

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.  
H01L 31/10 (2006.01)



# [12] 发明专利说明书

专利号 ZL 200480044292.3

[45] 授权公告日 2009年11月4日

[11] 授权公告号 CN 100557826C

[22] 申请日 2004.10.25

[21] 申请号 200480044292.3

[86] 国际申请 PCT/JP2004/015794 2004.10.25

[87] 国际公布 WO2006/046276 日 2006.5.4

[85] 进入国家阶段日期 2007.4.25

[73] 专利权人 三菱电机株式会社

地址 日本东京

[72] 发明人 柳生荣治 石村荣太郎 中路雅晴

[56] 参考文献

JP7-202252A 1995.8.4

JP11-121785A 1999.4.30

JP3061203B2 2000.4.28

CN1507078A 2004.6.23

JP10-313131A 1998.11.24

JP5-129638A 1993.5.25

JP2844822B2 1999.10.30

审查员 王晓峰

[74] 专利代理机构 中国国际贸易促进委员会专利  
商标事务所

代理人 许海兰

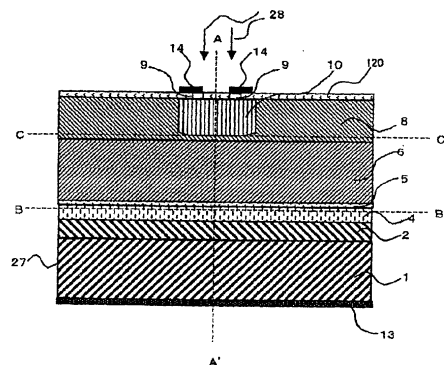
权利要求书 2 页 说明书 17 页 附图 9 页

[54] 发明名称

雪崩光电二极管

[57] 摘要

在备有具备第1电极和电连接到该第1电极上的由第1导电型构成的第1半导体层的衬底的雪崩光电二极管中，配置成在上述衬底上至少层叠了雪崩倍增层、光吸收层和能带隙比上述光吸收层的能带隙大的第2半导体层，在上述第2半导体层内形成第2导电型导电区域并将上述第2导电型导电区域电连接到第2电极上。利用该结构可用简易的工序提供低暗电流且长期可靠性高的雪崩光电二极管。此外，留下上述第2导电型导电区域和第2导电型导电区域的周围的第2半导体层，除去在其外周的衬底上层叠的层中的至少光吸收层，从而形成上述光吸收层的侧面。利用该结构可进一步减少暗电流。



1. 一种雪崩光电二极管，其特征在于：

具有第1电极、和具有电连接到该第1电极的由第1导电型构成的第1半导体层的衬底，在上述衬底上从上述衬底侧开始顺序地至少层叠了雪崩倍增层、电场缓和层、光吸收层和能带隙比上述光吸收层大的第2半导体层，在上述第2半导体层内形成第2导电型导电区域，而且，

留下上述第2导电型导电区域和上述第2导电型导电区域的周围的第2半导体层的一部分，设置以在该一部分的外周的衬底上层叠了的层中、至少光吸收层被除去的方式从上表面起形成的堵头孔，将上述第2导电型导电区域电连接到第2电极上。

2. 如权利要求1中所述的雪崩光电二极管，其特征在于：  
上述堵头孔的形状是环状或履带形状。

3. 如权利要求1中所述的雪崩光电二极管，其特征在于：  
在上述堵头孔上设置有保护膜。

4. 如权利要求1中所述的雪崩光电二极管，其特征在于：  
上述堵头孔的外侧设置有第2堵头孔。

5. 如权利要求1中所述的雪崩光电二极管，其特征在于：  
在外周的衬底上层叠的层中包含第1导电型的层，在上述第1导电型的层上设置绝缘膜，在上述绝缘膜上形成第1电极。

6. 如权利要求1中所述的雪崩光电二极管，其特征在于：  
将在外周的衬底上层叠的层中的光吸收层形成得比上述电场缓和层窄，从而在层间设置台阶差。

7. 如权利要求1中所述的雪崩光电二极管，其特征在于：  
在上述光吸收层的光射出面一侧以预定厚度设置布拉格反射层和反射调整层，

上述布拉格反射层的预定厚度是在将所检测的光的波长定为 $\lambda$ 、将上述布拉格反射层的折射率定为 $n$ 时为用 $\lambda/(4n)$ 表示的数值的奇

数倍，

在将上述反射调整层的折射率定为  $n_r$ 、将夹在上述光吸收层与上述布拉格反射层之间的层的厚度定为  $t_1$ 、 $t_2$ 、... $t_n$ 、将夹在上述光吸收层与上述布拉格反射层之间的层的折射率定为  $n_1$ 、 $n_2$ 、 $n_3$ 、... $n_n$ 、将  $k$  取奇数时，上述反射调整层的预定厚度  $t_r$  为满足下式的数值：

$$t_r = 1 / ( 4 \times n_r ) ( k \times \lambda - 4 \times \sum ( t_n \times n_n ) ) > 0 .$$

## 雪崩光电二极管

### 技术领域

本发明涉及使用了半导体的受光元件，特别涉及暗电流低、长期地可靠性高的雪崩光电二极管。

### 背景技术

在光通信等中使用的雪崩光电二极管是通过除了设置进行光电变换的光吸收层之外、还设置使进行了光电变换的载流子雪崩倍增的层而提高感光灵敏度的半导体受光元件，对雪崩光电二极管要求暗电流低且具有高的可靠性。

上述雪崩光电二极管大多由化合物半导体形成，根据其结构，可大致分成台式结构和平面结构。台式结构采取在衬底上形成台（台面）并在该台中采用包含PN结的结构，在台周边的表面上容易产生击穿。为了抑制该击穿，一般采用设置了倾斜状的结构，进而采取在台的外周区域设置成为高电阻部分的埋入层等的结构，进行了将暗电流抑制得较低的改进（例如专利文献1）。

平面结构是通过设置选择扩散区域而形成PN结的结构，但上述PN结的边缘部分中的边缘击穿成为问题。如果在边缘部分中流过电流，则即使增大电压、位于中央的受光部的PN结的反向电压也几乎不增加，故不能发挥作为雪崩光电二极管的功能。因此，采取了例如在上述边缘部分中利用杂质注入等设置高电阻的保护环等的对策（例如专利文献2）。

专利文献1：特开2002-324911号公报（图1）

专利文献2：特开平7-312442号公报（第4-6页，图2、6）

但是，在现有的雪崩光电二极管中存在以下那样的问题。

在倾斜型台式结构中，为了在台的外周区域中设置埋入层，有必

要进行利用有机金属气相生长法 (MO-CVD) 法等、部分地且不管结晶面如何、均匀地使其进行结晶再生长这样的处理, 故存在制造成本上升、成品率差这样的问题。此外, 虽然采取了降低暗电流的对策, 但存在抑制效果不充分的这样的问题。

在平面结构中 (在专利文献 2 记载为模拟平面结构), 例如在补偿受光区周边部分的电场缓和层的 p 导电型以形成保护环的方法中, 必须形成槽并进行 Ti 等的离子注入, 有必要设置刻蚀中止层。再者, 由于在其外周设置杂质扩散层, 故处理变得复杂, 制造成本上升, 同时在成品率方面也有问题。此外, 由于在光吸收层中的保护环的电场强度变高, 故也存在隧道暗电流变大等的问题。

### 发明内容

本发明是为了解决这些问题而进行的, 其目的在于提供能用简易的工序制作且抑制了暗电流、确保了长期可靠性的雪崩光电二极管。

本发明的雪崩光电二极管具有衬底, 该衬底具备第 1 电极和电连接到第 1 电极的由第 1 导电型构成的第 1 半导体层, 在上述衬底上至少层叠了雪崩倍增层、光吸收层和能带隙比上述光吸收层的能带隙大的第 2 半导体层, 在上述第 2 半导体层内形成了第 2 导电型导电区域, 将上述第 2 导电型导电区域电连接到第 2 电极上。

按照本发明, 能用简易的工序提供低暗电流且长期可靠性高的雪崩光电二极管。

### 附图说明

图 1 是表示本发明的实施方式 1 的雪崩光电二极管的概略结构的剖面图。

图 2 是表示了本发明的实施方式 1 的图 1 的 A-A' 剖面中的深度方向的电场强度分布的特性图。

图 3 是表示了本发明的实施方式 1 的图 1 的 B-B' 剖面 and C-C' 剖面中的面方向的电场强度分布的特性图。

图 4 是表示了本发明的实施方式 1 的深度方向上的载流子浓度的差别的特性图。

图 5 是表示了本发明的实施方式 2 的雪崩光电二极管的导带和价带的层接合部分中的能量分布的特性图。

图 6 是表示本发明的实施方式 3 的雪崩光电二极管的概略结构的剖面图。

图 7 是表示本发明的实施方式 3 的雪崩光电二极管的概略结构的剖面图。

图 8 是表示本发明的实施方式 4 的雪崩光电二极管的概略结构的剖面图。

图 9 是关于本发明的实施方式 4 的雪崩光电二极管、表示了电流和倍增率  $M$  与反偏置电压的关系的特性图。

图 10 是表示本发明的实施方式 5 的雪崩光电二极管的概略结构的剖面图。

图 11 是表示本发明的实施方式 6 的雪崩光电二极管的概略结构的剖面图。

图 12 是表示本发明的实施方式 7 的雪崩光电二极管的概略结构的剖面图。

图 13 是表示本发明的实施方式 8 的雪崩光电二极管的概略结构的剖面图。

图 14 是表示本发明的实施方式 8 的雪崩光电二极管的受光灵敏度分布的特性图。

图 15 是表示本发明的实施方式 9 的雪崩光电二极管的概略结构的剖面图。

图 16 是表示本发明的实施方式 9 的雪崩光电二极管的概略结构的剖面图。

图 17 是关于本发明的实施方式 9 的雪崩光电二极管、表示了电流和倍增率  $M$  与反偏置电压的关系的特性图。

图 18 是表示本发明的实施方式 9 的雪崩光电二极管的概略结构

的剖面图。

图 19 是表示本发明的实施方式 10 的雪崩光电二极管的概略结构的剖面图。

#### 符号的说明

1 衬底, 2、19 第 1 半导体层, 3 中止层, 4 雪崩倍增层, 5 电场缓和层, 6 光吸收层, 7 迁移层, 8 第 2 半导体层, 9 接触层, 10 第 2 导电型导电区, 11 耗尽区, 12 保护膜, 13 第 1 电极, 14 第 2 电极, 15 绝缘膜, 23 布拉格反射层, 24 反射调整层, 25 侧面, 26 槽, 27 劈开面, 28 光, 29 半绝缘性衬底, 30 堵头孔, 110 第 2 导电型周边导电区, 120 表面保护膜兼反射防止膜

#### 具体实施方式

##### 实施方式 1.

图 1 是表示本发明的实施方式 1 的雪崩光电二极管的概略结构的剖面图。在此, 使用了 n 型作为第 1 导电型、p 型作为第 2 导电型、n 电极作为第 1 电极、p 电极作为第 2 电极。例如在 n 型 InP 等的晶片状的衬底 1 上使用 MO-CVD 或分子束外延生长法 (MBE) 等可实现各半导体层的制作。在本实施方式 1 中, 用以下的工序顺序进行了制作。在衬底 1 上, 例如依次使载流子浓度  $0.2 \sim 2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$  的 n 型 InP 等的第 1 半导体层 2 (以下称为缓冲层) 生长为厚度  $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$ 、使 i 型 AlInAs 的雪崩倍增层 4 生长为厚度  $0.15 \sim 0.4 \mu\text{m}$ 、使载流子浓度  $0.5 \sim 1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  的 p 型 InP 等的电场缓和层 5 生长为厚度  $0.03 \sim 0.06 \mu\text{m}$ 、使载流子浓度  $1 \sim 5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$  的 p<sup>-</sup>型 GaInAs 等的光吸收层 6 生长为厚度  $1 \sim 1.5 \mu\text{m}$ 、使 i 型 InP 等的能带隙比上述光吸收层 6 的能带隙大的第 2 半导体层 8 生长为厚度  $1.0 \sim 2 \mu\text{m}$ 、使 i 型 GaInAs 接触层 9 生长为厚度  $0.1 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 。在此, 由于采取从与衬底 1 相反一侧入射被检测光的结构 (以下称为表面入射), 故上述第 2 半导体层 8 的能带隙比被检测光的能量大。此外, 由于第 2 半导体层 8 使被检测光透过, 故以下将第 2 半导体层 8 称为窗层。

下面，将挖通了直径  $25 \sim 55\mu\text{m}$  的圆形的  $\text{SiO}_x$  膜作为掩模，在未被上述掩模覆盖的圆形部分例如用 Zn 选择热扩散方法形成 p 型导电区域 10。接着，用刻蚀除去中央部和外部，使得上述 p 型导电区域 10 上的 i 型 GaInAs 接触层 9 遗留下来成为宽度  $5 \sim 10\mu\text{m}$  的环状。再者，利用蒸镀形成  $\text{SiN}_x$  表面保护膜兼反射防止膜 120，除去处于上述接触层 9 的上部的上述  $\text{SiN}_x$  表面保护膜兼反射防止膜 120，在上述接触层 9 上利用 AuZn 形成 p 电极 14。再者，在衬底 1 中研磨与层叠了缓冲层 2 的面相反的面，利用 AuGe 形成 n 电极 13，使上述缓冲层 2 电连接到上述 n 电极 13 上。再者，将晶片状的衬底 1 劈开分离，作成具有劈开面 27 的约  $300\mu\text{m}$  见方的元件。

以下说明用上述的工序制作的雪崩光电二极管的工作。在从外部施加了反偏置电压使得 n 电极 13 一侧成为正、p 电极 14 一侧成为负的状态下，使光 28 从 p 电极 14 一侧入射。例如，如果使作为光通信波长带的  $1.3\mu\text{m}$  带或  $1.5\mu\text{m}$  带的近红外区域的光入射到上述接触层 9 的环内部，则光透过窗层 8，在光吸收层 6 中被吸收，生成电子-空穴对，上述电子移动到 n 电极 13 一侧，上述空穴移动到 p 电极 14 一侧。在反偏置电压足够高时，电子在上述雪崩倍增层 4 中离子化生成新的电子-空穴对，与新生成的电子、空穴一起引起进一步的离子化，从而引起电子、空穴雪崩地倍增的雪崩倍增。

下面，说明在图 1 中表示的本实施方式雪崩光电二极管中的电场强度。图 2 是表示了图 1 的 A-A' 剖面中的深度方向的电场强度分布的特性图，图 3 是表示了图 1 的 B-B' 剖面 and C-C' 剖面中的面方向的电场强度分布的特性图。图 2 和图 3 的横轴的符号表示上述形成的各半导体层，图中将 A-A' 剖面表示为 A-A'，将 B-B' 剖面表示为 B-B'，将 C-C' 剖面表示为 C-C'。如图 2 中所示，成为最高电场的部分成为雪崩倍增层 4。再者，如图 3 的 B-B' 剖面中的电场强度分布中所示，在其中上述 p 型导电区 10 正下方的受光区域中央部分成为电场强度最高的区域，越朝向周边部分电场强度越小。此外，如图 3 的 C-C' 剖面中的电场强度分布中所示，上述 p 型导电区

域 10 的周边部分的电场强度因扩散区域的有限的曲率而比中央部分高，但如果与图 2 的 B-B' 剖面中的电场强度分布比较，则比与雪崩倍增层 4 的电场强度低，故可抑制在作为边缘击穿而已知的周边部分的电流，可起到作为雪崩光电二极管的功能。

再者，由于在能带隙比光吸收层 6 的能带隙大的窗层 8 内形成了扩散区周边的电场强度局部地高的区域、即在图 3 的 C-C' 剖面中在上述 p 型导电区域 10 的周边部分电场强度变高的部分，故可抑制从上述电场强度变高的部分流过隧道暗电流。因而，本实施方式的雪崩光电二极管没有必要设置抑制边缘击穿的被称为保护环的结构，可简易地实现具有低暗电流、高可靠性的雪崩光电二极管。

再有，在本实施方式中说明了由使用 Zn 的选择热扩散形成 p 型导电区域 10 的例子，但所使用的原子只要是赋予 p 导电型的原子即可。作为其它的形成方法，例如将挖通了圆形的 SiO<sub>x</sub> 膜作为掩摸，用 Zn 选择热扩散方法形成了 p 型导电区后除去作为扩散的供给源的 Zn 膜和上述 SiO<sub>x</sub> 膜、进而再次进行热扩散处理使 p 型导电区内部的 Zn 扩散（以下称为 Zn 附加扩散）。此外，例如也可将挖通了圆形的光致抗蚀剂膜作为掩摸，在进行了 Be 的离子注入后除去光致抗蚀剂膜、通过在约 700℃ 下进行约 12 小时的热退火处理来形成（以下称为 Be 注入）。

图 4 是表示使用上述 Zn 选择热扩散（图中 D）、Zn 附加扩散（图中 E）和 Be 注入（图中 F）作为 p 型导电区域 10 的形成方法的情况下，深度方向（导电区域 10 - 窗层 8 接合部分）上的载流子浓度的差别的特性图（横轴的符号相当于各个层）。由此，由于在使用了 Zn 附加扩散的情况下与载流子浓度显著地变化的 Zn 选择热扩散相比可使载流子浓度变化变得缓和，故可将导电区域 10 - P 窗层 8 接合部分中的电场强度抑制得较低，可抑制隧道暗电流。此外，在 Be 注入中，可进一步使载流子浓度变化变得缓和。

再有，在本实施方式中，示出了将电场缓和层 5 作成了 p 型 InP 的例子，但也可作成 AlInAs。根据情况，也可省略电场缓和层 5。此

外，示出了为了使 p 型导电区域 10 与 p 电极 14 电连接而设置接触层 9 的例子，但也可直接使 p 型导电区域 10 与 p 电极 14 接触。示出了使用 i 型 InP 作为窗层 8 的例子，但导电型可以是半绝缘性、绝缘性、n 型或导电性低的 p 型的任一种。如果在窗层 8 与光吸收层 6 之间设置包含 GaInAsP、AlInAs、AlGaInAs、GaInAsP 等的中止层 3，则可抑制 p 型导电区域从 p 型导电区域 10 朝向光吸收层 6 扩散，是更为理想的。

### 实施方式 2.

在本发明的实施方式 2 的雪崩光电二极管中，在上述实施方式 1 中示出的雪崩光电二极管中，在光吸收层 6 与窗层 8 之间还设置了过渡层 7。作为形成方法，在上述实施方式 1 中使光吸收层 6 生长的工序之后，例如使 i 型 GaInAsP 生长为厚度  $0.01 \sim 0.05\mu\text{m}$ ，作成了过渡层 7。

图 5 示出了本实施方式的雪崩光电二极管的导带和价带的层接合部分中的能量分布。横轴的符号表示所层叠的各半导体层，纵轴表示能量，图中 G 表示了导带，图中 H 表示价带，图中 I 表示了空穴各自的能量。根据图 5 可知，过渡层 7 的价带能量取比光吸收层 6 低、比窗层 8 高的值、即光吸收层 6 与窗层 8 之间的值。这一点表示了通过在光吸收层 6 与窗层 8 之间夹有过渡层 7，价带的不连续量变小，空穴容易从光吸收层 6 起流动。因而，可防止在异质结（ヘテロ）界面中的空穴的聚积，可实现更高速的光响应。

再有，上述过渡层 7 采用了单层，但也可作成使能带隙阶梯性地变化的多层。通过采用多层使价带的不连续量进一步变小，其结果是空穴变得容易流动，故可实现更高速的光响应。此外，如在图 5 中用虚线所示的那样，也可作成使能带隙连续地变化的层。

在本实施方式中，示出了使用 i 型 GaInAsP 作为过渡层 7 的例子，但也可使用 AlInAs、AlGaInAs、GaInAsP。特别是在使用 InP 作为窗层 8 的情况下，起到第 2 导电型区域的扩散中止层的功能。

### 实施方式 3.

在本发明的实施方式3的雪崩光电二极管中,在上述实施方式1、2中示出的雪崩光电二极管中,在p型导电区域10的周边还设置了p型周边导电区域110。图6、图7是表示本实施方式的雪崩光电二极管的概略结构的剖面图。在此,6是光吸收层、3是中止层,兼作空穴迁移和扩散中止层。8是窗层,9是接触层。

在图6中表示的雪崩光电二极管中,在超过接触层9的外周的宽阔范围内以不达到过渡层7的程度较浅地进行选择热扩散而形成p型周边导电区域110,其后,在比上述p型周边导电区域110的区域窄的范围内以达到过渡层7的程度较深地进行选择热扩散而形成p型导电区域10。对于上述p型导电区域10的区域来说,重叠地进行了选择热扩散。这样,由于可充分地提高p型导电区域10的电阻,进而用p型周边导电区域110包围其周边,故可降低表面电场强度。因而,可进一步抑制击穿,能增加可靠性。

此外,在图7中表示的雪崩光电二极管中,将p型周边导电区域110形成为环状,使其围绕形成于接触层9下方的p型导电区域10的周边。这样,即使形成p型导电区域10和p型周边导电区域110,也可谋求表面电场强度的下降,可抑制击穿。

#### 实施方式4.

图8是表示本发明的实施方式4的雪崩光电二极管的概略结构的剖面图。为了说明现象,以图像的方式表示了耗尽区域11。在本实施方式中,在上述实施方式1中表示的雪崩光电二极管中包含p型导电区域10,把上述p型导电区域10的周边区域保留成直径约100 μm的圆形,除去其外周的窗层8、光吸收层6直至到达电场缓和层5,形成侧面25(以下称为侧面除去)。

图9是对于进行了上述侧面除去的雪崩光电二极管,示出了电流和倍增率M与反偏置电压的关系的特性图。图中虚线是未进行上述侧面除去而仅劈开使元件分离的上述实施方式1的雪崩光电二极管的暗电流特性。不依赖于反偏置电压的暗电流(图中 $I_{dark}$ )是来自光吸收层6的发生暗电流,在仅劈开了的结构中,由于上述发生暗电流

经由劈开面而流动，故暗电流成为  $10^{-7}$ A 电平（图中  $I_{\text{dark}}$  虚线）。与其相比，在本实施方式的雪崩光电二极管中，由于能隔断来自光吸收层 6 的发生暗电流路径，故可将暗电流减少到  $10^{-8}$ A 电平（图中  $I_{\text{dark}}$  实线）。

如上所述，由于暗电流主要从光吸收层 6 发生并以耗尽区域 11 为路径而流动，故至少除去包围耗尽区域 11 的光吸收层 6 即可。如果考虑耗尽区域 11 的扩展，则例如可从第 2 导电型导电区域起留下大于等于  $10\mu\text{m}$  的宽度的光吸收层 6 并进行侧面除去即可。

如果减小利用上述侧面除去而留下的光吸收层 6 的宽度，则由于上述进行了侧面除去的面的电场强度变高，长期可靠性也下降，故将利用侧面除去而留下的光吸收层 6 的宽度定为约大于等于  $10\mu\text{m}$  且小于等于  $200\mu\text{m}$  是较为理想的。此外，利用上述侧面除去而留下的光吸收层 6 的形状不作特别限定，可留下成为圆形、椭圆形状，也可成为四角形状、多角形状。在采用上述四角形状、多角形状的情况下，如果在角部设置圆角，则可防止在上述角部中的电场集中，是较为理想的。

作为侧面除去的方法，有例如使用 HBr/过氧化氢水混合溶液进行蚀刻的方法。此外，也可使用采用了柠檬酸、酒石酸等的有机酸与过氧化氢水的混合溶液的有机酸蚀刻。也可定为利用反应性离子蚀刻（RIE）等的干法蚀刻。此外，在有选择地蚀刻 InP 系列材料的情况下，可使用盐酸/磷酸混合溶液等的盐酸系列溶液。在有选择地蚀刻 AlGaInAs 系列材料、GaInAsP 系列材料的情况下，可使用有机酸（柠檬酸、酒石酸等）/过氧化氢水混合溶液等的有机酸系列溶液、硫酸系列溶液。如果在其中适当地组合选择蚀刻性小的 HBr/过氧化氢水、Br/甲醇等的 Br 系列溶液等，则可实现所希望的侧面除去。

此外，在本实施方式中示出了进行侧面除去直至达到电场缓和层 5 的例子，但也可进行侧面除去直至比雪崩倍增层 4 更深的层。

在本实施方式中示出了使窗层 8 与光吸收层 6 接合的例子，但也可如上述实施方式 2 或实施方式 3 中所示那样在窗层 8 与光吸收层 6

之间设置过渡层 7 或中止层 3。

在本实施方式中示出了形成导电区域 10 的例子，但也可如上述实施方式 3 中所示那样形成周边导电区域 110。

#### 实施方式 5.

图 10 是表示本发明的实施方式 5 的雪崩光电二极管的概略结构的剖面图。在本实施方式中，在上述实施方式 4 中示出的雪崩光电二极管中形成了侧面 25 使得光吸收层 6 的宽度比窗层 8 和电场缓和层 5 的宽度小。例如，如果使用有机酸与过氧化氢水的混合溶液，则可选择地将光吸收层 6 蚀刻得较深。通过这样地在光吸收层 6 和电场缓和层 5 中设置台阶差，暗电流难以流动，可将上述暗电流减少到小于等于  $10^{-8}$ A 电平。

再有，在没有特别必要设置电场缓和层 5 的情况下，可省略上述电场缓和层 5，在其下的雪崩倍增层 4 与光吸收层 6 中设置台阶差即可。

#### 实施方式 6.

图 11 是表示本发明的实施方式 6 的雪崩光电二极管的概略结构的剖面图。在本实施方式中，在上述实施方式 4 中示出的雪崩光电二极管中，在用盐酸/磷酸溶液对窗层 8 进行了侧面除去并利用有机酸/过氧化氢水溶液对光吸收层 6 进行了侧面除去后，在从光吸收层 6 的侧面 25 起离开约  $10\mu\text{m}$  的位置上使用 HBr/过氧化氢水混合溶液除去电场缓和层 5、雪崩倍增层 4、缓冲层 2 的一部分而形成槽 26。在这样地至少对光吸收层 6 进行了侧面除去之后，通过再设置上述槽 26，暗电流难以从光吸收层 6 起流动，可将上述暗电流减少到小于等于  $10^{-8}$ A 电平。

再有，将上述侧面 25 与上述槽 26 的间隔定为  $10\mu\text{m}$ ，但也可定为大于等于  $10\mu\text{m}$ 。

除去电场缓和层 5、雪崩倍增层 4、缓冲层 2 而形成槽 26，但至少除去电场缓和层 5 即可。在不设置电场缓和层 5 的情况下，至少除去最上层即可。

### 实施方式 7.

图 12 是表示本发明的实施方式 7 的雪崩光电二极管的概略结构的剖面图。在本实施方式中,在上述实施方式 4~6 中示出的雪崩光电二极管中利用  $\text{SiN}_x$  形成了保护膜 12 使其至少覆盖被除去的光吸收层 6 的侧面 25。

通过设置上述保护膜 12,由于可防止氧化、水分吸收,可抑制暗电流发生,可得到长期可靠性。再者,也有可防止因元件处理时的接触引起的破损的效果。

再有,由于如果使用  $\text{SiN}_x$  作为保护膜 12,则也可使其具有防止反射的效果,故是较为理想的,但从保护的观点来看,也可使用  $\text{SiO}_x$  等的电介质、聚酰亚胺等的有机材料。

在本实施方式的图 12 中,示出了不仅在光吸收层 6 的侧面 25 上、也在上面和其它的层的侧面上设置了保护膜 12 的例子,但如果至少覆盖被除去的光吸收层 6 的侧面 25,则也可只是在其他必要的部位上部分地设置保护膜 12。

### 实施方式 8.

图 13 是表示本发明的实施方式 8 的雪崩光电二极管的概略结构的剖面图。与上述实施方式 1 同样,在 n 型 InP 衬底 1 上依次使载流子浓度  $2 \times 10^{18} \sim 2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$  的 n 型 AlInAs/GaInAs 分布布拉格 (ブラッグ) 反射层 23 生长为预定的厚度、使 n 型 AlInAs 反射调整层 24 生长为预定的厚度、使 i 型 AlInAs 的雪崩倍增层 4 生长为  $0.1 \sim 0.3 \mu\text{m}$ 、使载流子浓度  $1 \times 10^{17} \sim 2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  的 p 型 InP 电场缓和层 5 生长为  $0.03 \sim 0.06 \mu\text{m}$ 、使载流子浓度  $1 \sim 5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$  的 p 型 GaInAs 光吸收层 6 生长为  $1.0 \sim 1.5 \mu\text{m}$ 、使 i 型 GaInAs 过渡层 7 生长为  $0.02 \sim 0.2 \mu\text{m}$ 、使 i 型 InP 窗层 8 生长为  $1.0 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 、使 i 型 GaInAs 接触层 9 生长为  $0.1 \sim 0.4 \mu\text{m}$ 。

在此,所谓上述分布布拉格反射层 23 的预定的厚度,指的是将想要检测的光的波长定为  $\lambda$ 、将折射率定为  $n$ 、满足由  $\lambda / (4n)$  的奇数倍给出的布拉格反射条件。最好定为最小的  $\lambda / (4n)$ 。

此外，所谓反射调整层 24 的预定的厚度，指的是将厚度定为  $t_r$ 、折射率定为  $n_r$ 、雪崩倍增层 4 的厚度定为  $t_a$ 、折射率定为  $n_a$ 、电场缓和层 5 的厚度定为  $t_e$ 、折射率定为  $n_e$ ，则满足下式：

$$t_r = 1 / (4 \times n_r) (k \times \lambda - 4 \times (t_a \times n_a + t_e \times n_e)) > 0 \quad (k \text{ 是奇数})。$$

最好使用最小值。

再者，与上述实施方式 1 同样地形成 p 型导电区 10、接触层 9，与上述实施方式 4 同样地进行侧面除去，与上述实施方式 7 同样地利用 SiNx 在上面和侧面上形成保护膜 12。

在本实施方式的雪崩光电二极管中，如果将 n 电极 13 定为正、p 电极 14 定为负，在从外部施加了反偏置电压的状态下使光 28 入射，则光在光吸收层 6 中被吸收，生成电子-空穴对。一部分的光不在光吸收层 6 中被吸收而透过，但被具有上述预定厚度的反射调整层 24 和分布布拉格反射层 23 有效地反射，再次入射到光吸收层 6 中而被吸收。该光进一步生成电子-空穴对，在光吸收层 6 因反偏置电压而耗尽了的区域中，由电场发生的电子漂移到正侧，空穴漂移到负侧。由于到达了过渡层 7 的空穴抑制了上述各层间的价带的不连续量，故无滞后地到达 p 型导电区域 10。因而，可实现更高速的响应。

特别是在反偏置电压足够高时，到达了雪崩倍增层 4 的电子离子化，生成电子-空穴对，所生成的电子、空穴分别在相反方向上漂移。通过这些电子、空穴进一步离子化，电子、空穴能以雪崩的方式倍增。

关于本实施方式的雪崩光电二极管中的电场强度分布，也与上述实施方式 1 中示出的图 2 同样，在雪崩倍增层 4 中最高，以便引起由离子化产生的雪崩倍增，在电场缓和层 5 中变化，能不在光吸收层 6 中产生隧道击穿。再者，与图 3 同样，与各层平行的方向（面方向）的电场强度分布在雪崩倍增层 4 中在 p 型导电区 10 正下方最高，以免产生边缘击穿。此外，由于设置了能带隙大的过渡层 7，故更加难以产生击穿。此外，由于对光吸收层 6 进行了侧面除去，故可隔断暗电流路径，与上述实施方式 2 的例子相比，可进一步抑制在过渡层 7 中的电场强度的上升。

图 14 是表示了本实施方式的感光灵敏度分布的特性图，用将峰值定为 1 的规格化光电流来表示。从图 14 可知，在 p 型导电区域 10 中央部分中灵敏度最高，没有边缘击穿，可得到良好的雪崩倍增。

在本实施方式中，由于设置了分布布拉格反射层 23 和反射调整层 24，可使在光吸收层 6 中未被吸收而透过了的光再次朝向光吸收层 6 反射，故可进一步提高在光吸收层 6 中的光吸收量。因而，可提高雪崩光电二极管的光灵敏度。

再有，在本实施方式中示出了将分布布拉格反射层 23 定为 AlInAs/GaInAs 的例子，但交替地层叠折射率高的层与低的层也可。作为折射率高的层，可使用 GaInAs、As 组成比高的 GaInAsP、或 Ga 组成比高的 AlGaInAs 等。作为折射率低的层，可使用 Al 组成比高的 AlGaInAs、特别是 AlInAs、P 组成比高的 GaInAsP、InP。

此外，在本实施方式中示出了使用折射率低的 AlInAs 作为反射调整层 24 的例子，但也可使用 InP、AlGaInAs、GaInAsP 等。

关于分布布拉格反射层 23、反射调整层 24 中的 n 型载流子浓度，在电阻对于工作速度不成为问题的范围内使其变化也可，越大越好。

此外，在本实施方式中示出了在衬底 1 与雪崩倍增层 4 之间设置了分布布拉格反射层 23 和反射调整层 24 的例子，但在光吸收层 6 的光射出面一侧以预定的厚度设置分布布拉格反射层 23 和反射调整层 24 也可。也可在光吸收层 6 与布拉格反射层 23 之间夹住其它的层。在该情况下，将布拉格反射层 23 的预定厚度定为在将所检测的光的波长定为  $\lambda$ 、将上述布拉格反射层的折射率定为  $n$  时用  $\lambda/(4n)$  表示的数值的奇数倍，在将反射调整层 24 的折射率定为  $n_r$ 、将在光吸收层 6 与分布布拉格反射层 23 之间被夹住的层的厚度定为  $t_1$ 、 $t_2$ 、... $t_n$ 、将折射率定为  $n_1$ 、 $n_2$ 、 $n_3$ 、... $n_n$ 、 $k$  采用奇数时，反射调整层 24 的预定厚度  $t_r$  为满足下式的数值即可：

$$t_r = 1 / (4 \times n_r) (k \times \lambda - 4 \times \sum (t_n \times n_n)) > 0.$$

此外，在本实施方式中说明了进行侧面除去直至电场缓和层 5 的例子，但可根据需要省略电场缓和层 5，也可进行侧面除去直至反

射调整层 24。通过进行侧面除去直至反射调整层 24，可防止耗尽区域 11 的露出，故进一步提高可靠性。

#### 实施方式 9.

图 15 是表示本发明的实施方式 9 的雪崩光电二极管的概略结构的剖面图。在本实施方式中，在上述实施方式 4~9 中示出的雪崩光电二极管中进行了侧面除去后，在外周部上设置绝缘膜 15，除去该绝缘膜 15 的一部分而形成了 n 电极 13。由于本实施方式的雪崩光电二极管可在元件表面上配置 n 电极 13 和 p 电极 14，故可一起对 n 电极 13、p 电极 14 进行导线布线接合。此外，对于 n 电极 13 如果使用 AuZn 等形成凸点电极，则可进行倒装式安装。此外，也可用同样的材料同时形成 n 电极 13 和 p 电极 14。

再有，本实施方式中的绝缘膜 15 也可使用保护膜 12。

此外，在本实施方式中示出在反射调整层 24 上形成 n 电极 13 的例子，但如果在构成反射调整层 24 和分布布拉格反射层 23 的层中、能带隙小的层上配置 n 电极 13，则可减少接触电阻。作为材质，最好使其与 GaInAs 接触。

此外，在本实施方式中示出了进行侧面除去直至反射调整层 24 的例子，但也可直至光吸收层 6，也可直至电场缓和层 5 或雪崩倍增层 4。此外，也可省略过渡层 7、电场缓和层 5。也可省略反射调整层 24、分布布拉格反射层 23。也可设置在上述实施方式 3 中示出的 p 型周边导电区域 110。

此外，侧面除去没有必要全部进行到劈开面 27，例如，如图 16 中所示，也可以除去外周的第 1 导电型半导体衬底上层叠的层中至少光吸收层的方式、从上面开始除去而部分地形成堵头孔 30。图 17 是表示了设置了堵头孔 30 的情况下的电流和倍增率 M 与反偏置电压的关系的特性图。图中虚线是不进行上述侧面除去而仅劈开从而使元件分离的上述实施方式 1 的雪崩光电二极管的暗电流特性。可知通过设置堵头孔 30，由于耗尽区域的扩展发生变化，故光电流(图中  $I_{photo}$ )一度减少，但与上述实施方式 4 同样，可将暗电流减少到  $10^{-8}$ A 电平

(图中 Idark 实线)。

再有,上述堵头孔 30 的形状不作特别限定,可保留成环状、履带(トラック)形状。所谓上述环状,不仅包含抽去了圆形的中央部分的形状,也包含抽去了四角形状、多角形状的中央部分的形状。最好是在角部上设置了圆角的形状以便防止电场集中。同样,所谓上述履带形状,指的是用半圆包围长方形的两端并抽去了中央部分的形状,但上述半圆部分包含作为四角形状、多角形状的一部分的形状。同样,最好是在角部上设置了圆角的形状。此外,上述履带形状也包含抽去了椭圆形状的中央部分的形状。

此外,如图 18 中所示,可设置上述堵头孔 30 并进而在其外侧设置第 2 堵头孔 30。如果设置多个堵头孔 30,则可使在处理时发生的崩裂、裂纹中止于外侧,可提高成品率、可靠性。

此外,如果在上面使 n 电极 13 引出,则安装变得更加容易。也可在外周部分设置 p 型周边导电区域 110。

在上述实施方式 1~9 中,也可使用半绝缘性衬底 29 作为衬底 1,采用表面入射。在该情况下,由于可抑制静电电容,故可提高工作带区域。

再有,在本实施方式中示出了为了使 n 电极 13 和 p 电极 14 配置在元件表面上而设置堵头孔 30 的例子,但堵头孔 30 可用作这样的元件:留下第 2 导电型导电区域 10 和上述第 2 导电型导电区域的周围的第 2 半导体层 8、在其外周的衬底上层叠的层中至少光吸收层的侧面除去。即在上述实施方式 1~8 中的在衬底 1 的背面上设置了第 1 电极 13 的本发明的雪崩光电二极管中也可设置堵头孔 30 作为侧面除去元件,同样地起到可降低暗电流的效果。

#### 实施方式 10.

图 19 是表示本发明的实施方式 10 的雪崩光电二极管的概略结构的剖面图。在本实施方式中,在上述实施方式 1~9 中示出的雪崩光电二极管中使用基于 Fe 杂质等的 InP 等的半绝缘性衬底 29 作为衬底 1。此外,使光 28 从半绝缘性衬底 29 衬底一侧入射。作为半导体的

层叠方法，例如在半绝缘性衬底 29 上依次使载流子浓度  $2 \times 10^{18} \sim 2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$  的 n 型 AlInAs 缓冲层 19、使 i 型 AlInAs 的雪崩倍增层 4 生长为  $0.1 \sim 0.3 \mu\text{m}$ 、使载流子浓度  $1 \times 10^{17} \sim 2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  的 p 型 InP 电场缓和层 5 生长为  $0.03 \sim 0.06 \mu\text{m}$ 、使载流子浓度  $1 \times 10^{15} \sim 5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$  的 p 型 GaInAs 光吸收层 6 生长为  $1.0 \sim 1.5 \mu\text{m}$ 、使 i 型 AlGaInAs 过渡层 7 生长为  $0.02 \sim 0.2 \mu\text{m}$ 、使 i 型 InP 的第 2 半导体层 8（在从背面使光入射的情况下，起到顶层的功能）生长为  $1.0 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 、使 i 型 GaInAs 接触层 9 生长为  $0.1 \sim 0.4 \mu\text{m}$  后，形成了 p 型导电区域 10、GaInAs 接触层 9 和 p 电极 14。再者，进行侧面除去直至 n 型 AlInAs 缓冲层 19，设置了保护膜 12 使其覆盖上面和侧面 25，形成了 n 电极 13 使其与 n 型 AlInAs 缓冲层 19 接触。

由于本实施方式的雪崩光电二极管如上述那样来构成，故可使光 28 从背面入射，可利用 p 电极 14 使透过了光吸收层 6 的光反射。此外，由于在 InP 半绝缘性衬底 29 的表面上设置了 n 电极 13 和 p 电极 14，故可进行倒装式安装。此外，由于通过使用 Fe 掺杂 InP 半绝缘性衬底可减少电容，故可实现高速化。也有抑制衬底中的吸收的效果。此外，由于设置了侧面 25，故也可用作侧面入射导波路型，可减少元件容量。

在本实施方式中，使光 28 入射到半绝缘性衬底 29 的背面，但也可在半绝缘性衬底 29 上设置反射防止膜。也可作成 n 型缓冲/包层来代替 n 型 AlInAs 缓冲层 19。也可在 p 型导电区域 10 的周边设置 p 型周边导电区域 110。

再有，在上述实施方式 1~10 中示出了使用 n 型作为第 1 导电型、p 型作为第 2 导电型、使用 n 电极作为第 1 电极、p 电极作为第 2 电极的例子，但也可使用 p 型作为第 1 导电型、n 型作为第 2 导电型、使用 p 电极作为第 1 电极、n 电极作为第 2 电极。

关于导电区域 10 的形成，示出了固相扩散的例子，但也可使用气相扩散。作为 n 电极 13、p 电极 14 的材料，也可使用 AuZn/Au、AuGe/Ni/Au、Ti/Au。

作为雪崩倍增层 4, 也可作成 GaInAsP、AlInAs/AlGaInAs 超晶格、AlInAs/GaInAsP 超晶格。

再有, 在上述实施方式 1~10 中示出了关于雪崩倍增层 4、使用了更加倍增电子的 Al 系列材料的例子, 在倍增层一侧是 p 型的情况下, 由于空穴移动到倍增层中, 故可使用更加倍增空穴的 InP 系列材料作为雪崩倍增层 4。

在不特别需要的情况下, 可省略电场缓和层 5, 但最好是能带隙大的材料。由于 InP 的空穴的离子化率高、AlInAs 的电子的离子化率高, 故如果将电子的离子化率更高的材料、例如 AlInAs 等的 Al 系列材料用作雪崩倍增层 4 时, 同样地使用电子的离子化率高的 AlInAs 电场缓和层 5, 则关于工作速度、噪声可得到更优良的特性。

关于光吸收层 6, 可定为 i 型的, 也可定为小于等于  $3 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$  的 n 导电型的。此外, 上述 i 型、n 导电型也可只是在光吸收层 6 的上部。

关于过渡层 7, 可定为 AlInAs、GaInAsP。

关于窗层 8, 可定为 AlInAs、AlGaInAs。此外, 也可定为掺了 Fe 的半绝缘性型。

关于接触层 9, 可以是非导电型的。如果能用低电阻来接触窗层 8 的导电区域 10 与 p 电极 14, 则可省略接触层 9。

再有, 即使在上述实施方式 1~10 各自的组合的方式中, 也能起到上述效果。

图1

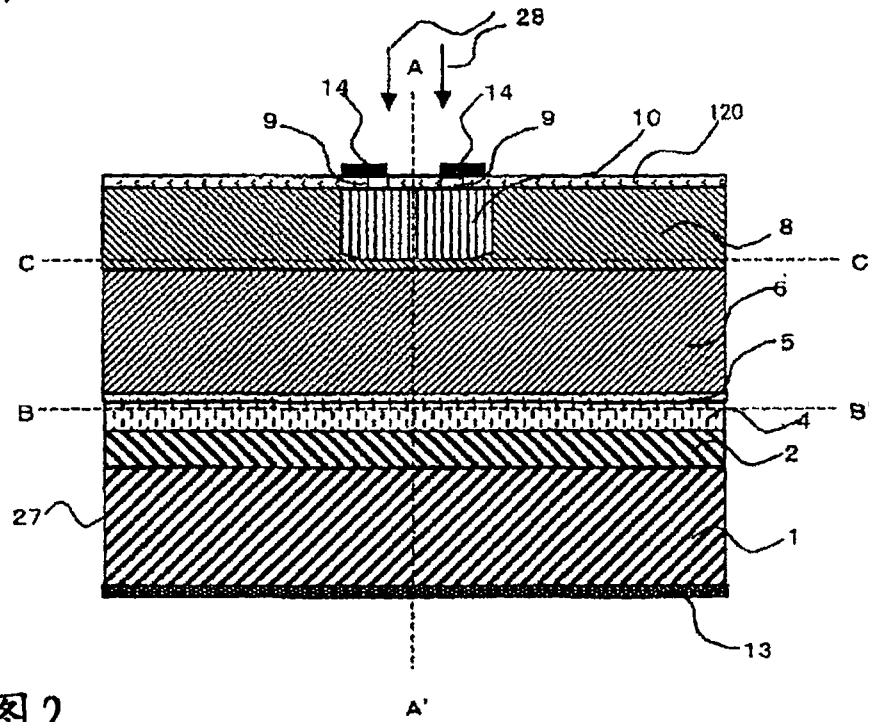


图2

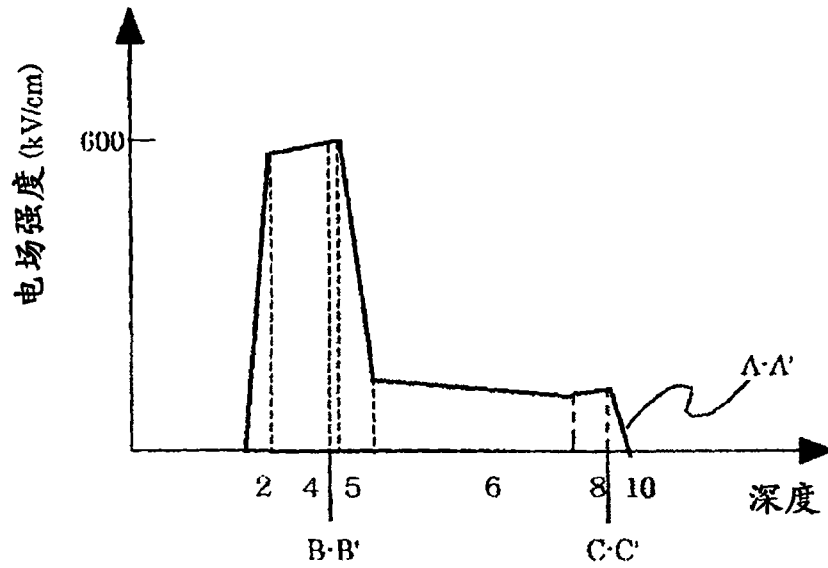


图3

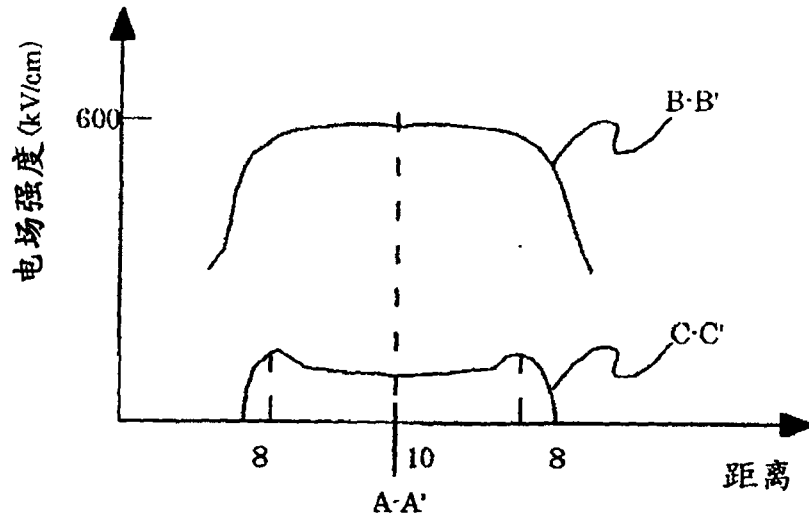


图4

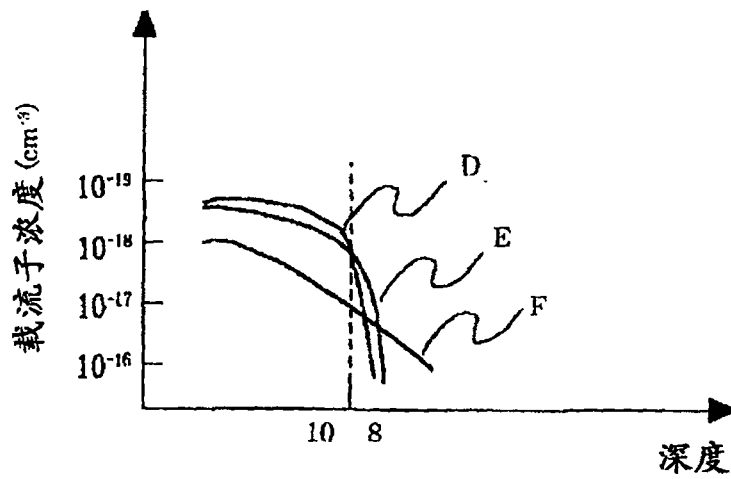


图5

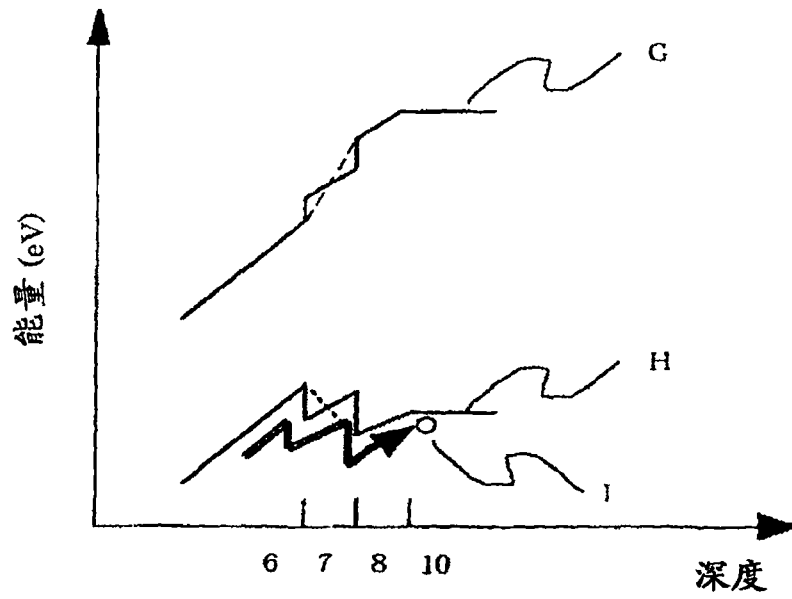


图6

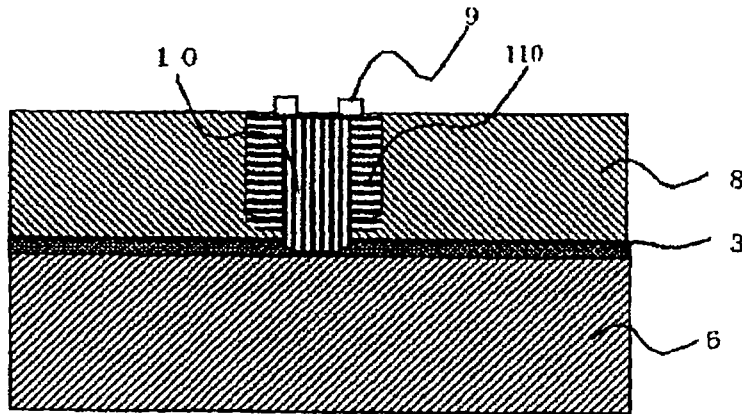


图7

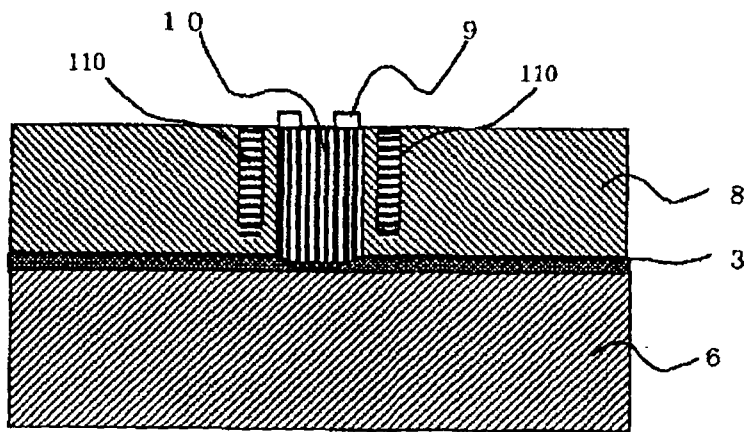


图8

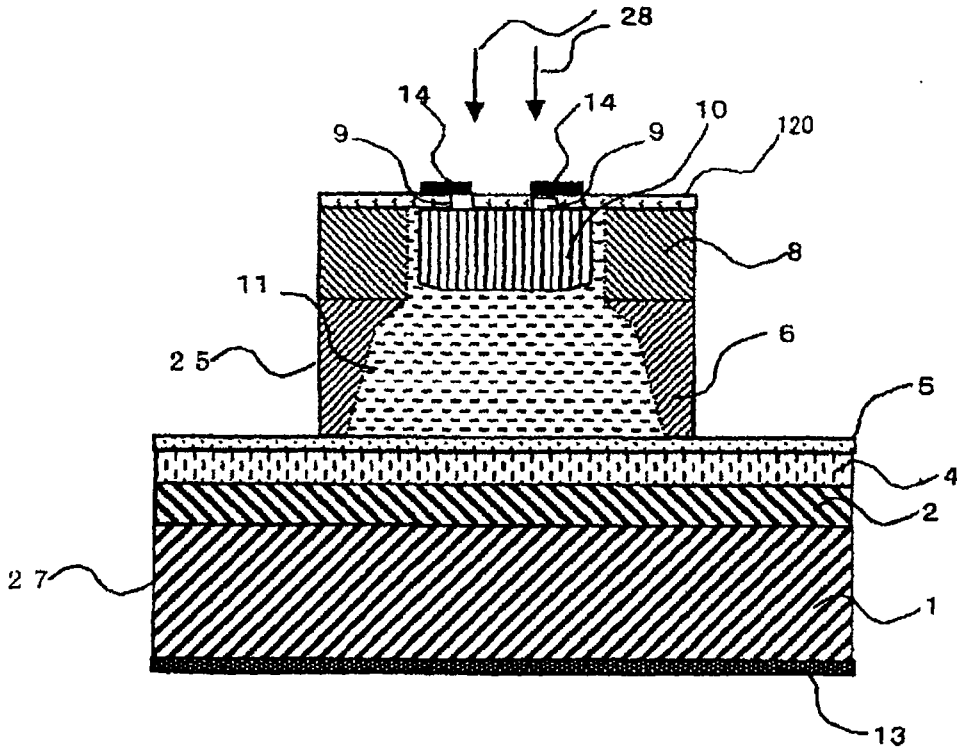


图9

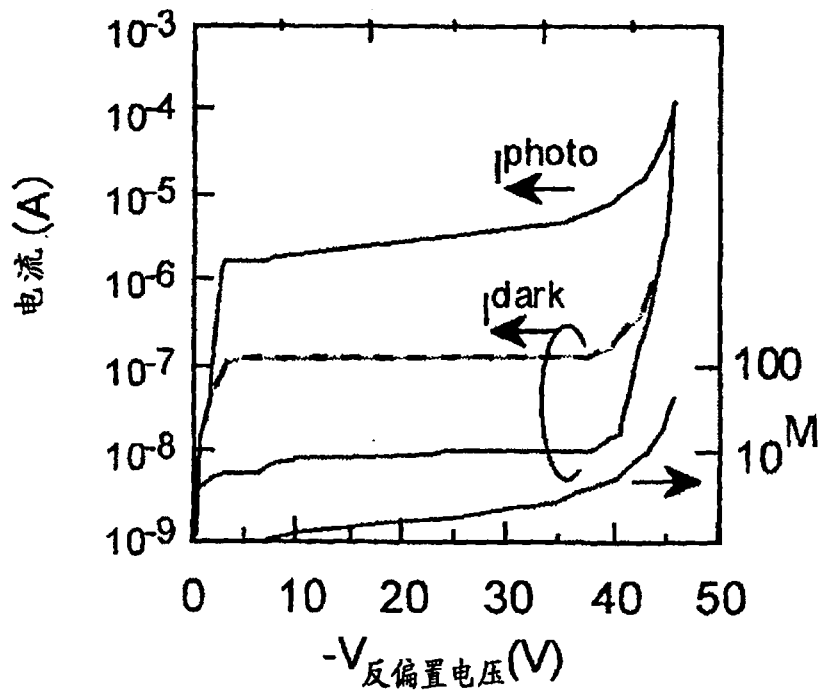


图10

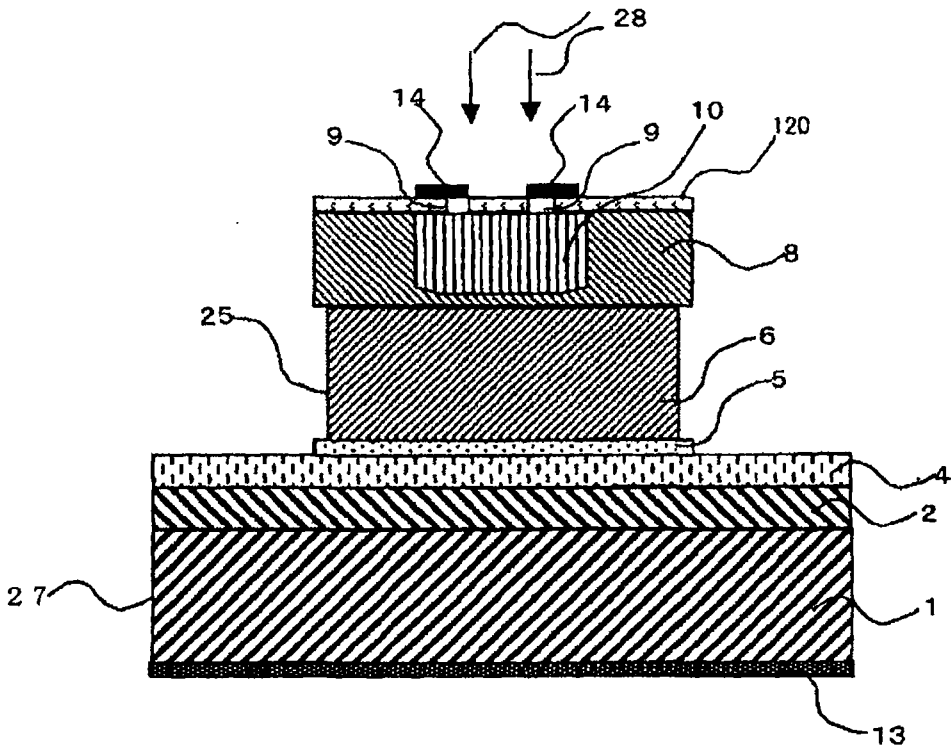


图11

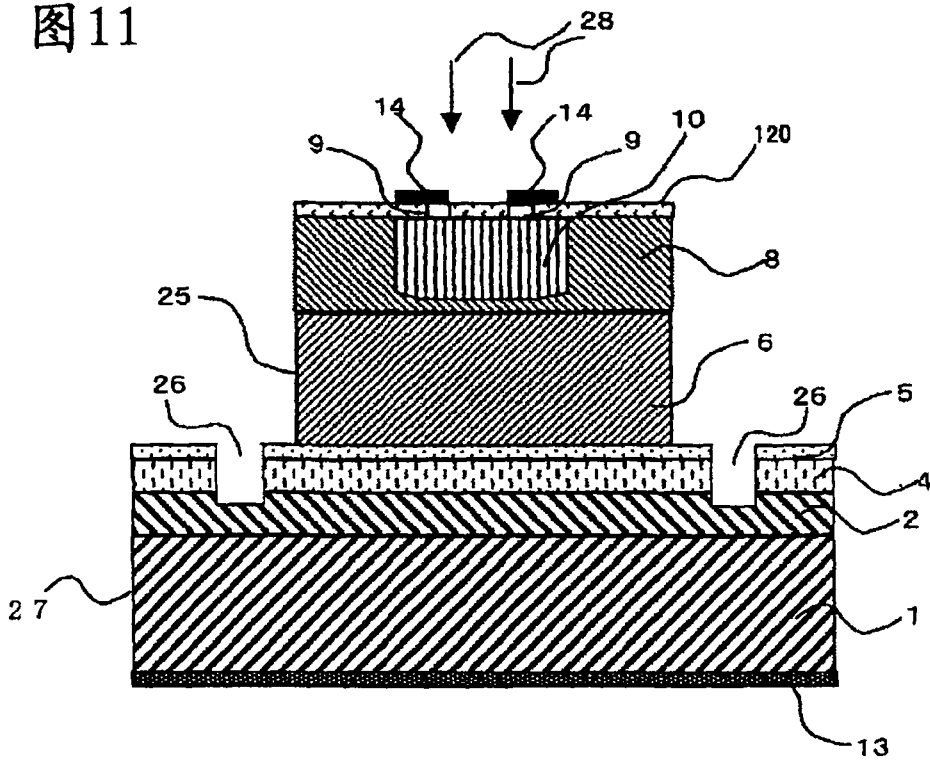


图12

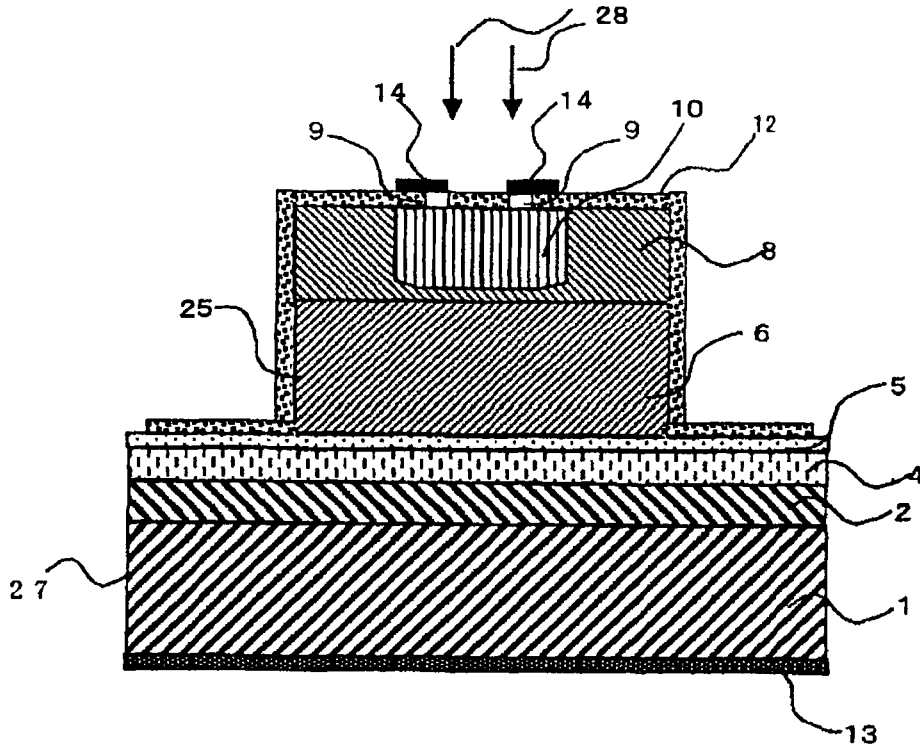


图13

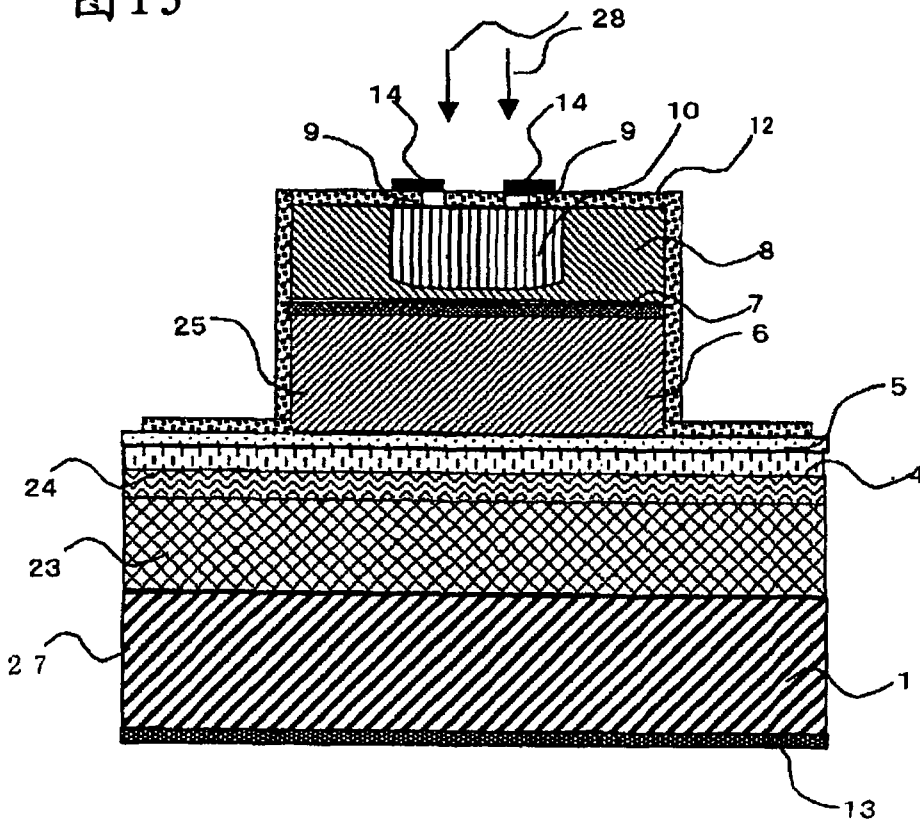


图14

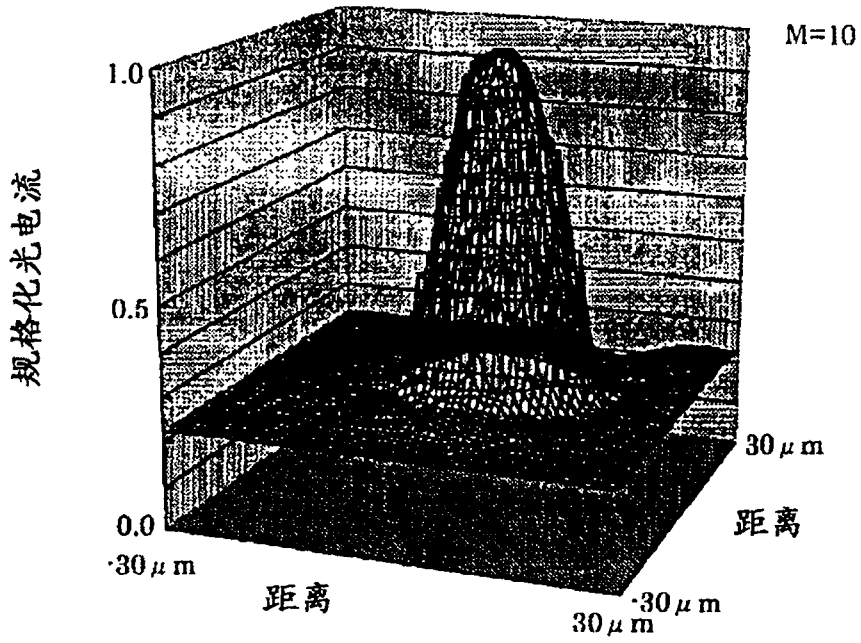


图15

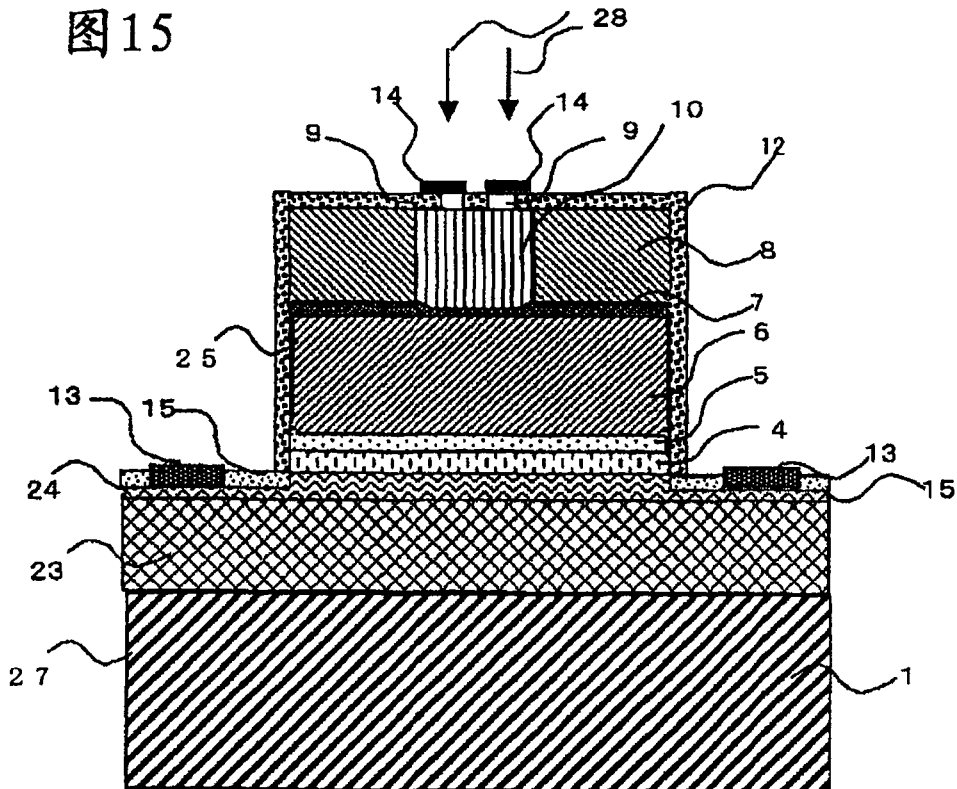


图16

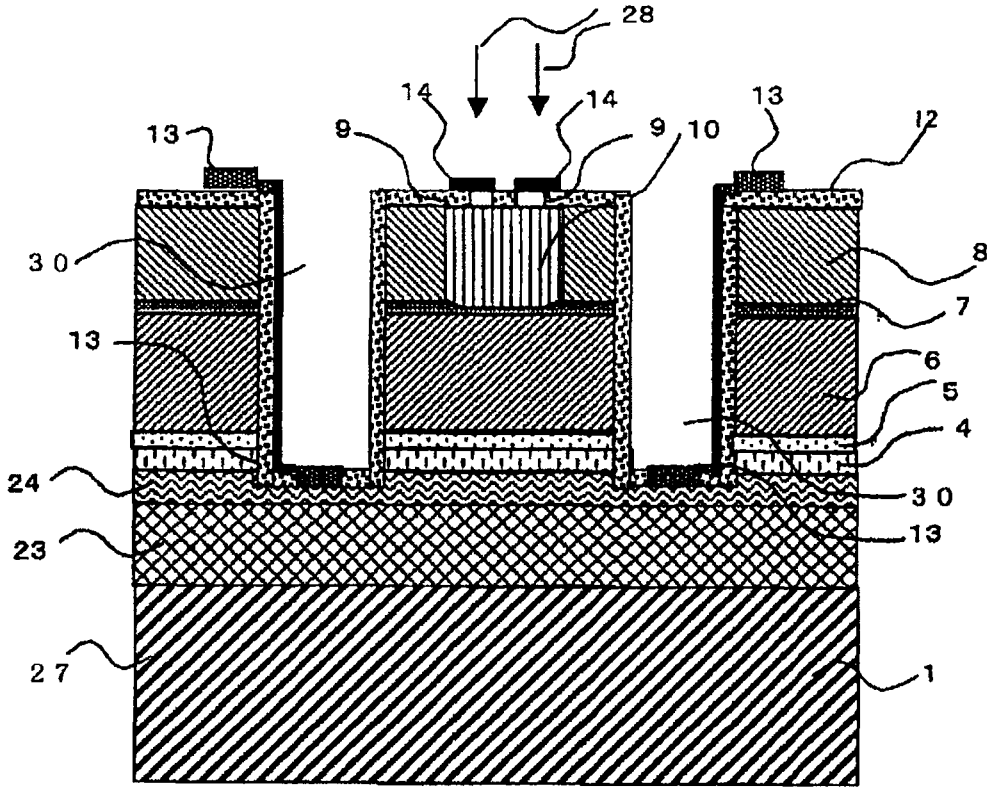


图17

