



SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ,
VC, VN, ZA, ZM, ZW。

HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO,
PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ,
CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE,
SN, TD, TG)。

- (84) **指定国** (除另有指明, 要求每一种可提供的地区
保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,
NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚
(AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT,
BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR,

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第 21 条(3))。

一种基于光子晶体波导的超高效紧凑十字型环行器, 它包括一个四个端口的十字交叉的光子晶体波导; 所述的十字交叉光子晶体波导中心放置一个方形磁光介质杆; 位于交叉波导中心的四个拐角处, 分别设置四个方形介质杆切角成为直角边与背景方形介质杆边长相同的等腰直角三角形以形成拐角介质杆; 所述拐角介质杆与其对应格点位置的左边重合或不重合; 所述环行器的插入损耗为 0.02dB~1dB, 其隔离端与输入端的隔离度大于 14dB。该环行器结构体积小, 集成度高, 电磁波传输效率高, 便于集成而且高效环行, 可广泛应用于微波、太赫兹和光通信波段。

基于光子晶体波导的超高效紧凑十字型环行器

技术领域

本发明涉及四端口十字型环行器领域，尤其涉及一种基于光子晶体技术的十字型环形行器。

背景技术

自从电磁学诞生以来，环行器以它独特的功能被广泛使用。环形器根据不同的用途可以应用于不同波段与器件。如当做隔离器使用时，可以通过屏蔽来自输出端的信号而使信号只能在一个方向上传播；而在雷达技术中，环形器可以将信号从发射器环行到天线、再从天线环行到接收器，而实现双工器的功能；在反射放大器中，环行器作为非互易器件可以将放大的输出信号与输入端分离。

近年来，随着光子晶体理论的提出，光子晶体波导被认为是可以高效传输电磁波的一种媒质。因此，光子晶体波导理论为探索高效率的微波集成电路和集成光路开拓了新的领域。在集成大量组件的微波器件和集成光路中，各个组件之间不可避免的会产生各种回波干扰而影响整个系统的功能。因此，将这些干扰最小化将是优化整个系统的首要任务。基于铁氧体材质的光子晶体波导环行器是一种非互易器件，它可以使波沿单一方向传播，而反向传播的波将被导入到另一波导。尽管目前已经设计出来的基于光子晶体波导的环行器相对于传统的磁光环行器来说，体积小了许多而且具有更好的性能，然而大部分设计都使用了多根磁光介质柱或耦合介质柱，并且与波前直接作用，因而结构还是相对复杂并且带宽相对较窄。

发明内容

本发明的目的是克服现有技术中的不足，提供一种基于光子晶体波导的超高效紧凑十字型环行器。

本发明的目的通过下述技术方案予以实现。

本发明的基于光子晶体波导的超高效紧凑十字型环行器包括一

个四个端口的十字交叉的光子晶体波导；所述的十字交叉光子晶体波导中心放置一个方形磁光介质杆；所述位于交叉波导中心的四个拐角处，分别设置四个方形介质杆切角成为直角边与背景方形介质杆边长相等的等腰直角三角形以形成拐角介质杆；所述拐角介质杆与其对应格点位置的左边重合或不重合；所述环行器的插入损耗为 0.02dB~1dB，其隔离端与输入端的隔离度大于 14dB。

所述光子晶体由高折射率介质杆在低折射率介质背景中周期排列而成，或由低折射率介质杆在高折射率介质背景中周期排列而成。

所述高折射率介质材料为硅、砷化镓、二氧化钛、氮化硅等折射率大于 2 的介质，低折射率介质材料为空气、真空、二氧化硅、冰晶石、橄榄油或折射率小于 1.6 的介质。

所述光子晶体波导的任意输入端输入的波沿顺时针或逆时针环行到相邻的与输入端波导 90 度正交的输出波导端口，电磁波的环行方向随外加磁场的方向而改变。

所述磁光介质杆为铁氧体材料。

所述磁光介质杆的横截面为方形、矩形、圆形、椭圆形、环行、五边形、六边形、任意多边形、任意闭合曲线。

所述四个拐角介质杆的横截面为三角形、半圆形、半椭圆形、半多边形、或由一直边和曲线形成的闭合图形。

所述光子晶体十字交叉波导的背景介质柱的横截面为三角形、圆形、半圆形、椭圆型、半椭圆形、多边形、或闭合曲线。

所述高折射率介质材料为硅，所述低折射率介质材料为空气，所述光子晶体由硅在空气背景周期排列而成，所述光子晶体中的硅介质柱半径为 $0.3a$ ，归一化频率为 0.4121、分离因子为 0.7792、磁光介质柱边长为 $0.2817a$ 、拐角介质柱中心距为 $1.2997a$ ，所述环行器的插入损耗为 0.02dB，其中 a 为光子晶体的晶格常数，分离因子为磁光介质的相对磁导率张量的第 1 行第 2 个量的绝对值与第 1 行第 1 个元素的值的比值，归一化频率为 $\omega a / 2\pi c$ ， ω 为圆频率， c 为真空中光速；所述高折射率介质材料为硅，所述低折射率介质材料为空气，所述光子晶体由硅在空气背景周期排列而成，所述光子晶体中的硅介质柱半径为 $0.3006a \sim 0.3045a$ ，归一化频率为 (0.4103~0.4138)、分离因子为 (0.7712~0.7906)、磁光介质柱边长为 ($0.2801a \sim 0.2815a$)、拐角介质

柱中心距为 $(1.3224a \sim 1.3365a)$ 或 $(1.2807a \sim 1.3122a)$, 所述环行器的插入损耗小于 0.05dB ; 所述环行器的高折射率介质材料为硅, 所述低折射率介质材料为空气, 所述光子晶体由硅在空气背景周期排列而成, 所述光子晶体中的硅介质柱半径为 $0.28a \sim 0.3344a$, 归一化频率为 $(0.4073 \sim 0.4160)$ 、分离因子为 $(0.7634 \sim 0.8056)$ 、磁光介质柱边长为 $(0.2745a \sim 0.2863a)$ 、拐角介质柱中心距为 $(1.2488a \sim 1.3852a)$, 所述环形器的插入损耗小于 0.2dB ; 所述高折射率介质材料为硅, 所述低折射率介质材料为空气, 所述光子晶体由硅在空气背景周期排列而成, 所述光子晶体中的硅介质柱半径为 $0.2693a \sim 0.3671a$, 归一化频率为 $(0.4043 \sim 0.4192)$ 、分离因子为 $(0.7558 \sim 0.8208)$ 、磁光介质柱边长为 $(0.2686a \sim 0.2885a)$ 、拐角介质柱中心距为 $(1.2304a \sim 1.4764a)$, 所述环形器的插入损耗小于 0.5dB ; 所述高折射率介质材料为硅, 所述低折射率介质材料为空气, 所述光子晶体由硅在空气背景周期排列而成, 所述光子晶体中的硅介质柱半径为 $0.2642a \sim 0.3818a$, 归一化频率为 $(0.4016 \sim 0.4235)$ 、分离因子为 $(0.7473 \sim 0.8316)$ 、磁光介质柱边长为 $(0.2639a \sim 0.2922a)$ 、拐角介质柱中心距为 $(1.2162a \sim 1.6971a)$, 所述环行器的插入损耗小于 1dB 。

本发明的基于光子晶体波导的超高效紧凑十字型环行器可广泛应用于微波、太赫兹和光通信波段。它与现有技术相比, 具有如下积极效果。

1. 结构体积小, 集成度高, 电磁波传输效率高, 适合大规模集成;
2. 本发明在短程通过一个铁氧体杆就可以实现信号的环行, 便于集成而且高效;
3. 本发明通过改变偏置场的极性, 即可使电磁波沿顺时针或逆时针环行;
4. 本发明在输出端口具有极低的插入损耗, 而在隔离端口具有非常高的隔离度;
5. 本发明原理在不考虑色散或色散可以忽略的情况下, 可以应用光子晶体可等比例缩放的特性, 通过等比例改变晶格常数的方法, 可以实现在不同波段电磁波环行的功能。

附图说明

图 1 为本发明的基于光子晶体波导的超高效紧凑十字型环行器的结构示意图及本发明采用的坐标系。

图 2 为本发明的方形介质柱光子晶体的光子带隙图和优化最大光子带隙对应的 TE 带结构图。

图 2 (a) 为带隙与背景介质柱边长 s_b 的关系图, 在背景介质柱边长为 $s_b = 0.3a$ 的情况下, 具有相对禁带比为 36% 的禁带。

图 2 (b) 为 $s_b = 0.3a$ 的情况下的带结构图。

图 3 为本发明中的线缺陷光子晶体 (即光子晶体波导) 的带结构图, 在禁带中间存在一个传导模。而图 3 中所标的线性色散区间, 是通过条件 $d\omega/dk < (d\omega/dk \text{ 的峰值的 } 20\%)$ 来选取的。

图 4 (a) 为本发明的铁氧体杆在无偏置磁场情况下, 即铁氧体杆未磁化情况下的奇模谐振模场分布的强度等色度二维图, 其中各点的颜色代表各点的电场强度。

图 4 (b) 为本发明的铁氧体杆未磁化情况下的偶模谐振模场分布的强度等色度二维图, 其中各点的颜色代表各点的电场强度。

图 5 为本发明的铁氧体杆在有偏置磁场情况下, 即铁氧体杆被磁化情况下的谐振模场分布图 (电场强度等色度二维图, 其中各点的颜色代表各点的电场强度)。

图 5 (a) 为在铁氧体杆被磁化情况下, 系统中谐振模场的漩涡状分布图。

图 5 (b) 为图 5 (a) 中心区域的放大图。

图 6 为本发明的铁氧体杆被磁化情况下的谐振模场能流分布图。

图 6 (a) 为能流分布的强度等色度二维图, 其中各点的颜色代表各点的能流强度值。

图 6 (b) 为能流场分布的强度高等色度三维图, 其中各点的颜色代表各点的能流强度值, 各点的高度表示各点的能流强度。

图 7 为本发明基于光子晶体波导的超高效紧凑十字型环行器中心区域的结构示意图。

图 8 为本发明基于光子晶体波导的超高效紧凑十字型环行器的插入损耗和隔离度随频率变化的特性, 图中只给出了插入损耗为在 0.2dB 以下的频率区间内的特性。

图 9 为本发明基于光子晶体波导的超高效紧凑十字型环形器的场分布与能流分布模拟结果。

图 9 (a) 为场分布的强度等色度二维图, 显示电磁波电场无任何损耗地高效环行, 其中各点的颜色代表各点的电场强度值。

图 9 (b) 为能流分布的强度等色度二维图, 显示能量几乎全部被环行到 P2 端口, 其中各点的颜色代表各点的能流强度值。

图 10 (a)、图 10 (b)、图 10 (c)、图 10 (d) 为电磁波分别从本发明的十字型环形器的四个端口输入时的电场分布的强度等色度二维图, 其中各点的颜色代表各点的电场强度值。

图 11 (a) 为一个实施结构例, 其中圆柱形背景介质柱拐角施加有四个三角柱;

图 11 (b) 为一个实施结构例, 其中圆柱形背景介质柱拐角施加有四个半圆形柱;

图 11 (c) 为一个实施结构例, 其中六角形背景介质柱拐角施加有四个半六角形柱;

图 11 (d) 为一个实施结构例, 其中六角形背景介质柱拐角施加有四个三角形柱;

图 11 (e) 为一个实施结构例, 其中六角形背景介质柱拐角施加有四个半圆形柱。

具体实施方式

如图 1 所示, 本发明的基于光子晶体波导的超高效紧凑十字型环形器包括一个四个端口的十字交叉的光子晶体波导; 在一个十字交叉的光子晶体波导中心位置放置一个方形磁光介质杆; 磁光介质杆采用铁氧体或磁光介质材料; 所述磁光介质杆的横截面采用方形、矩形、圆形、椭圆形、环行、五边形、六边形、任意多边形、任意闭合曲线; 同时在 T 字交叉波导中心的四个角落分别设置四个拐角杆, 将四个方形介质杆切角成为直角边与其他方形杆 (背景方形介质杆) 边长相同的等腰直角三角形以形成拐角介质杆; 四个拐角介质杆的横截面采用三角形、半圆形、半椭圆形、半多边形、或由一直边和曲线形成的闭合图形, 拐角介质杆与其对应格点位置的左边重合或不重合; 光子晶体十字交叉波导的背景介质柱的横截面采用三角形、圆形、半圆形、

椭圆型、半椭圆形、多边形、或闭合曲线；所述光子晶体由高折射率介质和低折射率介质交替排列布置而成，光子晶体由高折射率介质杆在低折射率介质背景中排列形成的结构和由低折射率介质杆在高折射率介质背景中排列形成的结构。光子晶体波导的任意输入端输入的波沿顺时针或逆时针环行到相邻的与输入端波导 90 度正交的输出波导端口，电磁波的环行方向随外加磁场的方向而改变。

图 1 中所示，从端口 1 (P1) 端口入射的电磁波信号将被高效低耗地环行到端口 2 (P2) 端口中去；同样，P2 至 端口 3 (P3)、P3 至端口 4 (P4)、P4 至 P1 都可以实现同样的环行效果。本说明中的坐标系如图 1 中所示。

首先，我们选择以正方晶格分布的方形介质杆阵列作为背景光子晶体。其中 a 为晶格常数，高折射率介质杆的材质采用硅 (Silicon)，其在微波波段的折射率可以认为是 3.4，低折射率介质为空气。为了得到最宽的光子晶体完全禁带，可以设置一个以介质杆边长为自变量的频率扫描序列，来研究边长变化随禁带的分布情况。如图 2 (a) 中所示，通过使用有限元方法 (Finite Element Method, 缩写为 FEM) 方法并计算场中的特征频率，可以得到在背景介质柱边长为 $s_b = 0.3a$ 的情况下，具有相对禁带比为 36% 的禁带。针对这个禁带，图 2 (b) 中详细的带结构图。

在微波集成电路和光集成器件中，避免不同频率引起的群速度不同是至关重要的，直接影响着信号的质量。为了最小化不同频率信号造成的群速色散，找出 $d^2\omega/dk^2 = 0$ 的区间是必要的。在光子晶体线缺陷波导中，带结构的投射图如图 3 中所示，在禁带中间存在一个传导模。图 3 所展示的即为此导模上的线性区间，此线性区间是通过取 $d\omega/dk$ 的峰值的 20% 来界定的。本说明中所计算出的此线性区间的归一化频率范围为：

$$f = (2\pi c)^{-1} \omega a = a / \lambda = 0.3748 \sim 0.4511$$

(1)

在本说明以下阐述的实施过程中，都以此频率范围为基础进行研究。

如图 1 中所示，本发明中的铁氧体按 z 轴方向偏置，在此情况下，相对磁导率张量为：

$$[\mu] = \begin{bmatrix} \mu & j\kappa & 0 \\ -j\kappa & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \mu \begin{bmatrix} 1 & -jp & 0 \\ jp & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/\mu \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中 p 为归一化磁化率或分离因子:

$$p = \frac{\kappa}{\mu} \quad (3)$$

当 κ/μ 增加时, 根据偏置磁场方向的不同, 会产生两个不同的谐振频率 ω_n^+ 和 ω_n^- , 其中一个沿顺时针方向 $e^{jn\phi}$ 传播, 一个是按逆时针方向 $e^{-jn\phi}$ 传播, 这也是 p 被称作分离因子的原因。对于一个被 p 磁化的电磁场, 麦克斯韦方程组可以表示为:

$$\nabla \times \dot{\vec{E}} = -j\omega\mu_0 [\mu] \dot{\vec{H}} \quad (4)$$

$$\nabla \times \dot{\vec{H}} = j\omega\varepsilon_0 \varepsilon \dot{\vec{E}} \quad (5)$$

$$\nabla \cdot (\varepsilon \dot{\vec{E}}) = 0 \quad (6)$$

$$\nabla \cdot ([\mu] \dot{\vec{H}}) = 0 \quad (7)$$

由式 (4) - (7) 可以得到如下方程:

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial y^2} + k^2 E_z = 0 \quad (8)$$

其中 $k^2 = \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon (\mu^2 - \kappa^2) / \mu = \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon \mu_e$ 为有效波数的平方, $\varepsilon = 12.9$ 是铁氧体材料的相对介电常数, $\mu_e = (\mu^2 - \kappa^2) / \mu$ 是有效相对磁导率, ε_0 和 μ_0 为真空中的介电常数和磁导率。如果铁氧体没有被磁化, 即外加磁场为 0, 此时 $\kappa = 0$, $\mu_e = \mu$ 。通过使用 FEM 法计算式(8)中的场, 可以得到如图 4 中所示的铁氧体处于非磁化状态下的两个谐振模式。其中图 4 (a) 和图 4 (b) 分别是奇模和偶模。当在系统中引入偏置场后, 磁导率变为上面所述的张量形式, 铁氧体处于磁化状态。当分裂系数为 0.77 时, 可以观察到明显的旋磁效应, 如图 5 (a) 所展示的电场在磁光介质处于磁化状态下呈现漩涡状分布。而在放大的图 5 (b) 中, 可以明显看到这种由铁氧体磁化时, 谐振场呈现太极状分布。根据电场可以计算出坡印廷矢量或能流分布:

$$\langle \vec{S} \rangle = (c^2 / 8\pi\omega) \cdot \text{Im}(\vec{E}_z^* \nabla_{\perp} \vec{E}_z) \quad (9)$$

其中 $\vec{E}_z$ 为 $E_z(x, y) = \rho(x, y)e^{i\varphi(x, y)}$, ρ 和 φ 是幅值与相位, *号为复数共轭符号。由式 9 可以计算出能流分布图, 如图 6 所示。由于涡旋场中心点的电场为 0, 其能流密度也为 0。

本发明在中心区域的结构分布如图 7 中所示, 边长为 s_b 方形介质柱以晶格常数 a 分布于整个器件的背景, 并通过删除一行和一系列介质柱而形成互相垂直的十字波导, 波导的宽度为: $(2a - s_b)$ 。同时, 对位于交叉中心四个角落处的方形杆进行切角操作, 使其成为如图 7 中所示的直角边长仍为 s_b 的等腰直角三角形。另外, 这四个三角形相对于交叉波导中心点有一个可以变动的距离 d_c , 通过改变这个距离, 可以

优化光在拐弯处的传输效果。最后，设定位于波导中心处的方形铁氧体的边长为 s_m 。由于在中心区域的电磁波耦合效应是非常复杂的，因此我们定义受铁氧体、三角形杆和波导影响的电场分布因子分别为 $\Psi_m(\vec{r}, \omega, p, s_m)$ 、 $\Psi_{tr}(\vec{r}, \omega, d_c)$ 、 $\Psi_w(\vec{r}, \omega)$ 。同样地，对于磁场我们定义 $\Phi_m(\vec{r}, \omega, p, s_m)$ 、 $\Phi_{tr}(\vec{r}, \omega, d_c)$ 、 $\Phi_w(\vec{r}, \omega)$ 。这样，整个系统的电场和磁场分布可以写成：

$$\vec{E} = \Psi_m \Psi_{tr} \Psi_w e^{-jk\vec{r}} \quad (10)$$

$$\vec{H} = \Phi_m \Phi_{tr} \Phi_w e^{-jk\vec{r}} \quad (11)$$

为简洁起见，同时因为本说明中的十字环形器相对于中心是 90° 对称的，我们在这里先只研究电磁波信号从 P1 输入，环行到 P2 输出而同时隔离 P3、P4 的情况，从其他端口输入的情况应与目前这种情况是完全相同的。通过引入 Nelder-Mead 优化方法，来设置所需要考察的目标函数。设基于能流分布的目标函数有以下形式：

$$f_{opt}(\omega, p, s_m, d_c) = \frac{\iint_{P3} \vec{E} \times \vec{H} ds + \iint_{P4} \vec{E} \times \vec{H} ds}{\iint_{P2} \vec{E} \times \vec{H} ds} \quad (12)$$

其中 f_{opt} 是由 ω , p , s_m 和 d_c 控制的多元函数。显而易见， f_{opt} 的值越小，整个系统的环行效果越好。通过计算我们可以找到这个 f_{opt} 的最小值，详细如下：

$$f_{\text{opt}}|_{\min} (f = 0.4121, p = 0.7792, s_m = 0.2817a, d_c = 1.2997a) \\ = 3.8489e^{-5}.$$

(13)

插入损耗和隔离度是考察一个环行器性能的重要指标，对于从 P1 入射的情况，它们的定义如下：

$$\text{Insertion Loss}_{P1-P2} = 10\log_{10}(P_1 / P_2)$$

(14)

$$\text{Isolation}_{P1-P3} = 10\log_{10}(P_1 / P_3)$$

(15)

$$\text{Isolation}_{P1-P4} = 10\log_{10}(P_1 / P_4)$$

(16)

其中 P_1, P_2, P_3 和 P_4 是各个端口处的均时功率流。我们设定范围为方程(1) 的频率 f 为自变量，来考察上述插入损耗与隔离度。

由于本发明是获得一个高性能的四端口环行器，因此一般将插入损耗为 0.2dB 的频率区间为工作区间，图 8 为通过计算得出的本发明的十字型环形器的插入损耗和隔离度在该频率区间内随频率变化的特性。如图 8 中所示，我们可以看到所有的隔离度都大于 14dB。另外，当工作频率为 0.4121，即与方程(13)一致时，可以获得一个插入损耗为 0.02dB 的最小值，同时对应 P3、P4 端口的隔离度的最大值分别为 46dB 与 48dB。

采用光子晶体介质柱半径为 $0.3a$ 、归一化频率为 0.4121、分离因子为 0.7792、磁光介质柱边长为 $0.2817a$ 、拐角介质柱中心距为 $1.2997a$ ，可得到如图 9 中所描述的结果。从图 9 (a) 中可以观察到，从 P1 入射的电磁波电场几乎没有任何损耗地环行到 P2 端口；从图 9 (b) 中可以观察到，由于电磁波被高效地环行，能流自然而然非常好地被环行到 P2 端口。因此，整个器件可以实现如图 10 所示的效果。图 10 (a)、图 10 (b)、图 10 (c)、图 10 (d) 为电磁波分别从本发明的十字型环形器的四个端口输入时的电场分布的强度等色度二维

图, 它显示了波在环形器中的环行效果。可见本发明是一种基于光子晶体波导的超高效紧凑十字型环形器。

如图 11 所示本发明基于光子晶体波导的超高效紧凑十字型环形器通过在不同形状介质柱构成的光子晶体波导的四个角落处施加形状不同、目的相同的其它形状柱子的环形器实例。

实施方案 1:

采用光子晶体介质柱半径为 $0.3a$ 、归一化频率为 0.4121 、分离因子为 0.7792 、磁光介质柱边长为 $0.2817a$ 、拐角介质柱中心距为 $1.2997a$, 所述环形器的插入损耗为 0.02dB 。

实施方案 2:

采用光子晶体介质柱半径为 $0.3a$ 、分离因子为 0.7792 、磁光介质柱边长为 $0.2817a$ 、拐角介质柱中心距为 $1.2997a$, 归一化频率分别取为 0.4138 、 0.4160 、 0.4192 和 0.4235 , 则环形器的插损分别为 0.05dB 、 0.2dB 、 0.5dB 和 1dB 。

实施方案 3:

采用归一化频率为 0.4121 、光子晶体介质柱半径为 $0.3a$ 、磁光介质柱边长为 $0.2817a$ 、拐角介质柱中心距为 $1.2997a$, 分离因子分别取 0.7906 、 0.8056 、 0.8208 和 0.8316 , 则环形器的插损分别为 0.05dB 、 0.2dB 、 0.5dB 和 1dB 。

实施方案 4:

采用归一化频率为 0.4121 、光子晶体介质柱半径为 $0.3a$ 、分离因子为 0.7792 、拐角介质柱中心距为 $1.2997a$, 磁光介质柱边长分别取 $0.2815a$ 、 $0.2863a$ 、 $0.2885a$ 和 $0.2922a$, 则环形器的插损分别为 0.05dB 、 0.2dB 、 0.5dB 和 1dB 。

实施方案 5:

采用归一化频率为 0.4121 、光子晶体介质柱半径为 $0.3a$ 、分离因子为 0.7792 、磁光介质柱边长为 $0.2817a$, 拐角介质柱中心距 d_c

分别取为 1.3365a、1.3852a、1.4764a 和 1.6971a，则环行器的插损分别为 0.05dB、0.2dB、0.5dB 和 1dB。

实施方案 6:

通过在不同形状介质柱构成的光子晶体波导的四个角落处施加形状不同、目的相同的介质柱，都可以实现与之前实例相同的环行功能。如图 11 (a)，所示，在圆柱形背景介质柱角落施加四个三角柱，并在中心处放置相应材质的铁氧体，通过控制如上述实例所述的工作频率 f ，分离系数 p ，铁氧体边长 s_m ，四个拐角三角柱中心距离 d_c 来实现高性能环行的功能。根据考察与上述参数相关的插入损耗曲线，来设定如 0.05dB、0.2dB、0.5dB、1dB 等不同的工作区间。

实施方案 7:

如图 11 (b)，所示，在圆柱形背景介质柱角落施加四个半圆柱，并在中心处放置相应材质的铁氧体，通过控制如上述实例所述的工作频率 f ，分离系数 p ，铁氧体边长 s_m ，四个拐角半圆柱中心距离 d_c 来实现高性能环行的功能。根据考察与上述参数相关的插入损耗曲线，来设定如 0.05dB、0.2dB、0.5dB、1dB 等不同的工作区间。

实施方案 8:

如图 11 (c)，所示，在六角形背景介质柱角落施加四个半六角形柱，并在中心处放置相应材质的铁氧体，通过控制如上述实例所述的工作频率 f ，分离系数 p ，铁氧体边长 s_m ，四个拐角半六角形柱中心距离 d_c 来实现高性能环行的功能。根据考察与上述参数相关的插入损耗曲线，来设定如 0.05dB、0.2dB、0.5dB、1dB 等不同的工作区间。

实施方案 9:

如图 11 (d)，所示，在六角形背景介质柱角落施加四个三角形柱，并在中心处放置相应材质的铁氧体，通过控制如上述实例所述的工作频率 f ，分离系数 p ，铁氧体边长 s_m ，四个拐角三角形柱中心距离 d_c 来实现高性能环行的功能。根据考察与上述参数相关的插入损

耗曲线，来设定如 0.05dB、0.2dB、0.5dB、1dB 等不同的工作区间。

实施方案 10:

如图 11 (e)，所示，在六角形背景介质柱角落施加四个半圆形柱，并在中心处放置相应材质的铁氧体，通过控制如上述实例所述的工作频率 f ，分离系数 p ，铁氧体边长 s_m ，四个拐角半圆形柱中心距离 d_c 来实现高性能环行的功能。根据考察与上述参数相关的插入损耗曲线，来设定如 0.05dB、0.2dB、0.5dB、1dB 等不同的工作区间。

由于本发明所提供的配置方法是基于归一化频率的，因此对于不同的波段，可以通过公式

$$f = \frac{\omega a}{2\pi c} = \frac{a}{\lambda} \quad (17)$$

来设计在相应的频率下符合要求的光子晶体波导的超高效超紧凑十字型环形器。

以上所述本发明在具体实施方式及应用范围均有改进之处，不应理解为对本发明限制。

权利要求书

1. 一种基于光子晶体波导的超高效紧凑十字型环行器，其特征在于：其包括一个四个端口的十字交叉的光子晶体波导；所述的十字交叉光子晶体波导中心放置一个方形磁光介质杆；所述位于交叉波导中心的四个拐角处，分别设置四个方形介质杆切角成为直角边与背景方形介质杆边长相同的等腰直角三角形以形成拐角介质杆；所述拐角介质杆与其对应格点位置的左边重合或不重合；所述环行器的插入损耗为 0.02dB~1dB，其隔离端与输入端的隔离度大于 14dB。

2. 按照权利要求 1 所述的基于光子晶体波导的超高效紧凑十字型环行器，其特征在于：所述光子晶体由高折射率介质杆在低折射率介质背景周期排列而成，或由低折射率介质杆在高折射率介质背景中周期排列而成。

3. 按照权利要求 2 所述的基于光子晶体波导的超高效紧凑十字型环行器，其特征在于：所述高折射率介质材料为硅、砷化镓、二氧化钛、氮化硅或折射率大于 2 的介质，低折射率介质材料为空气、真空、二氧化硅、冰晶石、橄榄油或折射率小于 1.6 的介质。

4. 按照权利要求 1 所述的基于光子晶体波导的超高效紧凑十字型环行器，其特征在于：所述光子晶体波导的任意输入端输入的波沿顺时针或逆时针环行到相邻的与输入端波导 90 度正交的输出波导端口，波的环行方向随外加磁场的方向而改变。

5. 按照权利要求 1 所述的基于光子晶体波导的超高效紧凑十字型环行器，其特征在于：所述磁光介质杆为铁氧体材料。

6. 按照权利要求 1 或 7 所述的基于光子晶体波导的超高效紧凑十字型环行器，其特征在于：所述磁光介质杆的横截面为方形、矩形、圆形、椭圆形、环行、五边形、六边形、任意多边形、任意闭合曲线。

7. 按照权利要求 1 所述的基于光子晶体波导的超高效紧凑十字型环行器，其特征在于：所述四个拐角介质杆的横截面为三角形、半圆形、半椭圆形、半多边形、或由一直边和曲线形成的闭合图形。

8. 按照权利要求 1 所述的基于光子晶体波导的超高效紧凑十字型环行器，其特征在于：所述光子晶体十字交叉波导的背景介质柱的横截面为三角形、圆形、半圆形、椭圆型、半椭圆形、多边形、或闭合曲线。

9. 按照权利要求 3 所述的基于光子晶体波导的超高效紧凑十字型环行器, 其特征在于: 所述高折射率介质材料为硅, 所述低折射率介质材料为空气, 所述光子晶体由硅在空气背景周期排列而成, 所述光子晶体中的硅介质柱半径为 $0.3a$, 归一化频率为 0.4121 、分离因子为 0.7792 、磁光介质柱边长为 $0.2817a$ 、拐角介质柱中心距为 $1.2997a$, 所述环行器的插入损耗为 0.02dB , 其中 a 为光子晶体的晶格常数, 分离因子为磁光介质的磁导率张量的第 1 行第 2 个量的绝对值与第 1 行第 1 个元素的值比值, 归一化频率为 $\omega a / 2\pi c$, ω 为圆频率, c 为真空中光速;

所述高折射率介质材料为硅, 所述低折射率介质材料为空气, 所述光子晶体由硅在空气背景周期排列而成, 所述光子晶体中的硅介质柱半径为 $0.3006a \sim 0.3045a$, 归一化频率为 $(0.4103 \sim 0.4138)$ 、分离因子为 $(0.7712 \sim 0.7906)$ 、磁光介质柱边长为 $(0.2801a \sim 0.2815a)$ 、拐角介质柱中心距为 $(1.3224a \sim 1.3365a)$ 或 $(1.2807a \sim 1.3122a)$, 所述环行器的插入损耗小于 0.05dB ;

所述高折射率介质材料为硅, 所述低折射率介质材料为空气, 所述光子晶体由硅在空气背景周期排列而成, 所述光子晶体中的硅介质柱半径为 $0.28a \sim 0.3344a$, 归一化频率为 $(0.4073 \sim 0.4160)$ 、分离因子为 $(0.7634 \sim 0.8056)$ 、磁光介质柱边长为 $(0.2745a \sim 0.2863a)$ 、拐角介质柱中心距为 $(1.2488a \sim 1.3852a)$, 所述环行器的插入损耗小于 0.2dB ;

所述高折射率介质材料为硅, 所述低折射率介质材料为空气, 所述光子晶体由硅在空气背景周期排列而成, 所述光子晶体中的硅介质柱半径为 $0.2693a \sim 0.3671a$, 归一化频率为 $(0.4043 \sim 0.4192)$ 、分离因子为 $(0.7558 \sim 0.8208)$ 、磁光介质柱边长为 $(0.2686a \sim 0.2885a)$ 、拐角介质柱中心距为 $(1.2304a \sim 1.4764a)$, 所述环行器的插入损耗小于 0.5dB ;

所述高折射率介质材料为硅, 所述低折射率介质材料为空气, 所述光子晶体由硅在空气背景周期排列而成, 所述光子晶体中的硅介质柱半径为 $0.2642a \sim 0.3818a$, 归一化频率为 $(0.4016 \sim 0.4235)$ 、分离因子为 $(0.7473 \sim 0.8316)$ 、磁光介质柱边长为 $(0.2639a \sim 0.2922a)$ 、拐角介质柱中心距为 $(1.2162a \sim 1.6971a)$, 所述环行器的插入损耗小于 1dB 。

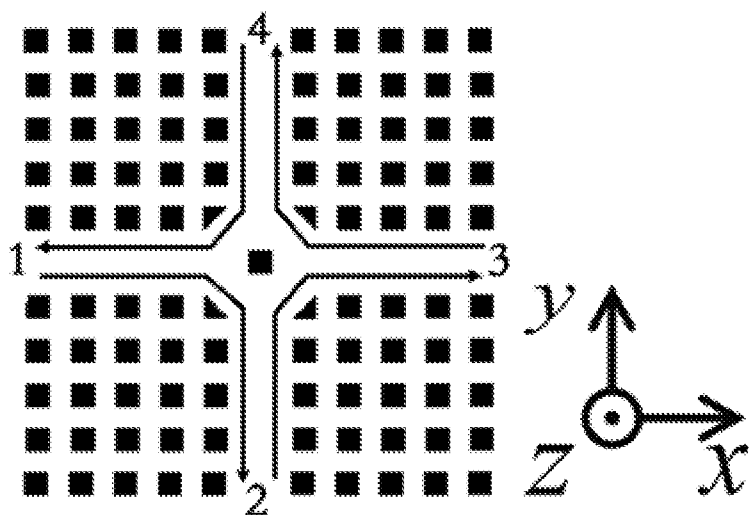


图 1

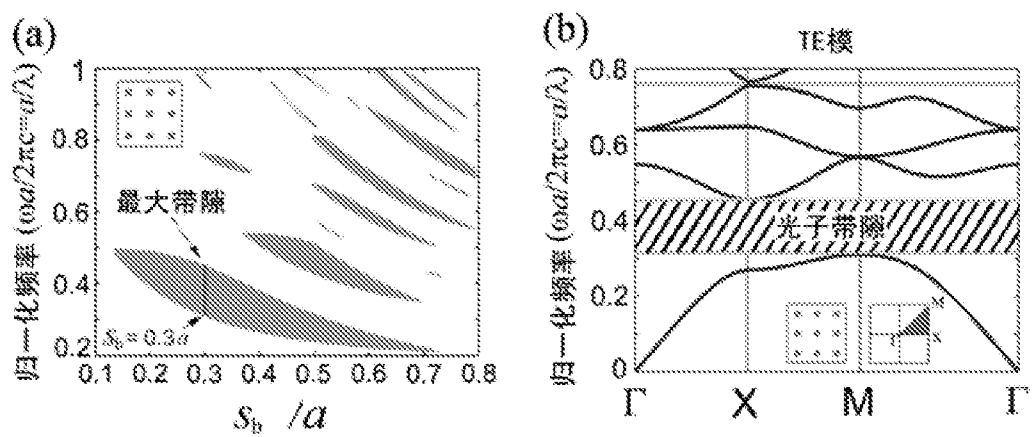


图 2

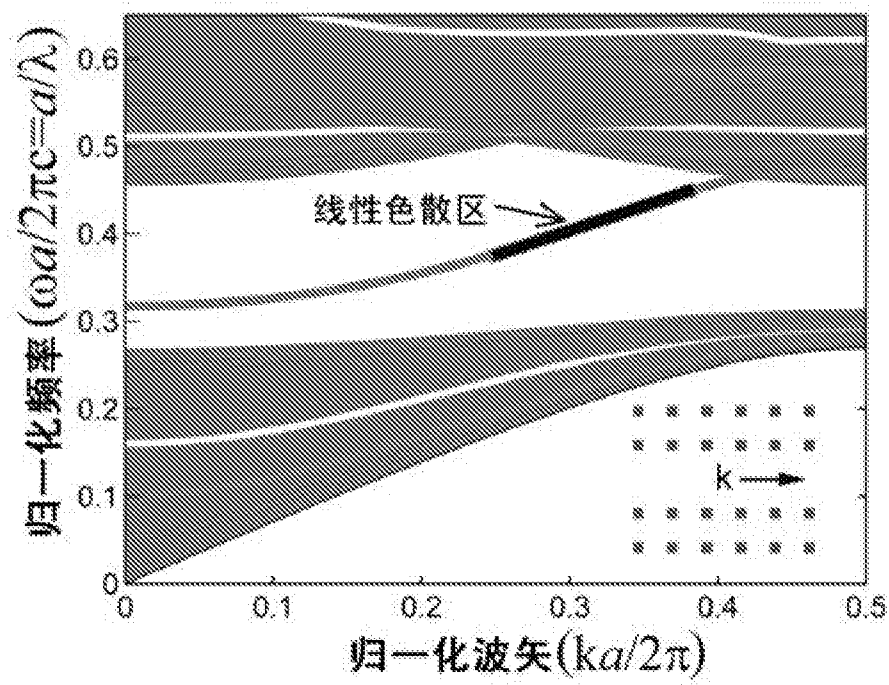


图 3

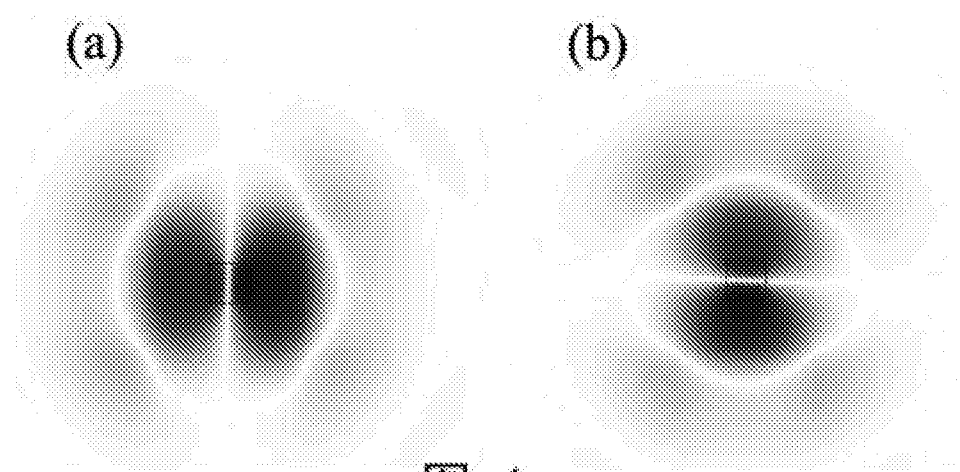


图 4

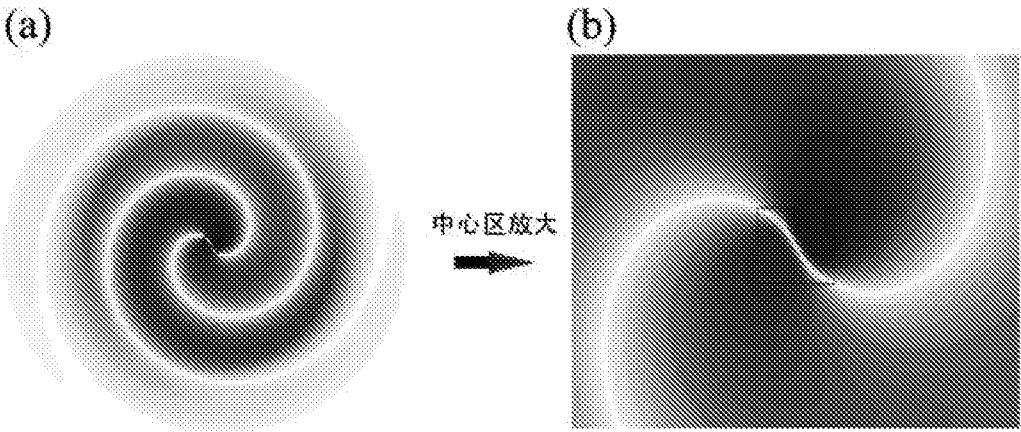


图 5

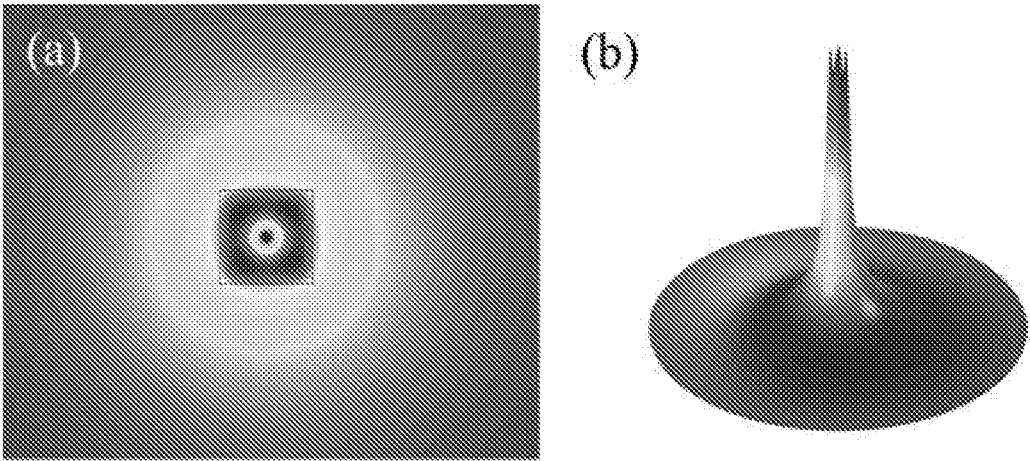


图 6

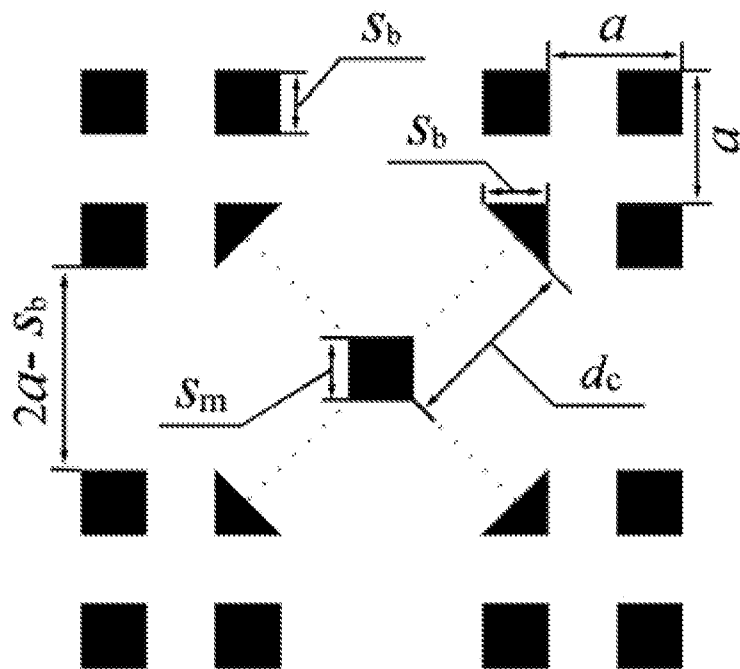


图 7

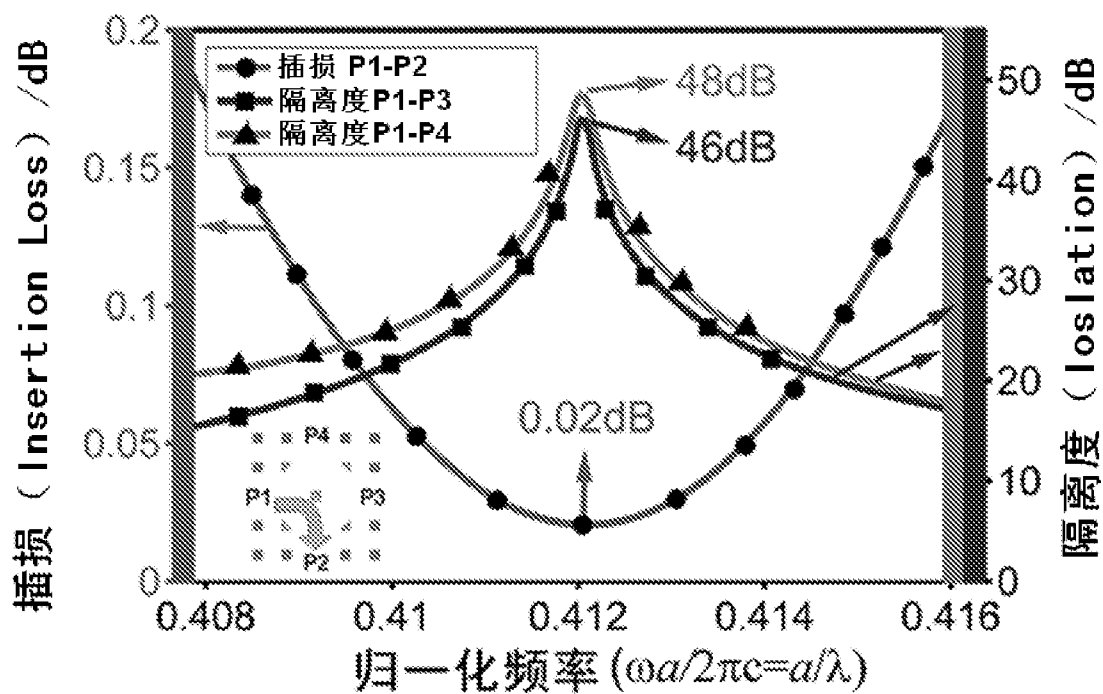


图 8

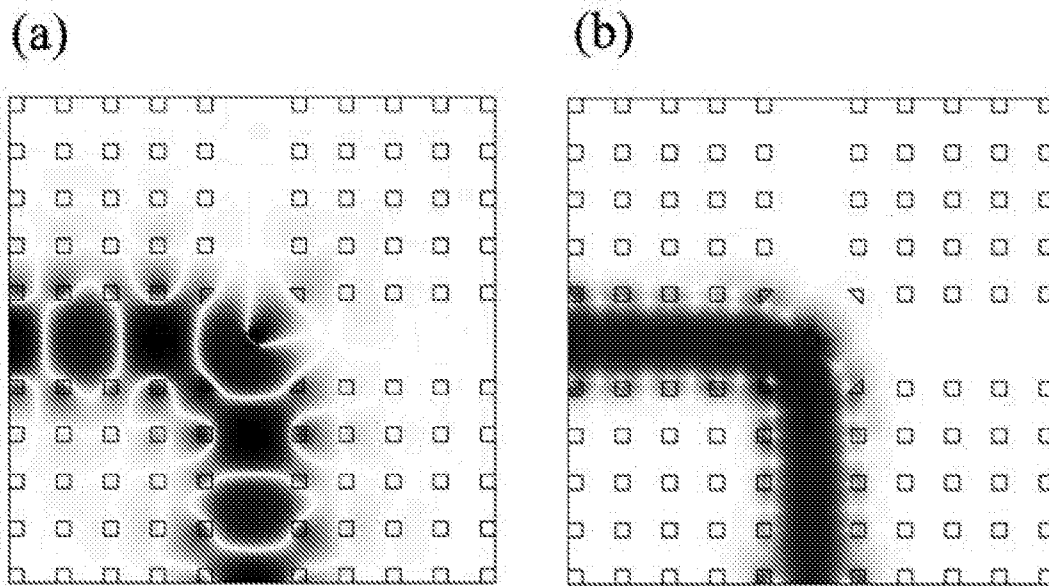


图 9

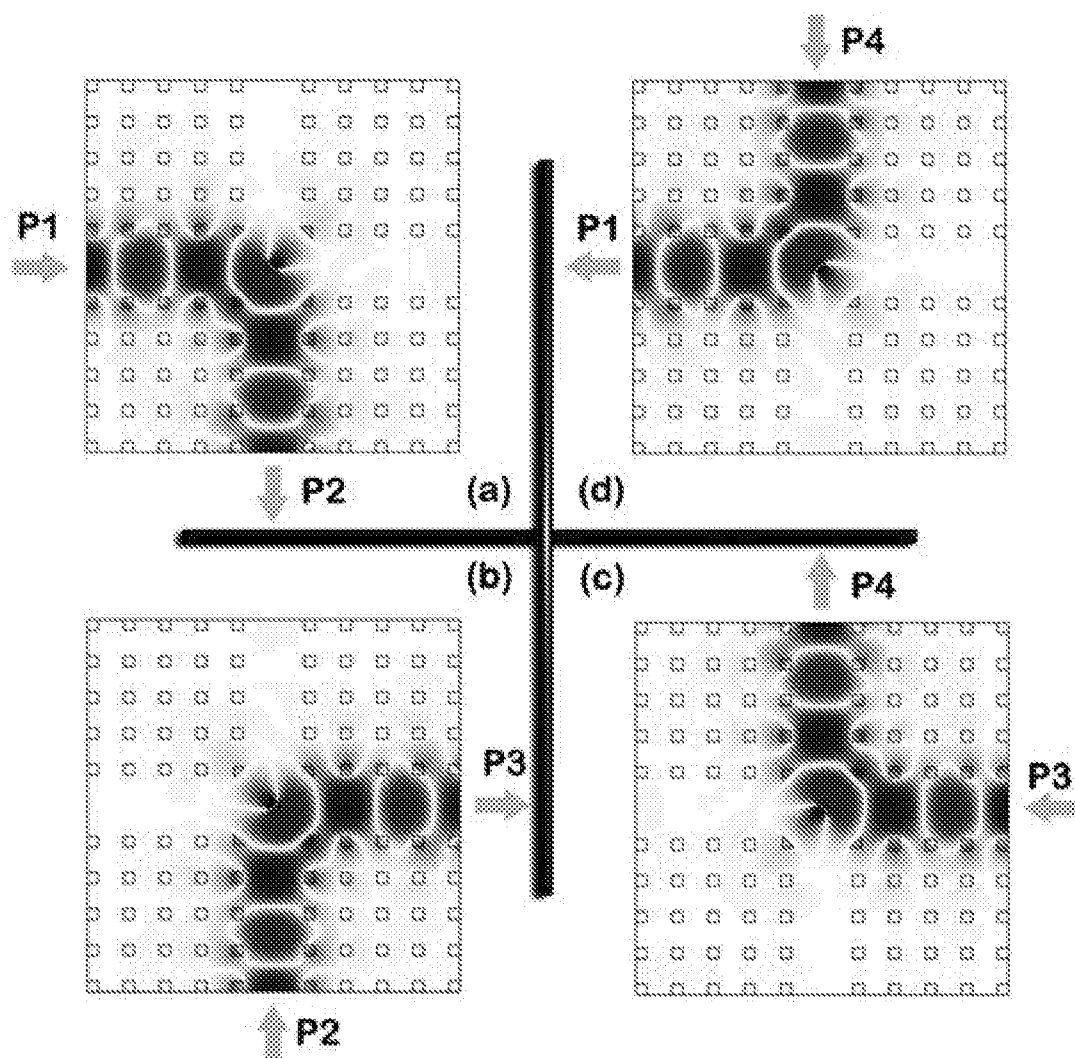


图 10

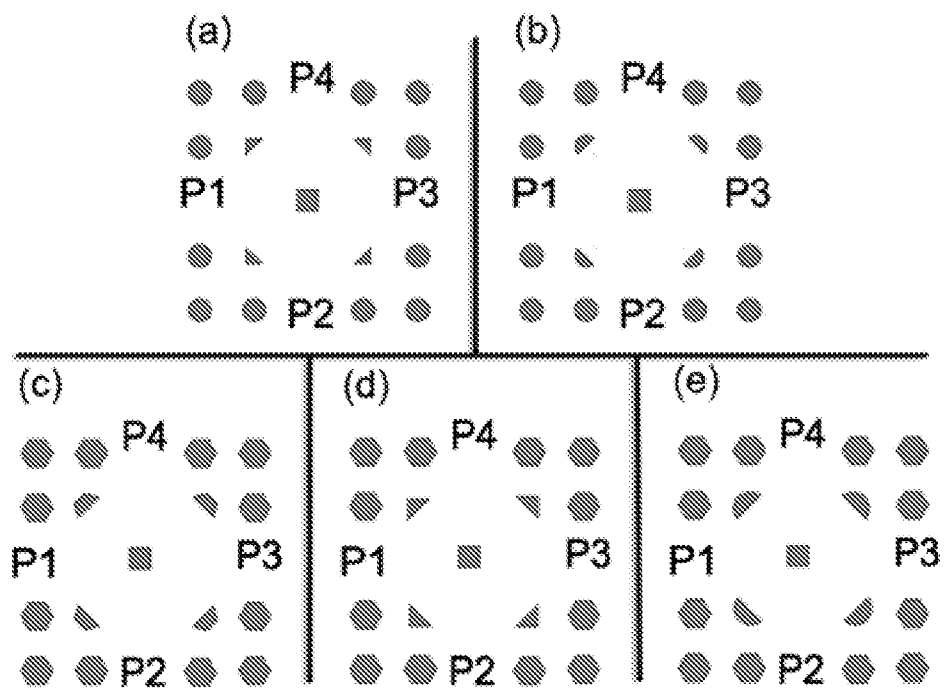


图 11

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2015/085345

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G02B 6/122 (2006.01) i; G02F 1/09 (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G02B; G02F

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPODOC, WPI, CNPAT, CNKI: OUYANG Zhengbiao, SHENZHEN UNIVERSITY, magnet+, photo+ 3d crystal+, circulator+, medium

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 104101948 A (OUYANG, Zhengbiao et al.) 15 October 2014 (15.10.2014) claims 1-9	1-9
A	CN 102043261 A (SHENZHEN UNIVERSITY et al.) 04 May 2011 (04.05.2011) description, paragraphs [0061]-[0072] and figures 9-12	1-9
A	CN 101788727 A (SHENZHEN UNIVERSITY et al.) 28 July 2010 (28.07.2010) the whole document	1-9
A	CN 101726873 A (SHENZHEN UNIVERSITY et al.) 09 June 2010 (09.06.2010) the whole document	1-9
A	US 2008267557 A1 (WANG, ZHENG et al.) 30 October 2008 (30.10.2008) the whole document	1-9

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"&" document member of the same patent family
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 08 October 2015	Date of mailing of the international search report 15 October 2015
Name and mailing address of the ISA State Intellectual Property Office of the P. R. China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088, China Facsimile No. (86-10) 62019451	Authorized officer FANG, Dingyi Telephone No. (86-10) 62413896

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2015/085345

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 104101948 A	15 October 2014	None	
CN 102043261 A	04 May 2011	CN 102043261 B	03 July 2013
		US 2013223805 A1	29 August 2013
		US 8731360 B2	20 May 2014
		WO 2012062005 A1	18 May 2012
CN 101788727 A	28 July 2010	US 8699835 B2	15 April 2014
		US 2012251048 A1	04 October 2012
		WO 2011072572 A1	23 June 2011
		CN 101788727 B	09 November 2011
CN 101726873 A	09 June 2010	US 2012243844 A1	27 September 2012
		US 8693823 B2	08 April 2014
		WO 2011072573 A1	23 June 2011
		CN 101726873 B	08 August 2012
US 2008267557 A1	30 October 2008	None	

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2015/085345

A. 主题的分类

G02B 6/122(2006.01)i; G02F 1/09(2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

G02B, G02F

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

EPODOC, WPI, CNPAT, CNKI: 欧阳征标, 深圳大学, 磁, 光子晶体, 环形器, 介质, magnet+, photo+ 3d crystal+, circulator+, medium

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
PX	CN 104101948 A (欧阳征标 等) 2014年 10月 15日 (2014 - 10 - 15) 权利要求1-9	1-9
A	CN 102043261 A (深圳大学等) 2011年 5月 4日 (2011 - 05 - 04) 说明书第0061-0072段及附图9-12	1-9
A	CN 101788727 A (深圳大学等) 2010年 7月 28日 (2010 - 07 - 28) 全文	1-9
A	CN 101726873 A (深圳大学等) 2010年 6月 9日 (2010 - 06 - 09) 全文	1-9
A	US 2008267557 A1 (WANG, ZHENG等) 2008年 10月 30日 (2008 - 10 - 30) 全文	1-9

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2015年 10月 8日

国际检索报告邮寄日期

2015年 10月 15日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中华人民共和国国家知识产权局(ISA/CN)
北京市海淀区蓟门桥西土城路6号
100088 中国

授权官员

方丁一

传真号 (86-10)62019451

电话号码 (86-10)62413896

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2015/085345

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	104101948	A	2014年 10月 15日	无			
CN	102043261	A	2011年 5月 4日	CN	102043261	B	2013年 7月 3日
				US	2013223805	A1	2013年 8月 29日
				US	8731360	B2	2014年 5月 20日
				WO	2012062005	A1	2012年 5月 18日
CN	101788727	A	2010年 7月 28日	US	8699835	B2	2014年 4月 15日
				US	2012251048	A1	2012年 10月 4日
				WO	2011072572	A1	2011年 6月 23日
				CN	101788727	B	2011年 11月 9日
CN	101726873	A	2010年 6月 9日	US	2012243844	A1	2012年 9月 27日
				US	8693823	B2	2014年 4月 8日
				WO	2011072573	A1	2011年 6月 23日
				CN	101726873	B	2012年 8月 8日
US	2008267557	A1	2008年 10月 30日	无			

表 PCT/ISA/210 (同族专利附件) (2009年7月)