



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102750997 A

(43) 申请公布日 2012. 10. 24

(21) 申请号 201210111013. 7

(22) 申请日 2012. 04. 16

(30) 优先权数据

2011-093068 2011. 04. 19 JP

(71) 申请人 佳能株式会社

地址 日本东京

(72) 发明人 冈本康平 高本笃史 宫田浩克

久保亘 野间敬

(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 欧阳帆

(51) Int. Cl.

G21K 1/06 (2006. 01)

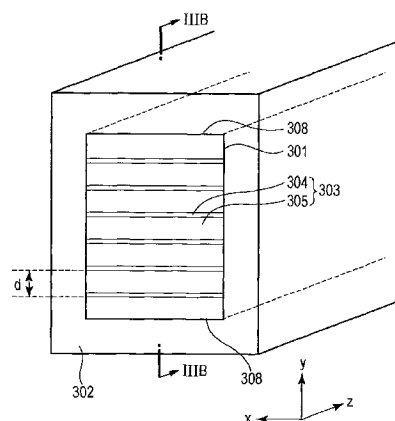
权利要求书 1 页 说明书 16 页 附图 14 页

(54) 发明名称

X 射线波导

(57) 摘要

本发明涉及 X 射线波导。该 X 射线波导包括包层和芯区。该芯区具有在至少一个周期方向上形成的周期结构。该周期结构包括周期性地排列的由具有不同的折射率实部的材料构成的部件。该芯区在与导波方向垂直的平面中被包层包围。由该周期结构的周期性获得的布拉格角小于 X 射线入射在包层和芯区之间的界面上的全反射临界角。该至少一个周期方向是表示与该导波方向垂直的芯区的平面中的周期结构的周期性的至少一个基本向量的方向。



1. 一种 X 射线波导,被配置为在预定方向上引导 X 射线通过所述 X 射线波导,包括:
包层;和

芯区,所述芯区具有在至少一个周期方向上形成的周期结构,所述周期结构包括周期性地排列的由具有不同的折射率实部的材料构成的部件,所述芯区在与引导电磁波的导波方向垂直的平面中被所述包层包围,

其中由所述周期结构的周期性获得的布拉格角小于所述 X 射线入射在包层和芯区之间的界面上的全反射临界角,以及

其中所述至少一个周期方向由表示与所述导波方向垂直的芯区的平面中的所述周期结构的周期性的至少一个基本向量的方向定义。

2. 根据权利要求 1 所述的 X 射线波导,其中所述至少一个周期方向由与所述导波方向垂直的多个基本向量的和或差形成的向量的方向定义。

3. 根据权利要求 1 所述的 X 射线波导,其中所述包层被布置为在与引导电磁波的导波方向垂直的方向上包围所述芯区。

4. 根据权利要求 1 所述的 X 射线波导,其中包括周期性地排列的部件的周期结构由介观结构材料构成。

5. 根据权利要求 1 所述的 X 射线波导,其中包括周期性地排列的部件的周期结构由介孔材料构成。

X 射线波导

技术领域

[0001] 本发明涉及 X 射线波导,并且具体地涉及在用于 X 射线分析技术、X 射线图像拾取技术、X 射线曝光技术等 X 射线光学系统中使用的 X 射线光学元件。

背景技术

[0002] 为了控制包括 X 射线波 (X 射线辐射) 的电磁波,主要使用大型空间光学系统。这是因为当使用具有几十纳米或更小的短波长的电磁波时,不同的物质之间的折射率的差别非常小,因此全反射角变得非常小。包括由具有不同的折射率的材料构成的交替层的多层反射器是空间光学系统的主要部分,并且用作各种功能 (诸如波束成形、光斑尺寸转换和波长选择)。

[0003] 另一方面,与这样的主流空间光学系统不同,X 射线波导 (诸如已知的多毛细管 (polycapillary)) 在 X 射线波通过全反射被限制在由一致的 (uniform) 物质 (诸如空气) 限定的导波部分中的状态下传播 X 射线辐射。近年来,为了实现小型化的、高性能的光学系统,已经研究了在电磁波被限制在薄膜或多层膜中的状态下传播电磁波的 X 射线波导。

[0004] Proceeding of SPIE,第 5974 卷,597414 页 (2005) (在下文中称为非专利文献 1) 在 Cedola 等人的题为“Ten years of x-ray waveguides :past,present and future”的文章中公开了一种薄膜波导,其包括具有两个层的包层 (cladding) 和在一维方向上由一致的材料构成并且位于该包层的两个层之间的芯区 (core)。Journal of Applied Physics, 第 101 号,054306 页 (2007) (在下文中称为非专利文献 2) 在 Jarre 等人的题为“X-ray waveguide nanostructures :Design,fabrication,and characterization”的文章中公开了一种 X 射线波导,其包括多个基本 X 射线波导,该多个基本 X 射线波导通过在芯区和包层之间的界面处的全反射将 X 射线在二维方向上限制在由一致的材料构成的芯区中,因而引导 X 射线。

[0005] 非专利文献 1 的 X 射线波导将 X 射线限制在由一致的材料构成的芯区中。但是,由于限制的方向是一维的,因此 X 射线被发射到没有被限制的其它方向。这导致大的损耗。此外,为了在此结构中形成单个导模 (guided mode),将芯区形成非常小的厚度以便满足形成单模的要求。因此,不能增大要被引导的 X 射线的功率。

[0006] 在非专利文献 2 中,每个基本 X 射线波导可以独立地形成单个导模,但是相邻的基本 X 射线波导的模式被结合以形成多个耦合的导模。因此,难以形成相位对准的单个导模。此外,由于在一维方向上布置基本波导,因此不能增大导模的截面。因此,不能增大要被引导的 X 射线的功率。这里提到的导模的截面指的是在与导波方向垂直的导模的平面处在电磁场强度分布中具有高的电磁场强度的区域,并且例如对应于光纤中的导模的模式直径。此外,由于与基本 X 射线波导的数目相应地使用显著吸收 X 射线的大量材料,因此吸收损耗增大。

[0007] 这里提到的“要被引导的 X 射线的功率”指的是每单位时间在导波方向 z 上经过与导波方向 z 垂直的芯区的截面的 X 射线的总功率,并且是芯区截面上的波印廷 (Poynting)

向量的 z 分量在整个芯区截面上的积分。例如,要被引导的 X 射线的功率与光子通量等对应。

发明内容

[0008] 因此,本发明提供一种呈现低的传播损耗并且可以实现具有大的截面的相位对准的单个导模的 X 射线波导。

[0009] 该 X 射线波导包括包层和芯区。该芯区具有在至少一个周期方向上形成的周期结构。该周期结构包括周期性地布置的由具有不同的折射率实部的材料构成的部件。该芯区在与引导电磁波的导波方向垂直的平面中被包层包围。由该周期结构的周期性获得的布拉格 (Bragg) 角小于 X 射线入射在包层和芯区之间的界面上的全反射临界角。该至少一个周期方向由表示与该导波方向垂直的芯区的平面中的周期结构的周期性的至少一个基本向量的方向定义。

[0010] 该周期结构可以由介观结构 (mesostructured) 材料构成。可替代地,该周期结构可以由介孔 (mesoporous) 材料构成。

[0011] 该 X 射线波导呈现低的传播损耗并且可以实现具有大的截面的相位对准的单个导模。

[0012] 通过以下对示例性实施例的描述,本发明的更多的特征将变得清楚。

附图说明

[0013] 图 1 是在 X 射线波导的包层和芯区之间的界面处的全反射临界角的示意图示。

[0014] 图 2 是示出与 X 射线引导方向垂直的平面的 X 射线波导的截面图。

[0015] 图 3A 和图 3B 是根据本发明的实施例的 X 射线波导的示意图。

[0016] 图 4 是 X 射线波导的芯区的一部分的示意图。

[0017] 图 5 是在 X 射线波导中形成的导模的损耗与有效传播角之间的关系的曲线图。

[0018] 图 6 是根据本发明的另一个实施例的 X 射线波导的示意图。

[0019] 图 7 是在与 z 方向垂直的平面处图 6 所示的 X 射线波导的电场强度分布的图示。

[0020] 图 8 是根据本发明的第一实施例的 X 射线波导的示意图。

[0021] 图 9 是根据本发明的第二实施例的 X 射线波导的示意图。

[0022] 图 10 是根据本发明的第三实施例的 X 射线波导的示意图。

[0023] 图 11 是根据本发明的第四实施例的 X 射线波导的示意图。

[0024] 图 12 是根据本发明的第五实施例的 X 射线波导的示意图。

[0025] 图 13 是根据本发明的第六实施例的 X 射线波导的示意图。

[0026] 图 14 是根据本发明的第七实施例的 X 射线波导的示意图。

[0027] 图 15 是根据本发明的第八实施例的 X 射线波导的示意图。

[0028] 图 16 是根据本发明的第九实施例的 X 射线波导的示意图。

[0029] 图 17 是芯区中的导模的有效传播角的图示。

[0030] 图 18 是三角形格子 (lattice) 图案的二维周期结构的图示。

具体实施方式

[0031] 现在将详细描述本发明的实施例。根据实施例的 X 射线波导包括包层和芯区,并且被配置为在预定方向上引导 X 射线通过该波导。该芯区由具有周期结构的材料构成,该周期结构包括周期性地布置的具有不同的折射率实部的部件。在实施例的 X 射线波导中,该包层和芯区被布置为使得该包层在与引导电磁波的方向(导波方向)垂直的平面处包围该芯区。此外,该包层和芯区被设置为使得,在作为基本向量或由基本向量的和或差形成的向量的至少一个方向的周期方向上,由该周期结构的周期性获得的布拉格角小于包层和芯区之间的至少一个界面处的全反射临界角,该基本向量表示在与电磁波引导方向垂直的芯区的平面处该周期结构的周期性。

[0032] 在本发明中, X 射线指的是具有一范围的频率或波长的电磁波,在该范围中,材料具有 1 或更小的折射率实部。更具体地,这里提到的 X 射线指的是具有 100nm 或更小的波长的电磁波,包括极端紫外光(EUV 光)。本发明的实施例的 X 射线波导控制与 X 射线对应的电磁波。因此,这里提到的电磁波主要指的是 X 射线,但是公开的实施例不限于此。已知,对于 X 射线,材料的折射率的实部小于 1,因为与具有大于或等于紫外光的波长的波长的电磁波(可见光和红外辐射)的频率不同,具有这样的短波长的电磁波的频率如此高以致于材料的最外层电子不能响应。具体地说,用于引导或传输 X 射线的材料的折射率 n 一般由以下等式 (1) 表示:

$$[0033] \quad n = 1 - \delta - i\beta = \tilde{n} - i\tilde{\beta} \quad (1)$$

[0034] 在等式 (1) 中, δ 表示实部与 1 的偏差,并且与吸收有关的虚部 (i) 由下式表示:

$$[0035] \quad i\tilde{\beta}$$

[0036] 由于 δ 与材料的电子密度 ρ_e 成比例,因此材料的电子密度 ρ_e 越大,材料的折射率的实部越低。折射率实部由以下等式表示:

$$[0037] \quad \tilde{n} = 1 - \delta$$

[0038] 此外,电荷密度 ρ_e 与原子密度 ρ_a 和原子序数 Z 成比例。因此,对于 X 射线的材料的折射率由复数表示。在本说明书中,复数的实部指的是折射率实部或折射率的实部,而复数的虚部指的是折射率虚部或折射率的虚部。

[0039] 当对于与 X 射线对应的电磁波的折射率实部最大时,也就是说,当 X 射线在真空中传播时,空气的折射率实部是在正常环境条件下基本上所有气体中最大的。在本说明书中,真空被认为是一种介质(或材料)。此外,在本说明书中,具有不同的折射率实部的两种或更多种材料经常是具有不同的电子密度的两种或更多种材料。

[0040] 在这里的描述中,导模的相位对准不仅意味着在时间方面在与导波方向垂直的平面中的电磁场的相位差是 0,而且意味着电磁场的相位差根据周期结构的周期率分布在 $-II$ 和 $+II$ 之间周期性地变化,其中 II 指示导模的相移量。

[0041] 本发明的实施例的 X 射线波导通过在芯区和包层之间的界面处的全反射将 X 射线限制在芯区中,因而在预定方向上引导 X 射线通过波导。引导 X 射线的方向(X 射线引导方向)在三维笛卡儿坐标系中被定义为 z 方向。当芯区的折射率实部大于在芯区和包层之间的界面周围的包层的折射率实部时,以小于全反射临界角的角度进入芯区和包层之间的界面的 X 射线在此界面处被全反射并且限制在芯区中。在这种情况下,全反射临界角被定义为角 θ_c ,其由在芯区和包层之间的界面处入射的 X 射线相对于与该界面垂直且与导波方向

平行的平面形成。在图 1 中,当在 z 方向上引导 X 射线时,入射在包层和芯区之间的界面 101 上的 X 射线 104 在与界面 101 垂直的平面 102 中与界面 101 形成角 103。当以角 103 入射的 X 射线 104 在芯区和包层之间的界面处被全反射时,角 103 是全反射临界角 θ_c 。

[0042] 全反射临界角 θ_c 可以通过考虑芯区和包层的材料的折射率来计算。具体地说,当在包层和芯区之间的界面处的包层的材料的折射率实部 n_{clad} 大于在该界面处的芯区的材料的折射率实部 n_{core} ($n_{\text{clad}} < n_{\text{core}}$) 时,全反射临界角由以下等式 (2) 表示:

$$[0043] \quad \theta_c = \frac{180}{\pi} \arccos \left(\frac{n_{\text{clad}}}{n_{\text{core}}} \right) \quad (2)$$

[0044] 在这种情况下,本发明的实施例的 X 射线波导的芯区具有包括由多种材料构成的部件的周期结构,并且该周期结构的周期和基本结构非常小。因此,等式 (2) 的 n_{core} 不一定表示在包层和芯区之间的界面处的芯区中的部件的严格的折射率实部,并且可以被认为是在严格的折射率实部和在周期结构整体中的折射率实部的平均值之间的值。

[0045] 在本发明的实施例的 X 射线波导中,包层和芯区被布置为使得在与 X 射线引导方向垂直的平面处该包层包围该芯区。图 2 是 X 射线波导的沿着与 z 方向或 X 射线引导方向垂直的平面截取的截面图。也就是说,图 2 是在三维笛卡儿坐标系中 X 射线波导的沿着与 x-y 平面平行的平面截取的截面图。在与 X 射线引导方向垂直的平面处包层包围芯区意指,与将芯区 201 中的点 A 与芯区 201 之外的点 B 连接的线段 AB 形成角 ψ 的半直线 AC 对于 0° 到 360° 的任意角 ψ 都与包层 202 相交。因此,X 射线波导可以通过从包层和芯区之间的界面以小于或等于全反射临界角的角全反射 X 射线来在二维方向上将 X 射线限制在芯区中,因而引导 X 射线。

[0046] X 射线波导的芯区包括周期性地布置的具有不同的折射率的部件(周期结构)。在这样的 X 射线波导中,X 射线的导模由在芯区和包层之间的界面处的全反射形成。X 射线的导模可以是其中 X 射线不太受芯区的周期结构的周期性的影响的一致导模或者其中 X 射线显著地受周期性的影响的周期共振模式。这里提到的一致导模指的是在其中芯区的周期结构被均衡为充当对于 X 射线的一致的介质的导模。在此模式中,芯区的折射率对于 X 射线基本上是一致的。另一方面,在周期共振导模中,X 射线由于周期结构以多种方式衍射,以使得 X 射线与周期结构强烈地共振。周期共振导模是其中 X 射线与周期结构共振的模式。当周期结构是一维时,周期共振模式包含于一维布拉格衍射中;当它是二维时,周期共振模式包含于二维布拉格衍射中;而当它是三维时,周期共振模式包含于三维布拉格衍射中。

[0047] 在这里的描述中,表示在与电磁波引导方向垂直的芯区的平面处的周期结构的周期性的基本向量或由基本向量的和或差形成的向量的至少一个方向被称为周期方向。

[0048] 形成 X 射线波导的芯区和包层以使得由在与导波方向垂直的周期方向的至少一个上的周期结构的周期性获得的布拉格角小于包层和芯区之间的至少一个界面处的全反射临界角。因而,通过由在芯区和包层之间的界面处的全反射将与引起布拉格衍射的周期结构共振的导模限制在芯区中,可以形成周期共振导模。

[0049] 图 3A 和图 3B 是根据本发明的实施例的 X 射线波导的示意图。此 X 射线波导具有一维周期结构。在这些图中,在 z 方向上引导 X 射线。图 3A 是 X 射线波导的鸟瞰图,而图 3B 是示出沿着线 IIIB-IIIB 截取的与 y-z 平面平行的截面的截面图。芯区 301 具有一维周期结构,其包括基本结构 303,每个基本结构包括由具有小的折射率实部的材料构成的

低折射率实部层 304 和由具有大的折射率实部的材料构成的高折射率实部层 305。基本结构 303 在 y 方向上周期性地布置,周期为 d。布置包层 302 以使得在 x 和 y 方向上包围芯区 301。周期方向是沿其周期结构在与芯区中的电磁波引导方向垂直的平面处具有周期性的方向。周期方向平行于表示波导中的目标周期结构的周期性的基本向量。在图 3A 和图 3B 所示的实施例中,周期方向是 y 方向。在图 3B 中,附图标记 306 表示相对于芯区和包层之间的界面 308 测量的全反射临界角 θ_c 。以比全反射临界角 θ_c 小的角度进入界面 308 的芯区中的 X 射线被全反射并且在 y 方向上被限制。附图标记 307 表示布拉格角 θ_B 。被限制的 X 射线在与 y-z 平面平行的方向上形成导模。每个导模的基波具有不同的有效传播角 $\theta' (^{\circ})$ 。

[0050] 如图 17 所示,当芯区中的导模的波数向量的 z 分量,即传播常数是 k_z ,并且真空中的波数向量是 k_0 时,有效传播角由以下等式定义:

$$[0051] \quad \tilde{\theta} = \frac{180}{\pi} \arccos\left(\frac{k_z}{k_0}\right)$$

[0052] 因此,有效传播角 $\theta' (^{\circ})$ 基本上被认为是由导波方向和导模上的基波的传播方向形成的角。

[0053] 认为每个导模中的基波主要在芯区和包层之间的界面 308 处以有效传播角 $\theta' (^{\circ})$ 反射。因而,为了形成期望的导模,有效传播角 $\theta' (^{\circ})$ 小于 θ_c 。

[0054] 这里提到的术语基波指的是当形成导模的电磁波被概括为一种平面波时假定以有效传播角 $\theta' (^{\circ})$ 相对于导波方向(z 方向)传播的电磁波。

[0055] 此外,在图 17 中,在与导波方向(z 方向)垂直的方向上的基波的波数向量被称为波数向量的垂直分量 $k_{\perp}$ 。用在本发明的实施例的 X 射线波导中的导模是周期共振导模,并且周期共振导模的有效传播角接近于由周期结构的周期性获得的布拉格角 θ_B 。为了形成周期共振导模,芯区和包层满足关系 $\theta_B < \theta_c$,即满足由在与导波方向垂直的周期方向的至少一个上的周期结构的周期性获得的布拉格角小于包层和芯区之间的至少一个界面处的全反射临界角的关系。当在 y 方向上的周期结构的周期为 d 而芯区的折射率实部的平均值是 n_{avg} 时,近似的布拉格角 $\theta_B (^{\circ})$ 由以下等式 (3) 定义:

$$[0056] \quad \theta_B \approx \frac{180}{\pi} \arcsin\left(\frac{1}{n_{\text{avg}}} m \frac{\lambda}{2d}\right) \quad (3)$$

[0057] 在等式 (3) 中,m 表示自然数,以及 λ 表示 X 射线的波长。但是,在实践中期望的是布拉格角由 X 射线衍射分析等获得。

[0058] 此外,为了形成周期共振导模,X 射线不被从基本结构的具有不同的折射率实部的层之间的界面全反射。更具体地,当基本结构的不同材料之间的界面处的全反射临界角是 $\theta_{c\text{-multi}}$ 时,关系 $\theta_{c\text{-multi}} < \theta_B$ 成立。

[0059] 如上所述,对于本发明的实施例的 X 射线波导,选择材料以使得在周期方向上满足关系 $\theta_B < \theta_c$ 和 $\theta_{c\text{-multi}} < \theta_B$ 。因此,可以形成周期共振导模,因而可以引导 X 射线。由于在与导波方向垂直的平面处周期共振导模的电磁场强度分布更多地集中在周期结构中的低损耗材料区域中,因此周期共振导模的损耗显著降低。周期共振导模的损耗变得小于具有接近于周期共振导模的有效传播角的一致导模的损耗。因此,在形成包

括一致导模的多个导模的波导的结构条件下,周期共振导模也变得比其它导模更显著。如果在周期结构的周期方向上的周期的数目增大,则周期共振导模的损耗降低。在实践中,周期的数目可以是 20 或更多。如果芯区由一致的介质构成,通常通过大大减小芯区区域来形成单个导模。但是,通过使用具有周期结构的芯区,可以增大芯区区域,并且可以将低损耗周期共振导模形成为在周期方向上的单个导模。

[0060] 这里提到的术语“单模”意指这样的模式比其它模式更容易被选择并且几乎或基本上是单一的,或一些模式中的一个变得显著。

[0061] 在本发明的实施例中,可以对于在限定芯区的周期结构中的具有周期性的方向上的任何一个来定义 X 射线波导的周期方向。通过由具有特别高的周期性的方向来定义周期方向,可以进一步增强周期性对周期共振导模的效果。例如,图 3A 和图 3B 所示的周期结构在 x-y 平面中除了 x 轴方向之外在所有方向上都具有周期性,并且在 y 方向上呈现出最有效的周期性。在这里的描述中,周期性最有效的周期方向被定义为具有由其绝对值最低的基本向量定义的周期性的方向。

[0062] 本发明的实施例的 X 射线波导通过在芯区和包层之间的界面处的全反射来在周期方向上限制 X 射线以形成周期共振导模,并且此外,可以通过全反射在其它方向上限制 X 射线。因此,在不具有结构的周期性的方向上的 X 射线辐射可以被抑制,因而可以大大地降低损耗。图 3A 和图 3B 所示的其芯区具有一维周期结构的 X 射线波导在 x 轴方向上不具有结构的周期性。因此,在 x 轴方向上存在多个一致导模。但是,通过减小 x 轴方向上的芯区区域,可以形成单个导模。在实践中引导的 X 射线的导模是在多个限制方向上形成的导模的混合。但是,如果在所有限制方向上形成单个导模,则可以在二维方向上形成基本上单个导模。

[0063] 图 4 示出具有与图 3A 和图 3B 相同的结构的 X 射线波导的芯区的一部分。芯区具有周期结构,其包括在 y 方向上一个布置在另一个上的基本结构 403。每个基本结构 403 包括具有低折射率实部的部件 402 和具有高折射率实部的部件 401。在图 4 中,部件 401 的斜对角阴影内部区域具有较高的电场强度,而部件 401 的外侧区域和部件 402 整体具有较低的电场强度。

[0064] 发明人在这已经示出了通过将周期共振导模的电场强烈地集中在具有较高的折射率实部的部件 401 中,即低损耗的部件中,来降低周期共振导模的损耗。图 5 是在具有如图 4 所示的具有 25 个周期的周期结构的 X 射线波导中形成的导模的损耗相对于每个导模的有效传播角的曲线图。由于导模的损耗与传播常数的虚部 $\text{Im}[k_z]$ 成比例,因此纵轴表示 $\text{Im}[k_z]$ 。部分 502 与布拉格反射角的带对应。部分 503 与导模的有效传播角的带对应,并且部分 504 与大于芯区和包层之间的界面处的全反射临界角的发射模式角的带对应。周期共振导模的损耗 501 比其它导模的损耗小得多。可以通过改变材料或结构参数来改变周期共振导模的损耗。周期共振导模的电磁场分布的包络函数在周期方向上是三角函数,并且当该分布在周期结构的中心处具有最大值时,周期共振导模最稳定。在这种情况下,该模式到包层的漏损降低,因此损耗进一步降低。

[0065] 本发明的实施例的 X 射线波导的芯区可以具有二维周期结构。此结构可以形成二维周期共振导模。这里提到的二维周期结构指的是其周期性可以用在与导波方向垂直的平面中的两个基本向量表示的结构。例如,如图 6 所示,芯区 603 在 x-y 平面中具有二维结

构。二维结构包括具有较高的折射率实部的材料的区域 601 和具有较低的折射率实部的材料的区域 602。这些区域 601 和 602 在 z 方向上延伸并且形成芯区 603。芯区 603 被包层 604 包围。当 X 射线在 z 方向上被引导时,芯区在与导波方向垂直的 x - y 平面处具有方形格子排列的二维周期结构。周期结构的周期性用图 6 所示的两个基本向量 a_1 和 a_2 表示。为了简化描述起见,图 6 所示的周期结构的周期的数目在 x 和 y 方向上少至 2 个。二维周期结构包括:具有周期为 $|a_1|$ 的在与向量 a_1 平行的方向上重复的基本结构的平面,和具有周期为 $|a_2|$ 的在与向量 a_2 的方向平行的方向上重复的另一个基本结构的平面。可以任意选择基本向量 a_1 和 a_2 ,只要它们可以表示周期性即可。更具体地,可以通过例如不同的方式使用基本向量的线性结合来选择其它的基本向量,并且可以定义具有与选择的向量对应的基本结构的平面。最基本的周期性通过绝对值最低的基本向量来表示。周期性的效果在与这样的基本向量平行的方向上增大。可以使用这些方向作为周期方向来定义周期共振导模。在图 6 所示的实施例中,当向量 a_1 和 a_2 被选择为基本向量时,平面 607 具有对于向量 a_1 的基本结构,并且平面 608 具有对于向量 a_2 的基本结构。这些平面 607 和 608 分别在 x 方向和 y 方向上周期性地重复。

[0066] 在芯区具有二维周期结构的 X 射线波导中,同样,形成芯区和包层以使得布拉格角小于在包层和芯区之间的界面的至少一个中的全反射临界角。更具体地,形成芯区和包层以使得由在与 X 射线引导方向垂直的周期方向的至少一个上的周期结构的周期性获得的布拉格角小于包层和芯区之间的界面的至少一个中的全反射临界角。在图 6 所示的实施例中,在与导波方向垂直的 x - y 平面处的一个周期方向是 y 方向。形成包层和芯区以使得在 y - z 平面中的芯区和包层之间的界面 605 处的 X 射线的全反射临界角 θ_c 和 y 方向上的周期性获得的布拉格角 θ_B 满足关系 $\theta_B < \theta_c$ 。

[0067] 当芯区具有二维结构时,在由两个基本向量表示的两个周期方向上呈现基本周期性,因此可以定义从各个方向上的周期性获得的两个布拉格角。例如,在具有图 6 所示的结构 X 射线波导中,两个周期方向是与基本向量 a_1 平行的 x 方向和与基本向量 a_2 平行的 y 方向。由与基本向量 a_1 或 a_2 平行的两个周期方向上的周期结构的周期性获得的布拉格角 θ_{B1} 和 θ_{B2} 由以下等式表示:

$$[0068] \quad \theta_{B1} \approx \frac{180}{\pi} \arcsin \left(\frac{1}{n_{1\text{avg}}} m \frac{\lambda}{2|a_1|} \right)$$

$$[0069] \quad \theta_{B2} \approx \frac{180}{\pi} \arcsin \left(\frac{1}{n_{2\text{avg}}} m \frac{\lambda}{2|a_2|} \right)$$

[0070] 在该等式中, $n_{1\text{avg}}$ 和 $n_{2\text{avg}}$ 是芯区中的在与基本向量 a_1 或 a_2 平行的各自两个周期方向上的平均折射率。在与基本向量 a_1 或 a_2 平行的两个周期方向上的芯区和包层之间的界面 606 或 605 处的全反射临界角由 θ_{1c} 和 θ_{2c} 表示。为了在各个方向上形成周期共振导模,对于各个方向设置材料和结构参数,正如 $\theta_B < \theta_c$ 一致,以便满足关系 $\theta_{1B} < \theta_{1c}$ 和 $\theta_{2B} < \theta_{2c}$ 。通过满足关系 $\theta_{1B} < \theta_{1c}$ 和 $\theta_{2B} < \theta_{2c}$,以及通过将每个方向上的芯区中的材料之间的界面处的全反射临界角设置为小于相应的布拉格角,可以在两个周期方向上形成周期共振导模。在此波导中,在与两个基本向量平行的两个方向上的周期共振导模彼此干涉以形成二维周期共振导模。

[0071] 图 7 示出在图 6 所示的 X 射线波导的周期结构的芯区中周期共振导模的在与 z 方向垂直的平面处的电场强度分布。在图 7 中, 具有较高的折射率实部的材料的区域 601 的斜对角阴影内部具有较高的电场强度, 而包围区域 601 的斜对角阴影内部的部分和具有较低的折射率实部的材料的区域 602 具有较低的电场强度。在包括具有二维周期结构的芯区的 X 射线波导中形成的二维周期共振导模的电场强度分布是二维的。由于电场集中在损耗 (诸如吸收损耗) 较低的区域中, 因此显示出周期共振导模的传播损耗较低。正如一维周期共振导模一致, 通过设计可以将二维周期共振导模的损耗降低到低于其它导模的水平, 并且可以形成在二维方向上受控的单个导模。在与导波方向垂直的二维平面中有规则地控制二维周期共振导模的电场分布或磁场分布, 因此电场或磁场的相位在整个芯区上也是有规则的。

[0072] 定义芯区的二维周期结构的周期性的基本格子不限于四边形格子。在具有图 6 所示的四边形格子图案的周期结构中, 可以使用与两个基本向量平行的两个周期方向。但是, 周期方向不一定由这些方向定义, 并且与使用基本向量的线性结合的向量平行的方向可以被用作周期方向。此外, 二维平面中的周期方向的数目不限于两个, 并且可以根据周期结构的周期性而是三个或更多个。例如, 图 18 示出了由点表示的具有三角形格子图案的二维周期结构。除与基本向量 a_1 和 a_2 平行的两个周期方向之外, 还使用与由 a_1+a_2 表示的第三向量平行的另一个方向, 以使得具有三个方向上的垂直分量的 X 射线干涉以形成二维周期共振导模。在这种情况下, 周期共振导模的电磁场强度分布具有三角形格子的形状, 并且电磁场集中在吸收损耗较低的部分中。

[0073] 芯区的周期结构不限于一维或二维结构, 并且实施例的 X 射线波导可以包括具有三维周期结构的芯区。用于在与导波方向垂直的平面中形成周期共振导模的构思与一维和二维周期结构的情况相同。由于三维周期结构还在导波方向上具有周期性, 因此引导的 X 射线与该周期结构共振, 并且 X 射线的相位可以容易地在导波方向上对准。

[0074] 可以形成芯区的一维周期结构包括一维周期的多层膜以及可以定义周期方向的其它周期结构, 该一维周期的多层膜包括具有较高的折射率实部的材料和具有较低的折射率实部的材料的交替层。换句话说, 还可以通过集中在结构的特定方向上来使用二维或三维结构。

[0075] 对于一维周期的多层膜, 具有较高的折射率实部的材料的示例包括碳 (C)、碳化硼 (B_4C)、氮化硼 (BN) 和铍 (Be)。具有较低的折射率实部的材料的示例包括铝氧化物 (Al_2O_3)、镁氧化物 (MgO)、硅碳化物 (SiC)、硅氮化物 (Si_3N_4) 和钛氧化物 (TiO_2)。一维周期结构可以是具有较高的折射率实部的材料和具有较低的折射率实部的材料的交替层, 或者是通过自组装工艺制造的周期性的介观结构材料。一维周期性的介观结构材料可以是在与薄膜的表面垂直的方向上周期性地排列 SiO_2 和有机材料的结构, 或是在与该平面垂直的方向上具有周期性的平面内不具有取向性的二维介孔材料。

[0076] 二维周期结构可以是通过由半导体工艺 (诸如电子束光刻或刻蚀) 将具有较低的折射率实部的材料的薄膜图案化而形成的具有面内周期性图案的层的结构。可以使用单个轴取向的二维周期性的介观结构材料。

[0077] 三维周期结构可以是具有几纳米到几十纳米的直径的孔的三维周期性的介观结构材料。此外, 可以使用具有三维周期结构的人造乳白 (opal) 结构, 在其中具有大约 50nm

的直径的聚苯乙烯球以自组织方式排列成六方紧密充填结构。

[0078] 用于形成周期共振导模的周期结构的周期根据构成波导的材料折射率可以是大约 9nm 或更多。如果周期小于大约 9nm, 则周期共振导模的限制变弱。

[0079] 在本发明的实施例中, 芯区可以由介观结构材料或介孔材料构成。

[0080] 现在将描述由自组装工艺制造的一维介观结构材料。在下面的描述中, 一维介观结构材料被称为介观结构层状膜。

[0081] 介观结构膜是具有 2 到 50nm 的结构周期的周期结构。层状结构包括两种不同的材料的层: 一种主要包含无机成分; 另一种主要包含有机成分。必要时可以结合主要包含无机成分的层(基于无机的层)和主要包含有机成分的层(基于有机的层)。这样的结合的材料可以是与烷基结合的硅氧烷化合物制备的介观结构材料。

[0082] 基于无机的层

[0083] 基于无机的层的材料没有特别限制, 并且可以是无机氧化物。示例性的无机氧化物包括硅氧化物、锡氧化物、锆氧化物、钛氧化物、铌氧化物、钽氧化物、铝氧化物、钨氧化物、钼氧化物和锌氧化物。基于无机的层的壁部分的表面必要时可以被修改。例如, 可以利用疏水性的分子修改它以便抑制水的吸收。

[0084] 基于有机的层

[0085] 基于有机的层没有特别限制, 并且有机成分可以是具有能够形成分子聚集体并且与形成壁部分的材料或形成壁部分的材料的前体 (precursor) 结合的部位的材料, 诸如表面活性剂。这样的表面活性剂可以是离子的或非离子的。离子型表面活性剂可以是三甲基烷基铵 (trimethylalkylammonium) 卤化物。此表面活性剂的烷基链可以具有 10 到 22 的碳数。非离子型表面活性剂可以包含聚乙二醇作为亲水基。包含聚乙二醇作为亲水基的表面活性剂的示例包括聚乙二醇烷基醚和聚乙二醇-聚丙二醇-聚乙二醇的嵌段共聚物。聚乙二醇烷基醚的烷基链可以具有 10 到 22 的碳数, 并且聚乙二醇的重复的数目可以是 2 到 500。通过改变表面活性剂的疏水基或亲水基, 可以改变结构的周期。通常, 通过增大疏水基和亲水基的尺寸, 可以增大结构的周期。基于有机的层可以根据需要或根据使用的材料或制造工艺而包含有机溶剂或盐。有机溶剂的示例包括酒精、乙醚和碳氢化合物。

[0086] 用于形成介观结构膜的工艺没有特别限制。例如, 将无机氧化物前体添加到可以形成分子聚集体的两亲材料(特别是表面活性剂)的溶液中, 然后施加结果得到的溶液以形成膜, 后面是加速反应以形成无机氧化物。

[0087] 除表面活性剂之外, 还可以添加添加剂来调节结构的周期。这样的添加剂可以是疏水性的材料。示例性的疏水性的材料包括不具有亲水基的苯化合物和烷烃, 并且可以使用例如辛烷。

[0088] 无机氧化物前体可以是硅或金属元素的醇化物或氯化物。这样的无机氧化物前体的示例包括 Si、Sn、Zr、Ti、Nb、Ta、Al、W、Hf 和 Zn 的醇化物和氯化物。示例性的醇化物包括甲醇盐、乙醇盐、丙醇盐和用烷基取代的醇化物。

[0089] 可以通过浸渍涂敷、旋涂或水热合成来形成膜。

[0090] 现在将描述具有二维或三维结构周期的周期性的介观结构材料。根据由 IUPAC (国际纯化学与应用化学联合会) 指定的孔尺寸将多孔材料分类, 并且具有 2 到 50nm 的孔尺寸的多孔材料被归类为介孔材料。介孔材料正在被集中研究, 并且通过使用表面活

性剂的聚集体作为模板可以获得其中具有相同直径的介孔有规则地排列的结构。

[0091] 在本发明的实施例中使用的具有二维或三维结构周期的周期性的介观结构材料是如上所述的介观结构膜并且包括以下具有二维或三维结构周期的材料：

[0092] (A) 介孔膜；和

[0093] (B) 其孔主要填充有机化合物的介孔膜。

[0094] 下面将详细描述这些膜。

[0095] (A) 介孔膜

[0096] 介孔膜由具有 2 到 50nm 的孔尺寸的多孔材料构成，并且该膜的壁部分的材料没有特别限制。例如，从可成形性的角度看，它可以由无机氧化物构成。示例性的无机氧化物包括硅氧化物、锡氧化物、锆氧化物、钛氧化物、铌氧化物、钽氧化物、铝氧化物、钨氧化物、钼氧化物和锌氧化物。壁部分的表面必要时可以被修改。例如，可以利用疏水性的分子修改它以便抑制水的吸收。

[0097] 用于形成介孔膜的工艺没有特别限制，可以应用例如下面的方法。将无机氧化物前体添加到其聚集体用作模板的两亲材料的溶液中，并且施加结果得到的溶液以形成膜，后面是加速反应以形成无机氧化物。然后，去掉模板分子以得到多孔材料。

[0098] 两亲物质没有特别限制，并且表面活性剂是合适的。这样的表面活性剂可以是离子的或非离子的。离子型表面活性剂可以是三甲基烷基铵 (trimethylalkylammonium) 卤化物。此表面活性剂的烷基链可以具有 10 到 22 的碳数。非离子型表面活性剂可以包含聚乙二醇作为亲水基。包含聚乙二醇作为亲水基的表面活性剂的示例包括聚乙二醇烷基醚和聚乙二醇-聚丙二醇-聚乙二醇的嵌段共聚物。聚乙二醇烷基醚的烷基链可以具有 10 到 22 的碳数，并且聚乙二醇的重复的数目可以是 2 到 500。通过改变表面活性剂的疏水基或亲水基，可以改变结构的周期。通常，通过增大疏水基和亲水基的尺寸，可以增大孔尺寸。除表面活性剂之外，还可以添加添加剂来调节结构的周期。这样的添加剂可以是疏水性的材料。示例性的疏水性的材料包括不具有亲水基的苯化合物和烷烃，并且可以使用例如辛烷。

[0099] 无机氧化物前体可以是硅或金属元素的醇化物或氯化物。这样的无机氧化物前体的示例包括 Si、Sn、Zr、Ti、Nb、Ta、Al、W、Hf 和 Zn 的醇化物和氯化物。示例性的醇化物包括甲醇盐、乙醇盐、丙醇盐和其部分用烷基取代的醇化物。

[0100] 可以通过浸渍涂敷、旋涂或水热合成来形成膜。

[0101] 可以通过烧成、析取、紫外线照射或臭氧处理来去掉模板分子。

[0102] 如果结果得到的介观结构膜具有在单个轴方向上延伸的多个孔以二维方式周期性地排列在与该单个轴方向垂直的平面中的结构，则该膜是具有二维结构周期的二维周期性的介观结构材料。如果结果得到的介观结构膜具有介观尺度的孔以三维方式周期性地排列的结构，则该膜是具有三维结构周期的三维周期性的介观结构材料。

[0103] (B) 其孔主要填充有机化合物的介孔膜

[0104] 壁部分可以由与 (A) 中描述的相同的介孔膜材料构成。任何有机化合物可以用于填充孔而没有特定的限制。词“主要”意指有机化合物的体积比是 50% 或更多。有机化合物可以是表面活性剂，或是具有能够形成分子聚集体并且与形成壁部分的材料或形成壁部分的材料的前体结合的部位的材料。这样的表面活性剂可以与 (A) 描述的相同。具有能够形成分子聚集体并且与形成壁部分的材料或形成壁部分的材料的前体结合的地

示例包括具有烷基的烷氧基硅烷 (alkoxysilanes) 和具有烷基的硅氧烷 (origosiloxane) 化合物。烷基链可以具有 10 到 22 的碳数。

[0105] 填充孔的有机化合物可以根据需要或根据使用的材料或制造工艺而包含有机溶剂或盐。有机溶剂的示例包括酒精、乙醚和碳氢化合物。

[0106] 用于制备其孔主要填充有机化合物的多孔膜的工艺没有特别限制,并且可以应用在 (A) 中描述的工艺,但是不包括去掉模板分子也不包括后面的步骤。

[0107] 正如 (A) 的情况一致,如果结果得到的膜具有在单个轴方向上延伸的多个孔以二维方式周期性地排列在与该单个轴方向垂直的平面中的结构,则该膜是具有二维结构周期的二维周期性的介观结构材料。如果结果得到的膜具有介观尺度的孔以三维方式周期性地排列的结构,则该膜是具有三维结构周期的三维周期性的介观结构材料。

[0108] 为了形成周期共振导模,关系 $\theta_B < \theta_C$ 和 $\theta_{C_multi} < \theta_B$ 成立。因此,根据芯区的材料选择包层的材料,以使得包层的材料的折射率实部低于芯区的所有材料的折射率实部。只要这样选择材料,各种材料就可以用于包层。根据芯区的材料,具有高电子密度的材料可以被选择为包层的材料。例如,包层可以由金属(诸如金(Au)、钨(W)、钛(Ti)、铂(Pt)和镍(Ni))及其它材料构成。

[0109] 第一实施例

[0110] 图 8 示出根据本发明的第一实施例的 X 射线波导。在本实施例中, X 射线在该图所示的 z 方向上被引导,并且波导的每个部分在 z 方向上是连续的。X 射线波导具有在 Si 衬底 801 上芯区 806 在与导波方向垂直的平面中被 30nm 厚的钨(W) 部件 802 和 10nm 厚的钨(W) 部件 803 包围的结构。芯区 806 由具有一维周期结构的一维周期性的多层膜构成,该一维周期结构包括在与 Si 衬底 801 的表面垂直的方向上形成的大约 14nm 厚的碳(C) 部件 804 和大约 4nm 厚的铝氧化物(Al_2O_3) 部件 805 的交替层。该一维周期性的多层膜在 x 方向上具有大约 $1\mu m$ 的有限宽度。多层膜的周期的数目是 30。

[0111] 通过由电子束光刻和干法刻蚀工艺图案化来形成芯区 806。在芯区 806 的图案化之后通过溅射形成钨(W) 部件 803。钨(W) 部件 802 和 803 用作 X 射线波导的包层。

[0112] 在本实施例中,芯区 806 具有一维周期结构,并且使用周期性的效果的周期方向是 y 方向。例如,对于具有 17.5keV 的光子能量的 X 射线,在 y 方向上在包层和芯区之间的界面处的全反射临界角 θ_C 是大约 0.25° , 并且由周期性的多层膜的周期性得到的布拉格角 θ_B 是 0.22° 。因而,满足 $\theta_B < \theta_C$ 。因此,由一维周期性的多层膜的周期性引起的周期共振导模在 y-z 平面中变得显著,因而可以形成单个低损耗的 X 射线导模。由于在 x 方向上的波导的芯区 806 的宽度较大,因此多个一致导模存在于 z-x 平面中。因此,总体上对 X 射线的传播有贡献的导模是 y-z 平面中的周期共振导模和 z-x 平面中的一致导模的混合。此外,由于通过包层和芯区之间的界面处的全反射不仅在 y 方向上而且在 x 方向上限制 X 射线,因此可以大大降低 x 方向上的 X 射线的辐射损耗。

[0113] 第二实施例

[0114] 图 9 示出根据本发明的第二实施例的 X 射线波导。在本实施例中, X 射线在该图所示的 z 方向上被引导,并且波导的每个部分在 z 方向上是连续的。在本实施例的 X 射线波导中,代替第一实施例的芯区,一维周期性的(层状)介观结构材料的膜被用作芯区。此 X 射线波导具有在 Si 衬底 901 上芯区 906 在与导波方向垂直的平面中被 30nm 厚的钨(W)

部件 902 和 10nm 厚的钨 (W) 部件 903 包围的结构。芯区 906 是一维周期性的 (层状) 介观结构材料的膜并且具有一维周期结构, 该一维周期结构包括在与 Si 衬底 901 的表面垂直的方向 (y 方向) 上形成的大约 80nm 厚的有机部件 904 和大约 2nm 厚的硅石 (SiO_2) 部件的交替层。该一维周期结构在 x 方向上具有有限宽度。周期结构的周期的数目是 50。

[0115] 通过由电子束光刻和干法刻蚀工艺图案化来形成芯区 906。在芯区 906 的图案化之后通过溅射形成钨 (W) 部件 903。钨 (W) 部件 902 和 903 用作 X 射线波导的包层。

[0116] 在本实施例中, 芯区 906 具有一维周期结构, 并且使用周期性的效果的周期方向是 y 方向。例如, 对于具有 8keV 的光子能量的 X 射线, 在 y 方向上在包层和芯区之间的界面处的全反射临界角 θ_c 大约为 0.54° , 并且由周期性的多层膜的周期性得到的布拉格角 θ_B 是 0.49° 。因而, 满足 $\theta_B < \theta_c$ 。因此, 由一维周期性的多层膜的周期性引起的周期共振导模在 y-z 平面中变得显著, 因而可以形成单个低损耗的 X 射线导模。由于在 x 方向上的波导的芯区 906 的宽度较大, 因此多个一致导模存在于 z-x 平面中。因此, 总体上对 X 射线的传播有贡献的导模是 y-z 平面中的周期共振导模和 z-x 平面中的一致导模的混合。此外, 由于通过包层和芯区之间的界面处的全反射不仅在 y 方向上而且在 x 方向上限制 X 射线, 因此可以大大降低 x 方向上的 X 射线的辐射损耗。

[0117] 第三实施例

[0118] 图 10 示出根据本发明的第三实施例的 X 射线波导。在本实施例中, X 射线在该图所示的 z 方向上被引导, 并且波导的每个部分在 z 方向上是连续的。此 X 射线波导具有在 Si 衬底 1001 上芯区 1006 在与导波方向垂直的平面中被 20nm 厚的钽 (Ta) 部件 1002 和 8nm 厚的钽 (Ta) 部件 1003 包围的结构。芯区 1006 是二维周期性的介观结构材料的膜, 并且包括硅石部分 1005, 在硅石部分 1005 中具有大约 4nm 的半径的孔 1004 在导波方向 (z 方向) 上延伸。孔 1004 在与导波方向垂直的方向上 (在与 x-y 平面平行的方向上) 排列, 以形成具有三角形格子图案的二维周期结构。格子常数是大约 11.6nm。

[0119] 芯区 1006 已经通过光刻和干法刻蚀而被图案化, 并且在 x 方向上具有大约 $5\mu\text{m}$ 的有限的宽度。在芯区 1006 的图案化之后通过溅射形成钽 (Ta) 部件 1003。钽 (Ta) 部件 1002 和 1003 用作 X 射线波导的包层。由于芯区 1006 的周期结构是二维的, 因此周期方向可以被定义为与示出三角形格子状的周期性的图 18 所示的两个基本向量 a_1 和 a_2 以及它们的线性结合 a_1+a_2 平行的方向。周期结构在此三个方向上最对称, 并且周期共振导模的电场集中在作为周期结构的低损耗部分的孔中并且具有二维周期性的分布。格子常数是大约 17nm。因此, 由二维周期性引起的周期共振导模变得显著, 因而可以形成单个低损耗的 X 射线导模。此外, 由于芯区在 x 方向上的宽度大到约 $5\mu\text{m}$, 因此要被引导的 X 射线的功率进一步增大。

[0120] 对于具有 8keV 的光子能量的 X 射线, 在 y 方向上在包层和芯区之间的界面处的全反射临界角 θ_c 为大约 0.52° , 而由周期性的介观结构膜的周期性得到的布拉格角 θ_B 是 0.47° 。因而, 本实施例的 X 射线波导满足 $\theta_B < \theta_c$ 。

[0121] 第四实施例

[0122] 图 11 示出根据本发明的第四实施例的 X 射线波导。在本实施例中, X 射线在该图所示的 z 方向上被引导, 并且波导的每个部分在 z 方向上是连续的。此 X 射线波导具有在 Si 衬底 1101 上芯区 1103 在与导波方向垂直的平面中被 40nm 厚的金 (Au) 部件 1102 和 10nm

厚的金 (Au) 部件 1103 包围的结构。芯区 1106 是三维周期性的介观结构材料的膜, 并且填充有有机材料的具有大约 10nm 的直径的球形空隙 1104 在锡氧化物 (SnO_2) 部分 1105 中形成六方紧密充填结构。格子常数大约为 11.6nm。

[0123] 芯区 1106 已经通过光刻和干法刻蚀而被图案化, 并且在 x 方向上具有大约 $5\mu\text{m}$ 的有限的宽度。在芯区 1106 的图案化之后通过溅射形成金 (Au) 部件 1103。金 (Au) 部件 1102 和 1103 用作 X 射线波导的包层。由于芯区的周期结构是三维的, 因此产生周期性的效果的 x 和 y 方向被选择为与 x-y 平面平行的两个周期方向。因而, 可以使用由各个方向上的周期性引起的两个周期共振导模。

[0124] 在本实施例的 X 射线波导中, y 方向上的周期大约为 15nm, 而 x 方向上的周期大约为 8.7nm。在 y-z 平面中, 由 y 方向上的周期性引起的周期共振导模变得显著, 因而可以形成单个低损耗的 X 射线导模。在 x 方向上, 由 x 方向上的周期性引起的周期共振导模变得显著, 因而可以形成单个低损耗的 X 射线导模。此外, 由于芯区在 x 方向上的宽度宽至约 $5\mu\text{m}$, 因此要被引导的 X 射线的功率进一步增大。此外, 具有三维结构的芯区 1106 在 z 方向上也具有周期性。因此, 利用在 x-y 平面中的周期性共振的周期共振导模受到 z 方向上的周期性的影响。因此, 导模的相位在导波方向上也可以容易地对准。

[0125] 对于具有 10keV 的光子能量的 X 射线, 在 y 方向上在包层和芯区之间的界面处的全反射临界角 θ_c 大约为 0.42° , 以及由三维周期性的介观结构膜的周期性得到的布拉格角 θ_B 是 0.31° 。因而, 本实施例的 X 射线波导满足 $\theta_B < \theta_c$ 。

[0126] 第五实施例

[0127] 图 12 示出根据本发明的第五实施例的 X 射线波导。在本实施例中, X 射线在该图所示的 z 方向上被引导, 并且波导的每个部分在 z 方向上是连续的。此 X 射线波导具有在图案化的 Si 衬底 1201 上芯区 1203 在与导波方向垂直的平面中被 10nm 厚的钨 (W) 部件 1206 和 10nm 厚的钨 (W) 部件 1202 包围的结构。芯区 1203 是二维的周期性的介观结构材料的膜, 并且包括硅石部分 1205, 在硅石部分 1205 中具有大约 4nm 的半径的孔 1204 在导波方向 (z 方向) 上延伸。孔 1204 在与导波方向垂直的方向上 (在与 x-y 平面平行的方向上) 排列, 以形成具有三角形格子图案的二维周期结构。格子常数大约为 17nm。已经通过光刻和使用 KOH 的各向异性刻蚀来使其表面具有 (110) 晶面的 Si 衬底 1201 图案化。衬底 1201 的图案具有大约 $5\mu\text{m}$ 的有限宽度。

[0128] 在通过溅射在图案化的 Si 衬底 1201 上形成钨部件 1202 之后, 通过溶胶凝胶工艺由介孔硅石形成芯区 1206, 并且通过烧成从孔中去掉有机材料。然后, 通过溅射形成另一个钨部件 1202。因而产生本实施例的 X 射线波导。钨 (W) 部件 1206 和 1202 用作 X 射线波导的包层。由于芯区 1203 的周期结构是二维的, 因此周期方向可以被定义为与示出了三角形格子状的周期性的图 18 所示的两个基本向量 a_1 和 a_2 以及它们的线性结合 a_1+a_2 平行的方向。

[0129] 周期结构在这三个方向上是最对称的, 并且周期共振导模的电场集中在作为周期结构的低损耗的部分的孔中, 并且具有二维周期性的分布。格子常数大约为 17nm。因此, 由二维周期性引起的周期共振导模变得显著, 因而可以形成单个低损耗的 X 射线导模。此外, 由于芯区在 x 方向上的宽度宽至约 $5\mu\text{m}$, 因此要被引导的 X 射线的功率大大地增大。

[0130] 对于具有 8keV 的光子能量的 X 射线, 在 x 方向上在包层和芯区之间的界面处的全

反射临界角 θ_c 大约为 52° ，而由二维周期性的介观结构膜的周期性得到的布拉格角 θ_B 是 0.3° 。因而，本实施例的 X 射线波导满足 $\theta_B < \theta_c$ 。

[0131] 第六实施例

[0132] 图 13 示出根据本发明的第六实施例的 X 射线波导。在本实施例中，X 射线在该图所示的 z 方向上被引导，并且波导的每个部分在 z 方向上是连续的。此 X 射线波导具有在图案化的 Si 衬底 1301 上芯区 1303 在与导波方向垂直的平面中被 10nm 厚的钨 (W) 部件 1302 和 10nm 厚的钨 (W) 部件 1306 包围的结构。芯区 1303 是二维周期性的介观结构材料的膜，并且包括硅石部分 1305，在硅石部分 1305 中具有大约 4nm 的半径的孔 1304 在导波方向 (z 方向) 上延伸。孔 1304 在与导波方向垂直的方向上 (在与 x-y 平面平行的方向上) 排列，以形成具有三角形格子图案的二维周期结构。格子常数大约为 11.6nm。

[0133] 已经通过光刻和使用 KOH 的各向异性刻蚀来使其表面具有 (100) 晶面的 Si 衬底 1301 图案化。衬底 1301 的图案具有三角截面，该三角截面在 x 方向上具有大约 $7\mu\text{m}$ 的有限宽度，而在深度方向上具有大约 $5\mu\text{m}$ 的有限高度。在通过溅射在图案化的 Si 衬底 1301 上形成钨部件 1302 之后，通过溶胶凝胶工艺由介孔硅石形成芯区 1303，并且通过烧成从孔中去除有机材料。然后，通过溅射形成另一个钨部件 1306。因而产生本实施例的 X 射线波导。钨 (W) 部件 1306 和 1302 用作 X 射线波导的包层。芯区 1303 的周期结构在 x-y 面内方向上是二维的并且是三角形格子状的。包层和芯区之间的界面具有基本上等效的三个方向。因此，周期方向可以被定义为与示出了三角形格子状的周期性的图 18 所示的两个基本向量 a_1 和 a_2 以及它们的线性结合 a_1+a_2 平行的方向。

[0134] 周期结构在这三个方向上是最对称的，并且周期共振导模的电场集中在作为周期结构的低损耗的部分的孔中，并且具有二维周期性的分布。格子常数大约为 17nm。因此，由二维周期性引起的周期共振导模变得显著，因而可以形成单个低损耗的 X 射线导模。即使在周期结构的 x-y 面内方向上的三个向量从包层和芯区之间的界面的三个方向偏移，在界面处全反射的 X 射线在三个周期方向上也与周期结构共振。此共振可以在三个方向上形成三个周期共振导模。在周期共振导模的 x-y 平面中的电磁强度分布与利用基本上等效的三个基本向量形成的周期结构对应。在本实施例中，电磁场集中到作为周期结构的低损耗的部分的孔中，以形成更多的低损耗的周期共振导模。因而，可以在低的传播损耗的情况下引导 X 射线。

[0135] 对于具有 8keV 的光子能量的 X 射线，在与向量 a_1 、 a_2 和 a_1+a_2 平行的方向上在包层和芯区之间的界面处的全反射临界角 θ_c 大约为 0.52° ，并且由二维周期结构的周期性得到的布拉格角 θ_B 是 0.42° 。因而，本实施例的 X 射线波导满足 $\theta_B < \theta_c$ 。

[0136] 第七实施例

[0137] 图 14 示出根据本发明的第七实施例的 X 射线波导。在本实施例中，X 射线在该图所示的 z 方向上被引导，并且波导的每个部分在 z 方向上是连续的。在本实施例的 X 射线波导中，第六实施例的两个 X 射线波导在这两个 X 射线波导的表面上不具有钨 (W) 部件的情况下以使它们的上表面彼此相对的方式被接合在一起，使得它们的芯区彼此接触。芯区 1403 具有菱形形状。此结构在包层和芯区之间具有两对相对的界面，并且可以在与这些界面垂直的方向上形成周期共振导模。

[0138] 由于周期结构具有二维三角形格子图案，因此与图 18 所示的向量 a_1 和 a_2 平行的

两个方向是周期方向,并且主要在这些方向上形成周期共振导模。因此,可以在与两个基本向量平行的方向上形成两个周期共振导模。这两个导模干涉以形成与三角形格子周期共振导模共振的导模。此导模的电磁强度分布集中到损耗较低的孔中。芯区由具有孔的介孔硅石构成,并且它的格子常数大约为 14nm。

[0139] 对于具有 8keV 的光子能量的 X 射线,在这两个周期方向上在包层和芯区之间的界面处的全反射临界角 θ_c 为大约 0.52° , 并且由二维周期结构的周期性得到的布拉格角 θ_B 是 0.36° 。因而,本实施例的 X 射线波导满足 $\theta_B < \theta_c$ 。

[0140] 第八实施例

[0141] 图 15 示出根据本发明的第八实施例的 X 射线波导。在本实施例中,X 射线在该图所示的 z 方向上被引导,并且波导的每个部分在 z 方向上是连续的。此 X 射线波导具有在图案化的 Si 衬底 1501 上芯区 1503 在与导波方向垂直的平面中被 20nm 厚的钨 (W) 部件 1506 和 20nm 厚的钨 (W) 部件 1502 包围的结构。芯区 1503 是二维周期性的介观结构材料的膜,并且包括硅石部分 1505,在硅石部分 1505 中具有大约 4nm 的半径的孔 1504 在导波方向 (z 方向) 上延伸。孔 1504 在与导波方向垂直的方向上 (在与 x-y 平面平行的方向上) 排列,以形成具有三角形格子图案的二维周期结构。格子常数大约为 11.6nm。Si 衬底 1501 的表面具有 (100) 晶面。利用市场上可买到的切割器 (dicer) (切割装置) 在 Si 衬底中形成在与 Si 衬底 1501 和该 (110) 平面平行的方向上延伸的、具有 $10\mu\text{m}$ 的宽度和 $100\mu\text{m}$ 的深度的凹槽。然后,通过使用 KOH 的各向异性刻蚀工艺将衬底图案化,以在 x-y 面内方向上形成在衬底的表面处具有开口的菱形部分。

[0142] 在通过溅射在图案化的 Si 衬底 1501 上形成钨部件 1506 之后,通过溶胶凝胶工艺由介孔硅石形成芯区 1503,并且通过烧成从孔中去掉有机材料。然后,通过溅射形成另一个钨部件 1502。因而产生本实施例的 X 射线波导。钨 (W) 部件 1506 和 1502 用作 X 射线波导的包层。在本实施例中,在 x-y 面内方向上芯区 1503 的周期结构是二维的并且是三角形格子状的,并且具有两对相对的在包层和芯区之间的界面。因此,用和第七实施例相同的方式形成主要的周期共振导模。周期方向是与第七实施例中相同的两个方向。

[0143] 对于具有 8keV 的光子能量的 X 射线,在 x 方向上在包层和芯区之间的界面处的全反射临界角 θ_c 为大约 0.52° , 并且由二维周期结构的周期性得到的布拉格角 θ_B 是 0.42° 。因而,本实施例的 X 射线波导满足 $\theta_B < \theta_c$ 。

[0144] 第九实施例

[0145] 图 16 示出根据本发明的第九实施例的 X 射线波导。在本实施例中,X 射线在该图所示的 z 方向上被引导,并且波导的每个部分在 z 方向上是连续的。此 X 射线波导具有在图案化的 Si 衬底 1601 上芯区 1603 在与导波方向垂直的平面中被 20nm 厚的钨 (W) 部件 1606 和 10nm 厚的钨 (W) 部件 1602 包围的结构。芯区 1603 是二维周期性的介观结构材料的膜,并且包括硅石部分 1605,在硅石部分 1605 中具有大约 4nm 的半径的孔 1604 在导波方向 (z 方向) 上延伸。孔 1604 在与导波方向垂直的方向上 (在与 x-y 平面平行的方向上) 排列,以形成具有三角形格子图案的二维周期结构。格子常数大约为 11.6nm。

[0146] Si 衬底 1601 的表面具有 (100) 晶面。利用市场上可买到的切割器 (切割装置) 在 Si 衬底 1601 中以 $30\mu\text{m}$ 的间隔平行地形成在与 Si 衬底 1601 和该 (110) 平面平行的方向上延伸的、具有 $10\mu\text{m}$ 的宽度和 $100\mu\text{m}$ 的深度的两个凹槽。然后,通过使用 KOH 的各向

异性刻蚀工艺将衬底图案化,以在 x-y 面内方向上形成在衬底的表面处具有开口的六边形部分。在通过溅射在图案化的 Si 衬底 1601 上形成钨部件 1606 之后,通过溶胶凝胶工艺由介孔硅石形成芯区 1603,并且通过烧成从孔中去掉有机材料。然后,通过溅射形成另一个钨部件 1602。因而产生本实施例的 X 射线波导。

[0147] 钨(W)部件 1606 和 1602 的包围芯区的部分用作 X 射线波导的包层。在 x-y 面内方向上芯区 1603 的周期结构是二维的并且是三角形格子状的,并且该波导具有三对相对的在包层和芯区之间的界面。因此,与该三对界面垂直的、接近于周期结构的基本向量的三个方向的三个方向可以被定义为三个周期方向。在这三个方向上的三个周期共振导模干涉以形成与三角形格子周期共振导模共振的导模。此导模的电磁场强度分布集中到作为低损耗的部分的孔中。因而,可以在低的传播损耗的情况下引导 X 射线。

[0148] 对于具有 8keV 的光子能量的 X 射线,在这三个周期方向上在包层和芯区之间的界面处的全反射临界角 θ_c 为大约 0.52° ,并且由二维周期结构的周期性得到的布拉格角 θ_B 是 0.42° 。因而,本实施例的 X 射线波导满足 $\theta_B < \theta_c$ 。

[0149] 虽然已经参考示例性实施例描述了本发明,但是应当理解,本发明不限于所公开的示例性实施例。以下权利要求的范围应当符合最宽的解释,以便涵盖所有这样的修改以及等同的结构和功能。

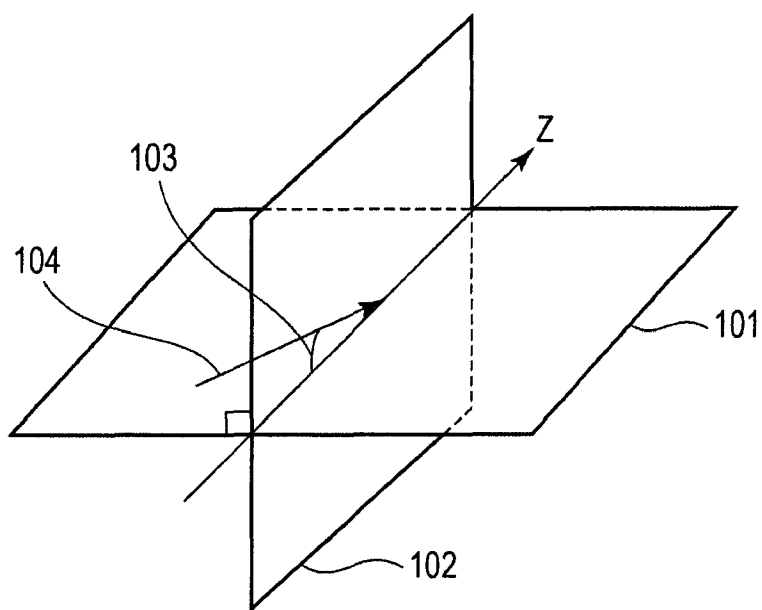


图 1

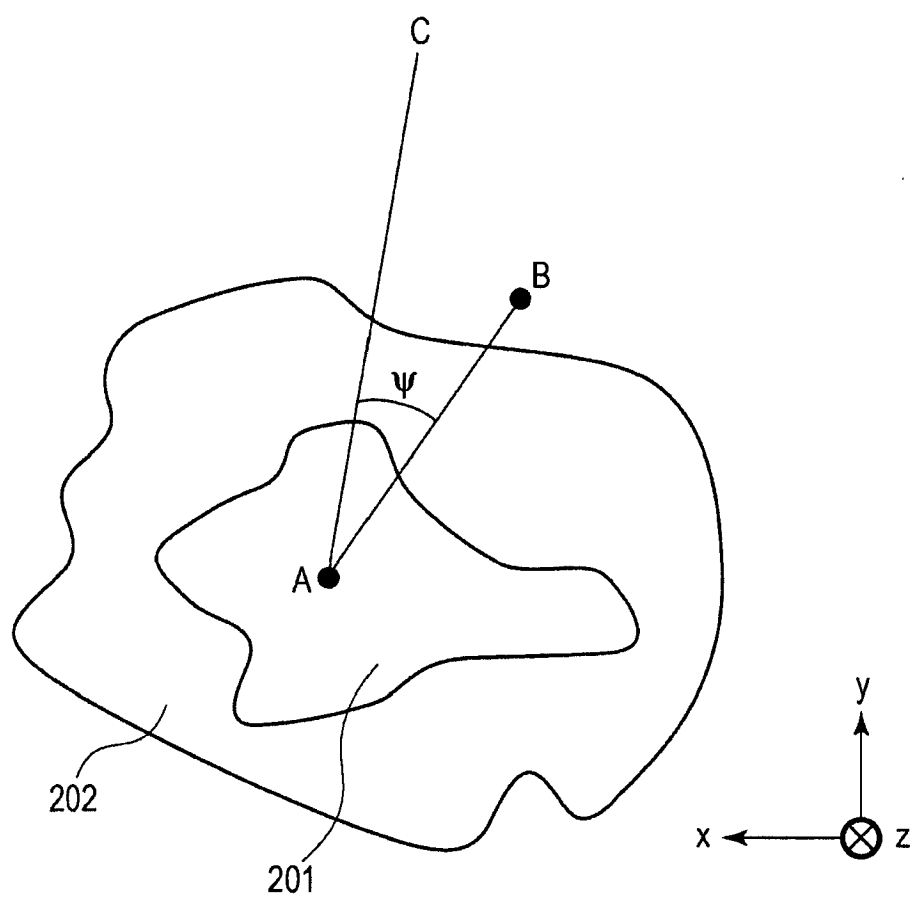


图 2

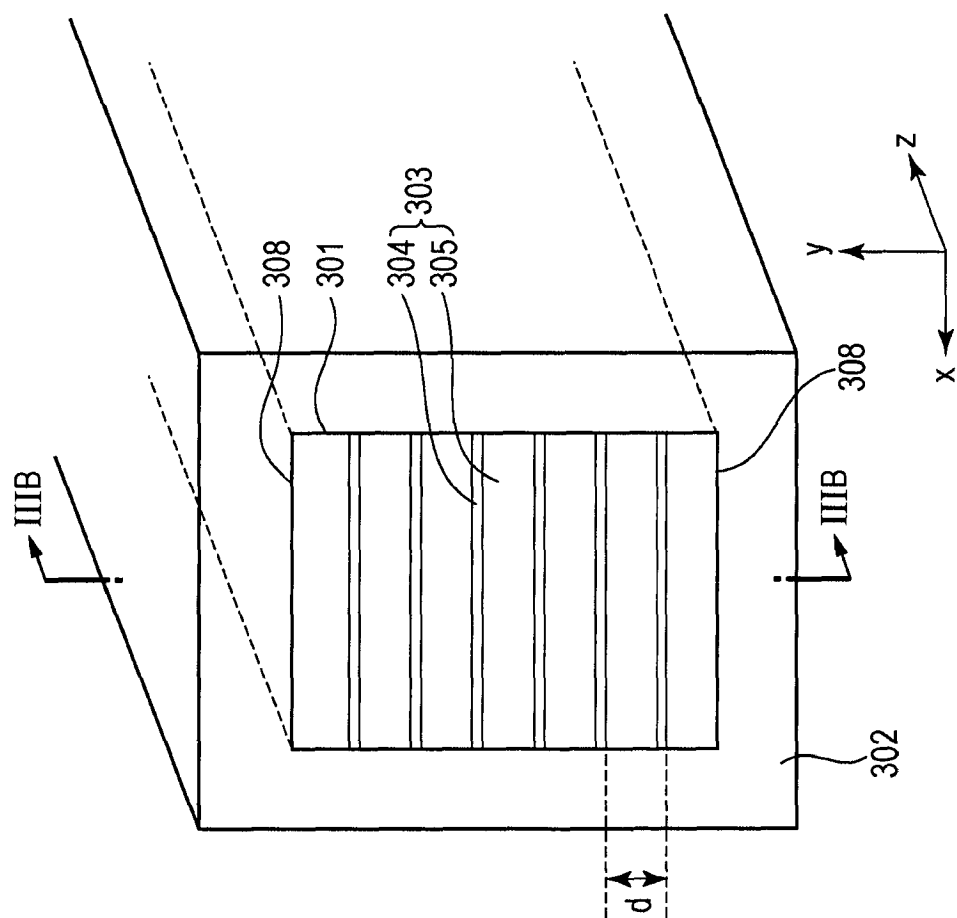


图 3A

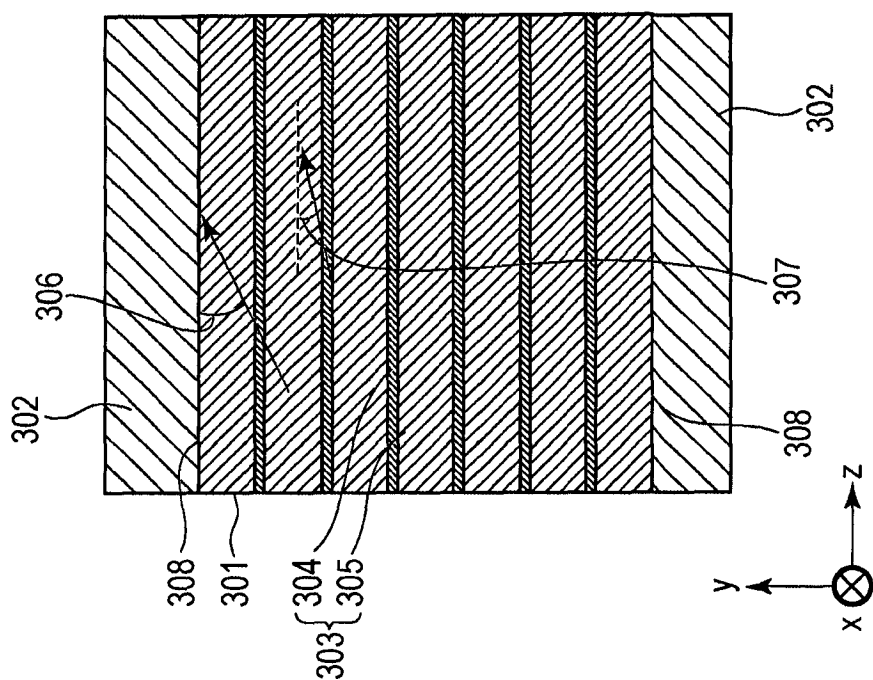


图 3B

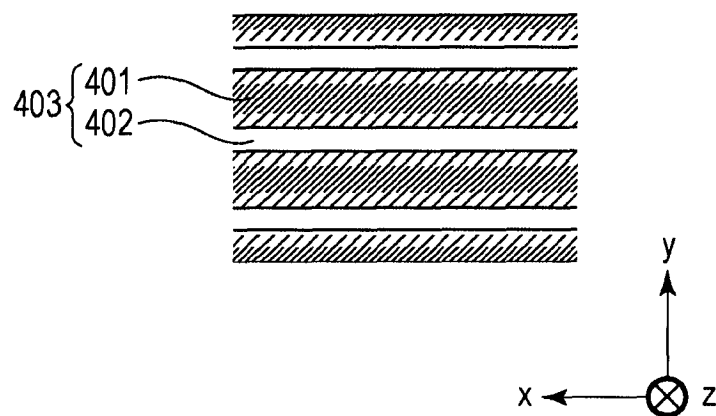


图 4

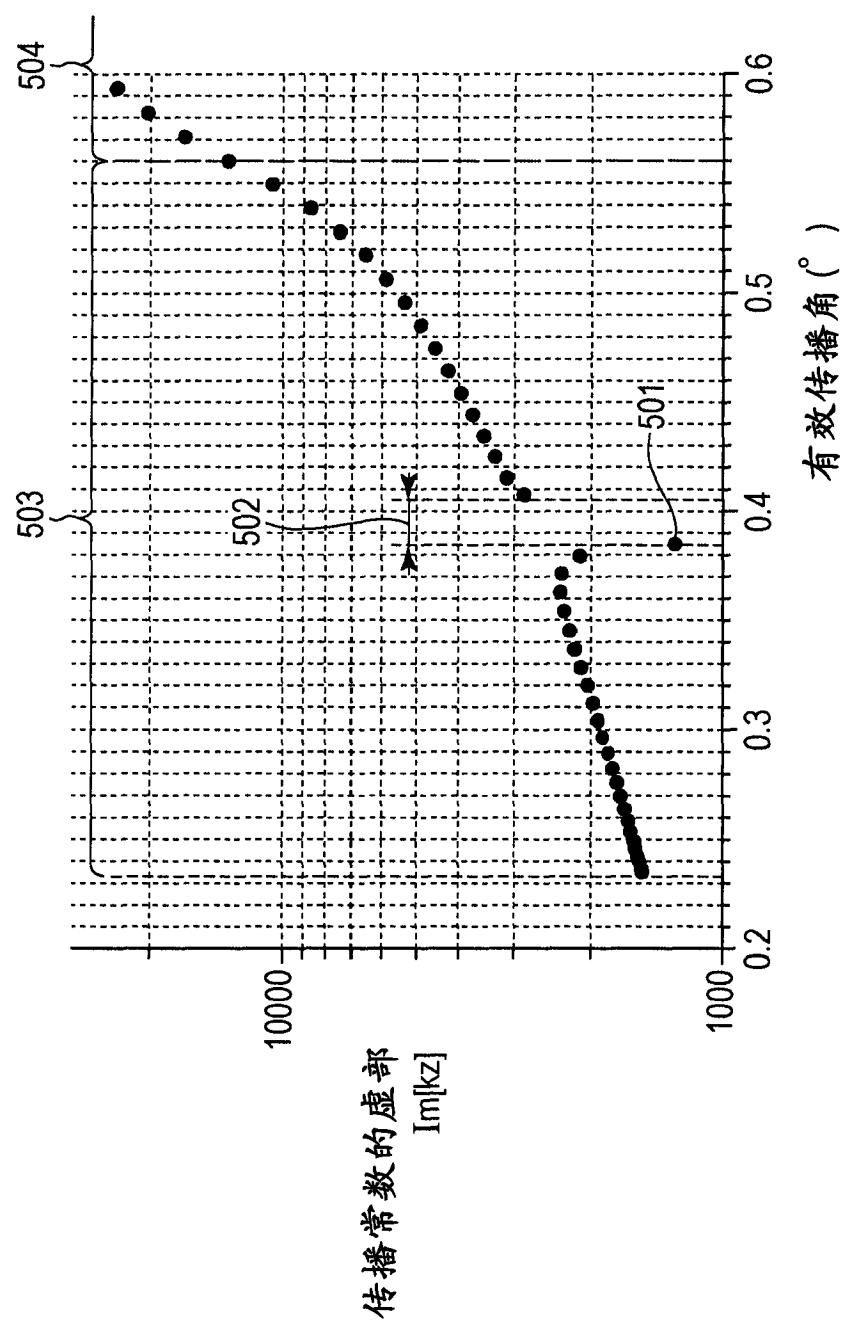


图 5

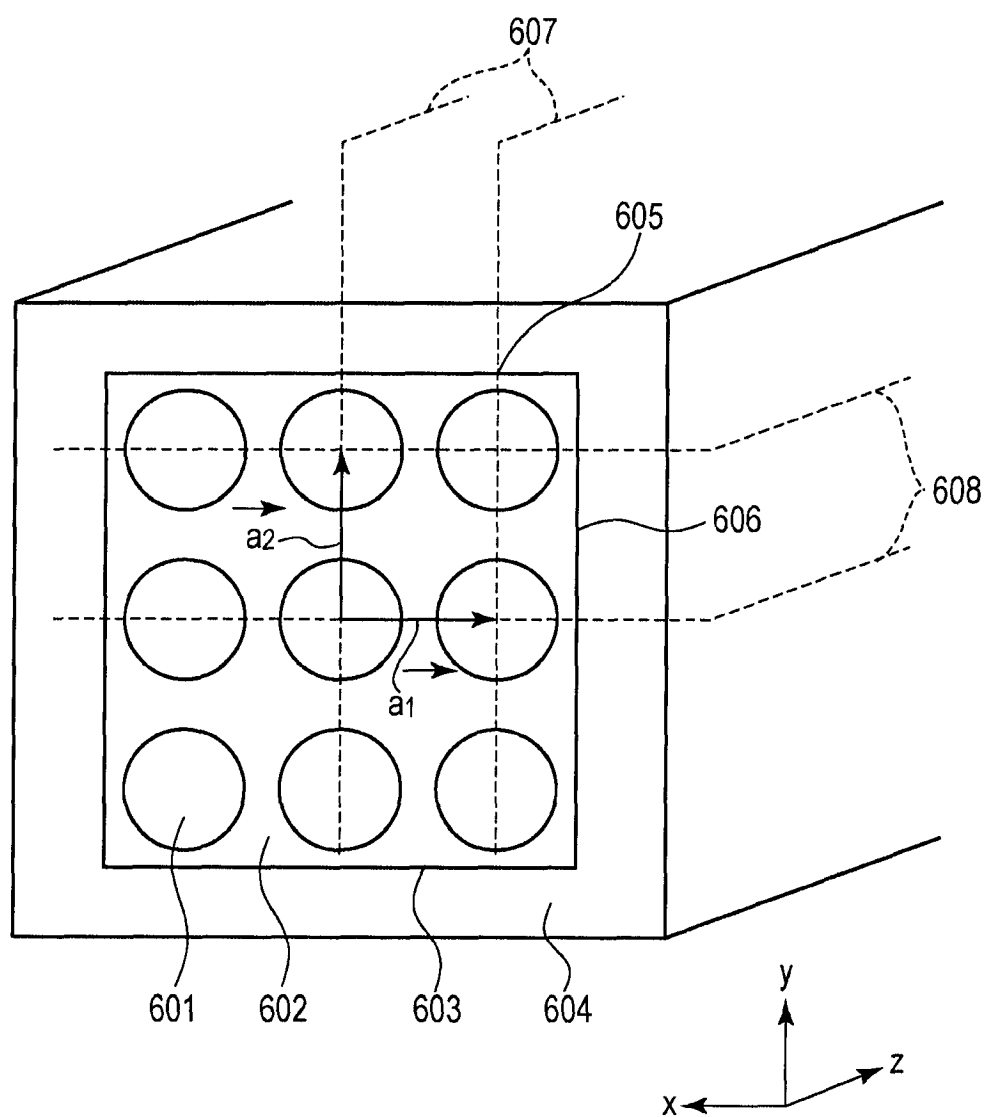


图 6

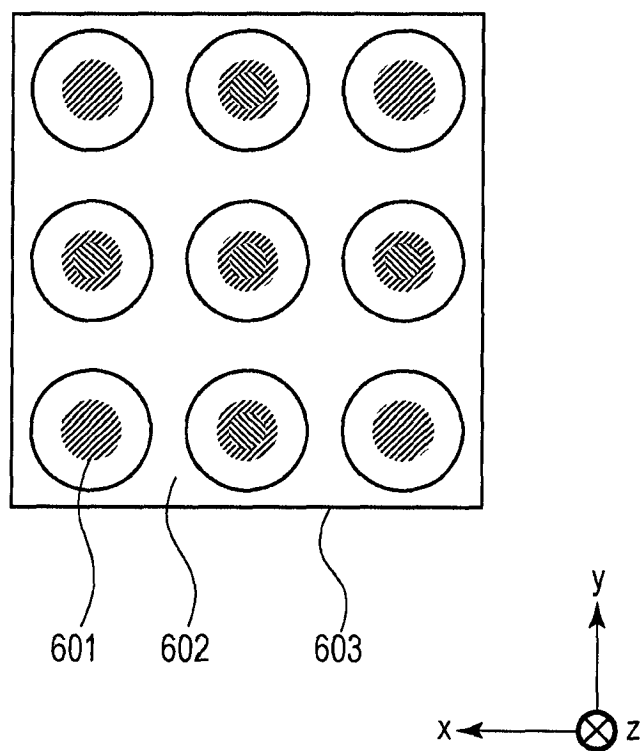


图 7

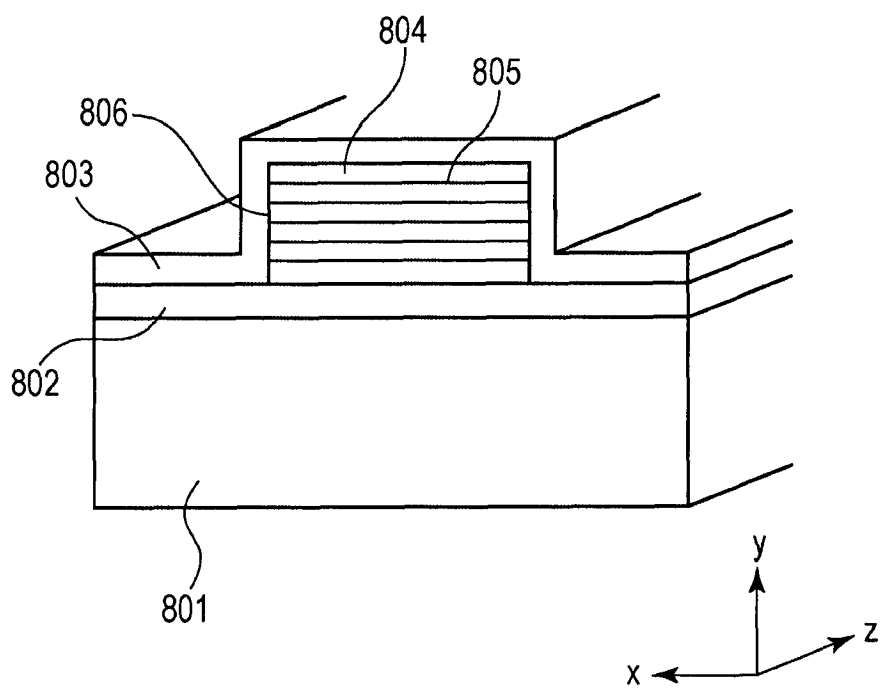


图 8

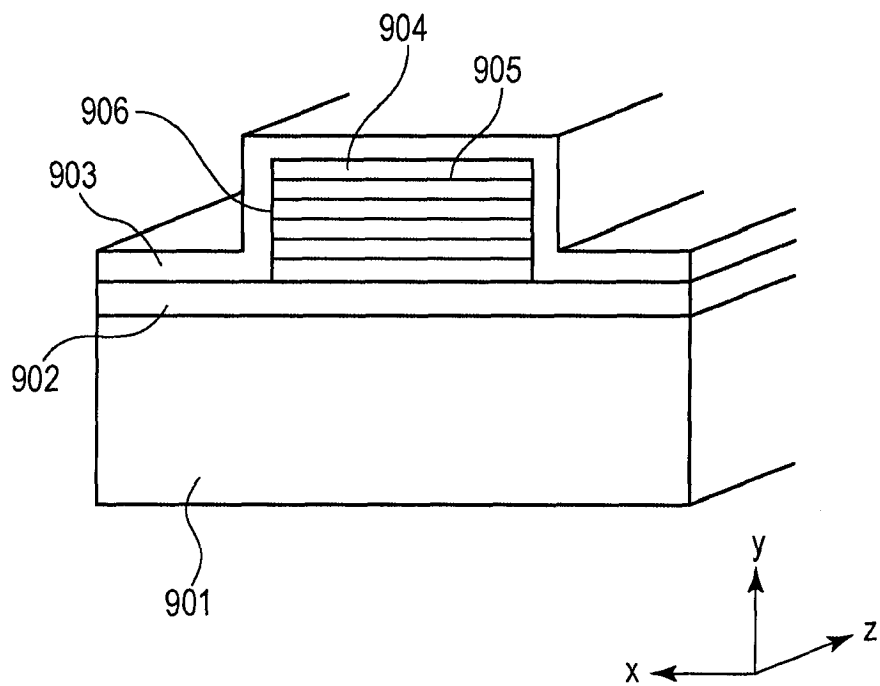


图 9

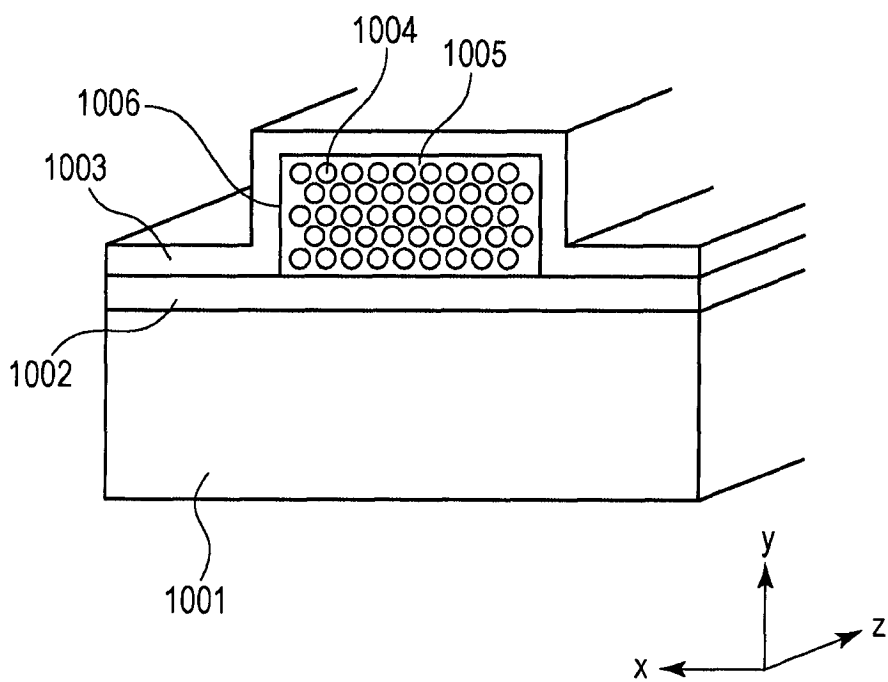


图 10

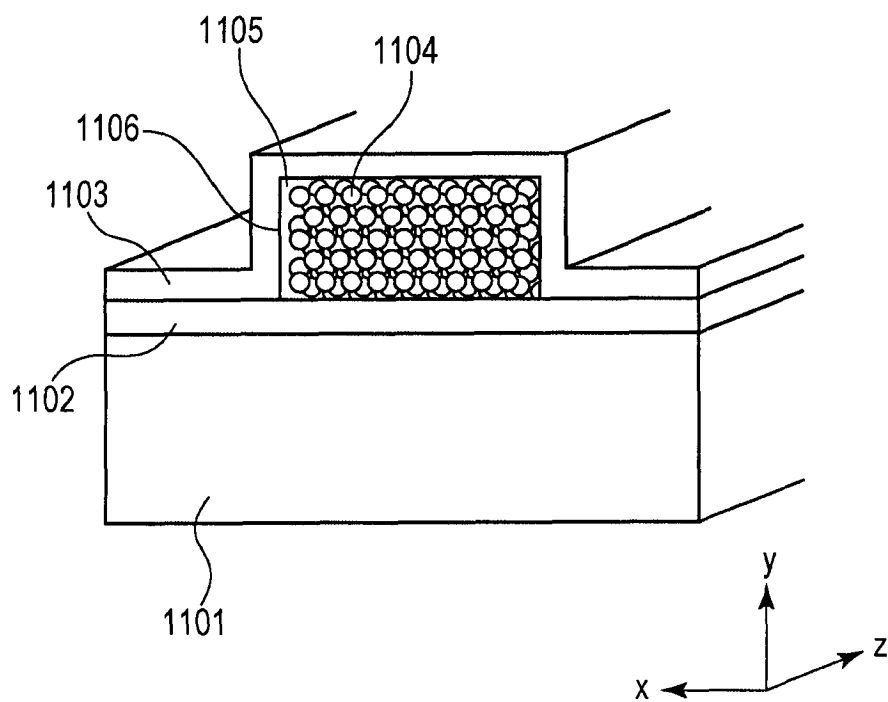


图 11

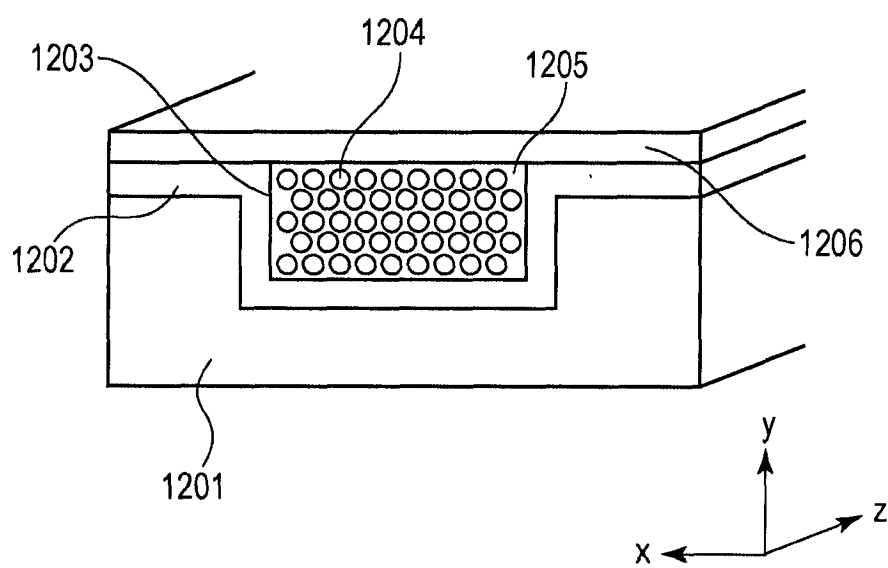


图 12

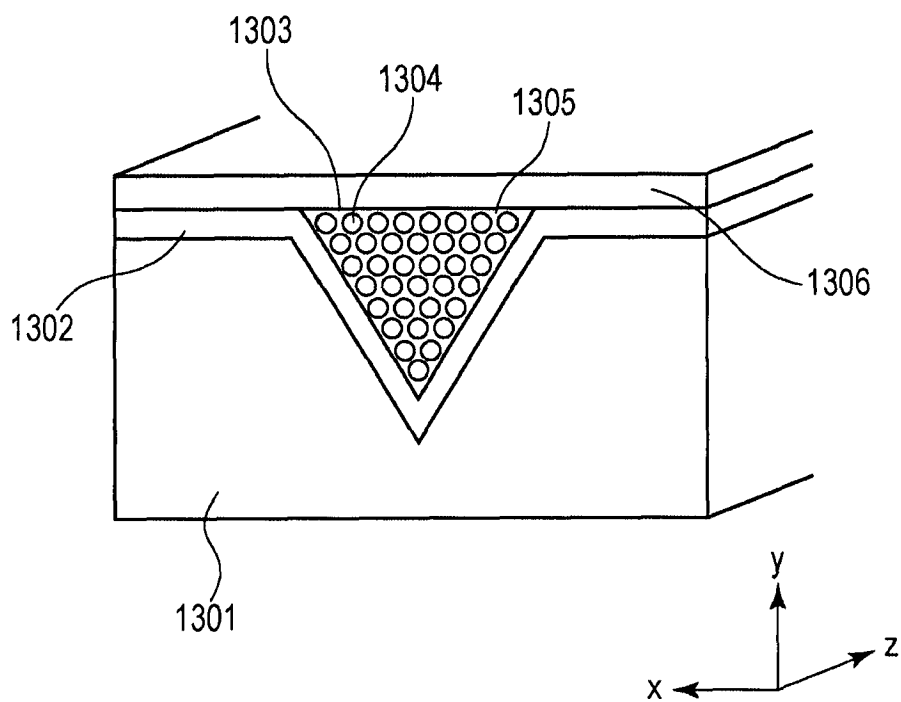


图 13

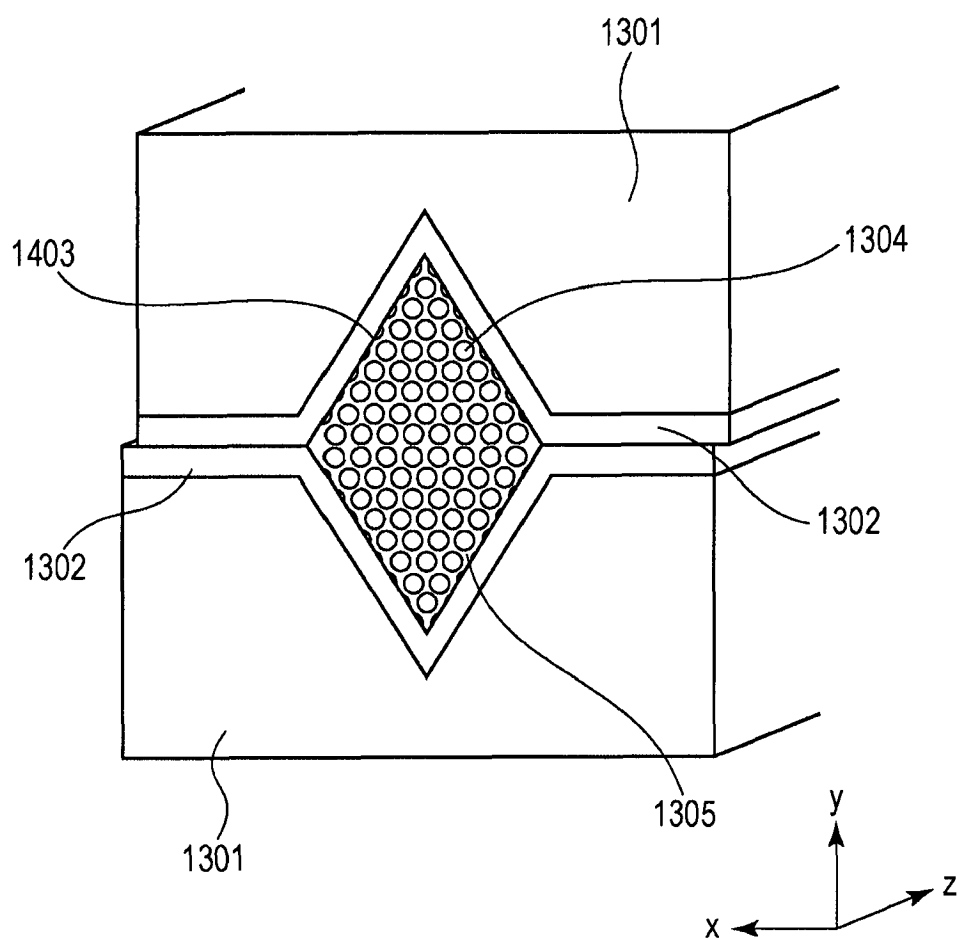


图 14

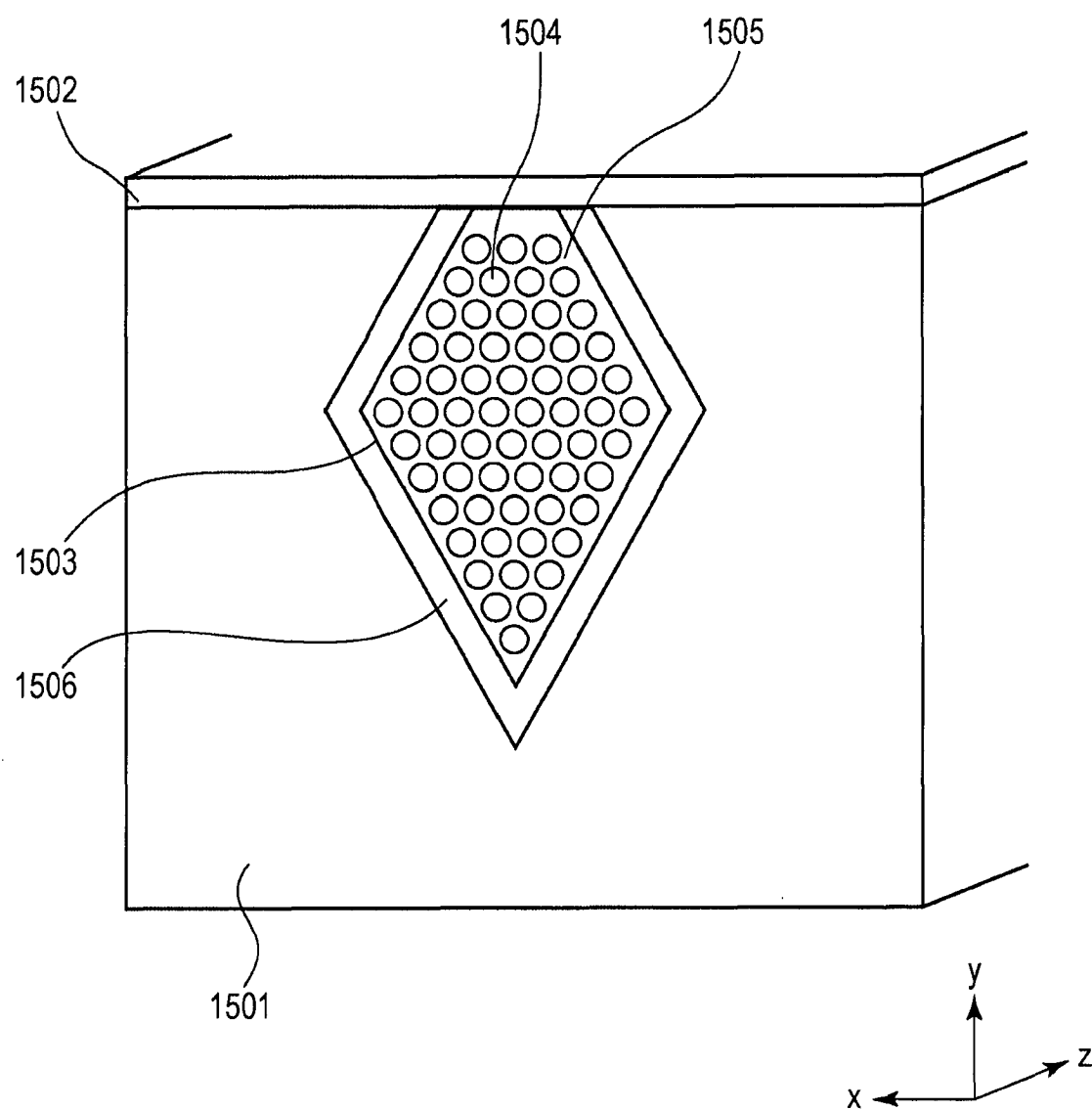


图 15

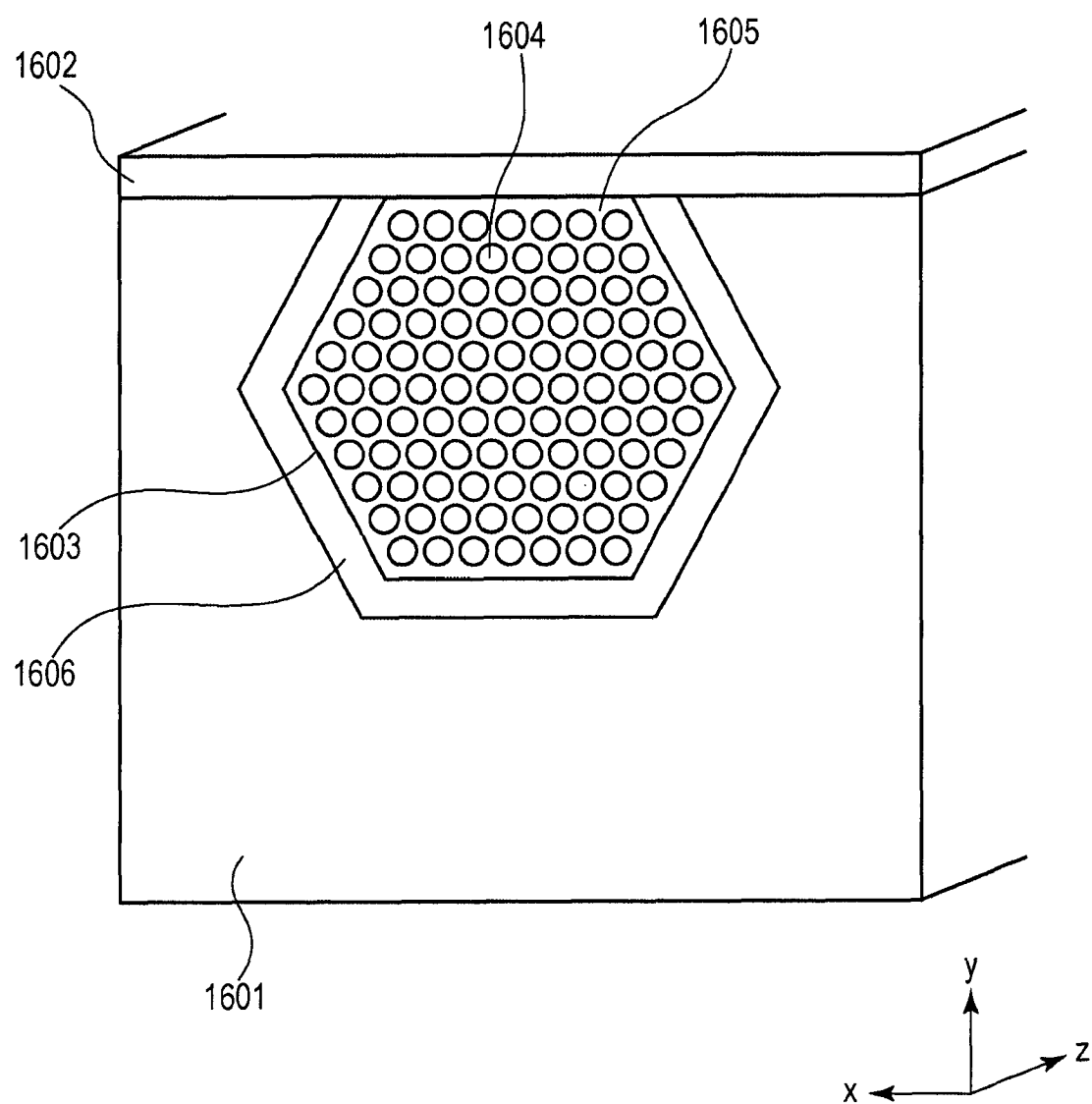


图 16

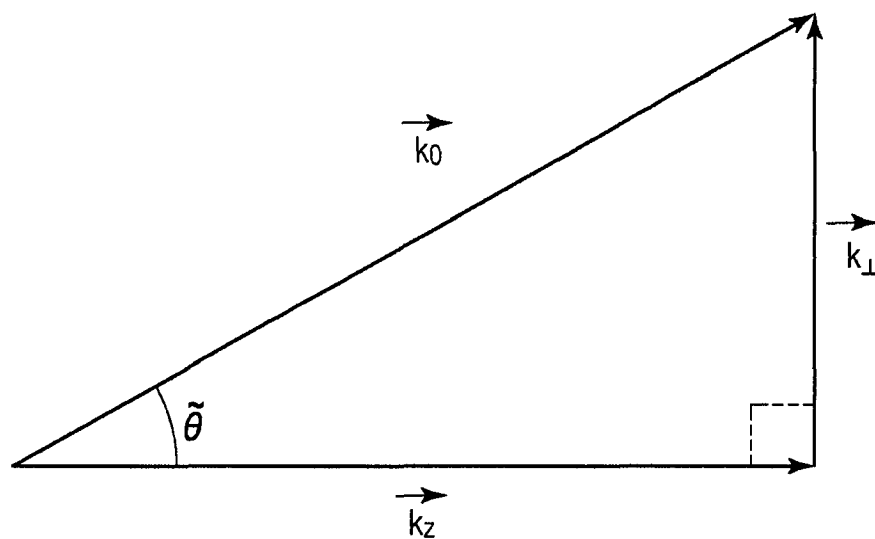


图 17

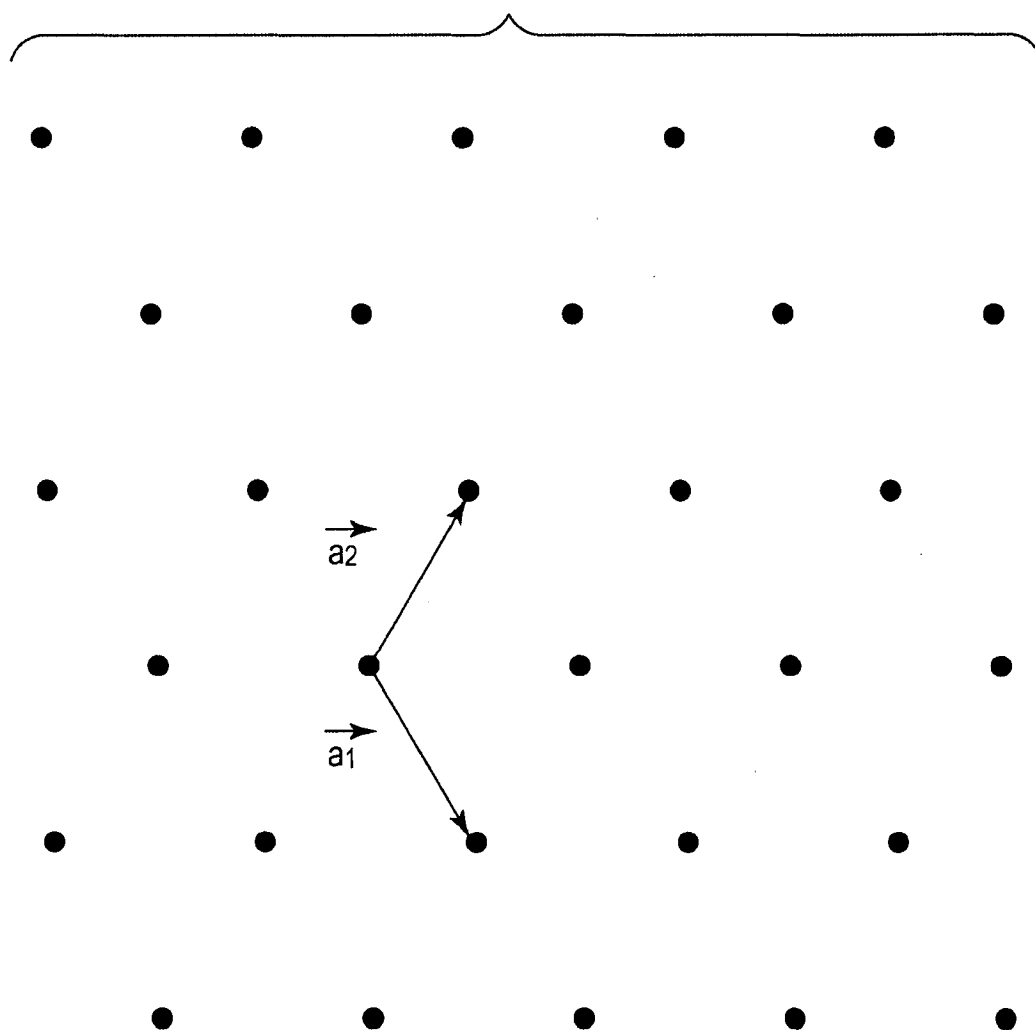


图 18