

基于光子晶体自准直效应的太赫兹偏振分束器设计

汪静丽¹, 刘洋², 陈鹤鸣³

¹南京邮电大学电子与光学工程学院、微电子学院, 江苏 南京 210023;

²中国移动通信集团江苏有限公司盐城分公司, 江苏 盐城 224000;

³南京邮电大学贝尔英才学院, 江苏 南京 210023

摘要 提出了一种新型、紧凑的光子晶体太赫兹 (THz) 偏振分束器, 利用自准直效应实现横电 (TE) 模和横磁 (TM) 模的无衍射传输, 利用禁带特性实现 TE 模和 TM 模的分离。基于平面波展开法和时域有限差分法对太赫兹偏振分束器的性质进行仿真建模分析, 结果表明, 该偏振分束器在 2.9~3.01 THz 频率范围内可实现偏振分离; 频率为 3 THz 时, TE 模的反射率和 TM 模的透射率均高于 90%, TE 模和 TM 模的消光比分别高达 19.9 dB 和 26.24 dB。此外, 与以往的光子晶体太赫兹偏振分束器相比, 所提出的偏振分束器设计简单, 更易于实现 (无需引入缺陷), 尺寸更微小 (650 μm \times 650 μm), 带宽更宽 (2.9~3.01 THz)。

关键词 光学器件; 太赫兹; 偏振分束器; 平面波展开法; 时域有限差分法; 光子晶体; 自准直

中图分类号 TN256

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0423001

Design on Terahertz Polarization Beam Splitter Based on Self-Collimating Effect of Photonic Crystal

Wang Jingli¹, Liu Yang², Chen Heming³

¹ College of Electronic and Optical Engineering & College of Microelectronics,

Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210023, China;

² China Mobile Group Jiangsu Co., Ltd. Yancheng Branch, Yancheng, Jiangsu 224000, China;

³ Bell Honors School, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210023, China

Abstract A novel and compact terahertz (THz) polarization beam splitter based on photonic crystal is proposed. Transmission without diffraction of transverse electric (TE) and transverse magnetic (TM) modes is realized by using the self-collimating effect, while the separation of TE and TM modes is realized by using the band gap characteristic. The characteristics of the terahertz polarization beam splitter is simulated and analyzed by using plane wave expansion method and time domain finite difference method. The results show that the polarization beam splitter can realize polarization separation in the frequency range of 2.9-3.01 THz. While the frequency is 3 THz, the reflectivity of TE mode and the transmittance of TM mode are both higher than 90%. The extinction ratios of TE and TM modes are 19.9 dB and 26.24 dB, respectively. Moreover, compared with the previous photonic crystal terahertz polarization beam splitters, the proposed polarization beam splitter is simpler to design, easier to realize (without defects), smaller in size (650 μm \times 650 μm) and wider in bandwidth (2.9-3.01 THz).

Key words optical devices; terahertz; polarization beam splitter; plane wave expansion method; time domain finite difference method; photonic crystal; self-collimating

OCIS codes 230.1360; 130.3120; 350.4238

1 引言

太赫兹 (THz) 波, 是指频率在 0.1~10 THz 范

围内的电磁波, 是光子学与电子学、宏观理论向微观理论的过渡区域, 具有很多极其优越的特性和非常重要的学术研究及应用价值^[1-2]。偏振分束器是光

收稿日期: 2017-09-30; 收到修改稿日期: 2017-10-31

基金项目: 国家自然科学基金 (61571237)、南京邮电大学国家自然科学基金孵化项目基金 (NY217047)、光电信息技术教育部重点实验室 (天津大学) 开放基金 (2014KFKT003)、下一代无源光网络中基于硅基的复用/解复用和分光/合光的集成器件设计 (2017 外 65)

作者简介: 汪静丽 (1980—), 女, 博士, 副教授, 主要从事光纤通信与光波技术等方面的研究。E-mail: jlwang@njupt.edu.cn

学系统中的一种重要器件,可将光信号分离成两个相互正交的偏振光,并沿着不同路径传输^[3-4]。近年来,科研工作者对光学波段的偏振分束器已进行了深入研究^[5-10],而对 THz 波段偏振分束器的研究仍处于起步阶段^[11-17]。随着 THz 辐射源及探测技术的不断成熟,其应用研究也受到了广泛关注,设计性能优良的 THz 偏振分束器对于 THz 器件的研究具有重要的意义。

传统的 THz 偏振分束器一般是基于双芯光纤设计的,尺寸较大(厘米量级),在微型集成电路中缺乏竞争力^[11-14]。为了设计出高效、紧凑的 THz 偏振分束器,人们开始关注光子晶体,光子晶体是一类人工设计的新型功能材料,其介电材料的周期性排列可影响电磁波的传输。目前,基于光子晶体的 THz 偏振分束器的报道相对较少:2010 年,范飞等^[15]设计了一种基于铁氧体磁光材料的光子晶体 THz 可调偏振控制器件,通过调整外磁场改变材料的磁导率,进而改变横电 (TE) 模的光子带隙,在 $f = 1$ THz 处实现了偏振分离,器件尺寸为 $3.15 \text{ mm} \times 1.68 \text{ mm}$;2015 年,Li 等^[16]设计了一种基于碲玻璃的光子晶体 THz 偏振分束器,可使 TE 模和横磁 (TM) 模沿着不同的谐振腔传输,带宽为 0.03 THz,尺寸为 $2.58 \text{ mm} \times 0.54 \text{ mm}$;2016 年,Mo 等^[17]设计了一种基于硅介质的光子晶体 THz 偏振分束器,使得 TE 模和 TM 模从不同的线缺陷出射,带宽为 0.0009 THz,尺寸为 $1.02 \text{ mm} \times 0.99 \text{ mm}$ 。然而,上述 THz 偏振分束器的设计均是利用了光子晶体的光子带隙效应:令某一偏振模处于禁带内被反射,另一偏振模处于导带内可通过,从而实现偏振分离。存在的问题是:结构较复杂,尺寸较大,带宽相对过窄。

针对上述问题,本文提出了一种新的光子晶体 THz 偏振分束器,摒弃了实现偏振分束的传统方法(仅利用光子晶体的禁带特性),将光子晶体的自准直效应和禁带特性^[18]有机结合实现分束,从而获得了更加简单的结构、更微小的尺寸和更宽的频率运行范围。

2 结构设计和仿真

2.1 自准直结构的设计

光子晶体的自准直效应最早是由 Kosaka 等于 1999 年发现的,它是指当 TE 模和 TM 模在光子晶体中传输时,受其周期结构影响,沿某一方向无衍射直线传输,光束宽度保持不变的现象^[18]。考虑到利用自准直效应可控制光的传输,实现波导一般的导

光,且不需要额外引入缺陷,可大大降低实际制作的难度,利用该效应设计的自准直结构如图 1(a)所示,基底材料为硅(其折射率为 3.42),引入 26×26 个半径为 R 的空气孔,并将它们按照正方形晶格排列(晶格常数为 a)。对自准直结构进行合理的参数优化后,即可实现自准直效应,此时 TE 模和 TM 模稳态场分布如图 1(b)所示。具体自准直结构参数的优化和确定如下文所述。

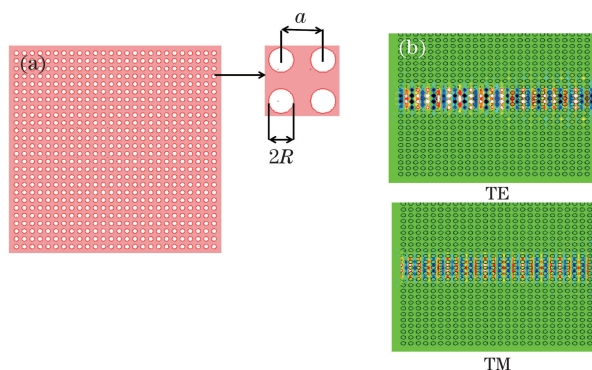


图 1 (a)自准直结构;(b) TE 模和 TM 模的稳态场分布
Fig. 1 (a) Self-collimating structure; (b) steady field distribution of TE and TM modes

将能带图和等频图结合,可确定自准直结构中无衍射传输的频率。分析如下:首先利用能带图获得 TE 模和 TM 模均处于导带的频率范围。由平面波展开法建模仿真,结果如图 2 所示。当入射波的归一化频率范围为 $0 \sim 0.4$ (即频率范围 $0 \sim 4.6$ THz), TE 模和 TM 模都处于导带,均可在该自准直结构中传输,满足要求。其次,利用等频图确定 TE 模和 TM 模均可无衍射传输的频率。在光子晶体中,群速度 \mathbf{V}_g 的定义为 $\mathbf{V}_g = \nabla_{\mathbf{k}} \omega(\mathbf{k})$,其中 \mathbf{k} 为布洛赫波矢, ω 为角速度。由此可知,群速度矢量垂直于等频图并指向频率增加的方向。可以证明,能流矢量 $\mathbf{V}_c = \mathbf{V}_g$,光子晶体中折射波的传播方向也即群速度

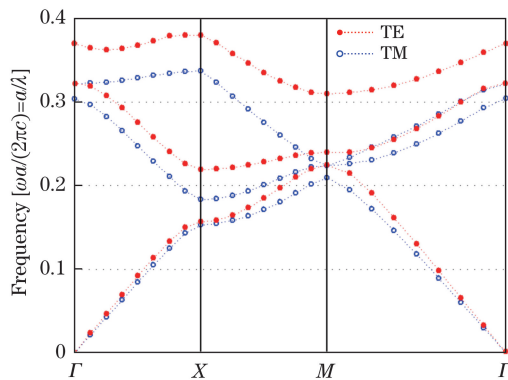


图 2 自准直结构的能带图

Fig. 2 Energy band diagram of self-collimating structure

的方向^[18]。图 3(a)和(b)分别为 TE 模和 TM 模的等频图,当频率为 $f=0.26(c/a)=3$ THz 时(c 为光速),TE 模和 TM 模的等频线都是环绕 Γ 点的圆角正方形,平坦的等频线表明 TE 模和 TM 模均可在该结构中沿 ΓX 方向无发散的准直传输。由此确定当光源入射频率为 3 THz 时,该结构可作为无通道的虚拟波导,无需引入介质波导或线缺陷就可约束两种偏振模无衍射的准直传输。

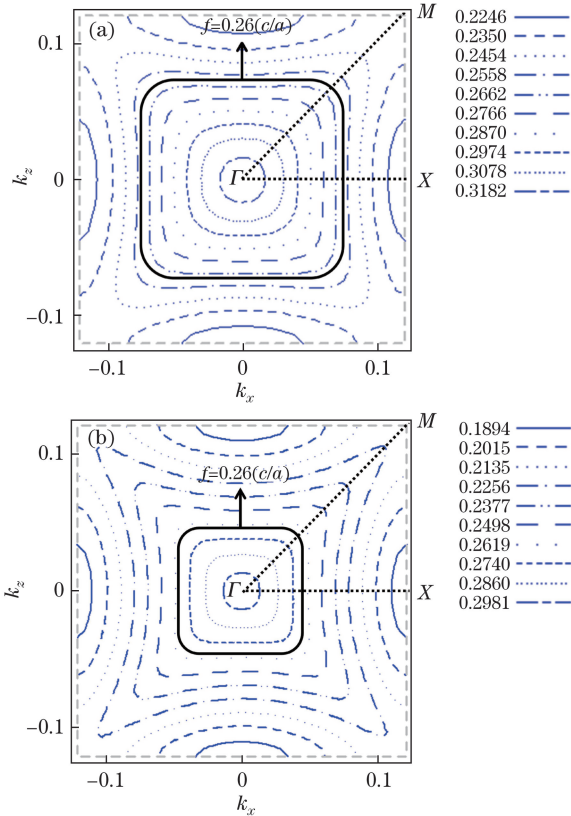


图 3 自准直结构的(a) TE 模和(b) TM 模的等频率图
Fig. 3 Equal frequency contours of (a) TE mode and (b) TM mode in self-collimating structure

透射率是衡量自准直结构的重要指标,可通过改变晶格常数 a 和空气孔半径 R 对所提出的自准直结构进行优化。首先,假设 $R=0.25a$ 固定不变,仅变化 a 的大小,TE 模和 TM 模透射率变化如图 4 所示,两者变化趋势基本一致,当 a 从 $20 \mu\text{m}$ 增加到 $25 \mu\text{m}$ 时,两者的透射率逐渐增大;当 a 从 $26 \mu\text{m}$ 增加到 $30 \mu\text{m}$ 时,两者的透射率又急剧减小;当 $a=26 \mu\text{m}$ 时,TE 模的透射率达到峰值 96%,TM 模的透射率为 90%。

然后,固定 $a=26 \mu\text{m}$ 不变,令 $R=a \times x$, x 为变化系数,TE 模和 TM 模透射率变化如图 5 所示。当 x 从 0.1 变化到 0.35 时,两者的透射率均随 x 的增大而增大,达到峰值($x=0.3$,TE 模和 TM 模

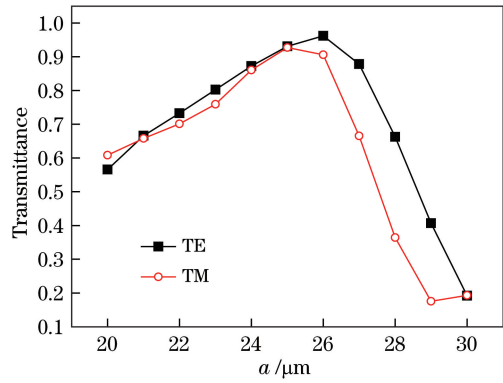


图 4 TE 模和 TM 模透射率随 a 的变化
Fig. 4 Transmittance of TE and TM modes as a function of a

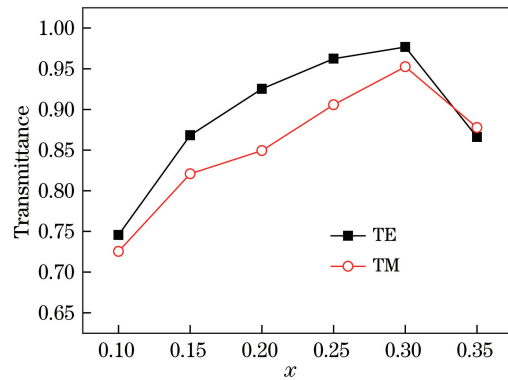


图 5 TE 模和 TM 模透射率随 x 的变化
Fig. 5 Transmittance of TE and TM modes as a function of x

的透射率都达到最大,分别为 97%和 95%)后随着 x 的增大而减小。综上,当 $f=3$ THz 时, $a=26 \mu\text{m}$, $R=0.3a$ 为自准直结构的最佳参数。

2.2 分离结构的设计

禁带特性是光子晶体最基本的特性,频率落在禁带中的电磁波将无法传输。利用该效应可设计分离结构,如图 6(a)所示。对图 1(a)所示的自准直结构进行微调,保持晶格常数 $a_1=26 \mu\text{m}$ 不变,改变空气孔 R_1 大小。对该分离结构进行合理的参数优化后,可实现 TE 模和 TM 模的分离,此时频率 $f=0.26(c/a)=3$ THz 处于 TE 禁带内,同时它又处于 TM 导带内,如图 6(c)能带图所示。TE 模和 TM 模的稳态场分布如图 6(b)所示,TE 模无法传输而 TM 模全部通过。具体分离结构参数的优化和确定如下文所述。

TE 模和 TM 模的光子带隙随 R_1 的变化关系如图 7 所示,当入射频率 $f=0.26(c/a)=3$ THz, $a_1=26 \mu\text{m}$ 固定不变, R_1 在 $9.6\sim 10.5 \mu\text{m}$ 范围内变化时,TE 模处于禁带,TM 模处于导带,满足分离结

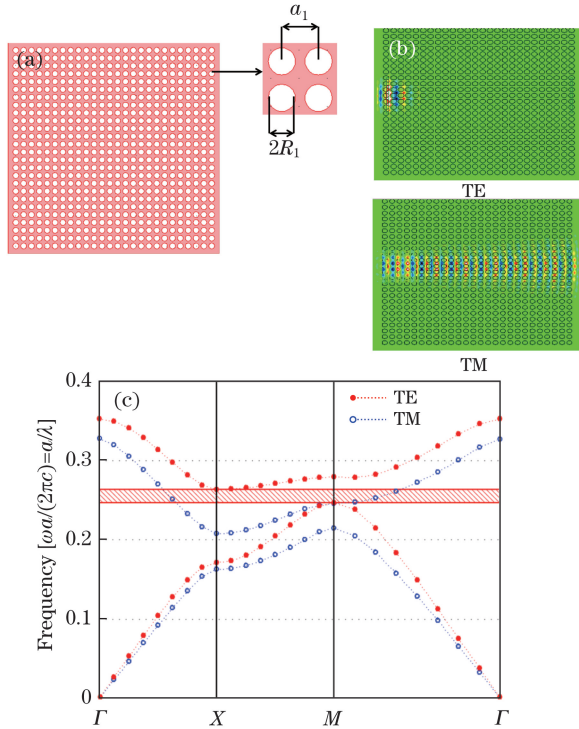


图 6 (a)分离结构;(c)TE模和TM模的稳态场分布;
(b)分离结构的能带图

Fig. 6 (a) Separation structure; (b) steady field distribution of TE and TM modes; (c) energy band diagram of separation structure

构设计要求。尽管 R_1 在 $9.6 \sim 10.5 \mu\text{m}$ 范围内取值时, TM 模都能传输,但其透射率不同,图 8 给出了 TM 模的透射率随 R_1 的变化情况,随着 R_1 的增大,透射率基本呈线性递减,当 R_1 取 $9.6 \mu\text{m}$,其透射率最大为 88%。因此,当源入射频率为 3 THz 时, $a_1 = 26 \mu\text{m}$, $R_1 = 9.6 \mu\text{m}$ 为分离结构的最佳参数,此时,TE 模无法传输且 TM 模的透射率最大。

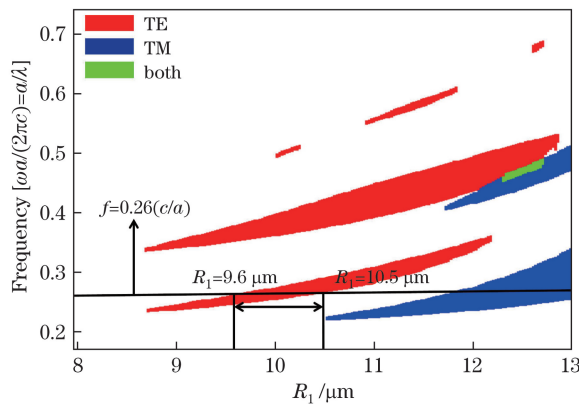


图 7 TE 模和 TM 模的光子带隙随 R_1 的变化

Fig. 7 Band gap of TE and TM modes as a function of R_1

2.3 偏振分束器的设计

为了实现 TE 模和 TM 模的传输和分离,可将前文设计的自准直结构和分离结构有机结合,构成

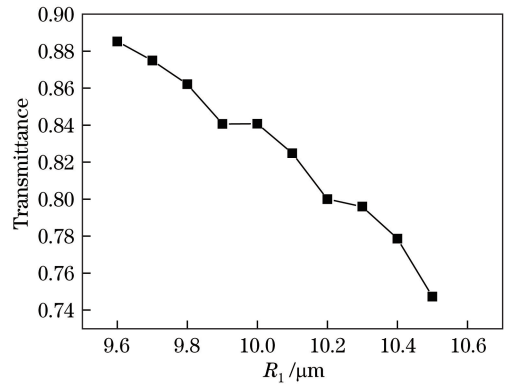


图 8 TM 模的透射率随 R_1 的变化

Fig. 8 Transmittance of TM mode as a function of R_1

THz 偏振分束器,如图 9 所示,背景材料为硅,光源入射频率 $f = 3 \text{ THz}$, $a = a_1 = 26 \mu\text{m}$, $R = 0.3a$, $R_1 = 9.6 \mu\text{m}$,整个偏振分束器结构的尺寸为 $676 \mu\text{m} \times 676 \mu\text{m}$ 。TE 模和 TM 模垂直边界入射进入自准直结构后无衍射向前传输,遇到分离结构(入射波与分离结构成 45°),TM 模直接透射并继续准直传输,而 TE 模无法通过而被反射,此时两偏振模产生分离并从不同的方向出射,出射角度为 90° 。

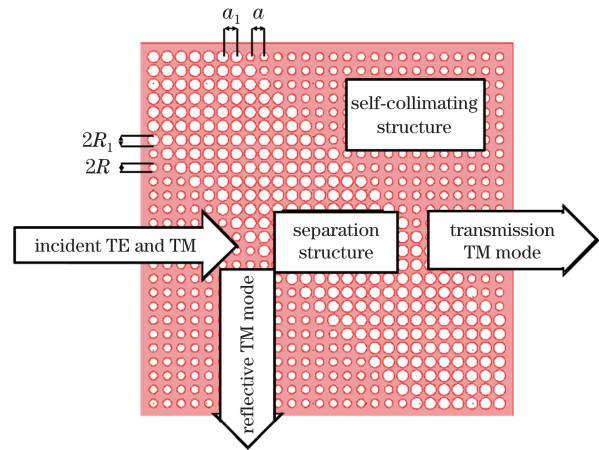


图 9 偏振分束器结构图

Fig. 9 Structure diagram of polarization beam splitter

分离结构中空气孔的排数 n 对分离效果有一定的影响,图 10 给出了 TE 模的反射率和 TM 模的透射率随 n 的变化曲线。如图 10 所示,对 TE 模而言,当 n 从 1 增加到 8 时,其反射率随 n 的增加而增加;当 n 大于 8 时,其变化趋势基本平稳。这说明一定厚度的分离结构对增大 TE 模反射率有益,然而厚到一定程度后就效果不显著了。对 TM 模而言,其透射率随 n 变化并不明显,这是因为 TM 模在分离结构和自准直结构中都处于导带并可实现准直传输。当 $n = 13$ 时,TE 模的反射率为 95.4%,TM 模的透射率为 88.4%。

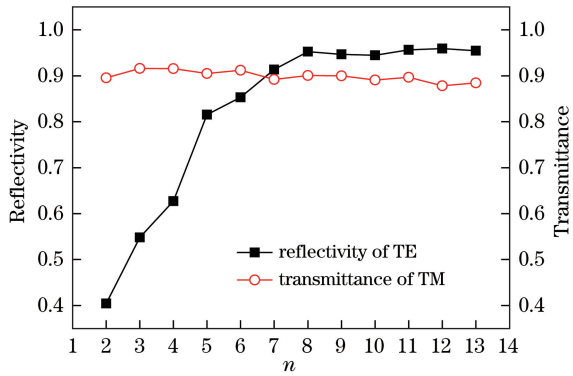


图 10 TE 模的反射率和 TM 模的透射率随 n 的变化
Fig. 10 Reflectivity of TE mode and transmittance of TM mode as a function of n

消光比是偏振分束器的重要指标之一, 可用来衡量偏振模的分离程度, 表达式为:

$$R_{e,TE} = |10 \times \lg(R_{TE}/R_{TM})|, \quad (1)$$

$$R_{e,TM} = |10 \times \lg(T_{TM}/T_{TE})|, \quad (2)$$

式中 $R_{e,TE}$ 和 $R_{e,TM}$ 分别表示 TE 模和 TM 模的消光比, R_{TE} 和 R_{TM} 分别为反射的 TE 模和 TM 模的强度, T_{TM} 和 T_{TE} 分别为透射的 TM 模和 TE 模的强度。图 11 给出了 TE 模和 TM 模的消光比随 n 的变化曲线, 随着 n 的增大, TE 模和 TM 模的消光比都随之增大, 且 TM 模的消光比增长速率明显高于 TE 模; 当 $n=13$, TE 模和 TM 模的消光比均达到峰值, 分别为 19.9 dB 和 26.24 dB。

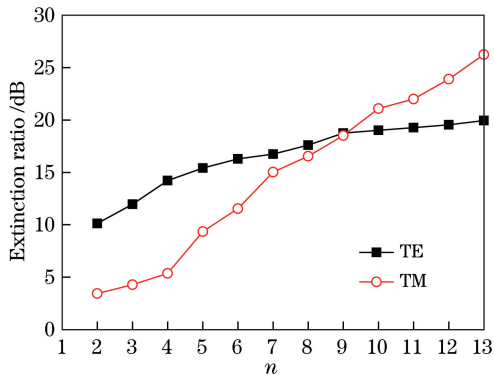


图 11 TE 模和 TM 模的消光比随 n 的变化
Fig. 11 Extinction ratios of TE and TM modes as a function of n

下面进一步分析当分离结构层数 $n=13$ 时, 频率变化对消光比的影响。以自准直频率 3 THz 为中心, 分别计算了 2.5~3.5 THz 范围内的消光比, 计算结果表明, 在 2.5~2.9 THz 以及 3~3.5 THz 范围内都无法实现偏振分离, 原因是该频率范围的 TE 模和 TM 模无法在此结构中自准直传输; 当 f 在 2.9~3.01 THz 范围内变化时, TE 模和 TM 模

的传输和分离效果明显且消光比较好, 即该 THz 偏振分束器的频率工作范围为 2.9~3.01 THz。图 12 给出了 TE 模和 TM 模的消光比随频率的变化, 可以看到, 在整个带宽内, TM 模的消光比均高于 TE 模; 而且两者的消光比随频率的变化缓慢, 基本为常数 (TM 模的消光比在 19 dB 左右, TE 模的消光比在 26 dB 左右); TE 模和 TM 模的消光比的最大值分别为 19.9 dB 和 26.24 dB。

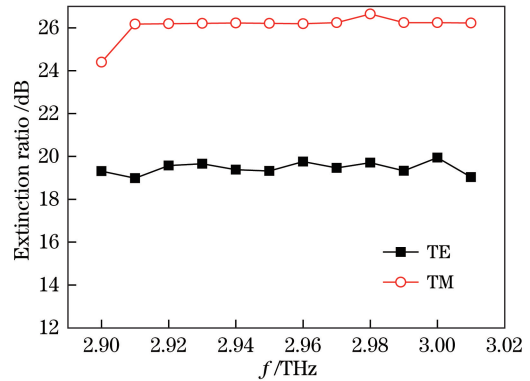


图 12 TE 模和 TM 模的消光比随频率的变化
Fig. 12 Extinction ratios of TE and TM modes as a function of frequency

最后, 利用时域有限差分法计算了 $n=13$ 时所设计的 THz 偏振分束器中 TE 模和 TM 模的稳态场分布, 如图 13 所示。TE 模遇到分离结构无法通过被反射, TM 模可直接通过分离结构向前传输, 从而实现了偏振分离, 自准直传输和分离的效果非常明显。

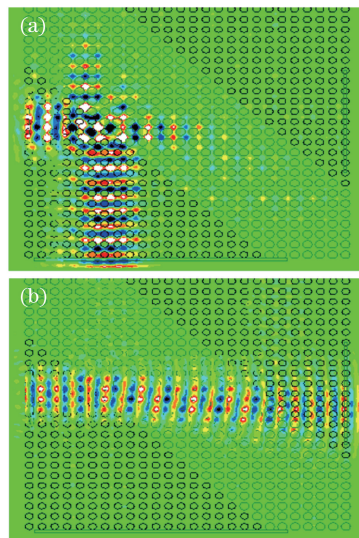


图 13 THz 偏振分束器中 (a) TE 模和 (b) TM 模的稳态场分布

Fig. 13 Steady field distribution of (a) TE mode and (b) TM mode in THz polarization beam splitter

综上所述, 所提出的 THz 偏振分束器因为利用

了自准直效应可控制光的传输,无须额外引入线缺陷引导光的传输,制作相对简单;且与同类 THz 偏

振分束器相比(表 1),频率运行范围宽,且尺寸小,利于集成。

表 1 各类 THz 偏振分束器的性能比较

Table 1 Performance comparison of various THz polarization beam splitters

Item	Classification	Bandwidth /THz	Size
Report	THz polarization beam splitter based on grating ^[19]	0.2-1.5	1 cm×1 cm
	THz polarization beam splitter based on dual core fiber ^[11-13]	0.14 ^[11]	Coupling length less than 15 cm
		0.07 ^[12]	Coupling length less than 1.8 cm
		0.8-2.5 ^[13]	Separation length 0.4-33.56 cm
	THz polarization beam splitter based on photonic crystal ^[15-17]	1 ^[15]	3.15 mm×1.68 mm
0.03 ^[16]		2.58 mm×0.54 mm	
0.0009 ^[17]		1.02 mm×0.99 mm	
Proposed	Photonic crystal THz polarization beam splitter based on self-collimation effect	2.9-3.01	650 μm×650 μm

3 结 论

将光子晶体的自准直效应和光子带隙效应结合,提出了一种新型的光子晶体 THz 偏振分束器。首先设计自准直结构,结合能带图和等频图确定自准直传输频率,讨论了 TE 模和 TM 模的透射率随晶格常数 a 和变化系数 x 的变化;其次设计分离结构,讨论了自准直传输频率下,TE 模及 TM 模的光子带隙和 TM 模的透射率随空气孔半径 R_1 的变化;最后将两者有机结合构成 THz 偏振分束器,讨论了 TE 模的反射率、TM 模的透射率和 TE 及 TM 模的消光比随分离结构中空气孔的排数 n 的变化,最后还讨论了频率变化对消光比的影响。研究表明,在自准直结构中,频率为 3 THz 时, $a = 26 \mu\text{m}$, $R = 0.3a$,TE 模和 TM 模的透射率均达到最大,分别为 97% 和 95%。在分离结构中,频率为 3 THz, $a_1 = 26 \mu\text{m}$, $R_1 = 9.6 \mu\text{m}$ 时,TE 模无法传输且 TM 模的透射率最大为 88%。在偏振分束器结构中, n 大于 8 时,TE 模的反射率、TM 模的透射率变化趋势基本平稳且均大于 85%;TE 模和 TM 模的消光比均随 n 的增加而增加,当 $n = 13$,TE 模和 TM 模的消光比均达到峰值,分别为 19.9 dB 和 26.24 dB;TE 模和 TM 模的消光比随频率的变化缓慢。

此外,随着纳米技术的不断发展,光子晶体器件的制备技术日益成熟,人们能够通过各种方法制备出光子晶体器件,例如多点曝光法、三光束制备法、多孔硅制备法等^[20],这为所设计的光子晶体 THz

偏振分束器的加工提供了有利条件。

参 考 文 献

- [1] Hou Y. Design and research on terahertz fiber functional device[D]. Tianjin: Nankai University, 2013: 25-28.
侯宇. 太赫兹光纤功能-器件的设计与研究[D]. 天津: 南开大学, 2013: 25-28.
- [2] Wang C H. Researches on sub-wavelength structured functional devices in terahertz frequency range[D]. Tianjin: Nankai University, 2013: 46-52.
王昌辉. 亚波长微结构太赫兹功能器件的研究[D]. 天津: 南开大学, 2013: 46-52.
- [3] Galan J V, Sanchis P, Garcia J, *et al.* Study of asymmetric silicon cross-slot waveguides for polarization diversity schemes[J]. Applied Optics, 2009, 48(14): 2693-2696.
- [4] Lee Y, Han K, Lee B, *et al.* Polarization-independent all-fiber multiwavelength-switchable filter based on a polarization-diversity loop configuration[J]. Optics Express, 2003, 11(25): 3359-3364.
- [5] Saitoh K, Florous N, Koshihara M. Ultra-flattened chromatic dispersion controllability using a defected-core photonic crystal fiber with low confinement losses[J]. Optics Express, 2005, 13(21): 8365-8371.
- [6] Pan P, Li L L, Cai X Y. Design and error analysis of silica on silicon based polarization beam splitter[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(12): 122301.
潘盼, 李伶俐, 蔡雪原. 硅基二氧化硅偏振分束器的设计及误差分析[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(12): 122301.
- [7] Li X Y, Xu Z L, Liu P, *et al.* Short polarization

- splitter based on dual-core photonic crystal fiber with ultra-high extinction ratio[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(6): 0605006.
- 李绪友, 许振龙, 刘攀, 等. 短长度超高消光比双芯光子晶体光纤偏振分束器[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0605006.
- [8] Mao D, Guan C Y, Yuan L B. Polarization splitter based on interference effects in all-solid photonic crystal fibers[J]. Applied Optics, 2010, 49(19): 3748-3752.
- [9] Saitoh K, Sato Y, Koshiba M. Polarization splitter in three-core photonic crystal fibers[J]. Optics Express, 2004, 12(17): 3940-3946.
- [10] Wen K, Wang R, Wang J Y, *et al.* Polarization splitter based on resonant tunneling phenomenon in three-core photonic crystal fibers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(12): 1962-1965.
- 文科, 王荣, 汪井源, 等. 基于谐振耦合现象的三芯光子晶体光纤偏振分束器[J]. 中国激光, 2008, 35(12): 1962-1965.
- [11] Bai J J, Wang C H, Hou Y, *et al.* Terahertz dual-core photonic band-gap fiber directional coupler[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(10): 108701.
- 白晋军, 王昌辉, 侯宇, 等. 太赫兹双芯光子带隙光纤定向耦合器[J]. 物理学报, 2012, 61(10): 108701.
- [12] Jiang Z W, Bai J J, Hou Y, *et al.* Terahertz dual air core fiber directional coupler[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(2): 028702.
- 姜子伟, 白晋军, 侯宇, 等. 太赫兹双空芯光纤定向耦合器[J]. 物理学报, 2013, 62(2): 028702.
- [13] Li S S, Zhang H, Bai J J, *et al.* Dual-porous fiber-based low loss broadband terahertz polarization splitter[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(14): 1399-1402.
- [14] Zhu Y F. Study on microstructured low loss THz fiber and fiber sensing technology[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2014: 16-22.
- 祝远锋. 微结构低损耗太赫兹光纤及光纤传感技术研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2014: 16-22.
- [15] Fan F, Guo Z, Bai J J, *et al.* Magnetically tunable magneto-photonic crystals for multifunctional terahertz polarization controller[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(8): 084219.
- 范飞, 郭展, 白晋军, 等. 多功能磁光子晶体太赫兹可调偏振控制器件[J]. 物理学报, 2011, 60(8): 084219.
- [16] Li J S, Liu H. Terahertz polarization beam splitter based on two photonic crystal cavities[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2015, 126(1): 139-143.
- [17] Mo G Q, Li J S. Compact terahertz wave polarization beam splitter using photonic crystal[J]. Applied Optics, 2016, 55(25): 7093-7097.
- [18] Wu Z H. Study on self-collimation effect in photonic crystal and its applications[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012: 32-41.
- 伍振海. 光子晶体自准直现象及其应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012: 32-41.
- [19] Zhang M E, Wang W T, Liu P A, *et al.* Research of sub-wavelength wire-grid terahertz polarizing beam splitters[J]. Laser Technology, 2013, 37(3): 297-300.
- 张蒙恩, 王文涛, 刘平安, 等. 亚波长线栅太赫兹偏振分束器的研究[J]. 激光技术, 2013, 37(3): 297-300.
- [20] Li W C. Investigation on photonic crystal with tunable refractive index and experimental characteristics[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2011: 53-57.
- 李文超. 折射率可调的光子晶体及实验的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2011: 53-57.