

# GeSbSe 光子晶体波导结构设计及传输特性研究

王贤旺 张 巍\* 韩金涛 魏凤娟 张培晴 吴越豪 章 亮 戴世勋 徐铁峰

宁波大学高等技术研究院红外材料与器件实验室, 浙江 宁波 315211

**摘要** 利用平面波展开法计算 GeSbSe 基质光子晶体带隙, 研究光子晶体波导中带隙与空气孔(或介质柱)半径的变化关系, 并结合光子晶体波导的工作波长, 设计出周期为 500 nm, 半径为 150 nm 的三角晶格空气孔型 GeSbSe 光子晶体波导。采用时域有限差分法模拟所设计的直线型光子晶体波导和 60° 弯曲光子晶体波导的传输特性, 模拟结果显示在传统结构光子晶体波导中, 直线型光子晶体波导具有很高的光学传输效率, 但在 60° 弯曲型波导中的传输效率较低, 分析原因为光子晶体波导直线区域与弯曲区域光的传播模式不同。因此对 60° 弯曲型 GeSbSe 光子晶体波导进行了结构优化, 优化后的光子晶体波导可以在较宽的波长范围内具有很高的传输效率。

**关键词** 光学设计; 光子晶体波导; 硫系玻璃; 光子禁带; 平面波展开法

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0105001

## Investigation of Structure Design and Transmission Characteristic of GeSbSe Photonic Crystal Waveguides

Wang Xianwang Zhang Wei Han Jintao Wei Fengjuan Zhang Peiqing  
Wu Yuehao Zhang Liang Dai Shixun Xu Tiefeng

Laboratory of Infrared Material and Devices, Advanced Technology Research Institute, Ningbo University,  
Ningbo, Zhejiang 315211, China

**Abstract** The plane wave expansion method is used in this paper to calculate the photonic band gap based GeSbSe and the relationship between the photonic band gap and the air holes (or media column) in photonic crystal waveguides is studied. Combining with the operating wavelength of photonic crystal waveguides, the period of 500 nm and the radius of air holes of 150 nm in a triangular lattice are determined. The two-dimensional finite difference time domain method is induced to simulation the transmission characteristics both in straight and 60° bend waveguides, and the results show that the transmission efficiency in straight waveguides is much higher than those in bend waveguides. The reasons may be there are different propagation modes between straight parts and bend parts in photonic crystal waveguides. Finally, the structures of 60° bend waveguides are optimized and the results show that there is an excellent transmission efficiency in a wide range of wavelengths in photonic crystal waveguides based GeSbSe.

**Key words** optical design; photonic crystal waveguides; chalcogenide glass; photonic band gap; plane wave expansion method

**OCIS codes** 060.4510; 130.5296; 160.5298; 230.0230

收稿日期: 2014-07-01; 收到修改稿日期: 2014-08-26

基金项目: 国家自然科学基金(61107047, 61307060)、国家 973 计划项目子课题(2012CB722703)、宁波市自然科学基金(2014A610125)

作者简介: 王贤旺(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事硫系光子晶体波导的制备和损耗等方面的研究。

E-mail: wangxianwangyi@163.com

导师简介: 徐铁峰(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤通信技术、特种玻璃光纤等方面的研究。

E-mail: xutiefeng@nbu.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: zhangwei3@nbu.edu.com

## 1 引言

1987年,美国贝尔实验室的Yablonovitch<sup>[1]</sup>和美国普林斯顿大学的John<sup>[2]</sup>分别在研究如何抑制自发辐射和无序电介质材料的光子局域时,各自独立地提出光子晶体概念。光子晶体是由介电常数不同的物质在空间周期性排列而形成的人工微结构,按照其周期性变化方式可以分为一维、二维以及三维光子晶体。光子带隙是光子晶体最重要的特征之一,分为不完全光子带隙和完全光子带隙。光子带隙不仅与光子晶体的结构和介电常数的配对有关,还与光波的传播方向有关,光子晶体中两种介质的介电常数比越大,入射光被散射的程度越强,就越容易出现光子带隙。光子晶体另一个特征是光子局域,当在光子晶体中引入缺陷时,同时就在光子晶体中引入了局域模式,也称为缺陷模,与缺陷模频率共振的光有可能通过光子晶体。利用光子晶体这两个性质光子晶体可以用来制作光子晶体光纤、光子晶体波导、光子晶体微波天线、光子晶体谐振腔的波分及解波分复用器、光子晶体偏振器<sup>[3-5]</sup>等光学器件。

在光子晶体中引入一条(或多条)线缺陷时就形成了光子晶体波导。与传统介质光波导相比,光子晶体波导是利用光子带隙导光,所以理论上可以实现任意角度弯曲的高效率传输。传统的光子晶体器件大都采用硅材料作为基底,并且有了较为深入的研究。例如研究者利用反应离子刻蚀法刻蚀槽型光子晶体波导,最后测量其传输损耗大约在 $(0.7 \pm 0.4) \text{ dB/mm}$ <sup>[6]</sup>。相比而言,硫系基质材料具有较长的透红外截止波长( $> 15 \mu\text{m}$ ),较小的双光子吸收 $\alpha_2(0.01 \sim 1 \times 10^{-12}) \text{ m/W}$ ,超高的非线性响应(响应时间小于200 fs),极好的三阶非线性(是硅基的100~1000倍),无自由载流子效应<sup>[7-12]</sup>等。与硅基的光子晶体波导相比,硫系光子晶体波导具有诸多优点:同等情况下可大大减小光子晶体波导的尺寸和输入能量,并且其有效非线性系数可以达到 $2.6 \times 10^4 \text{ W}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ <sup>[13-14]</sup>;可忽略的双光子吸收现象,而且还可利用慢光效应实现高效自相位调制和四波混频等<sup>[14]</sup>。这些优点使硫系材料光子晶体波导在国际上得到了越来越多人的关注,如日本横滨国立大学的Suzuki等<sup>[15]</sup>利用电子束曝光的方法制作出 $400 \mu\text{m}$ 长的硫系基质光子晶体波导,在输入峰值能量为0.78 W时观察到自相位调制和四波混频现象;澳大利亚CUDOS研究中心<sup>[15]</sup>利用聚焦离子束方法制作的硫系基质光子晶体波导与纳米光纤实现了高效率的耦合,耦合效率达到了98%,为集成光学的实现提供了一个很好的平台。但是国内硫系光子晶体波导方面的研究则处于起步阶段,大多数工作停留在硅基材料光子晶体波导的理论研究或结构设计模拟等基础工作,只有少数的研究单位在硅基材料上实现了的光子晶体波导的制作和简单测试,如中科院物理所韩守候小组<sup>[16-17]</sup>利用聚焦离子束方法制作出了基于硅的光子晶体波导,并对样品的光学特性做了简单的测试,测量结果显示其传光性能良好,而在硫系基质材料上的光子晶体波导研究基本处于空白状态。

本文研究的光子晶体波导以GeSbSe为基质,该基质材料具有很高的三阶非线性,通过Z-扫描技术测得该基质材料非线性折射率系数 $n_2$ 和非线性双光子吸收系数 $\beta$ 分别为 $(3.6 \pm 0.3 \times 10^{-17}) \text{ m}^2/\text{W}$ 和 $(8.7 \pm 0.7 \times 10^{-11}) \text{ m/W}$ <sup>[18]</sup>。并在中红外区域具有良好的透射率,被广泛应用在军用和民用红外光学系统中,此外相比国内外报道的常见含As硫系材料,具有无毒绿色环保的优点<sup>[19-20]</sup>。所设计的波导工作波长为1550 nm,利用二维时域有限差分(FDTD)法模拟其传输特性,并进行了结构的优化,优化后得到的光子晶体波导在很大波长范围内具有极高的传输效率。

## 2 硫系光子晶体波导设计

光子晶体波导的设计主要是对其结构的设计。包括结构类型、晶格类型、结构周期、空气孔(介质柱)半径的设计等。同时还要考虑结构与工作波长的匹配,一般情况,设计的结构在工作波长要有很好的应用。光子晶体波导是在两个方向做周期性变化而第三个方向不做周期性变化的三维结构,简称光子晶体平板波导。如果用三维模拟其传输特性将大大增加计算量而且很耗时。等效折射率法解决了这一问题,它把带有空气孔具有一定厚度的平板波导看着没有带孔的二维光子晶体波导来计算,这样可以大大减小计算量和时间,为硫系基质光子晶体波导的研究奠定基础,所以以下的研究都是基于二维光子晶体波导的研究<sup>[21]</sup>。

光子晶体结构类型主要有空气孔型和介质柱型两种,这里选择三角晶格结构,GeSbSe材料的折射率为2.65,结构周期为500 nm,空气孔(或介质柱)的半径在 $0.2a \sim 0.5a$ 之间变化( $a$ 为光子晶体的周期),用平面波展开(PWE)

法计算这两种结构的带隙随半径变化关系如图1、图2所示。如图可知,无论是带隙的数量,还是带隙的宽度,介质柱型优于空气孔型。所以介质柱型光子晶体相对空气孔型光子晶体更容易出现带隙,更容易引入缺陷模。但是介质柱型也有很多缺陷:首先,介质柱型光子晶体最大的带隙范围出现在介质柱半径很小的地方,这样在制作过程会大大增加制作的难度;其次,空气孔型光子晶体制作工艺与传统的互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺完全兼容,随着现在微纳技术的发展,制作纳米级别结构的光子晶体波导很容易,而制作介质柱型的光子晶体波导相对要困难。综合考虑这些因素,选择空气孔型光子晶体进行结构设计和优化。

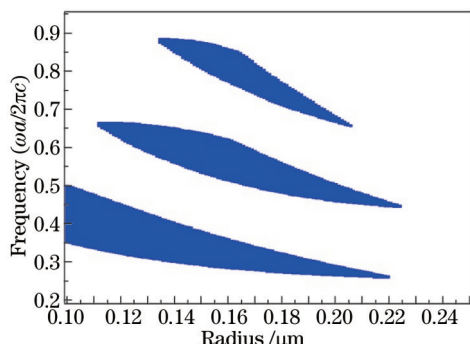


图1 三角晶格介质柱型光子晶体带隙随半径变化关系  
Fig.1 Relation between band gaps and radius in a triangular lattice of the media column

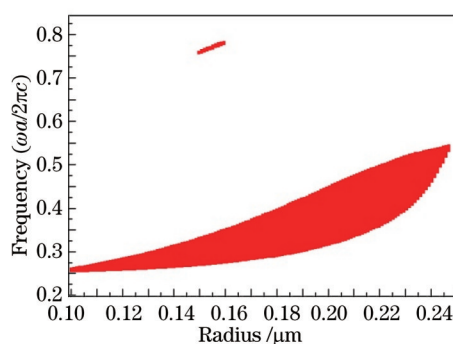


图2 三角晶格空气孔型光子晶体带隙随半径变化关系  
Fig.2 Relation between band gaps and radius in a triangular lattice of the air holes

空气孔型光子晶体结构中,主要有三角晶格和正方晶格两种典型的晶格结构。在其他结构参数都一样的情况下,对于三角晶格和正方晶格两种不同的晶格结构,可以得到横电(TE)偏振模式下带隙随半径的变化图如图3、图4所示。

由图3、4可知,虽然两种结构都有两条带隙,但是三角晶格光子晶体带隙宽度远远大于正方晶格光子晶体带隙。此外还能看出,随着空气孔半径增大,三角晶格光子晶体带隙宽度逐渐增大,当半径为 $0.42a$ 时,带隙宽度达到最大值,为 $0.145$ ,中心带隙在 $0.4$ 左右;之后随着空气孔半径继续增大,带隙宽度开始逐渐减小。综上所述可以得到,对于硫系基质空气孔型光子晶体,三角晶格光子晶体结构优于正方晶格光子晶体。

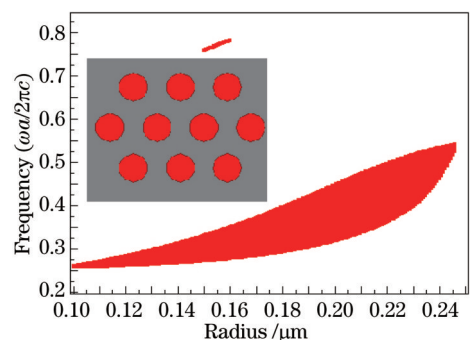


图3 三角晶格光子晶体带隙随图半径变化关系  
Fig.3 Relation between band gaps and radius in a triangular lattice

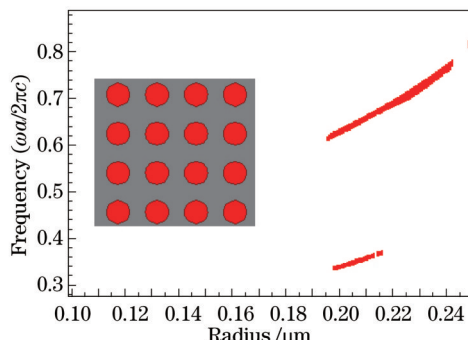


图4 正方晶格光子晶体带隙随半径变化关系  
Fig.4 Relation between band gaps and radius in square lattice

结合前面的分析,确定设计的光子晶体晶格类型为三角晶格,折射率为 $2.65$ ,空气孔半径 $r=0.3a$ 。由图3可知, $r=0.3a$ 时光子晶体带隙并不是最大值,这样的选择基于后续波导刻蚀工艺的考虑。首先,在选择光子晶体结构时,应尽量选择归一化频率( $f=a/\lambda$ )高的结构,因为 $a$ 和 $f$ 成正比, $f$ 越大,则光子晶体的周期 $a$ 也越大,这样能给后续光子晶体波导的制备带来方便;其次,要尽量选择禁带宽度宽的结构,因为光子晶体光波是利用带隙导光的,光子晶体的禁带宽度越宽,引入缺陷时更容易出现缺陷模式,而由图3可知,虽然最宽带隙出现在半径为 $0.42a$ 处,但此时的填充率(空气孔的直径比上晶格周期)为 $0.84a$ ,结构中两个相邻空气孔距离只有 $0.16a$ ,这样不但对刻蚀设备要求极高,对刻蚀所得结构的参数稳定性也有很高的要求<sup>[3]</sup>。综合考虑空气空半径既不能太大,也不能太小,最后选择了 $r=0.3a$ 这个值。

对设计的结构,利用平面波展开法计算其TE模的带隙结构,得到如图5所示的光子晶体带隙图。图中可以看出,该结构有两条带隙。上面那条带隙的宽度很窄,引入缺陷模式比较困难,所以这里主要考虑下面那条宽度更宽的带隙。这条带隙的归一化频率范围从0.2700~0.3365,宽度为0.0665,与图2的计算结果基本吻合。当在光子晶体中引入一条线缺陷时,就形成光子晶体波导,通过选取超晶胞(大小为 $a \times 11a$ ),同样利用平面波展开法计算可得此时光子晶体波导的带隙图如图6所示。图6中,带隙的变化范围在0.2680~0.2865,而图5的带隙变化范围在0.2700~0.3365,导致带隙变化范围明显变小的主要原因是原来的禁带在引入缺陷以后变成了导带,此时如果光在这些范围内传输,光就能很好的被限制在里面。这里需要说明的是,在光子晶体带隙以外本身也有许多的导带,研究者之所以利用光子晶体带隙中引入的缺陷带来导光而不利用光子晶体本身的导带来导光主要是因为利用光子晶体本身的导带频率传输光,传输效率很低(30%左右),而利用引入的缺陷带来导光具有很高的传输效率(理论上可以到达100%)。

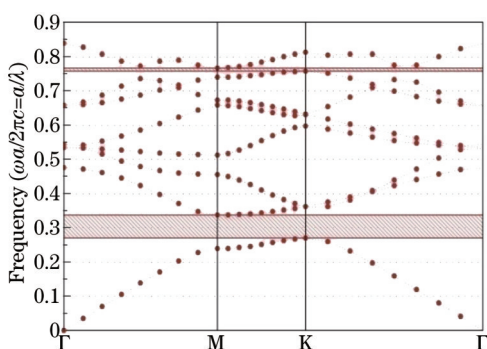


图5 三角晶格光子晶体带隙图

Fig.5 Bands of photonic crystal in a triangular lattice

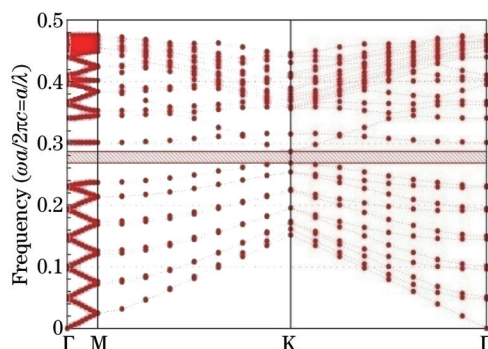


图6 引入线缺陷的光子晶体波导带隙图

Fig.6 Bands of photonic crystal in a triangular lattice after introduction of a line defect

### 3 光子晶体波导的传输特性

与传统介质光波导相比,光子晶体波导具有更好的束缚光能力。这主要是因为传统介质光波导是利用全反射导光,而光子晶体波导利用光子禁带导光,所以光子晶体波导的辐射损耗非常小。而光子晶体波导在弯曲角度处的损耗主要是由引入的直线波导区域和弯曲角度区域之间的模式不匹配造成的,具体来说就是当在光子晶体中引入两条线缺陷形成有角度的弯曲波导时,在弯曲前直线波导区域的光仅存在一个传播模式,而在弯曲角度区域有可能存在多个传播模式,这样导致弯曲处波导和直线处波导之间的模式不匹配,向两侧辐射光比较多,传输损耗大<sup>[22]</sup>。通过调整弯曲区域空气孔(介质柱)的半径大小,折射率,位置等参数对其进行结构优化<sup>[23]</sup>。由一维散射理论可知:光经过弯曲区域传输时的反射系数为

$$R(\omega) = \left\{ 1 + \left\{ \frac{2k_1(\omega)k_2(\omega)}{[k_1^2(\omega) - k_2^2(\omega)]\sin[k_2(\omega)L]} \right\}^2 \right\}^{-1}, \quad (1)$$

式中 $k_1(\omega)$ , $k_2(\omega)$ 分别是光在直线波导区域和弯曲波导区域处的传播常数,而 $L$ 是弯曲区域的长度。由(1)式可知,传播常数 $k_1(\omega)$ , $k_2(\omega)$ 越接近,反射系数越小。因此可以通过不断调整弯曲处的缺陷结构得到不同的 $k_2(\omega)$ 和 $L$ ,再代入(1)式,使其在更宽的频率范围内得到更小的反射系数 $R(\omega)$ <sup>[24-25]</sup>。通常情况下,受到缺陷类型的限制,根据一维散射理论优化的光子晶体弯曲波导的高透射频带范围一般比较窄。

在国内外,已经有许多研究者提出了各种各样的具体方案来提高弯曲角度光子晶体波导传输效率。自Mekis第一个报道了正方形晶格光子晶体波导在90°弯曲时的传输特性之后的十几年中<sup>[26]</sup>,研究者在Mekis的基础上提出了多种弯曲角度传输损耗的优化。例如在弯曲处引入一个谐振腔,这样可以在弯曲角度上实现高效率传输<sup>[18,22]</sup>;或者通过增加线缺陷的宽度来提高传输效率<sup>[23]</sup>;此外还可以通过在弯曲角度处引入点缺陷,而且通过改变点缺陷的折射率,个数,位置,大小来优化传输效率<sup>[21,23,27]</sup>;或者通过优化其周期结构,使其在弯曲角度区域尽量平缓,这样光在弯曲角度传输效率大大得到提高<sup>[28]</sup>。

根据前面设计的参数,结合通信波段1550 nm工作波长设计出引入缺陷的GeSbSe光子晶体波导结构,

并采用二维时域有限差分法模拟其传输特性。首先研究光子晶体直波导的传输特性,透射谱如图7所示。图中可以看到,归一化频率在0.31~0.33之间,即工作波长在1515~1613 nm(后面如无特殊说明都在这个频率范围内),这个频率范围内光基本都被限制在光子晶体里面,传输效率在99%以上。选择这个频率主要基于两点考虑:一方面在这个频率范围内开始是禁带,当引入线缺陷后变在这个频率范围内引入了缺陷模,有利于光的传输;另一方面这个频率范围包含了通信波段的1550 nm波长。

当在波导结构中引入两条线缺陷,形成60°弯曲光子晶体波导时,光子晶体弯曲波导及透射谱图如图8所示。图中明显可以看出光的传输效率在开始的时候波动很大,而且随着归一化频率的慢慢增大,一个很大的频率范围内光基本都不能在光子晶体波导中传输。通过观察波长为1550 nm时光子晶体60°弯曲波导中能量传输图(如图9所示)。可以看到在光子晶体波导弯曲处具有较严重的光泄露现象,光能量基本不能到达弯曲区域之后的直线波导处,导致光在很大的波长范围内传输效率都很低。这种现象可能是由于在线波导传输光的模式与弯曲区域的光的传播模式不匹配而造成,在引入一条线缺陷的光子晶体波导中只有一种传播模式,而在弯曲角度区域可能是多种传播模式<sup>[24]</sup>。

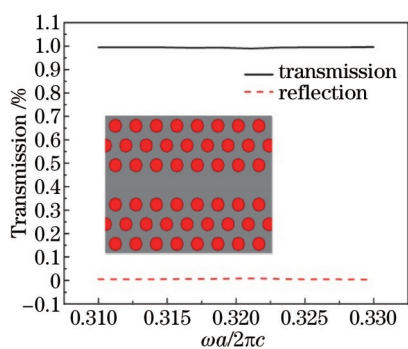


图7 直波导透射谱

Fig.7 Transmission spectrum of straight waveguide

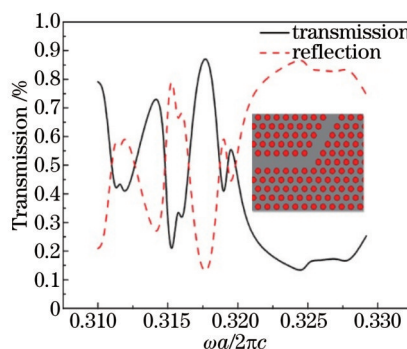


图8 弯曲波导透射谱

Fig.8 Transmission spectrum of bend waveguide

为了使光子晶体波导的光传输模式尽量匹配,可以调整改变弯曲区域的结构来实现。这里优化设计了两种结构的60°弯曲波导。第一种结构是通过移动弯曲区域处的空气孔使弯曲处最靠近线缺陷那排空气孔尽量平缓,这样可以使光在第一个线缺陷处的传播模式和弯曲区域的传播模式尽量接近。调整后光的传输透射谱如图10所示。从图可知,刚开始光的传输效率波动也很大,但当归一化频率增加到0.315(波长为1587 nm)时,传输效率开始变大,达到最大值99%左右之后在一个波长范围内都保持不变。但是当归一化频率继续增加到0.324(波长为1543 nm)时,传输效率开始降低,而且有大的波动。相对于优化前的结构,这种优化的结构的光子晶体波导的传输效率得到提高,在一定波长范围内可以实现高效率传输,但是在很大的频率范围内仍然没有解决光传输效率低、波动大的问题。分析造成这种现象的原因可能是因为在优化过程中弯曲处靠近线缺陷都是空气孔,具有相对较低的折射率,而相对远离弯曲处是规则的光子晶体结构,具有

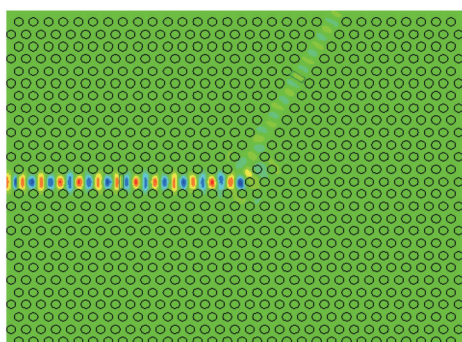


图9 弯曲波导电磁场的能量传输

Fig.9 Electromagnetic energy transfer of bend waveguide

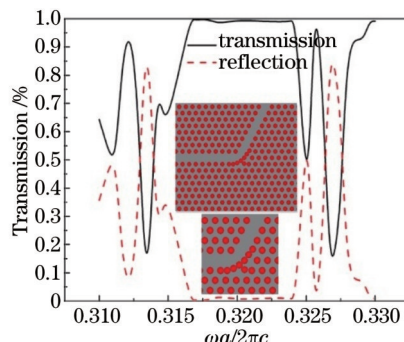


图10 优化后的弯曲波导透射谱图

Fig.10 Transmission spectrum of bend waveguide after optimization

较高的折射率,根据光会向折射率高处传播的特点,导致光在弯曲处向四周泄露,在很大的波长范围内传输效率都较低。因此,在第一种结构的基础上进一步优化后得到第二种结构。与第一种优化结构相比较,在优化的那排空气孔处添加一排弧形的空气孔如图 10 所示。由图可知,这种结构在开始有小段的频率范围传输效率不稳定,之后传输效率升高并持续稳定,具有很宽的频率范围。波长为 1550 nm 的光在优化后的光子晶体波导中传输的电磁场能量分布如图 12 所示,由于光能基本都被限制在光子晶体弯曲波导内部,因此具有很高的传输效率。

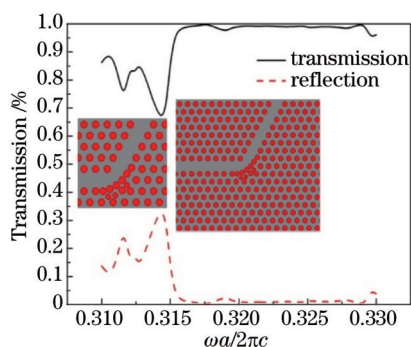


图 11 进一步优化后的弯曲波导透射谱

Fig.11 Transmission spectrum of bend waveguide after further optimization

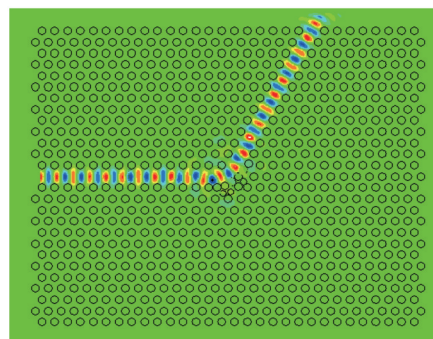


图 12 进一步优化后弯曲波导电磁场的能量传输

Fig.12 Electromagnetic energy transfer of bend waveguide after further optimization

## 4 总 结

本文从光子晶体的结构类型,晶格类型,周期等方面设计基于 GeSbSe 基质的二维光子晶体波导结构。选择了周期为 500 nm,半径为  $0.3a$  的三角晶格的空气孔型光子晶体结构参数,利用平面波展开法计算了该结构 TE 偏振模式时的光子带隙,并采用 FDTD 法分别模拟了直线型光子晶体波导和  $60^\circ$  弯曲光子晶体波导的透射谱,由透射谱可知光能很好的在线型光子晶体波导中传输,但是在  $60^\circ$  弯曲波导中传输的效率很低。为了降低弯曲波导处的传输损耗,分别提出了两种优化结构。第一种结构中通过改变弯曲区域处的空气孔的位置使弯曲处最靠近线缺陷那排空气孔尽量平缓,这样可以使光在第一个线缺陷处的传播模式和弯曲区域的传播模式尽量接近,通过模拟分析得到在一定波长范围内,光在第一种优化结构中可以实现高效率传输,但是在很大的频率范围内仍然没有解决光传输效率低,波动大的问题;第二种优化结构在之前的优化基础上添加一排弧形的空气孔,分析得出这种结构中的光传输在开始时传输效率有些波动,之后很宽的一个频率范围内的传输效率都得到了很大提高,更重要的是在 1550 nm 的通信工作波长处,可以获得高达 99% 以上的传输效率。通过研究,可以为硫系基质光子晶体波导设计方面的研究提供相应的理论指导,并促进硫系光子晶体波导向器件化方向的发展。

## 参 考 文 献

- 1 E Yablonovitch . Inhibited spontaneous emission in solidstate physics and electronics[J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(20): 2059-2062.
- 2 S John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric super lattices[J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(23): 2486-2489.
- 3 Cui Naidi, Liang Jingqiu, Liang Zhongzhu, *et al.*. Design and fabrication of two-dimensional photonic crystal waveguides on silicon films[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(12): 2549-2556.  
崔乃迪, 梁静秋, 梁中翥, 等. 二维硅薄膜光子晶体波导的设计及制作[J]. 光学精密工程, 2010, 18(12): 2549-2556.
- 4 Tang Haixia, Wang Qiming. Photonic crystal waveguides based on SOI[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2006, 27(2): 103-107.  
唐海侠, 王启明. SOI基光子晶体光波导[J]. 半导体光电, 2006, 27(2): 103-107.
- 5 Zhou Xingping, Shu Jing, Lu Binjie, *et al.*. Two-wavelength division demultiplexer based on triangular lattice photonic crystal resonant cavity[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0123001.  
周兴平, 疏 静, 卢斌杰, 等. 基于三角晶格光子晶体谐振器的双通道解波分复用器[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0123001.
- 6 Falco A D, Massari M, Scullion M G, *et al.*. Propagation losses of slotted photonic crystal waveguides[J]. Photonics Journal, 2012, 4

- (5): 1536–1541.
- 7 Luther–Davies B, Freeman D, Ruan Y, *et al.* Chalcogenide glass photonic devices[J]. Lasers and Electro–Optics Society, 2004, 2: 921–922.
- 8 Zhang L, Zhang W, Wang X W, *et al.* Investigation of  $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$  photonic crystal slab waveguides with slow light at infrared wavelength[J]. Optical Materials Express, 2013, 3(9): 1438–1443.
- 9 Freeman D, Madden S, Luther–Davies B. Fabrication of planar photonic crystals in a chalcogenide glass using a focused ion beam [J]. Opt Express, 2005, 13(8): 3079–3086.
- 10 Smitha C, Grilleta C, Tomljenovic– Hanic S, *et al.* Characterisation of chalcogenide 2D photonic crystal waveguides and nanocavities using silica fibrenanowires[J]. Physica B, 2007, 394(2): 289–292.
- 11 Liu Shan, Shen Xiang, Xu Tiefeng, *et al.* Dispersion characteristics of  $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$  chalcogenide rib waveguides[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0513001.  
刘 珊, 沈 祥, 徐铁峰, 等.  $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$  硫系脊形光波导的色散特性[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0513001.
- 12 Wu Ligang, Li Zupan, Wang Xunsi, *et al.* Internal macroscopic defects perspective imaging detection system for infrared chalcogenide glasses[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(1): 0108001.  
吴礼刚, 李祖盼, 王训四, 等. 红外硫系玻璃内部宏观缺陷透视成像检测系统[J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0108001.
- 13 Suzuki K, Hamachi Y, Baba T. Fabrication and characterization of chalcogenide glass hotonic crystal waveguides[J]. Opt Express, 2009, 17(25): 22393–22400.
- 14 Suzuki K, Baba T. Nonlinear light propagation in chalcogenide photonic crystal slow light waveguides[J]. Opt Express, 2010, 18(25): 26675–26685.
- 15 Grillet G, Smith C, Freeman D, *et al.* Efficient coupling to chalcogenide glass photonic crystal waveguides via silica optical fiber nanowires[J]. Opt Express, 2006, 14(3): 1070–1078.
- 16 Han Shouzheng, Tian Jie, Feng Shuai, *et al.* Fabrication of straight waveguide in two–dimensional photonic crystal slab and its light propagation characteristics[J] Acta Physica Sinica, 2005, 54(12): 5659–5662.  
韩守振, 田 洁, 冯 帅, 等. 二维平板光子晶体直波导的制备和光传输特性的测量[J]. 物理学报, 2005, 54(12): 5659–5662.
- 17 Fang Yuntuan, Shen Yangen. Optical wave propagation in photonic crystal waveguide[J]. Laser & Infrared, 2005, 35(6): 433–434.  
方云团, 沈延根. 光子晶体线缺陷构成的波导中光的传输[J]. 激光与红外, 2005, 35(6): 433–434.
- 18 Krogstad M R, Rengnath E, Park W, *et al.* Third–order nonlinearities of  $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$  for waveguide devices[C]. CLEO, 2013: JW2A. 40.
- 19 Shi Guangwei, Zhang Xin, Wang Lingjie, *et al.* Application of the new chalcogenide glass in design of low cost thermal imaging systems[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(4): 615–619.  
史广维, 张 新, 王灵杰, 等. 新型硫系玻璃在低成本热成像系统设计中的应用[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(4): 615–619.
- 20 Dai Shixun, Chen Huiguang, Li Maozhong, *et al.* Chalcogenide glass and their infrared optical applications[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(4): 847–852.  
戴世勋, 陈惠广, 李茂忠, 等. 硫系玻璃及其在红外光学系统中的应用[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 847–852.
- 21 Hu Z, Lu Y Y. Improved bends for two–dimensional photonic crystal waveguides[J]. Optics Communications, 2011, 284(12): 2812–2816.
- 22 Chutinan A, Okano M, Noda S. Wider bandwidth with high transmission through waveguide bends in two–dimensional photonic crystal slabs[J]. Applied Physics Letters, 2002, 80(10): 1698–1700.
- 23 Xing P F, Borel P I, Feangsen L H, *et al.* Optimization of bandwidth in  $60^\circ$  photonic crystal waveguide bends[J]. Optics Communications, 2005, 248(1–3): 179–184.
- 24 Mekis A, Chen J C, Kurland I, *et al.* High transmission through sharp bends in photonic crystal waveguides[J]. Physical Review Letters, 1996, 77(18): 3787–3790.
- 25 Bakhshi S, Moravvei–Farshi M K, Ebnali–Heidari M, *et al.* Proposal for enhancing the transmission efficiency of photonic crystal  $60^\circ$  waveguide bends by means of optofluidic infiltration[J]. Appl Opt, 2011, 50(21): 4048–4053.
- 26 Chutinan A, Noda S. Waveguides and waveguide bends in two–dimensional photonic crystal slabs[J], Physical Review B, 2000, 62 (7): 4488–4492.
- 27 Moghaddam M K, Mirsalehi M M, Attari A R. A  $60^\circ$  photonic crystal waveguide bend with improved transmission characteristics[J]. Optical Applicata, 2009, 39(2): 307–317.
- 28 Frandsen L H, Harpøth A, Borel P I, *et al.* Broadband photonic crystal waveguide  $60^\circ$  bend obtained utilizing topology optimization [J]. Opt Express, 2004, 12(24): 5916–5921.