



# (12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 106471687 A

(43)申请公布日 2017.03.01

(21)申请号 201580011021.6

(22)申请日 2015.02.24

(30)优先权数据

2014-039298 2014.02.28 JP

(85)PCT国际申请进入国家阶段日

2016.08.26

(86)PCT国际申请的申请数据

PCT/JP2015/055161 2015.02.24

(87)PCT国际申请的公布数据

W02015/129668 JA 2015.09.03

(71)申请人 国立研究开发法人科学技术振兴机构

地址 日本埼玉县

(72)发明人 野田进 井上卓也 浅野卓

M·德佐萨

(74)专利代理机构 北京林达刘知识产权代理事务所(普通合伙) 11277

代理人 刘新宇

(51)Int.Cl.

H01S 5/04(2006.01)

H01S 5/12(2006.01)

H01S 5/18(2006.01)

H01S 5/34(2006.01)

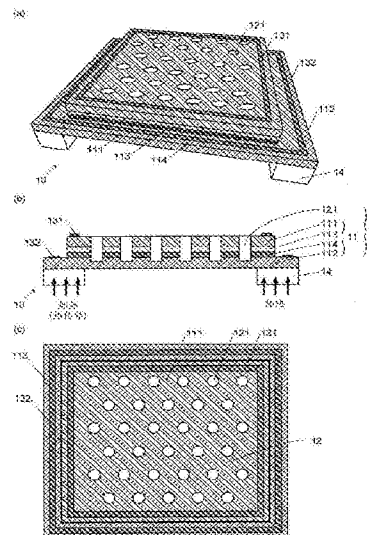
权利要求书1页 说明书10页 附图13页

## (54)发明名称

热辐射光源以及在该光源中使用的二维光子晶体

## (57)摘要

本发明提供一种能够以与光电转换元件同样快的响应速度进行光的强弱切换的热辐射光源。热辐射光源(10)具备:二维光子晶体(12),其在将由n型半导体形成的n层(112)、具有量子阱结构的量子阱结构层(114)以及由p型半导体形成的p层(111)依此序层叠而成的板材(11)内,周期性地配置有折射率与n层(112)、p层(111)及量子阱结构层(114)的折射率不同的异折射率区域(空孔(121)),使得与量子阱结构层(114)中的量子阱内的子带之间的跃迁能量对应的特定波长的光发生谐振;以及p型电极(131)和n型电极(132),其向板材(11)施加p层(111)侧为负、n层(112)侧为正的电压。



1. 一种热辐射光源,其特征在於,具备:
  - a) 二维光子晶体,其在将由n型半导体形成的n层、具有量子阱结构的量子阱结构层以及由p型半导体形成的p层依此序沿厚度方向层叠而成的板材内,周期性地配置有折射率与所述n层、所述p层及所述量子阱结构层的折射率不同的异折射率区域,使得与该量子阱结构层中的量子阱内的子带之间的跃迁能量对应的特定波长的光发生谐振;以及
  - b) 电极,其用于向所述板材施加所述p层侧为负且所述n层侧为正的电压。
2. 根据权利要求1所述的热辐射光源,其特征在於,  
所述量子阱结构层具有n型量子阱,在该量子阱结构层与所述p层之间具有由绝缘体形成的i层。
3. 根据权利要求1所述的热辐射光源,其特征在於,  
所述量子阱结构层具有p型量子阱,在该量子阱结构层与所述n层之间具有由绝缘体形成的i层。
4. 根据权利要求1~3中的任一项所述的热辐射光源,其特征在於,  
所述二维光子晶体具有使  $(1/(2\pi RC))$  大于或等于目标频率的电阻R和电容C。
5. 根据权利要求1~4中的任一项所述的热辐射光源,其特征在於,  
所述p层和所述n层中的、载流子的有效质量大的一方的载流子密度比载流子的有效质量小的一方的载流子密度高。
6. 根据权利要求1~5中的任一项所述的热辐射光源,其特征在於,  
所述电极是金属制的p电极和金属制的n电极,该p电极与所述p层接触,与形成该p层的p型半导体之间形成欧姆接合,该n电极与所述n层接触,与形成该n层的n型半导体之间形成欧姆接合。
7. 根据权利要求1~6中的任一项所述的热辐射光源,其特征在於,  
所述电极在所述板材的表面中的至少一个表面以围绕周期性地配置有所述异折射率区域的配置区域的方式设置。
8. 根据权利要求1~7中的任一项所述的热辐射光源,其特征在於,  
还具备通过电力来加热所述二维光子晶体的加热装置。
9. 一种二维光子晶体,在热辐射光源中使用,该二维光子晶体的特征在於,具备:  
板材,该板材是将由n型半导体形成的n层、具有量子阱结构的量子阱结构层以及由p型半导体形成的p层依此序沿厚度方向层叠而成的;以及  
异折射率区域,该异折射率区域的折射率与所述n层、所述p层及所述量子阱结构层的折射率不同,在所述板材内周期性地配置该异折射率区域,使得与所述量子阱结构层中的量子阱内的子带之间的跃迁能量对应的特定波长的光发生谐振。

## 热辐射光源以及在该光源中使用的二维光子晶体

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种热辐射光源以及在该热辐射光源中使用的二维光子晶体。热辐射光源是将通过热辐射而放射的电磁波作为光源的装置,但能够当作以热为输入来输出光(电磁波)的热-光转换装置。在所输入的该热由电磁波(红外线)提供的情况下,还能够当作波长转换装置。另外,也能够当作通过接入电能而不接入热来产生热辐射的装置。本申请中的“热辐射光源”将这些装置均作为对象。

### 背景技术

[0002] 热辐射光源具有以下优点:仅对物体提供热就能够得到发光。热辐射光源例如能够作为将引擎的废热转换为用于感测的红外线的光源而适当地使用在对引擎的排气中的成分进行分析的气体传感器中。另外,热辐射光源不限于用作气体传感器的光源,还能够用作探测人、汽车、动物等的进入的传感器等使用红外线的各种传感器的光源。

[0003] 被提供热的物体所发出的电磁波的波谱所跨越的波长范围大。例如通过将物体加热到数十℃~数百℃而得到的电磁波的波长范围为数 $\mu\text{m}$ ~数十 $\mu\text{m}$ 。但是,在前述的红外线传感器中一般仅利用特定波长的红外线,因此当使用这种热辐射光源时,会产生向被测定物照射特定波长以外的不需要的红外线而将被测定物加热等不良影响。另外,在通过接入电能来产生热辐射的情况下,若是产生宽频带的辐射的光源,则消耗电力增大会成为问题。

[0004] 为了解决这种问题,在非专利文献1中提出了一种热辐射光源,该热辐射光源具有板材和异折射率区域,该板材具有后述的量子阱结构,该异折射率区域在该板材内周期性地配置,折射率与该板材的折射率不同。量子阱结构是指以下结构:通过将能带隙的大小不同的多种厚度为数nm~十数nm左右的半导体的层进行层叠,来形成阱型的能量势(量子阱)。另外,通过在板材内周期性地配置异折射率区域,来形成折射率的周期性分布。将像这样在板材内形成周期性的折射率分布之物称为“二维光子晶体”。已知的是,在二维光子晶体中形成具有与折射率分布的周期对应的特定波长的光的驻波,由此该特定波长的光发生谐振。

[0005] 在非专利文献1的热辐射光源中,当从热源供给热时,在形成于量子阱内的能带(与半导体的带相区别而被称为“子带”)之间发生能量跃迁,由此,生成在特定波长范围内的波长的光。而且,该波长范围的光中的具有由光子晶体的周期决定的特定波长的光在光子晶体中谐振。由此,非专利文献1的热辐射光源能够生成具有在该特定波长处具有尖锐的峰的波长谱的光。

[0006] 非专利文献1:De Zoysa Menaka(德索伊萨梅纳卡)等著、“Conversion of broadband to narrow band thermal emission through energy recycling”(基于能量回收的从宽带热辐射向窄带热辐射的转换)、Nature Photonics、(英国)、Nature Publishing Group、2012年7月8日、第6卷、535~539页

### 发明内容

[0007] 发明要解决的问题

[0008] 在使用红外线的传感器中,会产生由于环境温度的变动而产生的噪声、因电源的交流电力等引起的100Hz以下的低频噪声等,给测定带来不良影响。因此,在这种传感器中进行如下的利用强度调制的噪声去除处理:在光源中生成强度以1,000Hz~100,000Hz(1kHz~100kHz)左右的频率发生变化的红外线,在检测部中仅检测强度以该频率发生变化的红外线,由此去除噪声。典型地说,使用通过红外光的强度不同的2个值(“强”与“弱”或者“ON(开启)”与“OFF(关闭)”)的切换而生成的矩形波来进行强度调制。在将激光二极管等将电力直接转换为光的光电转换元件用作光源的情况下,只要使电力周期性地ON/OFF就能够容易地生成具有反复在“ON”与“OFF”之间进行红外光的输出的矩形波的红外线。但是,在以往的热辐射光源中,作为输出的光的强度切换是只通过作为输入的加热与该加热的停止的切换、或者加热与冷却的切换来进行的,切换的响应速度远慢于光电转换元件的切换的响应速度。因此,热辐射光源最多只能以1Hz~100Hz左右的低频率进行强度调制,难以直接应用于使用强度调制的传感器,因此需要附加以机械方式使光路ON/OFF的外部设备。

[0009] 本发明要解决的问题在于提供一种能够以与光电转换元件同样快的响应速度进行光的强弱切换的热辐射光源。

[0010] 用于解决问题的方案

[0011] 为了解决上述问题而形成的本发明所涉及的热辐射光源的特征在于,具备:

[0012] a) 二维光子晶体,其在将由n型半导体形成的n层、具有量子阱结构的量子阱结构层以及由p型半导体形成的p层依此序沿厚度方向层叠而成的板材内,周期性地配置有折射率与所述n层、所述p层及所述量子阱结构层的折射率不同的异折射率区域,使得与该量子阱结构层中的量子阱内的子带之间的跃迁能量对应的特定波长的光发生谐振;以及

[0013] b) 电极,其用于向所述板材施加所述p层侧为负且所述n层侧为正的电压。

[0014] 使用图1和图2来说明本发明所涉及的热辐射光源的动作。关于量子阱,根据形成量子阱结构的半导体的种类不同,存在将电子束缚在导带中的n型量子阱和将空穴束缚在价带中的p型量子阱这两种量子阱。

[0015] 首先,使用图1来说明量子阱结构层是具有n型的量子阱的n型量子阱结构层的情况。将n层、n型量子阱结构层以及p层依此序沿厚度方向层叠而成的上述板材在未被施加电压的状态下形成图1的(a)所示的能态。在该能态中,隔着各层共同的(与电子有关的)费米能级 $E_f$ 而形成有价带和导带,在n层,导带中存在电子,在p层,价带中存在空穴。而且,在量子阱结构层中,在导带中形成有量子阱,电子被束缚在量子阱内。在量子阱内形成有量子化后的多个能级(子带)。当对二维光子晶体进行加热时,量子阱内的电子由于热能而在子带间被激发,之后恢复为基态(子带间跃迁),此时生成与基态同激发态之间的能量差对应的波长的光。子带间跃迁具有某种程度的带宽,关于该频带中与异折射率区域的周期对应的上述特定波长的光,通过在二维光子晶体内形成驻波而变为谐振态。由此,该特定波长的光从热辐射光源被放出到外部。

[0016] 接着,当从电极向板材施加p层侧为负、n层侧为正的电压时,如图1的(b)所示,以n层的能带为基准而观察到的p层的价带的能量上升,原本存在于量子阱结构层的量子阱内的电子中的一部分移动到n层。由此,量子阱内的电子减少,因此有助于对二维光子晶体进行加热时发生的子带间跃迁的电子也减少。由此,通过子带间跃迁而生成的光的强度降低,

因此在二维光子晶体中谐振后被放出到外部的上述特定波长的光的强度也降低。

[0017] 如上所述,在本发明所涉及的热辐射光源中,能够通过施加电压的切换来进行在该电压OFF时“强”、在该电压ON时“弱”这样的光的强弱切换。相比于由加热与该加热的停止的切换或者加热与冷却的切换而引起的温度变化的速度,这种电压的切换能够以非常快的速度进行,而且量子阱内的电子数的变化大致追随电压的切换,因此本发明所涉及的热辐射光源中的光的强弱切换能够以与光电转换元件同样快的响应速度进行。

[0018] 在量子阱结构层是具有p型的量子阱的p型量子阱结构层的情况下,如图2所示,在价带中形成有量子阱,空穴被束缚在量子阱内。当对二维光子晶体进行加热时,在量子阱内的空穴发生子带间跃迁。以下方面与n型量子阱结构层的情况相同:通过该子带间跃迁而生成具有某种程度的波长的带宽的光;以及该频带中的上述特定波长的光在二维光子晶体内变为谐振态,由此该特定波长的光从热辐射光源被放出到外部。

[0019] 而且,当从电极向板材施加p层侧为负、n层侧为正的电压时,如图2的(b)所示,以p层的能带为基准而观察到的n层的导带的能量下降,原本存在于量子阱结构层的量子阱内的空穴中的一部分移动到p层。由此,量子阱内的空穴减少,因此有助于加热时的子带间跃迁的空穴也减少,通过子带间跃迁而生成的光的强度降低,因此在二维光子晶体中谐振后被放出到外部的上述特定波长的光的强度也降低。

[0020] 本发明所涉及的热辐射光源也可以是,在所述量子阱结构层具有n型量子阱的情况下,在该量子阱结构层与所述p层之间具有由绝缘体形成的i层,在所述量子阱结构层具有p型量子阱的情况下,在该量子阱结构层与所述n层之间具有由绝缘体形成的i层。如下面所叙述的那样,该i层利用其厚度来减小热辐射光源的电容C,由此有助于提高动作速度(频率)。

[0021] 在本发明所涉及的热辐射光源中,动作速度的上限是由从外部施加的电压实际施加于量子阱为止的延迟时间来决定的,以上述二维光子晶体的电阻R与电容C之积的倒数来表示的频率( $1/(2\pi RC)$ )为上限频率。该上限频率是光的强度的ON/OFF比为-3dB的频率。因此,优选的是,上述二维光子晶体具有使( $1/(2\pi RC)$ )大于或等于目标频率的电阻R和电容C。电阻R能够利用p层的空穴和n层的电子的添加密度来控制。另外,电容C能够利用各层的厚度来控制,但是优选的是,设置所述i层并利用其厚度控制电容C,以不对空穴数和电子数造成影响。其中,原因如下:若过多地添加电子/空穴则会在不需要的波长频带产生热辐射。另外,也能够利用二维光子晶体的面积S来调整电阻R和电容C。面积S越小,则电阻R和电容C越小,越能够提高上限频率。通过适当地设定该电阻R和该电容C,能够实现适于作为上述的传感器的光源的具有1kHz~100kHz的动作频率的热辐射光源,并且还能够实现不受大气的状态左右的能够在自由空间通信的信号源中使用的具有10MHz~50MHz的动作频率的热辐射光源。

[0022] 在本发明所涉及的热辐射光源中,优选的是,所述p层和所述n层中的、载流子(在p层中为空穴,在n层中为电子)的有效质量大的一方的载流子密度比载流子的有效质量小的一方的载流子密度高。在相同的载流子密度下,一般来说有效质量大的载流子呈现更高的电阻,因此与有效质量小的载流子相比,若以有效质量大的载流子的密度进行调整,则通过减小二维光子晶体的电阻R来提高动作频率的效果更为显著。另外,在不容易产生不需要的热辐射这一点上,也是与有效质量小的载流子相比,以有效质量大的载流子的密度进行调

整更优选。

[0023] 在本发明所涉及的热辐射光源中,优选的是,作为所述电极,使用金属制的p电极和金属制的n电极,该p电极与所述p层接触,与形成该p层的p型半导体之间形成欧姆接合,该n电极与所述n层接触,与形成该n层的n型半导体之间形成欧姆接合。欧姆接合是指以不在半导体与金属间产生整流作用就能够得到与遵守欧姆定律的电导接近的导通状态的方式进行接合,用于与产生整流作用的肖特基接合相对比。

[0024] 在本发明所涉及的热辐射光源中,优选的是,所述电极在所述板材的表面中的至少一个表面以围绕周期性地配置有所述异折射率区域的配置区域的方式设置。由此,能够不被电极遮挡地从该配置区域放出光。

[0025] 优选的是,本发明所涉及的热辐射光源还具备通过电力来加热所述二维光子晶体的加热装置。作为该加热装置,能够使用从上述电极向n层和/或p层流通电流的装置、在上述电极的周围另外设置加热装置用的电极来进行同样的加热的装置,或者能够使用通过另外设置高电阻的布线并流通电流来进行加热的机构。另外,也可以使用以下手法:光源本身不设置加热装置,而是通过与另外的热源接触来使光源的温度上升。

[0026] 本发明所涉及的二维光子晶体在热辐射光源中使用,该二维光子晶体的特征在于,具备:

[0027] 板材,该板材是将由n型半导体形成的n层、具有量子阱结构的量子阱结构层以及由p型半导体形成的p层依此序沿厚度方向层叠而成的;以及

[0028] 异折射率区域,该异折射率区域的折射率与所述n层、所述p层及所述量子阱结构层的折射率不同,在所述板材内周期性地配置该异折射率区域,使得与所述量子阱结构层中的量子阱内的子带之间的跃迁能量对应的特定波长的光发生谐振。

[0029] 发明的效果

[0030] 根据本发明,得到能够以与光电转换元件同样快的响应速度进行光的强弱切换的热辐射光源。

## 附图说明

[0031] 图1是用于说明在本发明所涉及的热辐射光源中量子阱结构层具有n型量子阱的情况下的电子的能态的图。

[0032] 图2是用于说明在本发明所涉及的热辐射光源中量子阱结构层具有p型量子阱的情况下的电子的能态的图。

[0033] 图3是作为本发明的一个实施例的热辐射光源的立体图(a)、纵剖视图(b)以及俯视图(c)。

[0034] 图4是表示针对本实施例的热辐射光源来计算在不向电极间施加电压的情况与向电极间施加电压的情况下的电子的电势而得到的结果的曲线图。插入图是表示对电压与吸收系数的关系进行计算而得到的结果的曲线图。

[0035] 图5是表示针对本实施例的热辐射光源来计算在不向电极间施加电压的情况与向电极间施加电压的情况下的光的放射率的波长谱而得到的结果的曲线图。插入图是表示这两个波长谱之差的曲线图。

[0036] 图6是表示对在本实施例的热辐射光源中以10kHz的频率切换电极间的电压的情

况 (a) 以及作为比较例的在以往的热辐射光源中以 10kHz 的频率切换用于加热该光源的加热器的电压的情况 (b) 下的辐射功率的时间变化进行计算而得到的结果的曲线图。

[0037] 图 7 是表示针对本实施例的热辐射光源通过计算求出调制频率所引起的调制功率的变化而得到的结果的曲线图。

[0038] 图 8 是本实施例中制作出的热辐射光源的显微镜照片 (a) 和对该热辐射光源中的二维光子晶体进行放大拍摄而得到的显微镜照片 (b)。

[0039] 图 9 是表示在不同的多个温度下测定本实施例中制作出的热辐射光源的电流-电压特性而得到的结果的曲线图。

[0040] 图 10 是将针对本实施例中制作出的热辐射光源测定在不向电极间施加电压的情况与向电极间施加电压的情况下放出的红外线的波长谱而得到的结果与从相同温度/相同面积的黑体辐射光源得到的测定结果一起表示的曲线图。

[0041] 图 11 是表示针对本实施例中制作出的热辐射光源、一边改变向电极间施加的电压一边测定出的红外线的波长谱 (a) 以及在与该测定对应的条件下计算出的红外线的波长谱 (b) 的曲线图。此外,在 (b) 中,重叠显示了电压为 8V 的情况和电压为 10V 的情况下的数据。

[0042] 图 12 是表示针对本实施例中制作出的热辐射光源一边以 0.1kHz~1.5MHz (100Hz~1,500,000Hz) 的范围内的频率切换电极间的电压一边测定所放射的光的强度的时间变化的高速调制实验的光学系统的示意图。

[0043] 图 13 是表示针对本实施例中制作出的热辐射光源的、以 10kHz 的频率进行的高速调制实验的结果的曲线图。

[0044] 图 14 是表示针对本实施例中制作出的热辐射光源通过实验求出调制频率所引起的调制功率的变化而得到的结果的曲线图。

[0045] 图 15 是表示在本实施例的热辐射光源中针对 p 层的空穴密度  $N_p$  和 n 层的电子密度  $N_e$  均为  $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$  的情况 (a)、 $N_p$  和  $N_e$  均为  $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  的情况 (b) 以及  $N_p$  为  $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  且  $N_e$  为  $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$  的情况 (c) 通过计算求出放射率 (左图) 和延迟时间 (右图) 而得到的结果的曲线图。

[0046] 图 16 是表示通过计算求出将空孔的配置区域设为一个边为 0.5mm 的正方的情况下的调制频率所引起的调制功率的变化而得到的结果的曲线图。

[0047] 图 17 是表示空孔的直径小于图 8 的例子热辐射光源的显微镜照片 (a)、对该热辐射光源中的二维光子晶体进行放大拍摄而得到的显微镜照片 (b) 以及测定在该热辐射光源中放出的红外线的波长谱而得到的结果的曲线图 (c)。

[0048] 图 18 是表示本发明所涉及的热辐射光源的变形例的立体图 (a) 和俯视图 (b)。

## 具体实施方式

[0049] 使用图 3~图 18 来说明本发明所涉及的热辐射光源的实施例。

[0050] 实施例

[0051] (1) 本实施例的热辐射光源的结构

[0052] 如图 3 所示,本实施例的热辐射光源 10 具有板材 11、空孔 (异折射率区域) 121、p 型电极 131、n 型电极 132 以及腿 14,由板材 11 和空孔 121 来形成二维光子晶体 12。

[0053] 板材 11 是长方形,具有从上到下依次层叠 p 层 111、i 层 113、量子阱结构层 114 以及 n

层112的结构。关于本实施例中的各层的厚度，p层111和n层112的厚度是800nm，i层113和量子阱结构层114的厚度是200nm。在本实施例中，作为p层111的材料，使用在GaAs中添加作为p型杂质的Be而得到的p型半导体p-GaAs，作为n层112的材料，使用在GaAs中添加作为n型杂质的Si而得到的n型半导体n-GaAs，作为i层113的材料，使用未注入杂质的GaAs。p层111的空穴密度 $N_p$ 和n层112的电子密度 $N_e$ 分别是 $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 。量子阱结构层114是交替地层叠大量的由GaAs形成的层和由n-AlGaAs形成的层而成的。由此，在量子阱结构层114中形成大量的以由GaAs形成的层的部分为阱内的n型量子阱。将像这样形成有大量的量子阱的能量势(energy potential)称为多重量子阱，将具有多重量子阱的结构称为多重量子阱结构。

[0054] 在板材11中的一个边的长度L为2mm的正方形的范围内，呈三角格子状地配置有空孔121。该三角格子的晶格常数a为 $4.8 \mu\text{m}$ 。在二维光子晶体12中，通过以这种周期配置空孔121，真空中的波长为 $9.2 \mu\text{m}$ 的红外线发生谐振。空孔121具有圆柱状的形状，该圆柱的设计上的半径r为约 $0.96 \mu\text{m}$  ( $0.20a$ )，厚度为约 $1.3 \mu\text{m}$ 。

[0055] 构成板材11的各层中的n层112与其它层相比面积大，在长边方向的两端具有不与量子阱结构层114接触的部分。n型电极132由与n层112之间形成欧姆接合的Ge/Au/Ni/Au合金制的金属电极形成，通过蒸镀法设置于n层112的该部分。p型电极131由与p层111形成欧姆接合的Au/Zn/Au合金制的金属电极形成，通过蒸镀法设置于p层111的表面。通过将p型电极131和n型电极132设置于这些位置，来隔着量子阱结构层114和i层113向p层111与n层112之间施加电压。另外，p型电极131被设置成围绕周期性地配置有空孔121的区域(配置区域)，因此能够不被p型电极131遮挡地从该配置区域放出光。

[0056] 腿14是由未注入杂质的绝缘体的GaAs形成的2条长方体状的构件。2条腿14以在板材11的长边方向的两端附近沿板材11的短边方向延伸的方式安装于n层112的下表面。通过该腿14保持板材11，使得板材11除了安装有腿14的部分以外，不与其它物接触。另外，在对热辐射光源10加热时，从外部的热源通过热传导而经由该腿14向二维光子晶体12导热。

[0057] (2) 与本实施例的热辐射光源10的特性有关的计算结果

[0058] 接着，对本实施例的热辐射光源10的特性，通过计算进行的模拟结果进行说明。此外，下面，除了特别记载的情况以外，在向p型电极131与n型电极132之间施加电压时，电压的极性是以p层111(p型电极131)侧为负、以n层112(n型电极132)侧为正。

[0059] 首先，使用图4来说明通过计算求出热辐射光源10的p层111、i层113、量子阱结构层114以及n层112中的有助于热辐射的电子的电势而得到的结果。在该计算中，以(a)不向p型电极131与n型电极132之间施加电压的情况以及(b)向p型电极131与n型电极132之间施加8V的电压的情况为对象，将加热温度设为 $200^\circ\text{C}$ 。其结果，如图4的曲线图所示，(a)、(b)均在量子阱结构层114中形成大量的量子阱(多重量子阱)，但是在(a)中每个量子阱均具有大致相同的电势，与此相对，在(b)中靠p层111的量子阱整体的能量比(a)的情况高。这意味着，在施加了电压的情况下，在靠p层111的量子阱内不存在电子，与不施加电压的情况相比，有助于热辐射的电子变少(参照图1)。由此，与不施加电压的情况相比，在施加了电压的情况下，量子阱内的子带间跃迁(Inter Sub Band Transition: ISB-T)所引起的光的吸收系数变小(图4中的插入图)，发光强度也变小。

[0060] 接着，使用图5来说明对在(a)不施加电压的情况和(b)施加8V的电压的情况下的通过外部热源将热辐射光源10加热到 $200^\circ\text{C}$ 时的光的放射率的波长谱进行计算而得到的结



果。在此,在各波长下,放射率被定义为将热辐射光源10的发光强度除以相同温度的黑体辐射的强度而得到的值。此外,在图5的曲线图中,波长和波数是指真空中的光的波长和波数。根据该曲线图可知,波长为 $9.2\mu\text{m}$ 时的放射率的峰值在(b)中为(a)的约 $1/8$ 。另一方面,虽然在该波长 $9.2\mu\text{m}$ 以外也能观察到放射率的峰,但是这些峰的值均充分小于波长为 $9.2\mu\text{m}$ 时(a)的峰值。而且,在波长 $9.2\mu\text{m}$ 以外的峰中,几乎观察不到(a)与(b)的峰值的不同。这一点从图5的插入图所示的取(a)与(b)之差的曲线图中也可以明确。这些计算结果意味着,通过电压的ON/OFF,仅波长 $9.2\mu\text{m}$ 附近的窄波长频带的红外线被调制了强度。因而,在使用该热辐射光源10的传感器中,能够基于检测出的光的信号中的在与电压的ON/OFF对应的频率下被调制了强度的信号,来仅得到波长 $9.2\mu\text{m}$ 附近的红外线所引起的响应。

[0061] 接着,使用图6来说明对在加热了热辐射光源10的状态下切换向电极间施加的电压的ON/OFF的情况下得到的辐射功率的时间变化进行计算而得到的结果。在此,设ON时的电压为8V,ON/OFF的频率(调制频率)为10kHz。设加热温度为 $200^{\circ}\text{C}$ 。在此,在一般的红外线检测器中不按波长区分地检测固定的波长范围内的红外线,因此作为辐射功率会求出在 $5\mu\text{m}\sim 15\mu\text{m}$ 的波长范围内累积得到的辐射功率。另外,作为比较例,针对在以往的热辐射光源中为了改变其温度而接通到光源的输入功率以10kHz的频率进行切换的情况进行了同样的计算。这些计算的结果是,在比较例(图6的(b))中的加热器ON时与OFF时的辐射功率之差(将该差称为“调制功率”)只有 $0.066\%$ ,与此相对,在本实施例(图6的(a))中调制功率为约 $67\%$ 。这样,根据本实施例,能够以较之以往约1000倍的调制深度,以10kHz这样的高调制频率进行光的强度调制。此外,图6的(a)所示的数据如上所述那样表示对 $5\mu\text{m}\sim 15\mu\text{m}$ 的波长范围内的辐射功率进行累积而得到的值,但是若结合图5的谱来考虑,则可以说有助于强度调制的是波长 $9.2\mu\text{m}$ 附近的红外线。

[0062] 接着,使用图7来说明在调制频率不同的情况下对电压OFF时与电压ON时的调制功率的差异进行计算而得到的结果。以分贝来表示各调制频率下的调制功率与调制频率为低频(100Hz)时的调制功率之比。在此,对板材11上配置空孔121的区域(配置区域)是一个边的长度L为2mm的正方形以及该配置区域是L为0.5mm的正方形这两种情况进行计算。关于图7的纵轴的值 $-3\text{dB}$ (调制频率=横轴为100Hz时的调制功率的 $1/2$ )的调制频率,在L=2mm的情况下该调制频率为约700kHz,在L=0.5mm的情况下该调制频率为约10MHz。因而,在本实施例的这些热辐射光源中,即使将调制频率设定得比以往的最大值即100Hz高,也能够进行明确的调制动作。另外,与L=2mm的情况相比,在L=0.5mm的情况下即配置区域小的情况下,能够使调制频率更高。

[0063] (3) 针对本实施例的热辐射光源的实验的结果

[0064] 接着,示出针对实际制作出的热辐射光源(以下称为“热辐射光源10A”)的实验结果。图8是从图3的(a)的立体图中的上侧拍摄热辐射光源10A而得到的显微镜照片。在(a)中利用光学显微镜拍摄热辐射光源10A的整个上表面,在(b)中利用电子显微镜放大拍摄二维光子晶体12的一部分。

[0065] 图9中示出针对所得到的热辐射光源10A测定电流-电压特性而得到的结果。在此,如在按p型半导体、绝缘体、n型半导体的顺序相接合而成的PIN二极管的测定中通常进行的那样,将p型电极131侧为正、n型电极132侧为负的电压表示为正的。当从室温到 $200^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内进行测定时,所得到的热辐射光源10A均具有如下的二极管特性:在电压为正时

流通电流,在电压为负时几乎不流通电流。可以说利用了以下情况:在PIN二极管中的电压0到负的偏压的范围内,热辐射光源10A不流通电流地使电子在量子阱与n型半导体之间移动。

[0066] 图10中将测定在热辐射光源10A中(a)向p型电极131与n型电极132之间施加的电压为0V时以及(b)向p型电极131与n型电极132之间施加的电压为10V(在图9中以负数表示的值)时的光的放射强度的波长谱而得到的结果与从相同温度/相同面积的黑体辐射光源得到的测定结果一起表示。此外,以任意单位示出了光的放射强度,但是为了能够使(a)、(b)以及黑体辐射光源的测定结果之间进行比较而对强度进行调整。该实验结果示出了:与图5所示的计算结果同样地,在波长 $9.2\mu\text{m}$ 下(b)的放射强度的值大幅小于(a),另一方面,在其它波长下,没有发光或者(a)与(b)正在以相互接近的强度发光。

[0067] 接着,图11的(a)中示出了在0V~10V的范围内的多个施加电压下测定波长 $9.2\mu\text{m}$ 附近的波长谱而得到的结果,图11的(b)中示出了与该测定对应的计算的结果。无论在施加电压是哪一个的情况下,测定结果与计算结果都相当一致。

[0068] 接着,示出一边以10kHz以上的调制频率反复切换p型电极131-n型电极132间的施加电压的ON/OFF一边测定来自热辐射光源10A的发光强度而得到的结果。使用图12所示的实验装置20来进行该测定。此外,对后述的热辐射光源10B也使用该实验装置20,因此,在图12和本段落以下的记载中,将表示热辐射光源的标记表述为“10”。实验装置20具有:加热器21,其载置热辐射光源10并对该热辐射光源10加热;脉冲生成器22,其生成向p型电极131-n型电极132间施加的、具有规定的调制频率的方形波的高频电压;检测器23,其检测热辐射光源10所发出的光;光学系统24,其将该光从热辐射光源10导向检测器23;以及数字示波器25,其通过使从检测器23输出的信号与脉冲生成器22的高频电压同步来观测输出信号。作为检测器23,使用HgCdTe(汞镉碲)检测器。设脉冲生成器22所输出的ON时的高频电压的值为10V。

[0069] 图13中示出了调制频率为10kHz的情况下的测定结果。得到了与施加电压的频率对应的方形波的输出信号。

[0070] 图14中示出了使用上述实验装置20来测定调制频率所引起的调制功率的变化而得到的结果。在频率为约600kHz以下的范围内,能够得到-3dB以上的调制强度。该测定结果与图7所示的计算结果相当一致。

[0071] 接着,说明为了使调制频率更高、即为了使动作更高速化而对p层111和n层112的载流子密度、空孔的配置区域的面积进行研究的结果。

[0072] 首先,使用图15来说明载流子密度。图15的(a)是表示p层111的空穴密度 $N_p$ 和n层112的电子密度 $N_n$ 为上述实施例的值(均为 $1 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ )的情况下的放射率(左图。再次使用图5的除插入图以外的曲线图。)和延迟时间 $t_r$ (右图)的曲线图。在此延迟时间 $t_r$ 是指向电极间施加电压到实际施加于光子晶体中央部的量子阱为止的时间。在此,将施加于量子阱结构层114的电压的值变为经过足够时间后的值的 $(1-e^{-1})$ 倍( $e$ 是自然对数的底, $(1-e^{-1}) \approx 0.63$ )时的时间设为延迟时间 $t_r$ 。此外,设p型电极131与n型电极132间的电压在左图为8V,在右图为10V。在图15的(a)的计算中,电压OFF时与ON时之间的放射率的变化为0.69,延迟时间 $t_r$ 为 $0.62\mu\text{s}$ 。

[0073] 接着,在使p层111的空穴密度 $N_p$ 和n层112的电子密度 $N_n$ 均增加为 $1 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 时,如

图15的(b)所示,与(a)相比延迟时间 $t_r$ 缩短为 $0.061\mu\text{s}$ ,电压OFF时与ON时的放射率的变化减少为0.19。这意味着,虽然延迟时间 $t_r$ 被改善,但是ON/OFF比恶化了。另外,根据图15的(b)的左图可知,目标波长( $9.2\mu\text{m}$ )以外的波长下的无用辐射增加。

[0074] 因此,使n层112的电子密度 $N_e$ 保持 $1 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ ,仅使p层111的空穴密度 $N_p$ 增加为 $1 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 。这意味着使载流子的有效质量大的p层111的空穴的密度比n层112的电子的密度高。其结果,如图15的(c)所示,与(a)相比延迟时间 $t_r$ 缩短为 $0.091\mu\text{s}$ ,并且电压OFF时与ON时的放射率的变化变为0.56,放射率的降低相比于(b)的情况能够得到抑制。目标波长以外的波长下的无用辐射也相比于(b)的情况得到抑制。

[0075] 接着,图16中示出了通过计算求出将空孔的配置区域设为一个边为 $0.5\text{mm}$ 的正方形的情况下的调制频率所引起的调制功率的变化而得到的结果。该计算中的条件与图14所示的实验中的条件相比在以下方面不同:仅使p层111的空穴密度 $N_p$ 增加到 $1 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ (n层112的电子密度 $N_e$ 保持为 $1 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 。即,其载流子密度与图15的(c)的情况相同。);以及减小空孔的配置区域。该计算结果示出了能够将上限频率提高至约 $70\text{MHz}$ 。

[0076] 接着,使用图17来说明使空孔121的半径小于上述实施例的热辐射光源10A的空孔半径的热辐射光源10B。在该例子中,设三角格子的晶格常数 $a$ 为 $4.5\mu\text{m}$ ,空孔121的半径 $r$ 为 $0.63\mu\text{m}$ ( $0.14a$ ),其它条件与热辐射光源10A相同。图17的(a)和(b)中示出了所得到的热辐射光源10B的显微镜照片,图17的(c)中以曲线图示出了使用实验装置20来测定在该热辐射光源中放出的红外线的波长谱而得到的结果。关于红外线的波长谱,示出了辐射强度最大的施加电压为 $2\text{V}$ 的情况以及辐射强度最小的施加电压为 $10\text{V}$ 的情况。在热辐射光源10B中,在施加电压为 $2\text{V}$ 的情况下,红外线的波长谱的半峰全宽为 $7.0\text{cm}^{-1}$ ,比图11的(a)所示的热辐射光源10A中的施加电压为 $0\text{V}$ 的情况下的半峰全宽 $12.5\text{cm}^{-1}$ 窄。这意味着,通过减小空孔的直径,能够得到更窄频带的放射谱。另外,已确认了:当使向热辐射光源10B施加的施加电压从 $2\text{V}$ 变化为 $10\text{V}$ 时光的强度降低,与热辐射光源10A的情况同样地能够通过电压进行强度调制。

[0077] 本发明不限于上述实施例。

[0078] 在上述实施例中,作为p层111、n层112以及i层113,使用了以GaAs为主要结构元素的半导体,但是也可以使用其它半导体。作为量子阱结构层114,也可以使用由上述以外的材料形成的量子阱结构层。并且,作为量子阱结构层114,不限于使用具有n型量子阱的量子阱结构层,也可以使用交替地层叠大量的由InP形成的层与由p-InGaAs形成的层而成的量子阱结构层等具有p型量子阱的量子阱结构层。另外,量子阱结构层114不限于具有上述实施例中的多重量子阱结构,也可以使用具有仅形成一个量子阱的量子阱结构的量子阱结构层。p层111、n层112、i层113以及量子阱结构层114的上述厚度的值是一个例子,不限于于这些值。上述的p层111的空穴密度和n层112的电子密度(这些层中的杂质的密度)的值也是一个例子,不限于于这些值。另外,也可以不使用i层113而将p层111与量子阱结构层114直接接合。

[0079] 在上述实施例中,作为异折射率区域,使用了空孔121,但是也可以将折射率与板材11的折射率不同的构件用作异折射率区域。另外,异折射率区域(空孔121)的形状、大小不限于于上述实施例,关于形状,也可以使用三棱柱状、四棱柱状等形状。异折射率区域(空孔121)的晶格常数、格子的形状也不限于于上述实施例,关于格子的形状,也可以使用正方

格子等其它格子。

[0080] 在上述实施例中,将p型电极131设置成围绕周期性地配置有空孔121的配置区域,但是例如在如图18所示那样以隔着配置区域的方式设置2根即1对p型电极131A的情况下,也能够不被p型电极131A遮挡地从该配置区域放出光。此外,在图18中n型电极132A也与p型电极131A同样地使用了2根即1对,但是像这样使p型电极与n型电极的形状一致并不是必须的。

[0081] 在上述实施例中,在热辐射光源的加热中使用了来自外部热源的热传导,但是加热方法不限于于此。既可以对热辐射光源本身接入用于加热的电力,也可以使用其它手段。

[0082] 附图标记说明

[0083] 10、10A、10B:热辐射光源;11:板材;111:p层;112:n层;113:i层;114:量子阱结构层;12:二维光子晶体;121:空孔;131、131A:p型电极;132、132A:n型电极;14:腿;20:实验装置;21:加热器;22:脉冲生成器;23:检测器;24:光学系统;25:数字示波器。

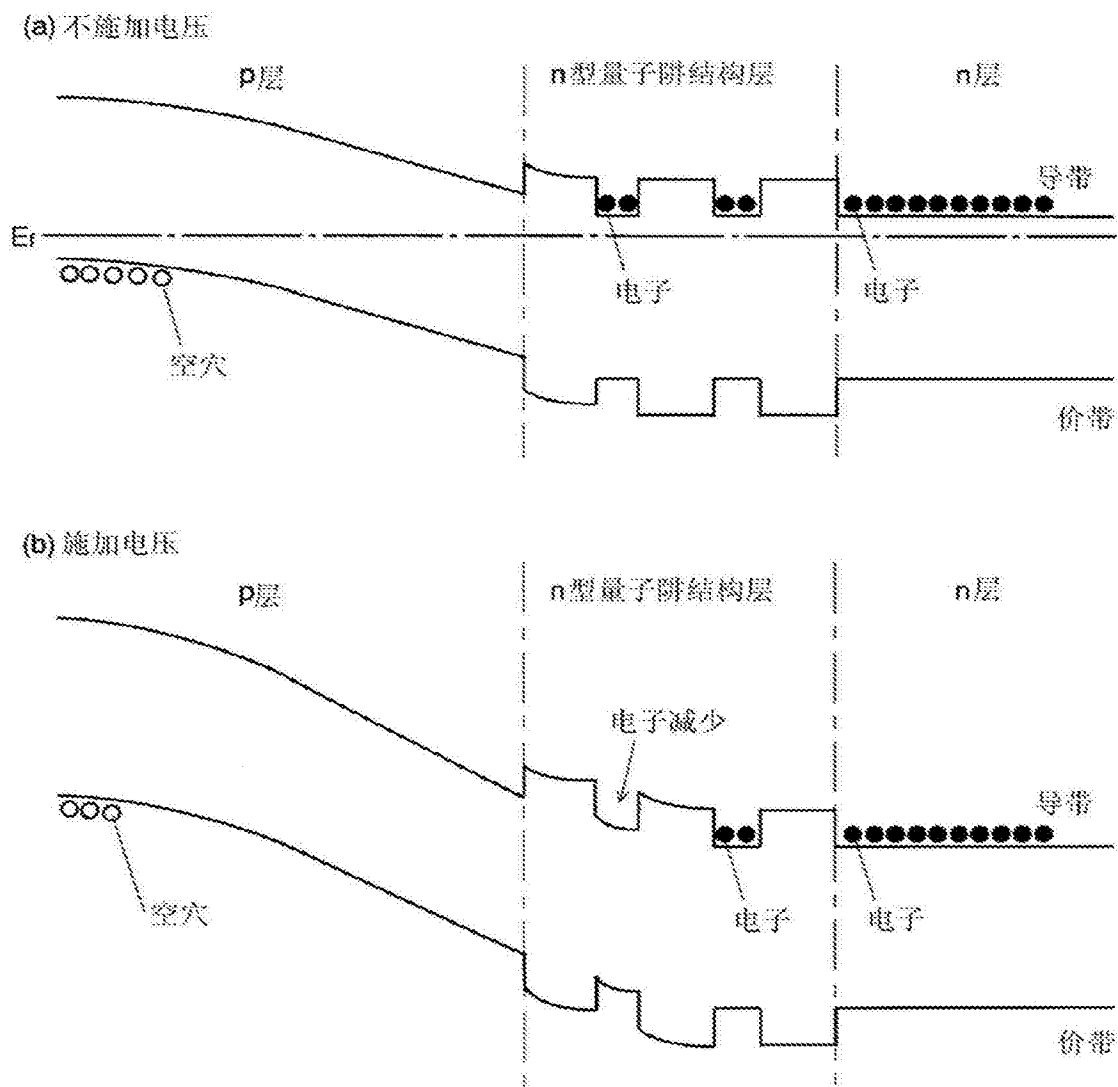
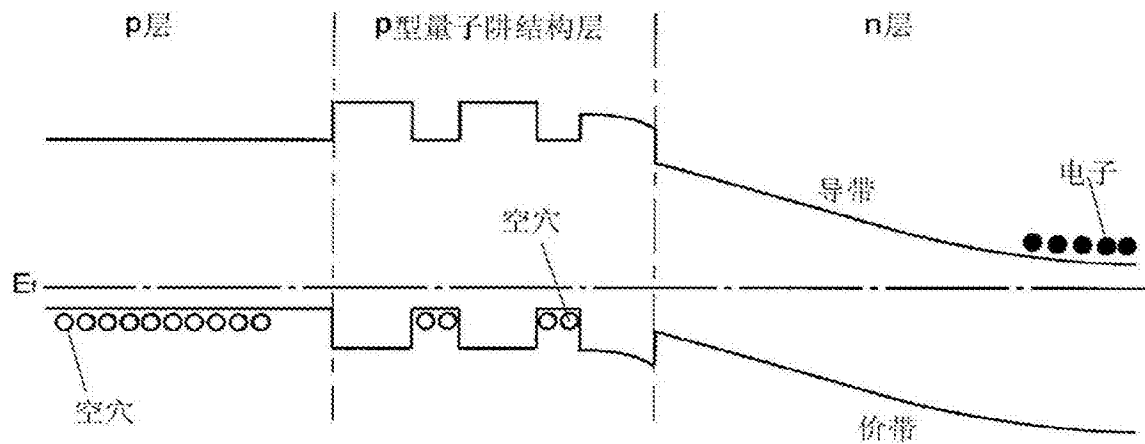


图1

(a) 不施加电压



(b) 施加电压

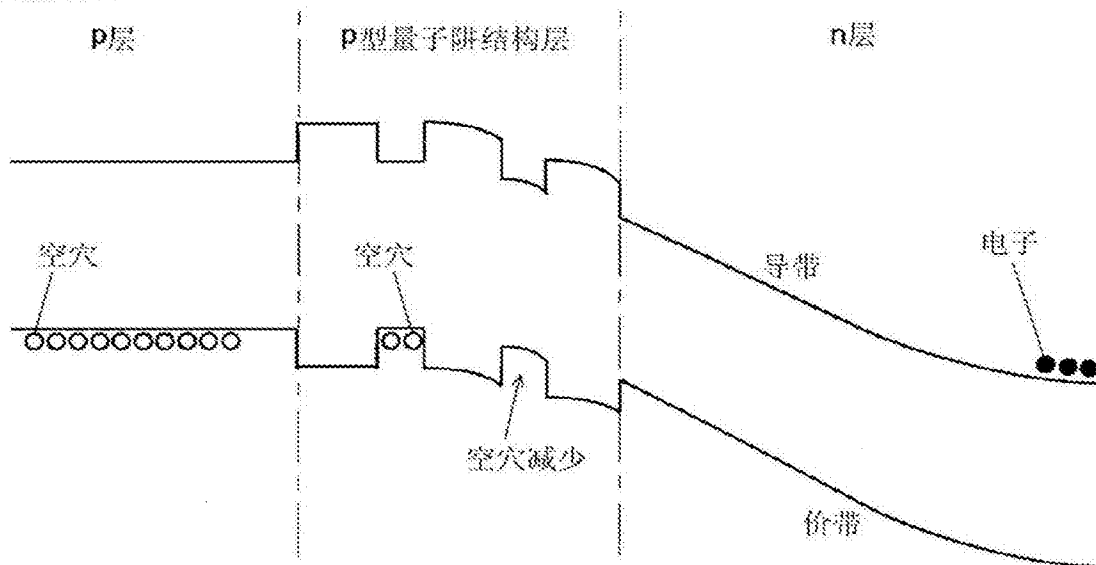


图2

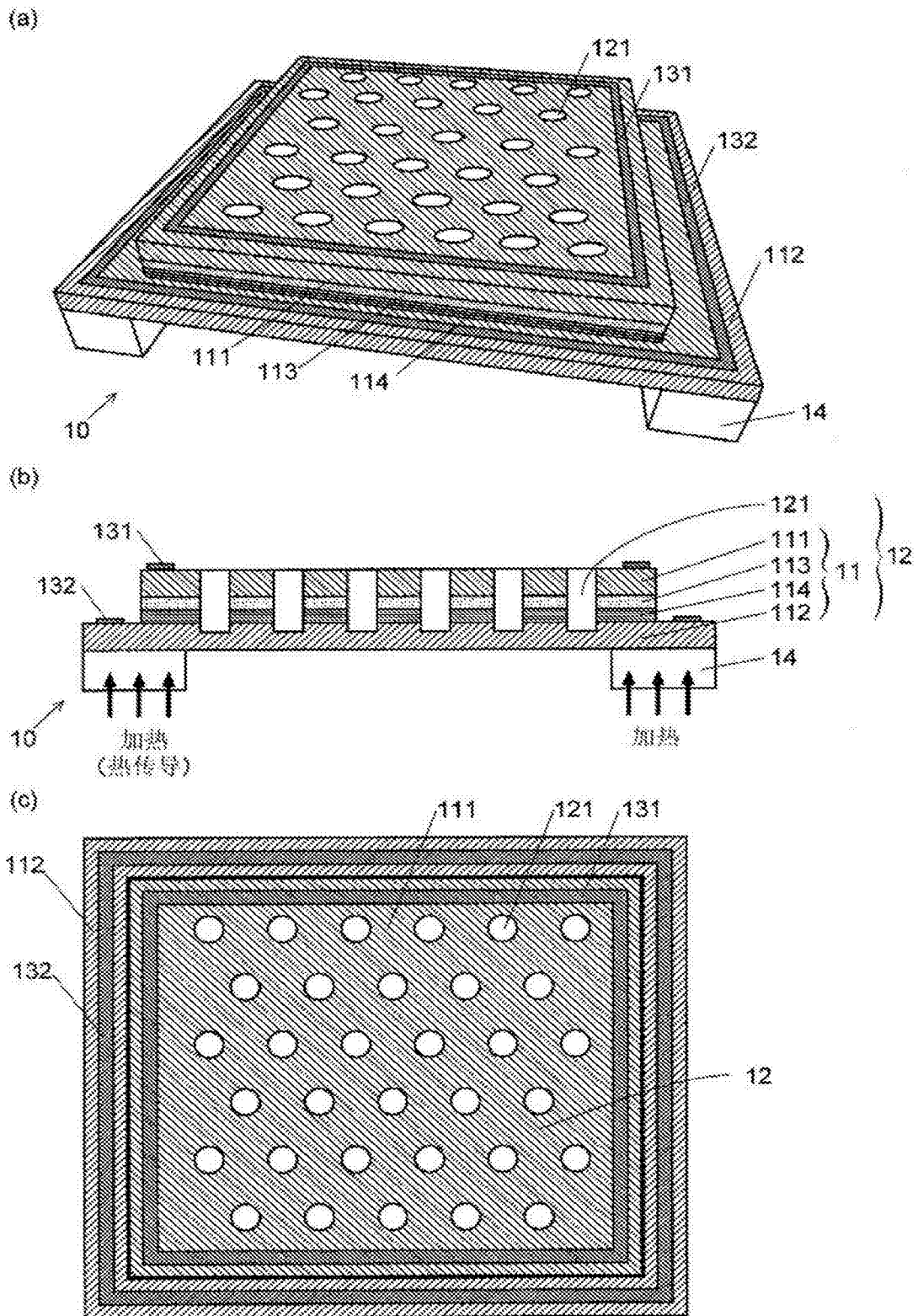


图3

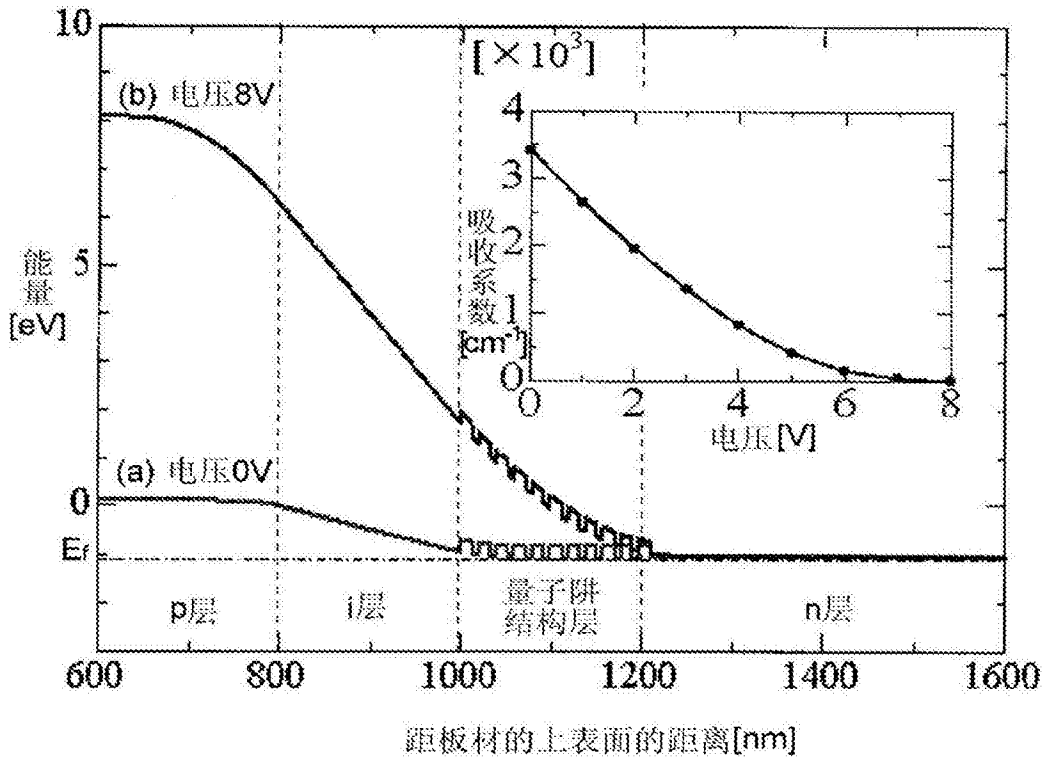


图4

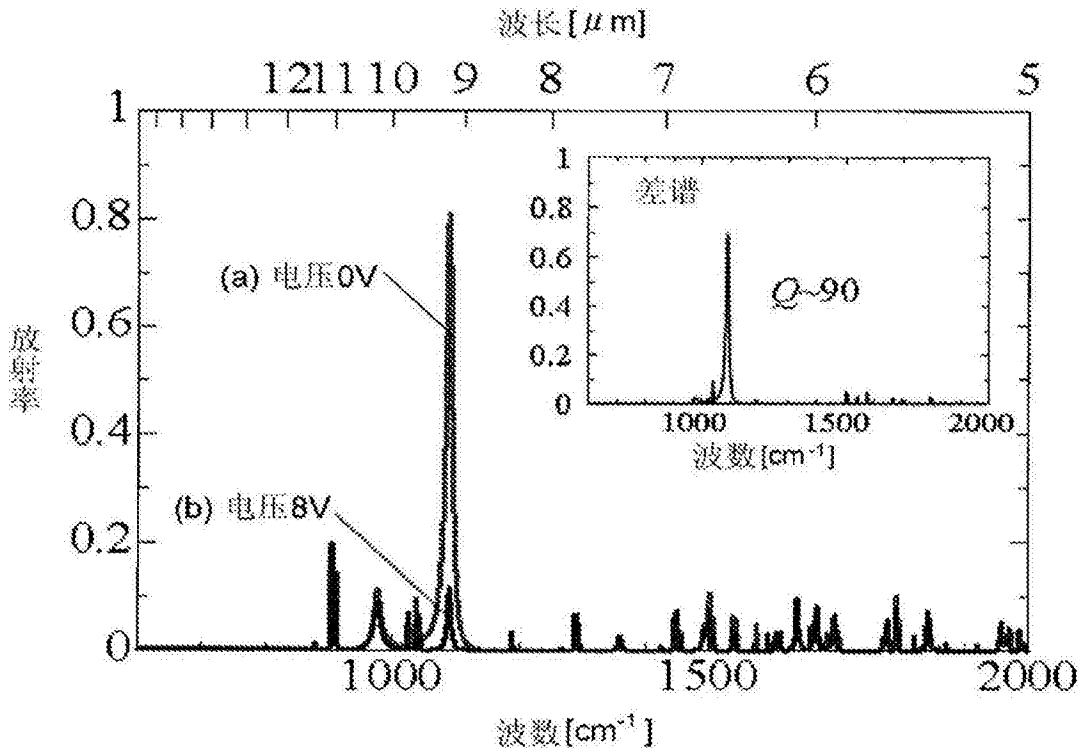
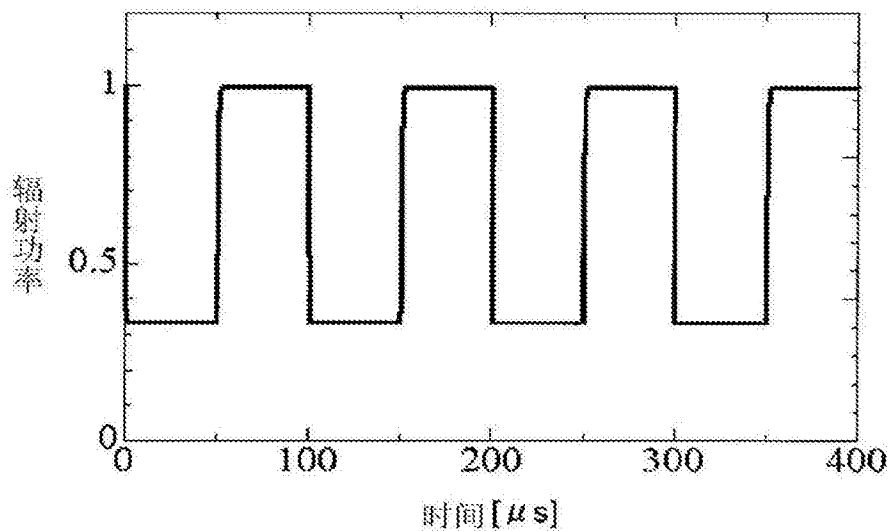


图5



(a) 本实施例



(b) 比较例

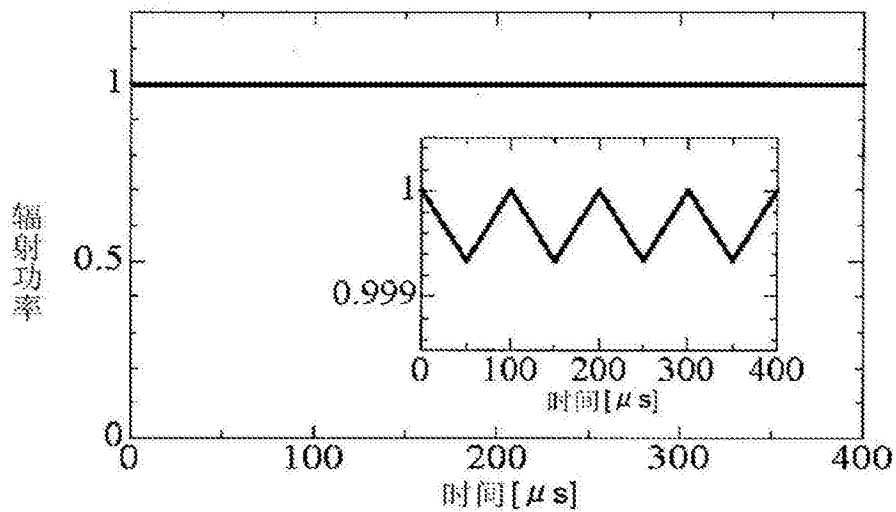


图6