



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102790355 B

(45) 授权公告日 2015. 04. 01

(21) 申请号 201210148448. 9

审查员 胡涛

(22) 申请日 2012. 05. 14

(30) 优先权数据

2011-110887 2011. 05. 17 JP

(73) 专利权人 佳能株式会社

地址 日本东京

(72) 发明人 小山泰史

(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 11038

代理人 魏小薇

(51) Int. Cl.

H01S 5/20(2006. 01)

(56) 对比文件

WO 2008/012527 A1, 2008. 01. 31, 全文.

US 2011/0101250 A1, 2011. 05. 05, 全文.

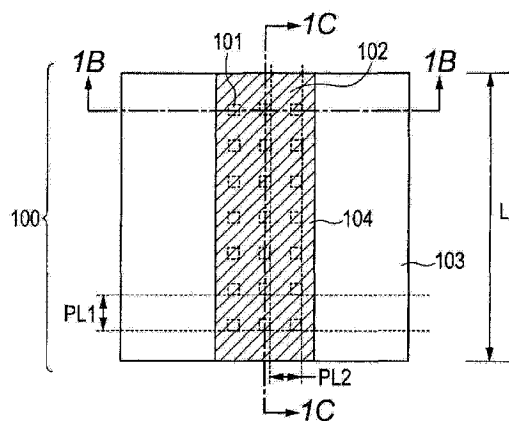
权利要求书2页 说明书10页 附图6页

(54) 发明名称

波导、包括该波导的装置及制造该波导的方法

(57) 摘要

提供一种波导、包括该波导的装置及制造该波导的方法,使用该波导抑制了在初始阶段中或在操作期间在半导体中引起的或由制造工艺等引起的应力和缺陷,从而预期有特性的改进和稳定性。该波导包括:第一导体层和第二导体层,其包括相对于波导模式下的电磁波具有负介电常数实部的负介电常数介质;以及核心层,其与第一导体层和第二导体层接触,并且被放置在第一导体层与第二导体层之间,并且包括半导体部分。包括半导体部分的核心层具有在面内方向上延伸的凹入凸出结构。



1. 一种波导 (107), 包括 :

第一导体层 (103) 和第二导体层 (104), 所述第一导体层 (103) 和第二导体层 (104) 包括相对于波导模式下的电磁波具有负介电常数实部的负介电常数介质 ; 以及

核心层 (108), 其与所述第一导体层和所述第二导体层接触并且被放置在所述第一导体层与所述第二导体层之间, 并且包括半导体部分 (101),

其中, 包括所述半导体部分的所述核心层具有凹入凸出结构, 其中, 在核心层的面内方向上, 在核心层的厚度方向上凹入的凹入部分 (102) 被布置在相邻的凸出部分 (101) 之间, 其特征在于, 满足以下要求中的至少一个 :

1) 在凹入凸出结构中, 凹入部分在与波导模式下的电磁波的传播方向垂直的面内方向上被布置在相邻的凸出部分之间 ;

2) 所述凹入凸出结构具有小于 $\lambda_g/2$ 的节距长度, 其中, $\lambda_g = \lambda/n_e$, λ 是所述电磁波的波长, n_e 是所述波导的等效折射率 ; 以及

3) 所述凹入凸出结构具有小于 $100\ \mu\text{m}$ 的节距长度, 并且所述凹入凸出结构具有在所述波导的端面附近逐渐改变的疏密程度。

2. 根据权利要求 1 所述的波导, 其中, 在要求 1) 和 2) 中, 所述凹入凸出结构具有在所述波导的端面附近逐渐改变的疏密程度。

3. 根据权利要求 2 所述的波导, 其中, 所述凹入凸出结构的疏密程度在所述波导的端面附近逐渐改变表现为凸出部分的体积比率朝向所述波导的端面逐渐减小。

4. 如权利要求 1 至 3 中任一项所述的波导, 其中, 所述凹入凸出结构的凹入部分包括槽, 所述槽用于通过在厚度方向上穿过所述核心层而将所述半导体部分划分为岛形状。

5. 如权利要求 4 所述的波导, 其中, 所述凹入部分被构造为电介质或绝缘体的间隔物。

6. 如权利要求 5 所述的波导, 其中, 所述间隔物在所述波导的纵向方向和横向方向上具有等于或小于 $\lambda_g/2$ 的宽度, 其中, $\lambda_g = \lambda/n_e$, λ 是所述电磁波的波长, n_e 是所述波导的等效折射率。

7. 如权利要求 1 至 3 中任一项所述的波导, 其中, 所述半导体部分在所述波导的纵向方向和横向方向上具有等于或小于 $\lambda_g/2$ 的宽度, 其中, $\lambda_g = \lambda/n_e$, λ 是所述电磁波的波长, n_e 是所述波导的等效折射率。

8. 如权利要求 1 至 3 中任一项所述的波导, 其中, 所述半导体部分至少被布置在要成为振荡模式下的谐振电场中的波腹的位置处。

9. 如权利要求 5 所述的波导, 其中, 所述间隔物至少被布置在将要成为振荡模式下的谐振电场中的波节的位置处。

10. 如权利要求 1 至 3 中任一项所述的波导, 其中, 所述半导体部分具有多量子阱结构, 用于通过载流子的子带间跃迁来生成太赫兹波。

11. 一种使用电磁波的装置, 包括 :

如权利要求 1 至 10 中任一项限定的波导 ; 以及

算术单元, 用于检测已经与样本相互作用的电磁波, 并且基于检测信号来计算所述样本的状态。

12. 一种制造如权利要求 1 至 10 中任一项限定的波导的方法, 所述方法包括 :

在半导体层中形成凹入部分 ; 以及

使用物质填充所述凹入部分以布置间隔物。

13. 如权利要求 12 所述的方法,还包括:

制备第一衬底,所述第一衬底在上表面上提供有半导体层;

制备第二衬底;

经由第一导体层将所述第一衬底上的半导体层转移到第二衬底的上表面上;以及在所述半导体层的上表面上形成第二导体层,在所述半导体层中布置有间隔物。

波导、包括该波导的装置及制造该波导的方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种波导、包括所述波导的装置以及制造所述波导的方法。更具体地说,本发明涉及一种用于从毫米波带到太赫兹波带(30GHz 到 30THz)(下文中,又称为太赫兹波)的频带中的电磁波的波导。

背景技术

[0002] 在太赫兹波的频带中,存在生物材料、医药、电子材料等的很多有机分子的源自其结构和状态的吸收峰。此外,太赫兹波容易穿透诸如纸张、陶瓷、树脂和布料等材料。近年来,已经对使用太赫兹波的这些特性的成像技术和感测技术进行了研究和开发。例如,期望其对于用于代替 X 射线装置的安全荧光检查装置、制造工艺中的在线(in-line)无创检查装置等的应用。

[0003] 作为电流注入型太赫兹波光源,正在研究一种结构,其使用基于半导体量子阱结构中的电子的子带间跃迁的电磁波增益。Appl. Phys. Lett. 83, 2124(2003)提出了一种太赫兹波带量子级联激光器(quantum cascade laser,下文中,又称为 QCL),其中,被称为低损耗波导的双面金属波导(double-side metal waveguide,下文中,又称为 DMW)被集成为谐振器。该元件通过在表面等离激元模式下把感应地发射的太赫兹波引导到谐振器结构(谐振器结构中金属放置在由大约 10 μm 厚度的半导体薄膜形成的增益介质之上以及之下)而通过优异光封闭(confinement)和低损耗传播来获得大约 3THz 的激光振荡。

[0004] 另一方面,已知多量子阱结构归因于对其施加的应变而改变其特性。在 Sensors and Actuators, A, 143(2008), 230-236 中,作出这样的报告:谐振隧道二极管(resonant tunnel diode,下文中,又称为 RTD)的特性归因于对其施加的应变而改变。在 Sensors and Actuators, A, 143(2008), 230-236 中,观测到在接近 100MPa 的应力时负微分电阻的大约两倍的改变。此外,公开了一种具有如美国专利 No. 7, 693, 198 中描述的波导的激光设备。

[0005] Appl. Phys. Lett. 83, 2124(2003) 中公开的 DMW 具有这样的结构:其中,两个金属层夹住具有大约 10 μm 的厚度的半导体层,并且通过使用金属接合技术等将半导体薄膜转移到不同衬底上来制造 DMW。另一方面,其中层叠具有不同晶格常数和不同热膨胀系数的薄膜材料的结构通常已知易于归因于制造工艺而在其中产生残余应力。因此,在常规结构中,归因于制造工艺等的应变或缺陷可能改变作为增益介质的半导体薄膜的特性,从而导致振荡特性的恶化或不稳定性。

发明内容

[0006] 已经鉴于上述问题作出了本发明。根据本发明的波导包括:第一导体层和第二导体层,其包括相对于波导模式下的电磁波具有负介电常数实部的负介电常数介质;以及核心层,其与第一导体层和第二导体层接触,并且被放置在第一导体层与第二导体层之间,并且包括半导体部分。包括半导体部分的核心层具有在面内方向上延伸的凹入凸出结构,此外,满足以下要求中的至少一个:

[0007] (1) 凹入凸出结构被布置在与在波导模式下的电磁波的传播方向垂直的方向上, 并且具有多个凸出部分。

[0008] (2) 凹入凸出结构具有小于 $\lambda_g/2$ 的节距长度, 其中, $\lambda_g = \lambda/n_e$, λ 是所述电磁波的波长, n_e 是波导的等效折射率; 以及

[0009] (3) 凹入凸出结构具有小于 $100\ \mu\text{m}$ 的节距长度。

[0010] 根据本发明的波导具有其中包括半导体部分的核心层在面内方向上延伸的凹入凸出结构。因此, 即使使用不同材料(例如负介电常数介质的第一导体层、包括半导体部分的核心层、以及负介电常数介质的第二导体层)的层叠结构, 归因于由微小(minute)凹入凸出结构引起的减小应力的效应, 由晶格常数差或热膨胀系数差产生的应变减小了。

[0011] 更具体地说, 存在以下三种情况: (1) 凹入凸出结构被布置在与在波导模式下的电磁波的传播方向垂直的方向上, 并且具有多个凸出部分; (2) 凹入凸出结构可以具有小于 $\lambda_g/2$ 的节距长度, 其中, $\lambda_g = \lambda/n_e$, λ 是电磁波的波长, n_e 是波导的等效折射率; 以及 (3) 凹入凸出结构可以具有小于 $100\ \mu\text{m}$ 的节距长度。

[0012] 因此, 抑制了归因于制造工艺等的应变或缺陷或在初始状态中或操作期间在半导体中产生的应变或缺陷, 并且因此, 可预期特性(比如振荡特性)的改进和稳定。例如, 可以提供一种在尺寸方面容易制造并且在太赫兹波的频带中稳定地工作的半导体元件、以及一种制造该半导体元件的方法。

[0013] 根据参照附图的示例性实施例的以下描述, 本发明的更多特征将变得清楚。

附图说明

[0014] 图 1A、图 1B 和图 1C 是示出根据本发明的实施例和示例 1 的元件的视图。

[0015] 图 2A、图 2B 和图 2C 是示出根据本发明的示例 2 的元件的视图。

[0016] 图 3A、图 3B、图 3C1、图 3C2、图 3C3、图 3C4、图 3D1、图 3D2、图 3D3 和图 3D4 是示出根据本发明的制造波导的方法的示例的视图。

[0017] 图 4A、图 4B 和图 4C 是示出根据本发明的示例 3 的元件的视图。

[0018] 图 5 是示出根据本发明示例 3 的元件的结构分析结果的图。

[0019] 图 6A、图 6B 和图 6C 是示出根据本发明的示例 3 的元件的修改示例的视图。

[0020] 图 7 是示出使用根据本发明的实施例和示例的元件的应用示例的视图。

具体实施方式

[0021] 本发明涉及一种波导, 其特征在于: 核心层, 与用于限定波导的负介电常数介质的两个导体层接触并且放置在所述两个导体层之间, 并且包括半导体部分, 核心层具有在面内方向上延伸的凹入凸出结构。此外, 满足以下要求中的至少一个: (1) 凹入凸出结构设置为使得在与波导模式下的电磁波的传播方向垂直的方向上延伸; (2) 凹入凸出结构具有小于 $\lambda_g/2$ 的节距长度, 其中, $\lambda_g = \lambda/n_e$, λ 是电磁波的波长, n_e 是波导的等效折射率; 以及 (3) 凹入凸出结构具有小于 $100\ \mu\text{m}$ 的节距长度。凹入凸出结构可以是在厚度方向上穿过核心层的分隔槽、通过在厚度方向上向下挖所述核心层到中途所获得的盲槽、核心层中提供的中空部分等。当半导体部分包括具有如下述的电磁波增益的有源层时, 关于效果, 优选的是, 盲槽被挖掘从而穿过有源层, 但是即使盲槽在到达有源层之前停止, 也获得特定级

别的效果。此外,作为槽或中空部分的凹入部分可以是原样的空间,但可以通过用电介质或绝缘体填充空间而形成间隔物。在待放置于上面的导体层的形状的强度、稳定性等方面,后一种情况是优选的。根据本发明,使用通过在凹入凸出结构的一端的失配错位(misfit dislocation)等减小应力的效果,并且因此,只要可以如此产生应变减小,就可以在核心层中形成任何种类的凹入凸出结构。根据本发明的波导可以用作用于电磁波的简单波导,并且,如以下实施例和示例中描述的那样,半导体部分可以还具有电磁波增益部分,以形成振荡器、电磁波检测元件、电磁波放大元件等。

[0022] 以下参照附图描述根据本发明实施例和示例的波导、包括该波导的元件以及制造该波导的方法。

[0023] 实施例

[0024] 参照图 1A 至图 1C 描述包括根据本发明实施例的波导的振荡器 100。图 1A 是平面图,图 1B 是沿着图 1A 的直线 1B-1B 取得的截面图,图 1C 是沿着图 1A 的直线 1C-1C 取得的截面图。

[0025] 振荡器 100 包括具有电磁波增益并且其中的每一个都以岛形状形成的多个半导体部分 101、间隔物 102、以及作为相对于波导模式下的电磁波具有负介电常数实部的负介电常数介质的导体层的第一金属层 103 和第二金属层 104,并且被安装在衬底 105 上。在该实施例中,以下描述的有源层 106 以及在有源层 106 之上和之下提供的半导体形成半导体部分 101。半导体部分 101 和间隔物 102 形成核心层 108。作为包层的两个金属层 103 和 104 以及核心层 108 形成被称为 DMW 的波导 107。存在多个半导体部分 101,其被在厚度方向上延伸的分隔槽彼此分隔,并且其中每一个半导体部分以岛形状形成。优选的是,半导体部分 101 的大小在 $10\ \mu\text{m}$ 到约亚微米的范围中。在具有这样尺寸的用于毫米波到太赫兹波的频带的元件中,半导体部分 101 的大小被设置为使得波导 107 在纵向方向和横向方向上的宽度等于或小于 $\lambda_g/2$,优选地,等于或小于 $\lambda_g/10$ 。 λ_g 是在振荡模式下的波导 107 的波导波长,并且由 $\lambda_g = \lambda/n_e$ 表示,其中, λ 是电磁波的波长, n_e 是波导 107 的等效折射率。彼此接近地提供两个金属层 103 和 104,从而其间的距离是例如 λ_g 或更小。

[0026] 半导体部分 101 包括具有用于通过载流子的子带间跃迁而生成太赫兹波的多量子阱结构的有源层 106,并且具有电磁波增益。作为有源层 106,例如,具有几百至几千层的半导体多层结构的谐振隧道结构或量子级联激光器结构是合适的。该实施例描述为这样的情况:其中,谐振隧道二极管(RTD)用作有源层 106。RTD 具有基于负微分电阻区域中的光子协助隧穿现象(photon-assisted tunneling phenomenon)的在毫米波到太赫兹波的频带中的电磁波增益。优选的是,半导体部分 101 包括有源层 106 之上和之下的重掺杂层作为用于将电流注入 RTD 中的发射极/集电极。具有电磁波增益并且包括有源层 106 的半导体部分 101 与两个金属层 103 和 104 接触,并且放置在这两个金属层 103 和 104 之间。

[0027] 具体地说,该实施例的特征在于所述凹入凸出结构。更具体地说,其特征在于以下三个特征:(1)凹入凸出结构被布置在与在波导模式下的电磁波的传播方向垂直的方向上,并且具有多个凸出部分。(2)凹入凸出结构的节距长度小于 $\lambda_g/2$,其中, $\lambda_g = \lambda/n_e$, λ 是电磁波的波长, n_e 是波导的等效折射率;以及(3)凹入凸出结构的节距长度小于 $100\ \mu\text{m}$ 。通过提供这样的结构,凹入凸出结构可以被视为这样的结构:其中,反射、散射、折射等对波导模式下的电磁波的影响是可忽略的。

[0028] 用于使得核心层 108 具有在面内方向上延伸的凹入凸出结构的间隔物 102 被布置在邻近的半导体部分 101 之间,从而与半导体部分 101 接触。在面内方向上,半导体部分 101 形成凹入凸出结构的凸出部分,而间隔物 102 形成凹入凸出结构的凹入部分。作为间隔物 102,与半导体部分 101 的材料不同的材料(诸如电介质或绝缘体等)是合适的,并且相对于要振荡的电磁波的低损耗材料是优选的。间隔物 102 的材料可以是具有与半导体部分 101 不同的晶格常数的材料、多晶材料、或非结晶材料。优选的是,采用的材料使得半导体部分 101 中的每个半导体部分 101 都以岛形状形成,也就是说,形成不连续膜。关于间隔物 102 的大小,优选的是,在波导 107 的纵向方向和横向方向上的间隔物 102 的宽度等于或小于 $\lambda_g/2$,更优选地,等于或小于 $\lambda_g/10$ 。原因在于,大小被设置为波长的 $1/10$ 的结构可以通常被视为这样的结构:其中,反射、散射、折射等对该波长的电磁波的影响可忽略。

[0029] 如上所述,第二金属层 104 和第一金属层 103 分别放置在半导体部分 101 和间隔物 102 之上和之下。半导体部分 101 机械地且电气地与第一金属层 103 和第二金属层 104 接触。这允许作为有源层 106 的 RTD 由在第一金属层 103 与第二金属层 104 之间施加的电压来驱动。此外,优选的是,间隔物 102 至少机械地与金属层 103 和 104 接触。间隔物 102 在确定彼此接近的第一金属层 103 与第二金属层 104 之间的距离时起作用,并且使波导 107 成为刚性稳定结构。

[0030] 如上所述,根据该实施例的振荡器 100 包括作为 DMW 的波导 107。波导 107 包括:核心层 108,其包括具有电磁波增益的半导体部分 101;以及包层,其包括彼此接近的第一金属层 103 和第二金属层 104。第一金属层 103 与第二金属层 104 之间的距离小于或等于 $\lambda_g/2$,优选地小于或等于 $\lambda_g/10$,其中, λ_g 是振荡模式下振荡器 100 的波导波长。在此,毫米波到太赫兹波的频带中的电磁波在不存在衍射限制的表面等离激元模式下传播通过波导 107。为了获得其中波导波长为 λ_g 的振荡模式,如在半导体激光器技术领域已知的那样,作为电磁波的传播方向的波导 107 的纵向方向上的长度 L 设置为 $\lambda_g/2$ 的整数倍。

[0031] 根据该实施例的振荡器具有如上描述的波导 107。通过层叠具有不同晶格常数和不同热膨胀系数的薄膜材料形成的结构(例如金属/半导体部分/金属)可以归因于半导体部分中的制造工艺等而产生应变。通常,通过形成半导体膜的工艺或制造元件的工艺的热迟滞等而在薄膜中产生的内部应力近似在 $\pm 1\text{GPa}$ 的范围中。归因于工艺,在半导体部分 101 或有源层 106 中可能产生 $\pm 0.1\%$ 至 $\pm 1\%$ 的应变,其中,“+”表示拉伸应力,而“-”表示压缩应力。此外,当如在传统情况下那样通过接合不同种类的衬底来制造 DMW 结构时,归因于热膨胀系数差的热压力或接合界面周围的应力集中可能在半导体部分中产生应变。

[0032] 相反,本发明的元件包括半导体部分 101,其大小被设置为使得在波导 107 的宽度方向上的宽度等于或小于 $\lambda_g/2$ 至 $\lambda_g/10$ (在太赫兹波的频带中的 $10\mu\text{m}$ 至亚微米),其中的每一个半导体部分都以岛形状形成,并且半导体部分 101 包括有源层 106 以及在半导体部分 101 之间布置的间隔物 102。以此方式,通过把半导体部分形成为并非常规连续膜而是大小被设置为如波长那样微小或更小的岛形状结构的增益介质,通过在岛结构的一端处的失配错位减小应变的效果可以减小半导体部分中产生的应变。在该实施例的元件中,太赫兹波的频带中的振荡模式下的波导波长 λ_g 将半导体部分的厚度和宽度分别确定为几十微米至 $0.1\mu\text{m}$ 以及几十微米至 $0.1\mu\text{m}$,这对于用于减小应变的结构是合适的。

[0033] 此外,在根据该实施例的元件中,通过在邻近半导体部分 101 之间布置电介质或

绝缘体的间隔物 102,使 DMW 结构更稳定。通过把相对于毫米波至太赫兹波的低损耗材料用作间隔物 102,归因于自由电子吸收、导体损耗等的波导损耗减小。此外,为了高效地放大波导 107 中的驻波,期望包括有源层 106 作为增益介质的半导体部分 101 至少被布置在要被作为振荡模式下的谐振电场中的波腹的位置处。不贡献于电磁波增益的放大的间隔物 102 可以被布置在要被作为谐振电场的波节的位置处。

[0034] 现参照图 3A、图 3B、图 3C1 至图 3C4 以及图 3D1 至图 3D4 描述制造波导的方法的示例。该制造方法包括以下步骤:在半导体层中形成凹入部分;以及使用用于提供间隔物的物质填充凹入部分。更具体地说,通过以下步骤制造该实施例中描述的元件以及作为元件的谐振器的波导 307,可以减少归因于制造工艺等在初始状态中或操作期间在半导体中产生的应变或缺陷。波导 307 包括:包层,通过彼此靠近从而其间的距离等于或小于波导波长 λ_g 的第一导体层 303 和第二导体层 304 形成;以及核心层 308,放置在导体层 303 与 304 之间。核心层 308 包括每个均以岛形状形成的多个半导体部分 301 以及间隔物 302。在包括以下步骤(A)至(F)的工艺中制造波导 307:

[0035] (A) 制备在上表面上具有半导体部分 301 的第一衬底 309;

[0036] (B) 制备第二衬底 305;

[0037] (C)经由第一导体层 303 将第一衬底 309 上的半导体部分 301 转移到第二衬底 305 的上表面上;

[0038] (D) 将半导体部分 301 划分为岛形状;

[0039] (E)在每一个都以岛形状形成的划分出的半导体部分 301 之间布置间隔物 302;以及

[0040] (F) 在半导体层 301 的上表面上形成第二导体层 304。

[0041] 关于与图 3A、图 3B 和图 3C1 至图 3C4 的关系,图 3A 对应于步骤(A),图 3B 对应于步骤(B),图 3C1 至图 3C2 对应于步骤(C),图 3C3 对应于步骤(D)和(E),图 3C4 对应于步骤(F)。

[0042] 步骤(A)至(F)不一定要按该顺序(图 3A、图 3B、以及图 3C1 至图 3C4)执行。例如,如图 3 (图 3D1 至图 3D4)的右侧所示,即使按(A)、(B)、(D)、(E)、(C)和(F)的顺序执行步骤,也可以减少转移中产生的应力,并且减少应变的效果在预料之中。此外,当半导体部分 301 包括具有电磁波增益的有源层时,就制成了包括波导 307 作为谐振器的振荡器 100。如果制造方法包括步骤(D)和(E),则可以抑制在初始状态中或操作期间可能产生半导体的应变的结构中的应变。如果以金属形成第一导体层 303 和第二导体层 304,则实现执行低损耗传播和高效封闭的双等离子激元波导。如果以半导体形成第二导体层 304,则可以实现低损耗单等离子激元波导。

[0043] 如上所述,在该实施例中,即使使用作为包括不同种类薄膜的材料金属(导体层)/半导体部分/金属(导体层)的层叠结构,也可提供其中归因于制造工艺等而在半导体中产生的应变和缺陷被抑制了的元件,以及一种制造所述元件的方法。因此,根据该实施例,实现在太赫兹波的频带中稳定地工作的振荡器等。

[0044] 以下描述更多具体示例。

[0045] 示例 1

[0046] 现参照图 1A 至图 1C 以及图 3A、图 3B、图 3C1 至图 3C4 以及图 3D1 至图

3D4 描述根据本发明的具体示例 1 的元件。在示例 1 中,作为具有用于通过子带间跃迁而生成太赫兹波的多量子阱结构的有源层 106,使用与 InP 衬底晶格匹配的基于 InGaAs/InAlAs 的谐振隧道二极管结构。有源层 106 具有半导体多层结构,其中,按从顶部开始的顺序层叠 n-InGaAs (50nm, $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$)、InGaAs (5nm)、AlAs (1.3nm)、InGaAs (7.6nm, *)、InAlAs (2.6nm)、InGaAs (5.6nm, *)、AlAs (1.3nm)、InGaAs (5nm) 和 n-InGaAs (50nm, $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$)。在厚度之后具有星号(*)的 InGaAs 层要成为量子阱层,而没有星号(*)的基于 InAlAs 的材料要成为势垒层,以形成三垒谐振隧道结构。与 InP 衬底不晶格匹配的 AlAs 层比临界薄膜更薄,并且是高能垒。此外,在顶部和底部的掺杂有高密度载流子的 n-InGaAs 层是发射极/集电极层,用于将电子注入到谐振隧道结构/从谐振隧道结构抽取电子。在发射极/集电极层与势垒层之间放置的 InGaAs (5nm) 层是用于防止作为掺杂材料的 Si 的扩散的层。

[0047] 半导体部分 101 包括上述有源层 106 和被放置在有源层 106 之上和之下并且掺杂有高密度载流子的 n-InGaAs 层 (500nm, $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$)。掺杂层分别以相对低电阻连接半导体部分 101 以及放置在半导体部分 101 之上和之下的第一金属层 103 和第二金属层 104。第一金属层 103 和第二金属层 104 中的每一个包括 Ti/Pd/Au 层叠膜。振荡器 100 经由第一金属层 103 和第二金属层 104 连接到电源,并且用于驱动的偏置电压提供至振荡器 100。通过上述结构,振荡器 100 基于负微分电阻区域中的光子协助隧穿现象生成毫米波到太赫兹波的频带的电磁波。

[0048] 波导 107 具有 Fabry-Perot 谐振器结构,并且在电磁波的传播方向上包括至少两个端面,使用来自端面的反射而使得电磁波成为驻波。因此,波导 107 的传播方向(波导 107 的纵向方向)上的长度 L 是在确定振荡波长中的因素。在该示例中,波导 107 的长度 L 是 1mm,其为 λ_g 的 5 倍大,并且波导 107 的宽度是 0.02mm。因此,第二金属层 104 处于 $1\text{mm} \times 0.02\text{mm}$ 的矩形图案中。

[0049] 每个均以岛形状形成从而彼此分离的半导体部分 101 包括在与波导模式下电磁波的传播方向垂直的方向上延伸的凹入凸出结构。半导体部分中的每一个在具有 $2 \mu\text{m}$ 宽度的方形中,九个半导体部分 101 被布置在波导 107 的纵向方向上,节距长度是 $100 \mu\text{m}$ ($\lambda_g/2$),三个半导体部分 101 被布置在波导 107 的横向方向上,节距长度是 $5 \mu\text{m}$ 。以此方式,提供凹入凸出结构,从而在与波导模式下电磁波的传播方向垂直的横向方向上延伸。注意,在图 1A 至图 1C 中,节距长度是一个凹入部分的长度与一个凸出部分的长度的和。与波导模式下电磁波的传播方向平行的节距长度由 PL1 表示,在面内方向上且在与传播方向垂直的方向上的节距长度由 PL2 表示。为了容易理解结构特性,减少半导体部分 101 的数量。半导体部分 101 被布置在将要成为波导 107 的振荡模式下谐振电场中的波腹的位置处。在该示例中,波导 107 的端面是开放端,至少距端面 $\lambda_g/2$ 的位置是谐振电场中的波腹的位置。此外,作为间隔物 102,在太赫兹波带中是低损耗的 BCB (苯并环丁烯, benzocyclobutene) 被布置在邻近的半导体部分 101 之间,从而与半导体部分 101 接触。通过把相对于毫米波至太赫兹波的低损耗材料用作间隔物 102,归因于自由电子吸收、导体损耗等的波导损耗减小。从半导体部分 101 的厚度可见,第一金属层 103 与第二金属层 104 之间的距离大约是 $1 \mu\text{m}$,并且间隔物 102 被设置为具有相同厚度。在该示例中,波导 107 的核心层 108 的多于 90% 是作为间隔物 102 的 BCB,因此,如果当振荡频率是 1THz 时的等效

折射率是大约 1.5, 则振荡模式下的波导波长 λ_g 是 $200\ \mu\text{m}$ 。因此, 半导体部分 101 的大小近似等于 $\lambda_g/100$, 节距长度等于 $\lambda_g/2$, 间隔物 102 的大小近似等于 $\lambda_g/2$ 。注意, 当波导 107 的核心层 108 中的半导体部分 101 的比例高时, 如以下示例 2 中描述的那样, 等效折射率增大, 当比例为一半时, 等效折射率在示例 1 与示例 2 的等效折射率的中间。

[0050] 现参照图 3A、图 3B 以及图 3C1 至图 3C4 描述制造该示例的元件的波导 307a 的方法。作为第一衬底, 制备具有多量子阱结构的 InP 衬底 309, 多量子阱结构形成 InP 衬底上外延生长的半导体部分 301 (图 3A)。作为第二衬底, 制备 GaAs 衬底 305 (图 3B)。通过真空沉积在 InP 衬底 309 的上表面(上面放置有半导体部分 301 的表面)上形成 Ti/Pd/Au 层(20nm/20nm/200nm)。通过真空沉积在 GaAs 衬底 305 的上表面上形成 Ti/Pd/Au 层(20nm/20nm/200nm)。使得 InP 衬底 309 和 GaAs 衬底 305 的上表面彼此面对, 并且通过 Au 的热压缩接合而将两个衬底彼此接合(图 3C1)。在此通过热压缩接合而形成的 Ti/Pd/Au/Pd/Ti 层(20nm/20nm/400nm/20nm/20nm)是第一金属层 303。通过研磨和盐酸蚀刻从整体衬底移除 InP 衬底 309, 以将半导体部分 301 转移到 GaAs 衬底 305 上(图 3C2)。通过光刻和干法蚀刻而将半导体部分 301 划分为多个半导体部分 301a, 其中的每一个以岛形状形成。通过旋转涂覆和干法蚀刻而将 BCB 填充到邻近的半导体部分 301a 之间的空间, 以形成间隔物 302a。以此方式, 形成核心层 308a (图 3C3)。真空沉积和剥离(lift-off)用于形成 Ti/Pd/Au (20nm/20nm/200nm)的第二金属层 304 (图 3C4)。

[0051] 在该示例的元件中, 即使使用作为包括不同种类的薄膜的材料金属/半导体/金属的层叠结构, 也可减小晶格常数差或热膨胀系数差产生的应变。因此, 抑制归因于制造工艺等在初始状态中或操作期间在半导体中产生的应变或缺陷, 因此, 实现特性(比如振荡特性)的改进和稳定。在此, 通过提供间隔物 102, 使波导成为具有刚性结构的等离激元波导, 并且实现更稳定的元件。此外, 具有电磁波增益的半导体部分 101 至少被布置在要成为波导的振荡模式下的波腹的位置处, 相对于太赫兹波的低损耗材料的间隔物 102 被布置在要成为振荡模式下的波节的位置处, 因此, 实现低损耗和高效的等离激元波导。此外, 在根据本发明的半导体元件中, 以不连续膜(例如凹入凸出结构或岛形状的结构)形成使电流流过的半导体部分 101。因此, 与常规情况相比, 减少了半导体的面积, 因此, 抑制了被使得流过元件的电流。更具体地说, 在该示例中, 基于半导体层的结构和面积而近似计算出的元件的电阻是大约 $10\ \Omega$, 其为常规情况(即大约 $0.1\ \Omega$)的 100 倍。因此, 可以减少被使得流过包括元件、外围电路以及外部电源的整个系统的电流, 因此, 减少微小电阻器、电容器等的寄生组件的影响, 结果是可预期振荡器的产率的改进。此外, 如果大电流不是必须的, 则普通电子组件和装置可以用作电源和外围电路, 因此, 可预期更实际的效果(例如成本减少)。

[0052] 本发明不限于该示例的上述结构, 以下描述的修改示例也是可能的。例如, 在该示例中, 上述有源层 106 是以在 InP 衬底上生长的 InGaAs/InAlAs 或 InGaAs/AlAs 形成的三垒谐振隧道二极管。然而, 本发明不限于这样的结构和材料, 其它结构以及其它材料组合也可以提供半导体元件。例如, 也可以使用具有双垒量子阱结构的谐振隧道二极管, 具有四元或更多的多垒量子阱结构、已知为量子级联激光器的具有级联连接的多量子阱结构等的谐振隧道二极管等。关于材料组合, 也可以使用 GaAs 衬底上形成的 GaAs/AlGaAs、GaAs/AlAs、或 InGaAs/GaAs/AlAs, InP 衬底上形成的 InGaAs/AlGaAsSb, InAs 衬底上形成的 InAs/AlAsSb 或 InAs/AlSb, Si 衬底上形成的 SiGe/SiGe 等。可以取决于期望频率等而适当地选择结构

和材料。

[0053] 此外,在该示例中,假设载流子是电子来进行描述。然而,本发明不限于此,也可以使用正空穴(空穴)。此外,可以取决于应用目的而选择衬底的材料,也可以使用半导体衬底(诸如硅衬底、砷化镓衬底、砷化铟衬底、或磷化镓衬底等)、玻璃衬底、陶瓷衬底、树脂衬底等。此外,作为第一金属层 103 和第二金属层 104,也可以适当地使用金属(Ag、Au、Cu、Al、AuIn 合金等)或半金属(Bi、Sb、ITO、ErAs 等)。应理解,重掺杂的半导体可以用作导体。此外,作为间隔物 102,适当地使用无机材料(诸如 SiO_2 、TEOS、多晶硅、 SiN_x 、AlN 或 TiO_2 等)或有机材料(诸如 BCB、SU-8 或聚酰亚胺等)。此外,也可以使用重新生长的低导电本征半导体。这些修改示例相似地可应用于其它实施例和示例。

[0054] 示例 2

[0055] 现参照图 2A 至图 2C 以及图 3A、图 3B、图 3C1 至图 3C4 以及图 3D1 至图 3D4 描述根据本发明的示例 2 的元件。作为有源层 206,使用与示例 1 的情况下相同的谐振隧道二极管结构,并且半导体部分 201 的结构也与示例 1 的情况相同。关于波导 207,也与示例 1 的情况相似,长度 L 是 1mm ,其为 λ_g 的 20 倍,宽度是 0.05mm ,第二金属层 204 形成在 $1\text{mm} \times 0.05\text{mm}$ 的矩形图案中。省略与示例 1 的情况相似的其它结构的描述。

[0056] 在该示例中每个均以岛形状形成的半导体部分 201 中的每个均在宽度为 $24\mu\text{m}$ 的方形中,并且从波导 207 的一端被布置在波导 207 的纵向方向和横向方向上,各个节距长度为 $25\mu\text{m}$ ($\lambda_g/8$)。在图 2A 至图 2C 中,节距长度是将成为一个周期(一个节距长度)的一个凹入部分的长度与一个凸出部分的长度的和。与波导模式下电磁波的传播方向平行的节距长度由 PL1 表示,面内的与传播方向垂直的方向上的节距长度由 PL2 表示。为了容易理解结构,减少半导体部分 201 的数量。具有 $1\mu\text{m}$ 的宽度的间隔物 202 被布置在邻近的半导体部分 201 之间,在要成为波导 207 的振荡模式下谐振电场中的波节的位置处,并且该间隔物 202 被布置为多条线的形式。在该示例中,波导 207 的端面是开放端,至少距端面 $\lambda_g/4$ 的位置是谐振电场中的波节的位置。通过在要成为不贡献于放大的电场中的波节的位置处布置不是增益介质的间隔物 202,与在所述位置具有半导体部分 201 的结构的情况相比,更加防止振荡器的增益的降低。在该示例中,作为间隔物 202,布置太赫兹波带中低损耗的 SiO_2 ,以便与半导体部分 201 接触。

[0057] 从半导体部分 201 的厚度可见,第一金属层 203 与第二金属层 204 之间的距离大约是 $1\mu\text{m}$,并且间隔物 202 被设置为具有相同厚度。在该示例中,波导 207 的核心层 208 的多于 90% 是半导体部分 201,电磁波在表面等离子激元模式下传播通过有源层 206 的薄本征半导体层。在该示例中,如果当振荡频率为 0.3THz 时波导 207 的等效折射率是大约 20,则振荡模式下的波导波长 λ_g 是 $50\mu\text{m}$ 。因此,半导体部分 201 的大小近似等于 $\lambda_g/2$,节距长度近似等于 $\lambda_g/2$,间隔物 202 的大小近似等于 $\lambda_g/50$ 。

[0058] 现参照图 3A、图 3B 以及图 3D1 至图 3D4 描述制造该示例的元件的波导 307b 的方法。如下制造该示例中的波导 307b。作为第一衬底,制备具有多量子阱结构的 InP 衬底 309,多量子阱结构形成通过分子束外延等在 InP 衬底上外延地生长的半导体部分 301 (图 3A)。作为第二衬底,制备 GaAs 衬底 305 (图 3B)。通过光刻和干法蚀刻而将半导体部分 301 划分为多个半导体部分 301b,其中的每一个以岛形状形成。通过等离子体 CVD (化学气相沉积) 和 CMP (化学机械抛光) 将 SiO_2 填充到邻近的半导体部分 301b 之间的空间,以

形成间隔物 302b (图 3D1)。通过真空沉积在 InP 衬底 309 的上表面(上面布置有半导体部分 301b 的表面)上形成 Ti/Pd/Au 层(20nm/20nm/200nm)。通过真空沉积在 GaAs 衬底 305 的上表面上形成 Ti/Pd/Au 层(20nm/20nm/200nm)。使 InP 衬底 309 和 GaAs 衬底 305 的上表面彼此面对,并且通过 Au 的热压缩接合而将衬底彼此接合(图 3D2)。在此通过热压缩接合而形成的 Ti/Pd/Au/Pd/Ti 层(20nm/20nm/400nm/20nm/20nm)是第一金属层 303。通过研磨和盐酸蚀刻从整体衬底移除 InP 衬底 309,以将半导体部分 301b 转移到 GaAs 衬底 305 上。通过光刻和干法蚀刻,形成间隔物 302b(图 3D3)。真空沉积和剥离用于形成 Ti/Pd/Au (20nm/20nm/200nm)的第二金属层 304 (图 3D4)。

[0059] 在该示例中的元件中,也抑制了归因于制造工艺等在初始状态中或操作期间在半导体中产生的应变和缺陷,因此,实现特性(比如振荡特性)的改进和稳定。

[0060] 示例 3

[0061] 现参照图 4A 至图 4C、图 5 以及图 6A 至图 6C 描述根据本发明的示例 3。注意,在附图中,减少凹入凸出结构的数量。作为有源层 406,使用与示例 1 的情况相同的谐振隧道二极管结构,并且半导体部分 401 的结构也与示例 1 相同。关于波导 407,长度 L 是 1mm,其为 λ_g 的 20 倍,宽度是 0.005mm,第二金属层 404 形成在 $1\text{mm} \times 0.005\text{mm}$ 的矩形图案中。省略与示例 1 的情况相似的其它结构的描述。

[0062] 该示例中的振荡器 400 包括波导 407 的一个端面附近的区域 412,其中,半导体部分 401 以岛形状形成,作为凹入凸出结构的间隔物 402 在面内方向上延伸。与示例 1 的情况相似,以 BCB 形成间隔物 402。在该示例中,波导 407 的核心层 408 中的半导体部分 401 与间隔物 402 之间的体积比率分布在面内方向上。换句话说,波导 407 的核心层 408 中的凹入凸出结构的疏密程度在波导的端面附近逐渐改变。更具体地说,如图 5 的表所示,半导体部分 401 和间隔物 402 被布置为使得半导体部分 401 的体积比率以 $20\mu\text{m}$ 节距的增量朝向所述端面逐渐减小(因此,间隔物 402 的体积比率逐渐增大)。区域 412 的长度 L' 是 0.14mm。

[0063] 图 5 示出对于该示例的波导 407 的结构使用高频电磁场仿真器(ANSYS 公司制造的 HFSS)在 300GHz 处进行的间隔物的体积比率与等效折射率之间的相关性的分析结果。传播通过波导 407 的电磁波的等效折射率与间隔物 402 与半导体部分 401 之间的体积比率有关地从大约 2 逐渐改变为 20。因此,在该示例中公开的结构中,在波导 407 的端面附近的区域 412 中,等效折射率朝向端面逐渐减少,以达到大约 2,因此,可以相对容易地实现与波导的外部的阻抗匹配。在此使用的波导的外部指代例如自由空间、传输线、或具有低介电常数的电介质。

[0064] 图 6A 至图 6C 是示出作为该示例的修改示例的波导 500 的视图。注意,在这些图中,为了容易理解结构特性,减少凹入凸出结构的数量。此外,波导 500 的基本结构和材料与图 4A 至图 4C 所示的振荡器 400 相同,因此省略其描述。如在振荡器 500 中那样,可以在波导 507 的两侧的端面附近包括区域 512 和区域 513;在区域 512 和区域 513 中布置了将要成为在面内方向上延伸的凹入凸出结构的间隔物 502 和以岛形状形成的半导体部分 501。在波导 507 的区域 512 和区域 513 中,具有 $2\mu\text{m}$ 的宽度的半导体部分 501 被布置为使得其每单位长度的数量朝向端面逐渐减少。更具体地说,具有 $2\mu\text{m}$ 宽度的半导体部分 501 被布置为使得其每 $50\mu\text{m}$ 长度的数量在 $50\mu\text{m}$ 节距的增量的情况下逐渐减少为 25、10、5、2 和 1。在此情况下, $L' = 250\mu\text{m}$ 。其中端面附近的等效折射率以此方式逐渐改变的结构也适合于

与外部的阻抗匹配。此外,在本发明的另一修改示例中,可以通过部分地改变波导 407 的核心层 408 中的凹入凸出结构的疏密程度而部分地改变波导的有效折射率。

[0065] 在该示例的元件中,也抑制了归因于制造工艺等在初始状态中或操作期间在半导体中产生的应变或缺陷,因此,实现特性(比如振荡特性)的改进和稳定。此外,在 DMW 中,在端面处的反射增加,并且波束图案归因于波导与空间之间的模式失配而发散,因此,从应用性的观点来说,DMW 在波束的高效使用和传送路线中有问题。使用根据本发明的结构,可以提供容易地实现波导与外部之间的阻抗匹配的高效波导。

[0066] 此外,可以与用于计算样本的状态等的算术单元结合使用上述波导来提供图 7 所示的装置。例如,波导用作振荡器,并且样本放置在波导的一端处。样本与从波导发送的电磁波相互作用,因此,一些影响作用在发送的电磁波上。施加于样本的电磁波被样本反射或穿过样本,被检测器检测到。此后,算术单元(例如个人计算机)基于检测信号而计算样本的状态。更具体地说,提出了对用于检查医药状态等的工业检查装置的应用。

[0067] 虽然已经参照示例性实施例描述了本发明,但应理解,本发明不限于公开的示例性实施例。所附权利要求的范围将要被赋予最宽泛的解释,从而包括所有这些修改以及等效结构和功能。

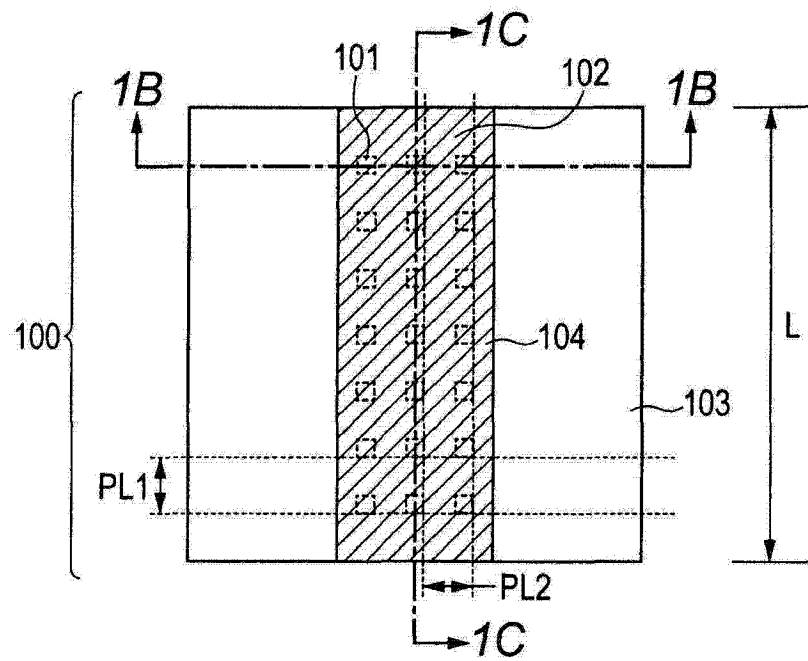


图 1A

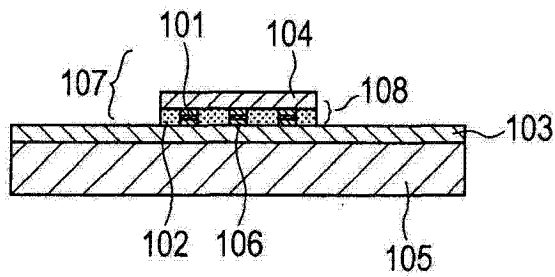


图 1B

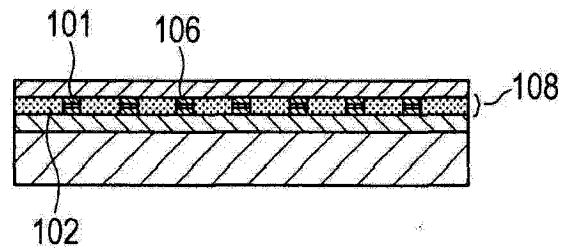


图 1C

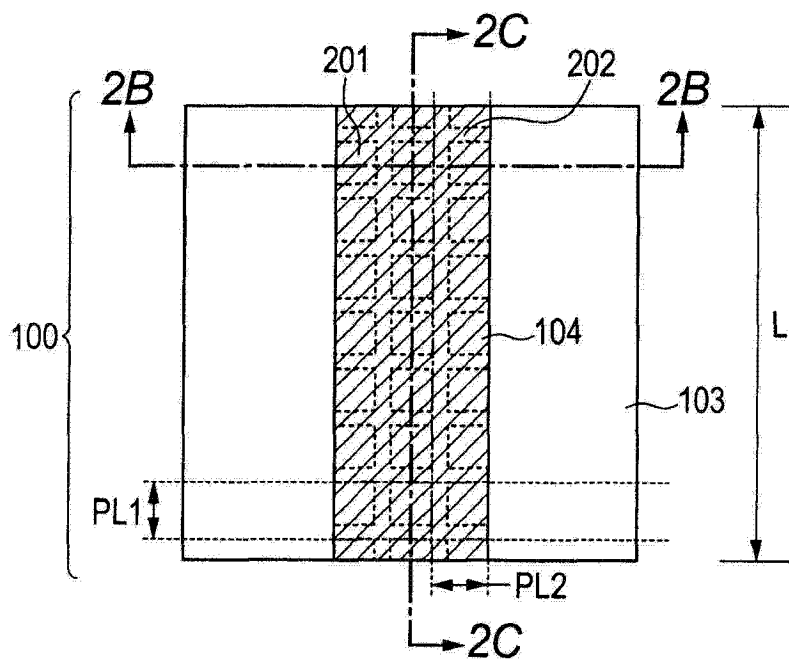


图 2A

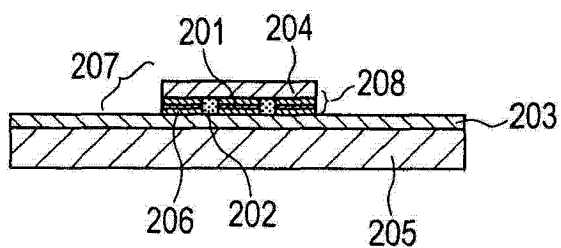


图 2B

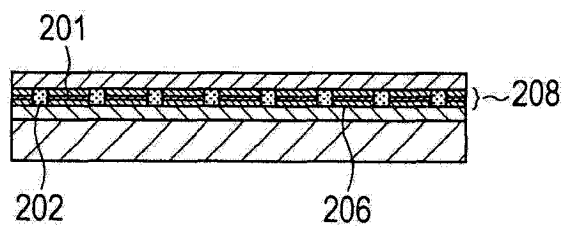


图 2C



图 3A

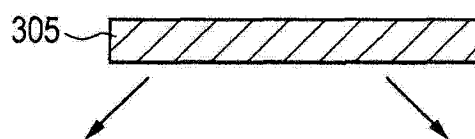


图 3B

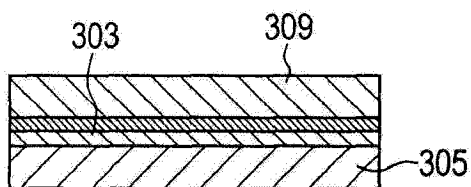


图 3C1



图 3C2

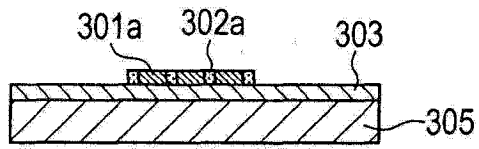


图 3C3

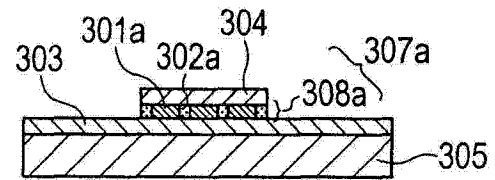


图 3C4

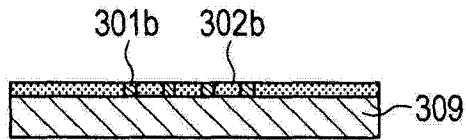


图 3D1

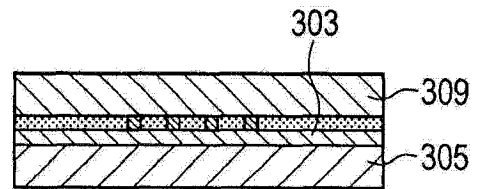


图 3D2

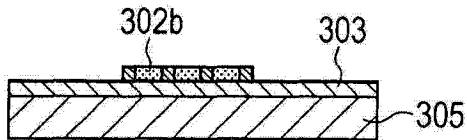


图 3D3

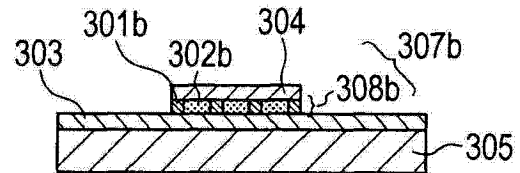


图 3D4

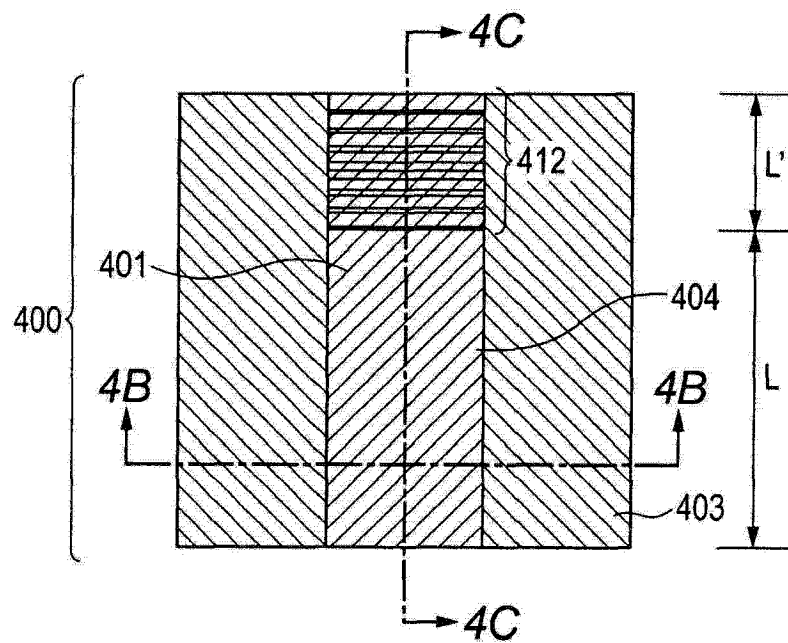


图 4A

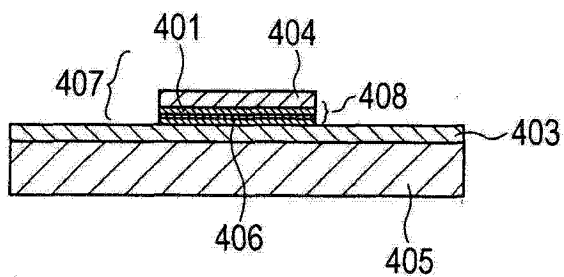


图 4B

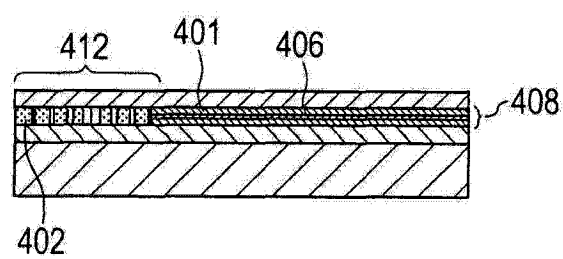


图 4C

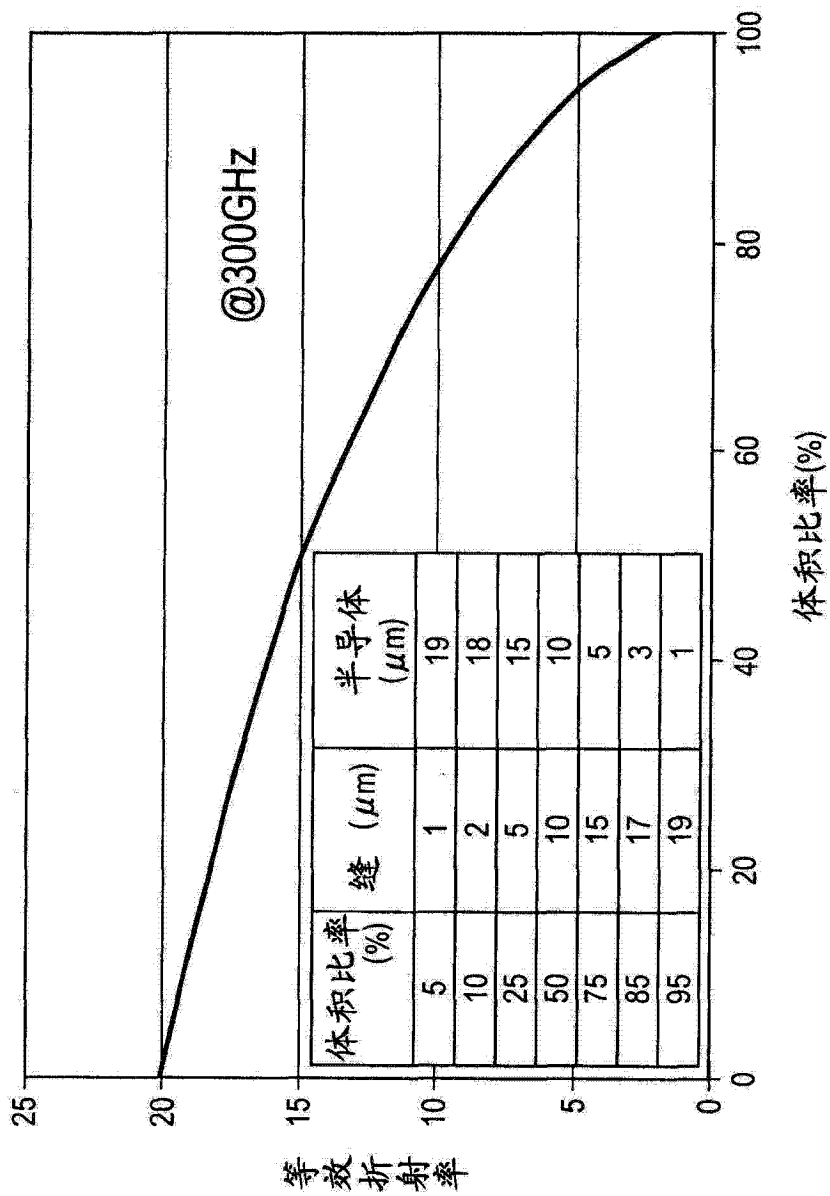


图 5

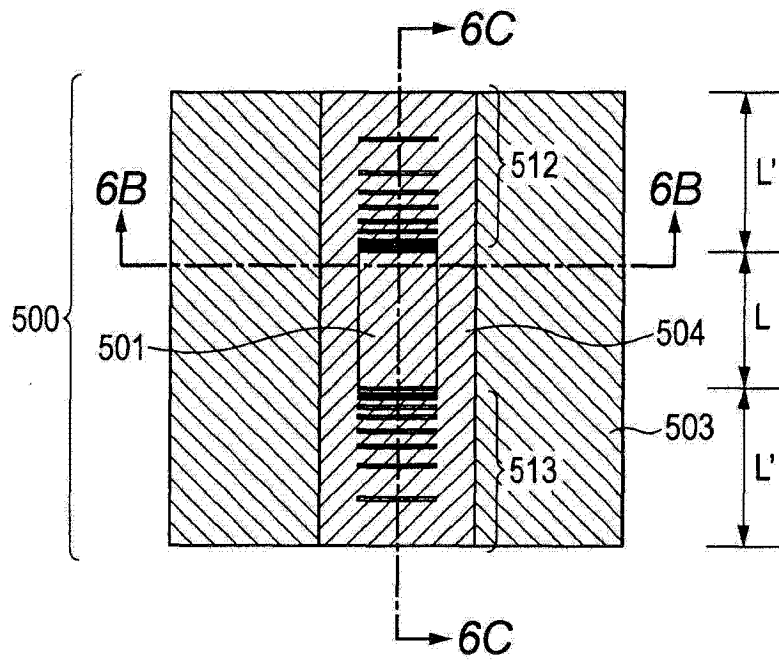


图 6A

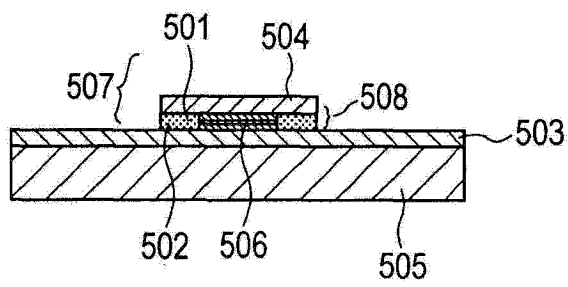


图 6B

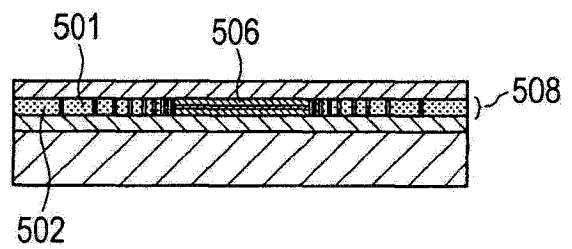


图 6C

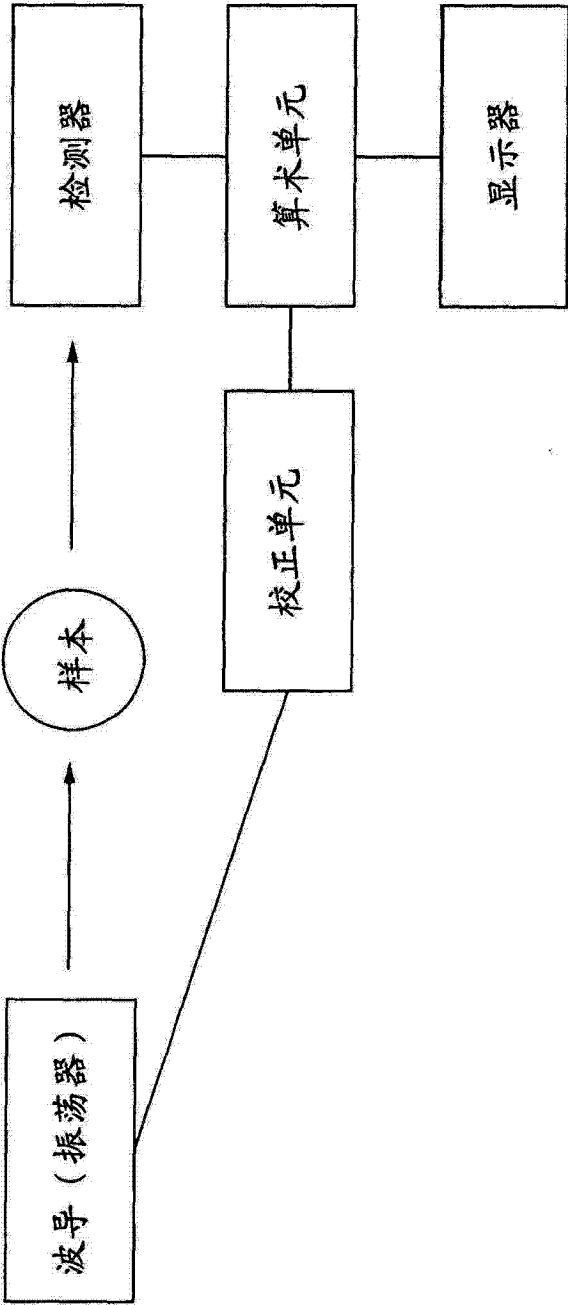


图 7