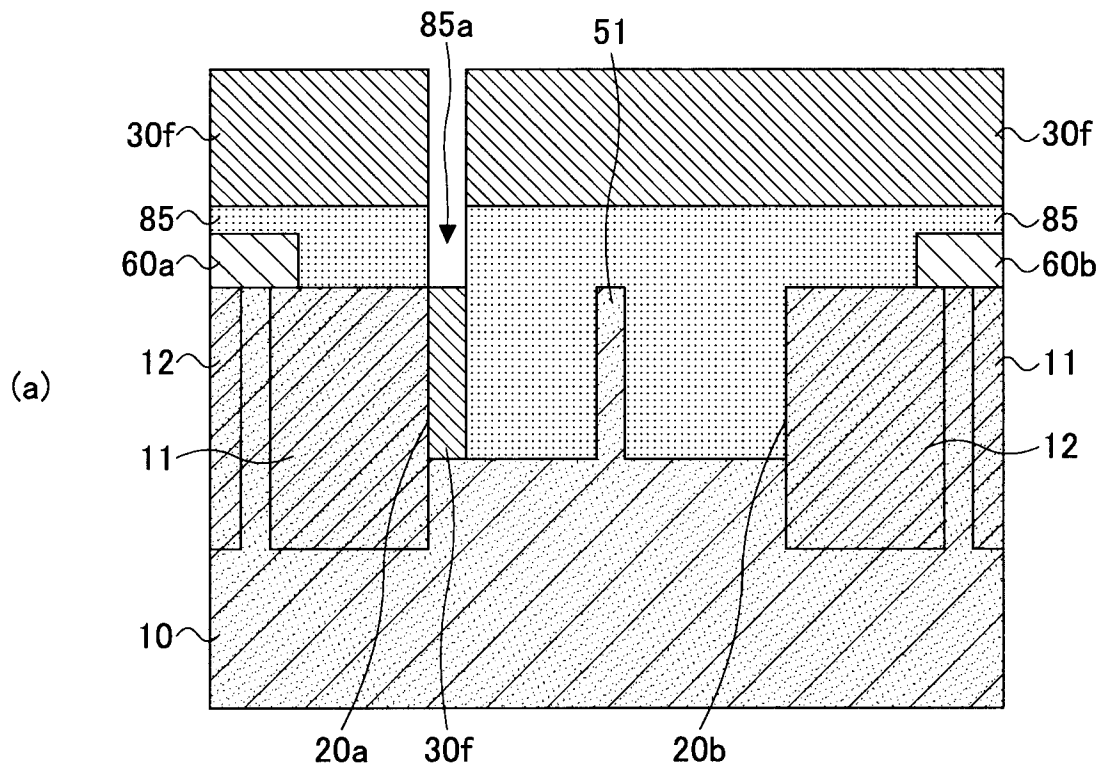
[図8]



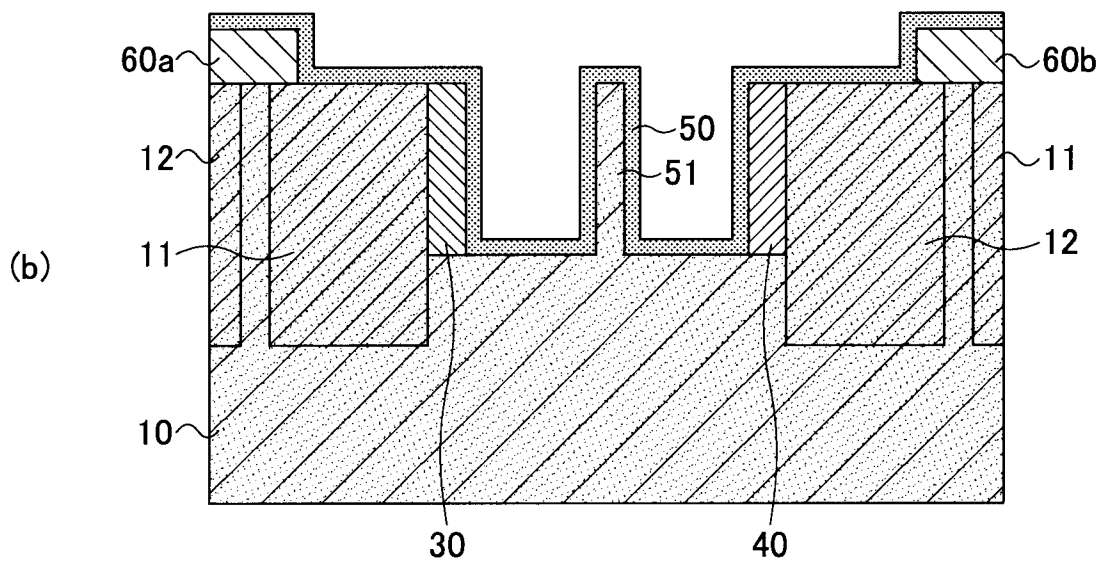
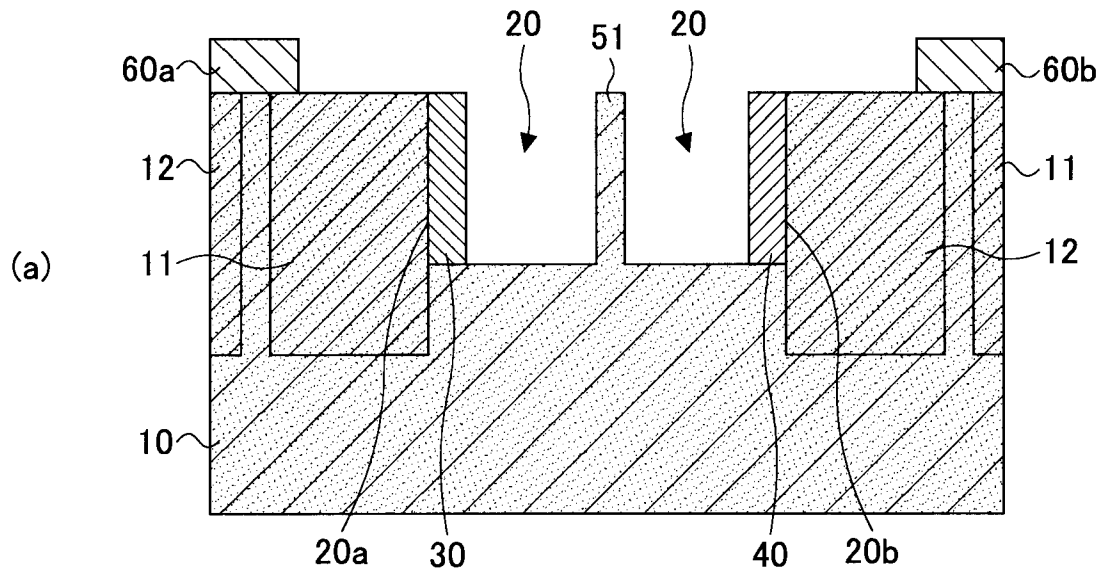
[図9]



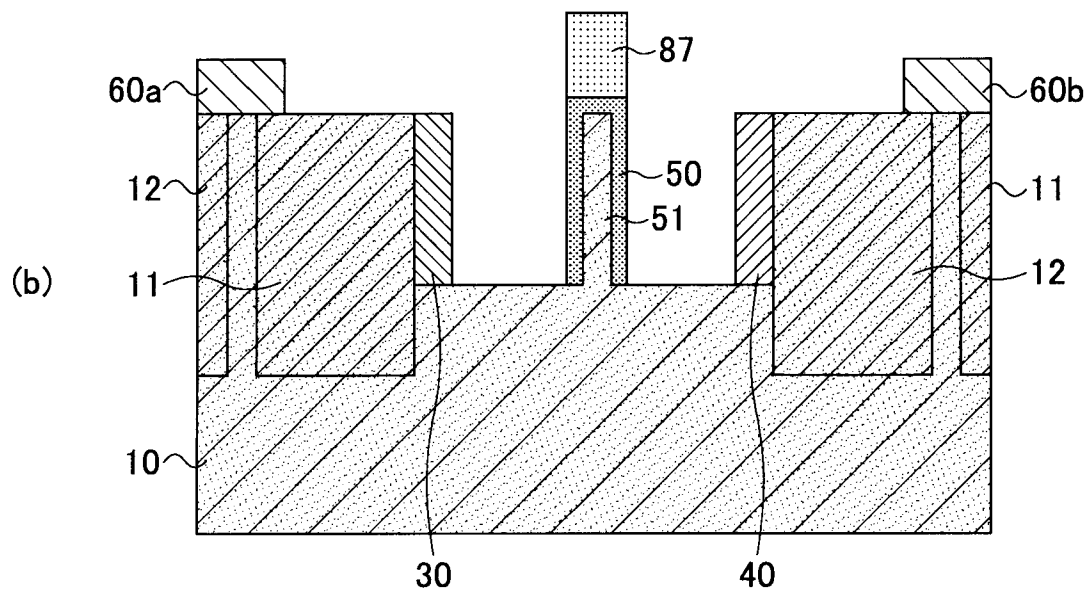
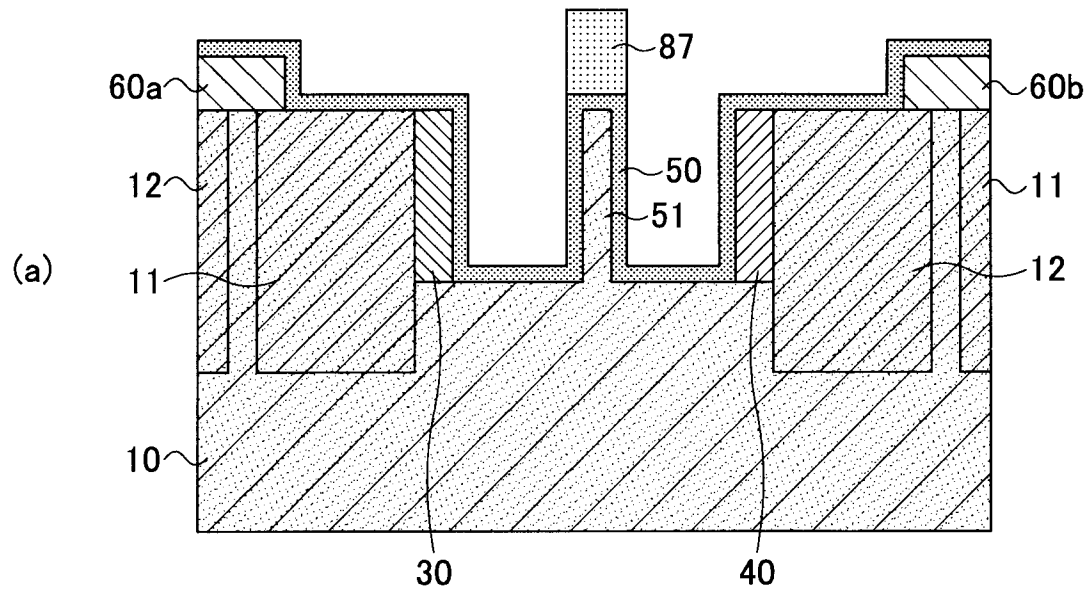
[図10]



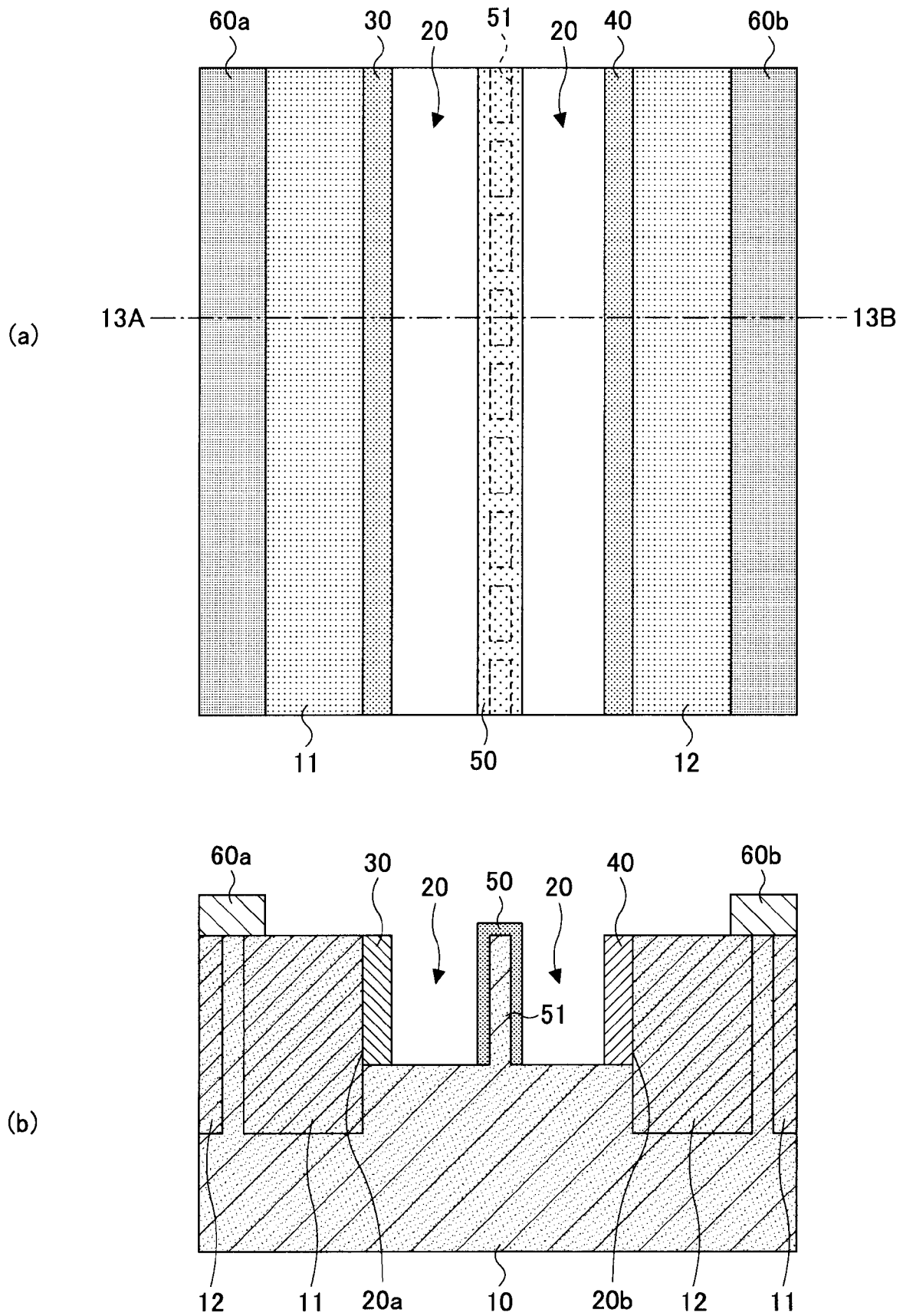
[図11]



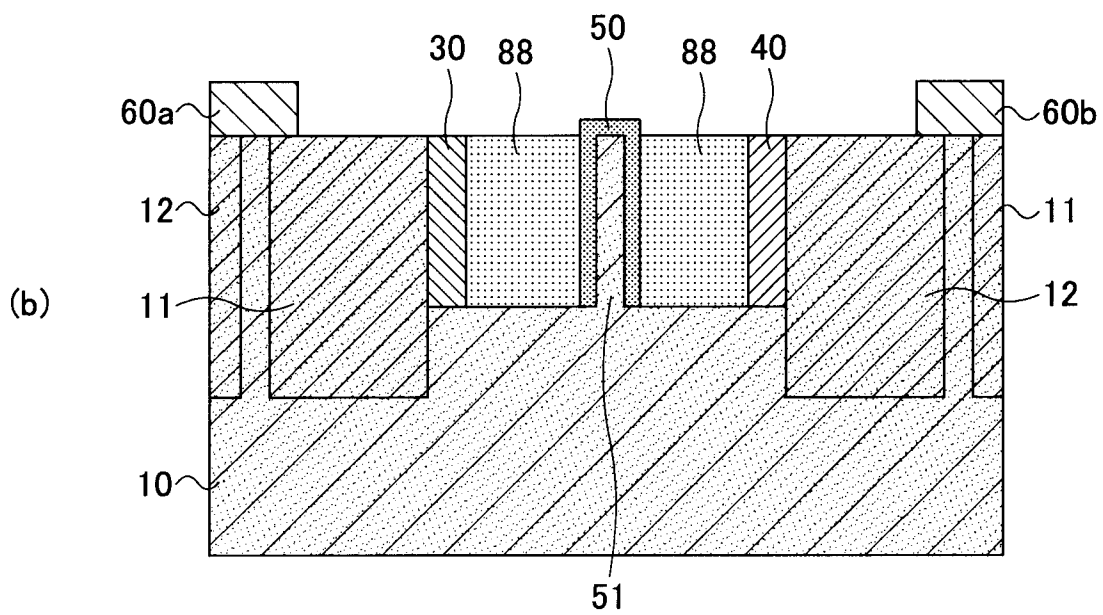
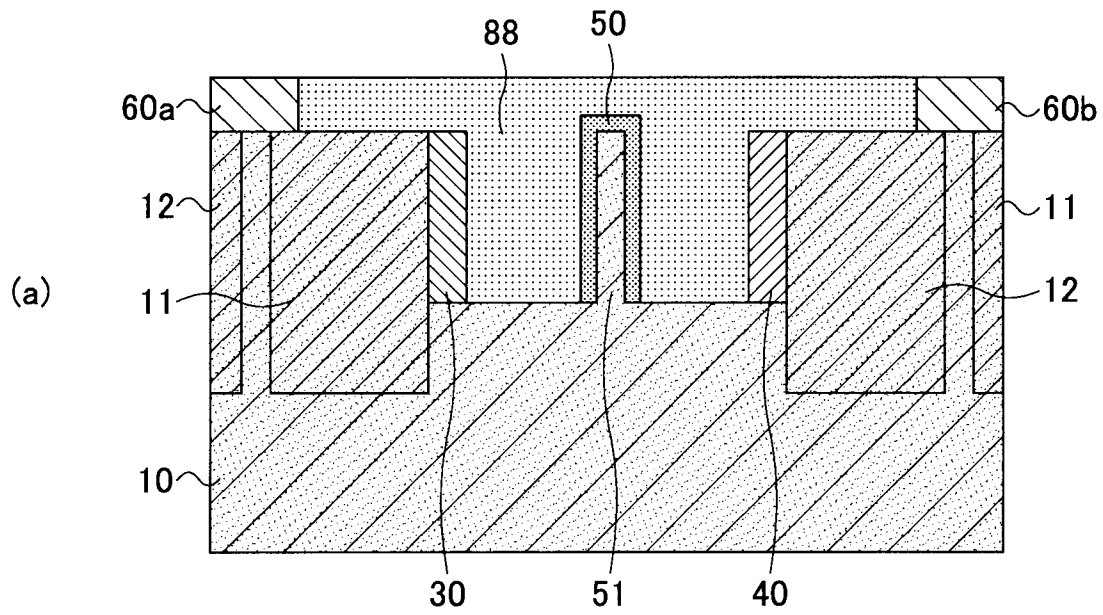
[図12]



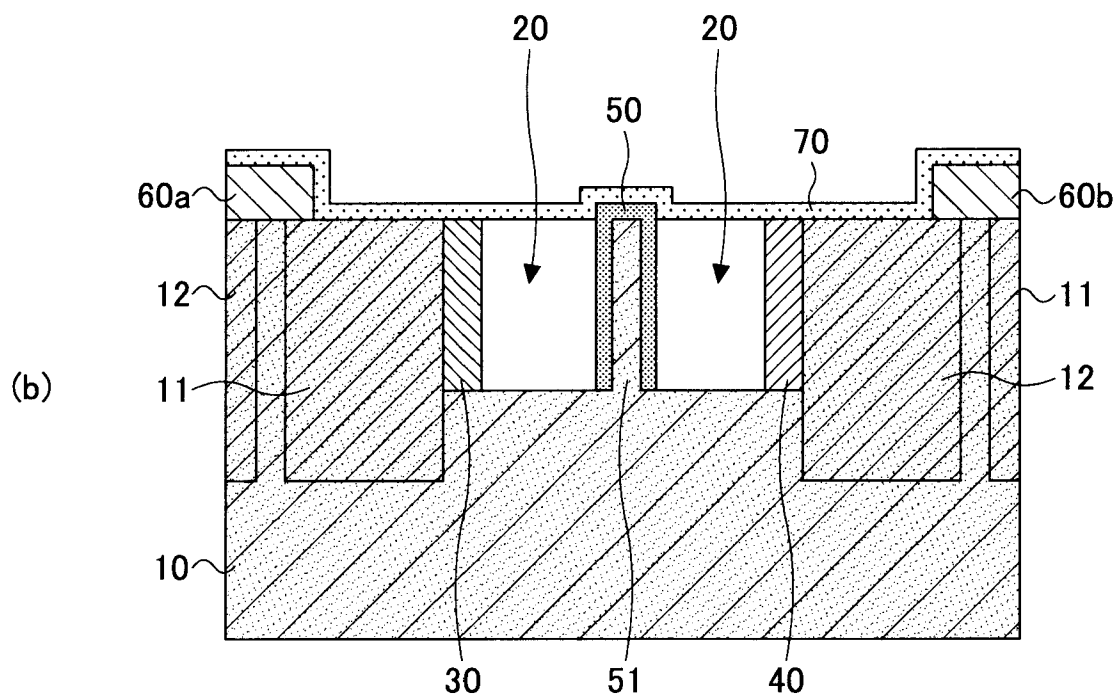
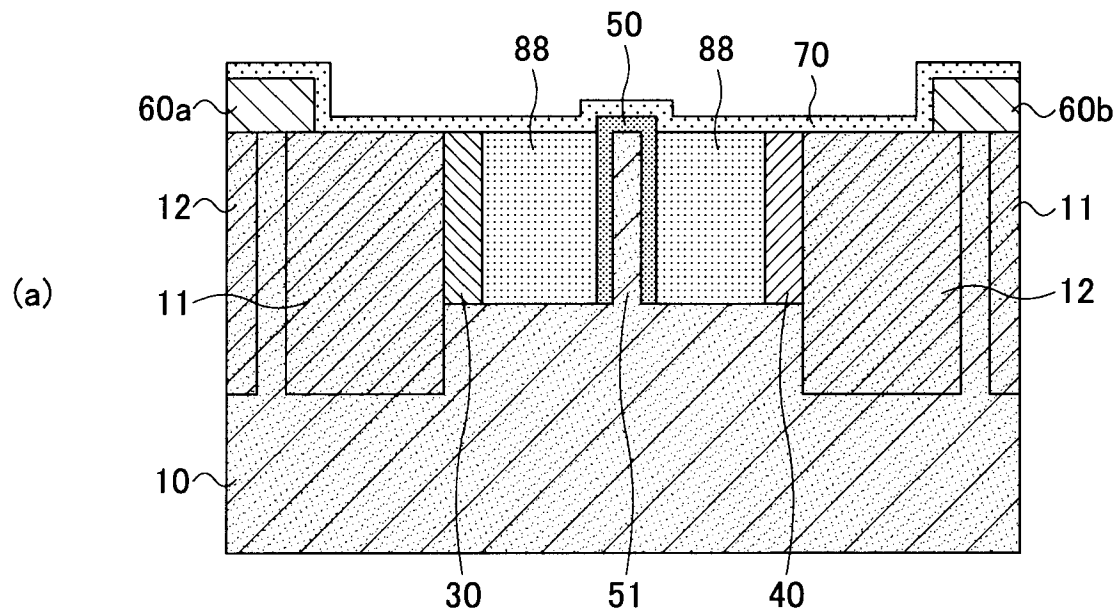
[図13]



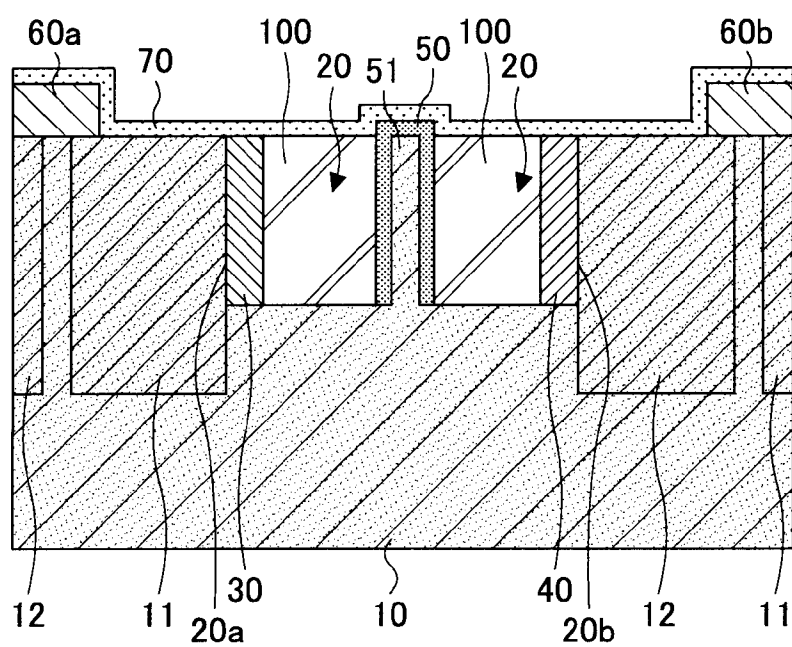
[図14]



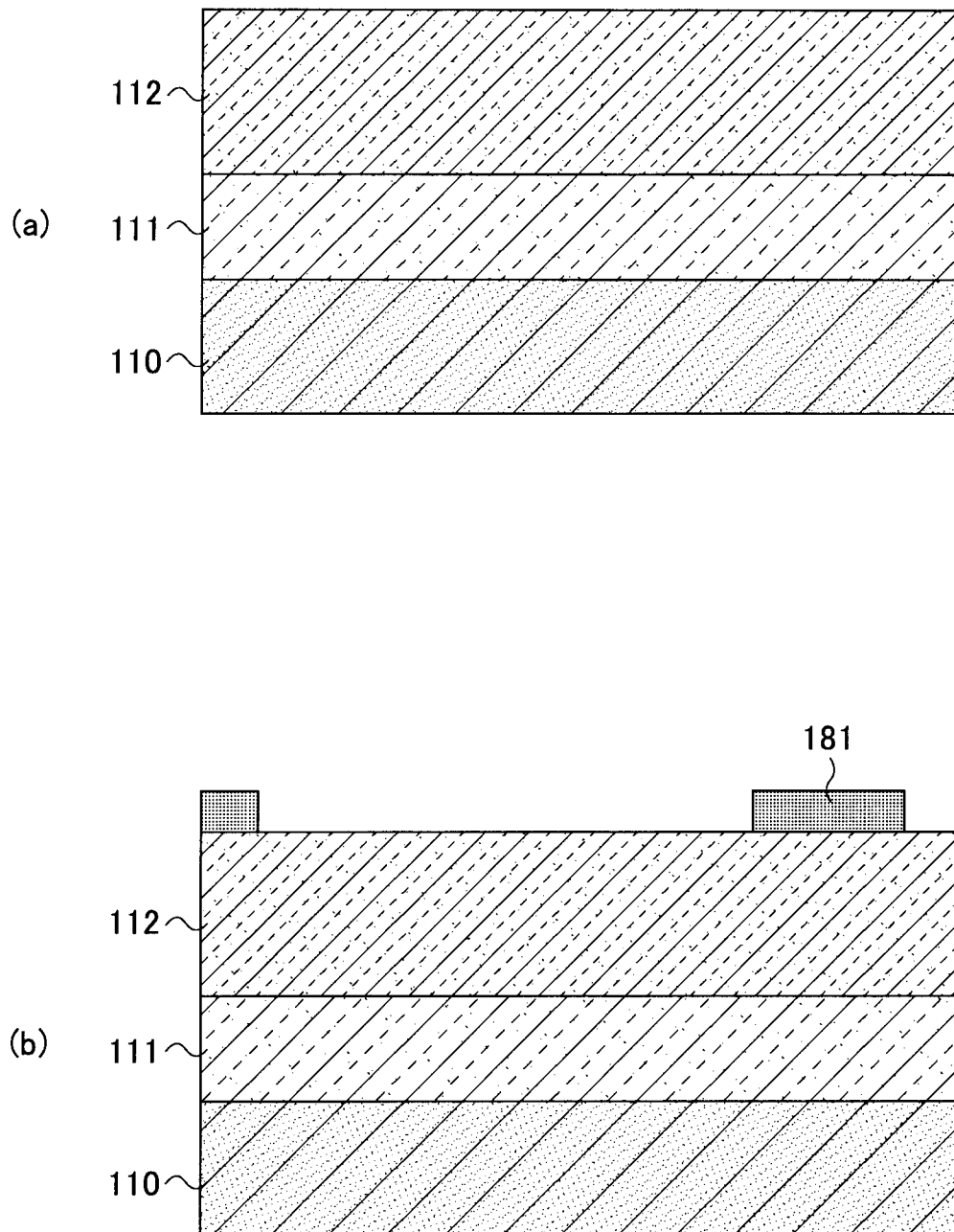
[図15]



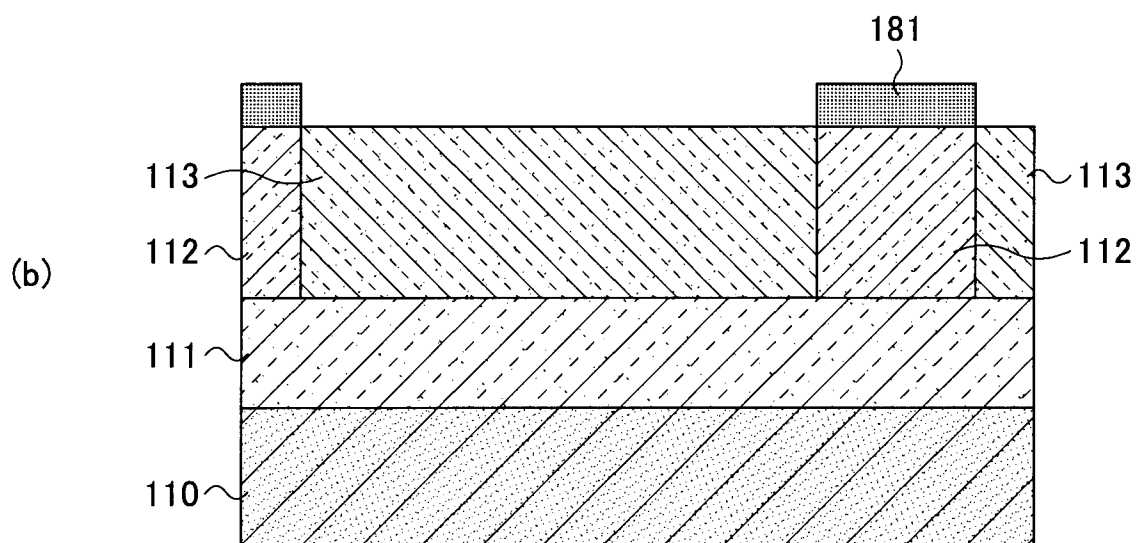
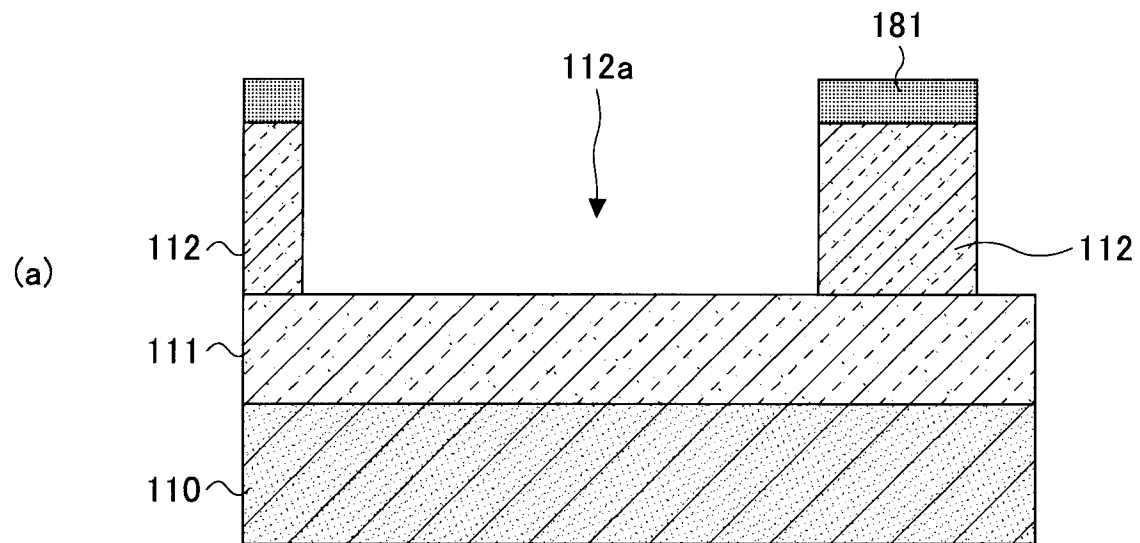
(a)



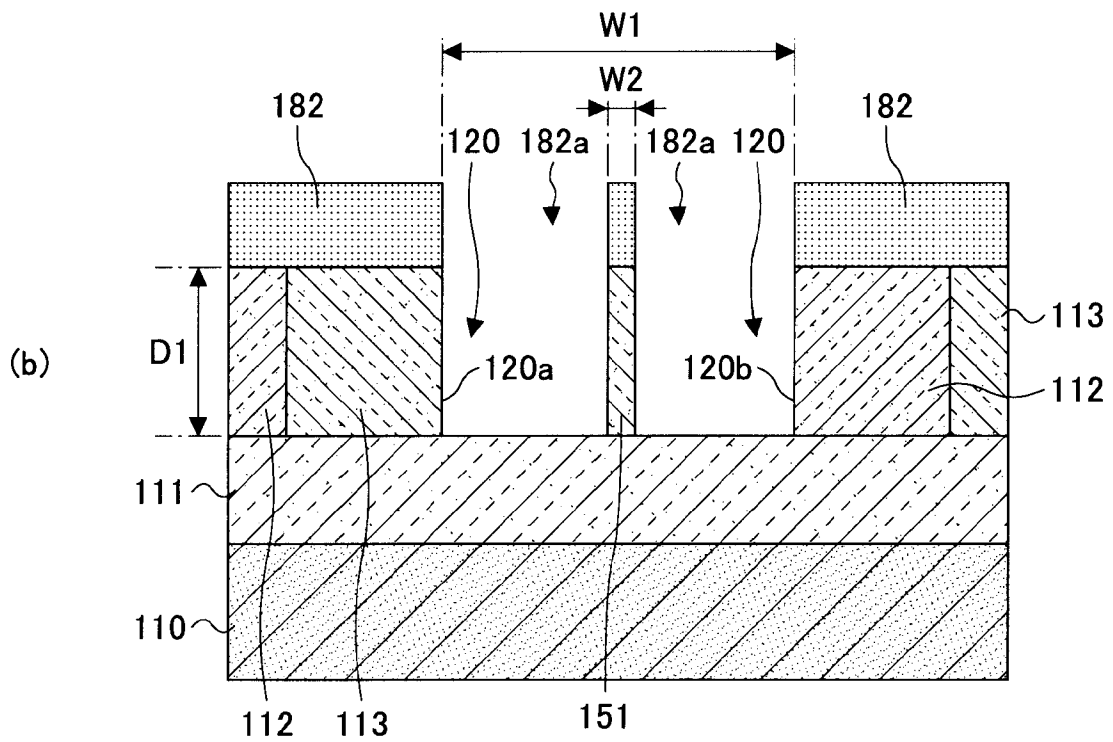
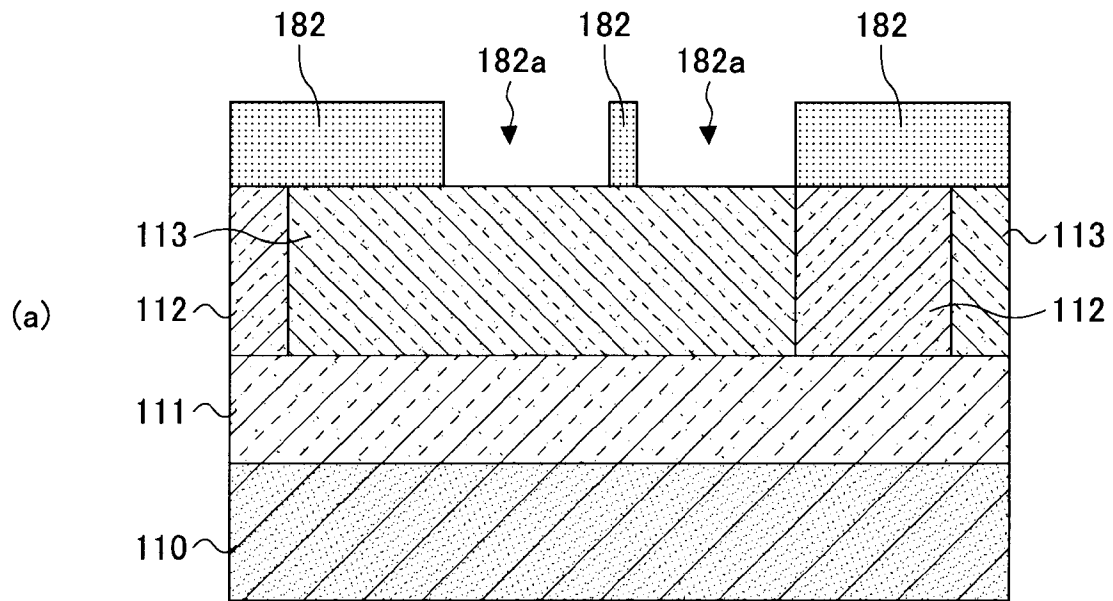
[図17]



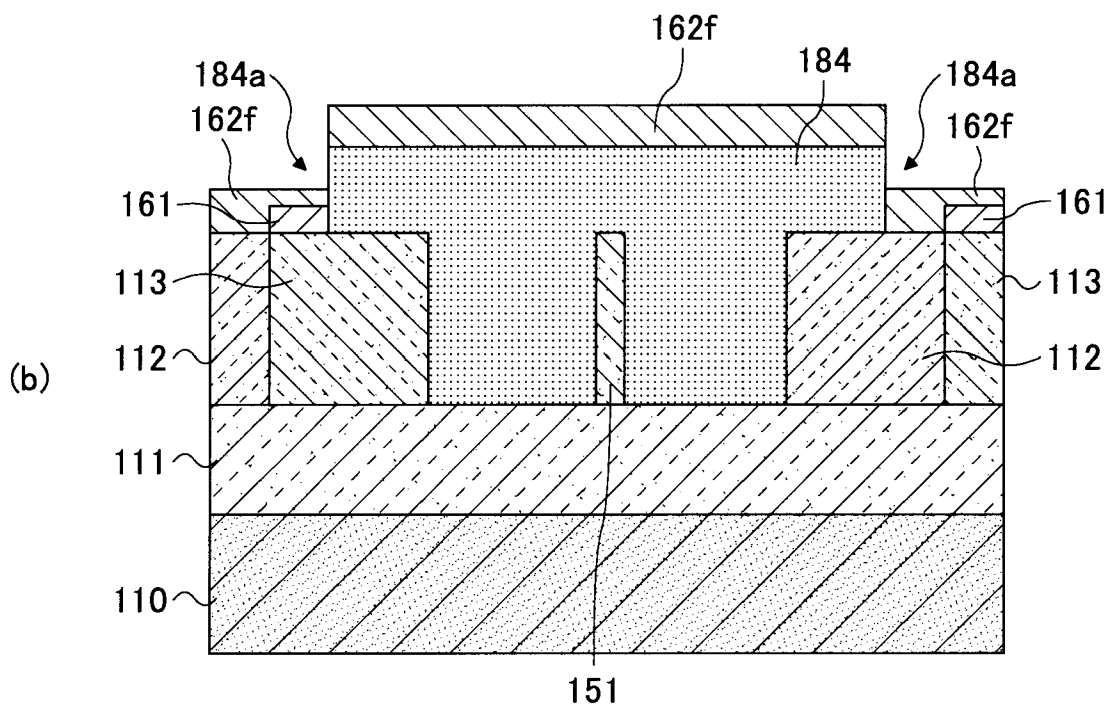
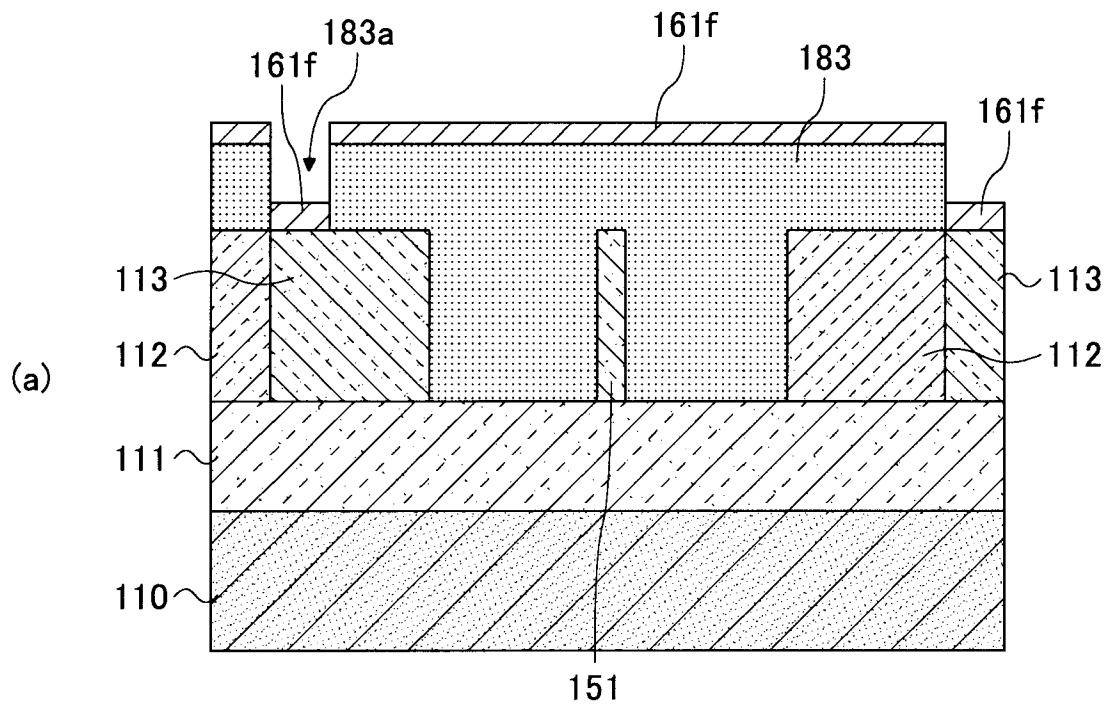
[図18]



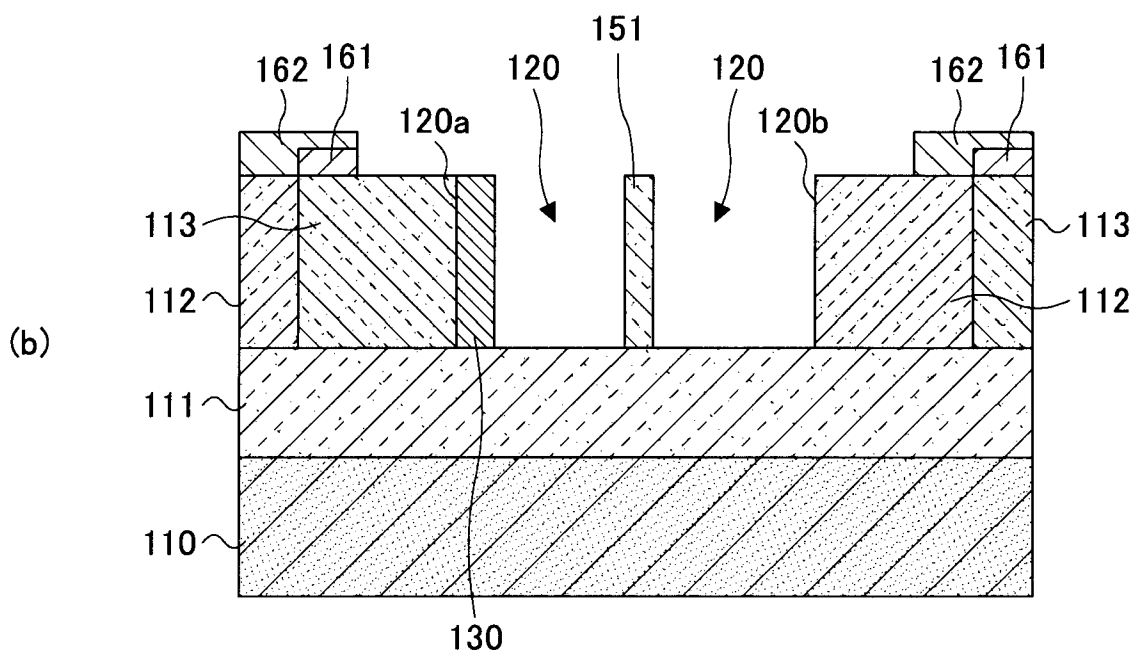
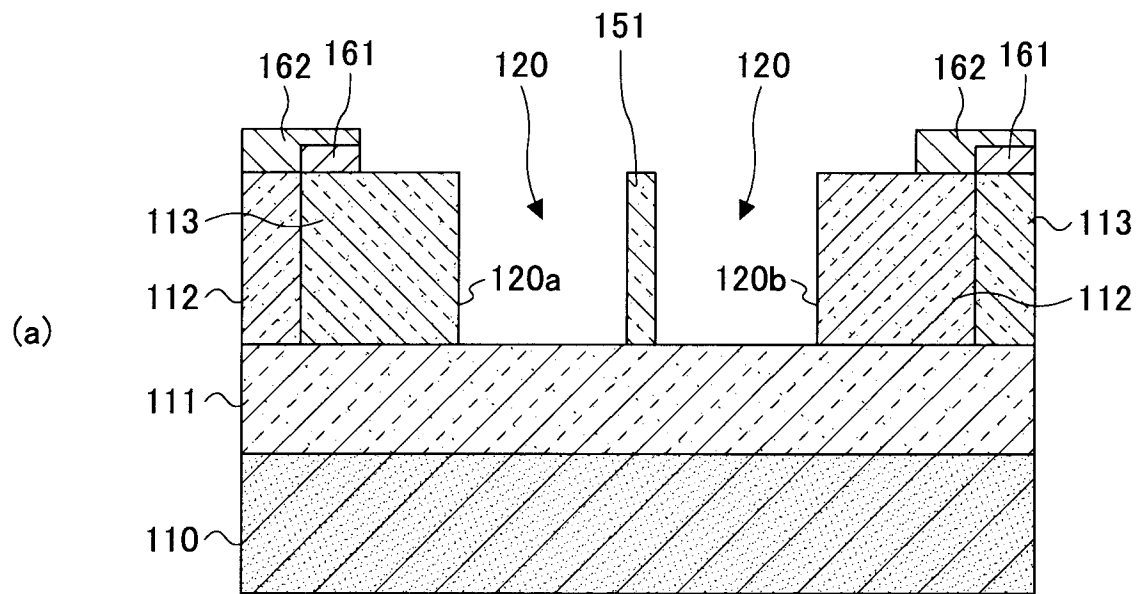
[図19]



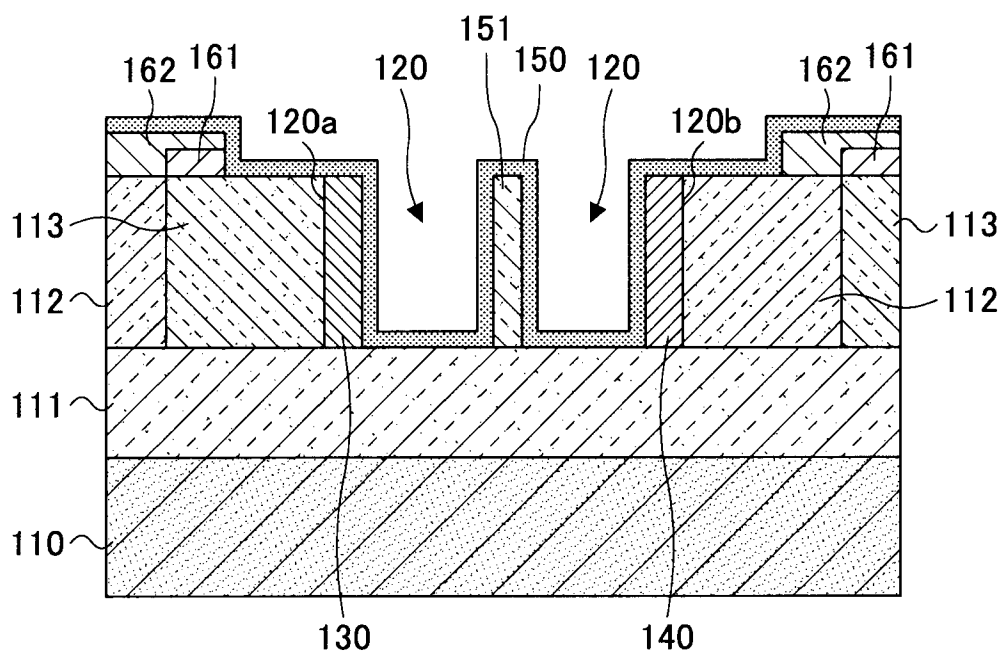
[図20]



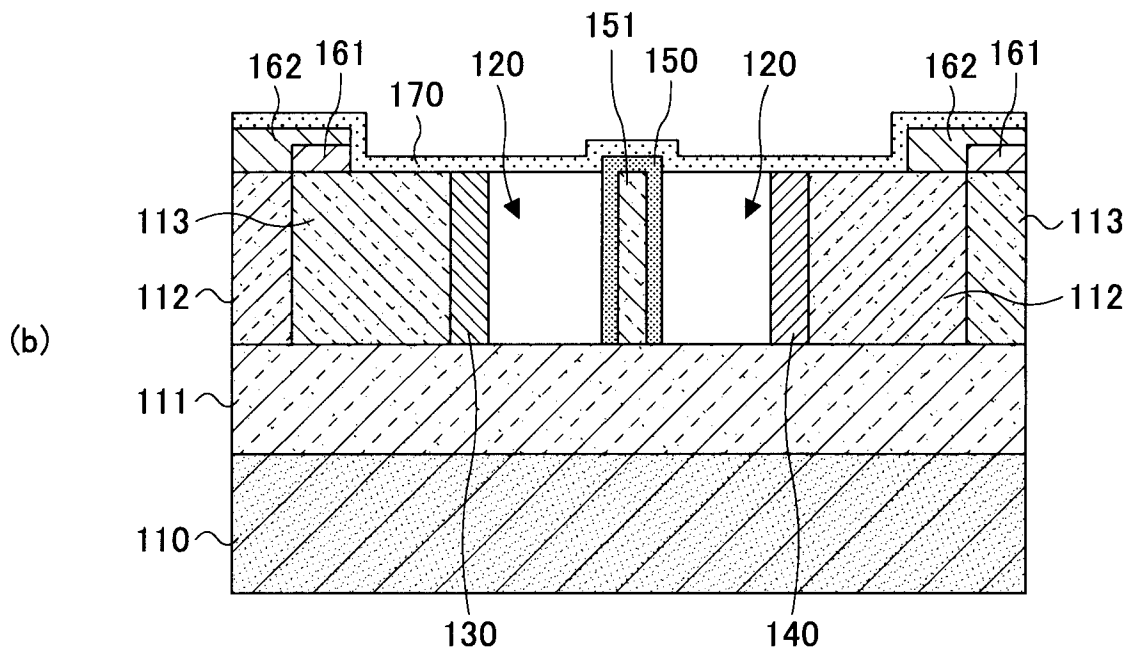
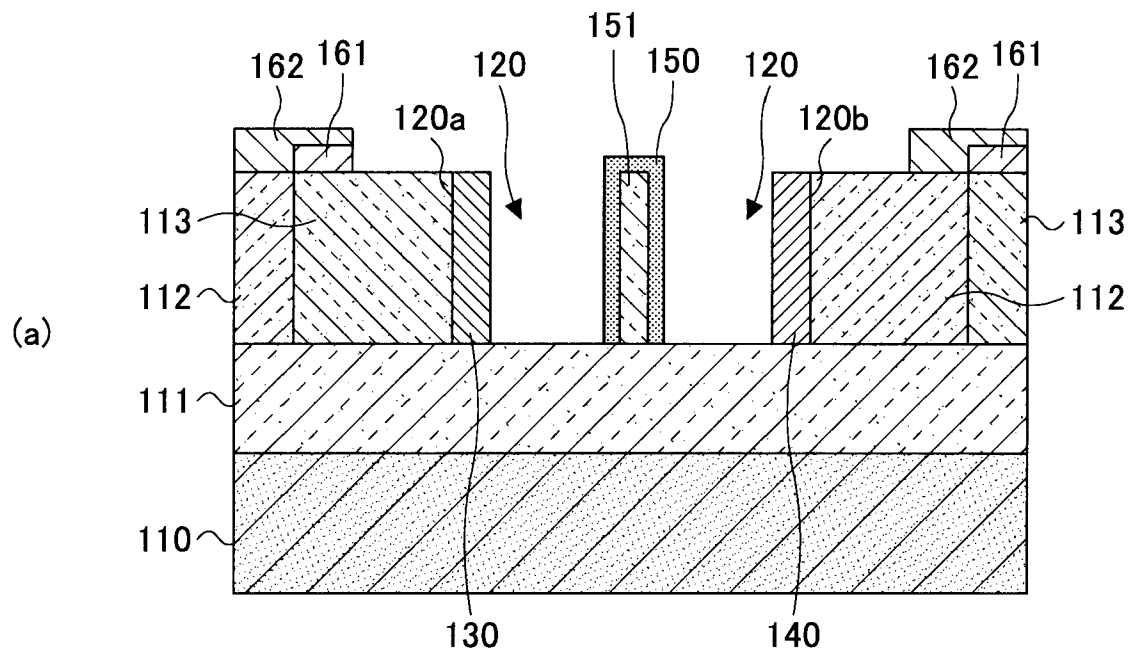
[図21]



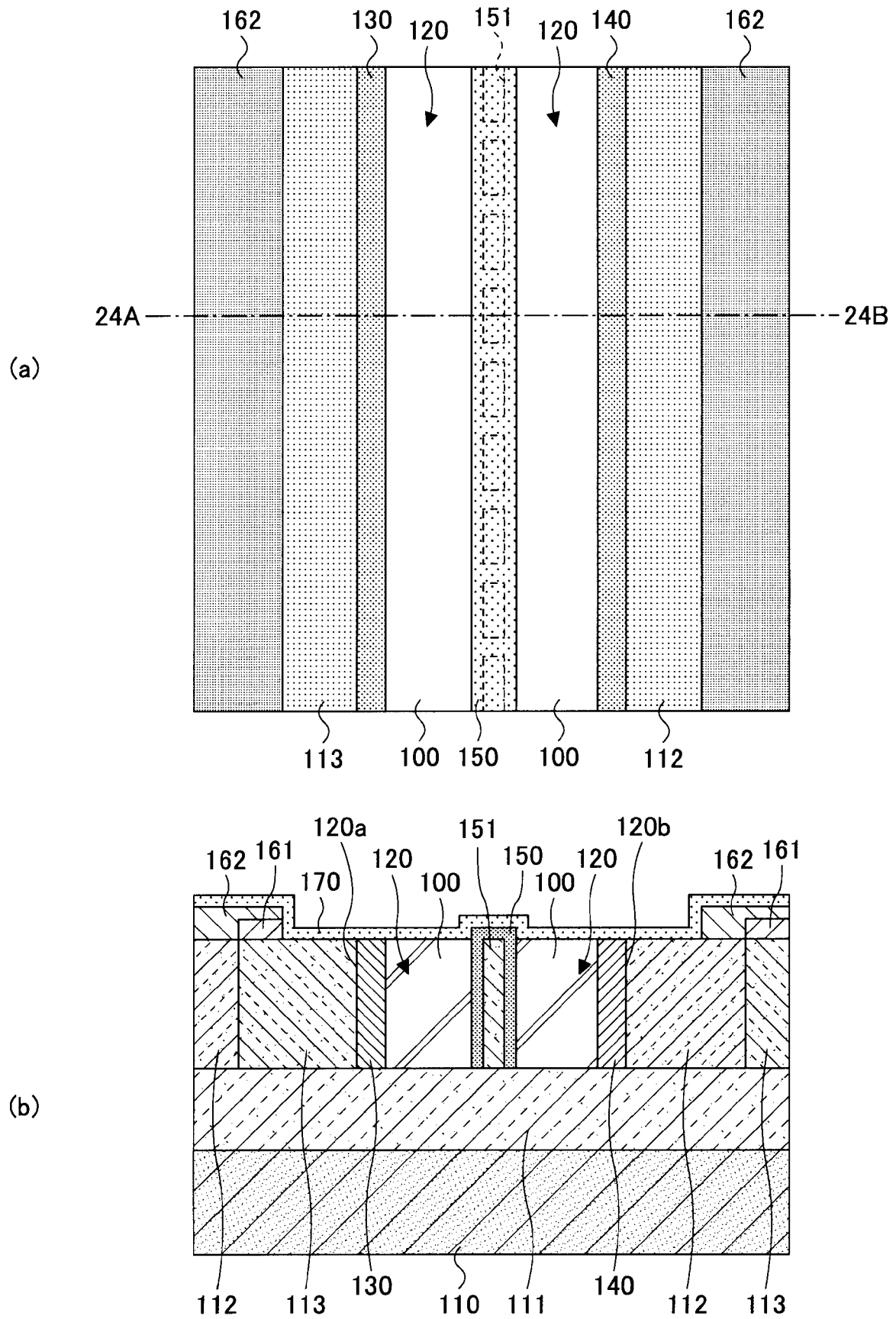
(a)



[図23]

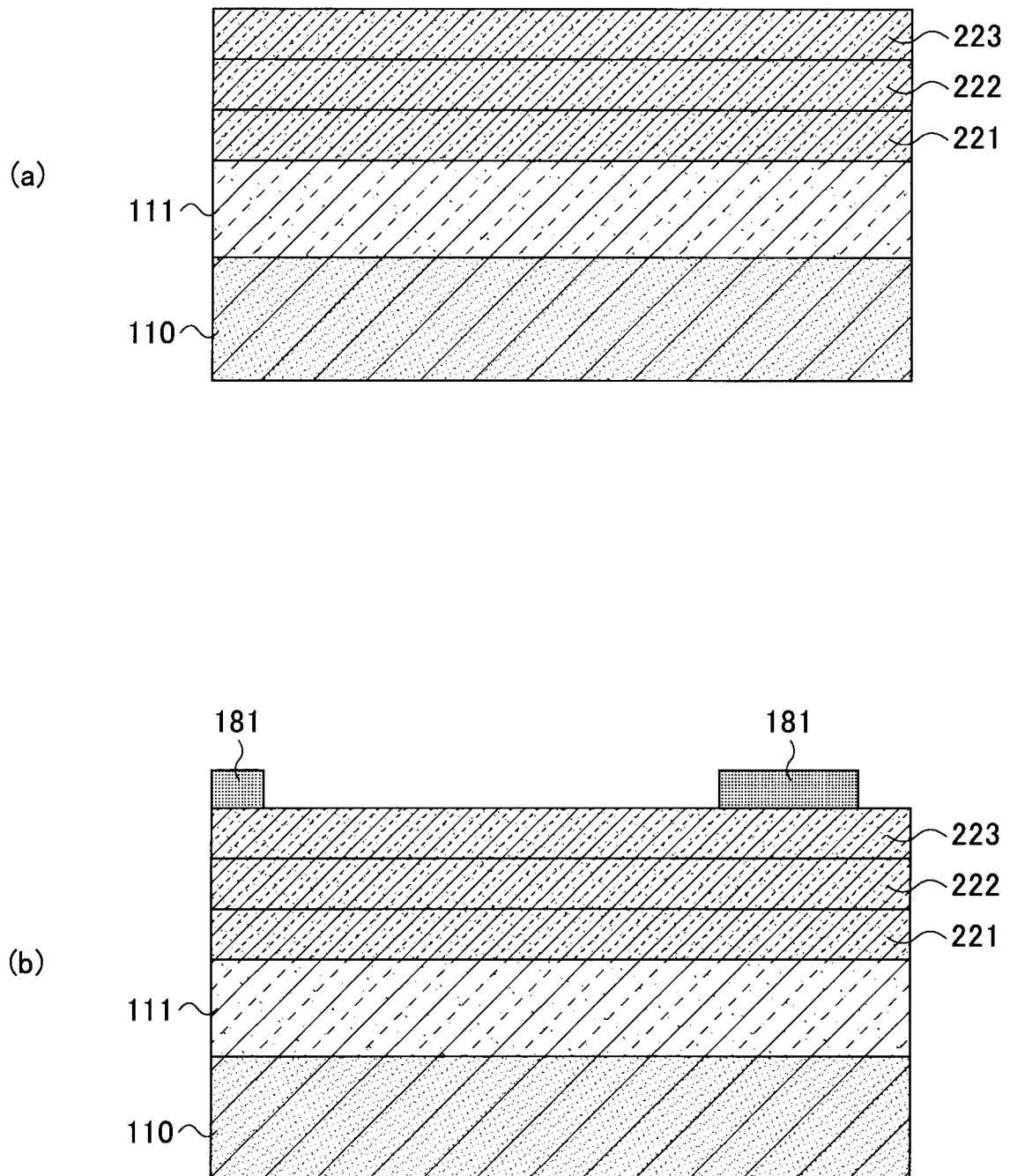


[図24]

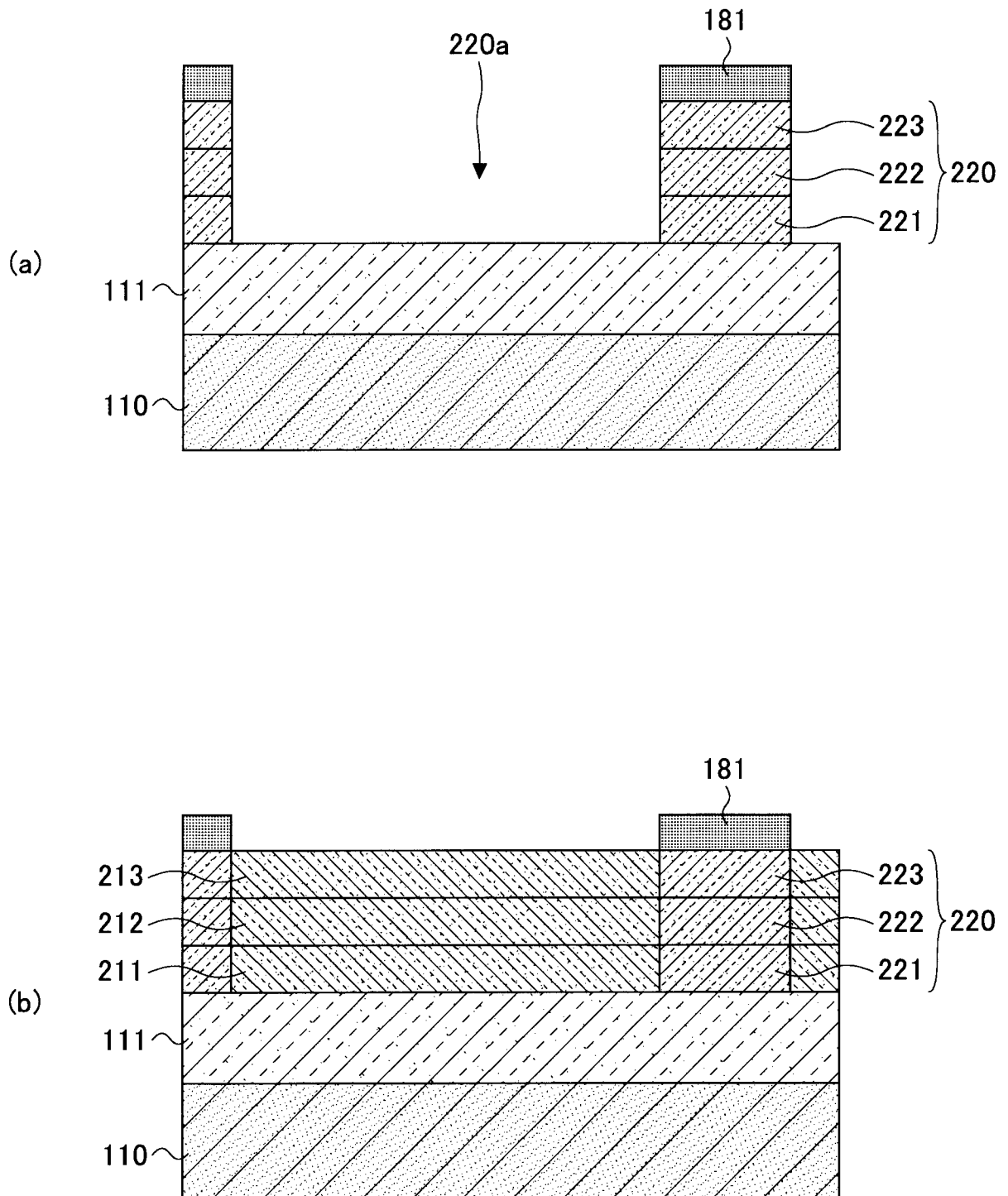


(b) is a cross-sectional view of the semiconductor device. It shows a substrate with layers 110 and 111. A central region contains a structure with layers 100, 120, 130, 140, 150, and 151. The structure is surrounded by a material with a grid pattern, labeled 160. The top surface is labeled 161, and the bottom surface is labeled 162. The central region is labeled 120a and 120b. The substrate is labeled 211, 212, and 213. The entire structure is labeled 220.

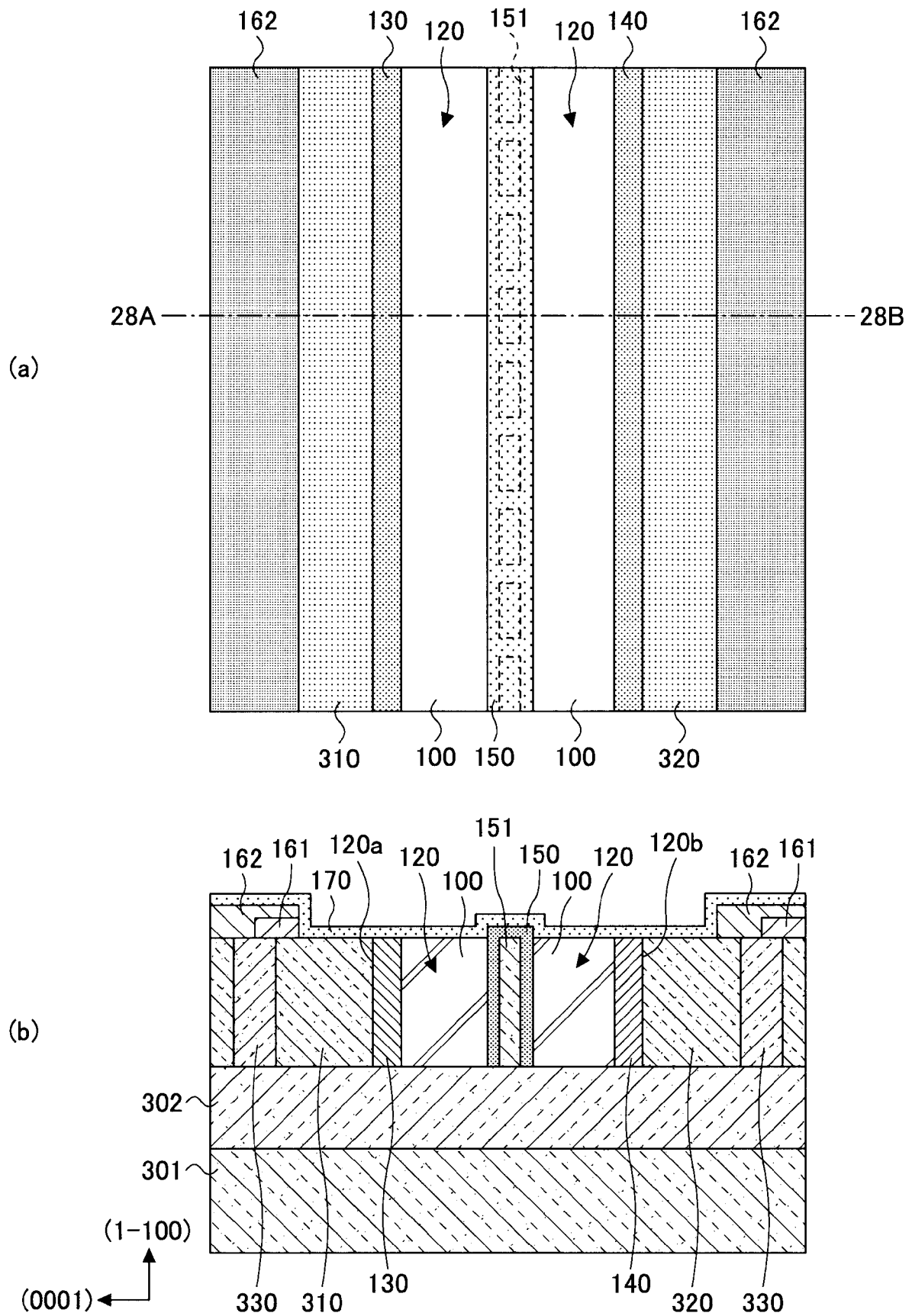
[図26]



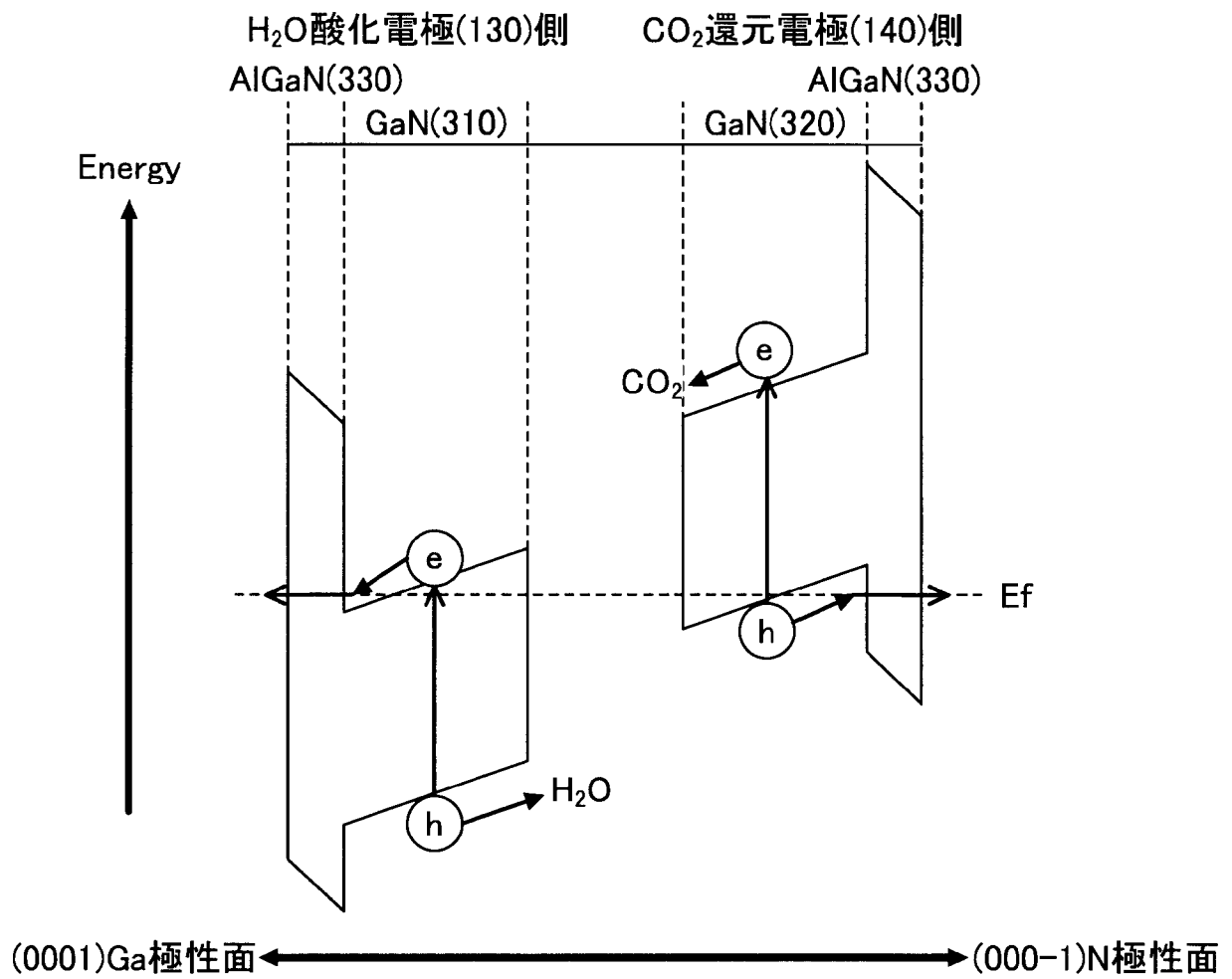
[図27]



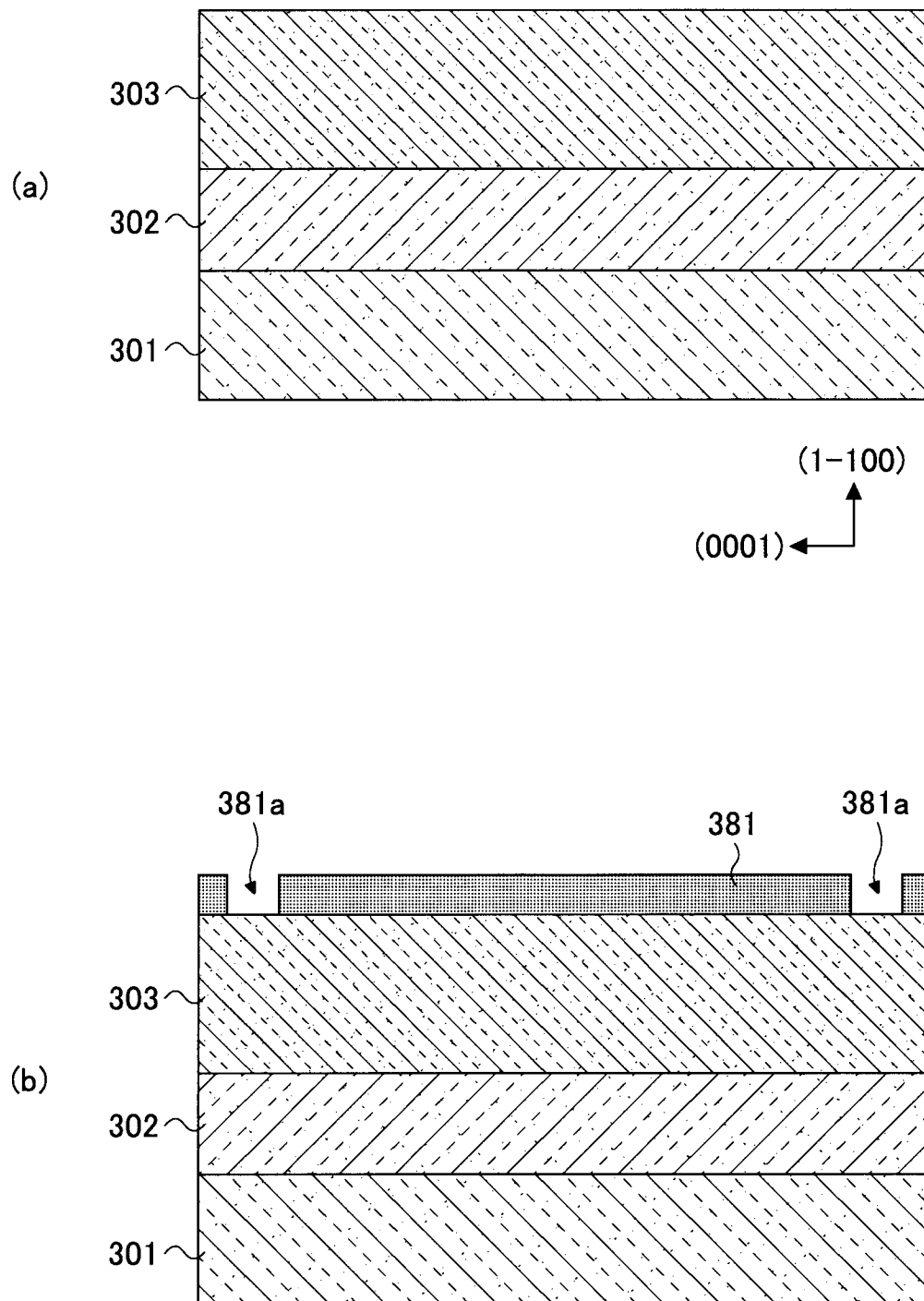
[図28]



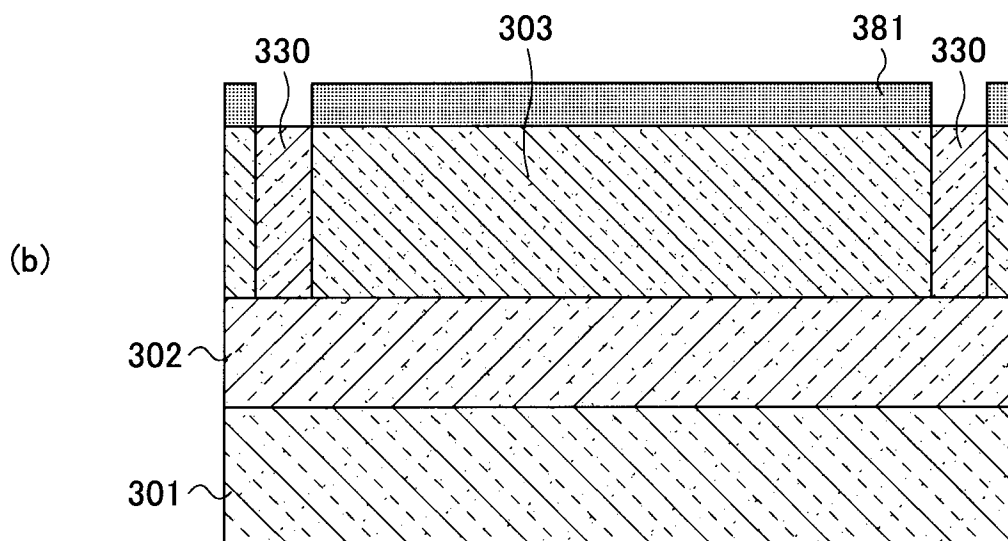
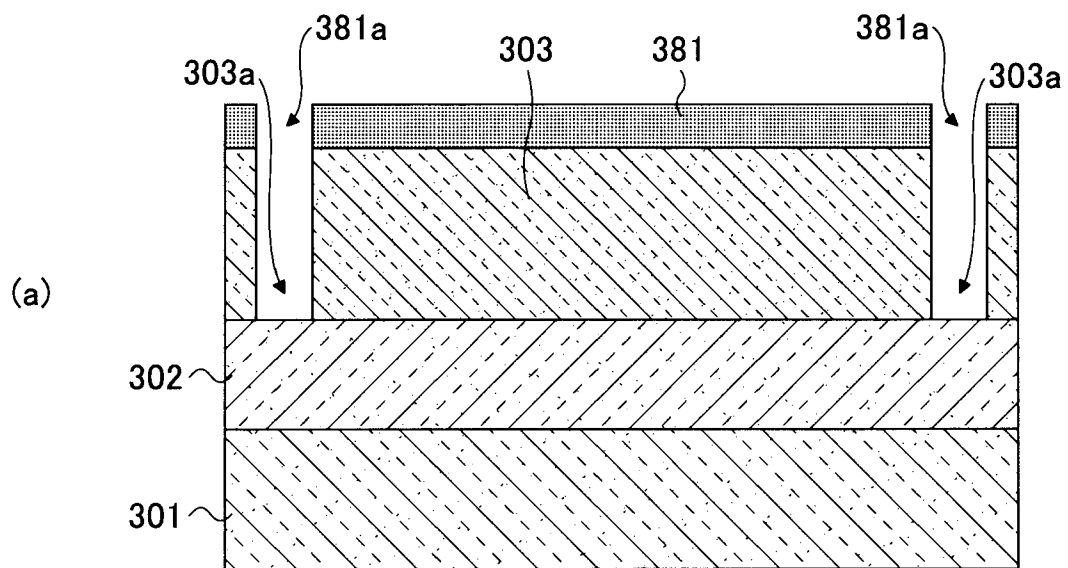
[図29]



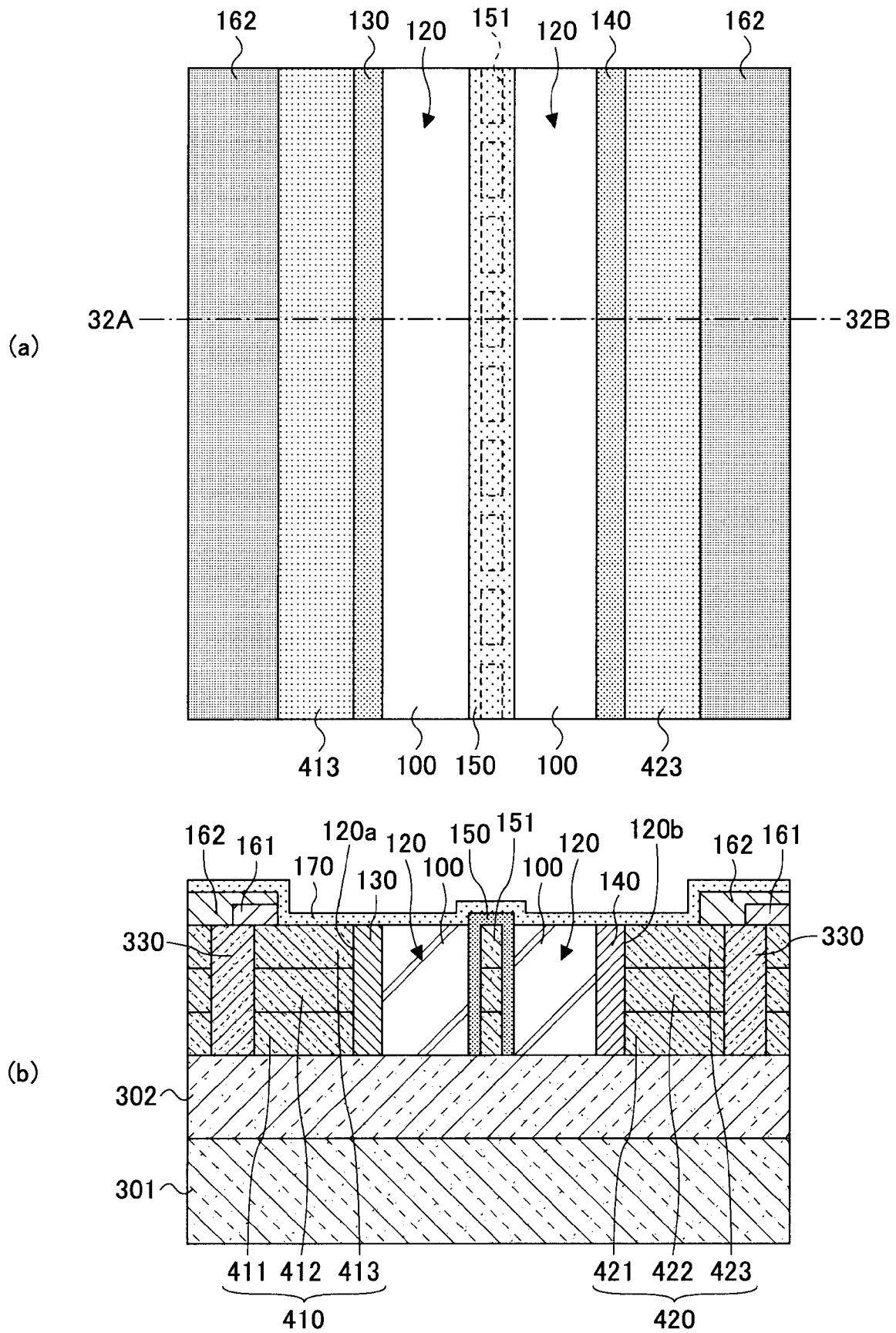
[図30]



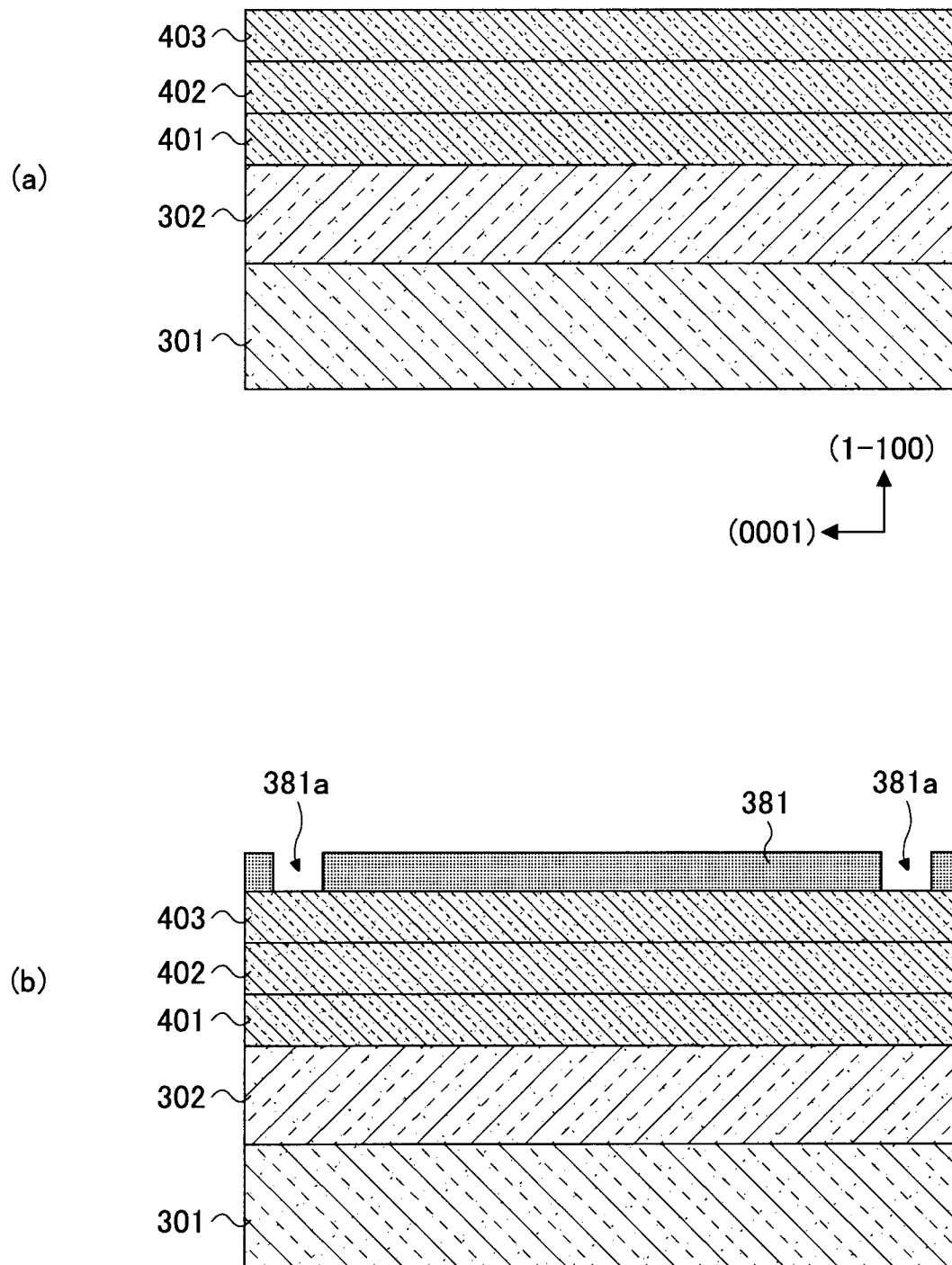
[図31]



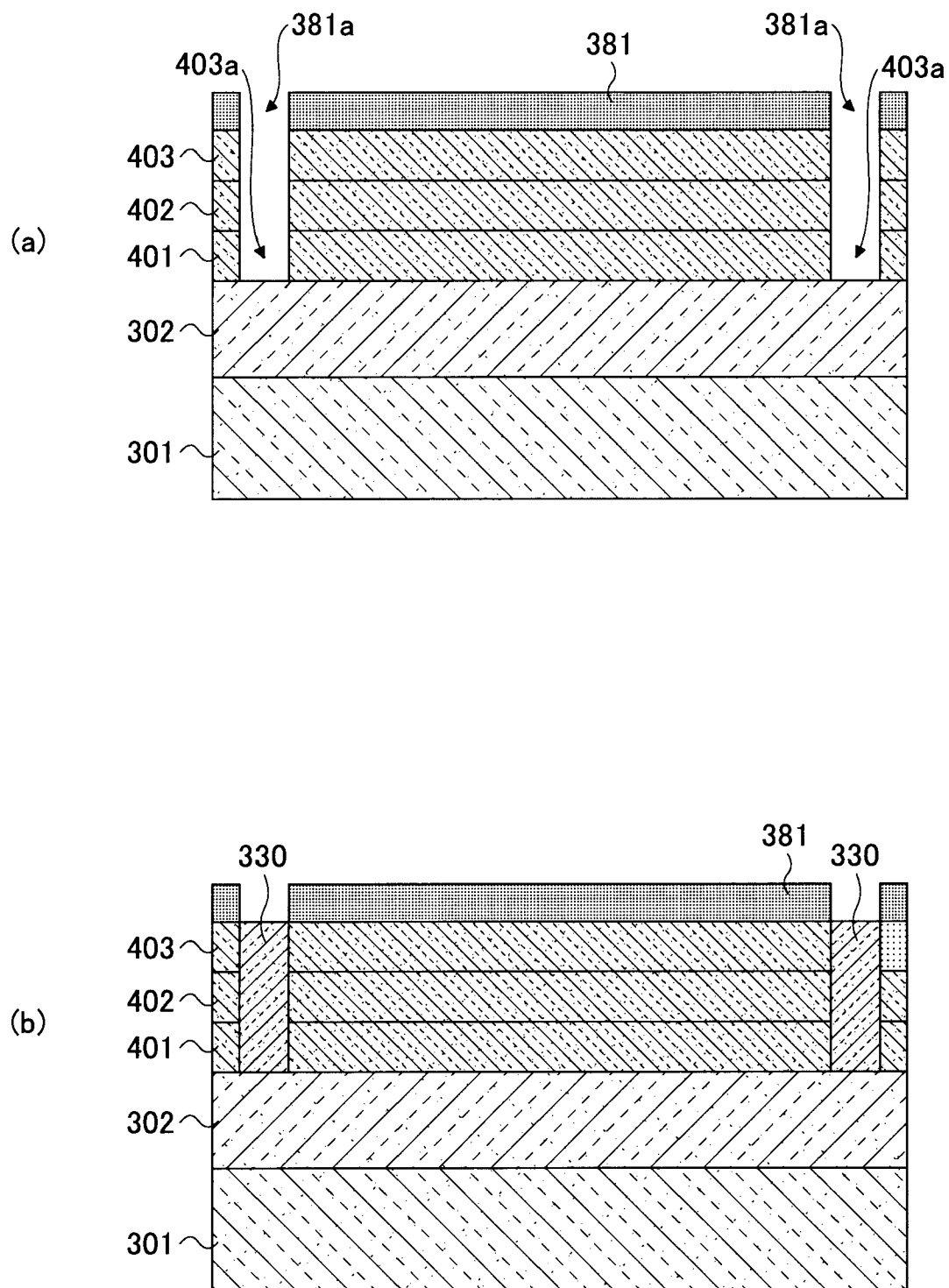
[図32]



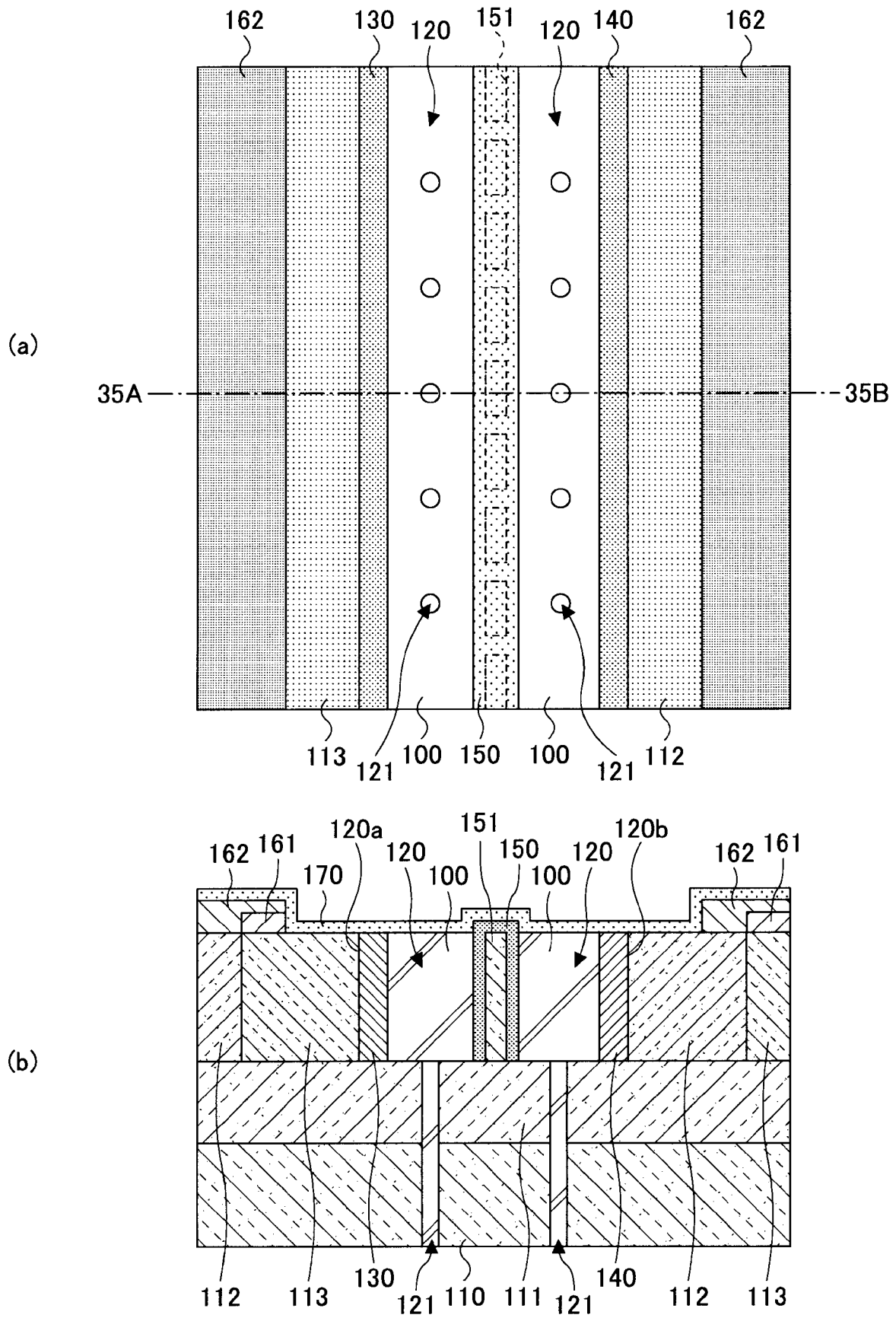
[図33]



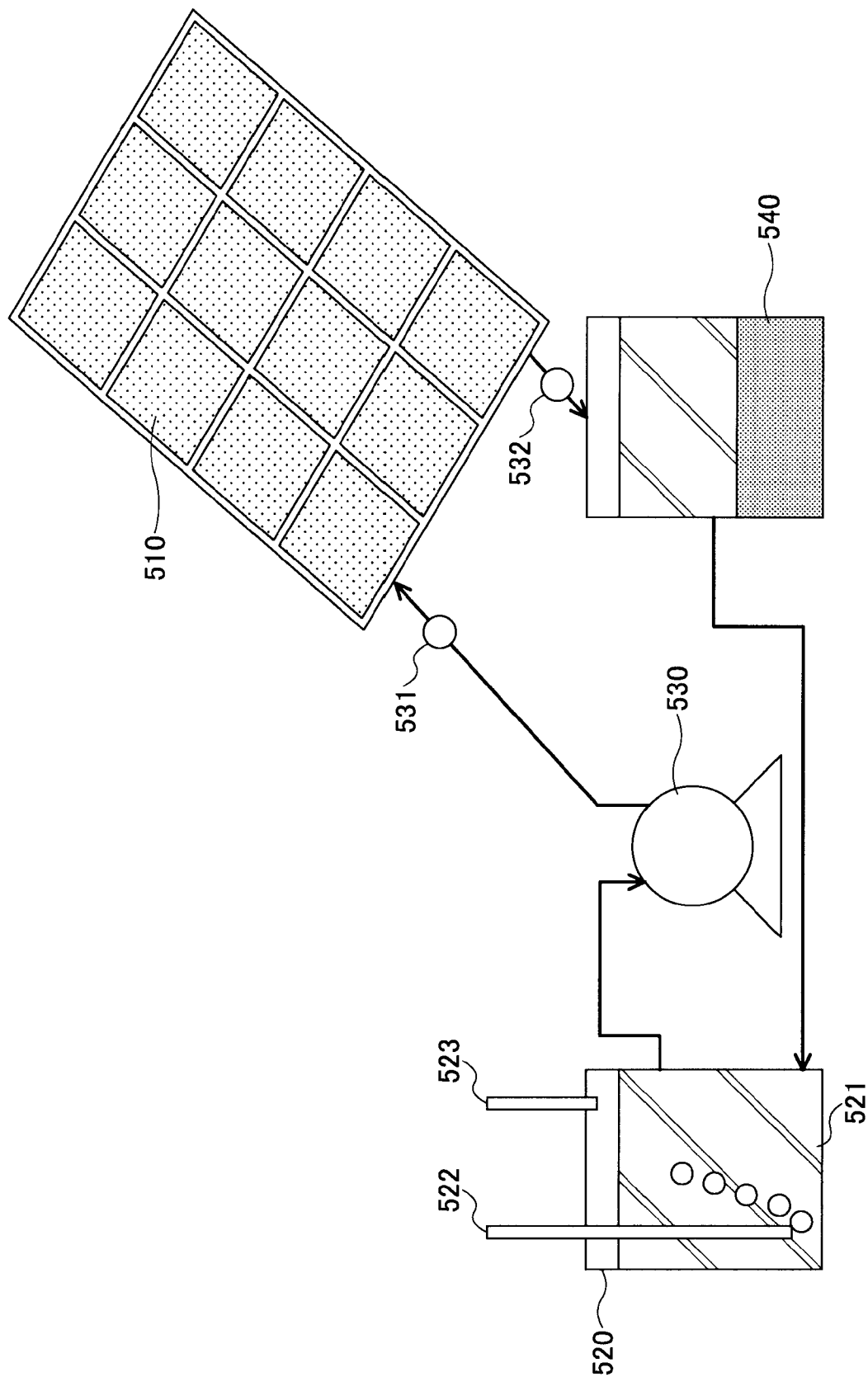
[図34]



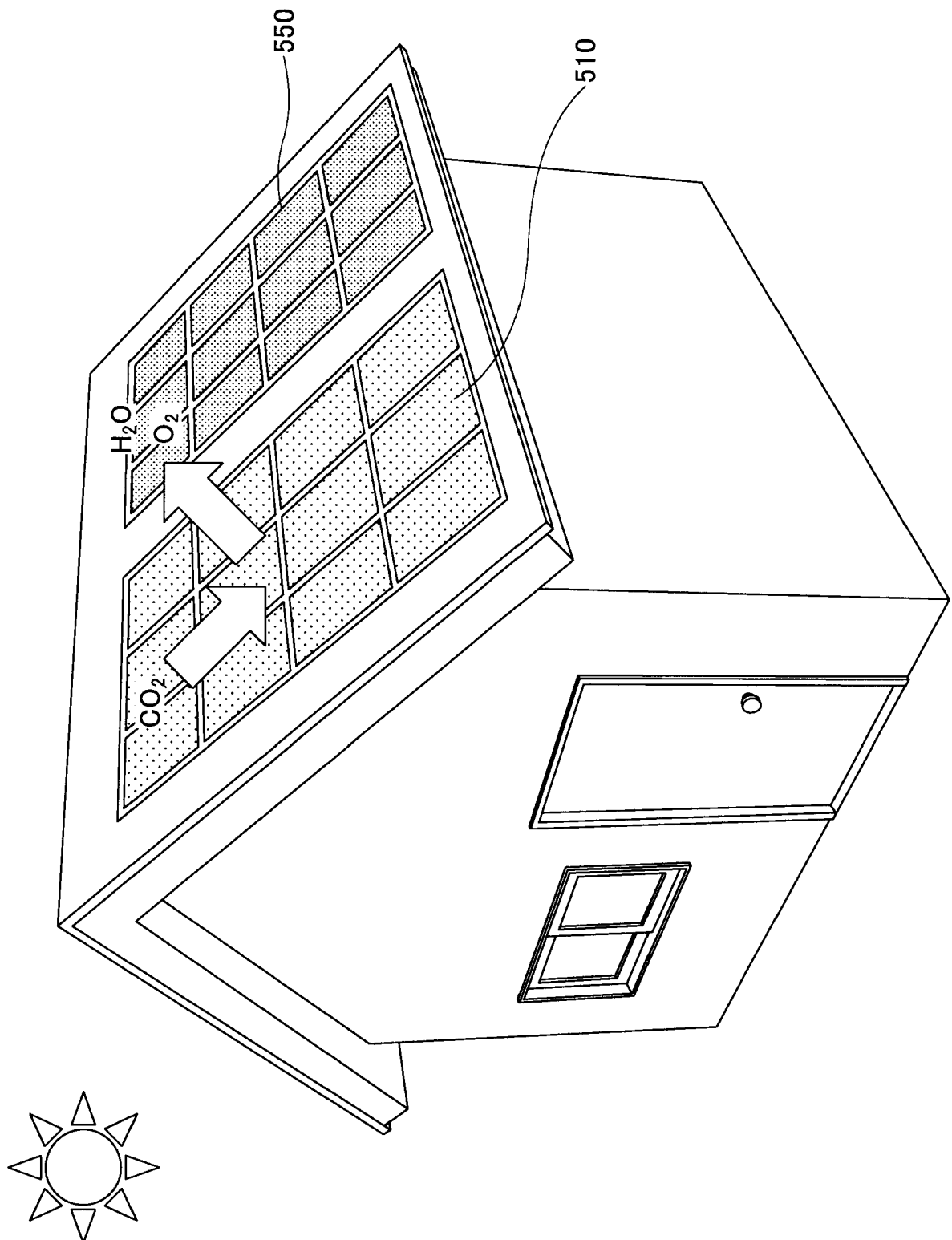
[図35]



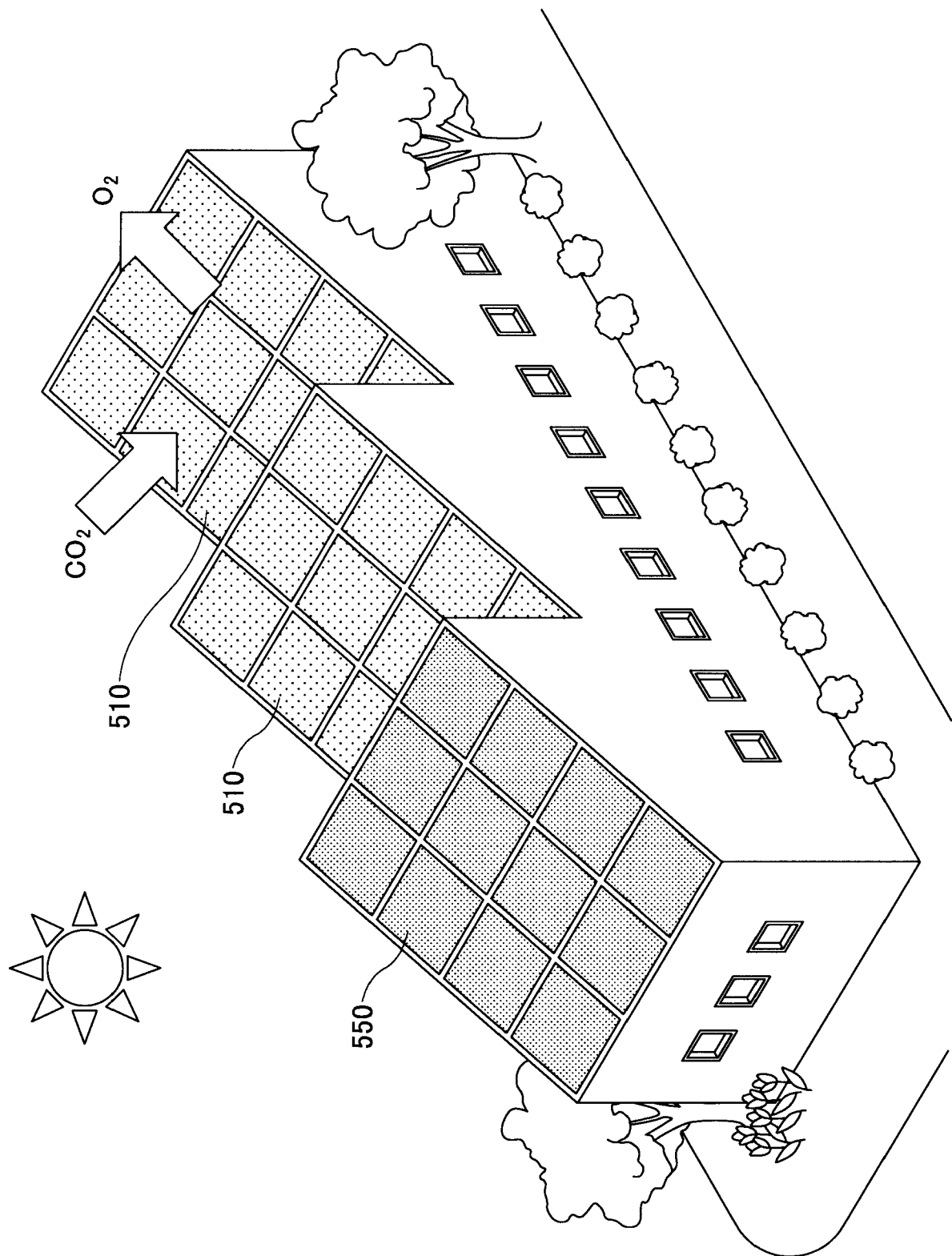
[図36]



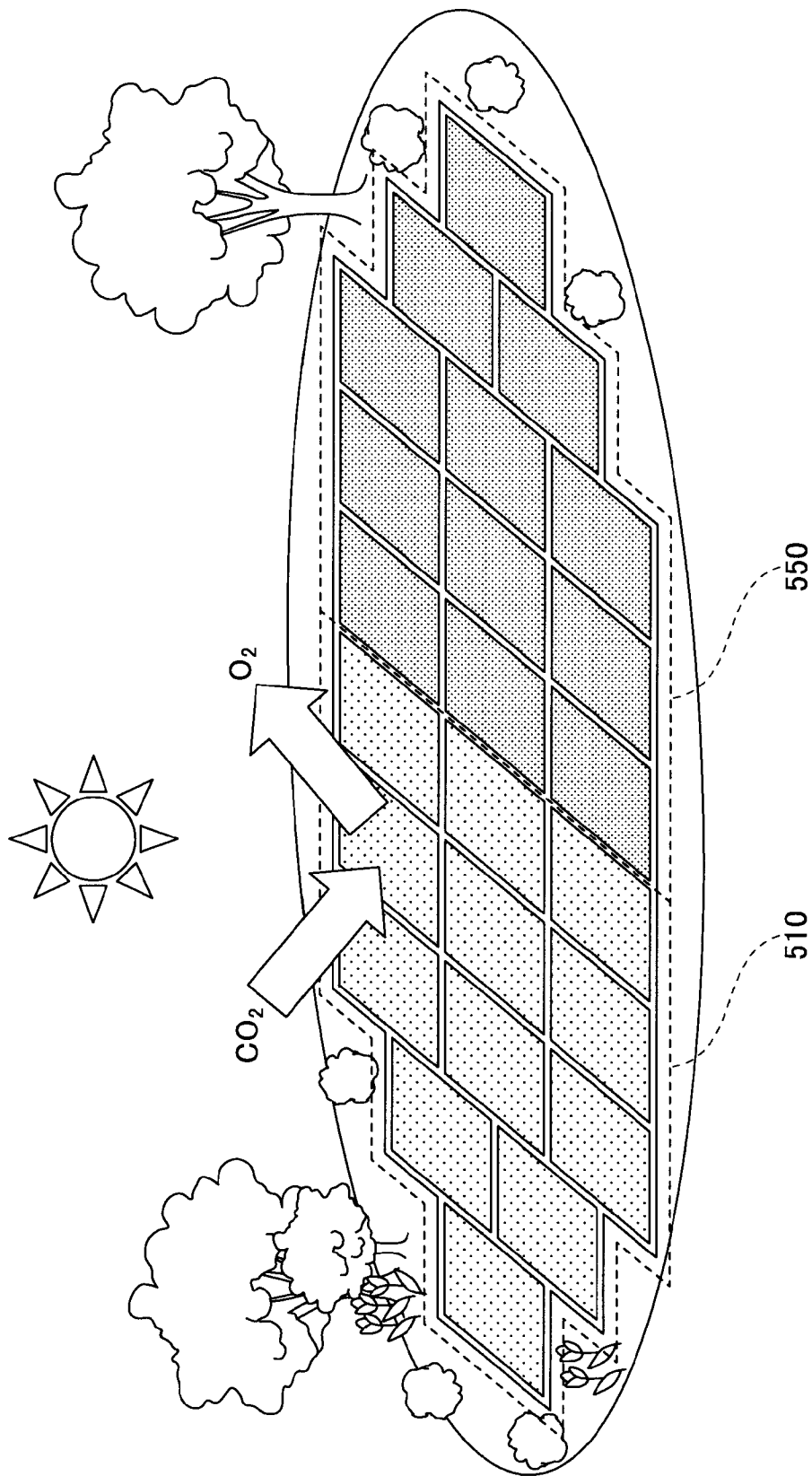
[図37]



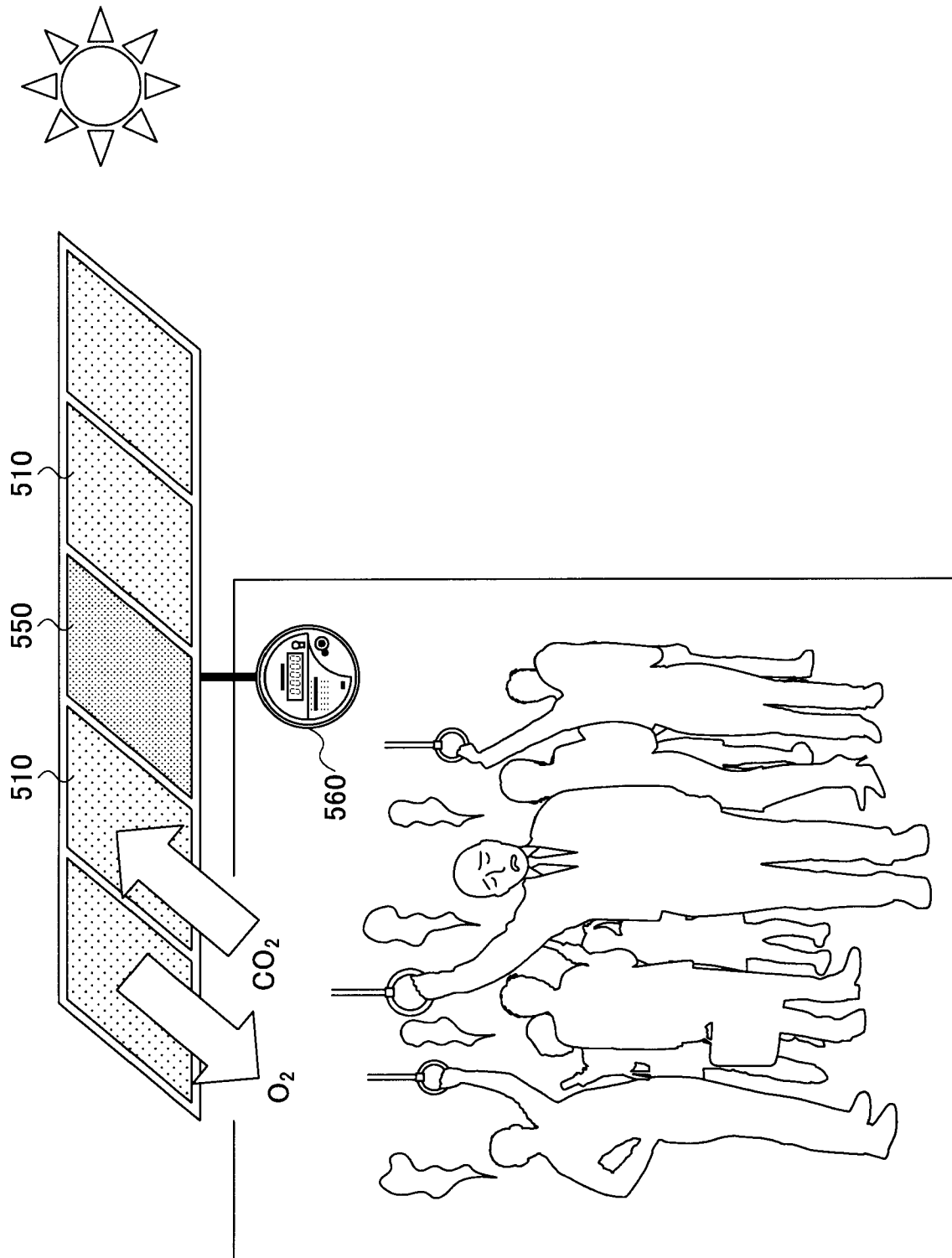
[図38]



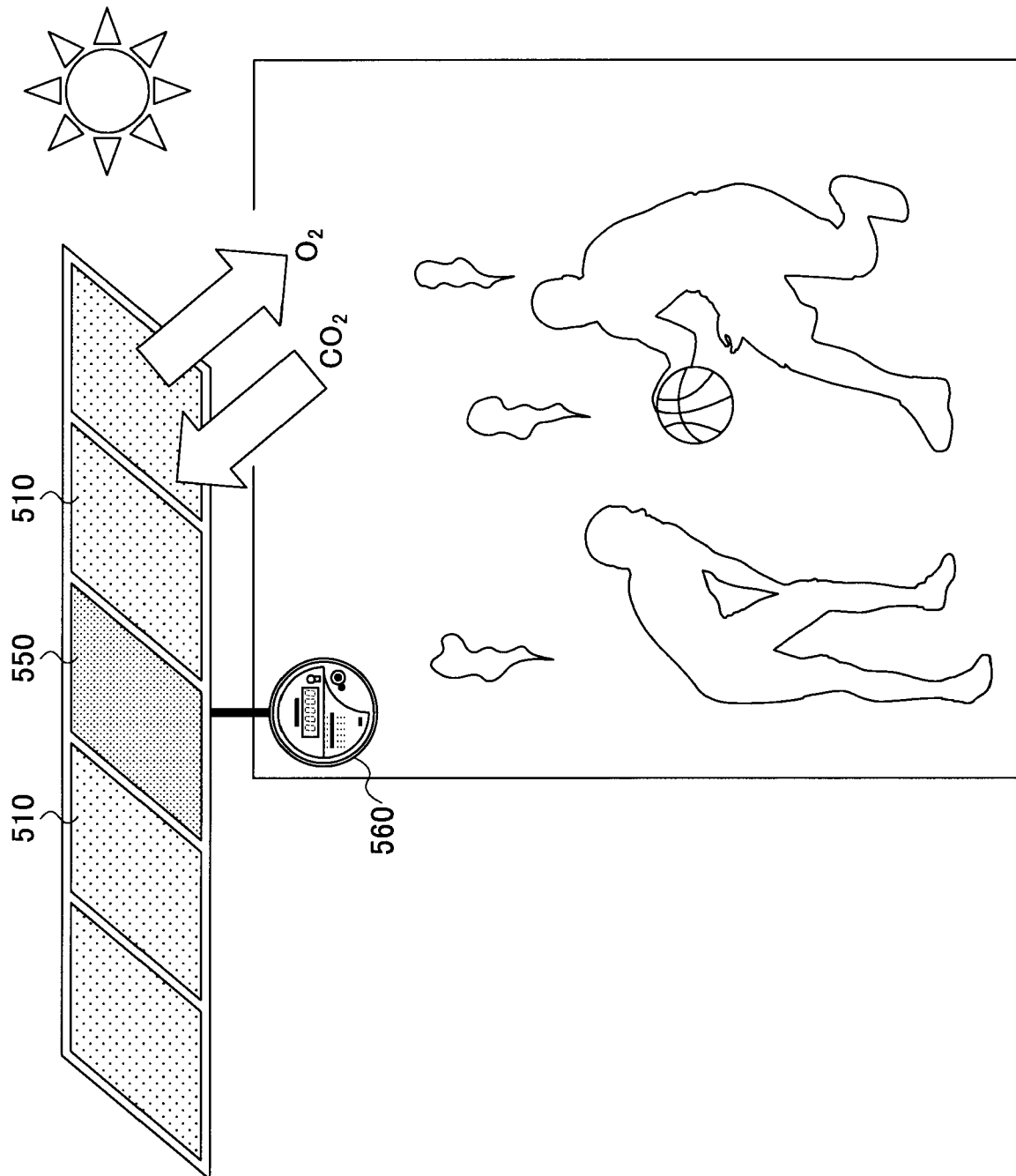
[図39]



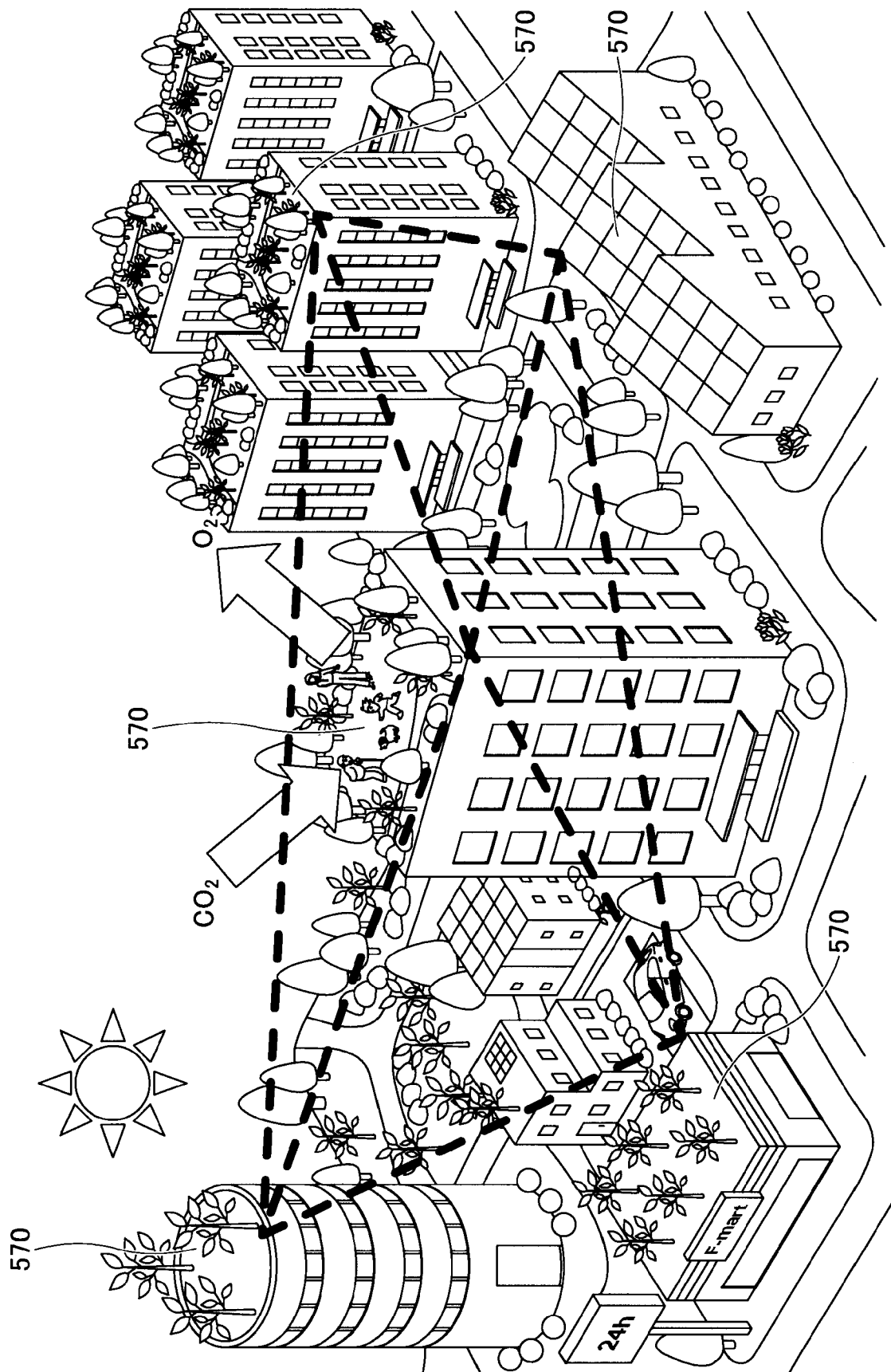
[図40]



[図41]



[図42]



# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2014/060628

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

C25B3/04(2006.01)i, C25B9/00(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)

C25B3/04, C25B9/00

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 (JDreamIII)

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages                                                          | Relevant to claim No. |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| A         | JP 2011-94194 A (Toyota Central Research and Development Laboratories, Inc.),<br>12 May 2011 (12.05.2011),<br>entire text<br>(Family: none) | 1-10                  |
| A         | JP 2001-097894 A (Toshiba Corp.),<br>10 April 2001 (10.04.2001),<br>entire text<br>(Family: none)                                           | 1-10                  |
| A         | JP 4-63113 A (Hitachi, Ltd.),<br>28 February 1992 (28.02.1992),<br>entire text<br>(Family: none)                                            | 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  
24 June, 2014 (24.06.14)

Date of mailing of the international search report  
15 July, 2014 (15.07.14)

Name and mailing address of the ISA/  
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**

International application No.

PCT/JP2014/060628

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages                                                                                                                          | Relevant to claim No. |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| A         | JP 53-31576 A (Sanyo Electric Co., Ltd.),<br>24 March 1978 (24.03.1978),<br>entire text<br>(Family: none)                                                                                                   | 1-10                  |
| A         | JP 2013-532228 A (Honda Motor Co., Ltd.),<br>15 August 2013 (15.08.2013),<br>entire text<br>& US 2011/0278176 A1      & EP 2572018 A<br>& WO 2011/146218 A1      & KR 10-2013-0021403 A<br>& CN 103119203 A | 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. C25B3/04(2006.01)i, C25B9/00(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. C25B3/04, C25B9/00

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 4 年 |
| 日本国実用新案登録公報 | 1 9 9 6 - 2 0 1 4 年 |
| 日本国登録実用新案公報 | 1 9 9 4 - 2 0 1 4 年 |

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

JSTPlus(JDreamIII)

## C. 関連すると認められる文献

| 引用文献の<br>カテゴリー* | 引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示                          | 関連する<br>請求項の番号 |
|-----------------|------------------------------------------------------------|----------------|
| A               | JP 2011-94194 A（株式会社豊田中央研究所）2011.05.12,<br>全文<br>(ファミリーなし) | 1-10           |
| A               | JP 2001-097894 A（株式会社東芝）2001.04.10,<br>全文<br>(ファミリーなし)     | 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

「&amp;」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

2 4 . 0 6 . 2 0 1 4

国際調査報告の発送日

1 5 . 0 7 . 2 0 1 4

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）

向井 佑

4 E

5 0 7 8

電話番号 0 3 - 3 5 8 1 - 1 1 0 1 内線 3 4 2 5

| C (続き) . 関連すると認められる文献 |                                                                                                                                                         |                |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| 引用文献の<br>カテゴリー*       | 引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示                                                                                                                       | 関連する<br>請求項の番号 |
| A                     | JP 4-63113 A (株式会社日立製作所) 1992. 02. 28,<br>全文<br>(ファミリーなし)                                                                                               | 1-10           |
| A                     | JP 53-31576 A (三洋電機株式会社) 1978. 03. 24,<br>全文<br>(ファミリーなし)                                                                                               | 1-10           |
| A                     | JP 2013-532228 A (本田技研工業株式会社) 2013. 08. 15,<br>全文<br>& US 2011/0278176 A1 & EP 2572018 A & WO 2011/146218 A1<br>& KR 10-2013-0021403 A & CN 103119203 A | 1-10           |