

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.
G02B 6/12 (2006.01)



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 200480032113.4

[45] 授权公告日 2009年8月5日

[11] 授权公告号 CN 100523887C

[22] 申请日 2004.8.26

[21] 申请号 200480032113.4

[30] 优先权

[32] 2003.8.29 [33] JP [31] 307266/2003

[86] 国际申请 PCT/JP2004/012287 2004.8.26

[87] 国际公布 WO2005/022221 日 2005.3.10

[85] 进入国家阶段日期 2006.4.28

[73] 专利权人 独立行政法人科学技术振兴机构

地址 日本埼玉县

共同专利权人 松下电工株式会社

[72] 发明人 野田进 浅野卓 宋奉植 高野仁路

[56] 参考文献

US6298180B1 2001.10.2

JP2003-139977A 2003.5.14

US6130969A 2000.10.10

JP2002-71981A 2002.3.12

CN1308244A 2001.8.15

审查员 刘章鹏

[74] 专利代理机构 北京市柳沈律师事务所

代理人 魏晓刚 李晓舒

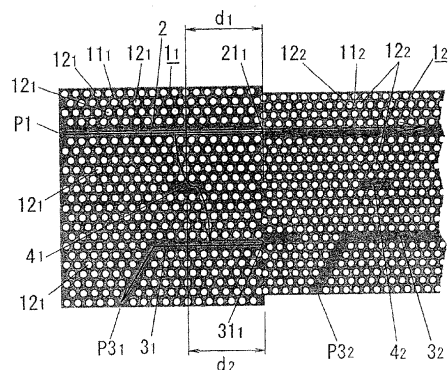
权利要求书4页 说明书20页 附图13页

[54] 发明名称

电磁波频率滤波器

[57] 摘要

在该电磁波频率滤波器中，匹配谐振器 4_1 的谐振频率的预定频率的电磁波被通过谐振器 4_1 ，从输入波导 2 传输到输出波导 3 上，并从输出端 P3 输出。该滤波器具有输入波导侧反射器 21_1 和输出波导侧反射器 31_1 ，其反射预定频率的电磁波。该电磁波频率滤波器满足下述关系： $Q_{inb}/(1 - \cos\theta_1) < Q_v$ ； $Q_{inb}/(1 - \cos\theta_2) = Q_{inr}/(1 - \cos\theta_2)$ ； θ_1 、 $\theta_2 \neq 2N\pi$ ($N = 0, 1, \dots$)。其中 θ_1 是被所述输入波导侧反射器 21_1 反射而回到所述谐振器附近的电磁波的相移量， θ_2 是被所述输出波导侧反射器 31_1 反射而回到所述谐振器附近的电磁波的相移量， Q_{inb} 是在所述谐振器 4_1 和所述输入波导 2 之间的 Q 因子， Q_{inr} 是在所述谐振器 4_1 和所述输出波导 3 之间的 Q 因子，而 Q_v 是在所述谐振器 4_1 和自由空间之间的 Q 因子。



1. 一种电磁波频率滤波器，包括：

输入波导，其构建为接收输入到所述输入波导的一端的多个频率的电磁波；

与所述输入波导并排设置的输出波导；及

谐振器，其设置在所述输入波导和所述输出波导之间，所述谐振器具有一谐振频率并与匹配该谐振频率的预定频率的电磁波谐振以将所述电磁波从所述输入波导传输到所述输出波导，由此允许所述电磁波从所述输出波导的一端的输出端发出；

其中

所述输入波导具有输入波导侧反射器，其用于在所述输入波导的一端与谐振器的相反侧反射所述谐振频率电磁波，

所述输出波导具有输出波导侧反射器，其用于在所述输出波导的一端的相反侧上反射预定频率的电磁波，

所述电磁波频率滤波器满足下述关系：

$$Q_{\text{inb}} / (1 - \cos\theta_1) \ll Q_V$$

$$Q_{\text{inb}} / (1 - \cos\theta_2) = Q_{\text{inr}} / (1 - \cos\theta_2)$$

$$\theta_1, \theta_2 \neq 2N\pi \quad (N = 0, 1, \dots)$$

其中 θ_1 是被所述输入波导侧反射器反射而回到所述谐振器附近的电磁波的相移量， θ_2 是被所述输出波导侧反射器反射而回到所述谐振器附近的电磁波的相移量， Q_{inb} 是在所述谐振器和所述输入波导之间的 Q 因子， Q_{inr} 是在所述谐振器和所述输出波导之间的 Q 因子，而 Q_V 是在所述谐振器和自由空间之间的 Q 因子。

2. 如权利要求 1 所述的电磁波频率滤波器，其中所述电磁波频率滤波器具有面内异质结构，在该异质结构中至少具有在二维面上的折射率周期结构的第一光子晶体和具有周期与第一光子晶体的折射率周期结构的不同的折射率周期结构的第二光子晶体，被并排放置在同一面内，

所述输入波导的形成是通过在这些光子晶体的排列方向上沿整个长度上在第一和第二光子晶体的折射率周期结构中制造线形缺陷，

所述输出波导的形成是通过在这些光子晶体的排列方向上跨着这些光

子晶体在第一和第二光子晶体的折射率周期结构中制造线形缺陷，

所述谐振器的形成是通过在第一光子晶体中制造点状缺陷，所述谐振器的谐振频率包括在第二光子晶体不具有波导模式中的频带中，

所述输入波导侧反射器由在输入波导形成在第一光子晶体中的一部分和输入波导形成在第二光子晶体中的一部分之间的边界形成，

所述输出波导侧反射器由在输出波导形成在第一光子晶体中的一部分和输出波导形成在第二光子晶体中的一部分之间的边界形成。

3. 如权利要求 2 所述的电磁波频率滤波器，其中每个所述第一光子晶体和所述第二光子晶体为一二维光子晶体，

在所述谐振器和所述输入波导之间的间隙与在所述谐振器和所述输出波导之间的间隙设定为彼此相等，在所述谐振器和所述输入波导侧反射器之间沿输入波导方向上的距离 d_1 与在所述谐振器和所述输出波导侧反射器之间沿输出波导方向上的距离 d_2 设定为彼此相等，

输入波导的传播常数 β_1 与输出波导的传播常数 β_2 设定为彼此相等，

在输入波导形成在第一二维光子晶体中的部分和输入波导形成在第二二维光子晶体中的部分之间的轴错位量与输出波导形成在第一二维光子晶体中的部分和输出波导形成在第二二维光子晶体中的部分之间的轴错位量设定为彼此相等，以使被输入波导侧反射器反射的电磁波的反射相移 Δ_1 与被输出波导侧反射器反射的电磁波的反射相移 Δ_2 彼此相等。

4. 如权利要求 3 所述的电磁波频率滤波器，其中在靠近第一光子晶体和第二光子晶体之间的边界处，至少所述第一二维光子晶体和所述第二二维光子晶体其中之一的折射率周期结构的周期阶段性地改变使得输入波导邻近该边界平滑且连续地延伸。

5. 如权利要求 3 所述的电磁波频率滤波器，其中所述第一光子晶体和所述第二光子晶体在所述输入波导和所述输出波导的排列方向上的相对位置被设定为使得在所述第一光子晶体和所述第二光子晶体之间不会产生输入波导的轴错位，

输入波导侧反射器和谐振器之间的距离设定为满足 $\cos\theta_1 = \cos\theta_2$ 的关系。

6. 如权利要求 3 所述的电磁波频率滤波器，其中所述第一光子晶体和所述第二光子晶体在所述输入波导和所述输出波导的排列方向上的相对位置

被设定为使得在所述第一光子晶体和所述第二光子晶体之间不会产生输入波导的轴错位,

所述输出波导侧反射器具有用于将 Δ_2 与 Δ_1 匹配的相位补偿器。

7. 如权利要求 1 所述的电磁波频率滤波器, 其中所述电磁波频率滤波器具有面内异质结构, 在该异质结构中至少具有在二维面内的折射率周期结构的第一光子晶体和具有其周期与该第一光子晶体的折射率周期结构不同的折射率周期结构的第二光子晶体被并排放置在同一平面中,

所述输入波导的形成是通过在这些光子晶体的排列方向上沿整个长度上在第一和第二光子晶体的折射率周期结构中制造线形缺陷,

所述谐振器的形成是通过在第一光子晶体中制造点状缺陷,

所述输出波导的形成是通过在第一光子晶体的折射率周期结构中制造线形缺陷,

所述输出波导的相反端构成输出波导侧反射器。

8. 如权利要求 7 所述的电磁波频率滤波器, 其中每个所述第一光子晶体和所述第二光子晶体为一二维光子晶体,

在所述谐振器和所述输入波导侧反射器之间沿输入波导方向上的距离 d_1 与在所述谐振器和所述输出波导侧反射器之间沿输出波导方向上的距离 d_2 设定为使得满足 $\cos\theta_1 = \cos\theta_2$ 的关系。

9. 如权利要求 8 所述的电磁波频率滤波器, 其中所述第一光子晶体的折射率周期结构变化为使得靠近所述输出波导的相反端的电磁场的分布不会急遽变化。

10. 如权利要求 1 所述的电磁波频率滤波器, 其中 Q_{inb} 、 Q_{inr} 、 $\cos\theta_1$ 和 $\cos\theta_2$ 满足下述的关系:

$$Q_{\text{inb}} = Q_{\text{inr}}$$

$$\cos\theta_1 = \cos\theta_2。$$

11. 如权利要求 1 所述的电磁波频率滤波器, 还包括一控制装置, 其用于通过改变靠近至少所述输入波导侧反射器和所述输出波导侧反射器其中之一的折射率来改变输出端的输出。

12. 如权利要求 2 或 7 所述的电磁波频率滤波器, 还包括一控制装置, 其用于通过改变靠近至少所述输入波导侧反射器和所述输出波导侧反射器其中之一的折射率周期结构的周期来改变输出端的输出。

13.如权利要求1所述的电磁波频率滤波器,还包括一控制装置,其用于通过改变靠近所述输出波导侧反射器的折射率来改变输出端的输出。

14.如权利要求1所述的电磁波频率滤波器,其中 Q_{inb} 和 Q_{inr} 彼此不同,所述电磁波频率滤波器还包括一控制装置,其用于通过改变靠近所述输出波导侧反射器的折射率来改变输出端的输出。

15.如权利要求1所述的电磁波频率滤波器,还包括一控制装置,其用于通过改变靠近各所述输入波导侧反射器和所述输出波导侧反射器及所述谐振器的折射率来改变输出端的输出。

电磁波频率滤波器

技术领域

本发明涉及一种电磁波频率滤波器，其用于选择性地取得预定频率的电磁波。

背景技术

近来，为了增大传输能力，使用波分复用的光学通讯系统在光学通讯领域等广受欢迎。在使用波分复用的光学通讯系统中，需要多路器、多路分离器及波长滤波器（频率滤波器）。通常，使用阵列波导光栅（AWG）作为多路分离器。然而因为阵列波导光栅是通过使用硅石基光学波导来形成因此为大约几平方厘米，盼望有更小的多路分离器。因而，为了使多路分离器小型化，在许多地方发展出使用具有光波长的量级（在大多数情况下，其约为预计电磁波段的半波长）的折射率周期结构的光子晶体的频率滤波器。

例如，作为这种类型的频率滤波器，提出了如 14A 和 14B 中所示的电磁波频率滤波器。该电磁波频率滤波器在所谓的板型光子晶体 1 中，具有线形的输入波导 2、输出波导 3 其设置为在输入波导 2 的宽度方向上与输入波导 2 成隔开的关系，以及谐振器 4 其设置在输入波导 2 的中间部分和输出波导 3 的中间部分之间。在图 14A 和 14B 中示出的电磁波频率滤波器中，输入波导 2 和输出波导 3 的形成是通过在二维的光子晶体 1 的折射率周期结构中制造两个线形缺陷（即，对折射率周期结构的扰乱）。而谐振器 4 的形成是通过在在二维的光子晶体 1 的折射率周期结构中制造一点状缺陷。在板型二维光子晶体 1 中，在板 11 的厚度方向上的两侧由高折射率介质例如 Si 制成，并用均匀的低折射率介质例如空气和 SiO₂ 夹入中间，因此电磁波（例如光）被平面中的光子带隙限制并且电磁波在厚度方向上被全反射限制。

在上面提到的电磁波频率滤波器中，输入波导 2 的一端定义为端口 P1（输入端 P1），输入波导 2 的另一端定义为 P2，而输出波导 3 的一端定义为端口 P3（输出端 P3），其另一端定义为端口 P4。当多个不同频率的电磁波入射到输入端 P1 时，从该多个电磁波中，匹配谐振器 4 的谐振频率的预定

频率的电磁波，通过谐振器 4 被传输到输出波导 3，然后被从输出端 P3 输出。具有与谐振器 4 的谐振频率不同的频率的电磁波被朝向输入波导 2 的端 2 传播。在图 14A 中，实线箭头示出具有与谐振器 4 的谐振频率相匹配的频率的电磁波的传输路径，而交替长短点划线箭头示出频率与谐振器 4 的谐振频率不同的电磁波的传播路径。

上面提到的电磁波频率滤波器可用作光开关，其改变输出端 P3 的输出并切换对来自输出端 P3 的电磁波的选择。

顺便说，通过使用模式耦合理论，本发明者评估在图 14A、14B 中示出的常规电磁波频率滤波器中的从每个端口 P1 到 P4 的输出强度以及从谐振器 4 到自由空间的输出强度，其得到的结果在图 15 中示出。当应用模式耦合理论时，在谐振器 4 和输入波导 2 之间的 Q 因子定义为 Q_{in} 而在谐振器 4 和自由空间之间的 Q 因子定义为 Q_v 。在图 15 中，水平轴表示 Q_{in}/Q_v ，而垂直轴表示输出强度，在图 15 中“X1”表示端 P2 的输出强度，“X2”表示端 P1、P3 和 P4 的输出强度，“X3”表示到自由空间的输出强度。如图 15 所示，在常规电磁波频率滤波器中，到输出端 P3 的传输效率的最大值（即波长选择效率）在理论上仅为 25%，因此就有传输效率过于不足的问题。另外， Q_{in} 是在与谐振器 - 输入波导系统中从谐振器 4 漏入到输入波导 2 中的能量的量有关的一个值。换句话说， Q_{in} 是示出在谐振器 - 输入波导系统中，谐振器 4 能储存多少能量的一个值。 Q_{in} 定义如下述表达式：

$$Q_{in} = \omega_0 \times W / (-dW/dt)$$

其中， ω_0 表示谐振器 4 的谐振频率，W 表示储存在谐振器 4 中的能量，而 $(-dW/dt)$ 表示从谐振器 4 到输入波导 2 中每单位时间损失的能量。 Q_v 是在谐振器 - 自由空间系统中与从谐振器 4 漏入到自由空间中的能量的量有关的一个值。换句话说， Q_v 是示出在谐振器 - 自由空间系统中，谐振器 4 能储存多少能量的一个值。 Q_v 定义如下述表达式：

$$Q_v = \omega_0 \times W / (-dW/dt)$$

其中， ω_0 表示谐振器 4 的谐振频率，W 表示储存在谐振器 4 中的能量，而 $(-dW/dt)$ 表示从谐振器 4 到自由空间中每单位时间损失的能量。

另外，已经提出了与图 14A 和 14B 示出的电磁波频率滤波器相比而言，能达到较高传输效率的电磁波频率滤波器。该电磁波频率滤波器包括二维光子晶体，其中在二维平面上设置有由具有比空气更高的折射率的介质制成的

圆柱形棒，而输入波导、输出波导和两个谐振器形成在该二维光子晶体（例如，看 Japanese Kohyo（国家公布的翻译版）No.2001-50887， p.22-23， p.40-46，图 3、8 和 22，及 C.Manolatu 等人“Coupling of Modes Analysis of Resonant Channel Add-Drop Filters”，IEEE JOURNAL QUANTUM ELECTRONICS，VOL35，NO9，1999，p.1322-1331，及 Shanhui Fan 等人，“Channel Drop Tunneling through Localized States”，PHYSICAL REVIEW LETTERS，VOL80，NO5，1998，p.960-963）。

在这种电磁波频率滤波器中，朝向输入波导的输入端的相对端传播的电磁波和朝向输出波导的输出端的相对端传播的电磁波可以被两个谐振器的谐振模式消去。具体的说，两个谐振器构成其中两个谐振器同相振荡的对称模式和两个谐振器反相振荡的反对称模式，当在对称模式中的谐振频率和在反对称模式中的谐振频率彼此相同时，在对称模式中的相对输入波导、输出波导和平面外的自由空间的衰减速率其每一个分别都等于在反对称模式中相对它们的衰减速率，在对称模式的振荡和反对称模式的振荡之间的相位差满足特定条件（例如， π ），来自谐振器的在输入波导的输入端（进入端）的相反方向传播的电磁波和来自谐振器的在输出波导的输出端（输出端）的相反方向传播的电磁波可以被消去。因此，可以从仅特定的输出端来选择性地输出电磁波。

顺便提及，在上述的具有两个谐振器的常规电磁波频率滤波器中，可以用下面的方程来计算各在对称模式中的谐振频率 ω_s 和在反对称模式中的谐振频率 ω_a ：

$$\omega_s = \omega_0 - \{ \mu - (1/\tau_e) \times \sin\Phi - (1/\tau_e') \times \sin\Phi' \}$$

$$\omega_a = \omega_0 + \{ \mu - (1/\tau_e) \times \sin\Phi - (1/\tau_e') \times \sin\Phi' \}$$

其中 μ 是在谐振器之间不通过任何波导的结合能， Φ 是在谐振器通过输入波导相互耦合时在谐振器它们之间的相移量， Φ' 是在谐振器通过输出波导相互耦合时在谐振器它们之间的相移量， $(1/\tau_e)$ 是从谐振器到输入波导的能量的衰减速率， $(1/\tau_e')$ 是从谐振器到输出波导的能量的衰减速率， ω_0 是在每个谐振器单独存在的情况下的谐振器频率。从上面的方程中可清楚看到，这些模式的谐振频率 ω_s 、 ω_a 彼此基本不同，因此，为了使两个模式的这些谐振频率 ω_s 、 ω_a 彼此一致，必须要满足下面的条件：

$$\mu - (1/\tau_e) \times \sin\Phi - (1/\tau_e') \times \sin\Phi' = 0$$

然而，为了满足上面的条件，需要采用复杂的结构。例如，必须将靠近谐振器的棒的折射率设定为与其他棒的折射率不相同的一个值，或者将靠近谐振器的棒的半径设定为与其他棒相比而言为非常小的一个值。因此，有许多设计限制，而难以设计和制造电磁波频率滤波器。

发明内容

考虑到上述问题，本发明的目的是提供一种电磁波频率滤波器，其能从输入到输入波导中的多个频率的电磁波中从输出波导的输出端选取预定频率的电磁波，并可由较容易的设计来形成。

根据本发明的电磁波频率滤波器包括构建为接收输入到输入波导的一端中的多个频率的电磁波的输入波导和与所述输入波导并排设置的输出波导，以及设置在输入波导和输出波导之间的谐振器。该谐振器具有预定的谐振频率并谐振与该谐振频率匹配的预定频率的电磁波以便将电磁波从输入波导传输到输出波导，由此使得从输出波导的一端的输出端发出电磁波。本发明的特征在于输入波导具有输入波导侧的反射器其用于在输入波导的一端的谐振器的相反侧反射该谐振频率电磁波，输出波导具有输出波导侧的反射器其用于在输出波导的一端的相反侧上反射预定频率的电磁波，该电磁波频率滤波器满足下面的关系：

$$Q_{\text{inb}} / (1 - \cos\theta_1) \ll Q_V$$

$$Q_{\text{inb}} / (1 - \cos\theta_2) = Q_{\text{inr}} / (1 - \cos\theta_2)$$

$$\theta_1, \theta_2 \neq 2N\pi \quad (N = 0, 1, \dots)$$

其中， θ_1 是被输入波导侧反射器反射而回到谐振器附近的电磁波的相移量， θ_2 是被输出波导侧反射器反射而回到谐振器附近的电磁波的相移量， Q_{inb} 是在谐振器和输入波导之间的 Q 因子， Q_{inr} 是在谐振器和输出波导之间的 Q 因子，而 Q_V 是在谐振器和自由空间之间的 Q 因子， Q_{inb} 是在谐振器 - 输入波导系统中与从谐振器漏入到输入波导的能量的量有关的一个值。换句话说， Q_{inb} 是指示出在谐振器 - 输入波导系统中谐振器能储存多少能量的一个值。 Q_{inb} 如下述表达式定义：

$$Q_{\text{inb}} = \omega_0 \times W / (-dW/dt)$$

其中， ω_0 表示谐振器的谐振频率， W 表示储存在谐振器中的能量，而 $(-dW/dt)$ 表示从谐振器到输入波导中每单位时间损失的能量。 Q_{inr} 是在谐振器 - 输出

波导系统中与从谐振器漏入到输出波导中的能量的量有关的一个值。换句话说， Q_{inr} 是示出在谐振器-输出波导系统中，谐振器能储存多少能量的一个值。 Q_{inr} 定义如下述表达式：

$$Q_{\text{inr}} = \omega_0 \times W / (-dW/dt)$$

其中， ω_0 表示谐振器的谐振频率， W 表示储存在谐振器中的能量，而 $(-dW/dt)$ 表示从谐振器到输出波导中每单位时间损失的能量。 Q_v 是在谐振器-自由空间系统中与从谐振器漏入到自由空间中的能量的量有关的一个值。换句话说， Q_v 是示出在谐振器-自由空间系统中，谐振器能储存多少能量的一个值。 Q_v 定义如下述表达式：

$$Q_v = \omega_0 \times W / (-dW/dt)$$

其中 ω_0 表示谐振器的谐振频率， W 表示储存在谐振器中的能量，而 $(-dW/dt)$ 表示从谐振器到自由空间中每单位时间损失的能量。然而，每个 Q_{inb} 、 Q_{inr} 和 Q_v 是由包括输入波导和输出波导的整个系统来决定的。如果在输入波导的一端或者在输出波导的一端有寄生反射部件，或者在输入或输出波导中有寄生谐振部件例如弯曲的波导，每个 Q_{inb} 、 Q_{inr} 和 Q_v 要考虑这些寄生部件来决定。

本发明的电磁波频率滤波器能有效地从入射到输入波导上的多个频率的电磁波中，从输出波导的输出端选取匹配谐振器的谐振频率的预定频率的电磁波，并可由较容易的设计来形成。对电磁波频率滤波器来说可达到接近100%的传输效率。

优选地，该电磁波频率滤波器具有面内异质结构，在该异质结构中至少具有在二维面上的折射率周期结构的第一光子晶体和具有周期与第一光子晶体的折射率周期结构不同的折射率周期结构的第二光子晶体，被并排放置在同一面内，输入波导的形成是通过在这些光子晶体的排列方向上沿整个长度上在第一和第二光子晶体的折射率周期结构中制造线形缺陷，而输出波导的形成是通过在这些光子晶体的排列方向上跨着这些光子晶体在第一和第二光子晶体的折射率周期结构中制造线形缺陷，而谐振器的形成是通过在第一光子晶体中制造点状缺陷，谐振器的谐振频率包括在第二光子晶体不具有波导模式中的频带中，输入波导侧反射器由在输入波导形成在第一光子晶体中的一部分和输入波导形成在第二光子晶体中的一部分之间的边界形成，而输出波导侧反射器由在输出波导形成在第一光子晶体中的一部分和输出波

导形成在第二光子晶体中的一部分之间的边界形成。

在这种情况下，谐振频率的电磁波可通过使用该面内异质结构而被反射。

最好，第一光子晶体和第二光子晶体其每一个为二维光子晶体，而在谐振器和输入波导之间的间隙与在谐振器和输出波导之间的间隙设定为彼此相等，在谐振器和输入波导侧反射器之间沿输入波导方向上的距离 d_1 与在谐振器和输出波导侧反射器之间沿输出波导方向上的距离 d_2 设定为彼此相等 ($d_1 = d_2$)，且输入波导的传播常数 β_1 与输出波导的传播常数 β_2 设定为彼此相等 ($\beta_1 = \beta_2$)，在输入波导形成在第一二维光子晶体中的部分和输入波导形成在第二二维光子晶体中的部分之间的轴错位量与输出波导形成在第一二维光子晶体中的部分和输出波导形成在第二二维光子晶体中的部分之间的轴错位量设定为彼此相等，以使被输入波导侧的反射器反射的电磁波的反射相移 Δ_1 与被输出波导侧的反射器反射的电磁波的反射相移 Δ_2 彼此相等 ($\Delta_1 = \Delta_2$)。

在这种情况下， $\theta_1 = \theta_2$ ，传输效率关于 θ_1 和 θ_2 的波动的波动范围较小，因此可增大对 θ_1 和 θ_2 的波动的容许量。

最好，在靠近第一光子晶体和第二光子晶体之间的边界处，至少第一二维光子晶体和第二二维光子晶体其中之一的折射率周期结构的周期阶段性地改变使得输入波导平滑且连续地延伸而邻近所述边界。

在这种情况下，因为输入波导平滑且连续地延伸而邻近在第一光子晶体和第二光子晶体之间的边界，因输入波导的轴错位而产生的，频率与形成在第一光子晶体中的谐振器的谐振频率不同的电磁波的反射损失可以被减小。

另外最好，第一光子晶体和第二光子晶体在输入波导和输出波导的排列方向上的相对位置被设定为使得在第一光子晶体和第二光子晶体之间不会产生输入波导的轴错位，且输入波导侧反射器和谐振器之间的距离设定为满足 $\cos\theta_1 = \cos\theta_2$ 的关系。

在这种情况下，因输入波导的轴错位而产生的，频率与所述谐振频率不同的电磁波的反射损失可以被消除。

或者，同样优选地，第一光子晶体和第二光子晶体在输入波导和输出波导的排列方向上的相对位置被设定为使得在第一光子晶体和第二光子晶体之间不会产生输入波导的轴错位，且在输出波导侧反射器上设置用于将 Δ_2

与 Δ_1 匹配的相位补偿器。

在这种情况下，可以将输出波导侧的反射器的反射效率与输入波导侧的反射器的反射效率相匹配，由此可以增大对距离 d_1 和 d_2 的变化的容许量。

同样优选地，该电磁波频率滤波器具有面内异质结构，在该异质结构中至少具有在二维面内的折射率周期结构的第一光子晶体和具有其周期与该第一光子晶体的折射率周期结构不同的折射率周期结构的第二光子晶体被并排放置在同一平面中，输入波导的形成是通过在这些光子晶体的排列方向上沿整个长度上在第一和第二光子晶体的折射率周期结构中制造线形缺陷，而谐振器的形成是通过在第一光子晶体中制造点状缺陷，而输出波导的形成是通过在第一光子晶体的折射率周期结构中制造线形缺陷，而输出波导的相反端构成输出波导侧反射器。

在这种情况下，在输入波导中，通过使用该面内异质结构来反射谐振频率的电磁波，而在输出波导中，通过使用在输出波导的相反端的第一二维光子晶体的光子带隙来反射谐振频率的电磁波。

在上述情况中，最好第一光子晶体和第二光子晶体其每一个为二维光子晶体，所述谐振器和所述输入波导侧的反射器在沿所述输入波导方向上的距离 d_1 与所述谐振器和所述输出波导侧的反射器在沿所述输出波导方向上的距离 d_2 设定为满足 $\cos\theta_1 = \cos\theta_2$ 的关系。

在这种情况下，设计电磁波频率滤波器就变得容易。

最好，第一光子晶体的折射率周期结构变化为使得靠近输出波导的相反端的电磁场分布不会急遽变化。

在这种情况下，可以防止靠近输出波导的相反端的电磁场分布急遽变化，从而可以降低到自由空间的辐射损失，因而提高传输效率。

优选地，电磁波频率滤波器设计为使得 Q_{inb} 、 Q_{inr} 、 $\cos\theta_1$ 和 $\cos\theta_2$ 满足下述关系： $Q_{\text{inb}} = Q_{\text{inr}}$ 和 $\cos\theta_1 = \cos\theta_2$ 。

在这种情况下，可以在关于谐振器的对称结构中，即在谐振器和输入波导之间的距离与谐振器和输出波导之间的距离设定为彼此相等，提高传输效率，因此滤波器的设计就变得容易。

同样优选地，电磁波频率滤波器还包括一控制装置其用于通过改变靠近至少输入波导侧的反射器和输出波导侧的反射器其中之一的折射率来改变输出端的输出，或者一控制装置其用于通过改变靠近至少输入波导侧的反射

器和输出波导侧的反射器其中之一的折射率周期结构的周期来改变输出端的输出，或者一控制装置其用于通过改变靠近各输入和输出波导反射器及谐振器的折射率来改变输出端的输出。

在这些情况中，该电磁波频率滤波器可用作频率选择（波长选择）电磁波开关。

$Q_{\text{inb}} \neq Q_{\text{inr}}$ 也同样优选，该电磁波频率滤波器还包括一控制装置，其通过改变靠近输出波导侧的反射器的折射率来改变输出端的输出。

在这种情况下，该电磁波频率滤波器可用作频率选择（波长选择）电磁波开关，另外，因为传输效率响应 θ_2 的改变的量而改变的量被增大，可以减小能耗量的量并使开关速度更快。

附图说明

图 1 示出本发明第一实施例的示意图；

图 2 示出第一实施例的特性评估图示；

图 3 示出本发明第二实施例的平面示意图；

图 4 示出本发明第三实施例的平面示意图；

图 5 示出第三实施例的特性评估图示；

图 6 示出第三实施例的另一结构的平面示意图；

图 7 示出本发明第四实施例的平面示意图；

图 8 示出第四实施例的特性评估图示；

图 9A 示出本发明第五实施例的平面示意图而图 9B 示出图 9A 一实质部分的放大图；

图 10 示出本发明第六实施例的平面示意图；

图 11 示出第六实施例的特性评估图示；

图 12 示出本发明第七实施例的平面示意图；

图 13 示出第七实施例的特性评估图示；

图 14A 示出常规结构的平面示意图，而图 14B 示出图 14A 的一实质部分的放大图；

图 15 示出图 14A 的特性评估图示。

具体实施方式

以下，将参考附图来具体描述本发明。

第一实施例

如图1所示，该实施例的电磁波频率滤波器具有面内异质结构，其中其每个具有彼此不同的折射率周期结构的多个二维光子晶体 $1_1, 1_2, \dots$ ，被并排放置在二维平面的一个方向（图1的水平方向）上（在图1中仅示出了两个二维光子晶体 $1_1, 1_2$ ）。该电磁波频率滤波器具有输入波导2，该波导的形成是通过在所有二维光子晶体 $1_1, 1_2, \dots$ 的折射率周期结构中在二维光子晶体 $1_1, 1_2, \dots$ 的排列方向上沿二维光子晶体的整个长度上制造一线形缺陷。该电磁波频率滤波器还具有输出波导 $3_1, 3_2, \dots$ ，其每一个的形成是通过在每对彼此相邻的二维光子晶体 $1_n, 1_m$ （ $n=1, 2, \dots, m=n+1$ ）的折射率周期结构中在这些二维光子晶体 $1_1, 1_2, \dots$ 排列方向上制造线形缺陷，使得该线形缺陷跨过每对二维光子晶体 $1_n, 1_m$ 。该电磁波频率滤波器还具有谐振器 $4_1, 4_2, \dots$ ，其每一个的形成是通过在每对二维光子晶体 $1_n, 1_m$ 中的一个二维光子晶体 1_n 的折射率周期结构中制造点状缺陷。输入波导2的一端（图1的左端）被定义为输入端P1，而每个输出波导 $3_1, 3_2, \dots$ 的一端（图1的左端）被分别定义为输出端P3₁, P3₂, ...。

每个输出波导 $3_1, 3_2, \dots$ 设置为与输入波导2并排，而每个谐振器 $4_1, 4_2, \dots$ 设置在输入波导2和每个输出波导 $3_1, 3_2, \dots$ 的中间部分之间，每个谐振器具有谐振频率 $\omega_{01}, \omega_{02}, \dots$ 。在该电磁波频率滤波器中，当多个频率的电磁波入射到输入端P1时，从该多个频率的电磁波中与每个谐振频率 $\omega_{01}, \omega_{02}, \dots$ 相匹配的预定频率的电磁波被从输入波导2通过每个谐振器 $4_1, 4_2, \dots$ 传输到每个输出波导 $3_1, 3_2, \dots$ 并从每个输出波导 $3_1, 3_2, \dots$ 的输出端P3₁, P3₂, ...输出。谐振器 $4_1, 4_2, \dots$ 的每个谐振频率 $\omega_{01}, \omega_{02}, \dots$ 与其他的不同，例如频率（第一预定频率）与谐振器 4_1 的谐振频率 ω_{01} 相匹配的电磁波通过谐振器 4_1 被从输出波导 3_1 的输出端P3₁输出（发出），而频率（第二预定频率）与谐振器 4_2 的谐振频率 ω_{02} 相匹配的电磁波通过谐振器 4_2 被从输出波导 3_2 的输出端P3₂输出（发出）。每个输出波导 $3_1, 3_2, \dots$ 的中间部分与输入波导2平行。

每个二维光子晶体 $1_1, 1_2, \dots$ 是所谓的板型二维光子晶体，其包括由高折射率介质例如Si和夹在该高折射率介质的厚度方向的两侧的均匀的低折射率介质例如空气和SiO₂制成的板 $11_1, 11_2, \dots$ 。在二维光子晶体的面内，

光被光子带隙限制，在厚度方向上，光被全反射限制。在每个二维光子晶体 $1_1, 1_2, \dots$ 中排列了多个圆孔 $12_1, 12_2, \dots$ 以在垂直板 $11_1, 11_2, \dots$ 的厚度方向的平面内具有二维周期结构，构成板 $11_1, 11_2, \dots$ 的高折射率介质与在圆孔 $12_1, 12_2, \dots$ 中作为低折射率介质的空气构成具有折射率周期结构的二维光子晶体 $1_1, 1_2, \dots$ 。具体的说，每个光子晶体 $1_1, 1_2, \dots$ 的形成是通过在每个板 $11_1, 11_2, \dots$ 中在单元格为正三角形的假想二维三角形点阵的每个格点上制造圆孔 $12_1, 12_2, \dots$ 。换句话说，圆孔 $12_1, 12_2, \dots$ 排列为三角形格形式，在与每个 $11_1, 11_2, \dots$ 的厚度方向相垂直的平面上。

在该实施例的电磁波频率滤波器中，每对二维光子晶体 $1_1, 1_2, \dots$ 的折射率周期结构具有比例关系，在二维光子晶体 1_m 中在圆孔 12_m ($m = n+1, n = 1, 2, \dots$) 的排列方向上的周期设定为比在在二维光子晶体 1_n 中在圆孔 12_n ($n = 1, 2, \dots$) 的排列方向上的周期小几个百分比（例如 1.2%）以便通过使用每对二维光子晶体 $1_n, 1_m$ 形成面内异质结构。

更具体的说，在该实施例中，光学通讯波长范围例如 C 波段（1530nm-1565nm）和 L 波段（1565nm-1625nm）被假定为要输入到输入端 P1 的电磁波的频率波段。在二维光子晶体 1_1 中在圆孔 12_1 的排列方向上的周期 (a_1) 设定为 $0.42\mu\text{m}$ ，每个圆孔 12_1 的半径设定为 $0.29 a_1$ ，而板 11_1 的厚度设定为 $0.6 a_1$ 。在放在二维光子晶体 1_1 旁边的光子晶体 1_2 中，每个圆孔 12_2 的半径和板 11_2 的厚度等于二维光子晶体 1_1 的，而在圆孔 12_2 的的排列方向上的周期 (a_2)（换句话说，二维光子晶体 1_2 的折射率周期结构的周期，其为在二维三角形点阵的格点之间的距离）被设定为比二维光子晶体 1_1 的圆孔 12_1 的周期 a_1 小 1.2%。通过将在圆孔 $12_1, 12_2$ 的排列方向上的周期 a_1, a_2 设定为这样的值，可以形成光子带隙，该光子带隙为一波长范围在该范围中从二维面内各个方向入射来的任何在上述频带中的电磁波（光）都不能传播。输入波导 2，输出波导 $3_1, 3_2, \dots$ 以及谐振器 $4_1, 4_2, \dots$ ，其每一个的形成是通过略过适当数目的圆孔 $12_1, 12_2, \dots$ 。在该实施例中，虽然每个输出波导 $3_1, 3_2, \dots$ 具有弯曲部分，因为光在光子带隙的静态传播在二维光子晶体 $1_1, 1_2, \dots$ 中二维面内的所有方向上被限制，所以电磁波可以在输出波导中没有辐射损失而传播。圆孔 $12_1, 12_2$ 的周期 a_1, a_2 的值以及每个圆孔 $12_1, 12_2$ 的半径并不特别限于这些值。每个周期 a_1, a_2 可以是在上述频带中的电磁波的波长的同量级的周期（例如，其约为电磁波波长的一半）。

在该实施例中，假定使用在上面提到的光学通讯波长范围中的电磁波，电磁波频率滤波器的形成是通过使用所谓的 SOI (silicon on insulator) 基底，其在厚度方向的中间部分具有为绝缘膜的二氧化硅膜(植入的二氧化物膜)。在该实施例的电磁波频率滤波器中的二维光子晶体 $1_1, 1_2, \dots$ 、输入波导 2、输出波导 $3_1, 3_2, \dots$ 和谐振器 $4_1, 4_2, \dots$ 的形成是通过使用光刻技术和蚀刻技术加工 SOI 基底的主表面侧的硅层。因此可以比较容易地形成二维光子晶体 $1_1, 1_2, \dots$ 、输入波导 2、输出波导 $3_1, 3_2, \dots$ 和谐振器 $4_1, 4_2, \dots$ 。例如，在商业 SOI 晶片的主表面侧的硅层上形成构图成预期形状的保护层，然后用干蚀刻机器蚀刻该硅层使得保留对应输入波导 2、输出波导 $3_1, 3_2, \dots$ 和谐振器 $4_1, 4_2$ ，以及板 $11_1, 11_2, \dots$ 的部分而除去对应圆孔 $12_1, 12_2, \dots$ 的部分。结果，可以同时形成二维光子晶体 $1_1, 1_2, \dots$ 、输入波导 2、输出波导 $3_1, 3_2, \dots$ 和谐振器 $4_1, 4_2, \dots$ 。在 C 波段和 L 波段等等的光学通讯波长范围中，Si 的折射率约为 3.4， SiO_2 的折射率约为 1.5 而空气为 1，因此在板 $11_1, 11_2, \dots$ 和在其两侧的覆层的相对折射率差异为 55 - 70%，与在典型光纤中芯与覆层之间的相对折射率差异(0.3%)相比，这是一个非常大的值。因而，与光纤相比，可以增强光限制效果，可以使滤波器小型化。

如上面提到的那样，在该实施例的电磁波频率滤波器中，由每对二维光子晶体 $1_n, 1_m$ 形成面内异质结构，而形成跨该对二维光子晶体 $1_n, 1_m$ 的输入波导 2 和输出波导 3_n ($n=1, 2, \dots$) 的波导模式在二维光子晶体 $1_n, 1_m$ 中是不同的。因而，在传播通过形成在二维光子晶体 1_n 中的波导 2、 3_n 的部分的多个频率中的一些频率，不能传播通过形成在二维光子晶体 1_m 中的波导 2、 3_n 的部分，并且它们被反射。谐振频率被设定为与被反射的频率相匹配。就是说，在该实施例的电磁波频率滤波器中，形成在二维光子晶体 1_n 中的谐振器 4_n ($n=1, 2, \dots$) 的谐振频率包括在二维光子晶体 1_m 中具有无波导模式的频带中，在二维光子晶体 $1_n, 1_m$ 之间的边界的附近，用于反射具有与形成在二维光子晶体 1_n 中的谐振器 4_n ($n=1, 2, \dots$) 的谐振频率相匹配的电磁波的输入波导侧反射器 21_n ($n=1, 2, \dots$)，由形成在二维光子晶体 1_n (以下称为前侧二维光子晶体 1_n) 中的输入波导 2 的部分和形成在二维光子晶体 1_m (以下称为后侧二维光子晶体 1_m) 中的输入波导 2 的部分之间的边界来形成，而用于反射具有与谐振器 4_n ($n=1, 2, \dots$) 的谐振频率相匹配的电磁波的输出波导侧反射器 31_n ($n=1, 2, \dots$)，由形成在前

侧二维光子晶体 1_n 中的输出波导 3_1 的部分和形成在后侧二维光子晶体 1_m 中的输出波导 3 的部分之间的边界来形成。

就是说, 在本实施例的电磁波频率滤波器中, 输入波导 2 的一端定义为输入端 P_1 , 每个输出波导 $3_1, 3_2, \dots$ 的一端分别定义为输出端 P_{3_1}, P_{3_2}, \dots , 用于反射每个谐振器 $4_1, 4_2, \dots$ 的谐振频率的电磁波的输入波导侧反射器 $21_1 \dots$ 设置在输入波导 2 上在输入波导 2 自每个谐振器 $4_1, 4_2, \dots$ 的一端的相反侧, 而用于反射每个谐振器 $4_1, 4_2, \dots$ 的谐振频率的电磁波的输出波导侧反射器 $31_1 \dots$ 设置在每个输出波导 $3_1, 3_2, \dots$ 的相反侧, 因此, 在本实施例的电磁波频率滤波器中, 从输入波导 2 通过每个谐振器 $4_1, 4_2, \dots$ 传输到每个输出波导 $3_1, 3_2, \dots$, 并朝每个输出波导 $3_1, 3_2, \dots$ 的输出端 P_{3_1}, P_{3_2}, \dots 的相反端传播的电磁波被每个输出波导侧反射器 $31_1 \dots$ 反射, 而电磁波其从输入波导 2 传输到每个谐振器 $4_1, 4_2, \dots$ 然后回到输入波导 2 然后朝向输入波导 2 的输入端 P_1 的相反端传播, 以及电磁波其匹配每个谐振器 $4_1, 4_2, \dots$ 的谐振频率并朝向输入波导 2 的相反端传播而没有被传输到每个谐振器 $4_1, 4_2, \dots$ 上, 被每个输入波导侧反射器 $21_1 \dots$ 反射。在图 1 中, 交替的长短点划线的箭头示出频率与谐振器 $4_1, 4_2, \dots$ 的谐振频率不同的电磁波的传播路径, 而实线箭头示出频率与谐振器 4_1 的谐振频率相匹配的电磁波的传输路径的例子, 该电磁波的传输路径为被输入波导侧反射器 21_1 反射并通过谐振器 4_1 移到输出波导 3_1 并被输出波导侧反射器 31_1 反射, 然后从输出端 3_1 输出。

在本实施例的电磁波频率滤波器中, 当在谐振器 4_1 和输入波导侧反射器 21_1 之间在沿输入波导 2 的方向上的距离表示为 d_1 , 在谐振器 4_1 和输出波导侧反射器 31_1 之间在沿输出波导 3_1 的方向上的距离表示为 d_2 , 输入波导 2 的传播常数表示为 β_1 , 输出波导 3_1 的传播常数表示为 β_2 , 被输入波导侧反射器 21_1 反射的电磁波的反射相移表示为 Δ_1 , 被输出波导侧反射器 31_1 反射的电磁波的反射相移表示为 Δ_2 , 被输入波导侧反射器 21_1 反射并回到靠近谐振器 4_1 的电磁波的相移量表示为 θ_1 , 被输出波导侧反射器 31_1 反射并回到靠近谐振器 4_1 的电磁波的相移量表示为 θ_2 , 各相移量 θ_1 和 θ_2 由下面的方程计算:

$$\theta_1 = 2\beta_1 \times d_1 + \Delta_1$$

$$\theta_2 = 2\beta_2 \times d_2 + \Delta_2$$

另外可以使用模式耦合理论来计算输出端 P_{3_1} 的传输效率 D , 其由下面的方程表达:

[方程 1]

$$D = \left| \frac{S_{-3}}{S_{+1}} \right|^2 = \frac{4 \{Q_{mb}/(1-\cos\theta_1)\} \cdot \{Q_{inr}/(1-\cos\theta_2)\}}{4 \left(\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \right)^2 + \left\{ \frac{1}{Q_v} + \frac{1}{Q_{mb}/(1-\cos\theta_1)} + \frac{1}{Q_{inr}/(1-\cos\theta_2)} \right\}^2}$$

$$\omega' = \omega_0 \left(1 - \frac{\sin\theta_1}{2Q_{mb}} - \frac{\sin\theta_2}{2Q_{inr}} \right)$$

其中， Q_{inb} 是谐振器 4₁ 和输入波导 2 之间的 Q 因子， Q_{inr} 是谐振器 4₁ 和输入波导 3₁ 之间的 Q 因子， ω 是电磁波的频率， ω_0 是谐振器 4₁ 的谐振频率， S_{+1} 是在通过输入端 P1 输入到输入波导 2 中的多个电磁波中匹配谐振器 4₁ 的谐振频率的预定频率的电磁波的振幅，而 S_{-3} 是从输出端 P3₁ 输出的电磁波的振幅。

在上述方程中，因为本实施例的电磁波频率滤波器的谐振器 4₁ 的形成是通过在板型二维光子晶体 1₁ 中的折射率周期结构中制造缺陷，而该缺陷为所谓的施主型缺陷，即该缺陷的形成是通过向在折射率周期结构中预期要形成圆孔 12₁ 的位置上的二维光子晶体 1₁ 的部分中加入半导体材料（在本实施例中，该施主型缺陷的形成是通过向两个圆孔 12₁ 中加入 Si），对自由空间的辐射损失较低并能获得高的 Q_v ($Q_{inb}/(1-\cos\theta_1) \ll Q_v$)。这样，在上述方程中的 $1/Q_v$ 可忽略为 0。因此，当每个参数 d_1 、 d_2 、 β_1 、 β_2 、 Δ_1 、 Δ_2 、 θ_1 、 θ_2 、 Q_{inb} 、 Q_{inr} 和 Q_v 设定为满足下面的条件时：

$$Q_{inb}/(1-\cos\theta_1) = Q_{inr}/(1-\cos\theta_2)$$

$$\theta_1, \theta_2 \neq 2N\pi \quad (N = 0, 1, \dots)$$

传输效率 D 可接近 1，即接近 100%。就是说，与常规滤波器相比，对本实施例的电磁波频率滤波器可以用较容易的设计来提高传输效率。另外，由例如出版物（Y.Akahane 等人，Great improvement of Q-factor by shifting lattice points of a two-dimensional photonic crystal slab point defect resonator(日语)，Extended Abstracts of the 50th Japan society of Applied Physics and Related Societies, 29a-YN -9(2003,三月)），以及出版物（Y.Akahane 等人，Design of

channel drop filter by using a donor-type cavity with high-quality factor in a two-dimensional photonic crystal slab, APPLIED PHYSICS LETTERS, VOL.82,NO.9,2003,p.1341-1343), 报告了通过在具有高 Q 因子 Q_V 的二维光子晶体中制造施主型缺陷而形成的谐振器。在前者中, 报道说可得到 45000 的 Q_V , 而在后者中, 报道说可得到 5000 的 Q_V 。

在本实施例的电磁波频率滤波器中, 谐振器 $4_1, 4_2, \dots$ 的位置设定为使得所有的谐振器 $4_1, 4_2, \dots$ 排列在沿二维光子晶体 $1_1, 1_2, \dots$ 的排列方向上行进的直线上, 而在每个谐振器和输入波导 2 之间的距离以及在每个谐振器和每个输出波导之间的距离被设定为彼此相等, 以使 Q 因子 Q_{inb} 和 Q_{inr} 彼此相等 ($Q_{inb} = Q_{inr}$)。此外, 通过设定 $d_1 = d_2, \Delta_1 = \Delta_2$ 和 $\beta_1 = \beta_2$, 将相移量 θ_1 和 θ_2 设定为相等 ($\theta_1 = \theta_2$)。这样因为 $\cos\theta_1 = \cos\theta_2$, 相移量 θ_1, θ_2 和传输效率 D 具有图 2 示出的关系。在图 2 中, 水平轴表示相移量 θ_1 , 而垂直轴表示相移量 θ_2 , 而传输效率 D 由灰阶的等高线表示, 其中颜色接近黑色则传输效率变得越低而颜色接近白色则其变得越高。在本实施例的电磁波频率滤波器中, 通过将在输入波导 2 的形成在二维光子晶体 1_1 中的部分与输入波导 2 的形成在二维光子晶体 1_2 中的部分之间的轴错位量, 与在输出波导 3_1 的形成在二维光子晶体 1_1 中的部分与输出波导 3_1 的形成在二维光子晶体 1_2 中的部分之间的输出波导 3_1 的轴错位量, 设定为彼此相等, 而将反射相移 Δ_1 和 Δ_2 设定为彼此相等 ($\Delta_1 = \Delta_2$)。因此, $\theta_1 = \theta_2$, 则相移量 θ_1, θ_2 沿着短划线 L 响应距离 $d_1 (=d_2)$ 的变化而变化, 因而, 对于相移量 θ_1, θ_2 的波动的传输效率 (即波长选择效率) 的波动范围较小, 可以增大对相移量 θ_1, θ_2 的波动的容许量。

应注意到, 虽然上述方程 1 是用于求解输出端 $P3_1$ 的传输效率的方程, 可以对其他输出端 $P3_2, \dots$ 建立同样关系的表达式。

如上面提到的那样, 在本实施例的电磁波频率滤波器中, 当在输入到输入波导 2 中的多个频率的电磁波中匹配每个谐振器 $4_1, 4_2, \dots$ 的谐振频率的预定频率的电磁波被从输出波导 $3_1, 3_2, \dots$ 的每个输出端 $P3_1, P3_2, \dots$ 中选出时, 与常规电磁波频率滤波器相比, 可以提高传输效率 (波长选择效率)。另外, 因为在关于谐振器 $4_1, 4_2, \dots$ 的对称结构中即在每个谐振器 $4_1, 4_2, \dots$ 和输入波导 2 之间的距离与在每个谐振器 $4_1, 4_2, \dots$ 和每个输出波导 $3_1, 3_2, \dots$ 之间的距离被设定为相等时, 可以增大传输效率, 对电磁波频率滤波器的设

计较为容易。

虽然在本实施例中采用 Si 作为构成二维光子晶体 $1_1, 1_2, \dots$ 的板 $11_1, 11_2, \dots$ 的高折射率介质, 其并不限于 Si, 而是可以是其他材料, 例如 GaAs、InP。

[第二实施例]

在第一实施例的电磁波频率滤波器中, 谐振器 $4_1, 4_2, \dots$ 被设置为使得所有的谐振器 $4_1, 4_2, \dots$ 排列在一直线上, 而在这些二维光子晶体 $1_1, 1_2, \dots$ 的排列方向上的彼此相邻的每对二维光子晶体 $1_n, 1_m$ ($n=1, 2, \dots, m=n+1$) 中的折射率周期结构中的周期彼此不同。这样, 输入波导 2 在输入波导形成在前二维光子晶体 1_n (在图 1 中, 在二维光子晶体 1_1 中) 的部分与输入波导 2 在输入波导形成在后二维光子晶体 1_m (在图 1 中, 在二维光子晶体 1_2 中) 的部分之间, 具有轴错位 (光轴的错位)。结果是, 对频率与谐振器 4_n (在图 1 中, 谐振器 4_1) 的谐振频率不同的电磁波, 会产生因输入波导 2 的轴错位引起的反射损失, 由此, 在多个输出端 $P3_1, P3_2, \dots$ 沿输入波导 2 的纵向方向排列的情况中, 后面的输出端 $P3_2, \dots$ 的传输效率 (波长选择效率) 随着对输出端 $P3_1$ 的接近程度的下降而变得更低。

与之相比, 在本实施例中, 如图 3 所示, 在二维光子晶体 $1_1, 1_2, \dots$ 的排列方向上的彼此相邻的每对二维光子晶体 $1_n, 1_m$ ($n=1, 2, \dots, m=n+1$) 的边界附近, 前二维光子晶体 1_n (在图 1 中, 在二维光子晶体 1_1 中) 和后二维光子晶体 1_m (在图 1 中, 在二维光子晶体 1_2 中) 两者的折射率周期结构的周期都阶段性改变, 使得输入波导 2 平滑并连续地延伸而靠近边界。本实施例的电磁波频率滤波器的基本结构与第一实施例的相同, 因此, 与第一实施例相似的零件用相同的附图标记来标示, 并且这里不再进行重复说明。

在本实施例的电磁波频率滤波器中, 因为输入波导 2 平滑且连续地延伸而靠近在多个二维光子晶体 $1_1, 1_2, \dots$ 的排列方向上的彼此相邻的每对二维光子晶体 $1_n, 1_m$ ($n=1, 2, \dots, m=n+1$) 的边界, 对频率与形成在前二维光子晶体 1_n 中的谐振器 4_n 的谐振频率不同的电磁波, 因输入波导 2 的轴错位引起的反射损失可以被减小, 由此, 与第一实施例相比, 可以增大后面的输出端 $P3_2, \dots$ 的传输效率。

虽然在本实施例中, 前二维光子晶体 1_n 和后二维光子晶体 1_m 两者的折射率周期结构的周期都阶段性改变, 可以是至少一个二维光子晶体的折射率

周期结构的周期改变。

[第三实施例]

在第二实施例的电磁波频率滤波器中，因为输入波导 2 平滑且连续地延伸而靠近每对二维光子晶体 $1_n, 1_m$ ($n=1, 2, \dots, m=n+1$) 的边界，对频率与谐振器 4_n 的谐振频率不同的电磁波，因输入波导 2 的轴错位引起的反射损失可以被减小，由此，与第一实施例相比，可以增大后面的输出端 $P3_2, \dots$ 的传输效率。然而，即使在第二实施例的电磁波频率滤波器中，也产生因输入波导 2 的轴错位引起的反射损失，使得每个输出端 $P3_1, P3_2, \dots$ 的传输效率变得相互不同。因而，希望进一步提高后面的输出端 $P3_2, \dots$ 的传输效率（波长选择效率）。

本实施例的电磁波频率滤波器具有与第一和第二实施例的相同的基本结构，除了如图 4 所示，其输入波导 2 形成在每个光子晶体 $1_1, 1_2, \dots$ 中的部分的光轴为相互一致从而在该多个二维光子晶体 $1_1, 1_2, \dots$ 的排列方向上的彼此相邻的每对二维光子晶体 $1_n, 1_m$ ($n=1, 2, \dots, m=n+1$) 的边界附近不会产生轴错位。虽然谐振器 $4_1, 4_2, \dots$ 在第一和第二实施例中设置在直线上，本实施例的谐振器并不设置在直线上以使输入波导 2 的光轴位于直线上，且本实施例的谐振器 $4_1, 4_2, \dots$ 的相对位置与第一和第二实施例中的不同。与第一和第二实施例相似的零件用相同的附图标记来标示，并且这里不再进行重复说明。

在本实施例的电磁波频率滤波器中，因为在该多个二维光子晶体 $1_1, 1_2, \dots$ 的排列方向上的彼此相邻的每对二维光子晶体 $1_n, 1_m$ ($n=1, 2, \dots, m=n+1$) 的边界附近输入波导 2 没有轴错位，对频率与形成在前二维光子晶体 1_n 中的谐振器 4_n 的谐振频率不同的电磁波，因输入波导 2 的轴错位引起的反射损失可以被消除，由此可以使每个输出端 $P3_1, P3_2, \dots$ 的传输效率平均。

顺便提及，图 5 示出了本实施例的电磁波频率滤波器的 θ_1, θ_2 和输出端 $P3_1$ 的传输效率 D 之间的关系。因为 $\Delta_1 \neq \Delta_2$ ， θ_1 和 θ_2 响应于距离 $d_1 (= d_2)$ 的变化而沿图 5 的短划线 L 改变。因而，对距离 $d_1 (= d_2)$ 的变化的容许量减小。图 5 所观看的方式与第一实施例中所说明的图 2 相同。

与之相反，例如，如图 6 所示，相位补偿器 32，其通过调节靠近输出波导侧反射器 31_1 的周期使 Δ_2 与 Δ_1 匹配，可以设置在输出波导侧反射器 31_1 上。

在这种情况下，因为 $\Delta_2 = \Delta_1$ ，可以使输出波导侧反射器 31_1 的反射效率与输入波导侧反射器 21_1 的反射效率相匹配。因此， θ_1 和 θ_2 响应于距离 $d_1 (= d_2)$ 的变化而沿图5的短划线L'改变。因而，对距离 $d_1 (= d_2)$ 的变化的容许量增大。

[第四实施例]

本实施例的电磁波频率滤波器具有与第三实施例的相同的基本结构，除了如图7所示，其每个输出波导 $3_1, 3_2, \dots$ 的形成是通过在每个光子晶体 $1_1, 1_2, \dots$ 的折射率周期结构中制造线形缺陷，而每个输出波导 $3_1, 3_2, \dots$ 的一端分别为输出端 $P3_1, P3_2, \dots$ ，每个输出波导 $3_1, 3_2, \dots$ 的相反端构成用于分别反射每个谐振器的谐振频率的电磁波的输出波导侧反射器 $31_1, 31_2, \dots$ 。就是说，虽然第三实施例的每个输出波导 $3_1, 3_2, \dots$ 是跨过二维光子晶体 $1_n, 1_m$ 而形成而每个输出波导侧反射器 $31_1, 31_2, \dots$ 是由每对二维光子晶体 $1_n, 1_m$ 的面内异质结构构成，本实施例的每个输出波导是形成在每个光子晶体 $1_1, 1_2, \dots$ 中而每个输出波导侧反射器 $31_1, 31_2, \dots$ 是由每个光子晶体 $1_1, 1_2, \dots$ 的光子带隙构成。在本实施例中，关于输出波导 3_1 ，在谐振器 4_1 和输出波导侧反射器 31_1 之间在沿输出波导 3_1 的方向上的距离 d_2 确定为满足关系式： $\cos\theta_1 = \cos\theta_2$ ，至于其他输出波导 $3_2, \dots$ ，同样，在每个谐振器 $4_2, \dots$ 和输出波导侧反射器 $31_2, \dots$ 之间在沿输出波导 $3_2, \dots$ 的方向上的距离确定为满足同样的关系。与第三实施例相似的零件用相同的附图标记来标示，并且这里不再进行重复说明。

在本实施例的电磁波频率滤波器中，位于输入波导2和每个输出波导 $3_1, 3_2, \dots$ 之间的每个谐振器 $4_1, 4_2, \dots$ 的谐振频率的电磁波可被在每个输出波导 $3_1, 3_2, \dots$ 的相反端的光子带隙反射，另外，不会产生每个输出波导 $3_1, 3_2, \dots$ 的轴错位。因而，可以进一步提高每个输出端 $P3_1, P3_2, \dots$ 的传输效率。

象第一实施例的图2一样，图8示出了本实施例的电磁波频率滤波器的 θ_1 、 θ_2 和传输效率D之间的关系。在图8中， θ_2 ($\theta_2 = 2\beta_2 \times d_2 + \Delta_2$) 响应于距离 d_2 的变化而沿图8的短划线L改变。这样，如图8所示，通过设定 d_1 和 d_2 以满足 $\cos\theta_1 = \cos\theta_2$ 的关系，可以达到接近100%的传输效率。

[第五实施例]

在第四实施例的电磁波频率滤波器中，在每个输出波导 $3_1, 3_2, \dots$ 的相

反端附近的电磁场分布变化急速，因此易于发生从每个输出波导 $3_1, 3_2, \dots$ 的相反端附近到自由空间的辐射。

与之相反，本实施例的电磁波频率滤波器，如图 9A 和 9B 所示，其在每个输出波导 $3_1, 3_2, \dots$ 的相反端附近的折射率周期结构的周期是变化的。具体的说，在本实施例中，圆孔 $12_1, 12_2, \dots$ 在排列方向上的每个周期是变化的使得在每个输出波导 $3_1, 3_2, \dots$ 的相反端附近的电磁场分布为逐渐而非急速变化。本实施例的电磁波频率滤波器的基本结构与第四实施例的相同，与第四实施例相似的零件用相同的附图标记来标示，并且这里不再进行重复说明。

因此，在本实施例的电磁波频率滤波器中，可以防止在每个输出波导 $3_1, 3_2, \dots$ 的相反端附近的电磁场分布急速地变化，从而可以降低向自由空间的辐射损失。结果是，可以进一步提高每个输出端 $P3_1, P3_2, \dots$ 的传输效率。

[第六实施例]

本实施例的电磁波频率滤波器具有与第一实施例相同的基本结构，其结构在图 10 中示出。该实施例电磁波频率滤波器还包括控制装置（未示出），其用于通过改变输出波导侧反射器 $31_1, 31_2, \dots$ 附近的折射率来改变输出端 $P3_1, P3_2, \dots$ 的输出。在本实施例的电磁波频率滤波器中，当输出波导侧反射器附近的折射率，例如 31_1 被控制装置改变时，在第一实施例中描述的输出波导的传播常数 β_2 和反射相移 Δ_2 其每一个都改变，于是相移量 θ_2 改变。最终，输出端 $P3_1$ 的传输效率改变。在本实施例的电磁波频率滤波器中，二维光子晶体 $1_1, 1_2, \dots$ 的板 $11_1, 11_2, \dots$ 的材料可以从这样的材料中适当地选择，所述材料其折射率响应于电场、光、热、磁场等而改变（换句话说，具有电光效应、光光效应、热光效应、磁光效应等的材料），控制装置的结构可根据板 $11_1, 11_2, \dots$ 的材料来适当地选择。或者其折射率响应于电场、光、热、磁场等而改变的材料可以被填入到圆孔 $12_1, 12_2, \dots$ 中，或者这样的材料可堆积在输出波导 $3_1, \dots$ 上在输出波导侧反射器 $31_1, \dots$ 附近。作为折射率由控制光而改变的半导体材料，已知有例如 Si、GaAs、InP、InGaAsP 和 AlGaAs 这样的半导体材料。

与第一实施例的图 2 一样，图 11 为示出本实施例的电磁波频率滤波器的 θ_1, θ_2 和传输效率 D 之间的关系的图示。例如，在 $\theta_1 = \pi$ 的情况中，当通过改变当输出波导侧反射器 31_1 附近的折射率而改变 θ_2 时，传输效率 D 沿图

11 中的短划线变化。因而，可以连续改变传输效率 D 。就是说，在滤波器被设计为满足 $\theta_1 = \pi$ 的情况中，当输出波导侧反射器 31_1 附近的折射率被改变以满足 $\theta_2 = 1.95\pi$ 时，传输效率 D 变为接近 0，而当输出波导侧反射器 31_1 附近的折射率被改变以满足 $\theta_2 = \pi$ 时，传输效率 D 变为接近 100%。因此本实施例的电磁波频率滤波器可用于频率选择（波长选择）电磁波开关（光开关）。

虽然本实施例的电磁波频率滤波器中的控制装置是改变输出波导侧反射器 $31_1, 31_2, \dots$ 附近的折射率，该控制装置可改变至少输入波导侧反射器和输出波导侧反射器其中之一的附近的折射率以改变输出端 $P3_1, P3_2, \dots$ 的输出。或者，该控制装置可通过使用例如包括压电元件或压电材料的基板，来改变至少输入波导侧反射器和输出波导侧反射器其中之一的附近的折射率周期结构的周期。当然，可以在上述实施例 1-5 中的每个电磁波频率滤波器中提供控制装置。

[第七实施例]

当第六实施例的电磁波频率滤波器被用作电磁波开关（光开关）时，对开关来说需要，例如用控制装置使其在 $\theta_2 = \pi$ 的条件和在 $\theta_2 = 1.95\pi$ 的条件之间。因此，控制装置使用较大量的能量，而作为电磁波开关其开关速度为较慢。

本实施例的电磁波频率滤波器具有与第六实施例相同的基本结构，它具有控制装置（未示出），其用于通过改变输出波导侧反射器 $31_1, 31_2, \dots$ 附近的折射率来改变输出端 $P3_1, P3_2, \dots$ 的输出。但在本实施例的电磁波频率滤波器中，如图 12 所示，在谐振器 4_1 和输入波导 2 之间的间隙被设定为大于在谐振器 4_1 和输出波导 3_1 之间的间隙以使 Q 因子 Q_{inb} 不同于 Q 因子 Q_{inr} 。与第六实施例相似的零件用相同的附图标记来标示，并且这里不再进行重复说明。

与第六实施例中的图 11 一样，图 13 示出了本实施例的电磁波频率滤波器的 θ_1, θ_2 和传输效率 D 之间的关系。例如，在 $\theta_1 = \pi$ 的情况中，当通过改变当输出波导侧反射器 31_1 附近的折射率而改变 θ_2 时，传输效率 D 沿图 13 中的短划线变化。与第六实施例相比，传输效率 D 响应于相移量 θ_2 的变化而改变的量会增大。因而，在滤波器被设计为满足 $\theta_1 = \pi$ 的情况中，当输出波导侧反射器 31_1 附近的折射率被改变以满足 $\theta_2 = 1.95\pi$ 时，传输效率 D 变

为接近 0，而当输出波导侧反射器 31_1 附近的折射率被改变以满足 $\theta_2 = 1.8\pi$ 时，传输效率 D 变为接近 100%。因此当本实施例的电磁波频率滤波器被用作频率选择电磁波开关（光开关），与第六实施例的电磁波开关相比，可以减小控制装置的能耗量，并且作为电磁波开关（光开关）其使开关速度更快。

当然，本实施例的控制装置可设置在每个上述实施例 1-5 中的电磁波频率滤波器中。或者，为了将该电磁波频率滤波器用作电磁波开关，可以使用，用于通过改变输入波导侧反射器 $21_1, \dots$ 、输出波导侧反射器 $31_1, \dots$ 、以及谐振器 $4_1, \dots$ 附近的折射率来改变输出端 $P3_1, P3_2, \dots$ 的输出的控制装置。

虽然在上述每个实施例中的二维光子晶体 $1_1, 1_2, \dots$ 是用硅和空气这两种介质的周期结构构建的，该二维光子晶体可以用硅和一种具有与硅不同的折射率并填入到圆孔 $12_1, 12_2, \dots$ 中的介电材料。或者，该二维光子晶体可以用三种或更多种介质的周期结构来构建。例如圆孔 $12_1, 12_2, \dots$ 形成在硅制成的板 $11_1, 11_2, \dots$ 中，而由 SiO_2 或 Si_3N_4 制成的绝缘膜形成在圆孔的内表面以覆盖它们，由此，形成了由硅、绝缘膜和空气这三种介质构建的二维光子晶体。另外，在上述每个实施例中说明的面内异质结构可以用光子晶体构建，而作为每个二维光子晶体 $1_1, 1_2, \dots$ 的替代物，可以采用三维光子晶体。虽然在上述实施例中每个 $4_1, 4_2, \dots$ 是一个挨一个地位于输入波导 2 和每个输出波导 $3_1, 3_2, \dots$ 之间，也可以在输入波导 2 和每个输出波导 $3_1, 3_2, \dots$ 之间有两个或更多谐振器。换句话说，可以在输入波导 2 和每个输出波导 $3_1, 3_2, \dots$ 之间有一组谐振器。

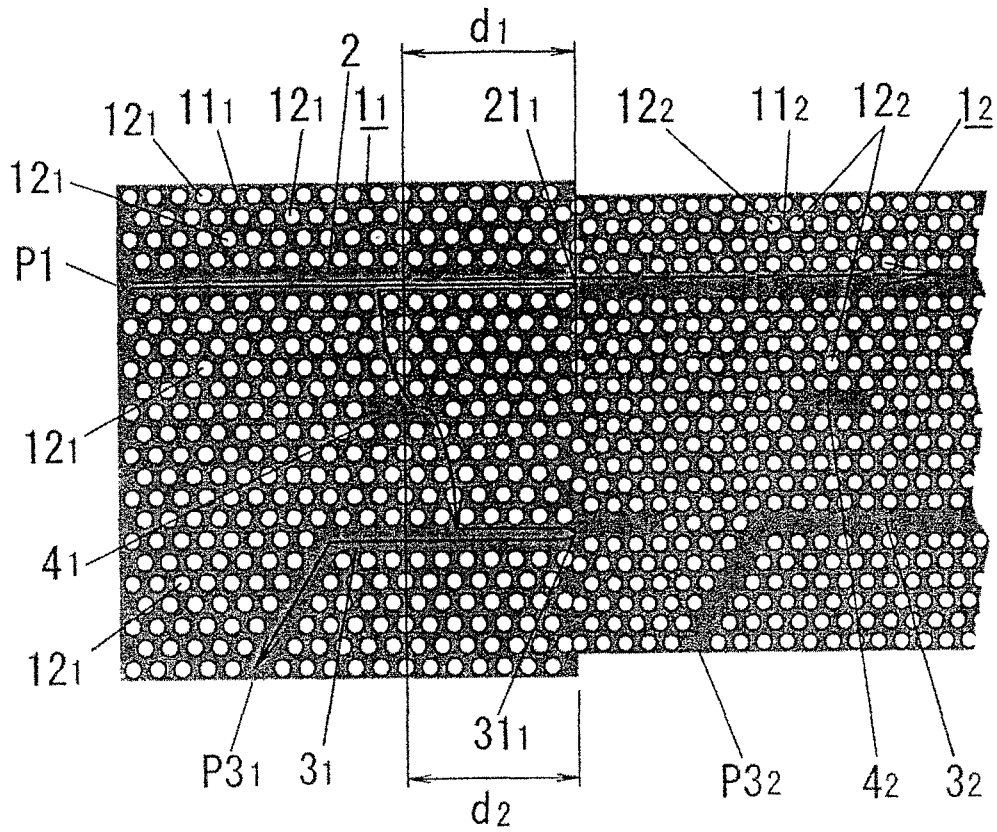


图 1

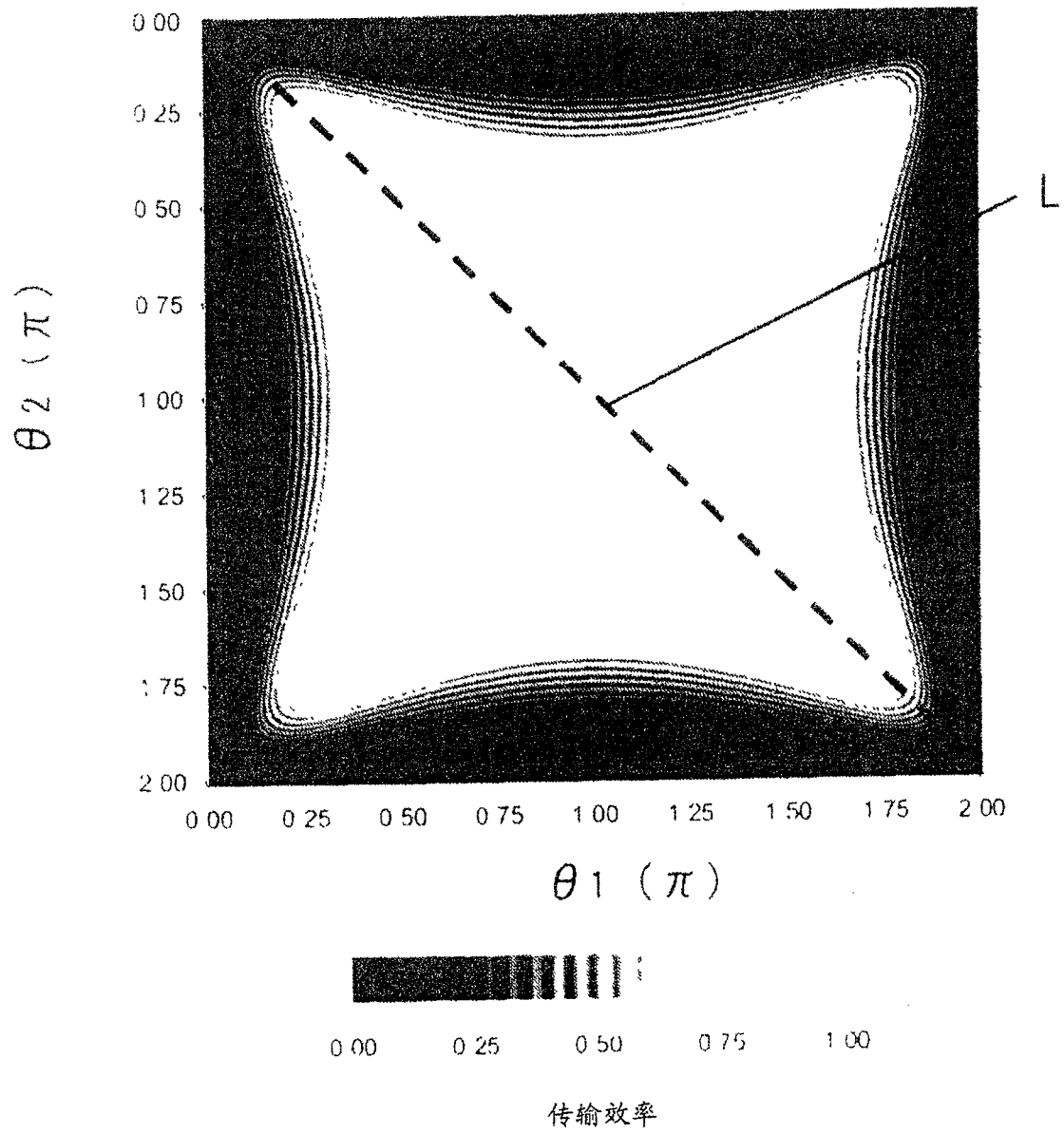
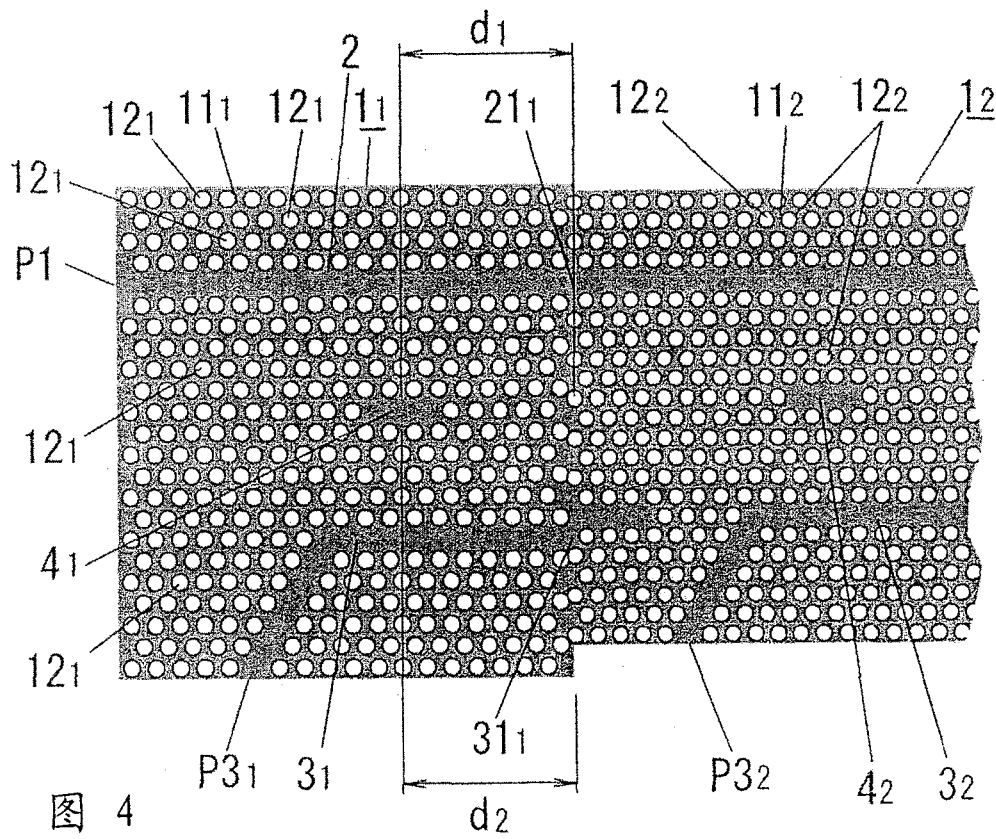
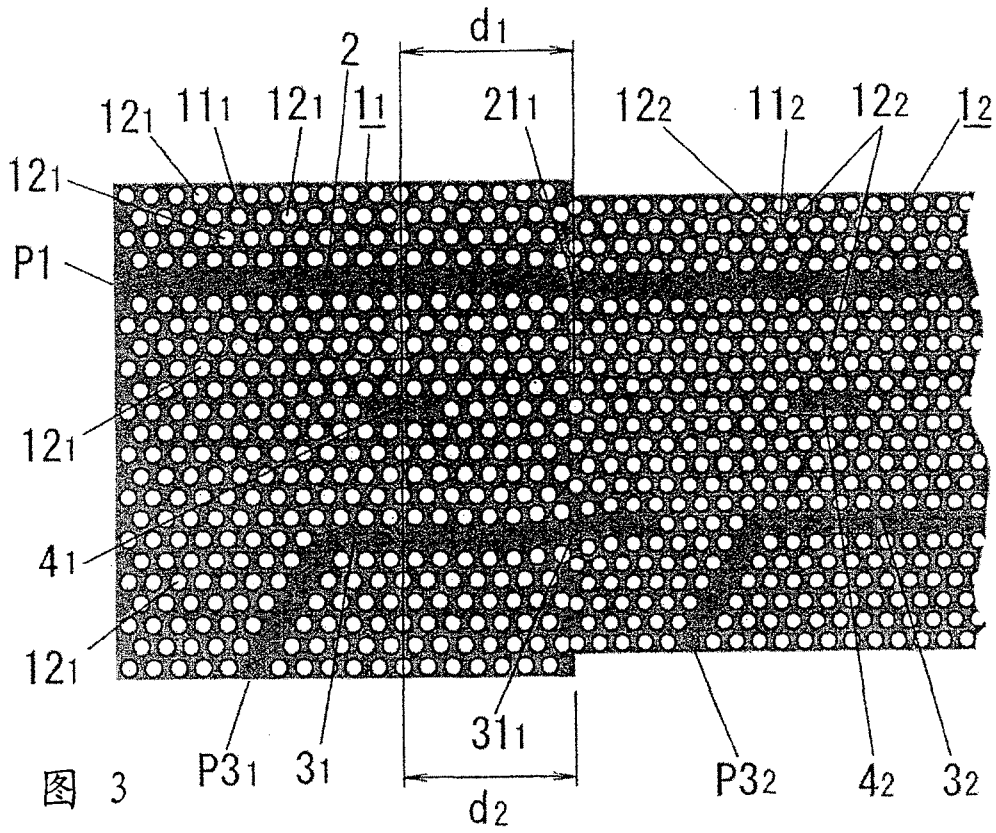


图 2



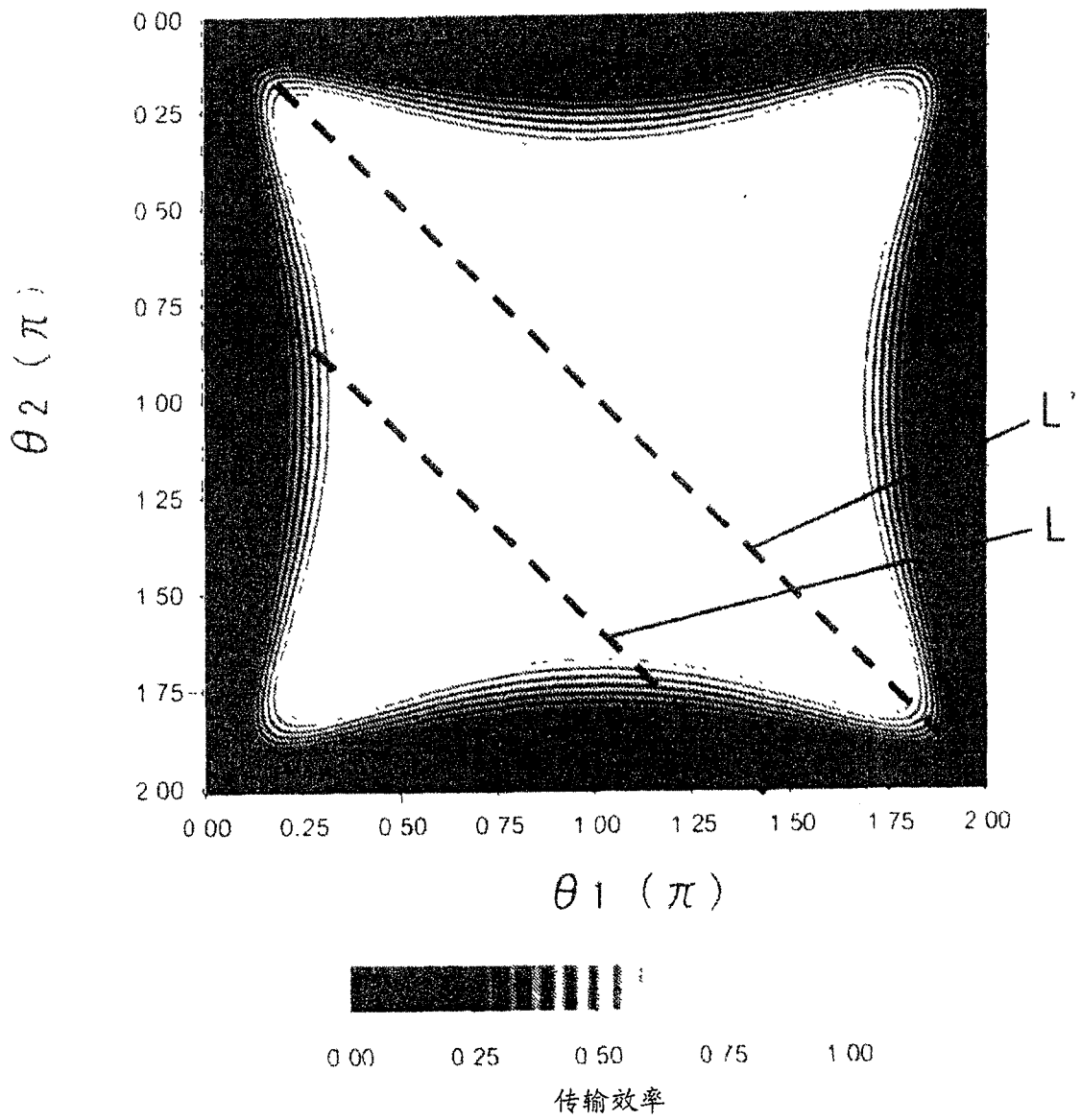
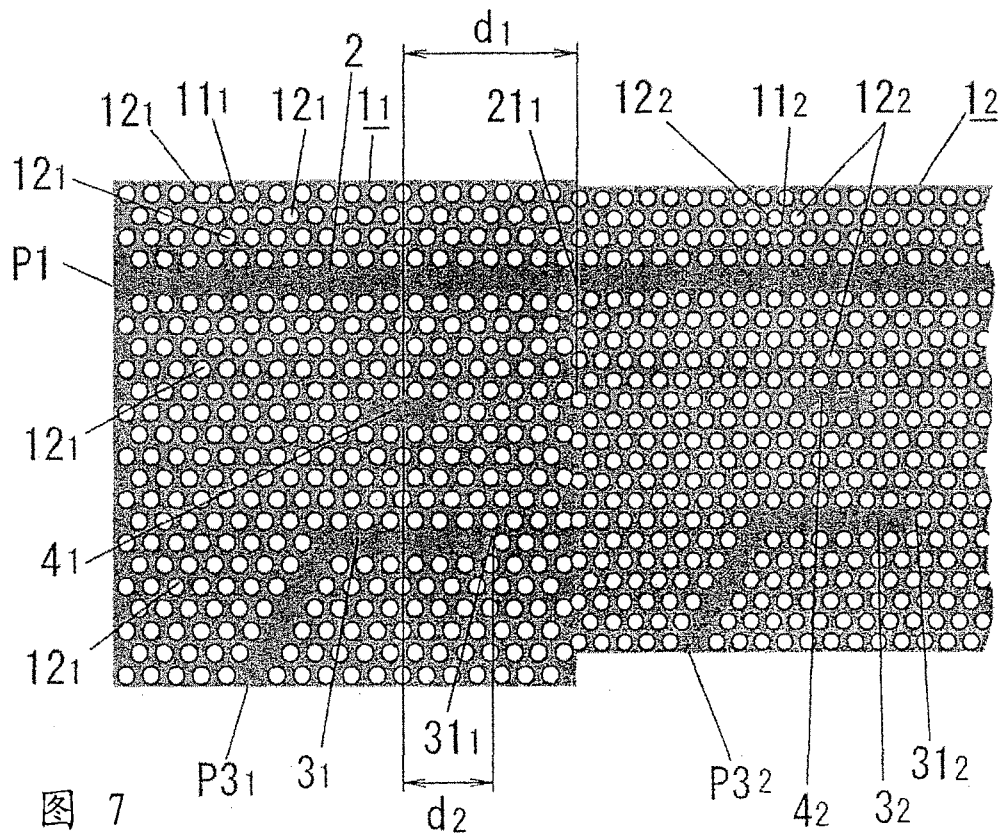
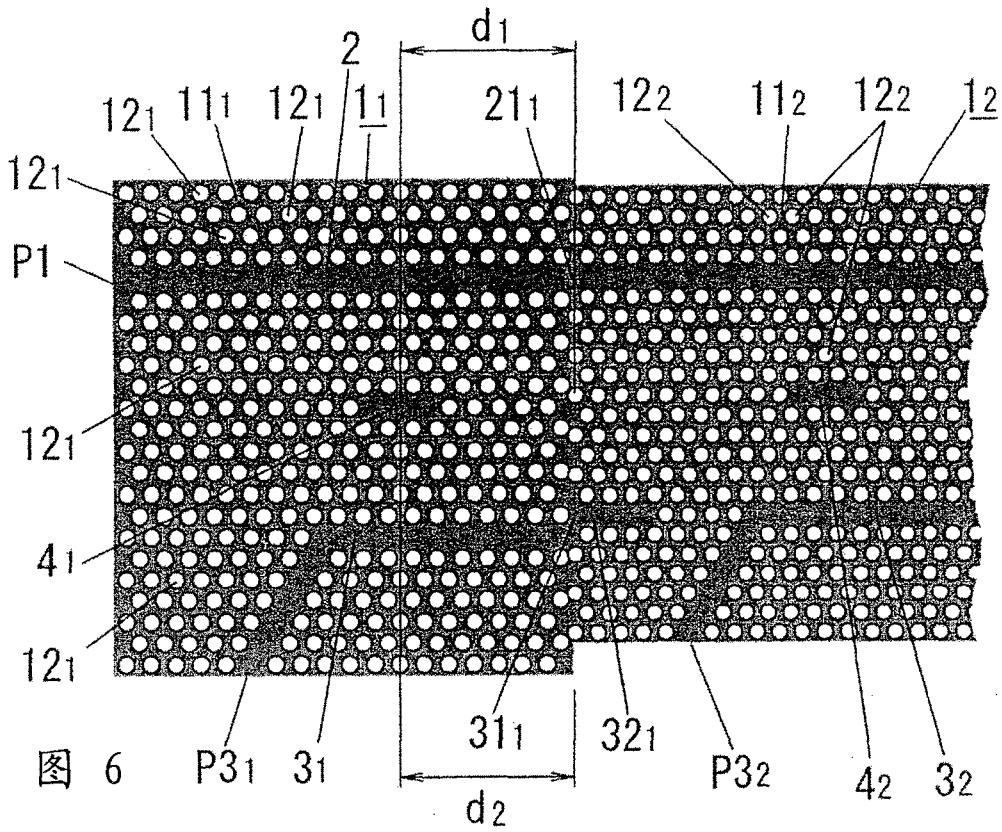


图 5



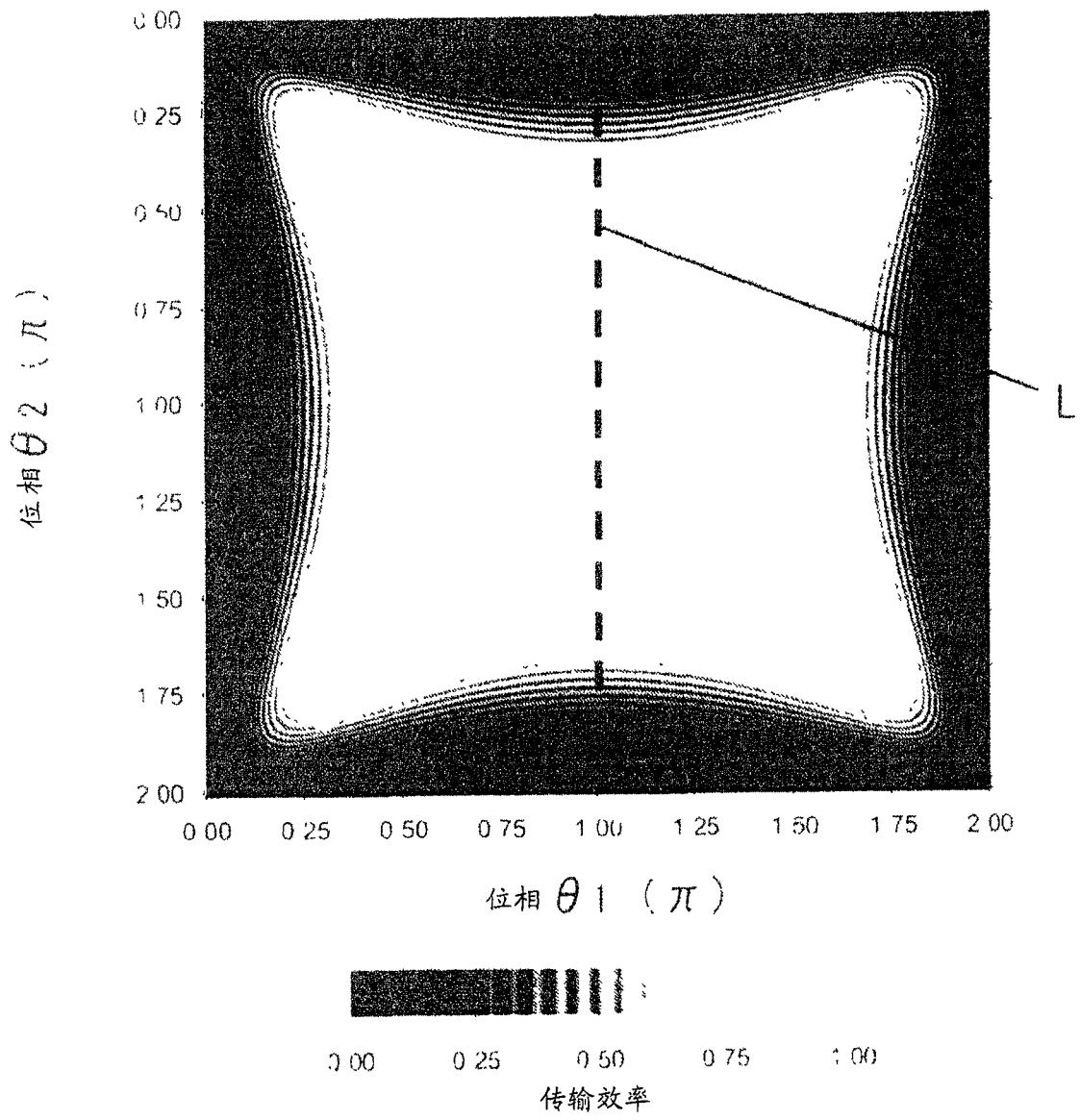


图 8

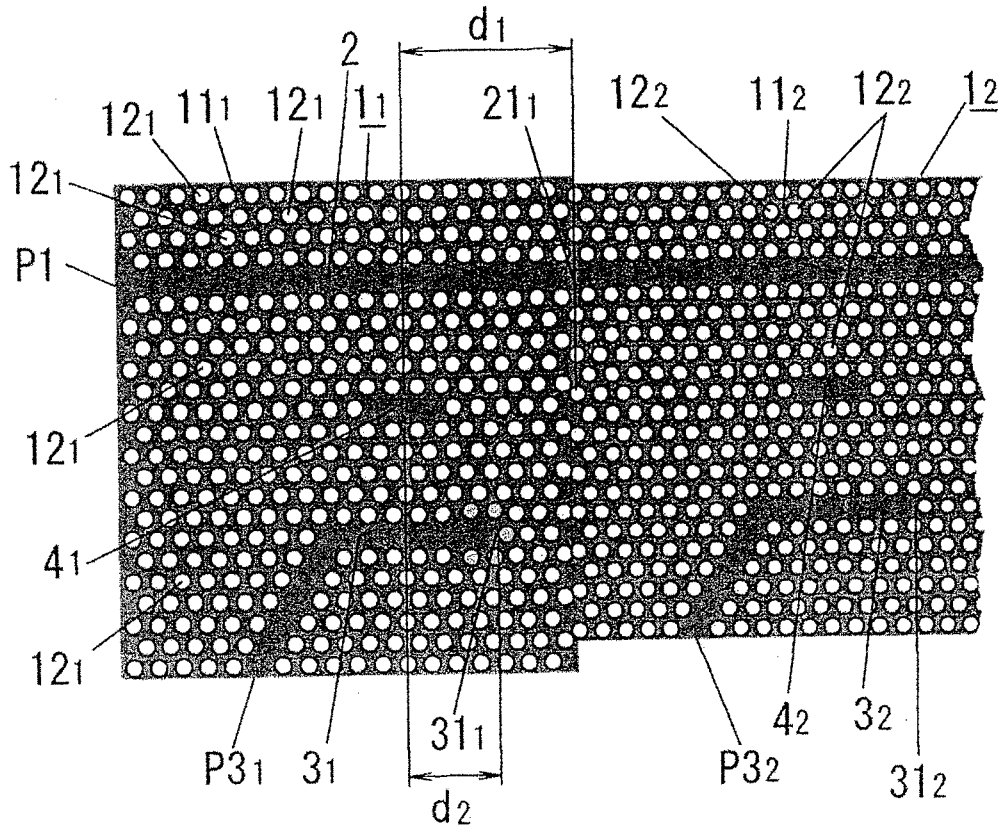


图 9A

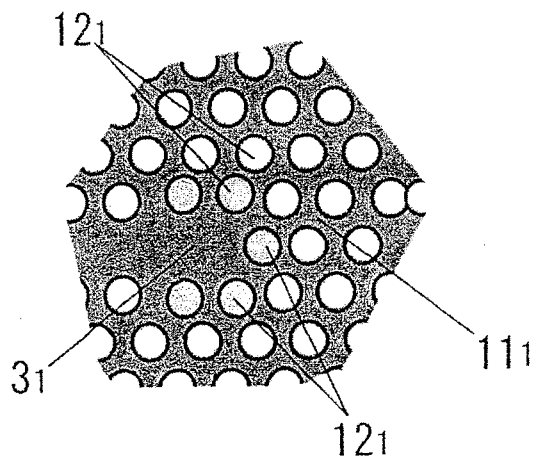


图 9B

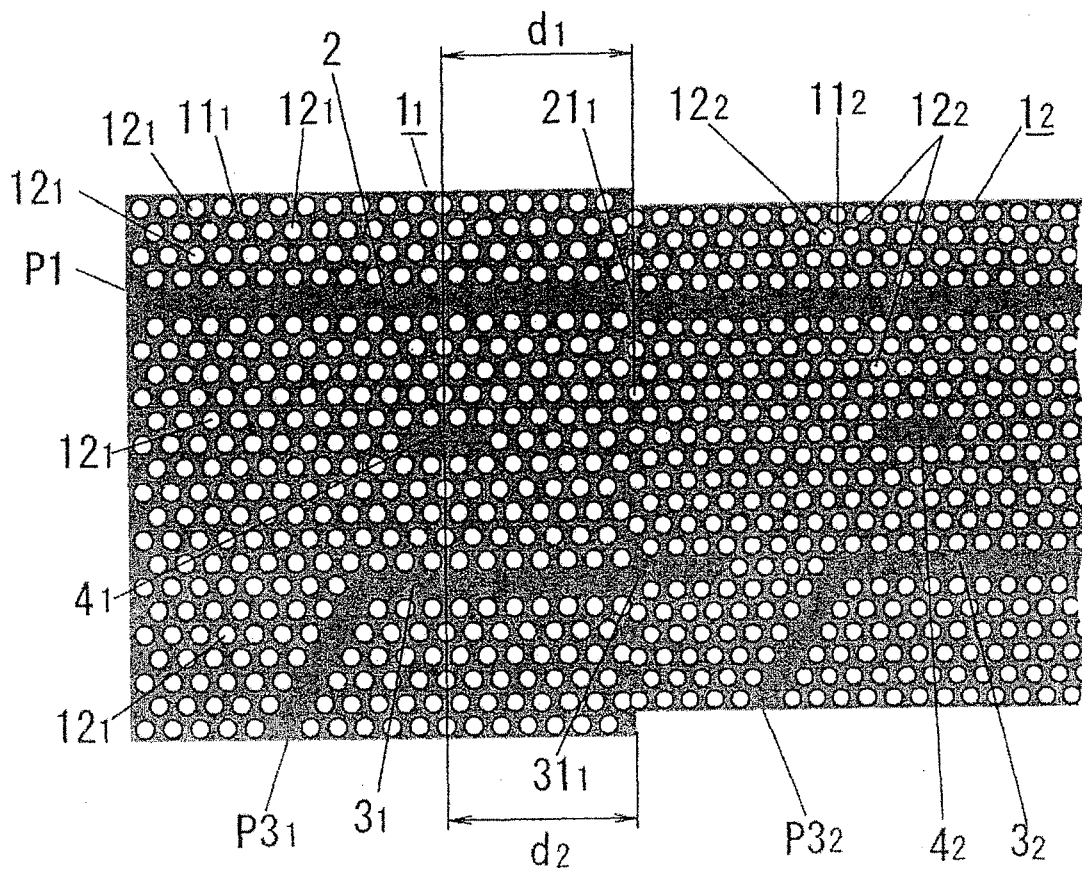


图 10

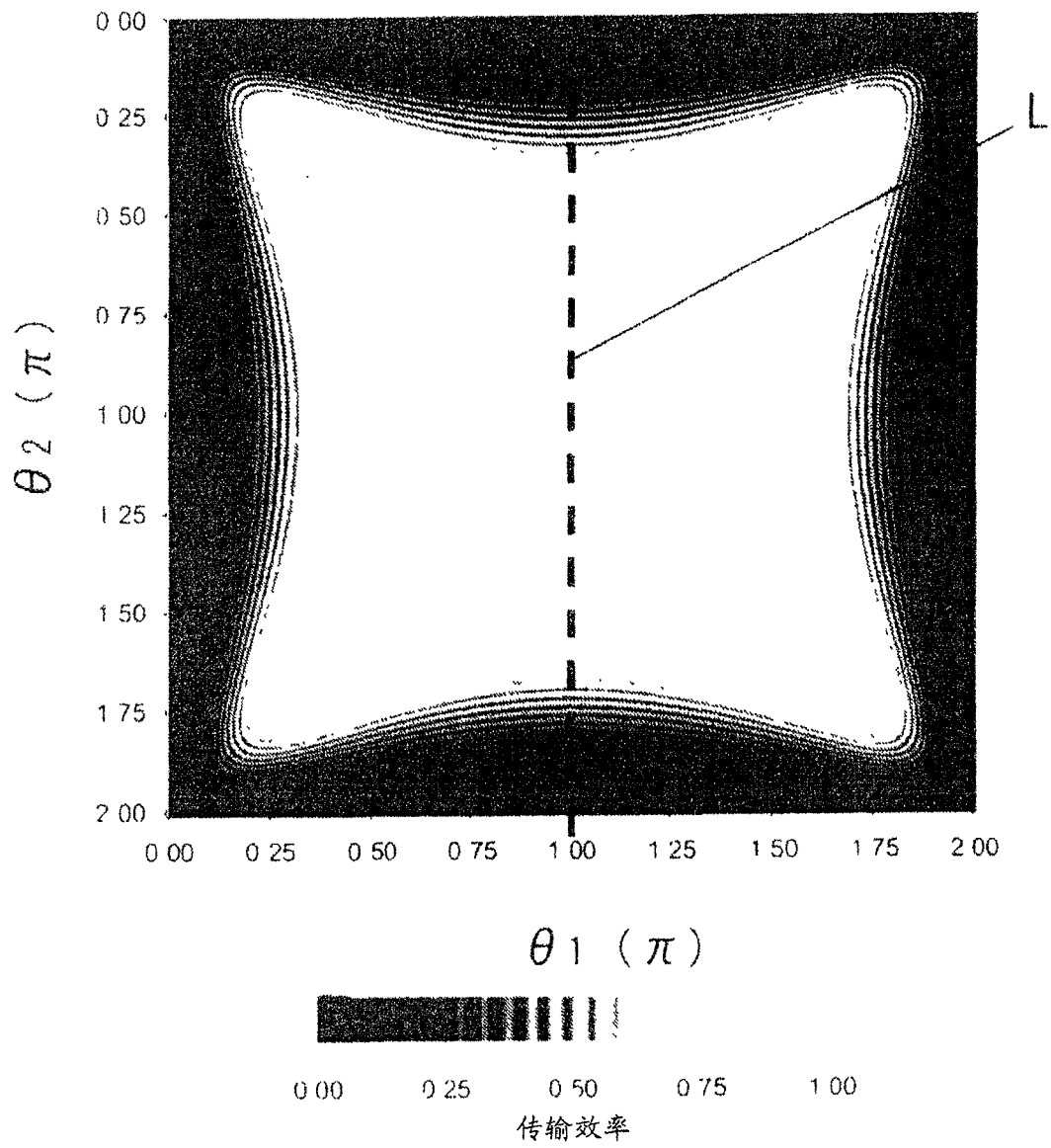


图 11

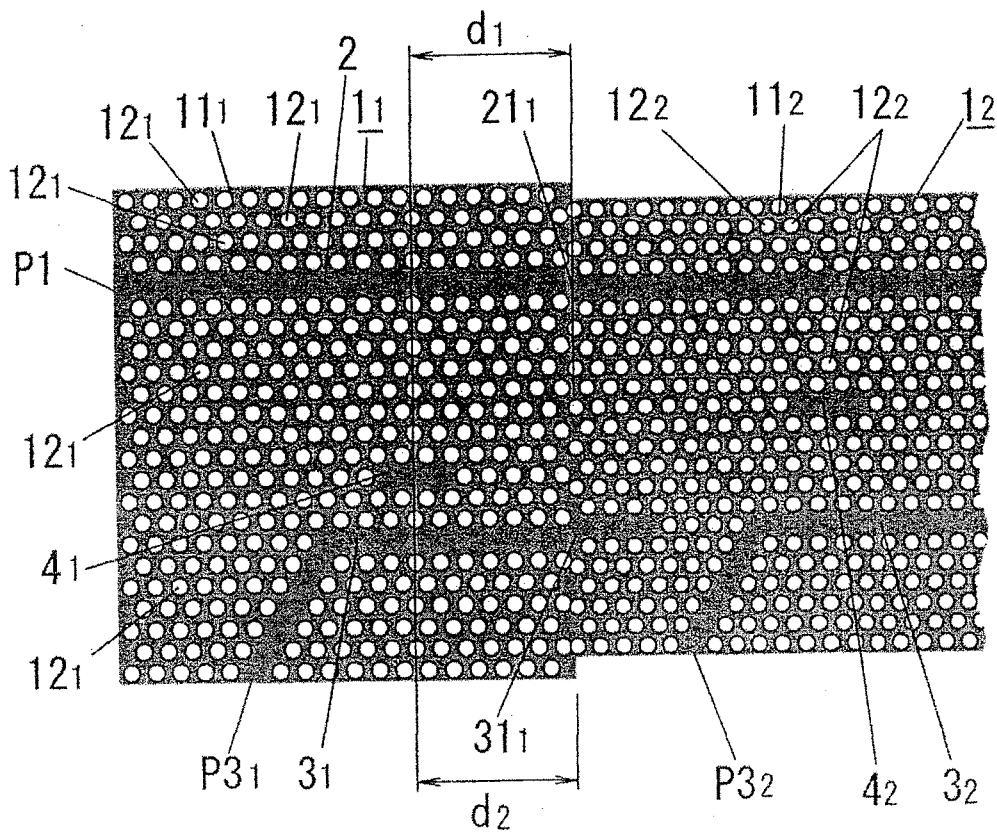


图 12

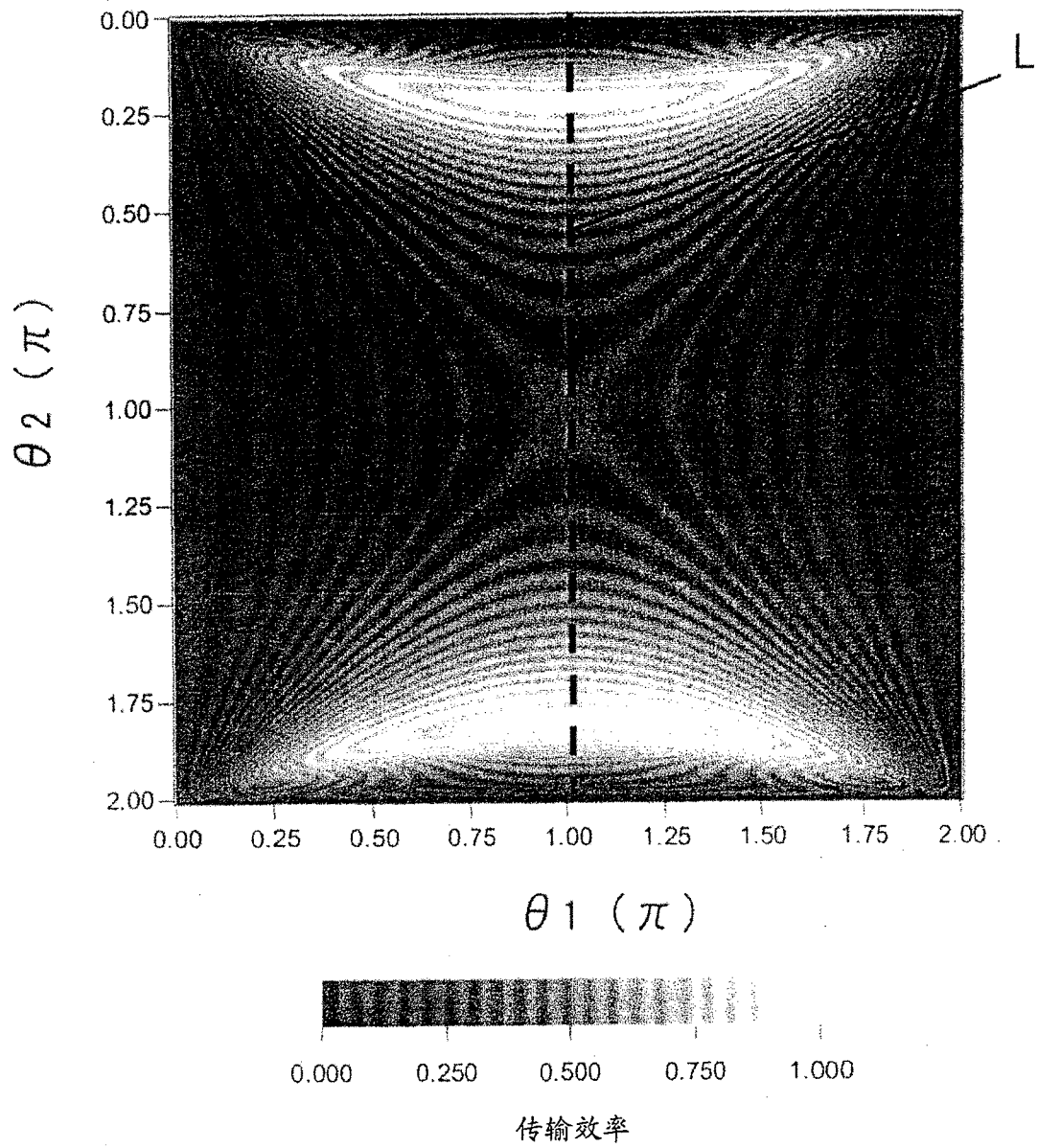


图 13

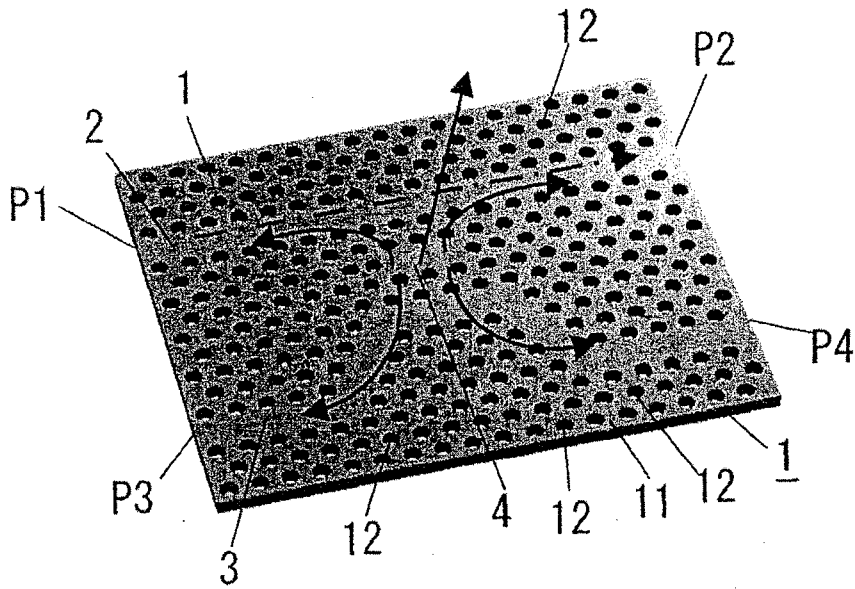


图 14A

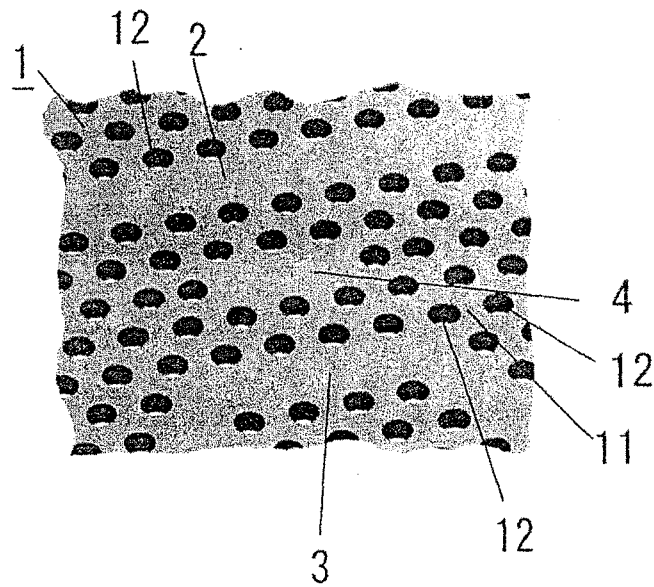


图 14B

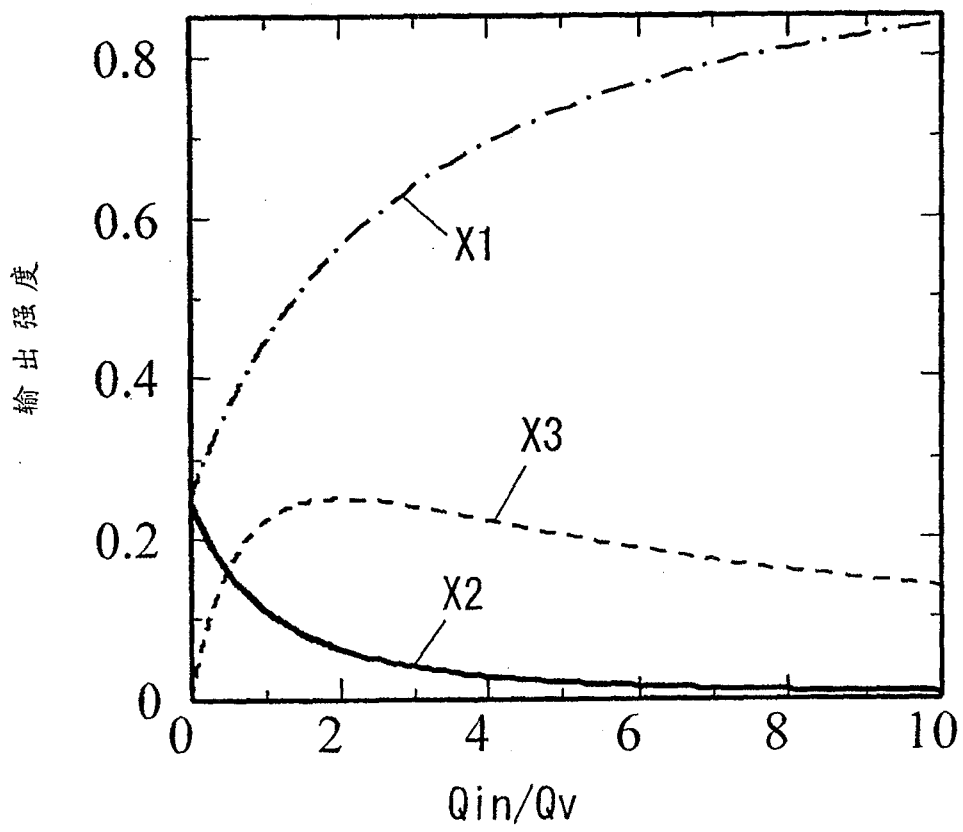


图 15