



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 108987521 B

(45) 授权公告日 2022. 02. 08

(21) 申请号 201810493763.2

(22) 申请日 2018.05.22

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 108987521 A

(43) 申请公布日 2018.12.11

(30) 优先权数据  
15/609,771 2017.05.31 US  
15/797,827 2017.10.30 US

(73) 专利权人 安华高科技股份有限公司  
地址 新加坡新加坡市

(72) 发明人 S·法法尔德 D·P·马松

(74) 专利代理机构 北京律盟知识产权代理有限  
责任公司 11287

代理人 林斯凯

(51) Int.Cl.

H01L 31/0725 (2012.01)

H01L 31/0735 (2012.01)

H01L 31/18 (2006.01)

(56) 对比文件

US 2013133730 A1, 2013.05.30

CN 1422443 A, 2003.06.04

CN 1191395 A, 1998.08.26

US 4631352 A, 1986.12.23

审查员 张跃

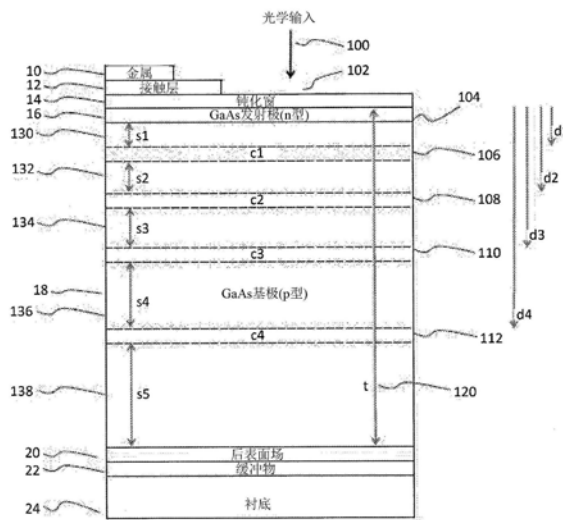
权利要求书2页 说明书31页 附图27页

(54) 发明名称

将光能转换为电能的换能器

(57) 摘要

本申请案是针对一种用以将光能转换成电能的换能器。揭示一种光学换能器、光电子装置和半导体。揭示说明性光学换能器包含多个p-n堆叠,其中每一p-n堆叠包括至少一p层和一n层,且在其中形成介于所述p层与所述n层之间的内置光电压。揭示所述p层和n层,以具有成分大体上相同的大体上相同的n型材料,使得所述多个p-n堆叠中的每一p-n堆叠具有大体上类似的内置光电压。进一步揭示所述光学换能器以包含多个连接层,所述多个连接层中的每一连接层包夹在两个邻近p-n堆叠之间,用于电连接所述两个邻近p-n堆叠。所述多个p-n堆叠中的所述p-n堆叠可经布置,使得每一p-n堆叠的所述内置光电压叠加地促成所述换能器的总电位。



1. 一种光学换能器系统,其包括:

光源,其经配置以产生具有关联到其的预定光子能量的光,所述预定光子能量是光频率的函数或与光波长成反比例;以及

换能器,其经配置以接收所述光源所产生的所述光,并将光能转换成电能,所述换能器具有彼此串联电连接的多个半导体层,每一半导体层具有大体上相同的成分,其具有关联到其的大体上相同的带隙能量,所述带隙能量大于所述预定光子能量。

2. 根据权利要求1所述的系统,其中所述光源进一步经配置以用包含在 $100\text{W}/\text{cm}^2$ 到 $2000\text{W}/\text{cm}^2$ 的范围内的强度来照明所述换能器。

3. 根据权利要求1所述的系统,其中选择所述成分以使所述带隙能量与所述预定光子能量之间的能量差异大体上等于所述半导体材料的声子能量。

4. 根据权利要求3所述的系统,其中所述声子能量包含纵向声学声子能量、横向声学声子能量和纵向光学声子能量中的至少一者。

5. 根据权利要求1所述的系统,其中选择所述成分以使所述带隙能量与所述预定光子能量之间的能量差异大于 $0\text{meV}$ 且小于 $100\text{meV}$ 。

6. 根据权利要求1所述的系统,其中所述半导体层为GaAs层,其在处于 $300\text{K}$ 的温度时,具有大体上 $1.43\text{eV}$ 的带隙能量。

7. 根据权利要求6所述的系统,其中所述光源是二极管光源和激光源中的一者,且具有包含在 $1.25\text{eV}$ 到 $1.37\text{eV}$ 的范围内的光子能量。

8. 根据权利要求1所述的系统,其中所述光源为脉冲式光源。

9. 根据权利要求1所述的系统,其中:

所述多个半导体层具有:

半导体发射极层,所述半导体发射极层经n掺杂和p掺杂中的一者;以及

半导体基极层,当所述半导体发射极层经n掺杂时,所述半导体基极层经p掺杂,当所述半导体发射极层经p掺杂时,所述半导体基极层经n掺杂,所述半导体基极层中的一者邻接所述半导体发射极层,以形成具有关联到其的第一电位的p-n结;

所述换能器进一步具有至少一个连接元件,其形成于邻近半导体基极层之间,以将所述邻近半导体基极层彼此电连接,每一连接元件经配置以产生所述邻近半导体基极层之间的相应额外电位;

所述换能器具有关联到其的总电位,其等于所述第一电位与每一相应额外电位的总和,每一相应额外电位大体上等于所述第一电位;

且,

所述换能器将接收来自所述光源的光,所述光传播通过所述半导体发射极层且在所述半导体发射极层中部分被吸收,且接着循序传播通过所述半导体基极层中的每一者并在其中部分被吸收。

10. 根据权利要求9所述的系统,其中每一半导体基极层具有相应厚度,其经配置以吸收相同数目个光子。

11. 根据权利要求1所述的系统,其中:

所述光源包含具有递送端以将光递送到所述换能器的光纤,所述系统进一步包括所述递送端将紧固到的连接件,所述连接件经配置以在所述递送端紧固到连接组合件时,使所

述递送端与所述换能器对准。

12. 根据权利要求11所述的系统,其中所述递送端包含套管,且所述连接件不含其中插入所述套管的任何插入件。

13. 一种光学换能器系统,其包括:

光源,其经配置以产生具有关联到其的预定光子能量的光;以及

换能器,其经配置以接收所述光源所产生的所述光,并将光能转换成电能,所述换能器具有彼此串联电连接的多个半导体层,每一半导体层具有大体上相同的成分,其具有关联到其的大体上相同的带隙能量,所述带隙能量大于所述预定光子能量,其中选择所述成分以使所述带隙能量与所述预定光子能量之间的能量差异大体上等于供体能量和受体能量中的至少一者。

14. 一种将光能转换成电能的方法,所述方法包括:

提供换能器,其具有彼此串联电连接的多个半导体层,每一半导体层具有大体上相同的成分,其具有关联到其的大体上相同的带隙能量;以及

用具有关联到其的光子能量的光来照明所述换能器,所述光子能量是光频率的函数或与光波长成反比例,所述光子能量小于所述带隙能量。

15. 根据权利要求14所述的方法,其中照明所述换能器包含用范围在 $100\text{W}/\text{cm}^2$ 到 $2000\text{W}/\text{cm}^2$ 之间的光功率密度来照明所述换能器。

16. 根据权利要求14所述的方法,其中提供所述换能器包含选择带隙能量比所述光子能量大大体上等于形成每一半导体层的半导体材料的声子能量的量的换能器。

17. 根据权利要求14所述的方法,其中提供所述换能器包含选择带隙能量比所述光子能量大大体上等于形成每一半导体层的半导体材料中的杂质的受体能级能量和供体能级能量中的至少一者的量的换能器。

18. 根据权利要求14所述的方法,其中提供所述换能器包含选择带隙能量比所述光子能量大大于 $0\text{meV}$ 且小于 $100\text{meV}$ 的量的换能器。

19. 根据权利要求14所述的方法,其中提供所述换能器包含选择具有GaAs半导体层且在处于 $300\text{K}$ 的温度下时具有大体上 $1.43\text{eV}$ 的带隙能量的换能器。

20. 根据权利要求14所述的方法,其中照明所述换能器包含提供二极管光源和激光源中的一者,所述光源具有包含在 $1.25\text{eV}$ 到 $1.37\text{eV}$ 的范围内的光子能量。

## 将光能转换为电能的换能器

[0001] 相关申请案的交叉参考

[0002] 本申请案是2017年5月31日申请的第15/609,771号美国专利申请案的部分接续申请案,所述专利申请案是2014年12月9日申请的第14/565,141号美国专利申请案的部分接续申请案,所述美国专利申请案主张2013年12月9日申请的第61/913,675号美国临时专利申请案的优先权;其中的每一者特此以引用的方式并入本文中。

### 技术领域

[0003] 本发明涉及将光能转换为电能的装置。

### 背景技术

[0004] 在光伏技术领域,存在需要窄带光学输入信号到电输出信号的高效转换,例如通过产生直流(DC)电输出。在这些应用的一些中,窄带光学输入信号由激光或发光二极管提供。

[0005] 用于将光学输入信号转换成电输出信号的现有技术装置包含光伏单结装置,其通常产生低电压电输出,其可能对设计师具有较强的约束性。所述现有技术装置还包含光伏多结装置,其可具有排列在同一平面中且彼此串联电连接的多个光伏结。此类光伏多结装置可产生较高电压输出信号;然而,它们要求所述多结具有相同尺寸,对称排列,且冲击窄带输入光信号成形并以均匀地照亮每一结的方式导向所述多结。另外,此类光伏多结装置可需要复杂的制造和组合技术,包含例如需要各种半导体层、空气桥金属连接件、多层触点和连接、密掺杂的半导体层中具有高纵横比蚀刻的多个深沟槽,以最小化薄片电阻率(例如,针对背部触点或顶部触点)等。

[0006] 因此,将输入光信号转换成输出电信号的换能器中的改进是合意的。

### 发明内容

[0007] 在第一方面,本发明提供一种换能器,其经配置以将光能转换成电能。揭示一种换能器,其包含多个p-n堆叠,其中每一p-n堆叠包含至少一p层和一n层,且所述p层与n层之间形成有内置光电压。在一些实施例中,所有的p层大体上包含成分相同的相同p型材料,且所有的n层大体上包含成分相同的相同n型材料,使得每一p-n堆叠具有大体上类似的内置光电压。进一步揭示所述换能器包含多个连接层,每一连接层包夹在两个邻近p-n堆叠之间,以用于电连接所述两个邻近p-n堆叠。在一些实施例中,每一p-n被布置成使得每一p-n堆叠的内置光电压累加以形成换能器的总电位。

[0008] 所属领域的技术人员在结合附图查阅了特定实施例的以下描述后,将容易理解本发明的其它方面和特征。

### 附图说明

[0009] 现在将参看附图仅仅举例描述本发明的实施例。

- [0010] 图1示出现有技术p-n结。
- [0011] 图2示出根据本发明的换能器的一个实施例。
- [0012] 图3示出均质p-n二极管的平坦频带能量图。
- [0013] 图4示出图3的p-n二极管的四个分段。
- [0014] 图5示出用连接元件彼此电连接的图3的四个分段。
- [0015] 图6示出具有形成隧穿二极管的连接元件的本发明的换能器的一个实施例。
- [0016] 图7示出本发明的连接元件的实施例。
- [0017] 图8示出本发明的连接元件的另一实施例。
- [0018] 图9是作为不具有连接元件的p-n二极管的电压的函数的电流的曲线图。
- [0019] 图10是根据本发明的换能器的实施例的作为电压的函数的电流的曲线图。
- [0020] 图11示出当光学输入的波长从最佳值变化时,根据本发明的换能器的实施例的预期性能变化。
- [0021] 图12示出当基础层分段的厚度从最佳设计值变化时,根据本发明的换能器的预期性能变化。
- [0022] 图13示出根据本发明的换能器的一实施例的作为光学输入功率的函数的转换效率。
- [0023] 图14示出根据本发明的换能器的实施例的作为光学输入功率的函数的开路电压。
- [0024] 图15示出包括彼此分离325微米的距离的网格线的本发明的换能器的俯视图。
- [0025] 图16示出包括彼此分离425微米的距离的本发明的换能器的俯视图。
- [0026] 图17示出无网格线但包括透明导电膜的本发明的换能器的俯视图。
- [0027] 图18示出图15、16和17的换能器的平均短路电流 ( $I_{sc}$ )。
- [0028] 图19示出图15、16和17的换能器的填充因子数据。
- [0029] 图20示出本发明的换能器的实施例的作为测量换能器电压的函数的检测到的功率的曲线图。
- [0030] 图21示出根据本发明的换能器和数据接收器单元的实施例。
- [0031] 图22示出根据本发明的功率计的实施例。
- [0032] 图23示出半导体材料的带隙能量图。
- [0033] 图24示出从不同厚度的单GaAs p/n结测得的短路电流的输入功率相依性。
- [0034] 图25A示出作为一系列p/n结的光功率的函数的光到电转换效率的曲线图。
- [0035] 图25B示出作为一系列p/n结的光功率强度的函数的光到电转换效率的曲线图。
- [0036] 图26示出作为以各种光功率照明的同一光学换能器的所施加电压的函数的响应度的曲线图。
- [0037] 图27示出同一光换能器的随针对两个不同照明功率的光学输入的波长而变的相对性能。
- [0038] 图28示出同一光换能器的随两个不同的照明波长下的光学输入功率而变的相对性能。
- [0039] 图29示出现有技术光纤电缆组合件的切开透视图。
- [0040] 图30示出现有技术凸缘安装连接件的横截面图。
- [0041] 图31示出根据本发明的连接件的实施例的横截面图。

- [0042] 图32示出根据本发明的面向板安装连接件的光纤电缆组合件的顶部前透视图。
- [0043] 图33示出图32的连接件和光纤光缆的顶部后透视图。
- [0044] 图34示出图32和33的配对的光纤电缆组合件和板安装连接件。
- [0045] 图35示出根据本发明的系统的实施例。
- [0046] 图36示出根据本发明的实施例的方法的流程图。
- [0047] 图37示出另一现有技术p-n结。
- [0048] 图38示出根据本发明的实施例的连接层。
- [0049] 图39示出根据本发明的实施例的连接层的细节。
- [0050] 图40示出用以建构根据本发明的实施例的连接层的一系列层对。
- [0051] 图41示出根据本发明的实施例的随铝成分而变的有效带隙估计。
- [0052] 图42是现有技术隧穿结的横截面图。
- [0053] 图43是根据本发明的实施例的隧穿结的横截面图。
- [0054] 图44是根据本发明的实施例的隧穿结的详细的截面视图。

### 具体实施方式

[0055] 一般来说,本发明提供用于高效光子到直流(DC)光换能器电力转换应用的谐波光电压上变频转换器。换能器将一种形式的能量转换成另一形式的能量,例如将光能转换成电能。本发明的光换能器优选基于直流电/电压输出以高转换效率,将光学输入转换成电输出。光学输入优选包含光束,例如激光束。光束通常从来源传播到光换能器。光束的传播可以穿过自由空间,例如空气、其它气体或真空的准直束来进行。或者,可通过固态媒介(例如光纤)、波导或光引导媒介(其还可包含液体媒介)来进行光束的传播,所述媒介可全部被视为光源的一部分。举例来说,本发明的光换能器可放置在穿过光纤传播以将来自远处来源的电力传递到远程设备的光束的接收端,所述远程设备将使用由光换能器转换的电压或电流。为了清楚起见,光源,优选以光束的形式,为本发明的光换能器提供光学输入。

[0056] 当前技术发展水平的PV装置最通常是基于单个p-n结,例如图1中所述,其包含由掺杂有相反极性(p或n)的掺杂剂的半导体组成的发射极16和基极18。基极18和发射极16形成p-n结104,且一起具有半导体材料的厚度(t) 120,所述半导体材料吸收冲击PV装置的前表面102的光学输入100。可通过使用钝化窗14来改进单结PV装置的性能,所述钝化窗以与发射极16相同的掺杂类型掺杂,且安置于前表面102与发射极16之间。可使用接触层12和/或金属层10来提取单结PV装置所产生的电流和电压。接触层12和/或金属层10可使用标准光刻技术来图案化或沉积,使得仅前表面102的一部分被覆盖,以便高效地让光学输入到达半导体发射极16和基极18的吸收厚度120。

[0057] 还可结合接触层12或金属层10或代替于所述接触或金属层而是用光学透明但导电的层。例如基极18和发射极16的层通常生长在衬底24上,所述衬底可充当机械支撑件,且可定义生长在衬底24上的半导体晶体的晶格常数。缓冲层22可安置于衬底24与基极18之间,以调整晶体质量和/或为了其它制造、光学、电气或晶体成长目的。举例来说,可使用缓冲物22来提供电导率(横向薄片导电性或垂直导电性以提取电流),或改变单结PV装置的光学特性。可通过使用后表面场(BSF)层20来进一步改进单结PV装置的性能,所述后表面层以与基极18相同的掺杂类型来掺杂,且安置于衬底24与基极18之间。在发射极和基极的厚

度120内吸收光学输入100,且基极中以及发射极中的少数光载流子扫掠越过p-n结104,从而在可连接到顶部金属10和衬底24的外部电路上产生光电流和光电压。

[0058] 对于PV装置,当在PV装置的电流-电压曲线(I-V曲线)的最大电力点处或附近操作PV装置时,获得最佳转换性能,通常被称作转换效率,被定义为从PV装置上冲击的光功率与从PV装置输出的电功率的比率。I-V曲线的最大电力点对应于输出电压( $V_{max}$ )与输出电流( $I_{max}$ )的乘积在此已达到最大值的点。所述点定义填充因子系数(也已知具有填充因子系数)  $FF = (V_{max} * I_{max}) / (V_{oc} * I_{sc})$ ,其中 $V_{oc}$ 是PV装置的开路电压,且 $I_{sc}$ 是PV装置的短路电流值。有时将“电压FF”(FF<sub>v</sub>)和“电流FF”(FF<sub>i</sub>)定义为 $FF_v = V_{max} / V_{oc}$ 和 $FF_i = I_{max} / I_{sc}$ ,使得 $FF = FF_v * FF_i$ ,也是方便的。可通过改变其电连接到的负载的阻抗,来在不同电流-电压设定下操作PV装置。举例来说,以最佳阻抗连接到PV装置的外部负载,也被称作最佳负载、最佳阻抗或最佳电路电阻,将驱动光换能器来在其最大电力点附近操作。

[0059] 光学输入信号具有光波长( $\lambda$ 或拉姆达),光频率( $\nu$ ),光能(或光子能量) $E = h\nu$ 或等效地 $E = hc / \lambda$ ,其中, $h$ 为普朗克常数,且 $c$ 为光速。光学输入信号可为单色的,在此情况下,包括光学输入的光子全部具有相同的波长和频率。光学输入信号可包括一束波长或色彩,在此情况下,包括光学输入的光子全部具有在均值周围的波长和频率。波长带的宽度可被称作光学输入信号的带宽。举例来说,光学输入信号可为宽带或窄带。光学输入信号可具有多于一个频带的波长,例如多个频带,每一频带的中心为平均频率。在多频带光学输入信号的情况下,可针对所述频带的波长中的一者来优化PV装置。对于下文的描述,当光输入具有一束频率或波长时,那么将取所述频带的平均频率或波长作为光学输入信号的频率或波长。在光学输入具有一束频率或波长的情况下,那么可为窄带光学输入,例如为小于500nm的带宽、或小于100nm的带宽,或小于20nm的带宽来优化PV装置。

[0060] 光学输入信号可被称为具有等效光电压: $h\nu / e$ ,其中 $e$ 是电子的电荷。举例来说,如果光学输入具有波长 $\lambda = 830\text{nm}$ ,那么光能为 $E = 1240\text{eV} * \text{nm} / 830\text{nm} = 1.494\text{eV}$ 。接着,光学输入信号的光电压为1.494V。本发明的换能器能够将光学输入信号转换到大于光学输入光电压的电压。举例来说,在一些实施例中,本发明的换能器能够将具有约1.5伏的光电压的光学输入信号转换成介于2V与20V之间,或2V与12V之间,或2V与8V之间的电输出电压。换能器的输出电压可为换能器的最大功率电压点(通常标记为 $V_{mpp}$ 或 $V_{max}$ )。或者,光换能器的光电压输出可为装置可产生的介于0V与开路电压 $V_{oc}$ 之间的任何电压。换能器的光电流输出可为换能器的最大功率电流点(通常标记为 $I_{mpp}$ 或 $I_{max}$ )。或者,换能器的光电流输出可为装置可产生的介于0A与短路电流 $I_{sc}$ 之间的任何电流。

[0061] 本发明的换能器的实施例在图2中示出。类似于图1中示出的现有技术的当前技术发展水平单结PV装置,图2中的本发明的光换能器装置包含由以相反极性(p或n)的掺杂剂掺杂的半导体组成的基极18和发射极16。基极和发射极形成p-n结104,且一起具有半导体材料的厚度( $t$ )120,所述半导体材料吸收冲击换能器的前表面102的光学输入信号100。本发明的实施例包含钝化窗14,其以与发射极相同的掺杂类型来掺杂,且安置于前表面102与发射极16之间。可使用接触层12和/或金属层10来提取换能器装置所产生的电流和电压。接触层和/或金属层可使用标准光刻技术来图案化或沉积,使得仅前表面102的一部分被覆盖,以便高效地令光学输入到达半导体发射极16和基极18的吸收厚度120。还可结合接触层12或金属层10或代替于所述接触或金属层而是用光学透明但导电的层。例如基极18和发射

极16的层通常生长在衬底24上,所述衬底充当机械支撑件,且定义半导体晶体的晶格常数。缓冲层22可安置于衬底24与基极18之间,以调整晶体质量和或为了其它制造、光学、电气或晶体成长目的。举例来说,可优选使用缓冲物22来提供电导率(横向薄片导电性或垂直导电性以提取电流),或改变单结PV装置的光学特性。优选使用后表面场(BSF)层20,其以与基极18相同的掺杂类型来掺杂,且安置于衬底24与基极18之间。优选使用BSF和窗层来将少数载流子返回朝向p/n结反射。举例来说,如果基极为p型,基极中的少数载流子为光电子,那么发射极将为n型,且发射极中的少数载流子将为光穴。在所述情况下,窗将优选在价带中具有频带不连续性,以将发射极中的少数空穴返回朝向p/n结104反射,且BSF将优选在导电带中具有频带不连续性,以将基极中的少数电子返回朝向p/n结104反射。在发射极和基极的厚度120内吸收光学输入100,且基极中以及发射极中的少数光载流子扫掠越过p/n结104,从而在可连接到顶部金属10和衬底24的外部电路上产生光电流和光电压。

[0062] 此外,本发明的实施例并入有连接元件106(c1)、108(c2)、110(c3)和112(c4)。在一些实施例中,连接元件可被称为连接层,因为使用一或多个材料层来制造连接元件。连接元件位于远离发射极104的最接近于前表面102的表面的特定距离处。举例来说,如图2中所说明,连接元件c1 106位于距发射极和窗接口距离d1处,类似地,连接元件c2 108位于距发射极和窗接口距离d2处,连接元件c3 110位于距发射极和窗接口距离d3处,连接元件c4 112位于距发射极和窗接口距离d4处。图2示范具有4个连接元件的实施例;在不脱离本发明的范围的情况下,其它实施例可包含超过4个连接元件或少于4个连接元件。

[0063] 图3、4、5和6利用半导体频带图来说明可如何通过使用根据本发明的连接元件使换能器的电输出电压高于输入光电压( $h\nu/e$ )。

[0064] 图3示出处于不具有偏置且不具有照明的稳态中的均质p-n二极管999的平坦频带能量图。线1000和1002分别表示导电带和价带。带隙能量1004是导电带1000与价带1002之间的能量差。线的长度1006表示组成p-n二极管999的半导体层的厚度。点线1008表示通过p-n二极管999的费米能级( $E_f$ )。费米能级1008相对于传导和价带的位置由存在于p-n二极管999中的半导体材料的掺杂浓度以及供体的类型(n型或p型)决定。p-n二极管999具有n掺杂区1001和p掺杂区1003。n掺杂区1001是发射极区,p掺杂区是基极区。费米能级1008介于价带1002与导电带1000之间。可将半导体材料或组成p-n二极管的材料掺杂特性选择为具有来自n型材料中的导电带的在 $KT \sim 0.025\text{eV}$ 内或以下且类似地来自p型材料中的价带的 $0.025\text{eV}$ 内或以下的费米能级1008,以便热激活尽可能多的供体。“KT”是波兹曼常数(Boltzman's constant)K与以开尔文为单位的温度T的乘积。这在图3的平坦频带能量图中示出,其中费米能级1008在整个p-n二极管999上相对于导电带1000且相对于价带1002偏移其位置,从n掺杂区1001到p掺杂区1003。费米能级1008从n掺杂区1001到p掺杂区1003的偏移或变化可被称作内置电位或称作电位1010,其可表示为 $V_{bi}$ 。内置电位1010定义p-n二极管的接通电压。内置电位1010还定义p-n二极管999在用具有至少等于带隙能量1004的能量的光照明后即刻产生的电压。内置电位的实例包含:对于Si,约 $0.7\text{eV}$ ;对于GaAs, $1\text{eV}$ ;对于InP, $1.3\text{eV}$ ;对于Ge, $0.3\text{eV}$ ;对于InGaAs, $0.4\text{eV}$ ;对于InGaP, $1.4\text{eV}$ ;对于AlInP, $2.0\text{eV}$ ;对于AlInAs, $1.2\text{eV}$ ;对于InAs,小于 $0.1\text{eV}$ 。包括两个或更多个不同半导体的异构半导体具有与其成分相称的内置电位。

[0065] p-n二极管999可根据吸收系数来吸收光,所述吸收系数随制作p-n二极管的材料



而变。p-n二极管可吸收的光的总量随p-n二极管的吸收系数和厚度1006而变。

[0066] 图4示出图3的p-n二极管999的四个分段1012、1014、1016和1018。为了清楚,将图4的四个分段示出为间隔开的;然而,应理解,所述分段的厚度的总和等于图3处示出的厚度1006。

[0067] 图5示出通过连接元件1020、1022和1024彼此电连接的四个分段1012、1014、1016和1018。每一连接元件邻接(即,接触)所述四个分段中的两个。每一连接元件经配置以再每一连接元件连接(电连接)到的分段之间引入电位。连续内置电位 $V_{bi}$ 、 $V'_{bi}$ 、 $V''_{bi}$ 和 $V'''_{bi}$ 累加以引入等于 $V_{total}=V_{bi}+V'_{bi}+V''_{bi}+V'''_{bi}$ 的总内置电位。当所有的内置电位等于 $V_{bi}$ 时, $V_{total}=4*V_{bi}$ 。

[0068] 图6示出本发明的换能器的实施例,其中连接元件包括形成隧穿二极管1021、1023和1025的高度掺杂半导体。所属领域的技术人员将知晓一对高度掺杂层(包括邻近于高度掺杂p型层的高度掺杂n型层)可形成隧穿二极管,其在与其它半导体层组合时,可被称作隧穿二极管单元。所述隧穿二极管单元可用以将来自一个区段的电流传递到另一区段,和或改变异质结构中的半导体层序列的极性。n和p掺杂等级可为 $10^{18} \text{cm}^{-3}$ 或高于至多达 $5 \times 10^{21} \text{cm}^{-3}$ 。

[0069] 图3、4、5和6中的每一者具有一对垂直标度,其中的一者对应于能量,且另一者对应于电压。在图3、4、5和6中的每一者中,p-n二极管在发射极侧接收光,所述发射极侧在n掺杂区1001侧。

[0070] 图3、4、5和6示出平衡情形,其中不施加外部电压,且不存在光。实际上,换能器(光换能器)在具有冲击光的正向偏置模式下操作。所述领域的普通技术人员将理解,可引入针对电子和空穴两者的半费米等级的概念,来更好地微调和优化这些实用情境。然而,导致换能器的输出电压高于输入光电压( $h\nu/e$ )的基本原理是众所周知的,且在上文所述的这些图中说明。

[0071] 图7示出可用作图2中所示的连接元件c1 106、c2 108、c3 110和/或c4 112的连接元件或连接层300的实例;图7的连接元件300还可用作图5处所示的连接元件1020、1022和/或1024。下文关于图5的基极分段1014、1016和1018来描述连接元件300。连接元件300包括最接近于光换能器的前表面(最接近于图3处示出的n掺杂区1001)且经p掺杂的第一层302,像图4的基极元件1014、1016和1018那样。层302的带隙 $E_{g1}$ 大于基极元件1014、1016和1018的带隙能量,且由此层302对光学输入信号透明,所述光学输入信号具有接近带隙能量1004(见图3)的光子能量值的光子能量值。

[0072] 连接元件300进一步包括第二层304,其电连接到第一层302。第二层304也经p掺杂;然而,第二层304中的掺杂剂的浓度高于第一层302中的掺杂剂的浓度。第二层304的带隙 $E_{g2}$ 大于基极元件1014、1016和1018的带隙能量,且由此第二层304对光学输入信号透明。

[0073] 连接元件300进一步包括第三层306,其电连接到第二层304。第三层306以高浓度的掺杂剂n掺杂,第三层306中的掺杂剂的浓度类似于第二层304的掺杂剂的浓度。层306的带隙 $E_{g3}$ 大于基极元件1014、1016和1018的带隙能量,且由此第二层304对光学输入信号透明。

[0074] 连接元件300进一步包括第四层308,其电连接到第三层306,且经n掺杂,但优选具有低于第三层306的掺杂剂浓度的掺杂剂浓度。层308的带隙 $E_{g4}$ 大于基极元件1014、1016和

1018的带隙能量,且由此第二层304对光学输入信号透明。

[0075] 连接元件300进一步包括第五层310,其电连接到第四层308。第五层310以与第四层308类似或比第四层低的掺杂剂浓度来n掺杂。层310的带隙 $E_{g5}$ 与基极元件1014、1016和1018的带隙相同或大于所述带隙。

[0076] 可通过并入有若干半导体层(少于或高于图7中所说明和描述的层),且在不脱离本发明的范围的情况下,设计连接元件300的大量其它实施例。举例来说,图8示出其中代替于具有第二层304和第三层306,存在导体层312。下文进一步描述其它具体实例。可使用任何合适类型的掺杂剂,通过任何合适的技术来实现换能器的各种层的n型和p型掺杂。举例来说,对于InP、GaAs和相关化合物,可例如通过Si、Ge、Te、S、Sn原子来实现n型掺杂,且可通过例如Zn、C、Cd、Mg、Si、Ge、Cr和Be原子来实现p型掺杂。

[0077] 存在于根据本发明的换能器中的连接元件的数目将有助于确定换能器的输出电压:例如当图3元件的p-n二极管999的输出电压具有值X时,那么本发明的具有一个连接元件的换能器的输出电压将大约为2X,或设计有两个连接元件的本发明的换能器的输出电压将大约为3X,或设计有三个连接元件的本发明的换能器的输出电压将大约为4X,或如图2中所说明,设计有4个连接元件c1 106、c2 108、c3 110和c4 112的本发明的换能器的光电压将大约为5X。每一基极区段所产生的电压(光电压)的确切值可稍有不同。可例如归因于个别基极分段的不同厚度、归因于由不同厚度或掺杂简档产生的不同内置电场、归因于每一基极区段中的不同掺杂浓度、归因于从一个基极区段到另一基极区段的光子再吸收,或归因于其它生长或制造参数(例如各种分段的生长期间所使用的生长温度,或生长期间合金成分的轻微变化)而导致所述不同。举例来说,较薄的基极分段将通常产生较高光电压,归因于光载流子的较高提取概率。举例来说,以上或其它本征或外部效应可导致各种基极分段中的不同的有效理想性因子,或n因子。重要的是,本发明的换能器可轻易地得益于从此类较薄基极分段产生的较高光电压。这是与现有技术光换能器建构成不具有本文所揭示的多个基极分段和连接元件的情况相比的。在后一种情况下,将设计有具有较薄基极的p-n结的现有技术光换能器也将通常展现比具有较厚基极的等效p-n结高的光电压,但将具有较低的总性能,因为较薄基极将不能够吸收来自光学输入的所有光子。在本发明中,未在上部基极分段中吸收的输入光在下部基极分段中吸收,使得光学输入的大体上全部光子均被吸收。然而,因为每一个别基极区段比吸收所有入射光将必需的基极分段厚度薄,因此每一基极分段可产生比其较厚的情况下将产生的光电压稍高的光电压。

[0078] 如所属领域的技术人员将理解,所需的连接元件的数目可与根据本发明的换能器的所要输出电压相称。举例来说,如果X是例如图3中参考标号999处所示的p-n二极管(其不具有任何收集元件)的输出电压,那么 $Y = (n+1)X$ 将为具有n个连接元件的根据本发明的换能器的输出电压,其中n是具有任何合适值的整数。举例来说,n可介于1与20之间,或1与10之间,或1与5之间。也就是说,根据本发明换能器的输出电压是并为并入有任何连接元件的类似换能器的输出电压的倍数。对应地,可将根据本发明的光换能器的光电压称为输出光电压,其为未并入有连接元件的类似PV装置的光电压的谐波值,如图2中所说明且本文所描述。为了清楚起见,本发明的输出电压的谐波值或相乘因子由形成于换能器中的连接元件的数目确定。

[0079] 参考图1和2,为了实现本发明的光换能器的所要光电特性,图2的实施例中的连接

元件将换能器的基极18的厚度 $t$ 分成多个基极分段。举例来说,基极分段 $s_1$  130、基极分段 $s_2$  132、基极分段 $s_3$  134、基极分段 $s_4$  136和基极分段 $s_5$  138,如图2中所说明。各个基极分段( $s_1$ 、 $s_2$ 、 $s_3$ 、 $s_4$ 、 $s_5$ )的厚度可相同,或它们可通过调整连接元件的位置而不同。也就是说,可调整 $c_1$ 的位置 $d_1$ 、 $c_2$ 的位置 $d_2$ 、 $c_3$ 的位置 $d_3$ 和 $c_4$ 的位置 $d_4$ 来改变各种基极分段的厚度。可选择 $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$ 、 $d_4$ 的值,使得 $s_5$  138的厚度大于 $s_4$  136的厚度,且 $s_4$  136的厚度大于 $s_3$  134的厚度,且 $s_3$  134的厚度大于 $s_2$  132的厚度, $s_2$  132的厚度大于 $s_1$  130的厚度。

[0080] 可选择 $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$ 、 $d_4$ 的值,使得每一基极分段( $s_1$ 、 $s_2$ 、 $s_3$ 、 $s_4$ 、 $s_5$ )从光学输入100吸收大体上相同分数的光子。举例来说, $s_1$ 从光学输入吸收20%的光子, $s_2$ 从光学输入吸收20%的光子, $s_3$ 从光学输入吸收20%的光子, $s_4$ 从光学输入吸收20%的光子,且 $s_5$ 从光学输入吸收20%的光子。为了获得理想光换能器,在一起的所有基极分段从光学输入100吸收大体上全部光子。但出于制造或成本考量,且取决于光换能器的应用,可能希望所有基极分段一起从光学输入100吸收不到全部的光子。举例来说,各种基极分段 $s_1$ 、 $s_2$ 、 $s_3$ 、 $s_4$ 和 $s_5$ 可各自吸收光学输入100的19.8%。所属领域的技术人员还将清楚,基极18的厚度 $t$ 以及用以建构基极的半导体材料的吸收系数将是确定每一基极分段所吸收以及所有基极分段在一起的群组总共所吸收的光学输入信号的分数的因子。

[0081] 因此,对于最直接带隙III-V半导体,基极18的厚度 $t$ 将不超过5微米,且在一些实施例中,将介于3微米与4微米之间。举例来说,忽略换能器的表面处的反射,其为在前表面102处具有抗反射涂层的换能器的有效近似,在深度 $z$ 从半导体的表面发射的光强度通过下式给出: $I(z) = I_0 \exp(-\alpha z)$ 。 $I_0$ 是输入强度(例如图2中的光学输入信号100的初始强度),且 $\alpha$ 是半导体吸收系数,其随材料的波长相关态密度而变(即 $\alpha$ 是波长相关的)。对于足够厚的半导体材料,仅具有比半导体带隙等效波长长的波长(或具有小于带隙能量的能量)的光将发射通过半导体层,因为态密度像 $\alpha$ 那样,针对小于带隙能量的光子能量降低。对于直接带隙半导体,在短于带隙波长的波长下, $\alpha$ 在 $10^4 \text{cm}^{-1}$ 到 $10^5 \text{cm}^{-1}$ 的范围内,且每一冲击光子可形成一对光载流子;也就是说,电子和空穴。

[0082] 基础层18中的半导体可与衬底24大体上晶格匹配或假晶。不具有应变感应缺陷的外延层通常被称作假晶层。假晶异质结构可含有应变层,但仅达到以下程度:弹性变形能够容纳所述应变,使得装置中的过多应力或应变不产生缺陷。也就是说,用于基础层18或基极分段130、132、134、136和138的半导体的晶格常数优选与衬底24的晶格常数大体上相同。晶格匹配的层有助于确保良好的晶体质量、低缺陷密度、长少数载流子寿命、低寄生电流、低掺杂剂扩散、低合金扩散、低分流,以及因此较高的换能器性能。或者,基极层18可为变质的,且因此具有与衬底24不匹配的晶格。对于变质层,可使用缓冲物22来将半导体层的晶格参数从衬底24的晶格参数调整基极18的所要晶格常数值。对于变质层,缓冲物22的成分可递变,或包括具有不同晶格常数的各种层,以适应归因于不匹配的晶格的应力或应变。

[0083] 对于包括GaAs衬底24的实施例,可用于基础层18或基极分段130、132、134、136和138的晶格匹配或假晶半导体的实例包含:二元GaAs、AlAs或ZnSe;或三元 $\text{Al}_x \text{Ga}_{(1-x)} \text{As}$ 、 $\text{In}_x \text{Ga}_{(1-x)} \text{P}$ 、 $\text{Al}_x \text{Ga}_{(1-x)} \text{P}$ ;或四元InGaAsP、GaInNAs。如所属领域的技术人员将理解,还可使用其它合金,例如:第IV族半导体:Ge、SiGe;AlGaInNPAsSb的其它III-V合金;ZnCdMnMgOSSeTe的其它II-VI合金,或上述各项的组合。其它实施例可并入有纳米结构以增强光学特性、电子特性和/或材料特性。举例来说,基极18可包括半导体量子井、量子线或量子点的层。

[0084] 对于包括Ge衬底24的实施例,可用于基础层18或基极分段130、132、134、136和138的晶格匹配或假晶半导体的实例包含:晶格匹配的Ge、 $\text{In}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$ 、 $\text{InAlGaAs}$ 、 $\text{In}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{P}$ 、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{P}$ ;或二元GaAs、AlAs或ZnSe;或三元 $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$ ;或四元InGaAsP、GaInNAs。如所属领域的技术人员将理解,还可使用其它合金,例如:第IV族半导体:Ge、SiGe;AlGaInNPAsSb的其它III-V合金;ZnCdMnMgOSSeTe的其它II-VI合金。其它实施例可并入有纳米结构以增强光学特性、电子特性和/或材料特性。举例来说,基极18可包含半导体量子井、量子线或量子点的层。

[0085] 对于包括InP衬底24的实施例,可用于基础层18或基极分段130、132、134、136和138的晶格匹配或假晶半导体的实例包含:晶格匹配InP、 $\text{In}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$ 、 $\text{In}_x\text{Al}_{(1-x)}\text{As}$ 、 $\text{In}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{P}_y\text{As}_{(1-y)}$ 、 $\text{GaAs}_y\text{Sb}_{(1-y)}$ 、 $\text{Zn}_x\text{Cd}_{(1-x)}\text{Se}$ 、 $\text{ZnSe}_y\text{Te}_{(1-y)}$ ;或GaInNAs。如所属领域的技术人员将理解,还可单独或组合在一起使用其它合金,其包括:Ge、SiGe;AlGaInNPAsSb的其它III-V合金;ZnCdMnMgOSSeTe的其它II-VI合金。其它实施例可并入有纳米结构以增强光学特性、电子特性和/或材料特性。举例来说,基极18可包括半导体量子井、量子线或量子点的层。

[0086] 对于包括Si衬底24的实施例,可用于基础层18或基极分段130、132、134、136和138的晶格匹配或假晶半导体的实例包含:晶格匹配的Si、GaP、AlP、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{P}$ 、ZnS、GaPN、AlPN、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{PN}$ 。如所属领域的技术人员将理解,还可单独或组合在一起使用其它合金,其包括:Ge、SiGe;AlGaInNPAsSb的其它III-V合金;ZnCdMnMgOSSeTe的其它II-VI合金。其它实施例可并入有纳米结构以增强光学特性、电子特性和/或材料特性。举例来说,基极18可包括半导体量子井、量子线或量子点的层。

[0087] 对于包括GaN、SiC或蓝宝石衬底24的实施例,可用于基础层18或基极分段130、132、134、136和138的晶格匹配或假晶半导体的实例包含:晶格匹配的GaN,或AlInN。如所属领域的技术人员将理解,还可单独或组合在一起使用其它合金,其包括:ZnO,或AlGaInNPAsSb的其它III-V合金;ZnCdMnMgOSSeTe的其它II-VI合金。其它实施例可并入有纳米结构以增强光学特性、电子特性和/或材料特性。举例来说,基极18可包括半导体量子井、量子线或量子点的层。

[0088] 对于包括InAs或GaSb衬底24的实施例,可用于基础层18或基极分段130、132、134、136和138的晶格匹配或假晶半导体的实例包含:晶格匹配的InAs、GaSb、CdSe、AlSb、InPSb、ZnTe、CdSTe、CdSeTe、MnSeTe。如所属领域的技术人员将理解,还可单独或组合在一起使用其它合金,其包括:AlGaInNPAsSb的其它III-V合金;ZnCdMnMgOSSeTe的其它II-VI合金。其它实施例可并入有纳米结构以增强光学特性、电子特性和/或材料特性。举例来说,基极18可包括半导体量子井、量子线或量子点的层。

[0089] 对于包括CdTe或InSb衬底24的实施例,可用于基础层18或基极分段130、132、134、136和138的晶格匹配或假晶半导体的实例包含:晶格匹配的CdTe或InSb。如所属领域的技术人员将理解,还可单独或组合在一起使用其它合金,其包括:AlGaInNPAsSb的其它III-V合金;ZnCdMnMgOSSeTe的其它II-VI合金。其它实施例可并入有纳米结构以增强光学特性、电子特性和/或材料特性。举例来说,基极18可包括半导体量子井、量子线或量子点的层。

[0090] 图2示范其中GaAs或Ge用于衬底24的根据本发明的换能器的实施例。衬底是p型,以具有与也优选为p型的基极18相同的导电性。基础层18可为GaAs,或可包含某一分数x的

Al, 从而使用 $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$ 来根据光学输入100的波长优化光换能器的性能。基极层的厚度介于1与10微米之间, 或2与5微米之间, 或3与4微米之间。由p型GaInP组成的后表面场20为光学输入100在基极18中光产生的少数电子提供良好的少数载流子反射器。后表面场的厚度介于10nm与2微米之间, 或20nm与500nm之间, 或80与120nm之间。缓冲层22是任选的, 但可用以确保外延层表面和/或生长条件在光学活性层在衬底和缓冲层之上生长之前得以优化。缓冲层22可为p型GaAs或p型GaInP。缓冲物的厚度介于10nm与10微米之间, 或100nm与2000nm之间, 或200与500nm之间。发射极16可为n型GaAs, 或可包含某一分数x的Al, 从而使用n型 $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$ 来根据光学输入100的波长优化光换能器的性能。或者, n型GaInP也可用于发射极层16。发射极层16的厚度可介于10nm与1000nm之间, 或20nm与200nm之间, 或80与120nm之间。

[0091] 由n型GaInP或AlInP组成的钝化窗14(其还可被称作钝化窗, 或简称为窗层)为光学输入100在发射极16中光产生的少数空穴提供良好的少数载流子反射器。窗层可包括具有不同值的掺杂和带隙能量的若干层来优化光换能器的光电特性。窗层可邻近于并电接触发射极层和接触层。窗层还可在装置中扮演其它功能以改进晶体质量, 优化光子吸收和光载流子提取, 和/或将生长过程从一个层分段转变到另一层分段。还可增加窗层中的掺杂, 以最小化归因于从顶部结16的发射极以及进入所述发射极流动到顶部n型欧姆金属触点10的电流的电阻损耗。窗的厚度可介于10nm与5微米之间, 或20nm与2000nm之间, 或30与1000nm之间。窗层可对光学输入100透明。或者, 窗成分还可为具有Al成分x的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$ , 使得所述窗的带隙大于来自光学输入100的光子的能量, 且还大于发射极14的带隙。所述窗还可分成2个区段: 邻近于发射极的第一区段具有比邻近于前表面102和/或接触层12的第二区段低的带隙。举例来说, 所述窗的第一区段可由GaInP组成, 且第二区段可由AlInP组成。

[0092] 第一区段的厚度与窗的总厚度的比率可介于10%与90%之间。窗层也可为光换能器的制造工艺中的蚀刻停止件。举例来说, 可选择湿蚀刻解决方案来在含有某一浓度的Al或P的层上停止, 且层成分的设计可因此考虑此类元素, 这将促进制造工艺。

[0093] 接触层12可由n型GaAs组成。使接触层中的掺杂等级足够高, 以确保具有低电阻率的良好欧姆接触, 其中金属层10沉积在接触层12之上。接触层12的掺杂等级可介于 $5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 与 $5 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 之间, 或 $10^{18} \text{cm}^{-3}$ 与 $10^{19} \text{cm}^{-3}$ 之间。接触层12的厚度可介于100nm与5000nm之间, 或20nm与1000nm之间, 或30与500nm之间。

[0094] 图2中所示范且在本文中描述的实施例给出p上n配置的实例, 但所属领域的技术人员将认识到, n上p配置将给出等效特征, 且也在本发明的范围内。对于n上p配置来说, 掺杂类型是反向的, 例如基极18将为经掺杂n型, 且发射极将为经掺杂p型, 等等。

[0095] 基极层18或基极分段130、132、134、136和138的掺杂等级可介于 $5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 与 $10^{19} \text{cm}^{-3}$ 之间, 或 $5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 与 $8 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 之间, 或 $5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 与 $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 之间。发射极层16的掺杂等级可介于 $10^{16} \text{cm}^{-3}$ 与 $5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 之间, 或 $10^{17} \text{cm}^{-3}$ 与 $10^{19} \text{cm}^{-3}$ 之间, 或 $5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 与 $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 之间。窗层14的掺杂等级可介于 $10^{17} \text{cm}^{-3}$ 与 $10^{20} \text{cm}^{-3}$ 之间, 或 $5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 与 $5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 之间, 或 $10^{18} \text{cm}^{-3}$ 与 $10^{19} \text{cm}^{-3}$ 之间。后表面场层20的掺杂等级可介于 $10^{17} \text{cm}^{-3}$ 与 $10^{20} \text{cm}^{-3}$ 之间, 或 $5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 与 $5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 之间, 或 $10^{18} \text{cm}^{-3}$ 与 $10^{19} \text{cm}^{-3}$ 之间。

[0096] 如上文所提到, 连接元件将基极18分成多个基极分段, 其中的每一者可吸收大体

上相同分数的光学输入,且连接元件将邻近基极分段彼此电连接。连接元件可由金属层,或透明的导电氧化物层,或隧穿结层,或经掺杂半导体层制成。连接元件可包含半导体层,其与半导体基极层如何掺杂相反地掺杂。也就是说,当半导体基极层经p掺杂时,连接元件可包含经n掺杂的半导体层并且,当半导体基极层经n掺杂时,连接元件可包含经p掺杂的半导体层。各种基极分段可机械堆叠,且安置于连接元件之间,或在插入连接元件之间时,一者生长在另一者的顶部上。为了促进光学输入从一个基极分段到其它基极分段的发射,并且还为了促进制造工艺以及各种基极分段中的半导体材料的质量,使用连续外延工艺来生长所有的基极分段和连接元件可为有利的。针对如图7中所说明的连接元件使用不同带隙能量半导体材料也可为有益的。优化连接元件中所包含的各种半导体层的掺杂等级和掺杂类型以便促进电流流动,在存在连接元件的情况下优化光载流子(电子和空穴)提取,且允许各种基极分段的光电压和光电流连接也可为合意的。电流流动可包括多数载流子或少数载流子在换能器的价带或传导带内的流动、载流子从导电带到价带或从价带到导电带的隧穿、使用p-n结、缺陷、陷阱或迷你带辅助的载流子输送,或其它合适的电流流动的任何组合,将少数载流子转换成多数载流子。

[0097] 对于其中基极18为GaAs(例如如图2所示的p型GaAs)的实施例:层302可为GaInP、AlGaInP、AlAs或AlGaAs,其中选择成分来给出大于光学输入的光子的能量的带隙,且层302的p型掺杂等级可介于 $10^{17}\text{cm}^{-3}$ 与 $10^{20}\text{cm}^{-3}$ 之间,或 $5\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 与 $5\times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ 之间,或 $1\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 与 $10^{19}\text{cm}^{-3}$ 之间。层302的厚度可介于10nm与2微米之间,或20nm与500nm之间,或80nm与120nm之间。层304可由GaInP、AlGaAs、AlAs或AlInP组成,其中选择成分来给出大于光学输入的光子的能量的带隙能量,且层304的p型掺杂等级可介于 $10^{18}\text{cm}^{-3}$ 与 $10^{21}\text{cm}^{-3}$ 之间,或 $5\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 与 $5\times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ 之间,或 $7\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 与 $5\times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ 之间。层304的厚度可介于5nm与2微米之间,或10nm与500nm之间,或20nm与200nm之间。层306可由GaInP、AlGaAs、AlAs或AlInP组成,其中选择成分来给出大于光学输入的光子的能量的带隙能量,且层306的n型掺杂等级可介于 $10^{18}\text{cm}^{-3}$ 与 $10^{21}\text{cm}^{-3}$ 之间,或 $5\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 与 $5\times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ 之间,或 $7\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 与 $5\times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ 之间。层306的厚度可介于5nm与2微米之间,或10nm与500nm之间,或20与200nm之间。层308可由GaInP、AlGaAs组成,其中选择成分来给出大于光学输入的光子的能量的带隙 $E_{g4}$ ,且层308的n型掺杂等级可介于 $10^{17}\text{cm}^{-3}$ 与 $10^{20}\text{cm}^{-3}$ 之间,优选 $5\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 与 $5\times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ 之间,或 $10^{18}\text{cm}^{-3}$ 与 $10^{19}\text{cm}^{-3}$ 之间。层308的厚度可介于10nm与2微米之间,或20nm与500nm之间,或80nm与120nm之间。层310可包括GaAs、GaInP或AlGaAs,其中选择成分来给出等于或大于光学输入的光子的能量的带隙能量 $E_{g5}$ ,且层310的n型掺杂等级可介于 $10^{16}\text{cm}^{-3}$ 与 $5\times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ 之间,或 $10^{17}\text{cm}^{-3}$ 与 $10^{19}\text{cm}^{-3}$ 之间,或 $5\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 与 $5\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 之间。层310的厚度可介于10nm与1000nm之间,或20nm与200nm之间,或80nm与120nm之间。

[0098] 对于基极18为InP,或具有类似于InP中的一者的晶格常数的InGaAsP,或具有类似于InP中的一者的晶格常数的InGaAs,例如p型InP、p型InGaAs或p型InGaAsP的情况,层302可由InP、AlInAs、GaInAsP或AlGaInP组成,选择成分以给出大于光学输入的光子的能量的带隙 $E_{g1}$ ,且层302的p型掺杂等级介于 $10^{17}\text{cm}^{-3}$ 与 $10^{20}\text{cm}^{-3}$ 之间,或 $5\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 与 $5\times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ 之间,或 $10^{18}\text{cm}^{-3}$ 与 $10^{19}\text{cm}^{-3}$ 之间。层302的厚度可介于10nm与2微米之间,或20nm与500nm之间,或80nm与120nm之间。层304可由InP、AlInAs、GaInAsP或AlGaInP组成,选择其成分以给出大于光学输入的光子的能量的带隙能量 $E_{g2}$ ,且层304的p型掺杂等级可为介于 $10^{18}\text{cm}^{-3}$ 与

$10^{21}\text{cm}^{-3}$ 之间,或 $5\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 与 $5\times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ 之间,或 $7\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 与 $5\times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ 之间。层304的厚度可介于5nm与2微米之间,或10nm与500nm之间,或20nm与200nm之间。层306可由InP、AlInAs、GaInAsP或AlGaInP组成,选择其成分以给出大于光学输入的光子的能量的带隙能量 $E_{g3}$ ,且层306的n型掺杂等级可为介于 $10^{18}\text{cm}^{-3}$ 与 $10^{21}\text{cm}^{-3}$ 之间,或 $5\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 与 $5\times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ 之间,或 $7\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 与 $5\times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ 之间。层306的厚度可介于5nm与2微米之间,或10nm与500nm之间,或20nm与200nm之间。层308可由InP、AlInAs、GaInAsP或AlGaInP组成,选择其成分以给出大于光学输入的光子的能量的带隙能量 $E_{g4}$ ,且层308的n型掺杂等级可为介于 $10^{17}\text{cm}^{-3}$ 与 $10^{20}\text{cm}^{-3}$ 之间,或 $5\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 与 $5\times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ 之间,或 $10^{18}\text{cm}^{-3}$ 与 $10^{19}\text{cm}^{-3}$ 之间。层308的厚度可介于10nm与2微米之间,或20nm与500nm之间,或80nm与120nm之间。层310可由InGaAs、InP、AlInAs、GaInAsP或AlGaInP组成,其中选择成分来给出等于或大于光学输入的光子的能量的带隙能量 $E_{g5}$ ,且层310的n型掺杂等级可介于 $10^{16}\text{cm}^{-3}$ 与 $5\times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ 之间,或 $10^{17}\text{cm}^{-3}$ 与 $10^{19}\text{cm}^{-3}$ 之间,或 $5\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 与 $5\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 之间。层310的厚度可介于10nm与1000nm之间,或20nm与200nm之间,或80nm与120nm之间。

[0099] 如图7中所说明的连接元件300安置于如图2中所说明的基极18内,在距发射极特定距离处。如上文所提到,这些距离取决于光学输入100的波长且取决于基极材料18的吸收系数。所属领域的技术人员将认识到,存在可用以满足不同应用的光波长与基极材料的许多可能组合。为了示范本发明的实施例,下文的描述详述了使用具有830nm的波长的光学输入100的本发明的光换能器的连接元件的实例位置。选择基极层的半导体材料以具有小于光学输入100的光子的能量的带隙能量。带隙能量可介于500meV与0meV之间,小于光学输入100的光子的能量。在其它实施例中,带隙能量可介于200meV与10meV之间,小于光学输入100的光子的能量。但在其它实施例中,在半导体材料具有低于带隙能量的残余吸收的情况下,设计具有将稍大于光学输入100的光子的能量的带隙能量的光换能器可为合意的。对于830nm的波长,光子能量为1.494eV,因此可将基极半导体材料选择为优选GaAs,或 $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$ ,其中x介于0%与5%之间。如果选择p型GaAs基极,如图2中所说明,其中厚度 $120t=4$ 微米,那么在830nm的光学输入波长下,GaAs的吸收系数 $\alpha$ 大约为 $1.2\times 10^4\text{cm}^{-1}$ 。因此基于吸收率的公式 $I(z) = I_0 \exp(-\alpha z)$ ,计算以下将较简单:连接元件的位置的值 $d1=192\text{nm}$ 、 $d2=438\text{nm}$ 、 $d3=784\text{nm}$ 和 $d4=1365\text{nm}$ 将把基极分成5个分段, $s1$ 、 $s2$ 、 $s3$ 、 $s4$ 和 $s5$ ,各自吸收光学输入光的19.8%。

[0100] 可为发射极16选择具有大于光学输入的带隙能量的半导体材料,例如 $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$ (其中x介于10%与35%之间)或InGaP。或者,也可为发射极16选择GaAs,但接着必须将GaAs发射极层16的厚度的值从 $d1$ 到 $d5$ 的以上值中减去,因为光学输入100还将在发射极层16中吸收。类似地,对于此实施例的具有连接层 $c1$ 、 $c2$ 、 $c3$ 和 $c4$ 的 $E_{g5}$ 的层310,可为层310选择具有大于光学输入的带隙的半导体材料,例如 $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$ (其中x介于10%与35%之间)或InGaP。或者,也可为层310选择GaAs,但接着必须在 $d1$ 到 $d5$ 的以上值的计算中减去GaAs层310的厚度的值,因为光学输入100还将在层310中吸收。连接元件300的其它层302、304、306、308全部选自具有大于光学输入的带隙的一组半导体材料,例如 $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$ (其中x介于10%与100%之间)、InGaP或AlInP。除上文之外,可例如使用倾斜角沉积或PECVD等离子体技术来构造的渐变折射率非均质电介质也可本身提供良好的抗反射涂层,或可用作层堆叠的一部分。在所有上述内容中,在可使用多种反射算法来估计或计算的抗反射层的厚度,



但一般来说,层的厚度将为所关注波长的分数,即介于5nm与200nm之间,取决于设计和所使用的层数。

[0101] 如熟练的技术人员将理解,窗层14的暴露部分,或前表面102的接触层12已从其去除盖的部分(前表面102的光输入部分)可被由任何合适材料制成的抗反射涂层覆盖,例如 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Sb}_2\text{O}_5$ 、 $\text{Ta}_2\text{O}_5$ 、 $\text{SiN}_x$ 、 $\text{MgF}_2$ 、 $\text{ZnSe}$ 、 $\text{ZnS}$ 、氧化锆、二氧化锆或氧化铟锡,或这些层中的两个或更多个的任何其它合适组合,或类似电介质层,通常结合折射率的组合而选择,所述折射率趋向于通过在从光换能器窗14到用以将光学输入引导到光换能器且进一步保护其前表面102或其它敏感层的环绕介质(通常为空气)、包封介质、光束成形光学元件或上述各项的组合时,基本上提供折射率的渐进步长,来最小化所关注的波长范围内的反射。如熟练的技术人员将知道,根据上述电介质的选择组合低折射率和高折射率的双层通常提供良好的抗反射特性。举例来说,以下bi层中的一者可使用与上述电介质中的一些组合的 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2/\text{Sb}_2\text{O}_5$ 、 $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Sb}_2\text{O}_5$ 、 $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ 、 $\text{MgF}_2/\text{ZnSe}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ta}_2\text{O}_5$ 、 $\text{MgF}_2/\text{ZnS}$ 、 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ ,或氧化铟锡。

[0102] 图9示出如图2中所说明的换能器的实施例的结果,包括使用p型GaAs的基极18,厚度120为3.5微米,但基极18中不包括连接元件。针对25C的装置温度,在曲线410中标绘I-V测量的数据的实例。针对 $1366\text{W}/\text{m}^2$ 的照明强度获得I-V曲线410,其中实施例并入有GaAs衬底24、GaAs缓冲层22、GaInP后表面场20、n型GaAs发射极16、GaInP窗14、沉积在前表面102上的双层抗反射涂层,以及经图案化的接触层12和金属层10,以从光换能器提取光电流和光电压。在施加到衬底24的顶部金属10与金属触点之间进行I-V测量。使用二极管等式来模拟测得的I-V数据 $I(V) = I_{i11} - I_o[\exp(eV/nkT) - 1]$ ,其中I(V)是所施加电压V下的二极管电流, $I_{i11}$ 是来自照明的电流, $I_o$ 是光电二极管的饱和电流,V是所施加电压,n为光电二极管理想性因子(其还可被称作n因子),k为玻尔兹曼常数,且T为温度(此处为25°C)。可从在此GaAs光换能器上获得的测得数据提取二极管参数。这些二极管参数接着可用来模拟并入有连接元件的实施例的光换能器,但原本基于使用相同类型的材料以及装置生长和制造条件。举例来说,图9中的曲线412示出当使用饱和电流 $I_o \sim 8.8\text{E}-12\text{mA}/\text{cm}^2$ ,和n因子 $\sim 1.45$ 时,模型很好地拟合实验数据。这些二极管参数产生图4的曲线412或410: $V_{oc} \sim 1.03\text{V}$ , $\text{FF} \sim 84.6\%$ 。

[0103] 接着将从图9提取的装置参数应用于模拟如图2所描绘且在本文中描述的并入有4个连接元件的光换能器,且在各种条件下预测所述光换能器的性能。举例来说,图10示出并入有5个GaAs基极分段s1、s2、s3、s4和s5的厚度 $t \sim 4.0$ 微米的基极18的光换能器的此I-V曲线,所述GaAs基极分段各自将吸收以830nm的波长冲击前表面102的光学输入100的19.8%。上文已描述了此实施例的各种层的具体要求。针对1瓦/ $\text{cm}^2$ 的光学输入,针对在830nm下具有97%的量子效率的光换能器,产生图10的I-V曲线510。I-V曲线510在曲线512的膝部附近具有其最大电力点,且I-V的分析得出以下性能度量: $V_{oc} \sim 5.632\text{V}$ 、 $I_{sc} \sim 130\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $\text{FF} \sim 86.1\%$ 、 $\text{FF}_v \sim 89.2\%$ 、 $\text{FF}_i \sim 96.6\%$ 、 $V_{max} \sim 5.022\text{V}$ 、 $I_{max} \sim 125.4\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $P_{max} \sim 630\text{mW}/\text{cm}^2$ ,以及具有 $\text{Eff} \sim 63\%$ 的转换效率。

[0104] 关于图2和图7而呈现和描述的实施例中的所描述的各种半导体层的沉积或生长可通过任何合适半导体生长方法来进行,例如:金属有机化学气相沉积(MOCVD)、化学束外延法(CBE)、分子束外延法(MBE)、固相外延法(SPE)、氢化物气相外延法或通过其它类似的混合系统或其组合。可针对实施例的各个层来优化生长参数,例如以最大化装置性能或其



可制造性。可优化生长参数和生长条件,包含(例如)生长温度、用以生长所述层的各种气体的压力、那些压力的比率(例如当生长III-V半导体层时的III/V比率)、合金成分、残余应变、生长率、各种层的掺杂或共掺杂、界面活性剂气体的使用、退火循环的使用等。

[0105] 此类层的外延可在每轮使用单个晶片或多个晶片的过程中进行。每一晶片的直径可介于25mm与450mm之间,取决于所使用的衬底的类型以及其商业可获得性。衬底的切割角度,也可被称作衬底的失调角,还可影响层的生长条件和质量,且因此可经调整来优化装置性能。举例来说,生长可在(100)、(110)或其它表面上进行,且朝各种结晶平面的切割角度可结合在0度与40度之间变化的角度一起使用。使用上述外延技术生长的半导体层的厚度、成分和掺杂的典型精度和对其的控制通常充分在规范的可容许变化内,以实现如本发明中所描述的所要实施例。

[0106] 此外,可通过例如图2中所示的层的排列的探测、后生长、光学特性、电子特性或这两者,来确定各种实施例的层的质量,以及包含在这些层中的半导体材料的质量。这可通过测量如本发明中所描述的光电流(PC)或光电压(PV)的光学光谱响应(量子效率)、光致发光(PL)、电致发光(EL)、时间分辨光致发光(TRPL)、时间分辨光电流(TRPC)、电子束感应电流(EBIC)量测值或其它表征技术或所属领域的技术人员已知的其它技术来实现。可在校准或验证生长回合,或在整个异质结构上,或在包含在光换能器内的层中的一些上,或对于完成的装置(包含图7的连接层)执行表征。可使用此类技术来确定少数载体寿命、层的厚度、层的光学路径,以及与装置性能相关的其它光电特性。此类技术还可用以揭示和/或评定例如光换能器性能对连接层的数目(c1、c2、c3、c4等)和那些连接层的位置(d1、d2、d3、d4等)的相依性。此外,举例来说,图2的换能器的反射高能电子衍射(RHEED)和光反射系数还可用以在图2或图7的层的生长期间或之后,获得各种层的表面粗糙度和形态信息。此类原位技术和其它光学技术可用以在其进行时产生关于层的光学特性和/或关于形态的实时反馈,且可用以确定层的质量。举例来说,所述原位技术包含在图2的排列的外延生长期间光子(光)或电子束的反射。这些技术还可提供半导体晶片的曲率的测量结果,以评估在外延生长期间是否发生任何应变堆积或应变松弛事件。可依据原位监视来调适生长条件/参数,以补偿在生长期间观察到的任何非所要效应。举例来说,可通过使用具有与将用于所关注的应用的输入100类似的波长的探测束监视光束的反射,来执行光学探测。或者,可使用考虑半导体层在外延期间的生长温度下的不同折射率的波长来进行光学探测。接着可在生长期间调整各种层的目标参数,以针对如使用此类原位技术监视的各种分段(s1、s2、s3、s4等)的厚度,实现所要的目标值。

[0107] 图11示出当光学输入的波长从最佳设计值变化时,根据本发明的光换能器的预期性能变化。图11的曲线图610显示,对于各种光学输入波长,如图2中所说明并描述的具有四个连接元件的光换能器的相对性能。图11的光换能器是为830nm的光学输入波长而设计的。曲线图610显示830nm的光学输入波长下的性能最大值612。在远离目标830nm的光学输入波长下,相对性能稍微减小,但在光学输入波长改变为~800nm的情况下,仍超过最佳性能的80%,且在光学输入波长改变为~850nm的情况下,仍超过90%。

[0108] 图12示出当基极层分段的厚度从最佳设计值变化时,根据本发明的光换能器的预期性能变化。此类厚度变化例如可根据晶片的不同区中的变化,或根据相同生长内的晶片之间的变化,或从晶片生长到晶片生长而发生。图12的曲线图710示出随相对厚度误差而变

的如图2中所说明并描述的具有四个连接元件的光换能器的相对性能。曲线图710示出零厚度误差下的性能最大值712(即,如上述实施例中所描述的最佳设计参数)。随着厚度误差在最佳值的两侧(即较薄层或较厚层)上增加,相对性能稍微减小,但在厚度的量值达到15%的情况下,仍超过最佳性能的80%。通常可将生产外延电抗器控制到比 $\pm 15\%$ 好得多的值,且通常充分在仅百分之几内。

[0109] 图13示出随如图2中所说明和描述的具有四个连接元件的光换能器的光学输入100的功率而变的光换能器转换效率。曲线图810示出增加来增大光学输入的功率的非线性相依性。在100mW输入处,效率为 $Eff \sim 58\%$ ,且在约2W的光学输入下,增加到 $Eff \sim 64.5\%$ 。

[0110] 如图14处所示,图13中观察到的性能随着光学输入功率增加的增加主要来源于光电压随光学输入功率增加的增加。举例来说,图14标绘随如图2中所说明和描述的具有四个连接元件的光换能器的光学输入100的功率而变的光换能器 $V_{oc}$ 。类似于图13,曲线图910示出非线性相依性,其增加以增大光学输入的功率。在100mW输入处,开路电压为 $V_{oc} \sim 5.22V$ ,且在约2W的光学输入下,增加到 $V_{oc} \sim 5.76V$ 。

[0111] 上述实施例示范对应于用如所测量且不一定优化的GaAs获得的值的材料参数的主要性能参数和光换能器特性。所属领域的技术人员将认识到,可通过装置开发和制造工艺,且结合某一设计参数的进一步优化,来进一步优化性能。举例来说,各种基极分段的理想性因子可从材料质量和各种设计方面来优化。后者可导致 $V_{oc}$ 的较高值。此外,少数载体寿命的优化也将改进 $V_{oc}$ 值。类似地,可通过确保层设计对高效电流提取有利,且薄层电阻、接触电阻和其它串联电阻得以最小化,来优化FF。用于各种层中的不同半导体的带隙能量的优化将有助于最小化来自半导体所吸收的光学输入的光子的热化损失。

[0112] 本发明的光换能器可在含有作用中p-n(或n-p)结的衬底上实现,所述p-n(或n-p)结能够检测可处于不同波长的光学输入中的光子。也就是说,光学输入100可具有两个来源,第一光功率源,其将由基极分段转换,如上述实施例中所描述,以及同时次要光学信号,其将由建构在衬底层24内的p-n结检测。此实施例的单块集成光换能器可用于同时发射数据信号和光功率的应用的实例。举例来说,实施例可包括GaAs基极层18,其具有如图2中所说明的连接元件,以产生光换能器,且实施例可进一步包括Ge衬底,其包含p-n结。可通过III-V层在Ge衬底上的生长期间的扩散,例如通过扩散第V族原子以将n型发射极形成到构成基极的p型Ge衬底中,来获得Ge p-n结。第一光功率源的波长优选具有介于500nm与880nm之间,或750nm与880nm之间的波长。次要光学信号的波长具有介于1250nm与1700nm之间,或1300nm与1650nm之间的波长。形成于Ge衬底中的p-n结在与前表面相对的侧邻近于光换能器。为了优化GaAs基极层18的材料质量,在此实施例中,可并入小部分的约1.1%铟(即 $In_xGa_{(1-x)}As$ ,其中 $x \sim 1.1\%$ ),以确保生长在衬底上的基极分段和其它层保持与Ge晶格常数晶格匹配。在此类实施例中,换能器通过第一组电接点电连接到换能器电路,且Ge p-n结电连接到数据处理电路,以处理在Ge p-n结处检测到的数据信号。

[0113] 图21示出在光学输入中接收处于第一波长(第一能量)的光功率和处于另一波长(能量)的数据信号。的换能器和数据接收器单元的实施例。在包括半导体发射极层16的换能器部分,且在半导体基极层130、132、134、136和138的基极18处,检测光功率。在p-n结3000处检测数据信号,所述p-n结形成于Ge衬底24中。

[0114] 本发明的换能器中所产生的光载流子(电子和空穴)由电触点收集。在发射极是n

型半导体的实施例中,电子到达发射极,且接着在到达金属电触点之前,横向流经发射极层。在发射极是p型半导体的另一实施例中,空穴到达发射极,且接着横向流到金属电触点。在两种情况下,可在 $5 \times 10^{18}$ 到 $2 \times 10^{20}$ 的范围内掺杂发射极,以便最小化电阻损耗。然而,以过高浓度掺杂可减小载流子迁移率,且因此减少层导电性以及少数载体寿命;可作出这种来优化换能器的总性能。另外,可为有利的是,金属电触点在本质上为欧姆的,具有 $1 \times 10^{-5} \text{ohm-cm}^2$ 或低于此的每平方低电阻。

[0115] 在光换能器的照明区域较大,且载流子必须行进较长的横向距离到电触点的情况下,通常从几百微米或更多,和/或产生大电流的情况下,来自流经发射极层的电流的电阻损耗可为显著的。在这些情况下,惯例是使用具有设计成减少载流子所行进的横向距离且最小化发射极电阻的金属网格线模式的金属电触点。现有技术网格线的宽度通常介于一微米与15微米之间,且隔开50微米或更多,取决于针对具体应用所产生的电流密度。另一方面,网格线将阻挡(遮蔽)入射光中的一些,从而减少总电流且降低换能器的效率。本设计优化因此需要发射极掺杂等级、网格线模式和金属触点之间的仔细平衡。

[0116] 网格线的替代方案是在发射极层上或窗层上形成透明导电膜(TCF)。入射光可接着自由传播通过TCF,且在下面产生并行进到发射极中的载流子可利用透明电极作为到达金属触点的并行路径。此实施例将入射光的阴影从网格线消除,且有助于最小化横向电阻。TCF,其为透明电极,可由以下材料组成:氧化铟锡或ITO;氟掺杂氧化锡或FTO;氧化锌或ZnO;铝掺杂氧化锌或AZO;铟掺杂氧化镉;金属氧化物的二元化合物;使用碳纳米管和石墨薄膜的有机膜;聚合物,例如聚乙炔、聚苯胺、聚吡咯、聚噻吩;以及聚(3,4-伸乙二氧基噻吩)及其衍生物。

[0117] 在其它实施例中,透明电极可由高度掺杂的半导体材料组成,掺杂通常介于 $10^{18}$ 到 $10^{20} \text{cm}^{-3}$ 之间,且带隙高于入射光的光子能量,以允许完成入射光的发射。在这些实施例中,半导体材料可包含III-V或II-VI化合物半导体材料,包括但不限于针对图1和2的钝化窗14较早所列的相同材料。

[0118] 图15示出包括彼此分离325微米的距离的网格线2002的本发明的换能器2000的俯视图。图16示出包括彼此分离425微米的距离的网格线2006的本发明的换能器2004的俯视图。图17示出无网格线但包括TCF 2010的本发明的换能器2008的俯视图。

[0119] 图18示出图15、16和17的换能器2000、2002和2004的平均短路电流( $I_{sc}$ )。图19示出图15、16和17的换能器2000、2002和2004的填充因子(FF)数据。使用具有中心在850nm周围(大体上在850nm处)的波长的入射光束来获取数据。所有装置具有由掺杂到 $10^{18} \text{cm}^{-3}$ 的掺杂等级的InGaP组成的透明电极,且具有五个基极分段。图18为无网格换能器2008的稍高的 $I_{sc}$ ,其正如期望。图19示出对于所有的换能器2000、2004和2008,FF大体上相同。FF直接受电路中任何串联电阻的存在影响,包含发射极和金属触点的存在。在不存在透明导电InGaP电极的情况下,图19的FF的值对于换能器2008将较低。

[0120] 本发明的换能器相对于光学输入功率具有电压和电流中的界限分明且宽动态范围响应。电流和 $I_{sc}$ 对输入光功率具有线性相依性,且 $V_{oc}$ 具有对数响应。本发明的换能器可因此在其中需要监视单色光的高度聚焦束的强度的应用中使用。应用的实例可包含来自LED或其它单色光源的持续波(CW)和脉冲激光束和聚焦的光。当需要准确的功率监视和测量结果时,不具有网格线的设计的使用特别有用。这是因为聚焦的光束可具有与网格线的

宽度和间距相当的光束直径或点大小,从而在光束落在网格线上或之间的情况下,因为遮蔽而引入相当大的误差。此外,对于使用具有受限功率等级的发光二极管的现有技术来说,高功率密度光束可能是成问题的。这些将通常需要使用额外的大体积分束器和衰减器,其还对大功率密度敏感,以中止和衰减光束到监视器的入射功率。

[0121] 在本发明的光换能器用作功率计装置的应用中,光换能器可配备有紧凑电压读出电路,以将测得的光换能器 $V_{oc}$ 与含有 $V_{oc}$ 与输入光功率之间的关系的校准表进行比较。举例来说,后者数据可存储在存储器中,且可使用可编程逻辑电路来例如在显示器上输出检测到的功率。所存储的信息可含有如先前图中所说明的各种输入波长的光电压响应数据。图20中说明给定波长(此处830nm)的数据,其中曲线1010示出 $V_{oc}$ 与输入光功率之间的经过校准的关系,垂直线1020是可用光换能器检测到的测得 $V_{oc}$ 的实例,且越过曲线1010和线1020的相交点的水平线1030是对应的检测到的功率,此处针对图20以瓦来表达。

[0122] 如所属领域的技术人员将清楚,使用本发明的光换能器作为激光功率计存在若干益处。所述益处不限于但包含以下:如上文所提到,光学输入表面可设计成不具有任何金属网格线。金属网格线可吸收和散射激光,从而导致量测结果中的误差,可能增加安全风险,且在变为被金属网格线吸收的大功率输入激光的情况下,可能导致功率计敏感区域的灾难性故障。避免网格线因此是有利的。此外,归因于其基于设计有多个基极分段的单块堆叠的构造,本发明的响应光换能器对位置不敏感。也就是说激光可冲击光学输入区域上的不同位置,而不显著影响检测到的功率。此外,归因于本发明的光换能器的非常高的光到电转换效率,较少浪费的能量将被置于此类功率计的光学作用中检测头部中,从而降低输入光源损坏所述装置的风险。

[0123] 所属领域的技术人员还将清楚,在不脱离本发明的范围的情况下,利用本发明的光换能器的此类功率计可在断路模式( $V_{oc}$ 模式)下、短路模式( $I_{sc}$ 模式)下、最大电力点模式或最大电压功率的电压( $V_{mp}$ 模式)下,或在光换能器的操作I-V曲线上的其它位置处操作。如熟练的技术人员将理解,在最大转换效率点附近( $V_{mp}$ 附近)操作所述装置以将尽可能多的输入光功率转换成电力可为有利的。经转换电力将避免抽空过热加载的需要,且从光学输入转换成电力的光功率可存储在例如可充电电池中。所存储的电力接着可用以运行功率计的电子电路。后者配置可为有利的,以减少或避免对将功率计单元再充电到外部。来源(例如壁式插座)或将可充电电池插入到外部来源(例如壁式插座)中的需要举例来说,不需要测量除光源(例如激光源)外的外部电源的紧凑手持式功率计可建构有本发明的光换能器,其简单地配备有可再充电电池、显示器以及读出和逻辑电路,以将测得的数据转换成所显示的读数。显示器可为数字液晶显示器或模拟拨号盘。如果激光功率足够高,那么这样建构的功率计可直接从待测量的来源拖曳其功率。在需要测量小激光功率的情况下,可从电力源或光功率源,来在外部再充电所述功率计。图22示出包括本发明的换能器4002的此类功率计4000、接收来自换能器4002的电输出(例如换能器4002的输出电压)的读出电路4004,操作地连接到读出电路4004的处理器4006的实例。处理器4006经配置以将电信号提供到充电电路4008,其为电池4010充电。显示器4012操作地连接到处理器4006;显示器可示出换能器4002经受的光功率的值。

[0124] 在其它实施例中,本发明提供一种紧凑手持式功率计,除待测量的激光源外,不需要外部电源。所讨论的功率计可包括本发明的光换能器,其配备有可再充电电池以及读出

和逻辑电路,所述读出和逻辑电路经配置以获得数据,且将数据无线提供到配备有用以在移动装置上读取和显示所述数据的软件的移动装置。

[0125] 一般来说,且在本发明的上下文中,当两个组件中的一者所导致或影响一者的电变化(例如电压或电流的变化)可导致另一者中的电变化时,或当一者所发送的电信号可由另一者接收时,两个组件“电连接”。所述两个组件无需直接电连接(也就是说,可存在插入于其之间的其它元件)。

[0126] 揭示至少一个实施例,且所属领域的技术人员所进行的对实施例和/或实施例的特征的变化、组合和/或修改在本发明的范围内。由组合、集成和/或省略一个或多个实施例的特征产生的替代实施例也在本发明的范围内。在明确地规定数字范围或限制的情况下,此类表达范围或限制可理解为包含落入明确地陈述的范围或限制内的相同量值的迭代范围或限制(例如,从约1至约10包含2、3、4等;大于0.10包含0.11、0.12、0.13等)。举例来说,每当揭示具有下限和上限的数值范围时,具体揭示落入所述范围内的任何数字。另外,术语“大体上”的使用表示参考值的 $\pm 10\%$ ,除非另行说明。举例来说,词组:“电压A与电压B大体上相同”意味着电压A在电压B的 $\pm 10\%$ 内。

[0127] 图2处示出的换能器的实施例是以外延方式制造的,且具有单块垂直架构,其包括具有不同成分的半导体材料的部分。由此,这种类型的换能器架构可被称作垂直外延异质结构架构(VEHSA)。如熟练的技术人员将理解,半导体化合物材料的成分将至少部分地决定给定半导体化合物的带隙能量,且制造半导体化合物以获得目标带隙能量在本领域中是众所周知的。

[0128] 对于一些实施例,本发明人已发现,制造此类VEHSA换能器(其组成半导体材料的带隙能量稍大于用以操作换能器的光学光源的光子的能量)使换能器能够具有高效的光到电转换效率。此类实施例可被称作子带隙光换能器或子隙光换能器。另外,本发明人已发现,在给定具有设定带隙能量的VEHSA光换能器的情况下,选择具有小于带隙能量的光子能量的光学光源可导致高效的光到电转换效率。

[0129] 本发明人也已发现,制造其组成半导体材料的带隙能量稍小于用以操作换能器的光学光源的光子的能量的此类VEHSA换能器使所述换能器与其它异构设计或材料配置相比,能够具有改进的光到电转换效率。

[0130] 本发明人已经以实验方式发现,用具有在等于VEHSA换能器的带隙能量的小能量差内的光子能量的光来照明VEHSA换能器产生光子到电子的最佳转换效率。在一些情况下,小能量差约为VEHSA换能器材料的声子能量。也就是说,本发明人已发现,VEHSA换能器也可在基于各种子隙吸收现象和其它线性或非线性效应(下文描述其中的一些)来转换传入光子能量时是有效的,且在一些情况下,比通常进行的那样更有效,通常转换具有大于其它装置配置中的带隙能量的光子能量的光,或甚至在一些情况下,用具有大于带隙能量的光子能量来操作VEHSA换能器。

[0131] 如下文将描述,当(光束的)光子能量小于所讨论的换能器的带隙能量时,本发明的VEHSA换能器的实施例具有较大的光到电转换效率。较高的效率允许光源以比针对具有小于光子能量的带隙能量的换能器通常将用的电力低的电力来操作。有利的是,以较低电力运行光源增加了其有用寿命。

[0132] 另外,对于由典型半导体材料(例如GaAs,但也可能是InP、InGaAs、AlGaAs、GaInP、

GaInAsP、Si、Ge、InAs、InSb、AlSb,或此类合金的组合,其例如在GaAs的情况下,具有1.42eV的带隙能量)制成的换能器,具有小于带隙能量的光子能量的光源制造起来可通常比具有大于带隙能量的光子能量的光源便宜,特别是例如针对GaAs的情况。

[0133] 此外,以低于带隙能量的光子能量来操作换能器允许换能器的运行温度低于它们在以大于带隙能量的光子能量操作时的运行温度。这可延长换能器的寿命。这可例如因为以下情况而发生,当在这些条件下操作所述装置时,存在光激发载流子的较少热化能量,且因此存在较少耗散的热量。

[0134] 如下文将描述,当(光束的)光子能量在一些情况下小于所讨论的换能器的带隙能量时,本发明的换能器的实施例展现较大的光到电转换效率。这允许光源在比它们通常针对具有小于光子能量的带隙能量的换能器将处于的电力低的电力下操作。有利的是,以较低电力运行光源增加了其长久性。

[0135] 图23示出半导体材料的价带5000和导电带5002的实例,其中图中的垂直方向表示半导体内的带电载流子的能量。所属领域的一般技术人员因此将理解,导电带5002与价带5000之间的能量差异通常被称作半导体材料的禁隙、能隙或带隙,其具有由 $E_{\text{gap}}$ 或 $E_g$ 表示的值,其为半导体材料的特征特性。对于 $E_{\text{gap}}$ 的值,可通过关系 $\lambda_{\text{threshold}} = hc/E_g$ 将阈值波长关联到带隙能量,其中 $c$ 为光速,且 $h$ 为普朗克常数。一般来说,且如熟练的技术人员将容易理解,对于比阈值波长长的光波长 $\lambda_{\text{input}}$ , $\lambda_{\text{input}} > \lambda_{\text{threshold}}$ ,吸收较弱。

[0136] 图23还示出价带5000附近的能级5004以及导电带5002附近的能级5006。这些能级5004和5006在禁隙内,即在价带5000与导电带5002之间,且可具有不同的状态密度,取决于能级5004和5006在所述隙内的起点。导电带5006附近的能级,例如能级5006可与半导体材料(半导体合金)中的供体杂质有关,且通常被称作供体级。类似地,价带5000附近的能级5004可与半导体材料中的受体杂质有关,且通常被称作受体级。含有纳米结构(例如量子井、量子线或量子点)的半导体异质结构中的量子效应也可在所述能隙内有效地产生类似的离散级和有限状态密度。

[0137] 禁隙内的此类能级可引起归因于子隙转变的吸收。举例来说,图23示出受体能级5004中的载体(电荷载流子)5008。由受体能级5004与供体能级5006之间的向上箭头5010描绘的具有等于或大于受体能级5004与供体能级5006之间的转变能量的能量的传入光子可在此光载流子激励过程中吸收。类似地,图23示出价带5000到供体能级5006转变5012,以及受体能级5004到导电带5002转变5014。存在可参与子隙光子吸收的各种转变。异质结构内的动量空间中的间接转变在低于带隙的能量下也可引起吸收。

[0138] 子隙光子吸收的另一实例关联到乌尔巴赫(Urbach)能量尾部。作为乌尔巴赫尾部的情况,子隙吸收中的一些可取决于半导体材料的温度和/或照明换能器的光束的强度。

[0139] 当吸收随输入光束的强度大体上线性变化时,效应被称为线性的,但当吸收非线性变化时,那么在装置特性和性能中可出现非线性效应。当吸收在较高强度下饱和时,可存在吸收饱和或漂白效应。在其它情况下,吸收可随着导致性能随输入强度的非线性增加的输入光束强度而增加。

[0140] 这可例如在参与转变的等级(例如杂质状态等级)的状态密度以及光学输入束强度使得可通过光学抽吸来实现一些等级的相当大的填充或耗乏时发生。光学抽吸可间接通过从照明装置(光学换能器)产生的二极管结构的有效电正向偏置。举例来说,大多数装置

具有不透明金属触点,从而防止装置的某一区域中的金属下的显著照明,因此通过照明装置的非金属化区域,金属化区域变为有效地正向偏置。在正向偏置中,二极管将通常产生电致发光或可能激光发射。当存在激光转变或受激发射时,或当通过电或光学抽吸实现粒子数反转时,也可发生等级饱和度和非线性效应。

[0141] 也可在多个步骤中实现子带隙吸收。举例来说,在图23中,示出两步法(转变)涉及第一步长5015和第二步长5016。存在许多可能组合:第一步长5015可小于第二步长5016,或反之亦然。第一步长和第二步长可同时,或在不同时间,经由虚拟状态,或经由真实状态(例如状态5004)全体而发生。但在所有情况下,如果相加在一起的多个步骤具有等于或大于半导体的能隙的能量,那么可通过此类多步骤过程,来将载流子从价带5000推动到导电带5002。此处,将步骤5015描绘为具有比步长5016小的能量(例如光子吸收转变),且可表示从价带5000和对应声子能量的声子转变。举例来说,横向光学(TO)、纵向光学(LO)、横向声学(TA)和纵向声学(LA)声子可参与补充具有子带隙能量的输入光子能量5016(即,比对应于关联到带隙能量的阈值波长的波长长的波长,  $\lambda_{\text{input}} > hc/E_g$ )。

[0142] 对于一些半导体化合物,单声子能量可介于~0meV与75meV之间。虽然一般来说对于处于低强度、处于较高输入强度,且处于有限温度(例如室温)的大多数半导体,子隙吸收通常较低,但可预期,此类子隙吸收效应将变得更高效。这是因为中间状态的粒子数积聚的概率增加,或声子或多声子交互或多载波交互(例如欧杰(Auger)散射)的散射速率在这些条件下通常较高。

[0143] 此外,在半导体材料中,能隙随着温度而减小。温度的改变将改变光学输入(例如,5016)与可用能量转变5010、5012、5014、 $E_{\text{gap}}$ 等之间的能量差。因此,输入光束的能量的未通过光换能器转换成电的部分以热量的形式耗散,这可增加半导体的温度,且使其带隙偏移成更接近阈值,以通过带间转变或通过子带隙吸收效应(如图23所描绘)来吸收输入波长。

[0144] 考虑到上文所述的效应,可修改VEHSA光换能器的组成,以优化相对于效率的子隙性能。优化可尤其基于所关注的应用程序的所要波长的吸收特性。并且,针对其它带间吸收下的操作而优化的实施例(例如对于基于GaAs的装置,在800nm与880nm之间的波长范围)也可用于子带吸收。性能可取决于VEHSA光换能器配置和操作条件。举例来说,图23可应用于GaAs VEHSA光换能器,其用于针对转变5016所表示的光学输入,介于880nm与1000nm之间且优选介于910与930nm之间的波长范围的子隙吸收。对于此实施例,可将基极半导体材料选择为优选GaAs,或 $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$ ,其中x介于0%与5%之间。对于p型GaAs基极,如图2中所说明,其中可选择厚度(120)  $t=4$ 微米,基极分段值 $d_1=192\text{nm}$ 、 $d_2=438\text{nm}$ 、 $d_3=784\text{nm}$ 和 $d_4=1365\text{nm}$ ,以将基极分成5个分段,s1、s2、s3、s4和s5。对于图24(曲线图5026)以及图25A和25B(曲线图5030)中所示的结果,VEHSA结构的基极可分成不同数目个分段,例如8个分段。基极分段的数目优选介于1与100之间。然而,在不脱离本发明的范围的情况下,可存在任何数目的分段。

[0145] 可通过计算或通过测量不同波长下以及不同值的输入光束强度下子隙吸收的量,来优化子隙VEHSA装置的基极分段的厚度。独立地测量不同厚度的p/n结来量子隙吸收可为优选的。举例来说,图24示出从不同厚度的单GaAs p/n结测得的短路电流的输入功率相依性。在低光学输入功率(例如针对小于1W的 $P_{\text{in}}$ ),对于图24中所示的所有不同p/n结厚度,短路电流非常低。然而,随着输入功率增加,短路电流首先增加,且接着趋向于饱和。举例来



说,在图24中,对于大于3W的输入功率,各种厚度的p/n结全部产生大约1A的短路电流。曲线图5018是针对具有2636nm的厚度的GaAs p/n结;曲线图5020是针对具有581nm的厚度的GaAs p/n结;曲线图5022是针对具有346nm的厚度的GaAs p/n结;曲线图5024是针对具有192nm的厚度的GaAs p/n结;以及曲线图5026是针对具有8个基极分段的GaAs VEHS A结构,所述基极分段总共具有4500nm的总厚度,且其最薄的基极分段具有126nm的厚度。

[0146] 由于具有各种厚度的p/n结趋向于在高强度的子隙激发下产生相当的光电流值,因此本发明人已发现,在这些条件下,基于VEHSA设计来操作光换能器装置可为有利的。这通过将子隙光到电转换效率标绘为光学输入功率的函数来清楚地表明。这在图25A中针对以909nm的低隙光功率激发的基于GaAs的装置而示出。在图25A中,曲线图5028是针对具有2636nm的厚度的GaAs p/n结;曲线图5030是针对具有8基极分段的GaAs VEHS A结构,所述基极分段总共具有4500nm的总厚度,且其最薄的基极分段具有126nm的厚度;曲线图5032是针对具有581nm的厚度的GaAs p/n结;曲线图5034是针对具有346nm的厚度的GaAs p/n结;且曲线图5036是针对具有192nm的厚度的GaAs p/n结。图25A中的所有装置在较低强度(例如,功率<1W)下展现低效率。关联到曲线图5028的较厚p/n结在~2.5W的中间功率达到~24%的最大峰值效率,但与曲线图5030相关联的具有8个基极分段的VEHSA光换能器大大胜过不基于VEHSA设计的所有其它配置。在图25A中,在这些条件下,已展示VEHSA光换能器来展现高达~36%的子隙转换效率,以及电力输出中至多达到1.4W的经转换功率。

[0147] 图25B示出与图25A中相同但标绘为峰值功率强度的函数的数据。对于曲线图5030,其关联到具有8个基极分段的GaAs VEHS A结构,针对约300W/cm<sup>2</sup>的功率强度,观察到约10%的转换效率,且针对800W/cm<sup>2</sup>的功率强度,观察到超过35%的转换效率。实际上,针对GaAs换能器,发明人已观察到,针对范围从100W/cm<sup>2</sup>到2000W/cm<sup>2</sup>的功率强度的子隙光学输入,获得有用的转换效率。类似地,虽然基于其它半导体材料的光换能器将在不同波长范围具有子间隙吸收,如上文所论述,但可预期,可基于上述设计考量,获得类似的子隙转换效率值。

[0148] 用于高强度下的子隙激励的短路电流是非线性的,如图24的非线性曲线图所示。效率随着子隙激励的输入功率而清楚地增加,如由图25A的曲线图所示。这意味着VEHSA光换能器的被定义为光电流除以输入功率的响应度(单位为A/W)随激励功率而增加。对于VEHSA结构,响应度可乘以基极分段的数目,以便将VEHSA装置的测得响应度值与其它装置(例如单p/n结装置)的值直接比较。

[0149] 对于处于波长 $\lambda_{input}$ 的光学输入,最大理论响应度通过下式得出: $R = \lambda_{input} / 1239.85 * QE$ ,其中 $\lambda_{input}$ 是以nm来表达,且QE是装置的量子效率,且R是单位为A/W的响应度。图26中通过针对QE=92.5%的线5038以及909nm的光学输入波长来示出最大理论响应度。图26还示出,对于具有十二个GaAs分段的VEHSA换能器,输入功率的测得响应度在曲线图5040处为1W(200W/cm<sup>2</sup>),在曲线图5042处为2W(200W/cm<sup>2</sup>),在曲线图5044处为3W(600W/cm<sup>2</sup>),在曲线图5046处为4W(800W/cm<sup>2</sup>),且在曲线图5048处为5W(1000W/cm<sup>2</sup>)。显然,子隙VEHSA光换能器装置的响应度随着输入功率的值而显著增加。在所有情况下,子隙光换能器所产生的开路电压(其中响应度与电压曲线图在零处相交)大体上为13V,尽管事实上,光学激励能量低于带隙能量的能量。此外,曲线图5048处示出的较高光学输入功率下的响应度接近于在0V附近施加的电压的最大理论响应度,曲线图5038。



[0150] 本发明人也已发现,光子耦合效应或光子再循环效应可显著促进基于例如如图26所示的VEHSA设计来改进光换能器中的响应度。此类光子耦合和光子再循环效应可例如在VEHSA装置的基极分段中的一或多个相对于其它基极分段产生过多光电流时发生。由于所有基极分段有效地串联,因此产生过多光电流的基极分段将有效地变为正向偏置,且可开始通过以电致发光的形式辐射再组合来发射光子。所发射的光子可被缺乏光电流的基极分段再吸收。所发射的光子的此再吸收将反过来促进平衡各个基极分段内的光生电流的量。当半导体材料可接近辐射限制时,此类光子耦合效应或光子再循环效应在较高激励强度下更有效。在这些操作条件下,非辐射再组合通道大体上饱和,或不有效地与辐射过程竞争。来自给定基极分段的光子发射将通常处于半导体带隙的边缘附近的能量;在室温下,对于GaAs,此发射将约为1.42eV。

[0151] 不断地照明换能器可产生过多的热量。热量来源于未经转换的光功率。较高效率光换能器因此将产生比较低效率光换能器少的热量。所产生的热量需要在周围环境中耗散,所述周围环境可包含其中安装换能器的封装、到所述封装的连接、安装设备(例如换能器封装安装到其的板)、散热片和周围的空气、气体或另一冷却介质(包含冷却液)。残余热量可增加光换能器装置中的p/n结的温度。温度的此增加将通常降低光换能器的开路电压和效率。至少出于所述原因,以脉冲式操作代替连续操作操作光换能器可为有利的。这可通过使光学输入的功率脉动来实现。脉冲式光换能器操作中的接通占空因子可优选介于100%(总是接通)与1/1000000(每时间周期接通0.0001%)之间。脉冲宽度可优选介于1fs与10s之间。可调整脉冲宽度和重复率在脉冲宽度调制(PWM)模式下操作光换能器。

[0152] 对于非连续(或非CW)操作,装置的面积可影响光换能器的响应时间。光换能器的响应时间将受光换能器的电容(C)和系统的电阻(R)(换能器电连接到的负载)影响。电容和电阻的乘积可表达为RC常数,其将影响脉冲式操作中的响应时间。VEHSA设计对此类操作是有利的,因为垂直串接的架构有效地串联组合p/n结电容。串联组合若干电容使所得电容减小,并且因此增加装置的响应时间。对于其中相对较快的切换是重要的应用,小电容和相对较小的光换能器面积可为优选的。较小的VEHSA光换能器对于给定光学输入功率也可为有利的,因为VEHSA装置将以较高强度操作,且如上文所描述,较高强度实现更高效的光子耦合和光子再循环效应。为了具有子隙光学输入的VEHSA结构的高效操作,选择较小的有效面积大小以及对应地光学输入束的较小直径,以便有效地在较高强度下操作光换能器因此可为有利的。VEHSA光换能器的有效面积的大小可优选介于侧面(或直径)的10微米与侧面(或直径)的10cm之间,并且最优选介于100微米与30mm之间。

[0153] 图27示出相同的光换能器随光学输入的波长而变的相对性能。图27示出当光学输入的波长从最佳设计值变化时,根据本发明的光换能器的预期性能变化。图27的曲线图5050和曲线图5052示出对于各种光学输入波长,如图2中所说明和描述的具有四个连接元件的光换能器的相对性能的实例。与图27相关联的光换能器是为830nm的光学输入波长设计的(即,已选择基极分段厚度来获得830nm的波长的电流匹配条件)。曲线图5050和5052因此在此830nm的光学输入波长下显示性能最大值5054。曲线图5050对应于当光学输入强度相对较低时光换能器的性能,例如针对介于0W与约1W之间的输入功率,如图25A所示。在短于830nm的光学输入波长下,相对性能稍微减小,但在光学输入波长改变为~800nm的情况下,仍超过最佳性能的80%,且在光学输入波长改变为~850nm的情况下,仍超过90%。然

而,在低强度下,子隙性能5056较低,或可靠近零,因为基极分段的材料吸收系数非常小。

[0154] 曲线图5052对应于当光学输入的强度相对较高时光换能器的性能,例如针对介于1W与约5W之间的输入功率,如图25A所见。在这些条件下,在远离目标830nm的光学输入波长下,相对性能稍微减小,但在光学输入波长改变为 $\sim 800\text{nm}$ 的情况下,仍超过最佳性能的95%,且在光学输入波长改变为 $\sim 875\text{nm}$ 的情况下,仍超过90%。归因于当较高光学强度用于输入时存在的光子再循环或光子耦合效应,远离峰值响应(曲线图5052的部分5058)的波长的相对性能的增加是可能的。此外,当光学输入的强度相对较高时,子隙性能(曲线图5052的区域5060)现在比曲线图5050的低强度部分5062高得多。归因于上文其它章节中揭示的效应,高强度下的良好子隙性能发起基极分段的材料显著吸收。图27中的曲线图说明不同输入功率(强度)和波长的性能行为的大致实例,所属领域的技术人员将理解,所述行为的细节可取决于实验条件而变化,但通过遵循本文所揭示的发现的引导,各种波长下针对较高输入强度的性能的大体增加将保持有效。

[0155] 图28示出随如图2中所说明和描述的具有四个连接元件的光换能器的光学输入100的功率而变的光换能器转换效率。曲线图5080和5082示出作为光学输入功率的函数而增加的效率。曲线图5080是针对大于基极分段的材料带隙能量的光子能量下的光学输入。举例来说,在这些条件中,在100mW输入处,效率可为 $\text{Eff} \sim 58\%$ ,且其在约2W的光学输入处,增加到 $\text{Eff} \sim 64.5\%$ 。曲线图5082是针对低于基极分段的材料带隙能量的光子能量下的光学输入。举例来说,在这些条件下,在500mW输入处,效率可为 $\text{Eff} \sim 1\%$ ,且其在约4W的光学输入处,逐渐增加到 $\text{Eff} \sim 35\%$ 。归因于上文其它章节中揭示的效应,高强度下的良好子隙性能来源于基极分段的材料对光子的显著吸收。

[0156] 下文涉及298K(约25 $^{\circ}\text{C}$ )的温度下的GaAs换能器。在此温度下,带隙能量为1.423eV。相对于L0声子,GaAs中的L0声子的能量值为36.1meV,其意味着在有L0声子(36.1meV)参与的情况下,用具有893.8nm(1.387eV)的波长的光照明GaAs换能器足以促成载流子从价带到导电带。

[0157] 也在298K下但相对于T0声子,GaAs中的T0声子的能量值为33.2meV,其意味着在有T0声子(33.2meV)参与的情况下,用具有891.9nm(1.390eV)的波长的光照明GaAs换能器将足以促成载流子从价带到导电带。

[0158] 也在298K下但相对于L0和T0声子,GaAs中的L0声子的能量值加T0声子的能量约为69.3meV,其意味着在有L0声子和T0声子(69.3meV)参与的情况下,用具有915.7nm(1.354eV)的波长的光照明GaAs换能器将足以促成载流子从价带到导电带。

[0159] 下文涉及313K(约25 $^{\circ}\text{C}$ )的温度下的GaAs换能器。在此温度下,带隙能量为1.417eV。相对于L0声子,GaAs中的L0声子的能量值为36.1meV,其意味着在有L0声子(36.1meV)参与的情况下,用具有898.2nm(1.381eV)的波长的光照明GaAs换能器足以促成载流子从价带到导电带。

[0160] 也在313K下但相对于T0声子,GaAs中的T0声子的能量值为33.2meV,其意味着在有T0声子(33.2meV)参与的情况下,用具有896.3nm(1.383eV)的波长的光照明GaAs换能器将足以促成载流子从价带到导电带。

[0161] 也在313K下但相对于L0和T0声子,GaAs中的L0声子的能量值加T0声子的能量约为69.3meV,其意味着在有L0声子和T0声子(69.3meV)参与的情况下,用具有920.3nm

(1.347eV)的波长的光照明GaAs换能器将足以促成载流子从价带到导电带。

[0162] 还存在以稍大于带隙的声子能量照明换能器使得所述声子能量减各种声子能量等于带隙的可能性。举例来说,在298K下,在1423meV (GaAs的带隙能量) +69.3meV (L0+T0声子) =1489.9meV (832.2nm) 的声子能量照明GaAs换能器将/可导致比用具有实质上较大光子能量的光照明所述换能器时会实现的转换效率好的转换效率。将通过L0和T0声子的产生来阐述832.2nm下的改进的转换效率。

[0163] 也在333K (1.407eV的GaAs带隙)下,但相对于如图23中所说明的供体或受体能级,例如对于受体能级(例如GaAs中的C),受体等级的能量值可为40.7meV,其意味着在有受体等级能量(40.7meV)参与的情况下,用具有907.2nm (1.367eV)的波长的光照明GaAs换能器将足以促成载流子从受体等级到导电带。并且其中杂质能级可本身从可用热能 $k_B T$ 填充或去填充。

[0164] 相对于本发明的另一方面,图29示出具有连接件末端部分802的现有技术光纤电缆组合件800的剖开视图。连接件末端部分802具有套管804、套筒806和形成于套筒806上的钥匙808。套管804具有位于其中的光纤805。在光纤电缆组合件800的远端(未图示)耦合到光纤电缆组合件800的光将从光纤805退出连接件末端部分802。连接件末端部分802还具有带螺纹套筒810,其经配置以用于将光纤电缆组合件800紧固到连接件。为了将连接件末端部分802连接到连接件,必须谨慎地将套管804精确地对准到连接件的中心。图30处示出此连接件的实例。

[0165] 在本发明的上下文中,光纤电缆组合件可包含连接到连接件末端部分的简单光纤,且连接件末端部分可被称作递送端,以将传播通过光纤的光朝所述递送端递送;在不脱离本发明的范围的情况下,所述光纤可为单模光纤或多模光纤。

[0166] 如上文所论述,此类连接件通常包含需要精密机械精度、基于陶瓷和金属元件的对准特征。制造期间与精密规格的小偏差可导致凸形部分与凹形部分无法很好地配合(连接)在一起。归因于潜在的断开连接和激光暴露,或归因于因高于正常光损耗而导致的差性能,不良连接配合可为危险的。发明人已发明了新的连接件,其允许将光纤电缆容易地连接到本发明的换能器。下文描述此类连接件的实施例,其具有较高制造容差,且允许较容易地将光纤电缆连接到此类连接件,这导致较容易的现场安装或测试。

[0167] 图30示出现有技术凸缘安装连接件900的横截面图,其包括带螺纹套筒902和套管套筒904。套管套筒904具有远离壁915延伸的部分913。套管套筒904界定套管腔905,其中安置圆柱形插入件911。圆柱形插入件911可由陶瓷或金属制成,且具有与套管804(图29)的直径接近地匹配的直径907。此直径可为例如2.5mm。在大多数现有技术实施例中,圆柱形插入件911与套管腔长度共同延伸。套管804与圆柱形插入件911之间的直径容差通常必须为大约一英寸的几千分之一或更少。类似地,套管套筒904的远离壁915延伸的部分的外径通常约为4.5mm,且必须具有配合套筒806(图29)的内径的严格容差。类似地,带螺纹套筒902的内径通常为6.18mm,且必须具有配合套筒806(图29)的外径的严格容差。

[0168] 连接件900界定装置腔906,其中可通过任何合适手段(例如粘合剂或焊料),来放置和紧固装置(例如光子装置)。连接件900设计成允许精确的光纤到装置对准(“装置”将位于腔906中)。为了将光纤电缆组合件800(图29)连接到连接件900,要求技术员抓住连接件末端部分800,使套管804与圆柱形插入件911对准,推动连接件末端部分800,因此套管804

穿透圆柱形插入件,且接着将带螺纹套筒810旋拧到带螺纹套筒902上。如熟练的技术人员将了解,此操作必须谨慎地进行,尤其考虑到上述严格容差,以避免因为连接过程期间角度不当的对准而擦伤套管807的面部和损坏光纤805,或可能使组合件的陶瓷破裂、擦伤或剥落。举例来说,当在将光纤电缆组合件800连接到连接件900时没有适当注意,圆柱形插入件911和/或套管804可能易于破裂。

[0169] 本发明的光换能器对光束未对准或对光束不均匀性不是非常敏感,且不需要与光源的非常精确的对准。也就是说,本发明的光换能器具有对光束未对准或对光束不均匀性的强容差;这是归因于光换能器的VEHSA设计的单块垂直架构。垂直架构确保了每一基极分段接收大体上相同的光子通量,与有效区域上光束位置无关,且与光束轮廓无关。

[0170] 由此,当使连接件末端部分与本发明的光换能器对准时,不需要为光纤与装置的精确对准设计的现有技术连接件,例如图30的连接件900。令人遗憾的是,用于低对准敏感性应用的连接件看起来将不可用,且只可容易地获得高精度连接件,例如连接件900。通常还发现,现有技术商业连接件的容差在各种供应商之间未必总是一致的。商业的凸形连接件(图29的连接件末端部分802)的容差的这些变化使得难以制造与如图30所示的现有技术的凹形连接件匹配的通用连接件。

[0171] 图31示出此连接件950的实施例的横截面图,所述连接件像图30的连接件900那样,是凸缘安装连接件。连接件950具有凸缘951、带螺纹套筒952和套管腔955。连接件950界定装置腔956,其中可通过任何合适手段(例如粘合剂或焊料)来放置和紧固装置(例如光子装置)。退出套管(未图示)的光从套管腔955传播,通过光圈961并到达装置腔956。

[0172] 套管腔955具有远离壁915延伸的任何部分。连接件950的套管腔955的直径957大于现有技术连接件900的圆柱形插入件911的直径907。直径957必须大于2.5mm,以容纳图29的2.5mm套管804。连接件950可显然提供大得多的容差,来适应容易的可制造性以及来自凸形连接件802的各种供应商的不同容差。举例来说,直径957可介于2.55mm到6.0mm之间,且优选介于2.6mm与3.6mm之间。

[0173] 连接件950是凸缘安装连接件;然而,其它类型的连接件安装件也在本发明的范围内。举例来说,图32示出面向板安装连接件960的光纤电缆组合件800的顶部前透视图,所述板安装连接件具有带螺纹套筒952和套管腔955。板安装连接件960与凸缘安装连接件950的不同之处在于连接件如何安装到另一件设备。如熟练的技术人员将理解,板安装连接件960通过使用插入洞962中的扣件来安装到板;凸缘安装连接件950通过插入洞951中的扣件安装到某一种类的隔墙或壁中(图31)。

[0174] 图33示出图32的连接件960和光纤光缆800的顶部后透视图。图33中示出套管804、套筒806、带螺纹套筒810和钥匙808。还示出由带螺纹套筒952界定的凹口809。凹口是用于接纳钥匙808。另外,示出换能器970紧固到表面安装连接件960。

[0175] 如熟练的技术人员将理解,不需要凹口809也不需要钥匙808来将光纤电缆连接到表面安装连接件。然而,归因于带钥匙的光纤电缆的普遍存在,使带凹口的连接件可用是重要的。

[0176] 图34示出安装(连接)到板安装连接件960的光纤电缆组合件800。

[0177] 如熟练的技术人员将理解,上述实施例中描述的光纤电缆800是FC光纤电缆。然而,本发明的连接件不限于用于FC光纤电缆的连接件。

[0178] 商业上存在若干其它光纤电缆类型,包含ST和SMA光纤电缆。虽然尺寸和连接机构的细节可针对ST和SMA连接件与针对上文所述的连接件实施例不同,但上文FC连接件所示的原理适用于其它类型的连接件。类似地,虽然图29的套管804通常在外径上具有2.5mm的外径,但可用上文所述连接件实施例或通过在上文提出的设计的范围内修改所讨论的实施例,来容易地调节具有其它套管直径的凸形FC连接件。

[0179] 图35示出根据本发明的系统1500的实施例。系统包括光源1502,其经配置以产生具有预定光子能量的光。系统1500进一步包括换能器1504,其经配置以接收来自光源的光,并将光能转换成电能。换能器具有彼此串联电连接到的多个半导体层。每一半导体层具有大体上相同的成分,其具有关联到其的大体上相同的带隙能量。带隙能量大于预定光子能量。

[0180] 光源可包含光纤或光纤电缆,其具有用以将光递送到换能器的递送端。系统可进一步包括递送端紧固到其的连接件。连接件经配置以在递送端固定到连接件时,使递送端与换能器对准。图36示出根据本发明的方法的流程图。在动作1600,提供换能器。换能器具有彼此串联电连接到的多个半导体层。每一半导体层具有大体上相同的成分,其具有关联到其的大体上相同的带隙能量。在动作1602,用具有关联到其的小于带隙能量的光子能量的光来照明所述换能器。

[0181] 本发明的另一方面提供单块半导体连接元件结构或连接层,来电连接通过磊晶生长的光电子装置的至少两个不同部分。在一些实施例中,连接元件对冲击装置的输入有效区域的需要传输通过连接元件而不具有显著光学吸收的光子提供高透明度。通过经由外延工艺的使用假晶生长低电阻隧穿结来获得低电阻。通过实现具有高掺杂浓度的 $p^{++}$ 和 $n^{++}$ 层来获得隧穿结的低电阻特性,所述层具有平均晶格常数,其不显著偏离在其上生长的底层(也被称作假晶生长)。举例来说,在与GaAs晶格常数( $a \sim 0.56575\text{nm}$ )晶格匹配的装置中,通常可通过用碳(C)将所述半导体层掺杂到介于 $1\text{E}18\text{cm}^{-3}$ 到 $5\text{E}21\text{cm}^{-3}$ 之间的等级,且优选掺杂到介于 $5\text{E}19\text{cm}^{-3}$ 到 $5\text{E}20\text{cm}^{-3}$ 的等级,来实现隧穿结的高 $p$ 型掺杂浓度(有时也被称为 $p^{++}$ 层)。图37中描绘此类装置3700的实例。

[0182] 类似地,在与GaAs晶格常数( $a \sim 0.56575\text{nm}$ )晶格匹配的装置中,通常可通过用碳(Te)将所述半导体层掺杂到介于 $1\text{E}18\text{cm}^{-3}$ 到 $5\text{E}21\text{cm}^{-3}$ 之间的等级,且优选掺杂到介于 $5\text{E}19\text{cm}^{-3}$ 到 $5\text{E}20\text{cm}^{-3}$ 的等级,来实现隧穿结的高 $n$ 型掺杂浓度(有时也被称为 $n^{++}$ 层)。可使用其它掺杂剂,但外延工艺必须允许实现靶向掺杂程度。举例来说,可使用Se、S或O来代替Te。取决于位于与光学输入有效区域相对的侧上的作用层的能隙,可将包含在连接元件中的上述半导体层选择为晶格匹配的GaAs或半晶格匹配的 $\text{Al}_x\text{Ga}(1-x)\text{As}$ 合金,其中 $x$ 例如介于0%与100%之间,且最优选介于0%与40%之间。

[0183] 存在外延工艺,其可用以针对此类GaAs或 $\text{Al}_x\text{Ga}(1-x)\text{As}$ ,容易地实现所要的 $n^{++}$ 和 $p^{++}$ 掺杂分布,如上文所提到。所属领域的技术人员将明白,此类设计将导致低电阻晶格匹配或假晶隧穿结,其可用作连接元件,特征是所要的GaAs层上的低电阻率和高透明度特性。通常,所要的低电阻率将导致电压的降低,优选低于100mV,且最优选低于10mV,取决于穿过光电子装置的电流。对于集中光伏装置或对于激光功率转换器装置,穿过此类连接元件的电流可大约为若干安培(例如通常小于10A),且装置区域优选低于 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ ,但有时可为几 $\text{cm} \times$ 几 $\text{cm}$ ,取决于应用,且最优选小于 $6\text{mm} \times 6\text{mm}$ 。除实际几何限制之外,对装置区域可

为多小没有限制,但装置面积优选大于 $0.1\text{mm} \times 0.1\text{mm}$ ,且最优选大于 $1.0\text{mm} \times 1.0\text{mm}$ 。装置区域可为正方形、矩形,或具有任何任意几何形状,取决于应用,且装置区域的几何形状的特殊性不影响本发明的一般性。

[0184] 上文所述的p++和n++层的厚度通常介于 $1000\text{nm}$ 与 $0.1\text{nm}$ 之间,优选介于 $100\text{nm}$ 与 $1\text{nm}$ 之间,且最优选介于 $90\text{nm}$ 与 $10\text{nm}$ 。p++层的厚度可设计成大约与n++层的厚度相同,或可在p++层的厚度可不同于n++层的厚度的情况下,获得类似结果。这些层的最佳厚度的确定可通常考虑界面处的载流子耗乏效应、生长或后生长过程中的扩散效应、相对于用于n++和p++层中的合金的生长率的外延生长期间的掺杂剂轮廓的斜升和斜降时间,这些层的形成中的耗乏区的厚度、这些层的形成中的载流子的库仑效应、激活的掺杂剂的部分的效应、外延工艺期间的掺杂剂或合金的表面偏析效应、表面重构效应、表面形态效应、掺杂剂合并效率效应、重掺杂剂浓度所导致的晶格收缩或展开效应、量子井或低维度隧穿效应、空间充电效应,或影响作用中载流子浓度、参与量子隧穿现象的有效电场、这些层中的残余光学吸收或掺杂轮廓的任何其它效应。

[0185] 举例来说,图37描绘基于随GaAs层3776上的GaAs晶格生长的此类隧穿结的现有技术连接元件。明确地说,图37示出两个此类连接元件3782和3790。其它连接元件未图示,但可并入其它层3786内,其可包括结构3700的其它部分,以及包括众多重复部分的结构的其他此类连接元件。如一般技术人员将理解,虽然图37描绘现有技术连接元件,但此类现有技术连接元件在一些情况下可用以创建新颖实施例,但在其它情况下,现有技术连接元件可能太局限以致无法建构如下文进一步详细描述的其他新颖实施例。

[0186] 在图37中,连接元件3782将结构3780的第一部分连接到结构3784的第二部分。类似地,连接元件3790将结构3788的N-1部分连接到结构3792的N部分。传入光子3704冲击在光学输入层3708上,且传输到结构3780的第一部分,其可吸收光子3704中的一些。传输通过结构3780的光子谱接着穿过连接元件3782。如果连接元件3782并不显著吸收传输通过结构3780的第一部分且冲击在连接元件3782上的光学输入3704的光谱含量,那么其被称为具有高光学透明度。在此情况下,从连接元件3782的一侧冲击的大体上全部的光传输到另一侧到结构3784的第二部分。类似地,如果连接元件3782上的电阻小于 $100$ 毫欧,且优选小于例如 $10$ 毫欧,那么连接元件3782可被称为具有低电阻率(或等效地高导电性)。将定义低电阻率的电阻的确切值将取决于装置的应用以及所使用的装置的面积。在此类装置中,例如,连接元件3782、3790的p++层3724、3756分别可例如为GaAs (C) 的单层,且连接元件3782、3790的n++层3728、3760可分别为GaAs (Te) 的单层。如上文所提到,可结合掺杂值来选择n++和p++层3724、3728、3756、3760的掺杂等级。此外,GaAs 3776与GaAs晶格常数晶格匹配,因此可例如通过使用商业电抗器进行外延,来容易地生长所述层。

[0187] 可通过任何合适的半导体生长方法来进行外延,例如:金属有机化学气相沉积(MOCVD)、化学束外延法(CBE)、分子束外延法(MBE)、固相外延(SPE)、氢化物气相外延法或通过其它类似的混合系统或其组合。可针对实施例的各个层来优化生长参数,例如以最大化装置性能或其可制造性。可优化生长参数和生长条件,包含(例如)生长温度、用以生长所述层的各种气体的压力、那些压力的比率(例如当生长III-V半导体层时的III/V比率)、合金成分、残余应变、生长率、各种层的掺杂或共掺杂、界面活性剂气体的使用、退火循环的使用等。

[0188] 如图37所示,结构3700可包含建构在结构3780的第一部分之上的光学输入层3708,结构3780建构在第一连接元件3782之上,第一连接元件建构在结构3784的第二部分之上,……,结构3784建构在结构3788的N-1部分之上,结构3788建构在另一连接元件3790之上,且所述另一连接元件建构在结构3792的第N部分之上,结构3792建构在GaAs层3776之上。应了解,所述部分和连接元件中的每一者可包含一个、两个、三个或更多个层。举例来说,结构3780的第一部分示出为包含n型侧3712、具有带隙 $E_{g1}$ 的第一部分3716和p型侧3720。类似地,结构3784的第二部分示出为包含n型侧3732、具有带隙 $E_{g1}$ 的第二部分3736和p型侧3740。此外,结构3788的N-1部分示出为包含n型侧3744、具有带隙 $E_{g1}$ 的N-1部分3748和p型侧3752。最后,结构3792的N部分示出为包含n型侧3764、具有带隙 $E_{g1}$ 的N部分3768和p型侧3772。如可了解,结构的每一部分包含至少一p型层和一n型层。每一p型层和n型层可具有内置光电压,其大体类似于结构的所有其它部分的内置光电压。

[0189] 还示出堆叠3700具有多个连接元件或连接层3782、3790,其包夹在两个邻近p-n堆叠之间,从而提供相邻堆叠之间的电连通。因为存在需要与图37中描述的光学特性不同的光学特性的应用,所以结构3700的变化可为有用的。举例来说,对于一些应用,期望具有比GaAs的带隙低的带隙,如上文结合图37中描绘的结构而示范。对于此类应用,可能需要基于InyGa(1-y)As层3804来建构装置3800,如图38所示。装置3800可类似于装置3700,因为p-n层和连接元件的堆叠建构在衬底之上。然而,应了解,层3804与3704之间的差可导致用于p-n层和/或连接元件中的一些或全部中的不同材料、掺杂剂和/或掺杂浓度。虽然将使用如图37中使用的类似参考编号来描述图38的这些p-n层和连接元件中的一些,但应了解,p-n层和/或连接元件本质上可为不同的。

[0190] InyGa(1-y)As层3804可为例如变质层或虚拟衬底。然而,在所述情况下,所属领域的技术人员将认识到,基极层的晶格常数较大。举例来说,对于 $y=12\%$ ,层3804的晶格常数现在大约为 $0.57016\text{nm}$ ,且In<sub>0.12</sub>Ga<sub>0.88</sub>As在 $20^\circ\text{C}$ 下将具有 $1.247\text{eV}$ 的带隙,其将对应于 $994\text{nm}$ 的阈值吸收带边缘波长。举例来说,此实施例可用于红外线应用。

[0191] In<sub>0.12</sub>Ga<sub>0.88</sub>As半导体合金可用于基于大功率 $976\text{nm}$ 激光源的光学输入3704的激光功率转换装置中的实例。此类激光可容易购得,具有高功率、良好的可靠性,且还是有成本效益光功率来源。因为基极层3804现在具有不同晶格常数,所以改变连接元件3782、3790的设计来维持假晶外延生长也是合意的。实际上,如果连接元件不是晶格匹配的或假晶生长到其底层,那么在关键厚度之后,预期形成缺陷,且可预期有缺陷的材料具有较差的电特性。在形成缺陷之前可实现的关键厚度的值取决于与邻近层的晶格失配。预期连接元件3782、3790中的缺陷的高密度,以诱捕载流子且减小峰值穿隧电流。峰值穿隧电流是在隧穿二极管的电流-电压行为进入负不同电阻(NDR)时段之前的特性电流,藉此通过所述装置的电流开始随着电压增加而减小。对于将高度导电的隧穿结,期望以显著低于其峰值穿隧电流的电流来操作所述隧穿结。因此,实现具有高峰值穿隧电流的隧穿结是合意的。实际上,这翻译成维持隧穿结设计的假晶层且实现这些层中的高掺杂等级的约束条件。

[0192] 图39说明基于用于基极层3804的In<sub>0.12</sub>Ga<sub>0.88</sub>As半导体合金的上述实例的实施例。高带隙InGaP 3732将与镉成分为60%的基于In<sub>0.12</sub>Ga<sub>0.88</sub>As的层3804晶格匹配。举例来说,其将具有 $1.768\text{eV}$ 的带隙,且可使用Si来n型掺杂。类似地,例如,可通过用Zn掺杂,来将p型包覆层3720设计成具有In60%Ga40%P。对于p++层3724和n++层3728,基于In12%



AlzGa(0.88-z)As合金的设计将与基于In<sub>0.12</sub>Ga<sub>0.88</sub>As的层3804晶格匹配。层3724和3728的铝成分可设定成介于0%与100%之间,且优选介于5%与35%之间,以维持连接元件3782对冲击光子的良好透明度。尽管图39描绘连接元件3782的细节,但应了解,连接元件3790和其它连接元件可类似或相同地建构。

[0193] 然而,虽然图39的实施例满足晶格匹配约束条件,但其也将显著合金分数的镉引入到n<sup>++</sup>隧穿结层3724和p<sup>++</sup>隧穿结层3728中。这些层的镉成分可使得难以达到所要的掺杂等级。举例来说,在MOCVD中,当In存在于所述层中时,难以达到用C进行的高p型掺杂。类似地,镉的存在可使得难以或不可能通过使用Te或Se作为掺杂剂来达到所需的n<sup>++</sup>掺杂等级。可尝试其它掺杂剂物质或生长条件来达到所需的掺杂等级,但通常得出在制造或成本考量方面不利的不符合要求的结果和/或生长条件。

[0194] 下文揭示将克服上述问题来获得所需的n<sup>++</sup>和p<sup>++</sup>掺杂等级,同时维持需要低于GaAs的带隙(例如In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As,包含In<sub>0.12</sub>Ga<sub>0.88</sub>As)的红外线光电应用所需的假晶结构特性的解决方案。

[0195] 更具体地说,图40示出藉此使用一系列层对来建构图38中所说明的连接元件3782和/或3790的实施例。在一些实施例中,结合图40和/或图38描绘的层可对应于作为光纤上功率或激光功率转换器装置而操作的层堆叠。

[0196] 层4008、4020、4028、4040是基于具有厚度t<sub>1</sub>的AlzGa<sub>1-z</sub>As而设计的。层4012、4024、4032、4044是基于具有厚度t<sub>2</sub>的二元半导体InAs而设计的。接着选择Al成分z来获得所要的光学透明度,同时选择t<sub>1</sub>和t<sub>2</sub>的值来维持高品质的假晶外延层。此实施例的优点是AlzGa<sub>1-z</sub>As层设计成不包括任何镉。它们可因此使用标准外延工艺,以所要的掺杂等级来容易地经n<sup>++</sup>和p<sup>++</sup>掺杂。举例来说,例如在MOCVD中,已知Te很好并入来实现AlGaAs中的高掺杂值。类似地,例如在MOCVD中,已知C很好地并入以实现AlGaAs中的高掺杂值。可因此将层4008、4020、4028、4040称为掺杂隧穿结层,或由高度可掺杂材料组成的层;以及可将层4012、4024、4032、4044成为调节物隧穿结层。因此,本发明解决了针对需要低于GaAs的带隙(例如In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As,包含In<sub>0.12</sub>Ga<sub>0.88</sub>As)的红外线光电应用的连接元件的掺杂约束条件。所属领域的技术人员接着将清楚,许多其它有用的配置将适用于其它应用,例如用于约910nm的光学输入,可用In<sub>0.08</sub>Ga<sub>0.92</sub>As基极层,且通过在上述实施例的厚度t<sub>1</sub>和t<sub>2</sub>中进行相关调整,来建构类似实施例。

[0197] 举例来说,为了进一步描述图40的实例,虽然基极层为In<sub>0.12</sub>Ga<sub>0.88</sub>As,但t<sub>1</sub>=2.2nm和t<sub>2</sub>=0.3nm的值将导致平均晶格常数等于In<sub>0.12</sub>Ga<sub>0.88</sub>As(此处,在20°C下,a~0.57016nm)。上文已选择t<sub>1</sub>和t<sub>2</sub>的值,使得个别层低于位错将开始在此形成的关键厚度。此外,由于鉴于这些材料中的电子和空穴波函数,t<sub>1</sub>和t<sub>2</sub>较薄,因此波函数耦合将形成有效相干或部分相干状态,其将大体上表现为单块合金。所属领域的技术人员将认识到,t<sub>1</sub>、t<sub>2</sub>的其它值,以及合金组成将类似地产生具有所要特性的有效假晶合金。t<sub>1</sub>和t<sub>2</sub>的选择中的主要考量是每一个别层厚度保持低于关键厚度,且相应晶格常数的加权平均得出与基极层(此处In<sub>0.12</sub>Ga<sub>0.88</sub>As,在此实例中)匹配的平均晶格常数。举例来说,已知InAs的关键厚度为约1.5单层。由于InAs厚度t<sub>2</sub>=0.3nm将大致对应于1单层,所以生长将以平面逐层生长模式继续进行,且所得层序列将以假晶方式继续进行。

[0198] 可针对Al成分z的各种值来评估连接元件3782、3790的有效带隙。可通过使用个别



带隙的加权平均来近似表示有效带隙估计。此近似可通过计算选定设计中的经量化能级来细化。对于图40中的实例,其中 $t_1=2.2\text{nm}$ 且 $t_2=0.3\text{nm}$ ,且 $z=15\%$ ,加权平均估计预测 $1.462\text{eV}$ 的有效带隙,而量子异质结构计算预测 $1.446\text{eV}$ (低 $16\text{meV}$ )的有效带隙。对于两者估计,以 $976\text{nm}$ 的波长冲击的光学输入光束将不在连接元件3782、3790内吸收。

[0199] 图41概述对于基于 $t_1=2.2\text{nm}$ 且 $t_2=0.3\text{nm}$ 的实施例,随 $\text{Al}_z\text{Ga}(1-z)\text{As}$ 合金的铝成分而变得有效带隙评估(曲线4110)。对于 $z$ 的所有值,连接元件层假晶为 $\text{In}_{12\%}\text{Ga}_{88\%}\text{As}$ 。此实施例因此适合于以 $976\text{nm}$ 冲击的输入光功率的实例。曲线4120描绘光学输入光束能量。通过选择光学输入光束(曲线4120)与所得连接元件的有效带隙(曲线4110)之间的适当的能量差(曲线4130),可确保连接元件的高光学透明度。如上文所提到,通过分别用例如Te且用C掺杂 $\text{AlGaAs}$ 层4008、4020、4028、4040等来实现所要的 $n^{++}$ 和 $p^{++}$ 掺杂等级。所得隧穿结的所要的高峰值电流因此通过用碳(C)将 $\text{AlGaAs}$ 层4008、4020等掺杂到介于 $1\text{E}18\text{cm}^{-3}$ 到 $5\text{E}21\text{cm}^{-3}$ 之间的等级,且有选掺杂到介于 $5\text{E}19\text{cm}^{-3}$ 到 $5\text{E}20\text{cm}^{-3}$ 之间的等级;以及通过用碳(Te)将 $\text{AlGaAs}$ 层4028、4040等掺杂到介于 $1\text{E}18\text{cm}^{-3}$ 到 $5\text{E}21\text{cm}^{-3}$ 之间的等级,且优选掺杂到介于 $5\text{E}19\text{cm}^{-3}$ 到 $5\text{E}20\text{cm}^{-3}$ 之间的等级来实现。如图40所示,可在 $p^{++}$ 对与 $n^{++}$ 对之间提供重复的 $\text{AlGaAs}/\text{InAs}$ 对4020、4036。

[0200] 如图42所示,除上面的描述中提到的高光学透明度要求之外,标准隧穿结4204具有与实现其低电阻率要求有关的两个关键属性:1)它们应具有高掺杂等级以高度导电,和2)它们应与要连接的材料A的晶格间距匹配,以防止位错和缺陷。隧穿结4204是可在一些半导体装置(即,堆叠激光器、太阳能电池和光换能器或光转换器)中使用的基本建构块。本发明的实施例预期本文所描绘或描述的任何类型的隧穿结可在换能器、堆叠激光(或类似发光装置)、太阳能电池、光转换器或任何其它半导体装置中使用。

[0201] 然而,这限于具有与标准隧穿结的晶格常数相同或大体上等同的晶格常数的材料(例如材料A)。具有不同晶格常数的材料通常无法在无阻止连接的恰当工作的位错、缺陷和其它故障的情况下连接。作为更具体的实例,对于具有不同晶格间距的材料,标准隧穿结可能不具有有恰当匹配的晶格间距。这将导致界面处的位错和缺陷。困难的问题是具有不同晶格间距的材料对于在特定波长范围内操作的激光器或光换能器来说是合意的。

[0202] 根据本发明的至少一些实施例,且如图43和44中所示,提供改进的隧穿结4304,其包含由额外材料周期性地间杂的标准隧穿结材料TJ1和TJ2,所述额外材料在本文中可被称作晶格调节物或(LA)4404,其迫使隧穿结4304采纳将连接的材料B的晶格常数。如以上描述中所提到,晶格调节物层4404可因此也被称为调节物隧穿结层。此方法产生不具有位错和缺陷的良好外延连接。如图44所示,通过晶格调节物材料4404(其具有相反的应力/应变)的存在,来拉伸或压缩标准隧穿结材料TJ1和TJ2,以匹配其它材料晶格间距。举例来说,隧穿结4304的两种不同材料TJ1和TJ2将拉伸,且晶格调节物材料4404会压缩,以抵制隧穿结材料TJ1和TJ2的拉伸。

[0203] 在外延半导体生长中,当材料以小于衬底的晶格常数的“自然”(块)晶格常数生长时,发生拉伸/压缩。随着材料成长,其被迫采纳较大晶格常数,且其在衬底的平面内拉伸。应注意,在此情况下,其也在垂直于衬底的方向上压缩。所得效应是晶片或衬底将朝上弓曲。对此弹性行为存在限制,且晶格常数的过多差异导致位错、破裂缺陷或类似者。对于压缩,揭示相反行为,即尝试以大于衬底的晶格常数的“自然”(块)晶格常数来生长材料。在此

情况下, 弓曲将在相反的方向上发生。本发明的实施例通过呈现具有一或多个晶格调节物材料4404的隧穿结4304来克服这些问题。

[0204] 还应了解, 所关注的波长决定要选择材料。举例来说, 如果期望转换来自975nm的波长下的激光, 吸收物材料的良好候选者是三元化合物In (12%) Ga (88%) As, 其中带隙具有仅稍小于具有975nm的波长的传入光子的能量。然而, 此三元材料将不在已知外延晶片衬底(如GaAs、Si、InP、Ge或其它)上很好地生长。然而, 其可在所谓的“变质”层或虚拟衬底上很好地生长。一旦选择衬底和p-n结材料, 就可选择用于隧穿结4304的材料。如先前所述, 由于高掺杂和光学透明度要求, 隧穿结材料的选择受到限制。因此, 可选择类似AlGaAs-GaAs的材料, 其不与三元/变质衬底晶格匹配。如果不适当地解决, 那么此材料选择可以其它方式经受位错和/或断裂。本发明的实施例通过在隧穿结材料TJ1、TJ2之间引入晶格调节物4404层来解决这些潜在问题。晶格调节物材料4404在隧穿结4304内提供相反的应力, 以管理应力堆积。

[0205] 举例来说, 当在用于其它应用的其它材料上实施高性能隧穿结时, 类似考量将适用。举例来说, 在InP上, p<sup>++</sup>可掺杂材料可为p<sup>++</sup>AlGaAs (C), 且n<sup>++</sup>可掺杂材料可n<sup>++</sup>AlGaAs (Te), 藉此晶格调节物层4404可再次为InAs (或等效地(具有高In分数的InGaAs)), 但现在较厚, 以恰当地考虑不同晶格常数要求。也如上文所提到, 可设想其它实例, 例如In (8%) Ga (92%) As, 其将用于900到910nm范围内的应用。还应了解隧穿结4304和其中提供的晶格调节物材料4404可用于不同类型的装置, 例如激光或发射体, 代替电力转换器或换能器。

[0206] 揭示至少一个实施例, 且所属领域的技术人员进行的对实施例和/或实施例的特征的变化、组合和/或修改在本发明的范围内。由组合、集成和/或省略一个或多个实施例的特征产生的替代实施例也在本发明的范围内。在明确地陈述数字范围或限制的情况下, 此类表达范围或限制可理解为包含落入明确地陈述的范围或限制内的相同量值的迭代范围或限制(例如, 从约1到约10包含2、3、4等; 大于0.10包含0.11、0.12、0.13等)。举例来说, 每当揭示具有下限和上限的数值范围时, 具体揭示落入所述范围内的任何数字。另外, 术语“大体上”的使用表示参考值的+/-10%, 除非另行说明。举例来说, 词组: “电压A与电压B大体上相同”意味着电压B在电压A的+/-10%内。

[0207] 在先前描述中, 出于解释的目的, 阐述众多细节以便提供对实施例的透彻理解。然而, 所属领域的技术人员将明白, 不需要这些具体细节。在其它情况下, 以框图形式示出众所周知的电气结构和电路, 以免混淆理解。举例来说, 不提供关于将本文所述的实施例实施为软件例程、硬件电路、固件还是其组合的具体细节。

[0208] 上述实施例既定仅为实例。所属领域的技术人员在不脱离本发明的范围的情况下可对特定实施例进行更改、修改和变化, 本发明的范围仅由所附权利要求书界定。

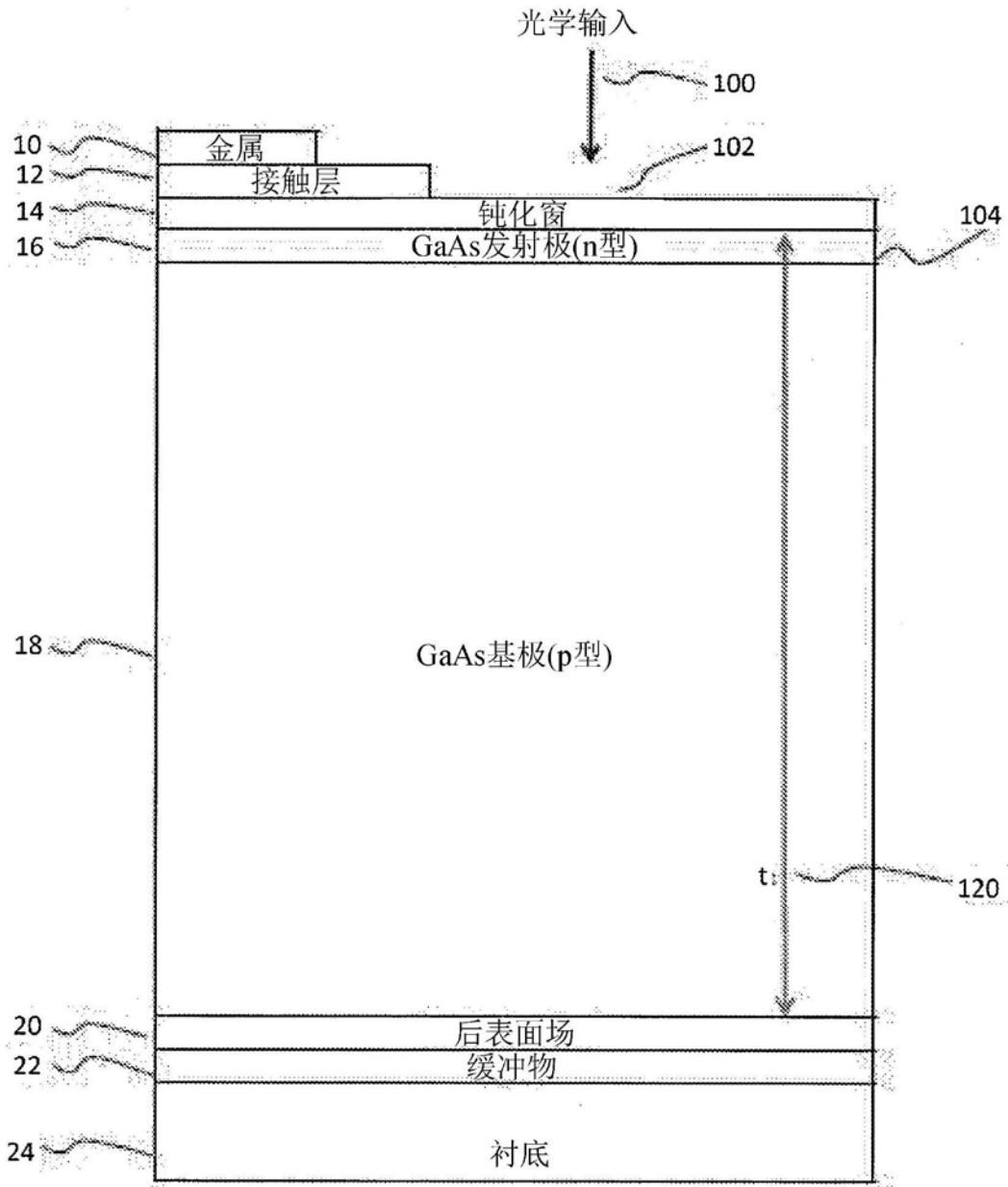


图1

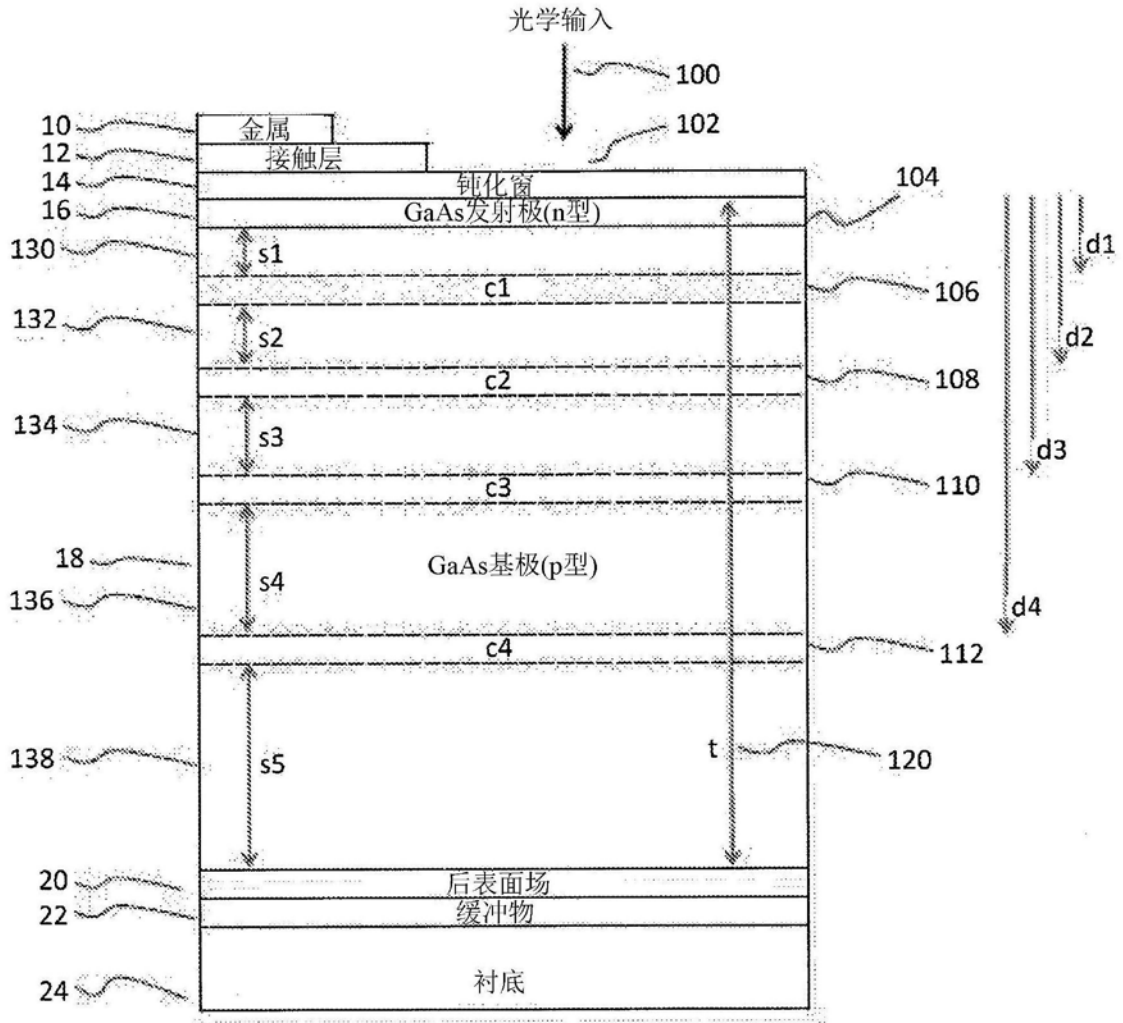


图2

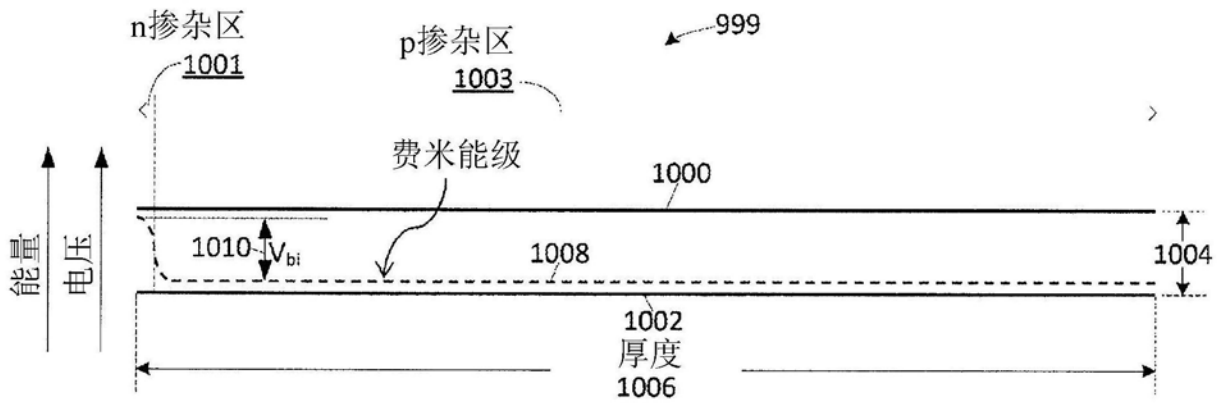


图3

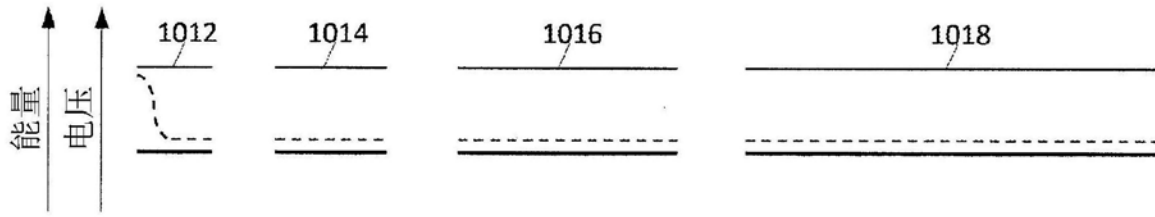


图4

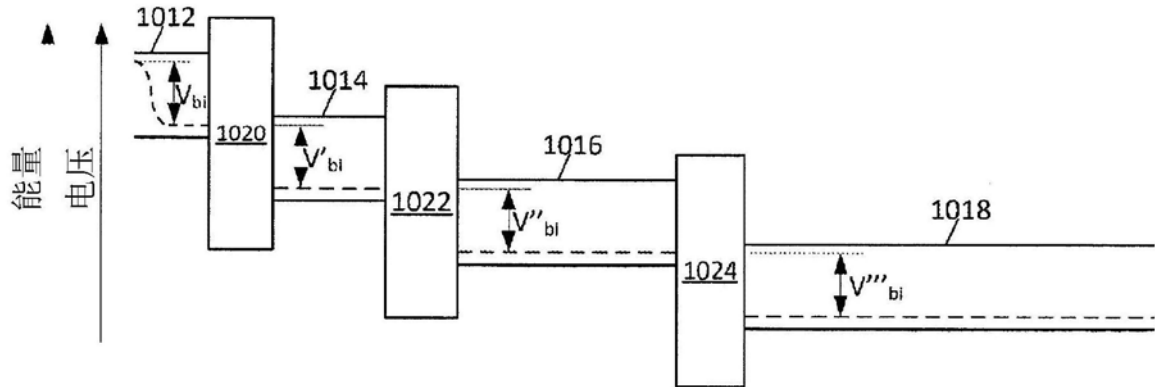


图5

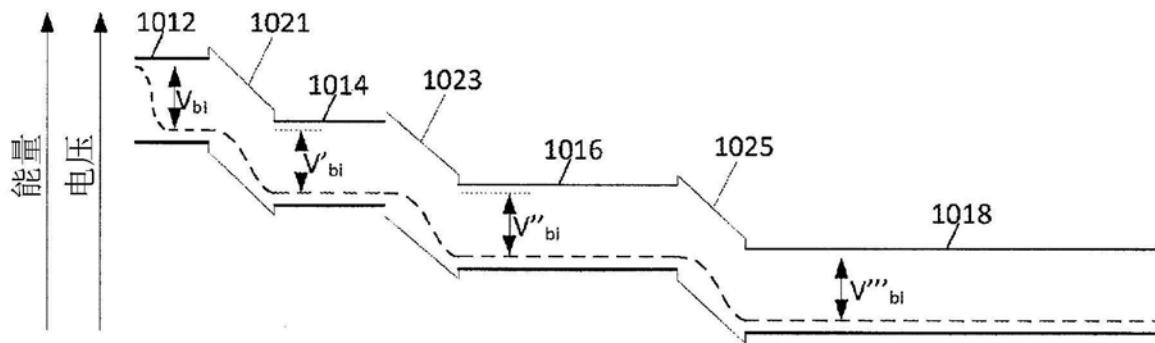


图6

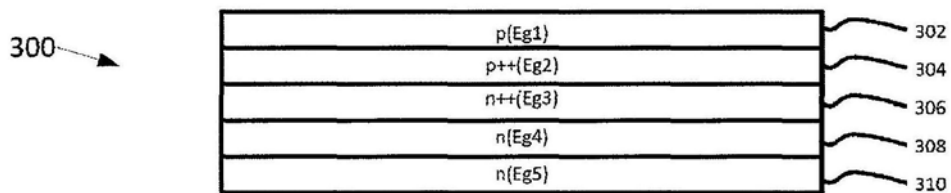


图7

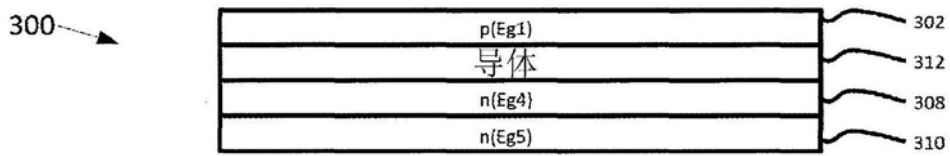


图8

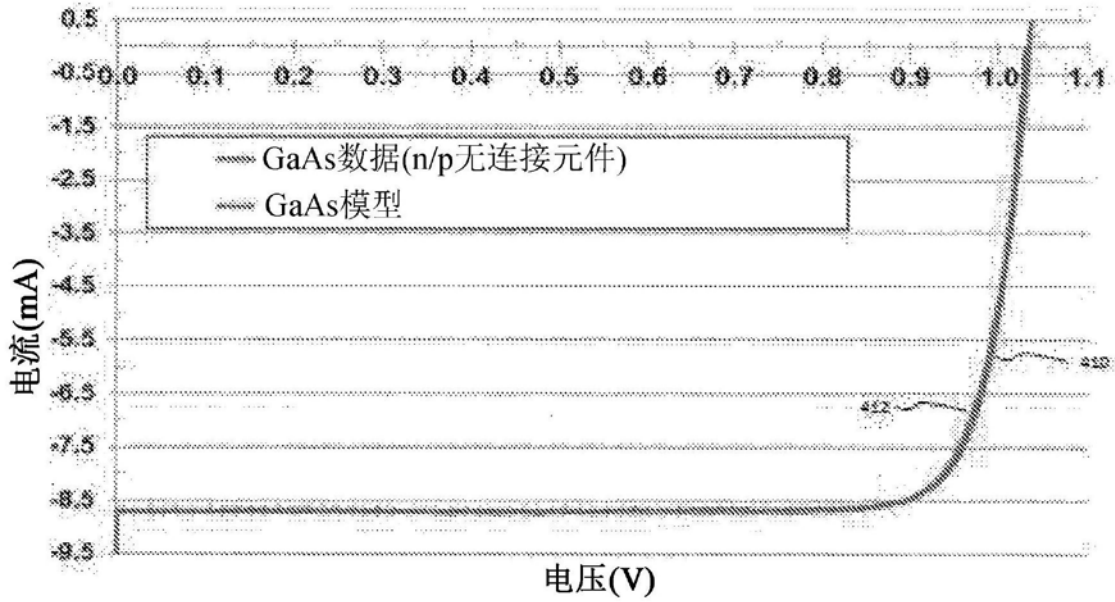


图9

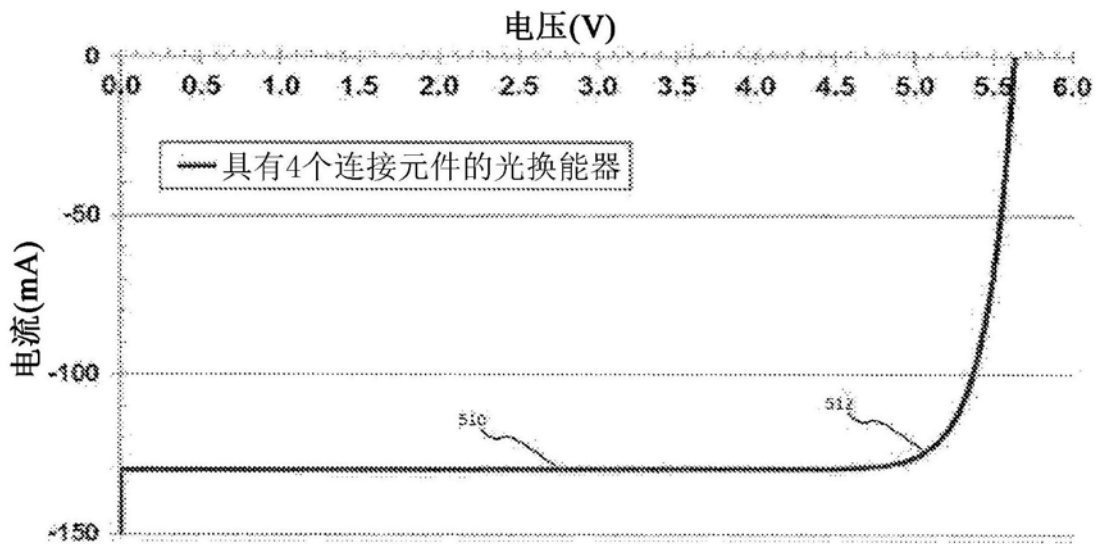


图10

830 nm光换能器的性能与光学输入的波长

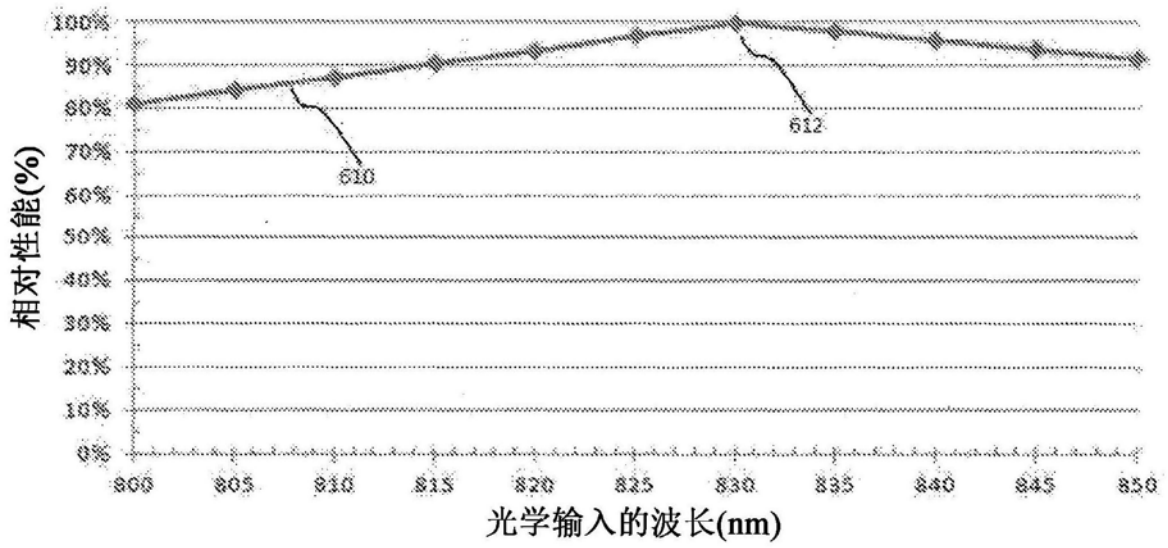


图11

性能与总厚度%误差

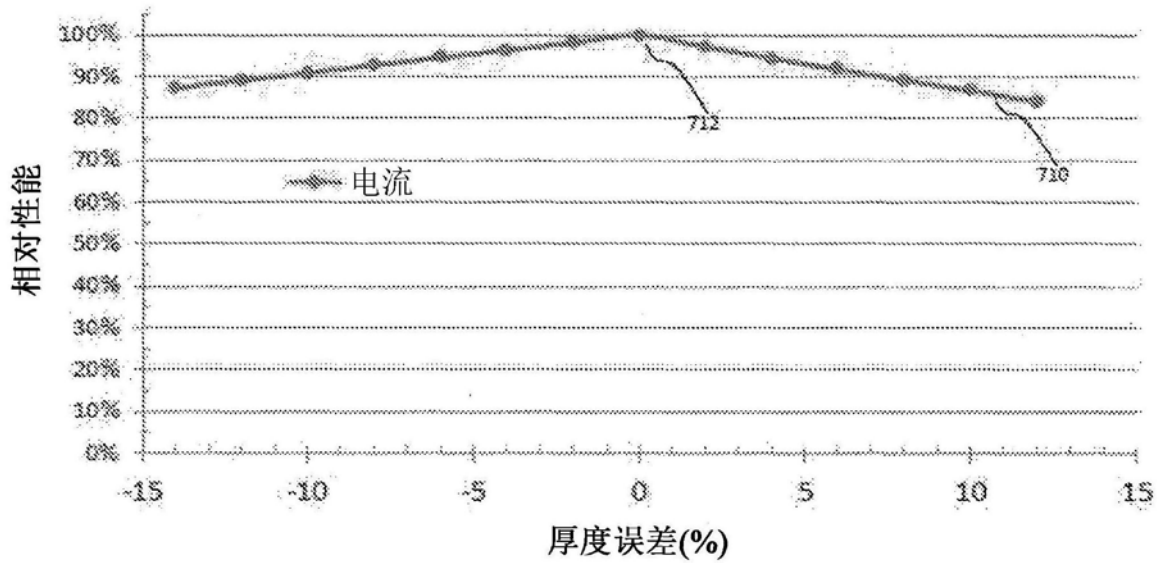


图12

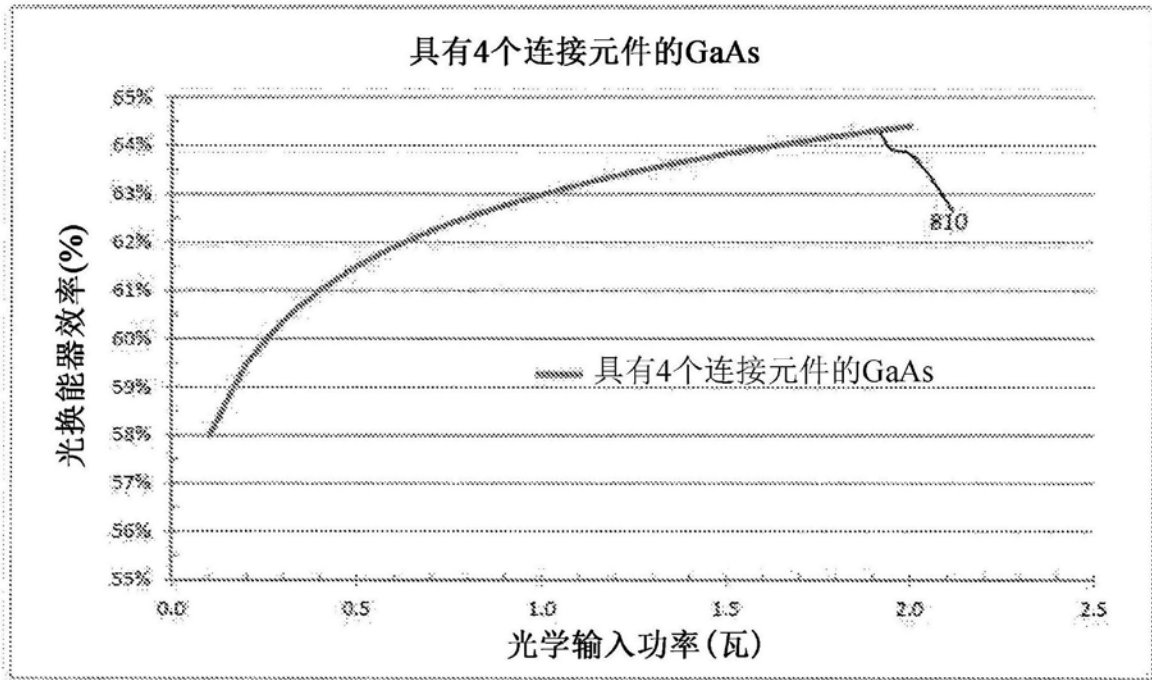


图13

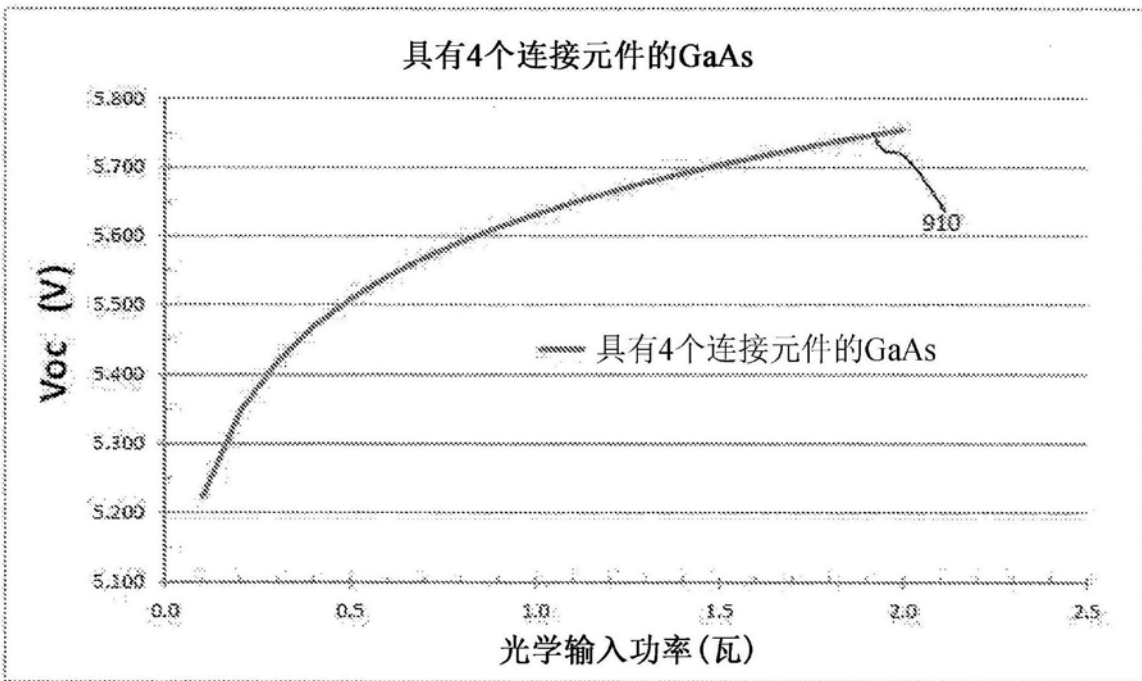


图14



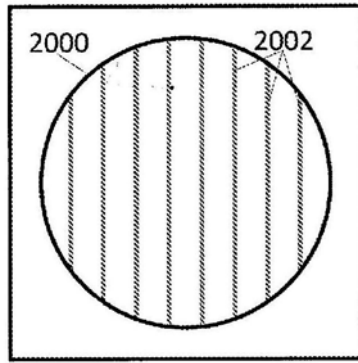


图15

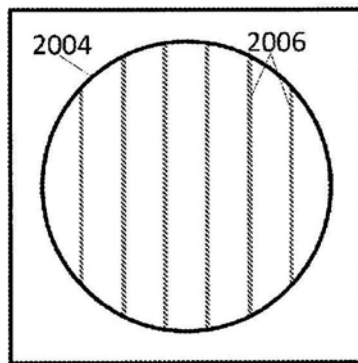


图16

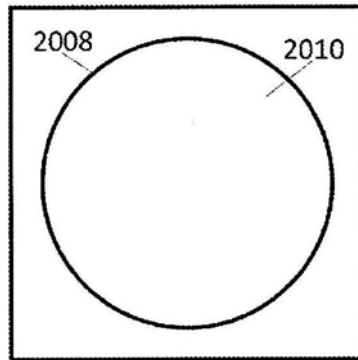


图17

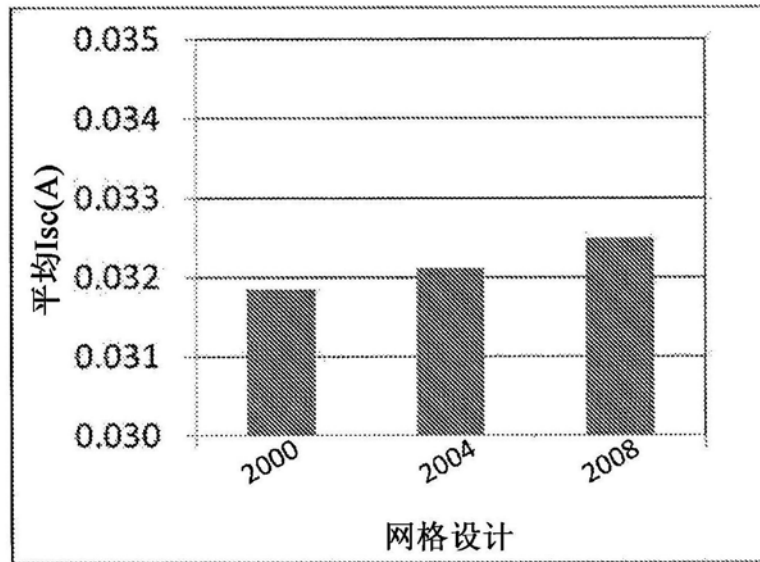


图18

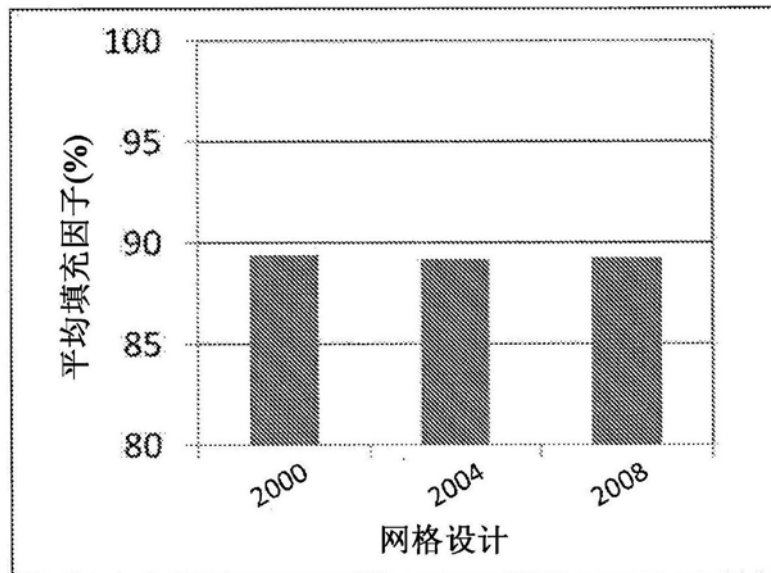


图19

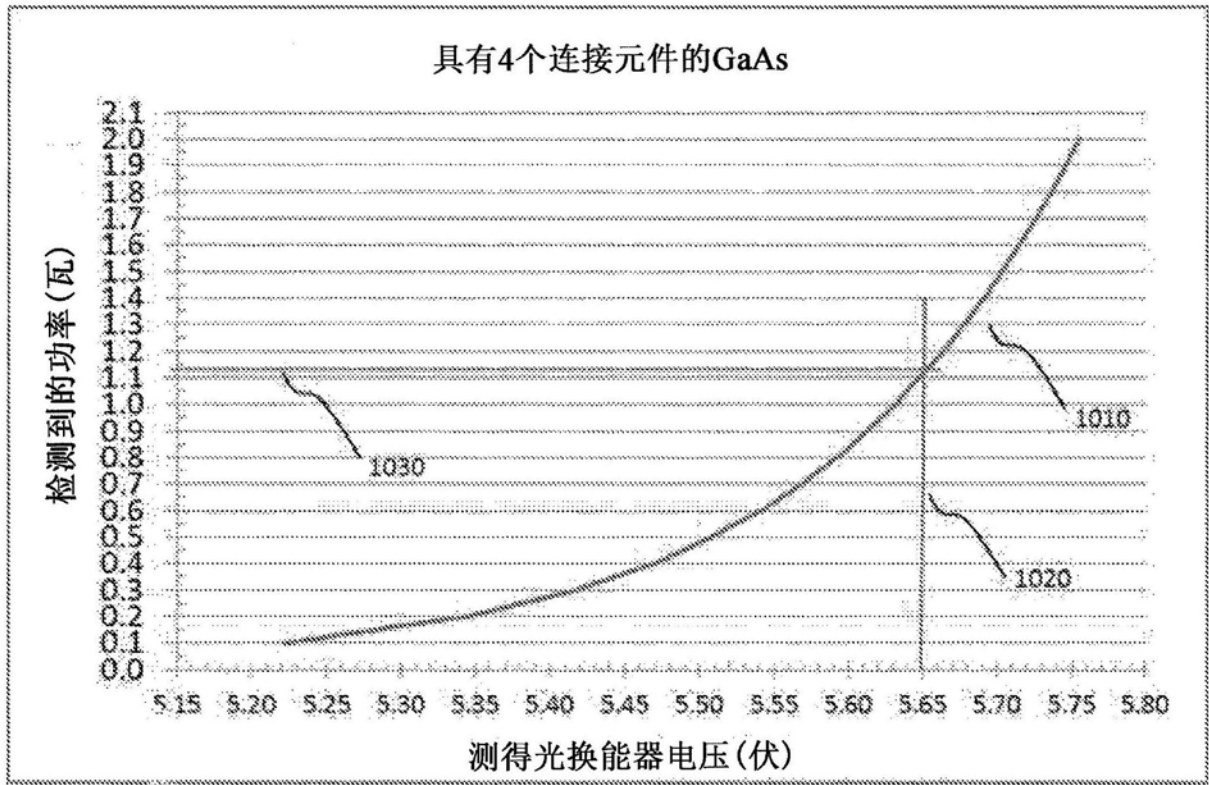


图20

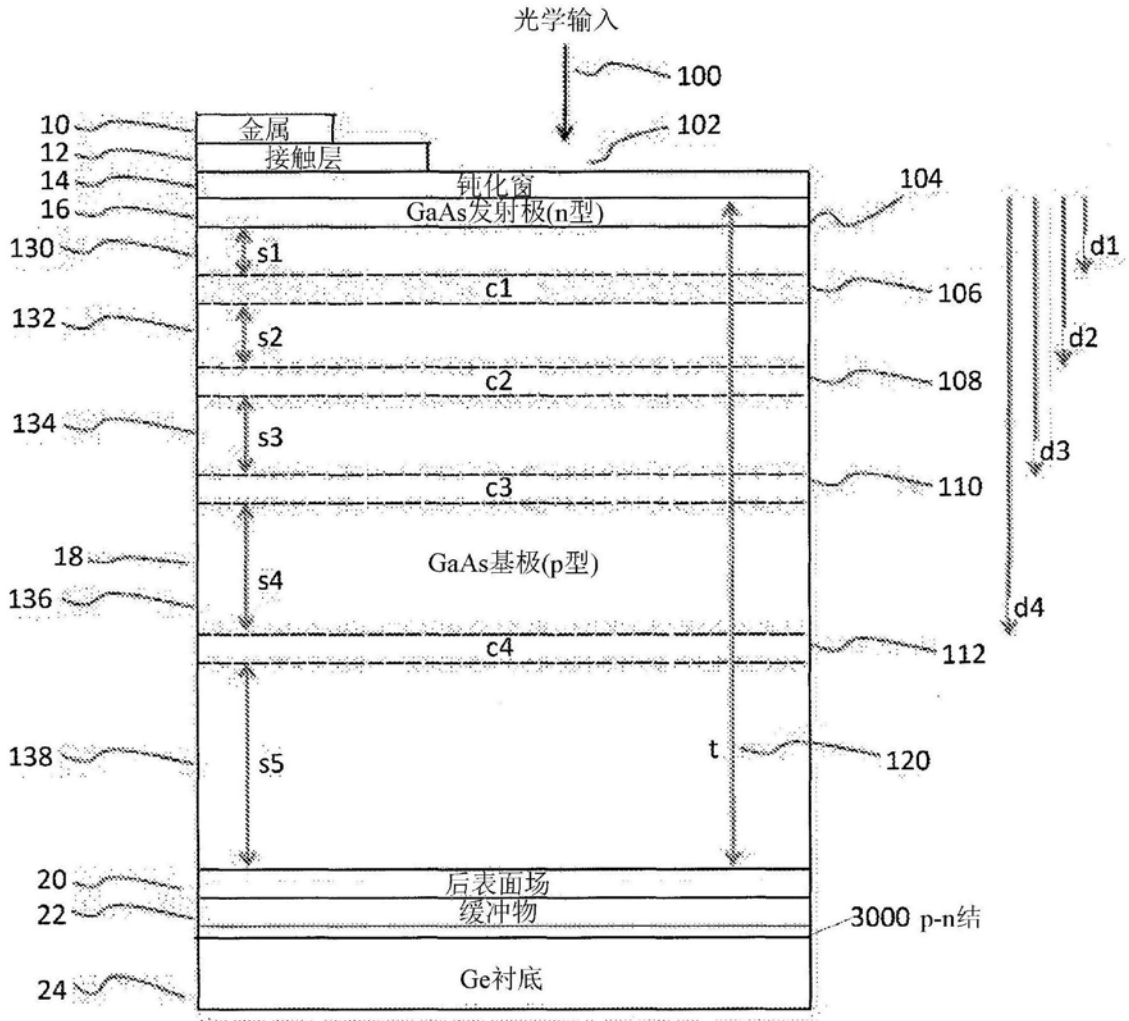


图21

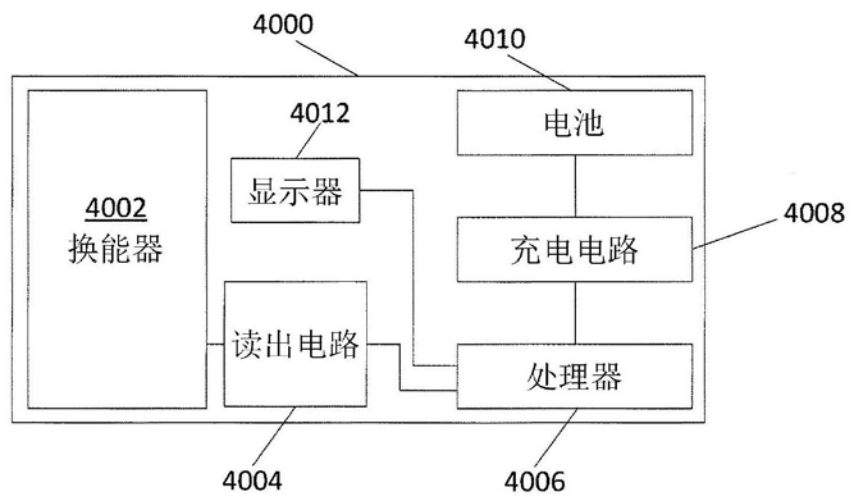


图22

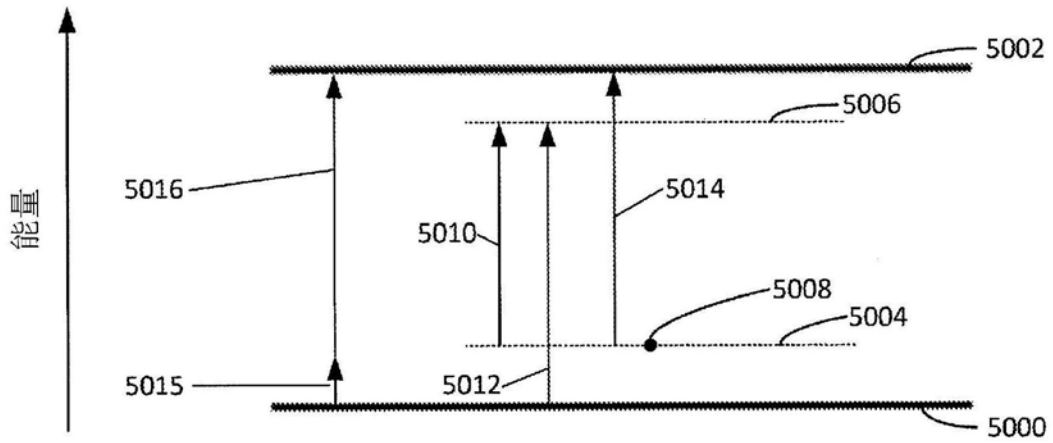


图23

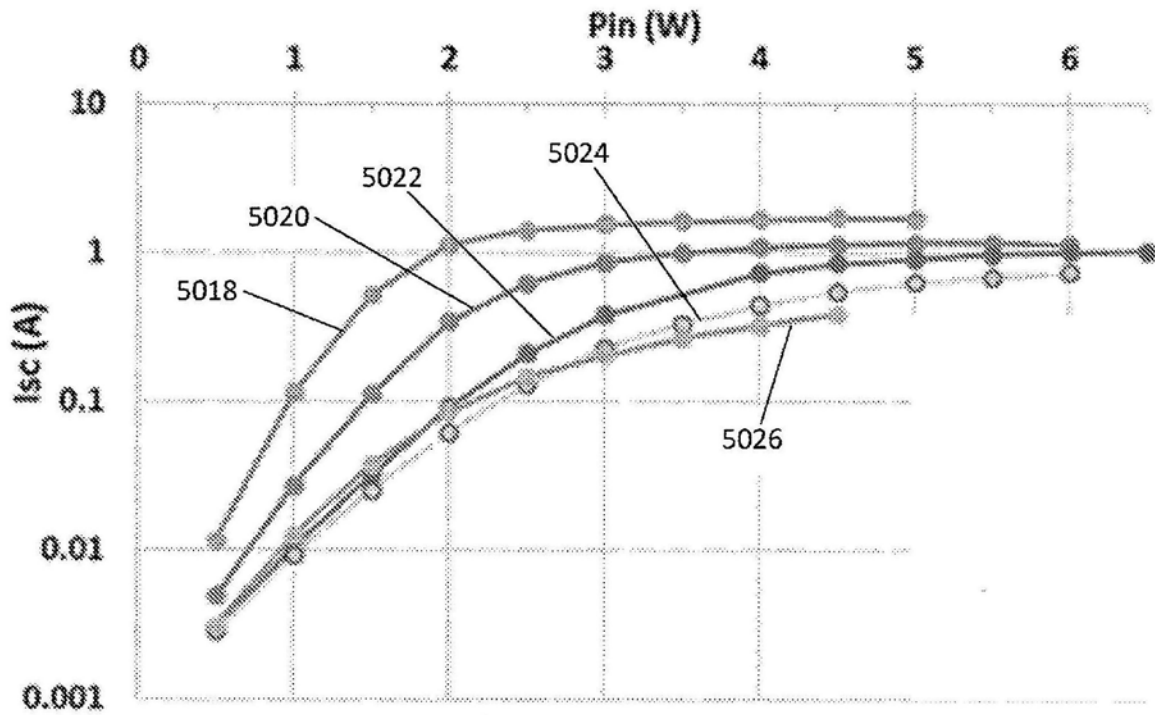


图24

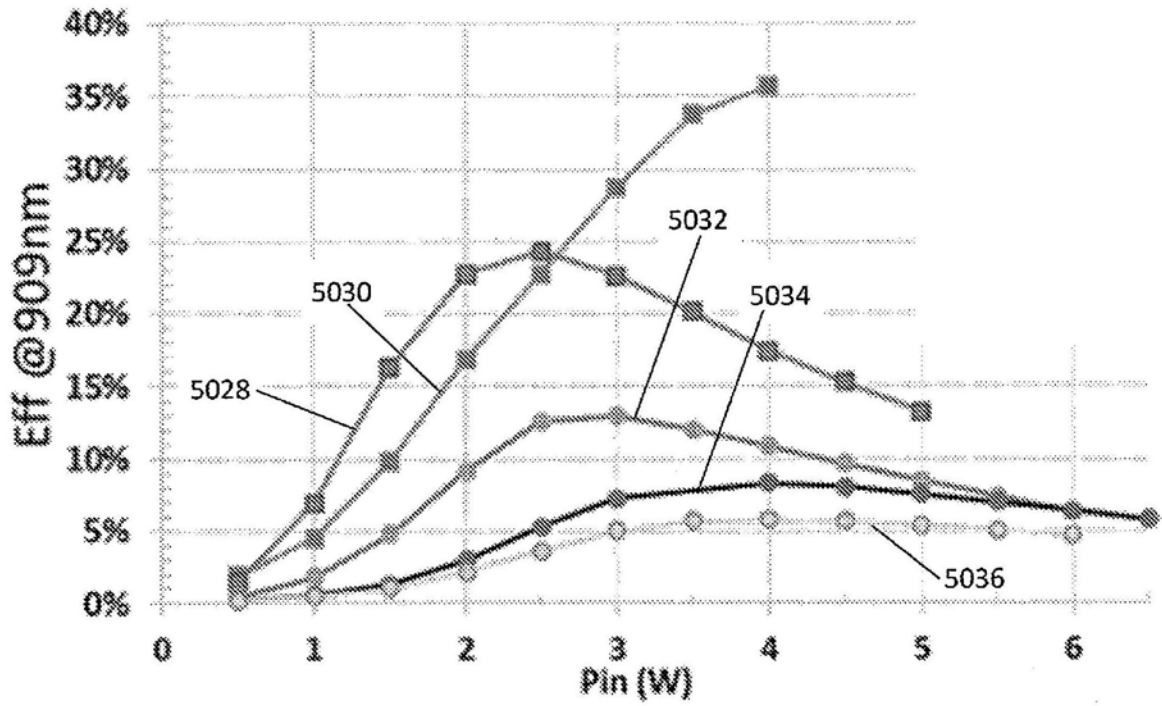


图25A

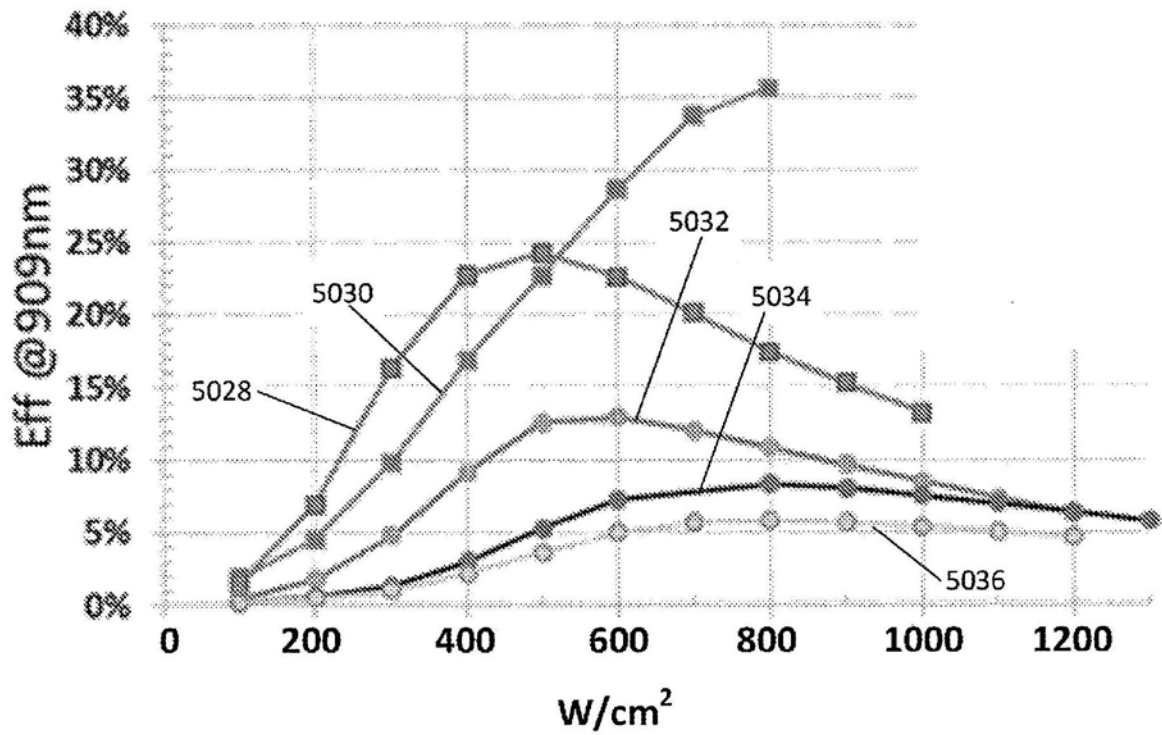


图25B

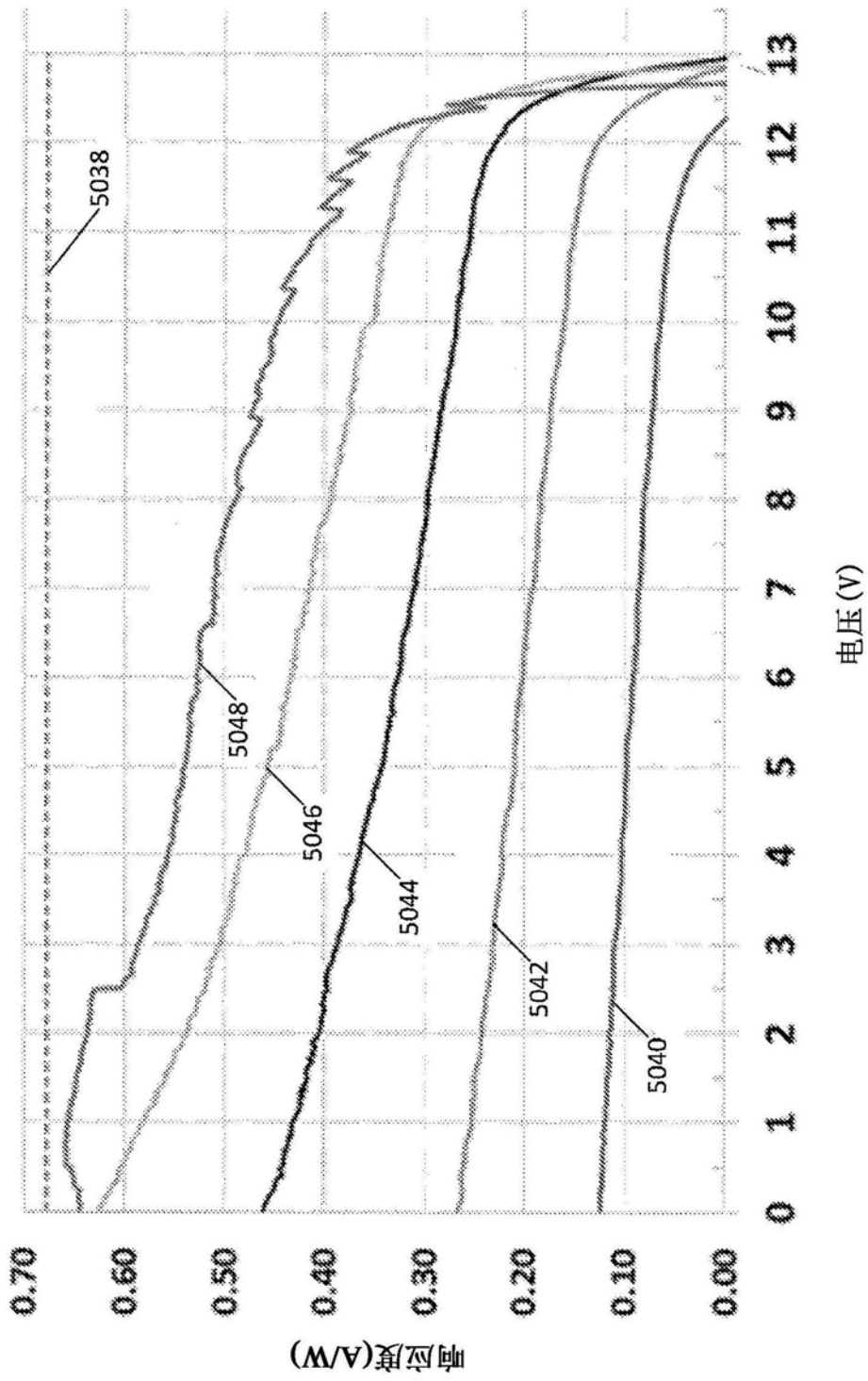


图26

830 nm 光交换器的性能与光学输入的波长

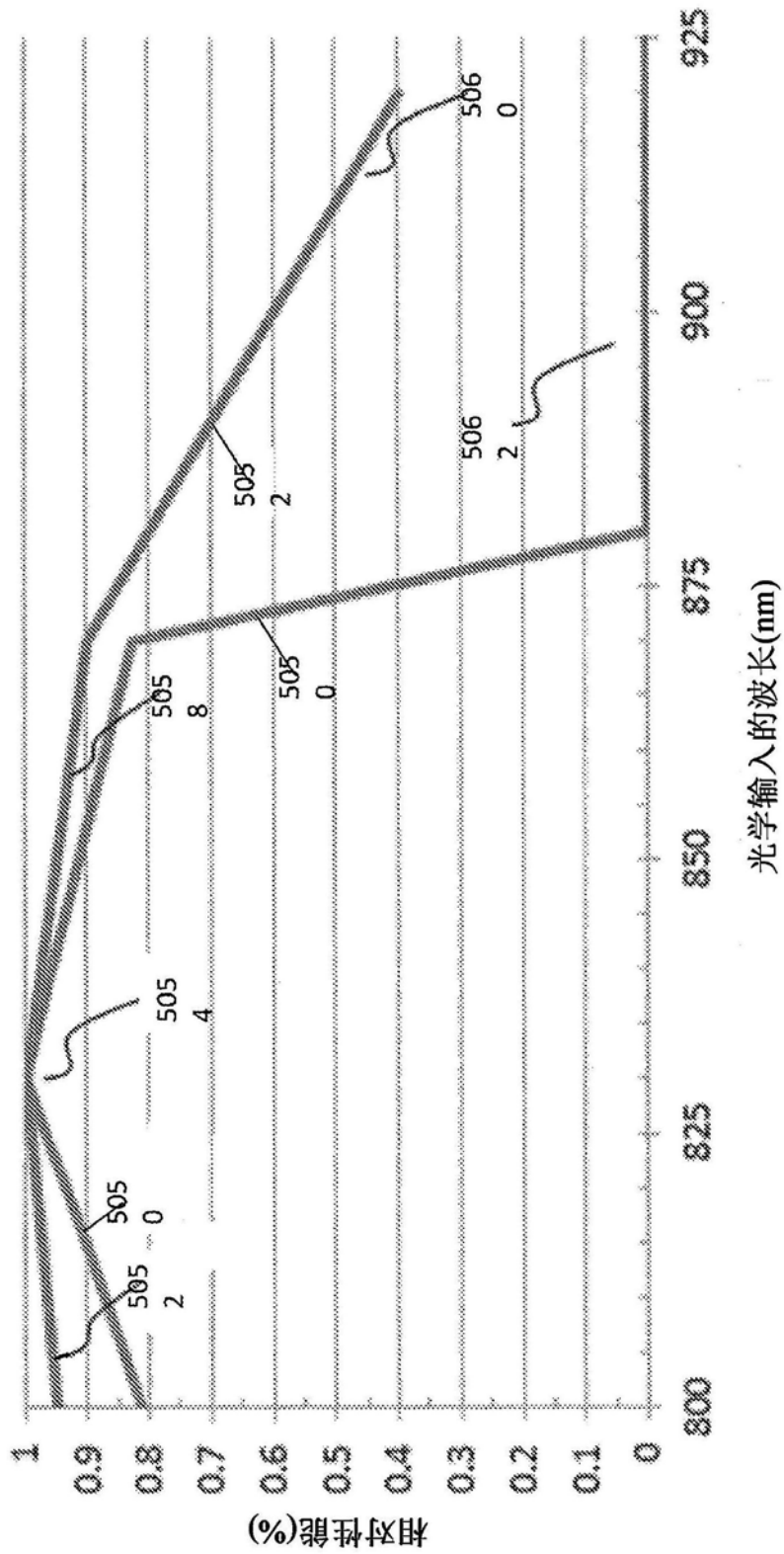


图27



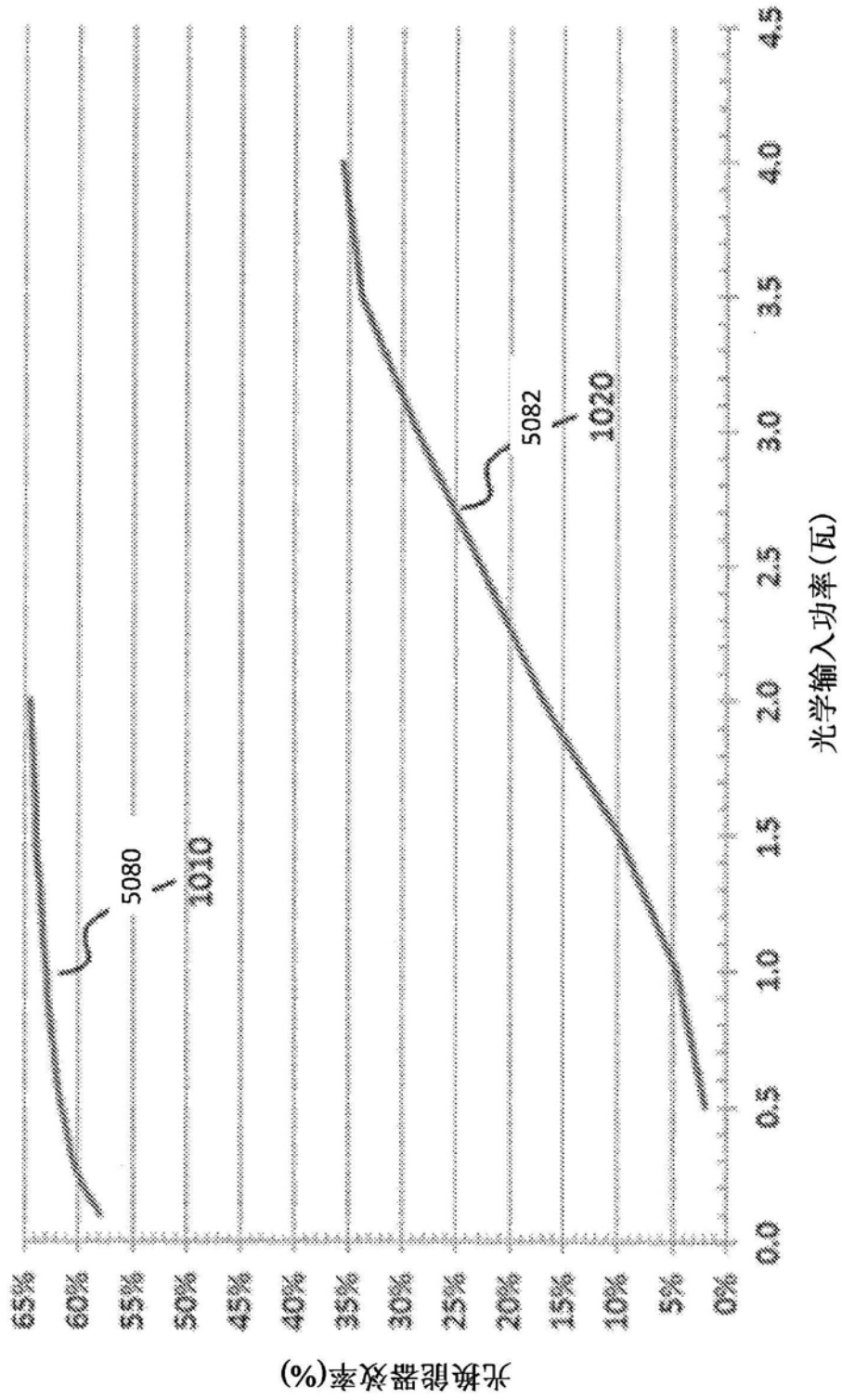


图28

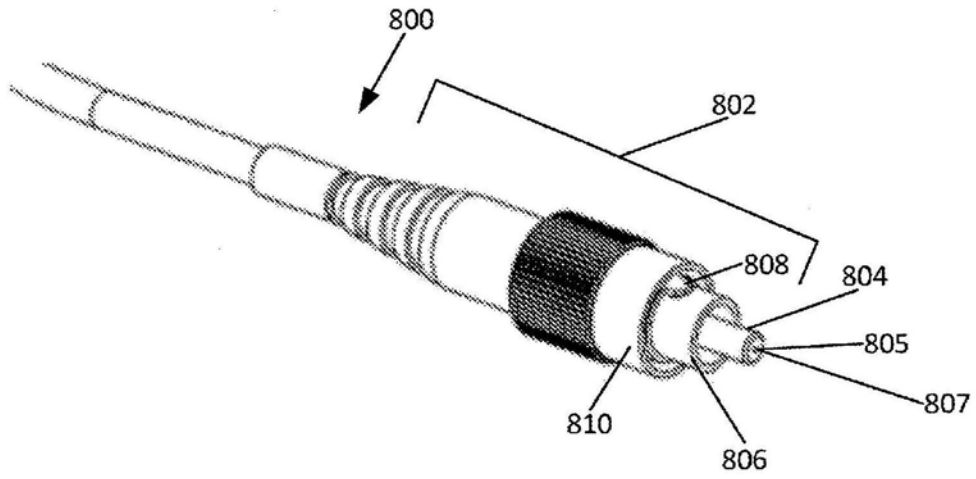


图29

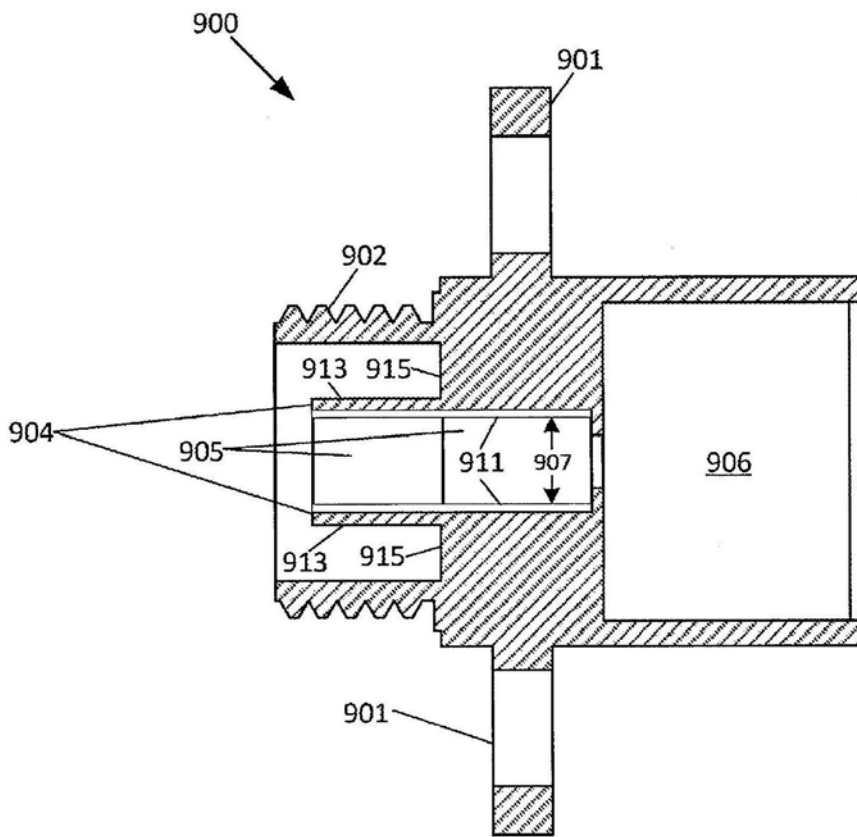


图30

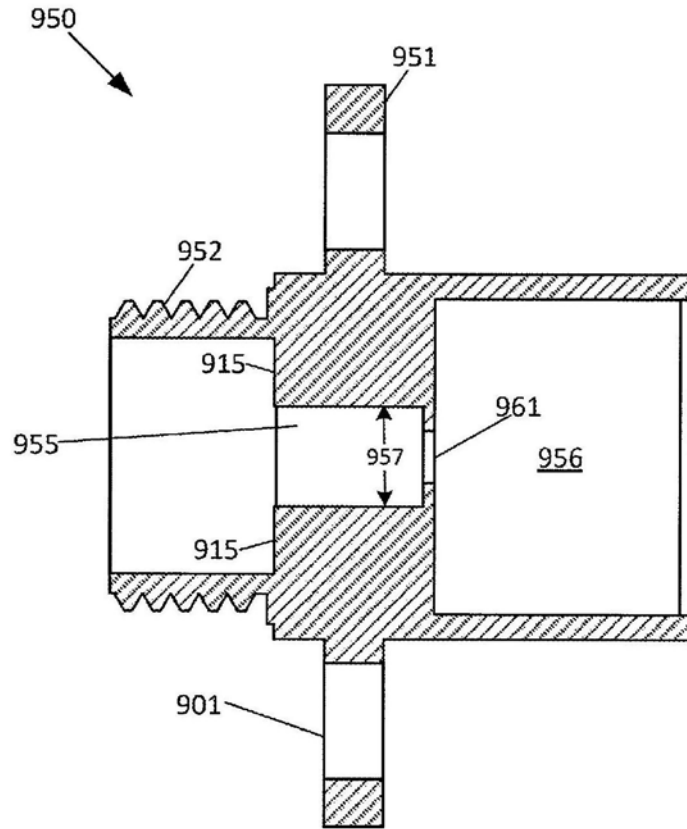


图31

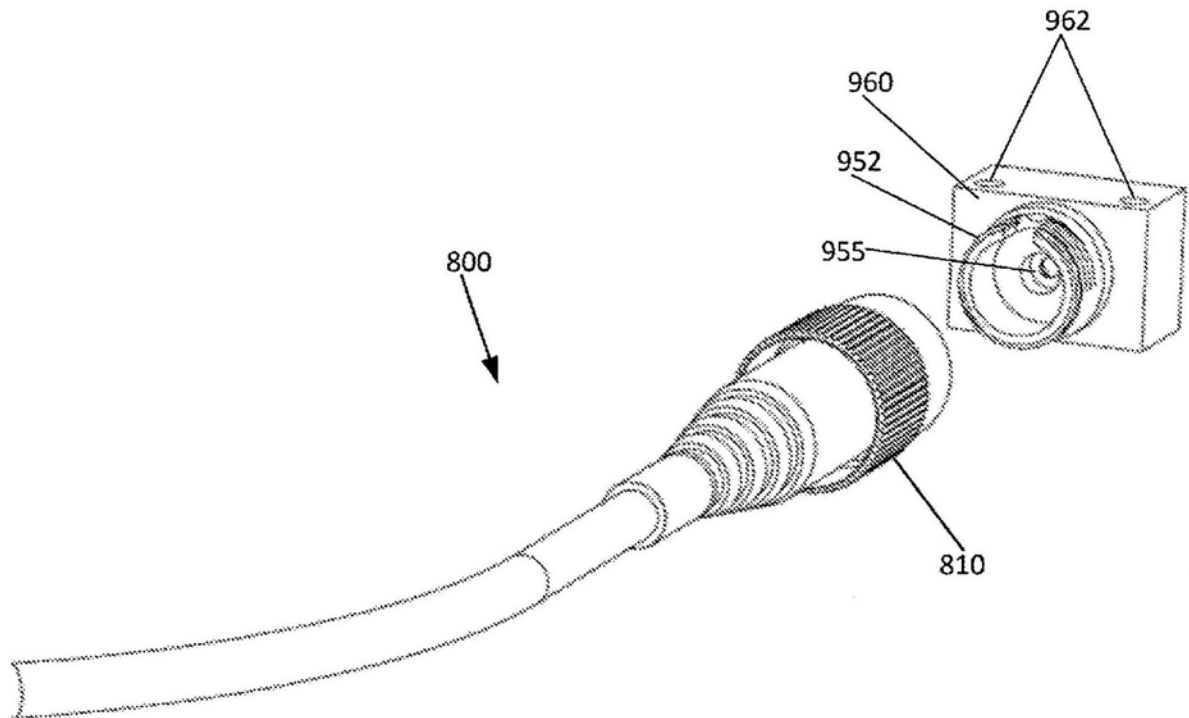


图32

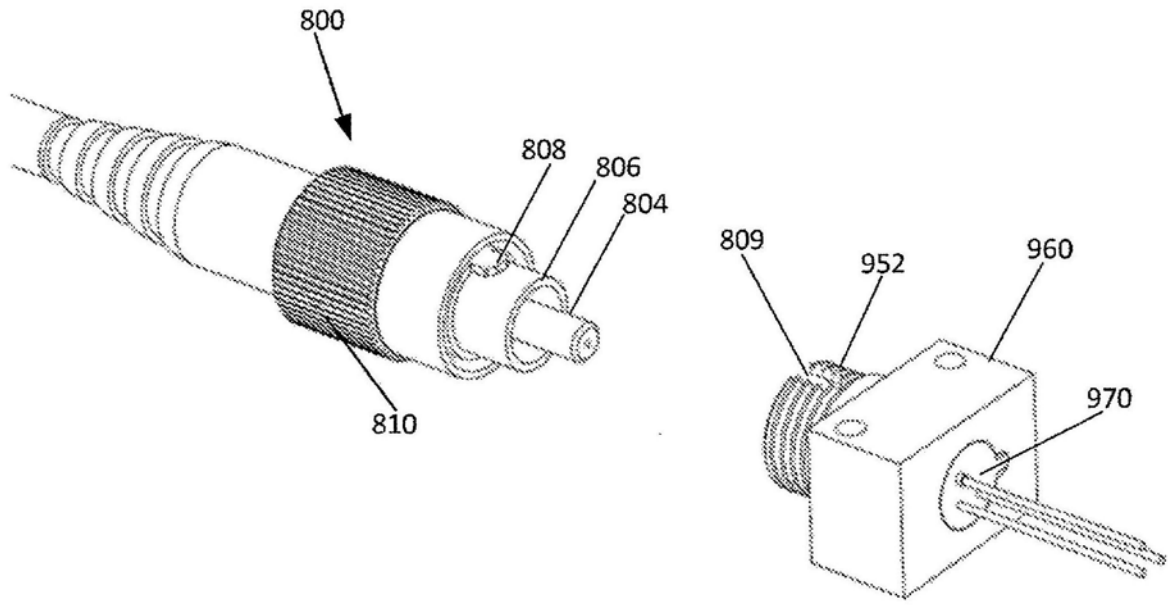


图33

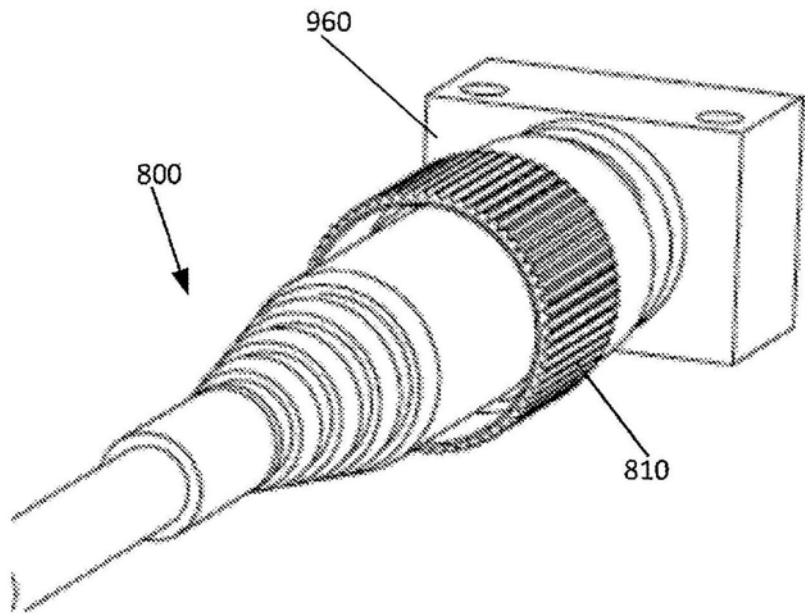


图34

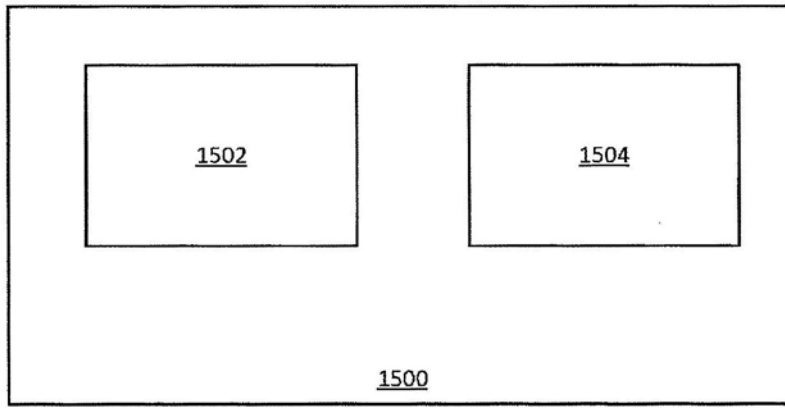


图35

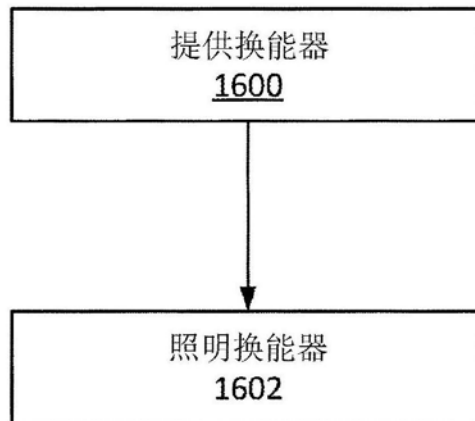


图36

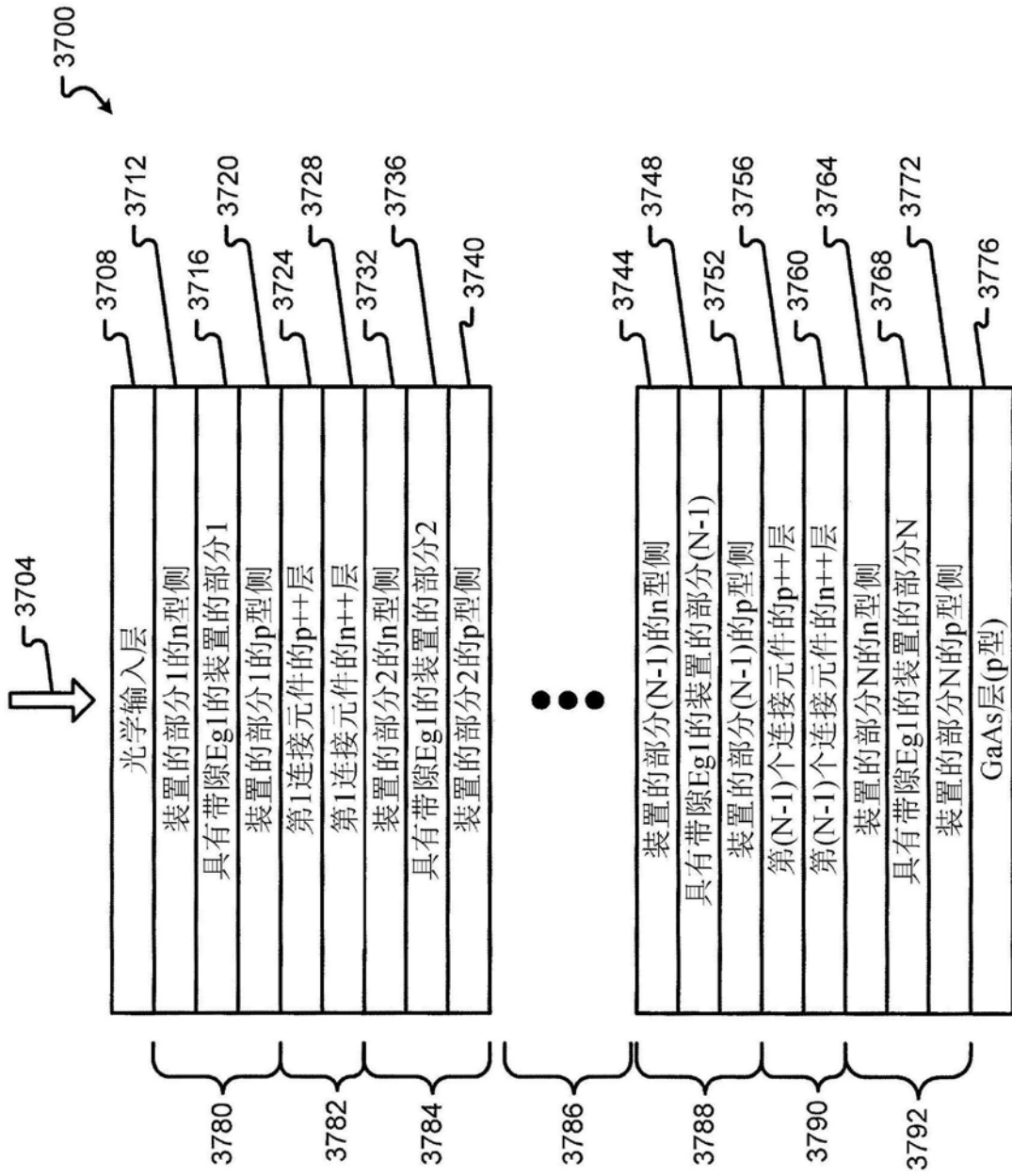


图37

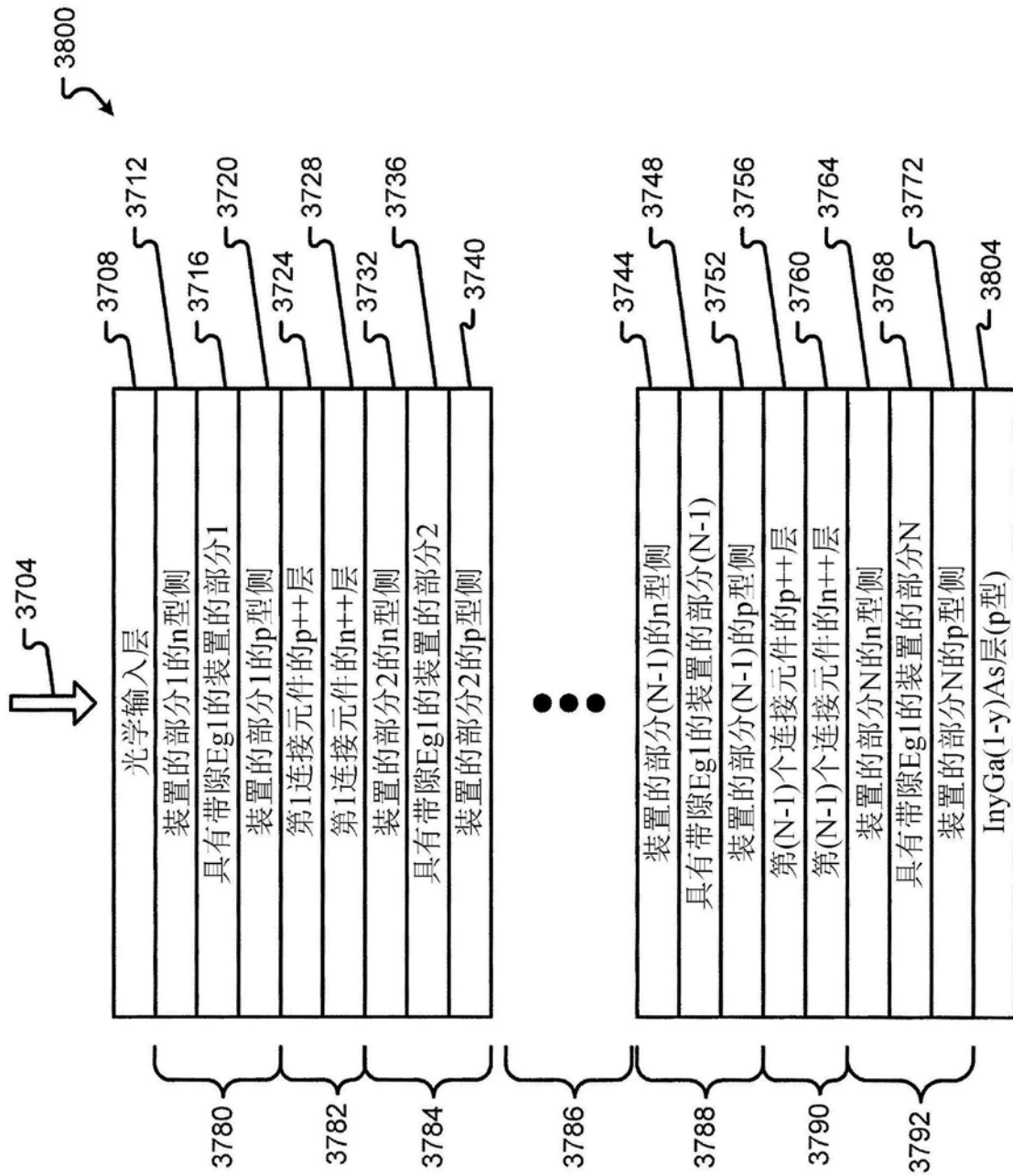


图38



图39



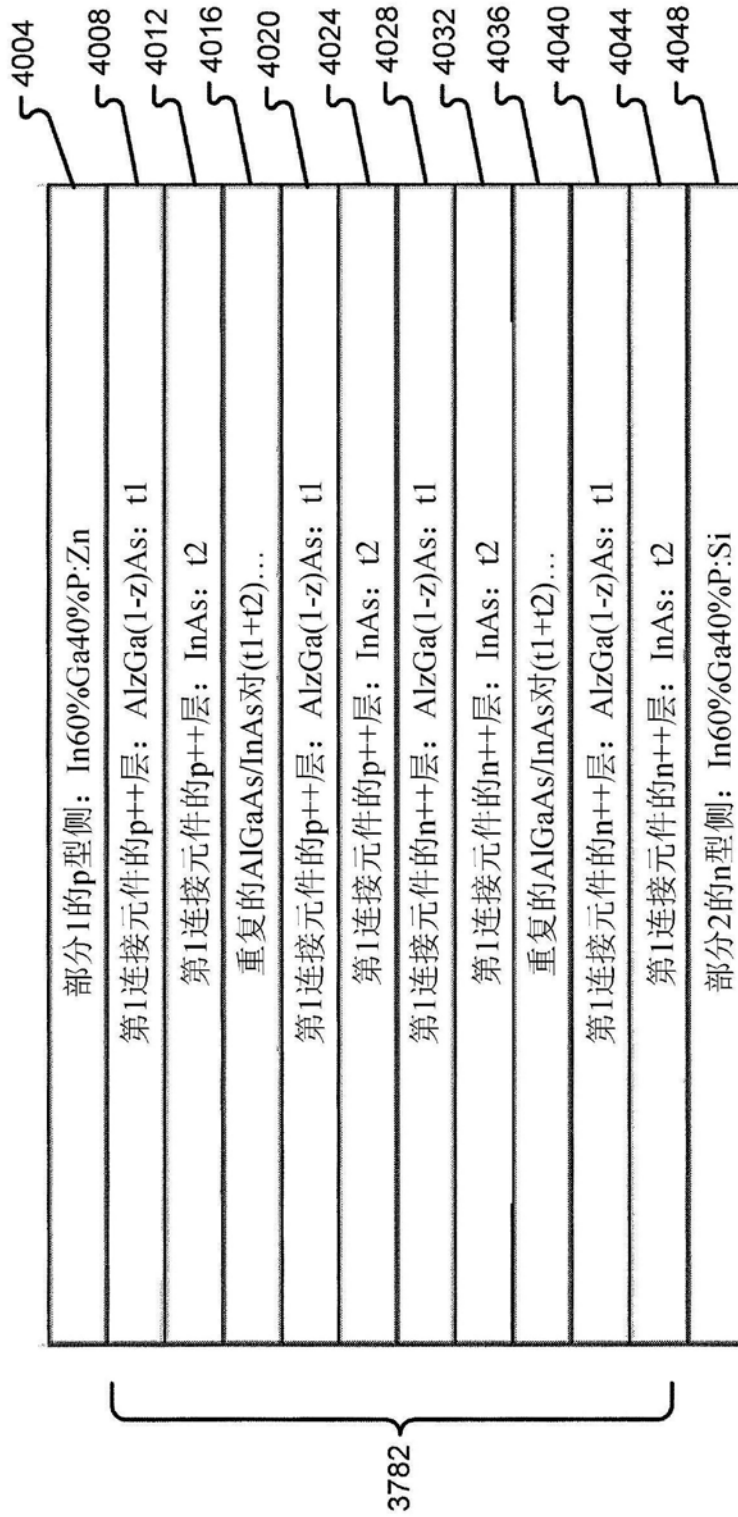


图40

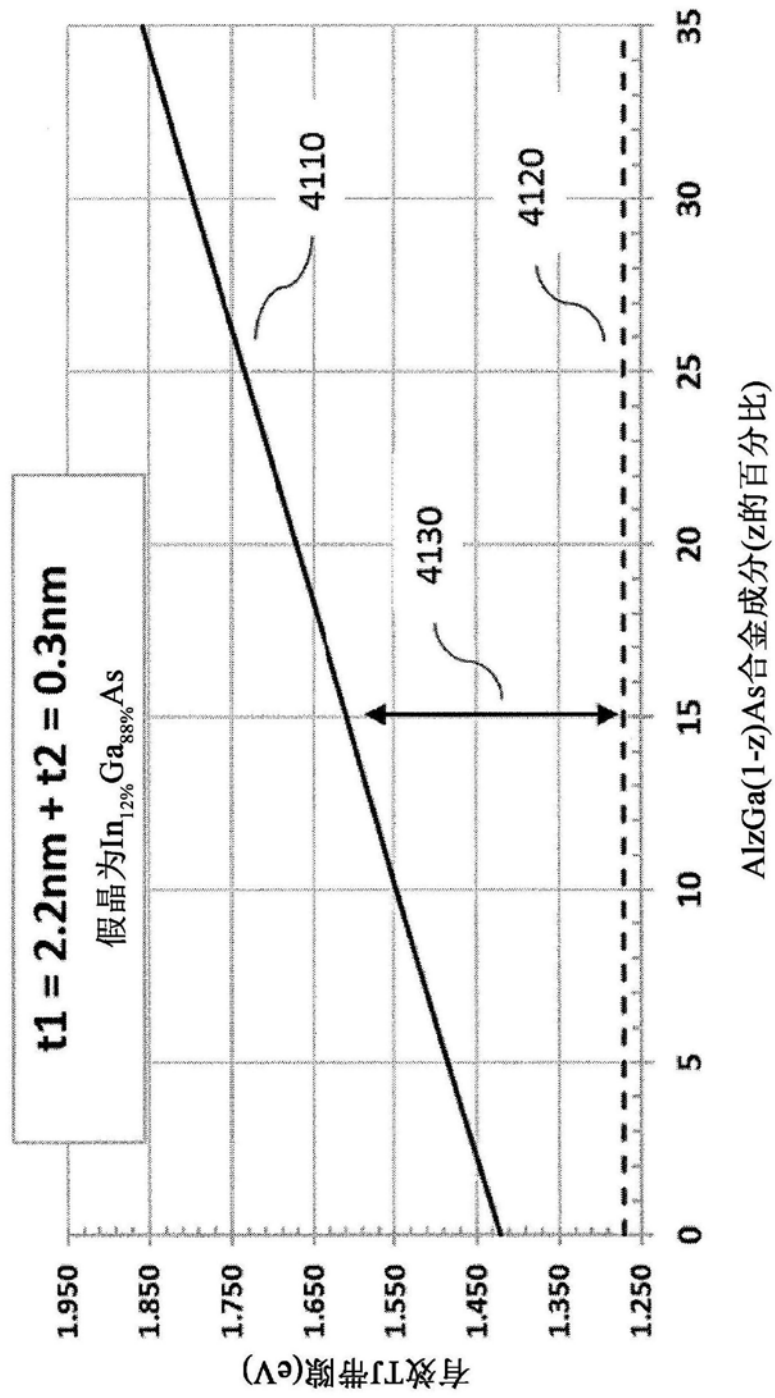


图41

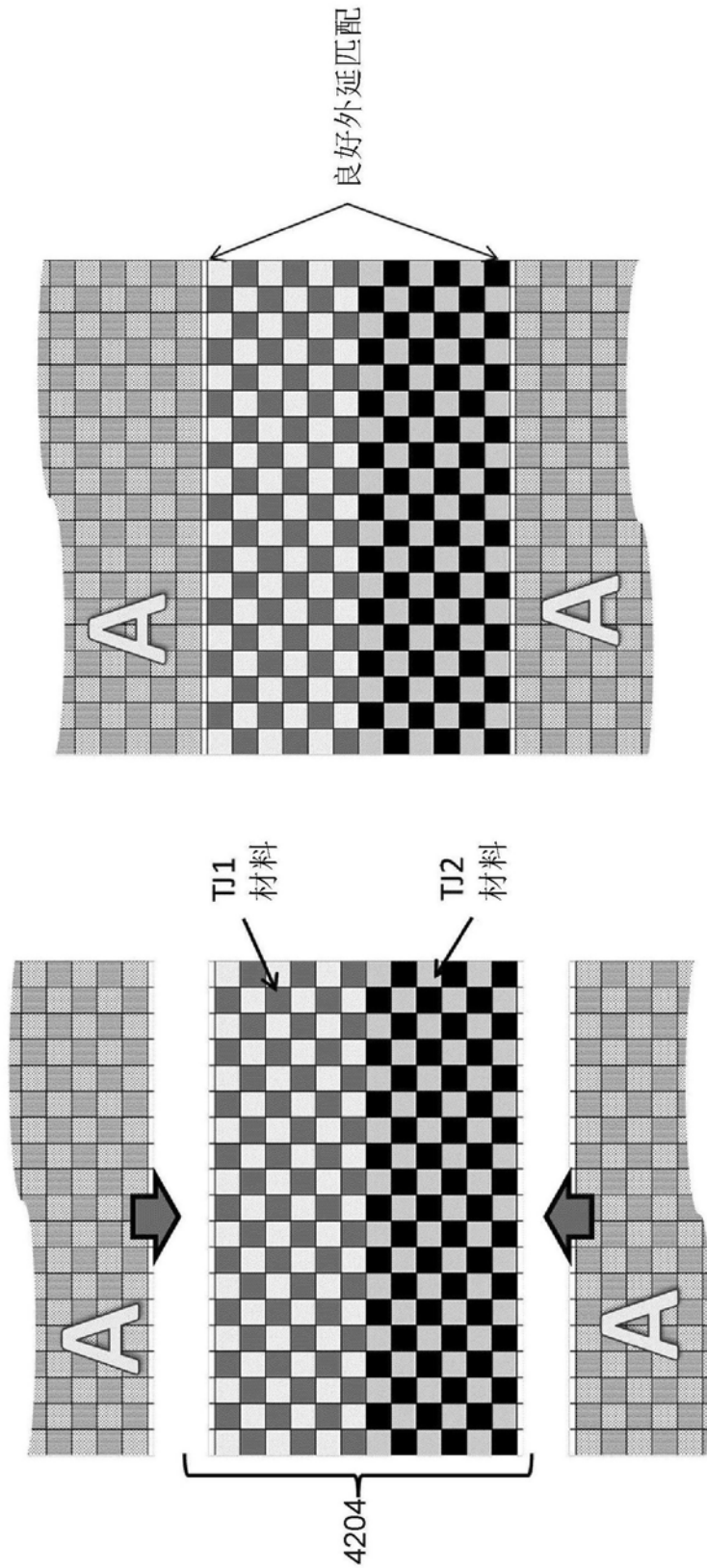


图42

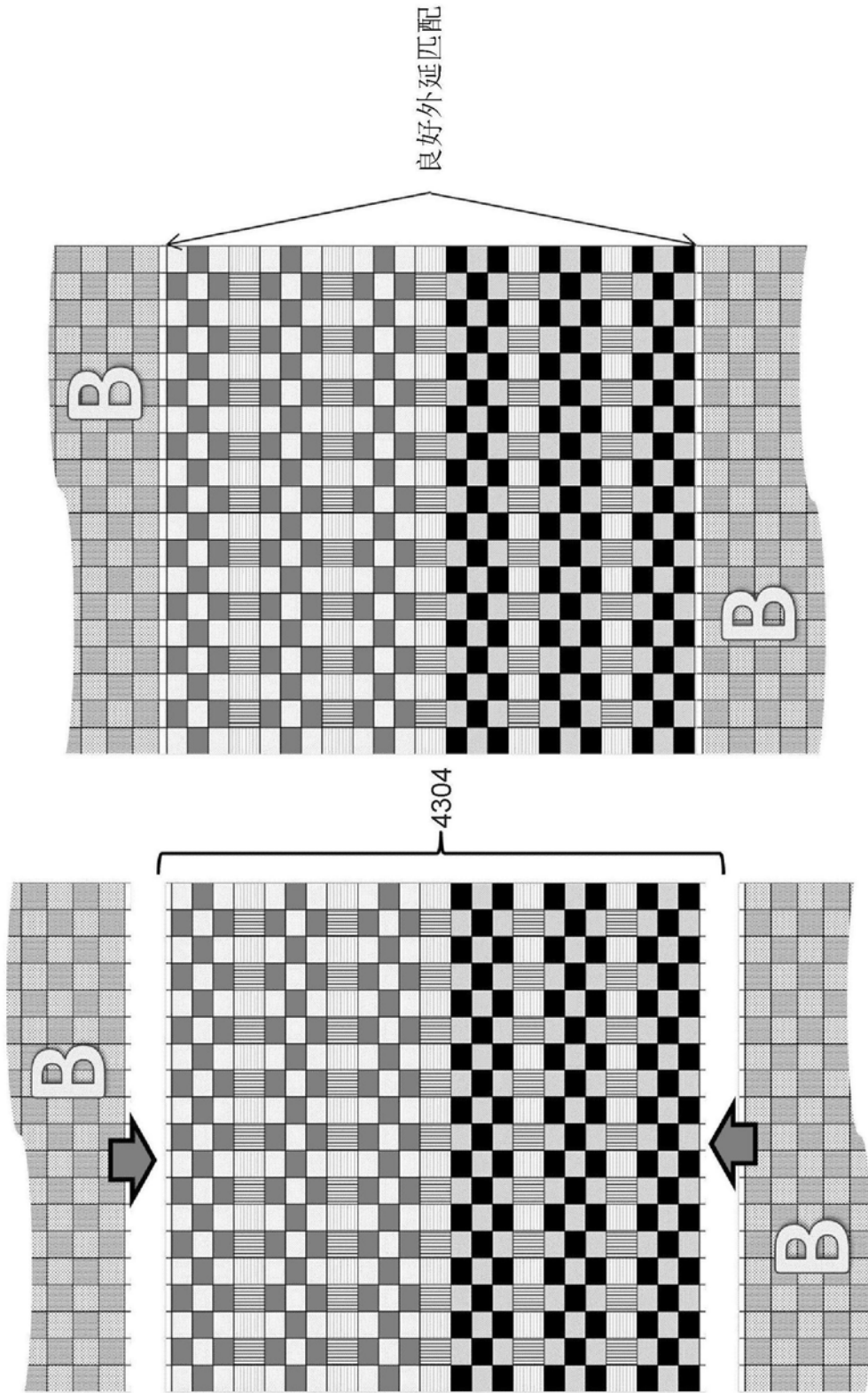


图43

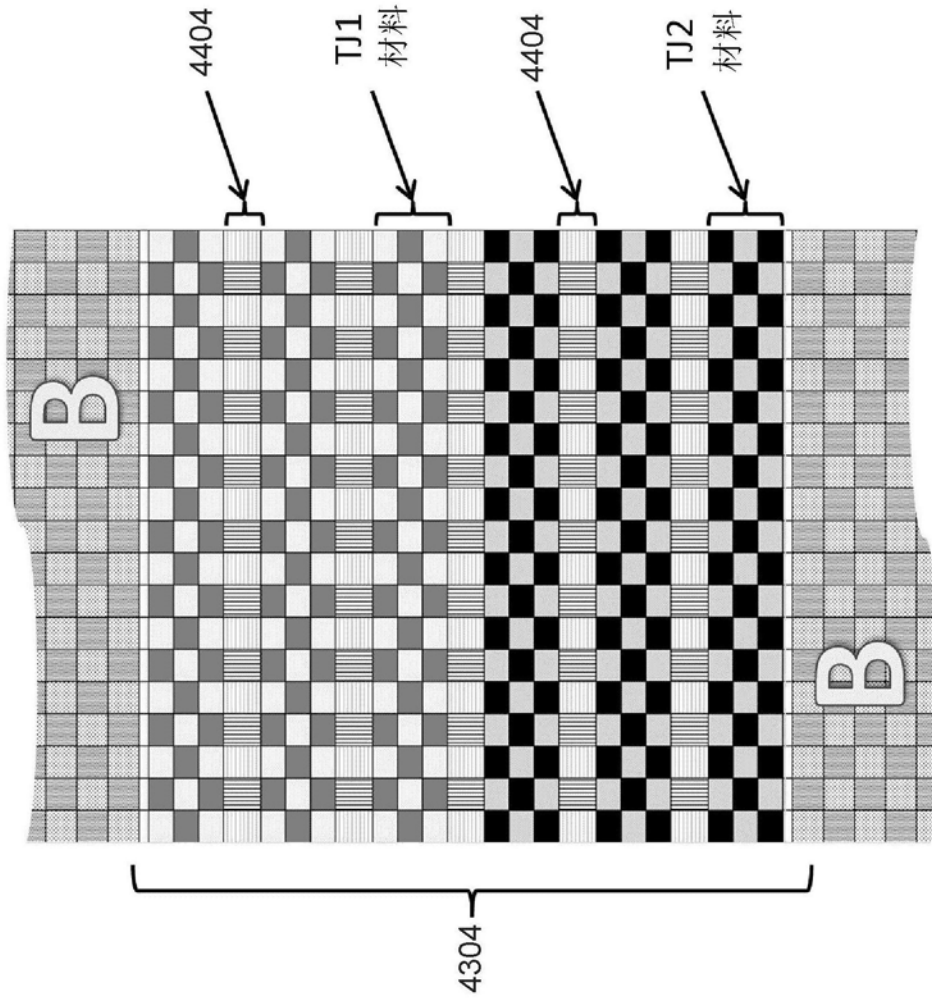


图44