

基于双环形谐振腔结构的二维光子晶体波分复用器

王周益,文化锋,徐薇,胡帆,李韵嘉,金轶群

(宁波大学 信息科学与工程学院,浙江 宁波 315211)

摘要:为了实现光波的波分复用功能并且提高光波的辐射效率,设计了一种基于双环形谐振腔结构的二维光子晶体波分复用器。首先,对光子晶体结构参数进行设计,通过谐振腔和微腔耦合选择不同频率的光波,设计光子晶体滤波器模型;然后,根据模式耦合理论确定主干波导与谐振腔之间的最佳耦合条件,设计波分复用器;最后,加入散射介质柱并调整两谐振腔之间的相对位置优化波分复用器,提高光波的透射率。实验结果表明:该复用器结构实现了对 1.562 μm 、1.544 μm 、1.451 μm 、1.436 μm 、1.366 μm 和 1.322 μm 这 6 种频率光波的波分复用,光波最大辐射效率能达到 96%,器件尺寸仅为 13.44 $\mu\text{m} \times 16 \mu\text{m}$ 。

关键词:光子晶体波导;波分复用;谐振腔;微腔

中图分类号:TN2562 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2022)02-0079-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.02.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Two-dimensional photonic crystal wavelength division multiplexer based on double ring resonator cavity structure

WANG Zhouyi, WEN Huafeng, XU Wei, HU Fan, LI Yunjia, JIN Yiqun

(College of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo Zhejiang 315211, China)

Abstract: In order to realize the wavelength division multiplexing function of light wave and improve the radiation efficiency of light wave, a two-dimensional photonic crystal wavelength division multiplexer based on double ring resonator cavity structure is designed. Firstly, the structural parameters of photonic crystal are designed. Through the coupling of resonator cavity and micro-cavity, the light waves with different frequencies are selected, and the photonic crystal filter model is designed. Then, according to the mode coupling theory, the optimal coupling conditions between the backbone waveguide and the resonator cavity are determined, and the wavelength division multiplexer is designed. Finally, the scattering dielectric column is added and the relative position between the two resonators is adjusted to optimize the wavelength division multiplexer to improve the transmittance of light wave. The experimental results show that the multiplexer structure realizes the improvement of 1.562 μm 、1.544 μm 、1.451 μm 、1.436 μm 、1.366 μm and 1.322 μm , the maximum radiation efficiency of light wave can reach 96% and the device size is only 13.44 $\mu\text{m} \times 16 \mu\text{m}$.

Key words: photonic crystals waveguides, wavelength division multiplexing, resonator cavity, micro-cavity

0 引言

20 世纪 80 年代,EBBESEN T W 等人^[1-2]提出了光子晶体的基本概念。光子晶体也称为光子禁带材

收稿日期:2019-03-23。

基金项目:国家自然科学基金项目(No.61371061)资助;宁波市自然科学基金项目(No.2018A610060)资助。

作者简介:王周益(1996—),男,硕士生,就读于宁波大学信息科学与工程学院电子与通信工程专业,主要从事无线通信、光子晶体材料和光学集成器件方面的研究工作。参加了光子晶体滤波器和出射光集束项目,在校期间连续三年获得二等学业奖学金。



料,它是由折射率不同的介质在空间中周期性排列的一种人造晶体。光子晶体具有 2 种特殊的性质:①光子禁带。根据此特性可以实现光子晶体波导、光子晶体分解器、光子晶体出射端辐射和光子晶体表面波等相关研究。②光子局域。根据此特性可以进行光子晶体滤波器和光子晶体光开关等光学器件研究^[3-5]。在全光网络领域,波分复用系统对光波的选频输出具有重要的意义。光子晶体的波分复用器通过波导、谐振腔和微腔耦合的方式来实现光波的选频功能^[7-10]。文献[11]根据光子晶体异质结构进行波分复用器的设计,通过改变介质柱的折射率使谐振腔的选择波长发生改变,

不同折射率的光子晶体阵列连接形成波分复用器整体结构,可实现多通道输出光波,但是这种结构选择光波长具有局限性,光波长控制在 $1.56\sim 1.59\ \mu\text{m}$,无法满足现在通信所需的频谱波段;文献[12]通过研究谐振腔中心介质柱的数量个数去调节出射光波波长,并通过耦合微腔选择单频光波从出射口辐射,但该结构设计较为复杂,通道之间距离过近导致多模干涉,从而影响了选择频率和辐射效率。上述基于谐振腔波分复用器的方案大多只采用了谐振腔的一个谐振模式,没有充分发挥谐振腔的多模特性。如果增加通道数量,相应的谐振腔的数量必须增加,导致器件的物理尺寸变大,不利于集成设计。为此,本文设计一种基于双环形谐振腔结构的二维光子晶体波分复用器。

1 基于双环形谐振腔结构的二维光子晶体波分复用器设计

1.1 光子晶体结构参数设计

在光子晶体结构的晶格选择上,由于三角晶格光子晶体更容易形成光子带隙且所产生的带隙频率范围更宽,因此本文在空气背景中按照三角晶格阵列周期性地插入一定折射率的圆形介质柱,构成完整的二维三角晶格光子晶体,其结构参数如表1所示。

表1 二维三角晶格光子晶体基本参数

介质柱 折射率	背景介质 折射率	晶格 常数/ μm	介质柱 半径/ μm
3.4	1	0.56	$0.2\times a=0.112$

本文应用 Rsoft 软件仿真光子晶体能带结构。光子晶体可以通过 TE 极化波形成带隙,归一化频率为 $0.28\sim 0.45\omega a/2\pi c$ 和 $0.57\sim 0.60\omega a/2\pi c$,光子晶体同样可以通过 TM 极化波形成带隙,归一化频率为 $0.82\sim 0.88\omega a/2\pi c$ 。为了使波分复用器拥有更大的频率选择范围,本文选择 TE 极化波下归一化频率 $0.28\sim 0.45\omega a/2\pi c$ 。其中, ω 表示光波频率,选择不同的晶格常数 a ,在仿真软件会生成不同的光波频率 ω ; c 表示光速。

通过 Rsoft 软件仿真求解可得出对应真空中传输的光波波长范围为 $1.23\sim 2.0\ \mu\text{m}$,覆盖了 E 带 ($1.360\sim 1.460\ \mu\text{m}$)、S 带 ($1.460\sim 1.530\ \mu\text{m}$)、C 带 ($1.530\sim 1.565\ \mu\text{m}$)、L 带 ($1.565\sim 1.625\ \mu\text{m}$) 和 U 带 ($1.625\sim 1.675\ \mu\text{m}$),因此本文设计的光子晶体器件结构能适用于大范围的波段。

1.2 光子晶体滤波器模型设计

1.2.1 滤波器模型

在 X 轴方向长度为 $13.44\ \mu\text{m}$,Y 轴方向长度为 $16\ \mu\text{m}$ 的完整二维三角晶格光子晶体中,Y=0 处去除 13 个介质柱形成主波导,以 $X=-a$ 为中心轴在主波导上、下方同时去除 20 个介质柱形成 2 个 8 字型的新滤波器。由于滤波器中心介质柱数目会影响透射谱峰值个数,经过多次试验,本文选取介质数目为 15 的谐振腔模型,该模型最适合滤波器模型的设计。

1.2.2 应用理论

在光子晶体缺陷态之间的耦合计算中,模式耦合理论是常用的研究方法,根据电磁场的功能分类可以将其分为 2 种不同的系统:传输光波的传输系统和形成耦合的耦合系统;与传输系统对应的电磁场模式为能量定向辐射模式,与耦合系统对应的电磁场模式则为缺陷耦合模式。在波分复用器结构中存在多个模式之间的耦合作用,需要分析不同耦合模式得到一种最适合光波传播的结构,文献[13]列出了具体模式耦合方程。方程中包括 2 个单模波导 (A_1, A_2), E 为它们的模场,假定它们的传播常数分别为 β_1, β_2 ,则 2 个波导中的模场表达式分别为

$$E_1=A_1(z)E_{10}(x,y)\exp[i(\omega t-\beta_1 z)] \quad (1)$$

$$E_2=A_2(z)E_{20}(x,y)\exp[i(\omega t-\beta_2 z)] \quad (2)$$

其中, z 为空间 z 轴坐标; t 为时间横轴坐标。运用洛伦兹对易关系,能够得到 $A_1(z)$ 和 $A_2(z)$ 的相互关系。

式(3)和式(4)中的 κ_{12} 和 κ_{21} 为耦合系数,这 2 个参数直接决定着波导 1 和波导 2 彼此相互作用的大小,从而推出耦合波方程为

$$\frac{dA_1(z)}{dz}=i\kappa_{21}A_2(z)\exp[i\omega t+i(\beta_1-\beta_2)z] \quad (3)$$

$$\frac{dA_2(z)}{dz}=i\kappa_{12}A_1(z)\exp[i\omega t+i(\beta_2-\beta_1)z] \quad (4)$$

1.3 波分复用器的设计与优化

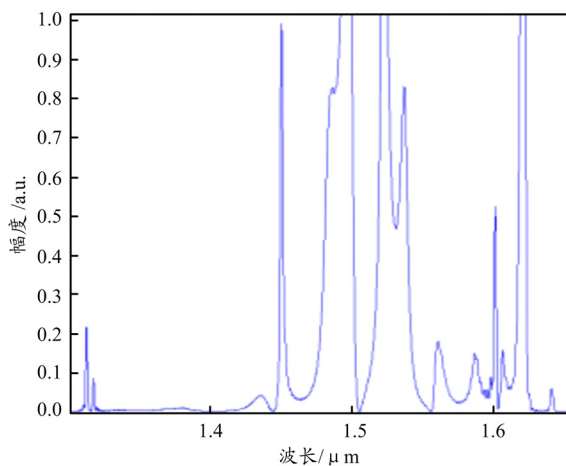
1.3.1 波分复用器的设计

本文基于双环形谐振腔设计波分复用器,结构图如图1所示,主要单元包括4个部分:主波导、下路波导、谐振腔和点微腔。在谐振腔6个节点处引入点微腔,并在1号节点 -120° 的方向上去除一个介质柱形成下路波导,在末端放置一个监控器绘制、记录通过滤波器结构光波的辐射效率和频谱,同样分别在2、3、4、5和6号节点 $60^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 60^\circ$ 和 120° 的方向上去除一个介质柱形成下路波导放置监控器监控光波数据。由于谐振腔中心介质柱半径会影响频谱的波长范围,本

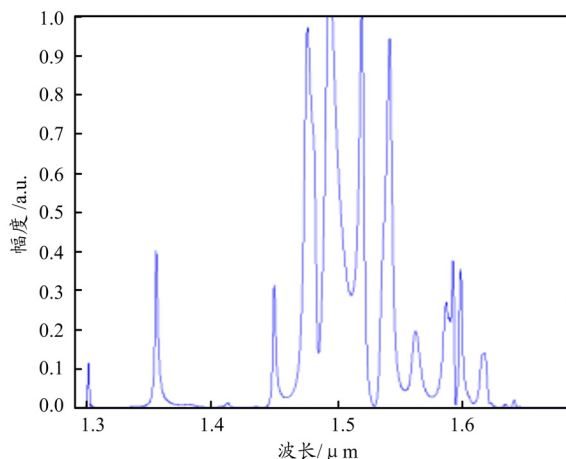
文选择将 X 轴上方谐振腔中心介质柱半径设置为 $0.09a$, 下方半径设置为 $0.18a$ 。

由于波分复用器的多个下路波导之间存在干涉效应, 单个下路波导输出频谱存在多个峰值。在有无微腔选频时 1 号下路波导频谱如图 2 所示。可以看出, 无微腔频谱分布在 $1.44 \sim 1.64 \mu\text{m}$

之间且峰值分布不均; 加入半径为 $0.476a$ 的微腔选频后, 1 号下路波导频谱分布在 $1.48 \sim 1.53 \mu\text{m}$ 之间且峰值明显。因此, 需要加入微腔结构提高光波的辐射效果^[14-15]。



(a) 无微腔频谱



(b) 有微腔频谱

图2 1号下路波导透射频谱

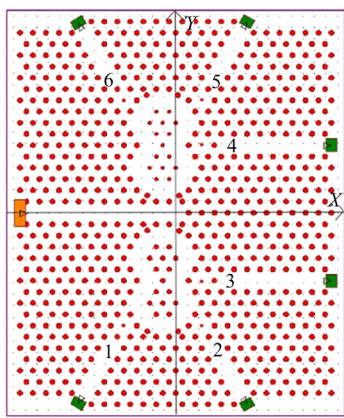


图1 波分复用器结构图

1.3.2 波分复用器的优化

为了提高谐振腔的透射效率, 本文在波分复用器的每个谐振腔内部都增加 4 个散射介质柱, 形成一个 8 字型的反射介质层, 如图 3 所示。在 X 轴上方谐振腔中 A 介质柱向 X 轴正方向移动 $0.04 \times a$, 向 Y 轴负方向移动 $0.04 \times \sqrt{3}a$ 到 A' 位置; 同理, B 、 C 和 D 点移动到 B' 、 C' 和 D' 位置。 X 轴下方谐振腔做相同操作。

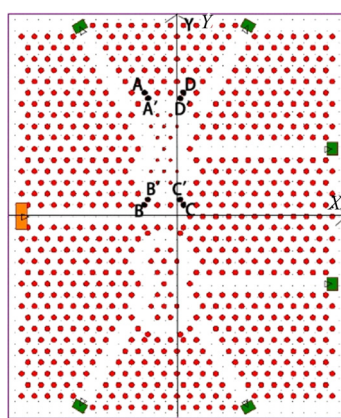
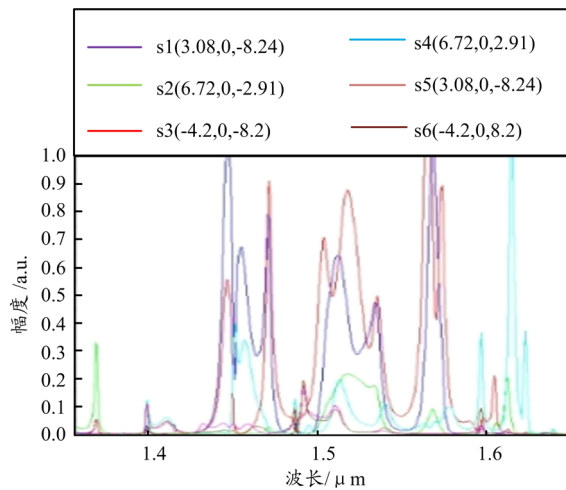


图3 增加散射介质柱的波分复用器

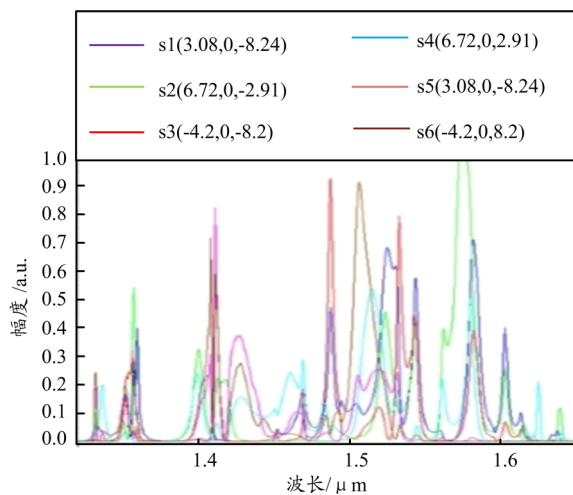
图 4 为有无散射介质柱时的波分复用器频谱图。其中, $s1 \sim s6$ 分别代表 6 个不同坐标(单位: μm)的光源监视器。可以看出, 与未加入散射介质柱的波分复用器相比, 加入散射介质柱后的波分复用器各个下路波导频谱分布更加清晰、峰值更加明显, 既降低了光波在谐振腔中的损耗, 又使光波的透射率增强^[16]。

2 波分复用器的性能优化

增加散射介质柱的波分复用器结构通过光波后呈现的频谱图中, 各个通道仍然存在主要波峰分布不清晰和频谱范围窄的问题, 本文通过调节微腔介质的半径、相对距离进行优化。由于点微腔介质柱半径会影响下路波导出射频率和辐射效率, 因此先分别对 1~6 号节点微腔介质柱进行调节。经过多次试验, 当设置 1~6 号微腔介质柱半径依次为 $0.0952a$ 、 $0.029a$ 、 $0.406a$ 、



(a) 加入散射介质柱频谱



(b) 未加入散射介质柱频谱

图4 波分复用器频谱

0、0.0384 a 以及 0.064 a 时,波分复用器结构中的谐振腔与微腔耦合效率最高。

由于当模式耦合通道间位置距离较近时会产生干涉影响,因此谐振腔上、下对称模式的波分复用器结构选频效率不高、透射率受影响,需要对波分复用器两谐振腔相对位置进行调整以达到最佳的选频效率。以 Y 轴为中心轴,上、下两谐振腔分别每次沿 X 轴正负方向移动相同距离并通过监控器测量频谱数据,不同上、下两谐振腔相对距离分别为 $2a$ 、 $4a$ 、 $6a$ 、 $8a$ 和 $10a$ 时波分复用器谐振腔的结构图如图 5 所示。

上、下两谐振腔之间的相对距离会改变多个出射口辐射光波的辐射效率,并且对辐射光波的频率范围产生影响,比较不同出射口光波的辐射效率可以得到波分复用器结构辐射波长与效率之间的关系,如图 6 所示。可以看出,谐振腔相对距离在 $10a$ 的辐射效率最高,在输出波长处于 $1.3215\ \mu\text{m}$ 、 $1.3664\ \mu\text{m}$ 、 $1.4361\ \mu\text{m}$ 、 $1.4506\ \mu\text{m}$ 、 $1.5444\ \mu\text{m}$ 和 $1.5618\ \mu\text{m}$ 时辐射效率分别

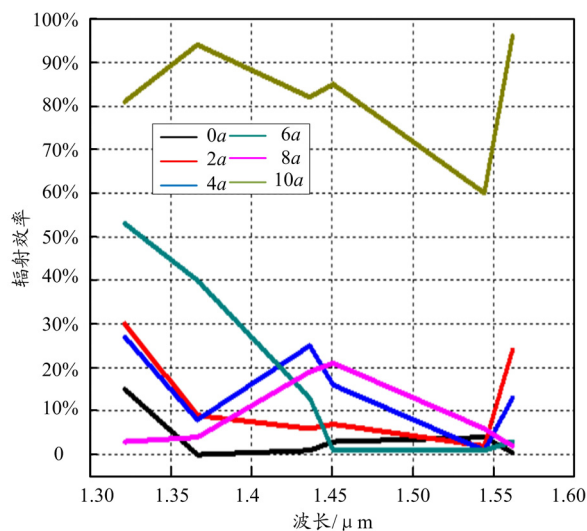


图6 辐射波长和辐射效率关系图

为 81%、94%、82%、85%、60% 和 96%;又因为器件结构尺寸限制为 $13.44\ \mu\text{m} \times 16\ \mu\text{m}$,当相对距离达到 $10a$ 时出射通道刚好达到器件的边界处,完全符合波分复用器的结构设计,最大程度地减小了多通道之间的干涉效应,从而获得最高的辐射效率。

不同出射口波导的光场图如图 7 所示。在入射光通过波分复用器时,波长在 $1.5618\ \mu\text{m}$ 、 $1.4506\ \mu\text{m}$ 、 $1.3664\ \mu\text{m}$ 、 $1.3215\ \mu\text{m}$ 、 $1.4361\ \mu\text{m}$ 和 $1.5444\ \mu\text{m}$ 的光波分别从 1~6 号下路波导辐射出,辐射效率为 60%~96%,因此选用上、下谐振腔相对距离为 $10a$ 的波分复用器结构最适合进行波分复用。

本文采用时域有限差分法计算上、下相对谐振腔相对距离为 $10a$ 的新型波分复用器的频谱图,如图 8 所示。可以看出, $10a$ 的光波峰值分布范围大,通道之间的干涉效应小,各通道辐射效率高,能够有效实现波分复用功能。

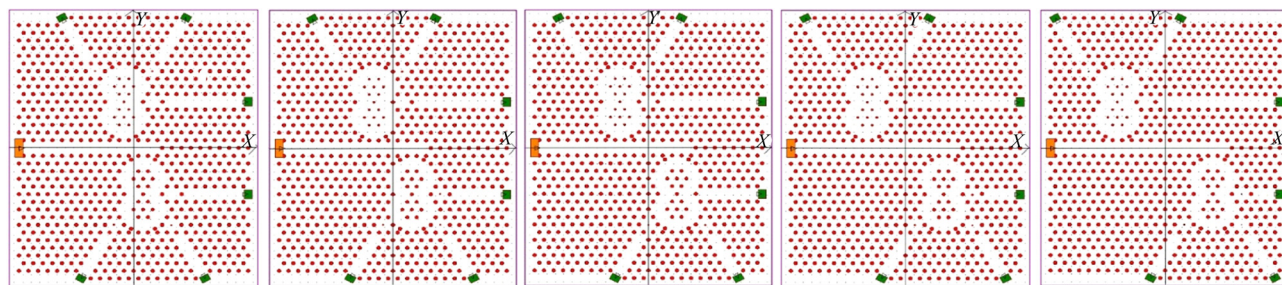
(a) 相对距离为 $2a$ (b) 相对距离为 $4a$ (c) 相对距离为 $6a$ (d) 相对距离为 $8a$ (e) 相对距离为 $10a$

图5 谐振腔不同相对距离结构图

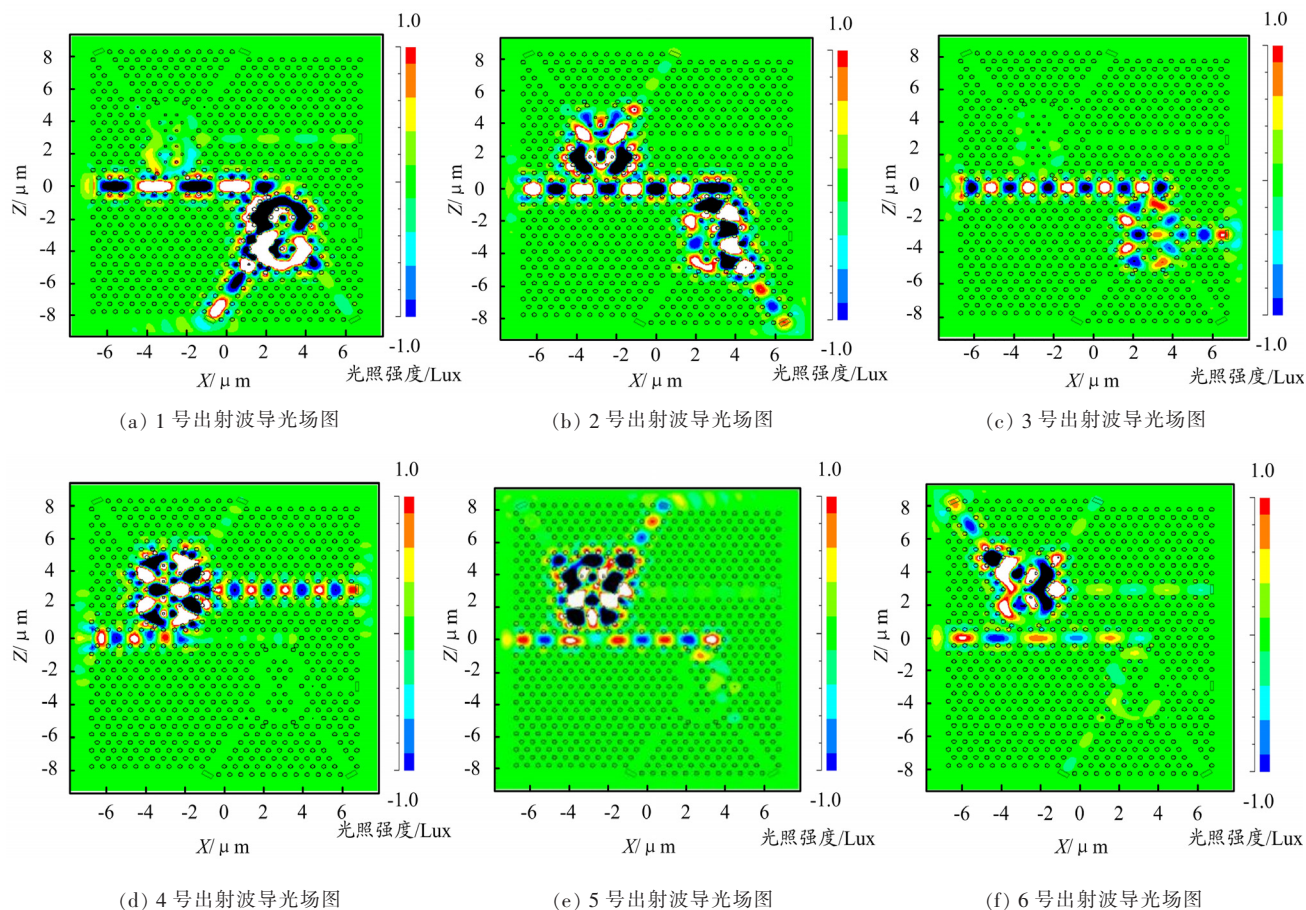
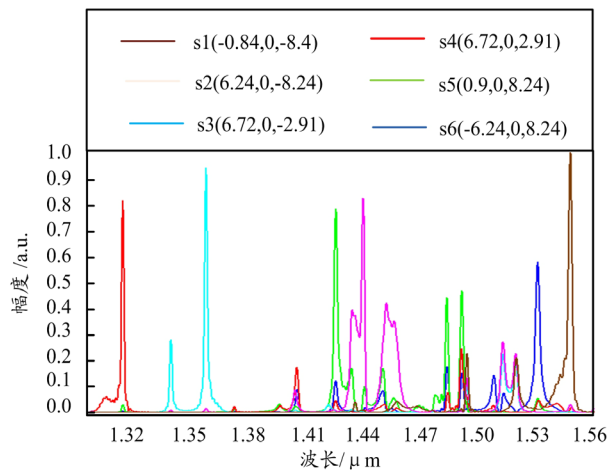


图7 波分复用器各出射口光场图

图8 谐振腔相对距离为 $10a$ 波分复用器的频谱图

3 结束语

基于耦合模理论,本文在二维光子晶体中引入线缺陷作为主波导和输出波导,引入谐振腔和点微腔作为滤波选频元件,设计出了一种新型的二维光子晶体波分复用器。

通过加入散射介质柱、研究谐振腔相对距离对滤波的影响,优化光子晶体波分复用器的结构,最终实现了对 $1562\text{ }\mu\text{m}$ 、 $1544\text{ }\mu\text{m}$ 、 $1451\text{ }\mu\text{m}$ 、 $1436\text{ }\mu\text{m}$ 、 $1366\text{ }\mu\text{m}$ 和 $1322\text{ }\mu\text{m}$ 这 6 种频率光波的波分复用,光波最大辐射效率达到 96%,且器件尺寸较小,这种结构在光子晶体集成研究领域具有很高的价值。

参考文献:

- [1] EBBESEN T W, LEZEC H J, GHAEMI H F, et al. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays[J]. Nature, 1998, 81(16): 667-669.
- [2] LEZEC H J, DEGIRON A, DEVAUX E, et al. Beaming light from a subwavelength aperture[J]. Science, 2001, 65(15): 820-822.
- [3] MARTIN-MORENO L, GARCIA-VIDAL F J, LEZEC H J, et al. Theory of highly directional emission from a single subwavelength aperture surrounded by surface corrugations [J]. Physical Review Letters, 2003, 90(16): 1671-1672.
- [4] FEHREMBACH A L, ENOCH S, SENTENAC A. Highly directive light sources using two-dimensional photonic crystal Slabs [J]. Applied Physics Letters, 2001, 79(26): 4280-4281.
- [5] STEFAN E, BORIS G, GERARD T. Enhanced emission with angular

confinement from photonic crystals [J]. Applied Physics Letters, 2002, 81 (9): 1588–1590.

[6] IRFAN B, HUMAYRA C, EKMELE O, et al. Highly directive radiation from sources embedded inside photonic crystals[J]. Applied Physics Letters, 2003, 83 (16): 3263–3265.

[7] GUVEN K, OZBAY E. A plain photonic crystal for generating directional radiation from embedded sources [J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2007, 9(3): 239–242.

[8] KRAMPER P, AGIO M, SOUKOULIS C M, et al. Highly directional emission from photonic crystal waveguides of subwavelength width [J]. Physical Review Letters, 2004, 92 (11): 1139–1140.

[9] ESTEBAN M, GARCIA-VIDAL F J, MARTIN-MORENO L. Enhanced transmission and beaming of light via photonic crystal surface modes [J]. Physical Review B, 2004, 69(12): 1214–1215.

[10] CHII-CHANG C, PERTSCH T, ILIEW R, et al. Directional emission

from photonic crystal waveguides[J]. Optics Express, 2006, 14(6): 2423–2428.

[11] 杨春云,徐旭明. 一种基于光子晶体异质结构的新型多通道波分复用器[J]. 发光学报,2010,31(5):757–761.

[12] 董小伟,倪品品,刘文楷. 四通道光子晶体解波分复用器的研究[J]. 激光与光电子学进展,2016,53(3):68–73.

[13] 刘莲香. 多信道波分-模分混合复用/解复用器的性能分析[D]. 南京:南京邮电大学,2020.

[14] 周兴平,疏静,卢斌杰,等. 基于三角晶格光子晶体谐振腔的双通道解波分复用器[J]. 光学学报,2013,33(1):211–215.

[15] 李未. 光子晶体波导与微腔耦合的三通道波分复用器 [J]. 激光杂志,2014,35(5):5–7.

[16] 李汉卿. 二维光子晶体谐振腔波导特性分析 [D]. 秦皇岛:燕山大学,2015.