

# 大角度偏振无关硅膜光子晶体宽带滤波器

陈志勇<sup>1</sup> 郝小龙<sup>1</sup> 郑彦敏<sup>1</sup> 陈曦曜<sup>2</sup> 蒋俊贞<sup>1</sup> 邱怡申<sup>1</sup> 强则焯<sup>1</sup>

<sup>1</sup>福建师范大学激光与光电子技术研究所, 福建省光子技术重点实验室,  
医学光电科学与技术教育部重点实验室, 福建 福州 350007  
<sup>2</sup>闽江学院物理学与电子信息工程系, 福建 福州 350108

**摘要** 提出一种基于超低折射率如聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)为衬底的大角度偏振无关蜂窝状空气孔型的二维硅基光子晶体宽带滤波器。结合色散关系和严格耦合波理论确定宽带工作区,分析了入射光垂直入射时硅膜厚度及空气孔径对器件性能的影响,得出适合于 1.55  $\mu\text{m}$  通信波长的一组优化参数,讨论了非垂直入射及偏振对器件性能的影响。结果表明,垂直入射时,可以得到透射率大于 98%、110 nm 以上的带宽;非垂直入射时,两偏振的共振带宽将随角度增加而减小,在入射角为 18°时,透射率大于 98%的共同带宽还能覆盖光通信的整个 C 波段(1525~1560 nm)。

**关键词** 光通信;光子晶体;宽带滤波器;导模共振;严格耦合波理论

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0305002

## Large-Angle Polarization-Independent Broadband Filters Based on Silicon Photonic Crystal Slabs

Chen Zhiyong<sup>1</sup> Hao Xiaolong<sup>1</sup> Zheng Yanmin<sup>1</sup> Chen Xiyao<sup>2</sup>

Jiang Junzhen<sup>1</sup> Qiu Yishen<sup>1</sup> Qiang Zexuan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Fujian Provincial Key Laboratory for Photonics Technology, Key Laboratory of Optoelectronic Science and Technology for Medicine of Ministry of Education, Institute of Laser and Optoelectronics Technology, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China*

<sup>2</sup>*Department of Physics and Electronic Information Engineering, Minjiang University, Fuzhou, Fujian 350108, China*

**Abstract** A large-angle polarization-independent broadband guided-mode-resonant filter is proposed based on two-dimensional honey-comb silicon photonic crystal slab with ultralow refractive-index substrate material like polymethylmethacrylate (PMMA). The broadband operating range is determined firstly based on the dispersion relationship and rigorous coupled wave analysis (RCWA). Then the impact of silicon membrane thickness and air hole size on the performance of proposed device under surface normal incidence is investigated and an optimal set of physical parameters for 1.55  $\mu\text{m}$  communication window is obtained correspondingly. Its performance affected by oblique incidence and polarization is also analyzed. It shows that broad bandwidth over 110 nm can be obtained with greater than 98% normalized transmittance under surface normal incidence. The common bandwidth of two polarizations will reduce with the increase of incident angle. But it can still cover the whole C-band window (from 1525 nm to 1560 nm) with over 98% normalized transmittance when the angle reaches 18°.

**Key words** optical communications; photonic crystals; broadband filters; guided mode resonance; rigorous coupled wave analysis

**OCIS codes** 230.5298; 230.7408; 310.6628

**收稿日期**: 2012-08-21; **收到修改稿日期**: 2012-11-12

**基金项目**: 福建省科技厅基金(2012J01253)资助课题。

**作者简介**: 陈志勇(1988—),男,硕士研究生,主要从事光子晶体方面的研究。E-mail: chenzhiyong247@yahoo.cn

**导师简介**: 强则焯(1975—),男,研究员,主要从事高功率激光器、光通信及纳米光子集成等方面的研究。

E-mail: qiangzx@fjnu.edu.cn(通信联系人)

# 1 引 言

光滤波器具有对一定波长范围内带通或带阻,而对带外波长带阻或带通的特性,使其在诸如高光谱成像、太阳能电池、光通信系统及光传感等领域具有广泛应用。随着这些光电系统的迅猛发展,它们对光滤波器提出了许多新的要求,如小型化、低成本、易集成及批量生产等。通常,它们可以通过光纤光栅<sup>[1,2]</sup>和多层介质薄膜技术<sup>[3,4]</sup>实现,前者难以实现小型化及集成化的要求,而后者尽管可以在尺寸上有所减小,但对每层薄膜的参数如折射率、厚度等都有严格的要求,制作过程复杂且成本高。

另一方面,光子晶体由于其独特的可在波长尺度内控光的能力给超小型光集成带来了希望。到目前为止,基于光子晶体设计的光滤波器主要有基于带隙缺陷模<sup>[5,6]</sup>和导模共振<sup>[7~9]</sup>两大类型。一般而言,前者需要高折射率对比度材料以获取足够大的光子晶体带隙,且和传统波导封装耦合时损耗大;而后者只要满足相位匹配条件的导模即可以和泄露模相互耦合,无需带隙限制,进而使选择材料更为广泛,一般仅需一层光子晶体结构即可实现窄带<sup>[7,10]</sup>和宽带<sup>[11~13]</sup>的滤波功能。因此,近年来基于导模共振机理的滤波器颇受青睐,其根据平面内介质周期分布的不同,可分为一维<sup>[7,9]</sup>和二维<sup>[8,10~13]</sup>两种。前者具有很强的偏振和角度相关性;而后者尽管在入射光垂直表面入射时呈偏振无关性,但在其他角度时依然表现出很强的偏振相关性。对此,人们提出了多种解决方案,如利用二元光栅<sup>[14~16]</sup>和堆叠光栅<sup>[17]</sup>等。然而到目前为止,见诸报道的大多是关于

窄带滤波器及反射器,而对于导模共振型的偏振无关大角度宽带滤波器讨论甚少。

因此,进一步探讨大角度偏振无关的导模共振型宽带滤波器显得尤为重要。本文以超低折射率材料如聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)为衬底,硅薄膜为光栅层,基于蜂窝晶格二维平板光子晶体设计了这种新型的近红外宽带滤波器,运用严格耦合理论(RCWA)分析讨论了入射光垂直于光栅表面情况下光栅层厚度及空气孔径大小对带宽大小及光谱形状的影响,在得出最佳参数后讨论了非垂直入射及不同偏振态下的光谱特性。

# 2 结构设计及理论分析

图 1(a)为基于二维蜂窝格子空气孔型二维平板光子晶体宽带滤波器的示意图。图中,空气孔完全嵌入硅平板波导以形成光栅层,衬底为低折射率材料,如聚合物 PMMA,以避免自支撑膜引起的易破裂问题<sup>[18]</sup>。对于近红外波段,硅和 PMMA 两种材料都是透明传输的,折射率分别为 3.48 和 1.14。研究表明,基于导模共振机理的窄带滤波器的性能可以很好地由其相应的色散关系曲线预测,例如在入射光垂直入射时对应色散关系曲线中  $\Gamma$  点上的某一归一化频率值<sup>[8,10]</sup>,而对于宽带滤波器一般解释为由不同谐振点模式叠加的结果<sup>[13]</sup>,且一般需要相对较大的空气孔径<sup>[11]</sup>。此外,谐振模的归一化频率下限为光栅层波导折射率的倒数乘以单位  $a/\lambda$ <sup>[19]</sup>,  $a$  为晶格常数,  $\lambda$  为波长。本结构谐振模的归一化频率下限取  $0.287a/\lambda$ , 空气孔径  $r$  为  $0.36a$ ,

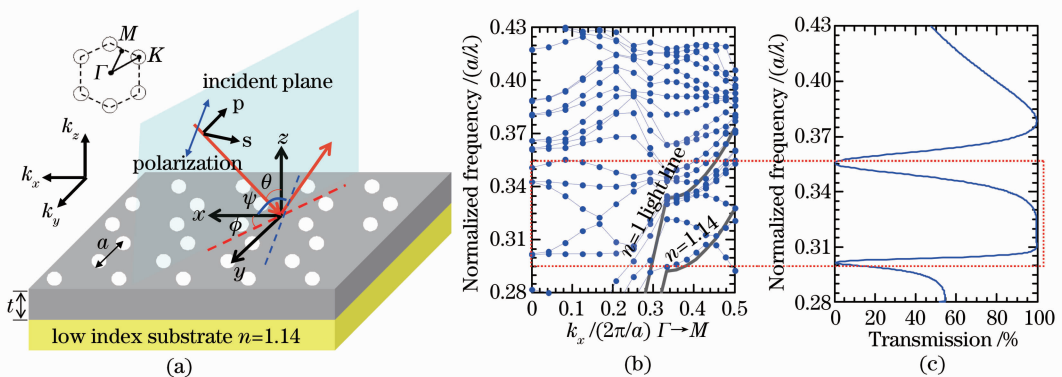


图 1 (a) 二维蜂窝晶格光子晶体宽带导模共振滤波器的结构示意图, (b) 相应色散曲线和 (c) 归一化透射光谱, 其中硅薄膜厚度  $t$ 、孔径大小  $r$  以及硅薄膜和衬底的折射率分别为  $0.48a$ ,  $0.36a$ ,  $3.48$  和  $1.14$

Fig.1 (a) Schematic diagram of the proposed broadband guided-mode resonance filter based on 2D honeycomb-lattice photonic crystal slab, (b) corresponding dispersion curves and (c) normalized transmission spectra where the silicon thickness, air hole radius, and the refractive indices of silicon and low-index substrate are  $0.48a$ ,  $0.36a$ ,  $3.48$ , and  $1.14$ , respectively

硅薄膜厚度为  $0.48a$ ，其中  $a$  为晶格常数。对于上述参数，基于平面波展开法(PWE)结合超原胞<sup>[8]</sup>和RCWA法<sup>[20]</sup>分别求得对应的色散关系和归一化传输透射谱，如图1(b)和1(c)所示。恰巧，在谐振点  $0.351a/\lambda$  和  $0.302a/\lambda$  (归一化频率)之间存在一个宽带透射区，如图中阴影所示，透射率  $T$  在 98% 以上。

### 3 数值模拟及讨论

对于上述讨论的两谐振点的中心频率为  $0.3265a/\lambda$ ，考察以  $1.55 \mu\text{m}$  通信波长为设计滤波器的中心波长，相应的晶格常数、空气孔径及硅薄膜厚度分别设定为  $0.5, 0.18, 0.24 \mu\text{m}$ 。须指出的是，图1(c)中可以看出，该宽带滤波器边缘的高反区还比较窄，其主要受单层硅平板法布里-珀罗(Fabry-Perot)振荡的背景调制<sup>[8]</sup>，其可以通过多膜层方式，如光栅层部分写入硅波导<sup>[14~16]</sup>及级联光子晶体平板解决<sup>[21]</sup>。简便起见，依然让光栅层全部嵌入硅平板波导以分析现有结构下设计的宽带滤波器的大角度及偏振特性；设计的平面尺寸为无限大，这样可以同样运用RCWA进行数值模拟分析。

#### 3.1 垂直入射

由于实际制作中存在膜厚和孔径的偏差，因此，首先讨论垂直入射情况下上述设定参数的变化对器

件性能的影响，如图2所示。图2(a)为硅膜厚  $t$  的归一化透射强度等高图，其中  $a$  和  $r$  分别为  $0.5 \mu\text{m}$  和  $0.36a$ ，硅膜厚度从  $0.2 \mu\text{m}$  变化到  $0.3 \mu\text{m}$ 。由图2(a)可见，厚度介于区间  $[0.2 \mu\text{m}, 0.255 \mu\text{m}]$ ，可以很容易获得  $1.55 \mu\text{m}$  波段透射率超过 90% 的带宽，在厚度比较小时，如  $0.22 \mu\text{m}$ ，带宽谱中会存在一个凹陷而非平顶型。随着厚度  $t$  的增加，这种凹陷会消失，但谱宽变窄，且谱宽的中心波长红移。这主要是因为上述导模共振点随厚度的增加，相应的短波长红移的速度快于长波长红移的速度。为获取透射率 98% 以上、带宽 113 nm 以上且谱平坦的滤波器，不妨取厚度  $0.24 \mu\text{m}$  为最佳值，进而考察空气孔半径  $r$  对归一化透射谱的影响，如图2(b)所示。显然，只要  $r$  介于孔径区间  $[0.24a, 0.40a]$ ，同样很容易获得  $1.55 \mu\text{m}$  波段透射率超过 92% 的带宽。随着空气孔半径  $r$  的增加，谱宽的中心波长蓝移，谱宽先增加后减小， $0.36a$  值是其最佳值；此外，在  $r$  小于  $0.32a$  时，谱线局部也会出现上述的凹陷。这主要是因为随着空气孔半径的增加，导模共振点所对应的长波长蓝移的速度快于短波长蓝移的速度。由此，为了保持 98% 以上透射率及 113 nm 的平坦带宽，选取晶格常数  $a$ 、空气孔半径  $r$  和厚度  $t$  分别为  $0.5 \mu\text{m}$ 、 $0.36a$  和  $0.24 \mu\text{m}$ ，并用于下面的非垂直及偏振的情况分析。

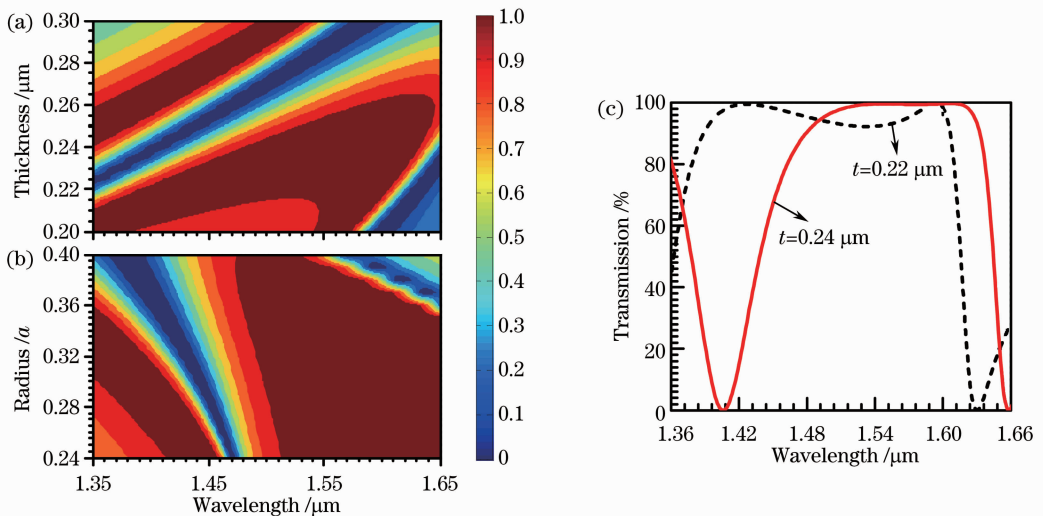


图2 (a)垂直入射时不同硅膜厚度  $t$  的归一化透射强度等高图,  $a=0.5 \mu\text{m}$ ,  $r=0.36a$ , (b)垂直入射时不同空气孔径  $r$  的归一化透射强度等高图,  $a=0.5 \mu\text{m}$ ,  $t=0.24 \mu\text{m}$ , (c)两种不同厚度  $t$  垂直入射时的归一化透射谱,  $a=0.5 \mu\text{m}$ ,  $r=0.36a$   
 Fig.2 Transmission intensity contour plots of proposed broadband filter under surface normal incidence (a) with different silicon thicknesses  $t$  when  $a=0.5 \mu\text{m}$ ,  $r=0.36a$ , (b) with different air hole radii when  $a=0.5 \mu\text{m}$ ,  $r=0.24 \mu\text{m}$  and (c) normalized transmission spectra with two different silicon thicknesses when  $a=0.5 \mu\text{m}$ ,  $r=0.36a$

#### 3.2 非垂直入射和偏振

如图1(a)所示，为了便于后面的分析讨论，定

义了入射光的方向由两个极角来确定，即余纬角  $\theta$  (法线方向到入射光方向的角度) 和方位角  $\phi$  ( $x$  轴

正方向到入射光线正投影到  $x-y$  平面的夹角)。入射光线的偏振( $E$  矢量)角  $\phi$  则定义为  $x$  轴正方向到偏振方向投影到  $x-y$  平面的夹角。根据传统的定义,  $E$  矢量垂直或平行于入射光线和反射光线所决定的平面分别代表  $s$  偏振或  $p$  偏振。例如,  $\phi = \phi$  表示  $p$  偏振(类  $TM$  模),  $\phi = \phi + 90^\circ$  表示  $s$  偏振(类  $TE$  模)。由于蜂窝状晶格的高度对称性, 这里只考虑了两种情况: 入射光线平行于  $x-z$  平面(即  $\phi = 0^\circ$ , 对应于倒格矢空间的  $\Gamma M$  方向, 改变  $\theta$ ) 和入射光线平行于  $y-z$  平面(即  $\phi = 90^\circ$ , 对应于倒格矢空间的  $\Gamma K$  方向, 改变  $\theta$ )。依然只关心  $1.55 \mu\text{m}$  中心波长附近的谱线, 带宽起点为短波长, 带宽终点为长波长。

首先讨论入射光线平行于  $x-z$  平面的情况, 改变不同的入射角  $\theta$ , 结果如图 3(a) 和 3(b) 所示, 它们分别为  $p$  偏振和  $s$  偏振下不同入射角  $\theta$  的归一化透射强度等高图。显然, 不论何种偏振态, 光谱带宽都会随着入射角  $\theta$  的增大而减小。对于  $p$  偏振, 随着

入射角  $\theta$  的增大, 短波长红移, 长波长蓝移, 且短波长红移的速度快于长波长蓝移的速度, 在入射角度小于  $16^\circ$  时, 长波长基本上不移动。而对于  $s$  偏振, 尽管随着入射角  $\theta$  的增大, 短波长红移, 长波长蓝移, 但不同于  $p$  偏振, 其长波长蓝移的速度快于短波长红移的速度, 并且  $s$  偏振带宽变窄的速度比  $p$  偏振的快, 入射角  $\theta$  的变化对  $s$  偏振的影响比较大。正由于两种偏振态的漂移速度相反, 它们将在一定波长范围内拥有相同带宽, 图 3(c) 为不同入射角  $\theta$  下, 两种偏振态拥有的共同带宽。从图 3(c) 可知, 随着入射角  $\theta$  的增加, 共同带宽将逐渐减少, 在入射角小于  $7^\circ$  时, 带宽减小速度缓慢, 基本保持不变, 如对于透射率为  $98\%$  和  $90\%$  时, 带宽将达  $110 \text{ nm}$  和  $151 \text{ nm}$ , 之后带宽将随着角度增加而下降。需要指出的是, 当入射角  $\theta$  增加到  $18^\circ$  时, 其归一化透射率大于  $98\%$  的共同带宽还能达到  $66 \text{ nm}$  ( $1523 \sim 1589 \text{ nm}$ ), 覆盖了光通信的整个 C 波段( $1525 \sim 1560 \text{ nm}$ )。

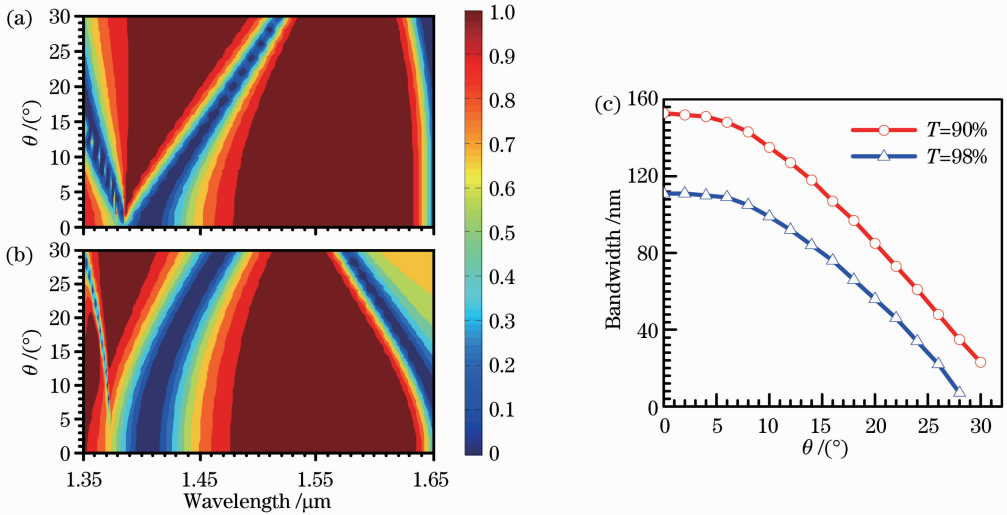


图 3 入射光位于  $x-z$  平面, 不同的入射角  $\theta$  的归一化透射强度等高图, 其中  $a=0.5 \mu\text{m}$ ,  $r=0.36a$ ,  $t=0.24 \mu\text{m}$ , (a)  $p$  偏振, (b)  $s$  偏振, (c)  $p$  偏振和  $s$  偏振拥有的共同带宽随角度的变化

Fig. 3 Transmission intensity contour plots for incident beam lay within  $x-z$  plane (along  $\Gamma M$  direction) with (a)  $p$  polarization and (b)  $s$  polarization, (c) shared bandwidth changes with the incident angle where  $a$ ,  $r$  and  $t$  are  $0.5 \mu\text{m}$ ,  $0.36a$  and  $0.24 \mu\text{m}$ , respectively

接着讨论入射光线平行于  $y-z$  平面的情况, 改变不同的入射角  $\theta$ , 其结果如图 4 所示。类似地, 两种偏振下的带宽也会随着入射角  $\theta$  的增大而逐渐变窄。对于  $p$  偏振情况, 如图 4(a) 所示, 随着入射角  $\theta$  的增大, 短波长红移, 长波长基本不移动。而对于  $s$  偏振情况, 如图 4(b) 所示, 随着入射角  $\theta$  的增大, 短波长红移, 长波长蓝移, 短波长红移的速度慢于长波长蓝移的速度。因此, 也可以同样地得到两种不同偏振态的共同带宽, 如图 4(c) 所示。从图 4(c) 中可

知, 随着入射角  $\theta$  的增加, 共同带宽将逐渐减少, 在入射角小于  $5^\circ$  时, 带宽减小速度缓慢, 基本保持不变, 如对于透射率为  $98\%$  和  $90\%$  时, 带宽将达  $108 \text{ nm}$  和  $150 \text{ nm}$ , 之后带宽将随着角度增加而下降。需要指出的是, 当入射角  $\theta$  增加到  $18^\circ$  时, 其归一化透射率大于  $98\%$  的共同带宽还能达到  $58 \text{ nm}$  ( $1523 \sim 1581 \text{ nm}$ ), 覆盖了光通信的整个 C 波段 ( $1525 \sim 1560 \text{ nm}$ )。

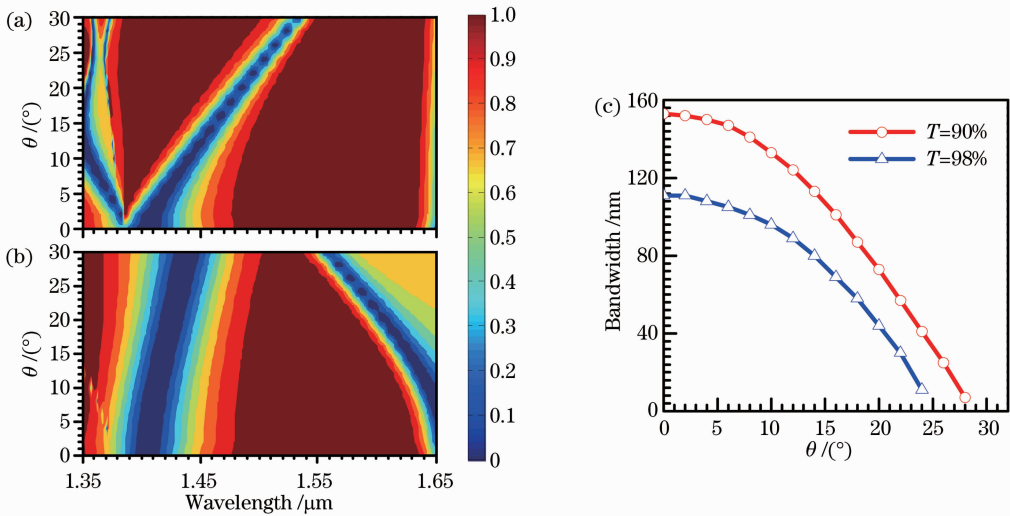


图4 入射光位于  $y-z$  平面,不同的入射角  $\theta$  的归一化透射强度等高图,其中  $a=0.5 \mu\text{m}$ ,  $r=0.36a$ ,  $t=0.24 \mu\text{m}$ ,  
(a) p 偏振, (b) s 偏振, (c) p 偏振和 s 偏振拥有的共同带宽随角度变化

Fig. 4 Transmission intensity contour plots for incident beam lay within  $y-z$  plane (along  $GK$  direction) with (a) p polarization and (b) s polarization. (c) shared bandwidth changes with the incident angle where  $a$ ,  $r$  and  $t$  are  $0.5 \mu\text{m}$ ,  $0.36a$  and  $0.24 \mu\text{m}$ , respectively

## 4 结 论

设计了基于超低折射率材料 ( $n=1.14$ ) 为衬底的蜂窝状空气孔型二维硅基平板光子晶体导模共振宽带滤波器,利用 RCWA 分析讨论了垂直和非垂直及不同偏振情况下归一化传输谱的变化关系。对于  $1.55 \mu\text{m}$  通信波长,晶格常数  $a$  取  $0.5 \mu\text{m}$ ,空气孔径为  $0.36a$ ,硅薄膜厚度为  $0.24 \mu\text{m}$  时,在入射角小于  $5^\circ$  时,归一化透射率大于  $98\%$  的两种偏振的共同带宽为  $108 \text{ nm}$ ,随着入射角度的进一步增加,共同带宽将减小,在入射角为  $18^\circ$  时,归一化透射率大于  $98\%$  的共同带宽为  $58 \text{ nm}$ ,还可以覆盖整个 C 波段。

## 参 考 文 献

- 1 H. Sakata, S. Suzuki, H. Ito *et al.*. Long-period fiber-grating-based bandpass filter using self-aligned absorptive core mode blocker[J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2007, **14**(2): 93~96
- 2 Sun Guodan, Wang Rong, Pu Tao *et al.*. Design and implementation of comb filter with arbitrary channel spacing based on fiber Bragg gratings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(3): 0305007
- 孙幅丹,王 荣,蒲 涛等.任意波长间隔的光纤光栅梳状滤波器设计与实现[J]. *中国激光*, 2012, **39**(3): 0305007
- 3 S. A. Kumar, C. L. Nagendra, H. G. Shanbhogue *et al.*. Near-infrared bandpass filters from Si/SiO<sub>2</sub> multilayer coatings [J]. *Opt. Engng.*, 1999, **38**(2): 368~380
- 4 Zhang Juan, Yu Shuai, Guo Sen *et al.*. Design of flat-top polarization filters based on one-dimensional photonic crystal theory[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0105005
- 张 娟,于 帅,郭 森等.基于一维光子晶体理论的平顶偏振

- 滤波器设计[J]. *中国激光*, 2011, **38**(1): 0105005
- 5 R. Costa, A. Melloni, M. Martinelli. Bandpass resonant filters in photonic-crystal waveguides [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(3): 401~403
- 6 Jiang Junzhen, Qiang Zexuan, Xu Xiaofu *et al.*. Air-hole type photonic crystal add-drop filters based on total-internal-reflection ring resonators[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(5): 0505001
- 蒋俊贞,强则焯,许晓斌等.基于内全反射微环空气孔型光子晶体光分插滤波器[J]. *中国激光*, 2012, **39**(5): 0505001
- 7 R. Magnusson, S. S. Wang. New principle for optical filters [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **61**(9): 1022~1024
- 8 S. Fan, J. D. Joannopoulos. Analysis of guided resonances in photonic crystal slabs[J]. *Phys. Rev. B*, 2002, **65**(23): 235112
- 9 Wang Zhenhua, Wu Yonggang, Ling Leijie *et al.*. Guided-mode resonance spectral characteristics in tunable orthogonal grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0505002
- 王振华,吴永刚,凌磊婕等.正交双光栅结构的导模共振光谱特性[J]. *光学学报*, 2011, **31**(5): 0505002
- 10 Z. Qiang, H. Yang, L. Chen *et al.*. Fano filters based on transferred silicon nanomembranes on plastic substrates [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **93**(6): 061106
- 11 O. Kilic, S. Kim, W. Suh *et al.*. Photonic crystal slabs demonstrating strong broadband suppression of transmission in the presence of disorders [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(23): 2782~2784
- 12 Z. Qiang, H. Yang, S. Chuwongin *et al.*. Design of Fano broadband reflectors on SOI[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2010, **22**(15): 1108~1110
- 13 S. Boutami, B. B. Bakir, H. Hattori *et al.*. Broadband and compact 2-D photonic crystal reflectors with controllable polarization dependence [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(7): 835~837
- 14 A. L. Fehrembach, A. Talneau, O. Boyko *et al.*. Experimental demonstration of a narrowband, angular tolerant, polarization independent, doubly periodic resonant grating filter [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(15): 2269~2271
- 15 H. Wu, J. Hou, D. Gao *et al.*. A multilayered configuration

- broadband polarization insensitive reflector utilizing a multi-subpart profile grating structure[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2010, **27**(7): 074216
- 16 D. Wu, X. Sui, J. Yang *et al.*. Binary blazed grating-based polarization-independent filter on silicon on insulator[J]. *Front. Optoelectron.*, 2012, **5**(1): 78~81
- 17 D. Zhao, H. Yang, Z. Ma *et al.*. Polarization independent broadband reflectors based on cross-stacked gratings[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(10): 9050~9055
- 18 M. Schmidt, G. Boettger, M. Eich *et al.*. Ultralow refractive index substrates—a base for photonic crystal slab waveguides[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(1): 16~18
- 19 P. Pottier, L. Shi, Y. A. Peter. Determination of guided-mode resonances in photonic crystal slabs[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2012, **29**(1): 109~117
- 20 M. G. Moharam, T. K. Gaylord. Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1981, **71**(7): 811~818
- 21 W. Suh, O. Solgaard, S. Fan. Displacement sensing using evanescent tunneling between guided resonances in photonic crystal slabs[J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **98**(3): 033102

栏目编辑:王晓琰