

实现圆偏振光非对称传输的完全光子禁带光波导异质结构的设计

韩雪婷^{1,2}, 费宏明^{1,2*}, 林瀚³, 杨毅彪^{1,2}, 曹斌照^{1,2}, 张明达^{1,2}, 田媛^{1,2}, 智文强^{1,2}

¹太原理工大学物理与光电工程学院, 山西 太原 030024;

²太原理工大学新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 山西 太原 030024;

³斯威本科技大学埃米材料转化中心, 澳大利亚 维多利亚 3122

摘要 从理论上提出了一种可以实现圆偏振光波非对称传输的器件设计。该器件是由锗、硅以及空气孔洞构成的具有完全光子禁带的二维光子晶体异质结构。本研究通过在光子晶体中引入线缺陷, 构成能够实现高正向透射的光波导结构, 同时设计可将光波发散的微腔结构并结合全反射原理抑制反向入射光, 实现圆偏振光非对称传输, 最终实现了圆偏振光在光通信波段(1550 nm)附近的高正向透射率(可达 0.726)的非对称传输。圆偏振是具有固定相位差($\pi/2$)的任意正交线偏振光的线性叠加, 本研究设计的结构同时可以实现任意线偏振光的非对称传输, 因此具有广泛的应用前景, 其应用领域包括量子通信、信息处理、集成光学。

关键词 集成光学; 圆偏振光; 完全光子禁带; 全反射界面; 非对称传输

中图分类号 O438

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0913002

Design of Optical Waveguide Heterostructure with Fully Photonic Bandgap for Asymmetric Transmission of Circularly Polarized Light

Han Xueting^{1,2}, Fei Hongming^{1,2*}, Lin Han³, Yang Yibiao^{1,2}, Cao Binzhao^{1,2},
Zhang Mingda^{1,2}, Tian Yuan^{1,2}, Zhi Wenqiang^{1,2}

¹Department of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

²Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

³Centre for Translational Atomaterials, Swinburne University of Technology, Victoria 3122, Australia

Abstract This paper theoretically studies the design of a device for achieving asymmetric transmission of circularly polarized light. The device is a two-dimensional (2D) photonic crystal (PhC) heterostructure with a fully photonic bandgap, which is with triangular lattice air holes embedded in the germanium and silicon. Here, a line defect is introduced in the 2D PhC to form an optical waveguide structure that can achieve high forward transmittance. At the same time, a microcavity structure is designed to diverge the light, which is combined with the total reflection principle to suppress backward incident light, and therefore the asymmetric transmission of circularly polarized light is achieved. As a result, the asymmetric transmission of circularly polarized light at the telecommunication wavelength (1550 nm) with high forward transmittance (up to 0.726) is realized. As the circularly polarized light is a linear superposition of two orthogonally linear polarization lights with a fixed phase difference ($\pi/2$), the structure designed in this study can realize asymmetric transmission of arbitrarily linearly polarized light at the same time. Therefore, it has a wide range of applications, including quantum communication, information processing, and integrated optics.

收稿日期: 2020-11-02; 修回日期: 2020-11-22; 录用日期: 2020-12-01

基金项目: 国家自然科学基金(11904255)

* E-mail: feihongming@tyut.edu.cn

Key words integrated optics; circularly polarized light; complete photonic bandgap; total reflection interface; asymmetric transmission

OCIS codes 130.5296; 060.4510; 250.4390

1 引言

光子作为信息载体在芯片中传输时具有能耗低、信息容量大和大工作带宽等一系列优点,可用于纳米光学片上系统中的信息传递和光量子计算^[1]。在信息传送及处理的过程中,非对称光传输器件有重要意义,能够实现光波的单向传输,并抑制反向信号的干扰。光波的非对称传输器件主要分为互易和非互易非对称传输器件。非互易非对称传输器件要求在微纳结构^[2]上外加磁场(利用磁光效应)^[3-4]或外加高强度光场(利用非线性效应)^[5-6]实现非对称光传输,因此不易于实现在光子芯片上的集成。相比之下,互易非对称传输器件则可以通过不同的原理设计实现,具有更好的多样性和可调谐性,可用于实现光子晶体(PhC)方向禁带^[7-8]、光栅衍射^[9-11]、表面等离激元^[12-13]、超材料^[14-15]等。但这类器件仍然存在传输效率低、光波偏振态单一、耗散较为严重等局限^[16-17]。本研究通过具有完全光子禁带^[18-19]的二维光子晶体平面波导结构实现高正向透射率(可达 0.726),同时使用光场发散微腔配合全反射原理来实现对于反向透射光的限制,从而实现一种互易光波导非对称传输器件。该器件适用于圆偏振光的非对称光传输。同时,该器件的工作原理可以应用于任意偏振光的非对称光传输器件。

圆偏振光(CPL)^[20-21]相较于线偏振光具有独特的偏振态特性,不仅可以传递光信号,且具有光子自旋态,从而可以增大光通信信道容量。圆偏振光为横电(TE)模和横磁(TM)模线性叠加形成,圆偏振光的完全光子禁带定义为在某个频率区间沿 TE 和 TM 方向的线偏振光同时实现的各个方向上的光子禁带,该频率区间中的光无法在光子晶体结构中传输,这也是光子晶体的一个重要特性^[22]。原理上,基于完全光子禁带原理的光波导能够实现圆偏振光的传输。然而目前的完全光子禁带波导结构大多基于线偏振光 TE 或 TM 模的传输^[23-25],存在偏振态较为单一、传输透射率低、光波空间局域性差等问题,因此,目前少有研究实现基于完全光子禁带的圆偏振光的非对称传输器件。

为解决以上问题,本研究对光子晶体的材料进行选择并通过引入线缺陷对结构进行优化设计,实现了

在光子禁带内的 TE 和 TM 线偏振态的正向高透射光传输。在此基础上,通过线性叠加的方法引入圆偏振光,实现了圆偏振光的高正向透射率。同时,通过利用光场发散特性及界面全反射来抑制反向光传输,实现了基于完全光子禁带特性的圆偏振光非对称传输。所设计结构在光通信波长(1550 nm 附近)实现的正向透射率为 0.726,透射对比度为 0.568。所设计的非对称传输器件可以使用现有的互补金属氧化物半导体(CMOS)纳米制造工艺来制造^[26-27],因此,它可以在光通信和量子计算中得到广泛应用。

2 结构设计和模型分析

本研究提出的二维光子晶体异质结构如图 1(a)所示,是由左侧的 PhC1 和右侧的 PhC2 构成。PhC1 和 PhC2 均为周期性的三角晶格结构。PhC1 是通过在硅衬底中打空气孔柱形成,其中晶格常数 a_1 为 815.9 nm,空气孔半径 $r_1=0.48a_1$ 。PhC2 是通过在锗衬底中打空气孔柱形成,其中晶格常数 a_2 为 750 nm,空气孔半径 $r_2=0.49a_2$ 。首先通过分别在 PhC1 和 PhC2 中移除一排空气孔柱来引入线缺陷,实现基于完全光子禁带的光波导结构。同时通过在右侧移除 6×3 空气孔柱来引入让反射光衍射发散的微腔,以降低反向透射率。波导宽度分别为 d_1 和 d_2 。在通信波段 1550 nm 下硅的折射率为 3.48,锗的折射率为 4.275,如图 1(b)所示。根据材料的折射率计算得到的界面倾斜角度 $\theta=30^\circ$ 。

一束以恒定角速度 ω 旋转并沿 x 方向传输的圆偏振光可以表示为具有固定相位差($\pi/2$)的两束线偏振(TE 和 TM)光的线性组合,可以表达为

$$E = A_y \cos(\omega t - kx) e_y \pm A_z \cos(\omega t - kx + \Delta\Phi) e_z, \quad (1)$$

式中: E 为圆偏振光; A_y 和 A_z 分别为 TE 和 TM 模式[偏振方向的定义如图 1(a)所示,其中 TE 模式的电场沿 y 方向, TM 模式的电场沿 z 方向]的振幅; e_y 和 e_z 分别为 TE 和 TM 模式的单位向量大小; $\Delta\Phi$ 为两束线偏振光的相位差。当 $\Delta\Phi = n\pi$ 且 $A_y = A_z$ 或 $A_y \neq A_z$ 时为线偏振光; $\Delta\Phi = \pm(2n+1)\pi/2$, n 为任意整数且 $A_y = A_z$ 时为圆偏振光; $\Delta\Phi = \pm(2n+1)\pi/2$, n 为任意整数且 $A_y \neq A_z$ 时或者 $\Delta\Phi$ 为其他值时为椭圆偏振光。

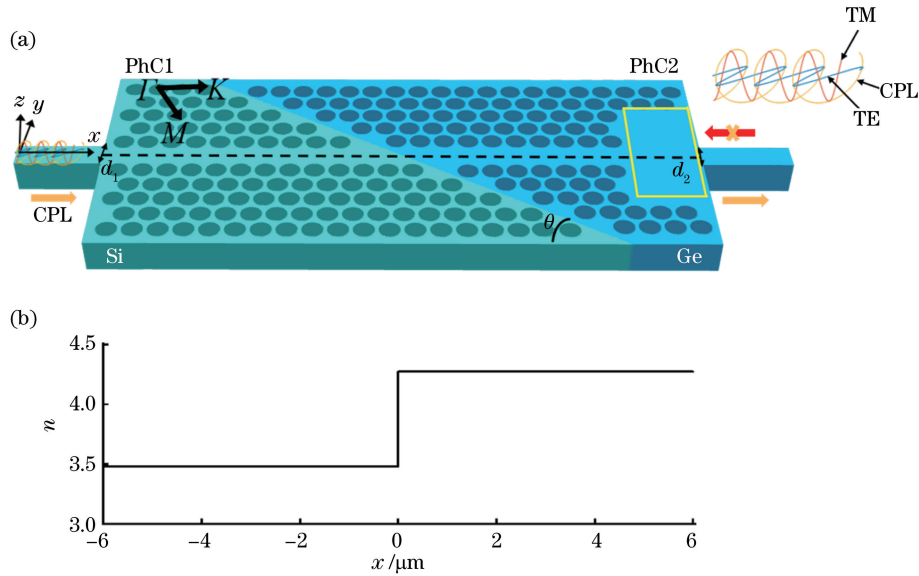


图 1 二维光子晶体波导异质结构图及衬底材料折射率随 x 方向位置的分布图。(a)二维光子晶体波导异质结构图；(b)衬底材料折射率随 x 方向位置变化的分布图

Fig. 1 Structural diagram of two-dimensional photonic crystal waveguide heterostructure, and refractive index distribution of substrate material along x -direction position. (a) Structural diagram of two-dimensional photonic crystal waveguide heterostructure; (b) refractive index distribution of substrate material along x -direction position

从(1)式可以看出,如果一个结构能够满足圆偏振光的传播要求,则能够满足任意线偏振光及椭圆偏振光的传输要求。如果要满足圆偏振光的传输要求,则两束线偏振光(TE 和 TM 模)需要满足以下三个条件:1) $A_y = A_z$; 2) $\pi/2$ 相位差; 3) 场强分布在空间上重叠。

根据圆偏振光传输的三个要求,为了实现圆偏振光的非对称传输,在设计结构时应满足以下要求; 1) TE 和 TM 偏振光在所研究的波段范围都具有完全光子禁带,即圆偏振光的完全光子禁带,并且要有最大完全光子禁带宽度 $\Delta\omega$; 2) 最大完全光子禁带宽度 $\Delta\omega$ 所对应的波段范围与工作带宽(光通信波段)重叠; 3) 圆偏振光的合成效果较好,即 TE 和 TM 分别在 PhC1 和 PhC2 中的正向透射率尽可能相等; 4) 圆偏振光在 PhC1 和 PhC2 中的正向透射率尽可能高,以确保在异质结构中的高效率非对称传输。

基于以上目标,首先对结构进行了初步设计。为得到较为理想的圆偏振光完全光子禁带宽度 $\Delta\omega$,即较大的工作带宽,首先对材料进行了选择。总的来说,完全光子禁带要求两种介质的折射率比大于 2。因此 PhC1 和 PhC2 的衬底材料折射率应较大,且 PhC 中的介质柱材料折射率应较小,本研究采用硅和锗为背景材料、介质柱为空气孔柱。介质折射率比分别为 3.48 和 4.275,理论上此时能够形成较好的完全光子禁带。其次确定晶格类型,研

究表明^[28]对称性在完全光子禁带的形成过程中起重要作用,与正方晶格相比,三角晶格结构具有更好的完全光子禁带特性。因此 PhC1 和 PhC2 都采用三角晶格光子晶体结构。

为实现更高效的圆偏振光非对称传输,对结构进行进一步的优化设计,其中填充比是影响完全光子禁带宽度的主要因素之一,在本研究中非对称传输器件中圆偏振光的最大完全光子禁带宽度 $\Delta\omega$ 为 PhC1 的 TE 和 TM 模的最大共同完全光子禁带宽度 $\Delta\omega_1$ 与 PhC2 的 TE 和 TM 模的最大共同完全光子禁带宽度 $\Delta\omega_2$ 的交集。为得到最大完全光子禁带,本研究分别对初始结构 PhC1 中的空气孔柱半径 r_1 和 PhC2 中的空气孔柱半径 r_2 进行了优化计算[基于平面波展开 (PWE)法并使用 Rsoft 软件进行计算],结果如图 2 所示。图 2(a)为 PhC1 的 TE 和 TM 模的能带组合图,通过计算得到当 $r_1/a_1 = 0.48$ 时,PhC1 具有最大的共同完全光子禁带宽度 $\Delta\omega_1 = 0.078[\omega a / (2\pi c)]$,对应波段范围为 1547~1817 nm,如图 2(a)中灰色阴影部分所示。其次对 r_2 进行优化计算,图 2(b)为 PhC2 的 TE 和 TM 模的能带组合图,计算得到当 $r_2/a_2 = 0.49$ 时,PhC2 具有最大的共同完全光子禁带宽度 $\Delta\omega_2 = 0.098 \times [\omega a / (2\pi c)]$,对应波段范围为 1463~1810 nm,如图 2(b)中灰色阴影部分所示。最终得到非对称传输器件中圆偏振光的工作带宽为 263 nm,即

1547~1810 nm。同时本研究展示了 PhC1 和 PhC2 的光子禁带随空气孔柱半径的变化,如图 2(c)和(d)所示,并且计算了 r_1/a_1 取不同整数值时 $\Delta\omega_1$ 的

大小变化趋势以及 r_2/a_2 取不同整数值时 $\Delta\omega_2$ 的大小变化趋势。本研究的优化目标是 TE 和 TM 能带相交叠的区域最宽。

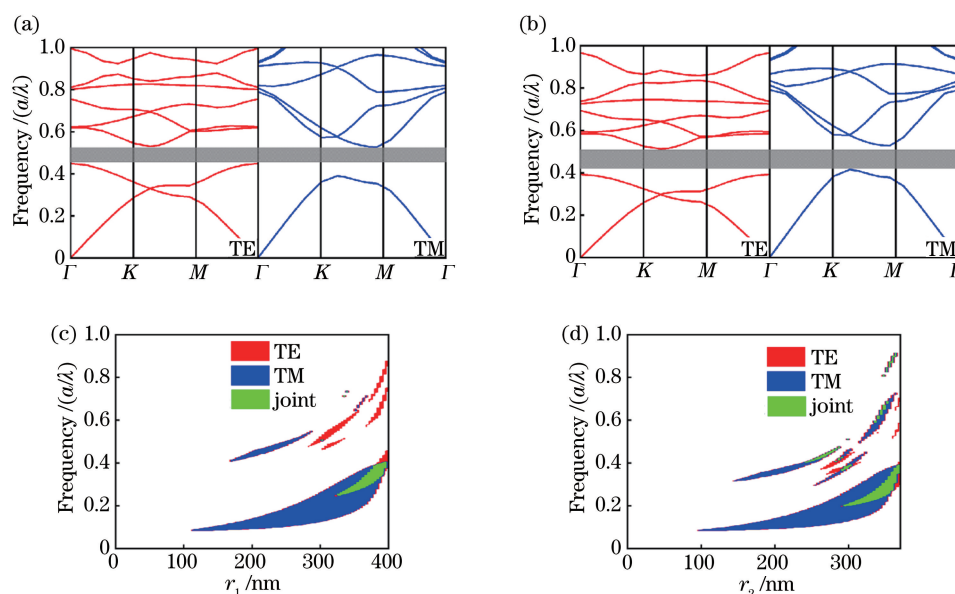


图 2 PhC1 和 PhC2 的 TE 和 TM 能带结构图,以及 PhC1(PhC2)的光子禁带分别随半径 r_1 (r_2)变化的扫描图。(a) PhC1 的 TE 和 TM 能带结构图;(b) PhC2 的 TE 和 TM 能带结构图;(c) PhC1 光子禁带随半径 r_1 变化的扫描图;(d) PhC2 光子禁带随半径 r_2 变化的扫描图

Fig. 2 TE and TM energy band diagrams of PhC1 and PhC2, and photonic bandgaps of TE and TM modes of PhC1(PhC2) varying with r_1 (r_2). (a) TE and TM energy band diagrams of PhC1; (b) TE and TM energy band diagrams of PhC2; (c) photonic bandgaps of TE and TM modes of PhC1 varying with r_1 ; (d) photonic bandgaps of TE and TM modes of PhC2 varying with r_2

波导的优化设计一直是光子晶体研究的热点之一,为进一步提高该非对称传输器件中圆偏振光的正向传输性能,本研究通过改变线缺陷波导宽度 d_1 和 d_2 ,系统研究了波导宽度的改变对正向传输透射率的影响[使用有限时域差分(FDTD)法计算,所用软件为商用 Lumerical FDTD 软件,并使用模式光源]。在确定以上最优填充比(r/a)的情况下,分别对 d_1 和 d_2 进行优化计算,以 20 nm 为步长,在 -100 nm~+100 nm 范围内改变波导的宽度,得到了 TE 和 TM 以及圆偏振光的透射光谱图。由图 3(a)~(c)可看出,对于 PhC1,在不同的 d_1 值下 TE、TM、圆偏振光的传输透射图都非常相似,且在 1550 nm 下,TE 在 d_1 为 570.18 nm 处取得最大传输透射率 0.95,如图 3(d)所示;TM 的透射率变化幅度要明显大于 TE,在 d_1 为 690.18 nm 处取得最大传输透射率 0.9,如图 3(e)所示;圆偏振光的透射率变化幅度介于 TE 和 TM 两者之间,在 d_1 为 690.18 nm 处取得最大传输透射率 0.916,如图 3(f)所示。圆偏振光在不同 d_1 值下的变化趋势和

TE、TM 都有关系,受两者的共同影响,且透射率值始终处于二者之间或三者均相等。其次计算 PhC2 的透射光谱,如图 3(g)~(i)所示。由图可看出,对于 PhC2,在不同的 d_2 值下 TE、TM、圆偏振光的传输透射图也都比较相似,且在 1550 nm 下,TE 的传输透射率整体变化不大,在 d_2 为 465.04 nm 处取得最大传输透射率 0.947,如图 3(g)所示;TM 的传输透射率变化幅度远大于 TE,在 d_2 为 565.04 nm 处取得最大传输透射率 0.9,如图 3(h)所示;圆偏振光的传输透射率变化幅度介于 TE 和 TM 两者之间,在 d_2 为 565.04 nm 处取得最大传输透射率 0.916,如图 3(i)所示。通过比较 PhC1 和 PhC2 的透射率变化趋势,发现通过改变波导宽度,PhC2 中的 TM 模传输透射率变化范围较大,即从 0.06 变化到 0.9。由于本研究目标是实现圆偏振光的非对称光传输,需要 TE 和 TM 具有相同的透射率,因此,根据 TM 模式来选取优化参数。最终得到在 1550 nm 波长下, d_1 为 690.18 nm 时圆偏振光在 PhC1 中取得最优传输透射率 0.916, d_2 为

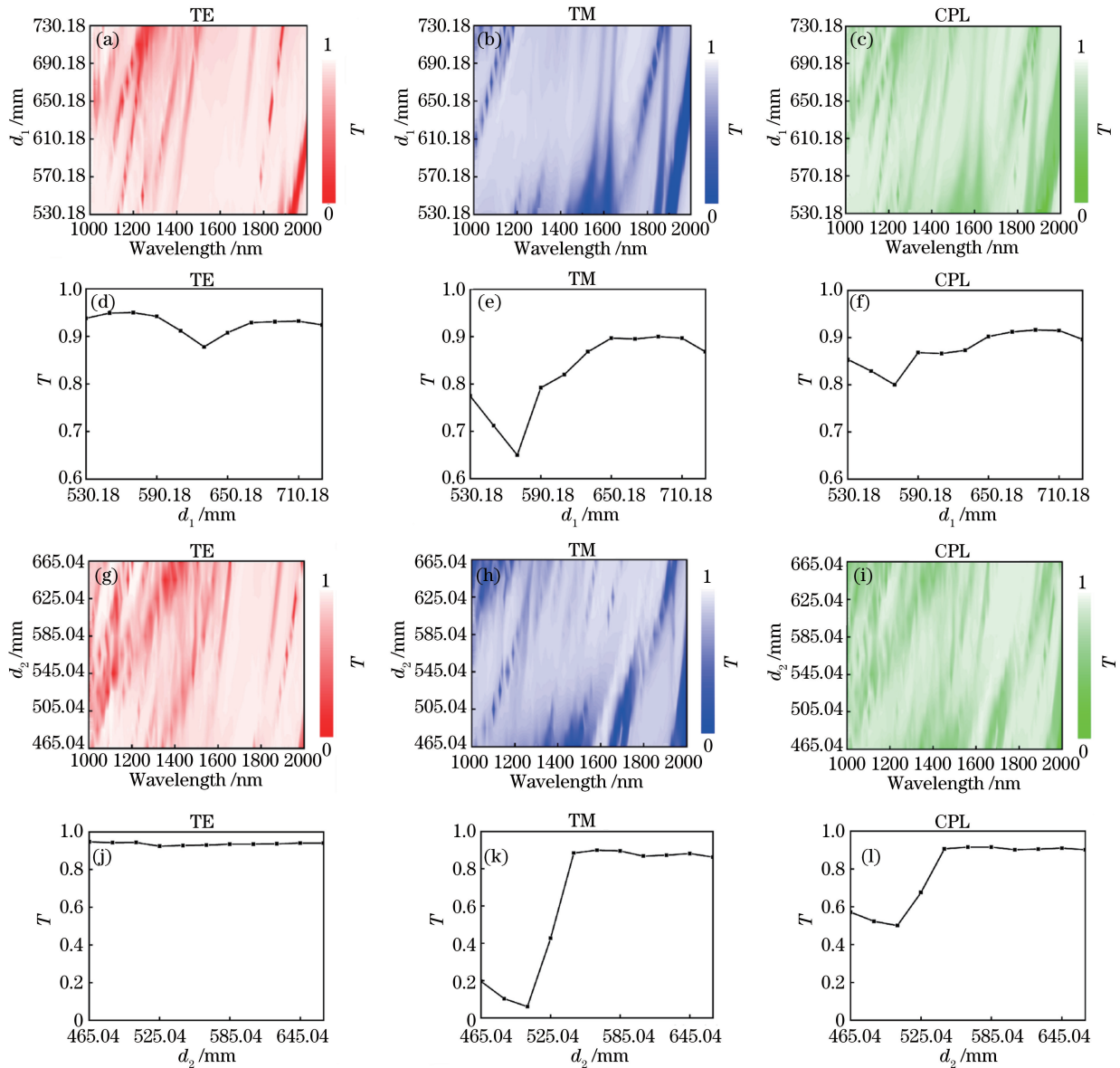


图 3 TE、TM 和 CPL 在 PhC1 或 PhC2 中的传输透射率随波导宽度的变化。(a)~(c) 分别对应以 20 nm 为步长改变 d_1 时 PhC1 中 TE、TM 和 CPL 的传输透射率；(d)~(f) 分别对应不同 d_1 下 PhC1 中 1550 nm TE、TM 和 CPL 的传输透射率；(g)~(i) 分别对应以 20 nm 为步长改变 d_2 时 PhC2 中 TE、TM 和 CPL 的传输透射率；(j)~(l) 分别对应不同 d_2 下 PhC2 中 1550 nm TE、TM 和 CPL 的传输透射率

Fig. 3 Transmittance of TE, TM, and CPL in PhC1 and PhC2 as a function of width of waveguide. (a)–(c) Transmittance of TE, TM, and CPL in PhC1 as a function of d_1 for step of 20 nm; (d)–(f) transmittance of TE, TM, and CPL at 1550 nm in PhC1 for different d_1 ; (g)–(i) transmittance of TE, TM, and CPL in PhC2 as a function of d_2 for step of 20 nm; (j)–(l) transmittance of TE, TM, and CPL at 1550 nm in PhC2 for different d_2

565.04 nm 时圆偏振光在 PhC2 中取得最优传输透射率 0.916。

非对称传输器件的特征参数主要有正向透射率(T_f)、反向透射率(T_b)和透射对比度(C)。其中透射对比度的定义为 $C = (T_f - T_b) / (T_f + T_b)$ 。器件设计的目标是取得尽可能高的正向透射率和透射对比度,并尽可能地减小反向透射率。

为实现圆偏振光波更高效率的非对称传输、达到光波反向截止的目的,本研究在 PhC1 和 PhC2 中引入异质界面(角度为 $\theta = 30^\circ$ 对应光波入射角 $\theta_m = 60^\circ$),基于全反射原理,反向入射的光波入射角达到临界角($\theta_c = 54.5^\circ$)时可实现光波反向截止。然而,由于完全光子禁带的影响,反向透射并不能完全被全反射界面抑制。因此,在引入全反

射界面后,反向透射率 T_b 依然较高。本研究通过在 PhC2 中移除几列光子晶体格点的方式来引入衍射微腔,使反向入射光衍射发散且未完全耦合到光波导中,从而降低反向透射率。本研究比较了分别移除 6×1 、 6×2 和 6×3 空气孔柱的情况,对三组数据进行了 TE、TM 和圆偏振光反向传输的优化计算。通过对反向传输场强分布图的观测,发现在去掉 6×3 空气孔柱时反向入射光波的传输明显减弱,衍射微腔起到了很好的扩散反向入射光波的作用,使其无法高效率地耦合进入波

导结构。图 4(a)~(c) 分别为 TE、TM 和圆偏振光的正向传输场强分布图。从图中可以看出衍射微腔对于正向透射光的影响很小。图 4(d)~(f) 分别为 TE、TM 和圆偏振光的反向传输场强分布图。图 4(g)~(i) 分别为 TE、TM 和圆偏振光的传输透射光谱图。在 1550 nm 下:TE 的正向透射率为 0.645,反向透射率为 0.256,透射对比度为 0.432;TM 的正向透射率为 0.775,反向透射率为 0.15,透射对比度为 0.676;圆偏振光的正向透射率为 0.71,反向透射率为 0.203,透射对比度为 0.555。

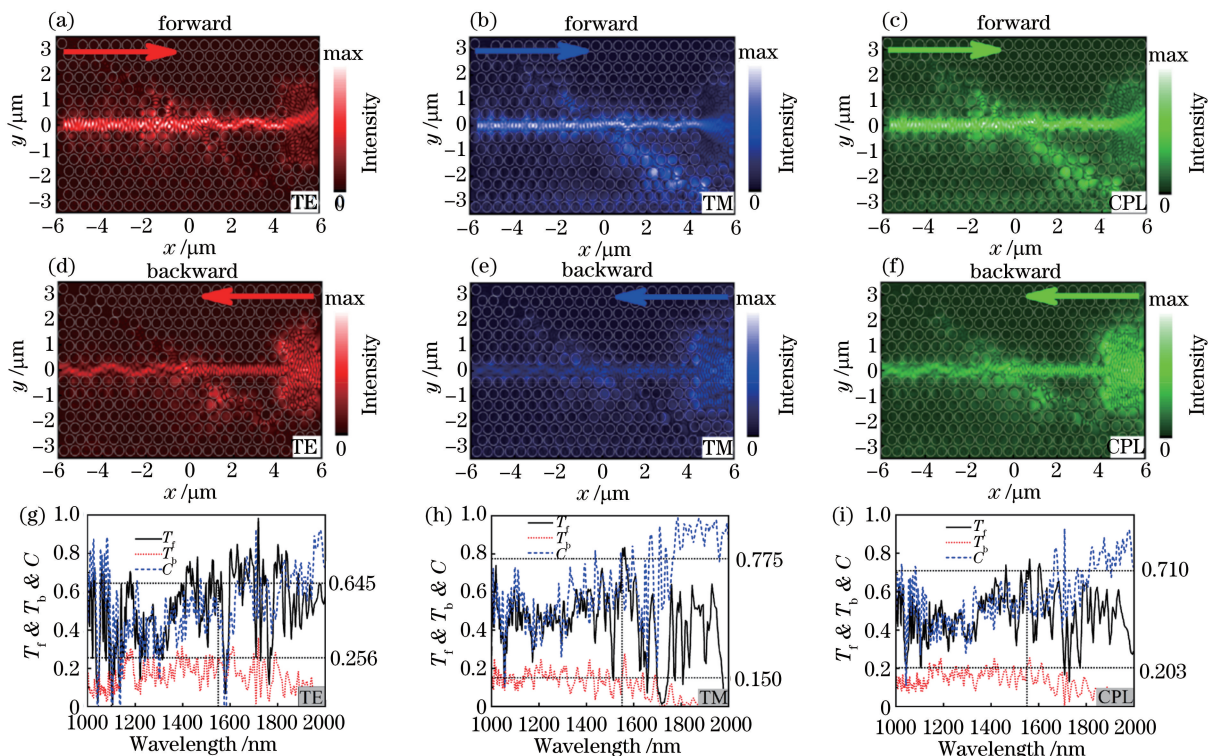


图 4 去掉 PhC2 右侧 6×3 空气孔柱后的异质结构在 1550 nm 波长处的正向入射场强图和反向入射场强图。(a) TE 正向; (b) TM 正向; (c) CPL 正向; (d) TE 反向; (e) TM 反向; (f) CPL 反向; (g) TE、(h) TM 和 (i) CPL 在研究波段的传输透射谱

Fig. 4 Forward and backward incident electric field intensity distributions at 1550 nm of heterostructure after removing 6×3 air holes on right side of PhC2. (a) TE, forward; (b) TM, forward; (c) CPL, forward; (d) TE, backward; (e) TM, backward; (f) CPL, backward; transmittance spectra of studied waveband of (g) TE, (h) TM, and (i) CPL

为减小异质界面折射对传输效果的影响,本研究也对波导中心间距进行优化,得到了最优中心波导间距(Δl 为 60 nm),此时,圆偏振光的透射效果达到最佳。在此基础上,本研究模拟了输出端口处 $y-z$ 截面的电场强度分布和相位分布,并标识出光偏振态,如图 5(a)、(b) 所示,其偏振态是根据(1)式的场叠加原理得到的。在每个点上,电场的偏振态可以用圆或椭圆表示,箭头代表旋转方向。可以看到,光的偏振从圆到椭圆略有变化,这是由 TE 和 TM 偏振光的电场强度在空间上的分布并不完全相

同造成的。但是,在光波导中心,场强最强处,偏振态确实为圆偏振。因此,可以证明该器件能够实现圆偏振光的非对称传输并保持圆偏振态。圆偏振光在 1550 nm 下的正向透射率为 0.726(比图 4 中未优化光波导中心位置的结果略有提高),反向透射率为 0.2,透射对比度为 0.568,如图 5(c) 所示。同时,为了分析实验设计的有限厚度的二维光子晶体平板结构(PhC slab)对器件性能的影响,本研究将有限厚度的 PhC slab 置于二氧化硅衬底上以进一步模拟厚度为 2000 nm 的器件结构。有限厚度的光波导在 z 方向

上是通过全内反射实现对光的限制,其限制程度随着波导厚度的减薄而下降,同时衬底对于光波导在 z 方向上对光的限制产生了一定的影响,因此在一定程度上影响了正向透射率(降低到 0.576),如图 5(d)所示。然而,该器件的透射率还是高于 0.5,能够满足应用需求。文中所设计的二维光子晶体波导结构的制

备可利用目前较为成熟的电感耦合等离子体刻蚀技术来实现,采用刻蚀剂加工出异质结构图案,然后将其转移到硅层^[26]或者锗层^[27],利用光刻将晶格常数 a_1 、 a_2 、 r_1 、 r_2 分别设置为 815.9 nm、750 nm、392 nm 和 367.5 nm。利用半导体激光器可将输入端和输出端的波导直接耦合到光子晶体异质结构中。

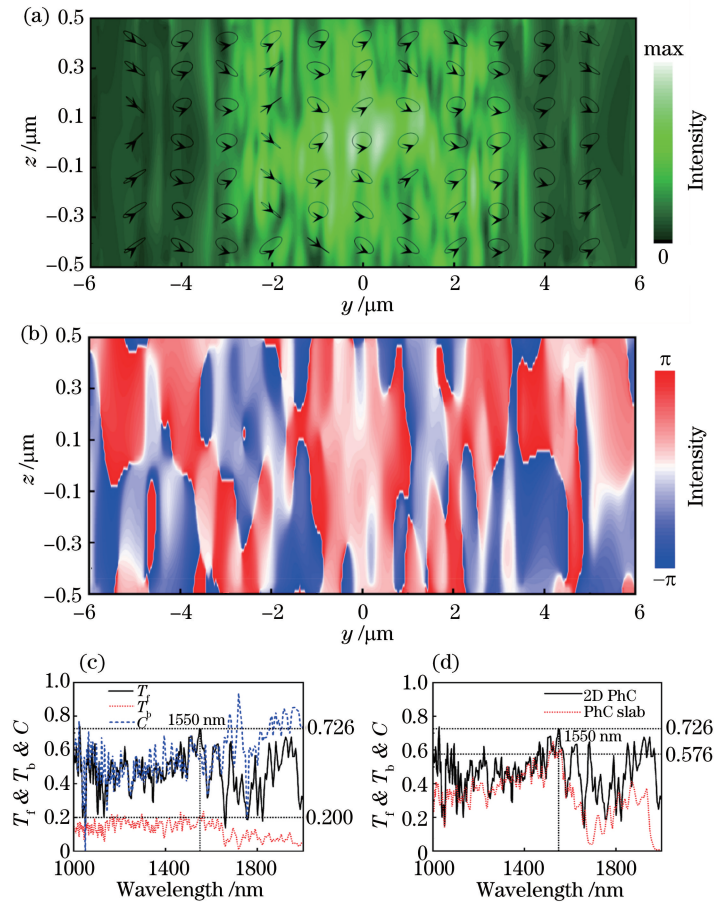


图 5 CPL 在二维光子晶体异质结构 y - z 截面中传输的场强、偏振态和相位分布,CPL 在二维光子晶体异质结构中传输的透射率以及透射对比度,以及 CPL 在二维光子晶体异质结构以及基于二氧化硅衬底的有限厚度平板光子晶体异质结构中的正向透射率图。CPL 在二维光子晶体异质结构 y - z 截面中传输的(a)场强和偏振态分布和(b)相位分布;(c) CPL 在二维光子晶体异质结构中传输的透射率以及透射对比度;(d) CPL 在二维光子晶体异质结构以及基于二氧化硅衬底的有限厚度平板光子晶体异质结构中的正向透射率图

Fig. 5 Electric field intensity, polarization, and phase distributions of CPL in y - z plane of 2D PhC heterostructure, transmittance and transmittance contrast of CPL in 2D PhC heterostructure, and forward transmittance of CPL in 2D PhC structure and finite thickness PhC heterostructure slab based on silica substrate. (a) Electric field intensity, polarization distribution, and (b) phase distribution of CPL in y - z plane of 2D PhC heterostructure; (c) transmittance and transmittance contrast of CPL in 2D PhC heterostructure; (d) forward transmittance of CPL in 2D PhC structure and finite thickness PhC heterostructure slab based on silica substrate

3 结 论

提出了一种可以实现圆偏振光非对称传输的基于二维光子晶体的非对称传输器件。基于光子晶体的完全禁带特性和波导局域特性,本研究能够实现

圆偏振光在通信波段 1550 nm 的 0.726 正向透射率以及高透射对比度,为设计基于二维光子晶体结构的非对称光传输器件提供了新的思路,并得到了较好的器件性能。该设计可以实现任意偏振态的非对称光传输,包括不同方向的线偏振光、椭圆偏振光

和圆偏振光等,具有广泛的应用前景,为进一步构造径向偏振光等高阶偏振态的非对称传输器件提供可能性。同时,该设计器件有可能通过使用目前成熟的 CMOS 半导体微纳加工技术制得,有实际应用前景。

参 考 文 献

- [1] Saleh B E A, Teich M C. Information transmission with photon-number-squeezed light [J]. Proceedings of the IEEE, 1992, 80(3): 451-460.
- [2] Johnson S G, Fan S H, Villeneuve P R, et al. Guided modes in photonic crystal slabs [J]. Physical Review B, 1999, 60(8): 5751-5758.
- [3] Jalali A A, Friberg A T. Faraday rotation in a two-dimensional photonic crystal with a magneto-optic defect [J]. Optics Letters, 2005, 30(10): 1213-1215.
- [4] Guo Z W, Wu F, Xue C H, et al. Significant enhancement of magneto-optical effect in one-dimensional photonic crystals with a magnetized epsilon-near-zero defect [J]. Journal of Applied Physics, 2018, 124(10): 103104.
- [5] Chen Y, Gao X B, Xu Y M, et al. Fano resonance-sensing mechanism of photonic crystal nanobeam side-coupling aperture chirped photonic crystal nanobeam cavity structure [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(11): 1123002.
陈颖, 高新贝, 许扬眉, 等. 光子晶体纳米梁侧耦合孔径啁啾光子晶体纳米梁腔结构的 Fano 共振传感机理 [J]. 光学学报, 2019, 39(11): 1123002.
- [6] Dang T T, Wang J F. Control of Gaussian optical waves in Gaussian parity-time symmetric waveguide [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(3): 0319001.
党婷婷, 王娟芬. 高斯型 PT 对称波导中高斯光波的控制 [J]. 光学学报, 2020, 40(3): 0319001.
- [7] Zuo Y F, Li P L, Luan K Z, et al. Heterojunction polarization beam splitter based on self-collimation in photonic crystal [J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(3): 034204.
左依凡, 李培丽, 栾开智, 等. 基于自准直效应的光子晶体异质结偏振分束器 [J]. 物理学报, 2018, 67(3): 034204.
- [8] Liu D, Gao Y H, Gao D S, et al. Photonic band gaps in two-dimensional photonic crystals of core-shell-type dielectric nanorod heterostructures [J]. Optics Communications, 2012, 285(7): 1988-1992.
- [9] Cakmakyan S, Serebryannikov A E, Caglayan H, et al. Spoof-plasmon relevant one-way collimation and multiplexing at beaming from a slit in metallic grating [J]. Optics Express, 2012, 20(24): 26636-26648.
- [10] Zhang Y, Kan Q, Wang G P. One-way optical transmission in silicon grating-photonic crystal structures [J]. Optics Letters, 2014, 39(16): 4934-4937.
- [11] Zhu Z H, Liu K, Xu W, et al. One-way transmission of linearly polarized light in plasmonic subwavelength metallic grating cascaded with dielectric grating [J]. Optics Letters, 2012, 37(19): 4008-4010.
- [12] Zhu G X, Liao Q H. Highly efficient collection for photon emission enhanced by the hybrid photonic-plasmonic cavity [J]. Optics Express, 2018, 26(24): 31391-31401.
- [13] Ding Y X, Song X K, Jiang P, et al. Directional optical travelling wave antenna based on surface plasmon transmission line [J]. Laser & Photonics Reviews, 2018, 12(4): 1870022.
- [14] Zhang S, Zhang Y. Broadband unidirectional acoustic transmission based on piecewise linear acoustic metamaterials [J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(26): 3239-3245.
- [15] Sun Y, Tong Y W, Xue C H, et al. Electromagnetic diode based on nonlinear electromagnetically induced transparency in metamaterials [J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(9): 091904.
- [16] Wang C, Zhou C Z, Li Z Y. On-chip optical diode based on silicon photonic crystal heterojunctions [J]. Optics Express, 2011, 19(27): 26948-26955.
- [17] Fei H M, Xu T, Liu X, et al. Interface of photonic crystal heterostructure for broadening bandwidth of unidirectional light transmission [J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(20): 204103.
费宏明, 徐婷, 刘欣, 等. 可用于拓宽光波单向传输带宽的光子晶体异质结构界面 [J]. 物理学报, 2017, 66(20): 204103.
- [18] Yan M B, Fu Z T, Wang H L. Study on complete band gap of two-dimensional photonic crystal with quadrangular rods [J]. Optik, 2012, 123(22): 2017-2020.
- [19] Jia L, Thomas E L. Two-pattern compound photonic crystals with a large complete photonic band gap [J]. Physical Review A, 2011, 84(3): 033810.
- [20] Zhu D F, Zhang J, Ye H, et al. Design of a broadband reciprocal optical diode in multimode silicon waveguide by partial depth etching [J]. Optics Communications, 2018, 418: 88-92.
- [21] Zhao F, Chen X N, Wang D C. Metalens design and simulation for simultaneous focusing of orthogonal circularly polarized light [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(10): 1024001.

- 赵峰, 陈向宁, 王得成. 正交圆偏振光同时聚焦的超透镜设计与仿真[J]. 光学学报, 2020, 40(10): 1024001.
- [22] Yang Y B, Wang S F, Li X J, et al. Band gap characteristics of two-dimensional photonic crystals made of a triangular lattice of dielectric rods[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(7): 5073-5077.
杨毅彪, 王拴锋, 李秀杰, 等. 介质柱型二维 Triangular 格子光子晶体的禁带特性[J]. 物理学报, 2010, 59(7): 5073-5077.
- [23] Fei H M, Wu M, Liu H Y, et al. Study on unidirectional transmission characteristics of waveguide heterostructure based on total reflection [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0323001.
费宏明, 武敏, 刘辉阳, 等. 基于全反射的波导异质结构单向传输性能研究[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0323001.
- [24] Fei H M, Zhang Q, Wu M, et al. Asymmetric transmission of light waves in a photonic crystal waveguide heterostructure with complete bandgaps [J]. Applied Optics, 2020, 59(14): 4416-4421.
- [25] Feng S, Wang Y Q. Unidirectional light propagation characters of the triangular-lattice hybrid-waveguide photonic crystals [J]. Optical Materials, 2013, 35(7): 1455-1460.
- [26] Shinkawa M, Ishikura N, Hama Y, et al. Nonlinear enhancement in photonic crystal slow light waveguides fabricated using CMOS-compatible process[J]. Optics Express, 2011, 19(22): 22208-22218.
- [27] Ngo T P, Kurdi M E, Checoury X, et al. Two-dimensional photonic crystals with germanium on insulator obtained by a condensation method [J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(24): 241112.
- [28] Zhang X Y, An W J, Zhang L, et al. Main factors for affecting complete forbidden band of 2-D air cylindrical photonic crystal [J]. Opto-Electronic Engineering, 2004, 31(3): 16-18.
张晓玉, 安卫军, 张磊, 等. 影响二维空气圆柱型光子晶体完全禁带的主要因素研究[J]. 光电工程, 2004, 31(3): 16-18.