

基于多模干涉结构的可调控偏振分束器设计与分析

孟方, 王亚新, 毛强, 唐雄贵*

湖南师范大学物理与电子科学学院, 湖南 长沙 410081

摘要 可调控偏振分束器是一种新型光波导功能器件, 对于提升集成光子系统性能或发展新应用有重要作用。采用多模干涉光波导结构, 利用液晶的大双折射效应和高可调性能, 提出了一种新型可调控偏振分束器。采用光束传输方法对偏振分束器的光学性能进行了模拟分析。结果表明, 该偏振分束器不仅易于实现高的消光比和低的光损耗。对于横电(TE)模和横磁(TM)模偏振, 其偏振消光比大于 28.7 dB, 光损耗小于 0.024 dB, 而且通过调控液晶晶轴的取向, 可以动态调控 TE 模和 TM 模的输出端口。该器件结构简单, 易于设计与制作, 易于与其他光子器件进行集成, 在集成光子系统中有着广阔的应用前景。

关键词 集成光学; 偏振分束器; 多模干涉; 光波导; 双折射

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.051301

Design and Analysis of Controllable Polarization Beam Splitter Based on Multimode Interference Structure

Meng Fang, Wang Yaxin, Mao Qiang, Tang Xiongui*

College of Physics and Electronic Science, Hunan Normal University, Changsha, Hunan 410081, China

Abstract Controllable polarization beam splitter is a new type of optical waveguide functional device, which plays an important role in improving the performance of integrated photon system or developing new applications. A novel controllable polarization beam splitter is proposed by utilizing the large birefringence effect and high tunability of liquid crystal, in which the multimode interference optical waveguide structure is adopted. The optical performance of the polarization beam splitter is simulated and analyzed by the beam propagation method. The results show that, the polarization beam splitter is easy to achieve a high extinction ratio and a low optical loss. The polarization extinction ratio is over 28.7 dB and optical loss is less than 0.024 dB for both transverse electric (TE) wave and transverse magnetic (TM) wave polarizations. And the output ports of TE wave and TM wave can be dynamically controlled by adjusting the orientation of the crystal axis of liquid crystal. This device has several advantages such as simple structure, ease for design and manufacture, ease for integration with other photonic device, which has a wide potential application prospect in the photonic integrated circuits.

Key words integrated optics; polarization beam splitter; multimode interference; optical waveguide; birefringence

OCIS codes 130.5440; 260.3160; 230.7370

1 引言

偏振分束器是一种重要的光学功能器件, 且在多种光学领域有着广泛的应用。传统偏振分束器采用棱镜结构^[1-2], 属于体光学器件。虽然偏振分离在这种光学系统中易于实现, 但其存在体积大、质量重等缺点。这种传统器件可应用于自由空间传输系

统, 但其不能在集成光子系统中应用。基于此, 研究人员提出了多种波导型偏振分离方案, 如光子晶体型结构^[3-5]、定向耦合型结构^[6]、马赫-曾德尔干涉型结构^[7-8]和多模干涉(MMI)耦合型结构^[9-10]、Y分支波导结构^[11-12], 但是这些器件通常属于静态型器件, 其偏振输出不能在线动态调控, 这使得其应用领域和范围受到诸多限制, 无法满足未来集成光子系

收稿日期: 2018-08-10; 修回日期: 2018-09-12; 录用日期: 2018-09-27

基金项目: 湖南省自然科学基金(2016JJ2087)、湖南师范大学青年科学基金

* E-mail: tangxg@hunnu.edu.cn

统的需要。针对上述器件所存在的问题,研究人员积极探索新结构来实现可控偏振分离,积极发展新应用。

1990年,Han等^[13]提出了基于LiNbO₃的双模干涉耦合型波导结构的偏振分束器。通过控制器件中电场的方向和大小,使得双模区横电(TE)波和横磁(TM)波的光路长度出现差异,从而实现分离或组合两个偏振态的输出。该器件能实现TE波和TM波输出端口的动态调控,但该器件电极结构复杂、制作难度大、尺寸过大,这不利于高密度集成。2013年,Tang等^[14]提出了一种基于电光效应的Y分支波导结构的可控偏振分束器。该偏振分束器为脊型波导结构,采用向列相液晶材料作为分支点的波导芯层,利用液晶的大双折射效应和高可调性能,从而实现TE波和TM波输出端口的动态调控,且该偏振分束器具有消光比高、光损耗低、波长依赖性小等优点,但该偏振分束器利用液晶材料作为波导芯层,要求分支处液晶与芯层侧面光滑且平整,这使得该器件的制造工艺较为复杂,不易于实现。

基于此,本文采用有机聚合物/液晶材料,基于

多模波导结构,利用向列液晶的电光效应,有效实现偏振分离且其偏振光输出端口可动态调控。

2 结构设计与工作原理

通常,根据器件制作材料的来源,波导可以分为无机波导、有机波导和混合型波导。为了便于器件设计与制作,这里采用混合型波导。器件的原理结构如图1所示,其中图1(a)为器件的俯视图,可以看到,器件由输入直波导、多模波导和输出直波导三部分组成,其中多模区波导为级联结构,长度分别为 L_1 和 L_2 ,宽度分别为 W_1 和 W_2 ,输入直波导和输出直波导的宽度均为 W_3 。图1(b)和(c)是液晶处于水平和垂直状态时的横截面图,器件横截面为条形波导结构,由下包层、芯层和上包层构成,下包层、芯层的折射率分别为 n_3 、 n_2 ,图中蓝色所示部分是上包层,其材料为液晶,具有正双折射特性。芯层的脊高为 H ,脊的宽度为 W_4 。图1(b)中,当电极间的电压为0时,液晶光轴初始取向与基板平行;但当上下电极之间施加饱和电压为 U_0 时,由于电光效应其光轴取向从水平状态旋转到垂直状态,如图1(c)所示。

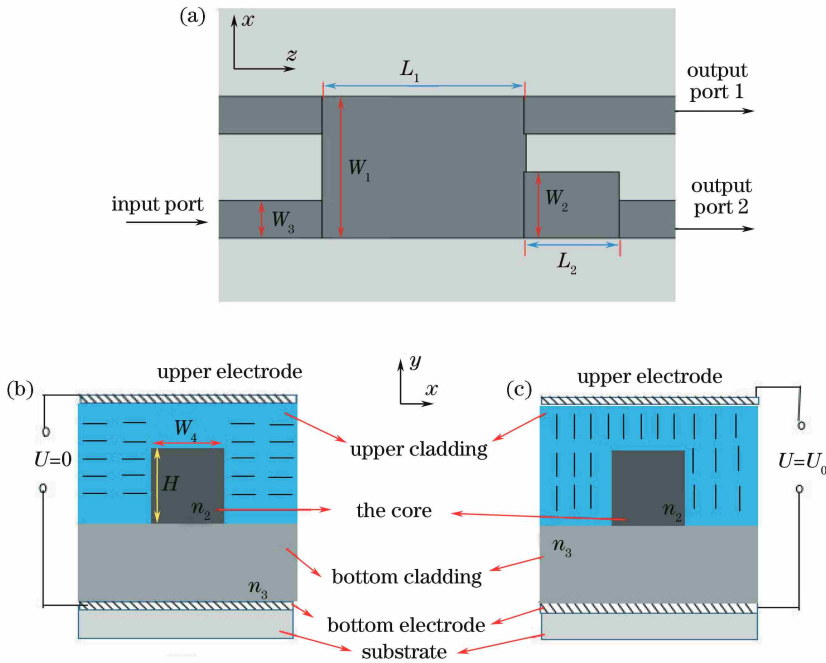


图1 可控偏振分束器的原理图结构。(a)俯视图;液晶处于(b)水平状态时和(c)垂直状态时的横截面图

Fig. 1 Schematic structure of controllable polarization beam splitter. (a) Top view; cross-sectional view when the liquid crystal director is (b) in horizontal states and (c) in vertical states

通常,在多模干涉型波导中存在自成像效应,即在传播方向上会周期性地产生自身像,这是多模区不同模场在传播过程中互相干涉形成的。其周期性成像距离为^[15-16]

$$L = m(3L_\pi), \quad (1)$$

式中: m 是正整数,表示周期数; L_π 表示两最低阶模的拍频长度,其大小为

$$L_{\pi} = \frac{\pi}{\beta_0 - \beta_1} = \frac{4n_r W_{\text{eff}}^2}{3\lambda_0}, \quad (2)$$

其中, n_r 为有效折射率, W_{eff} 是多模波导的有效宽度, β_0 与 β_1 表示两最低阶模的传播常数, λ_0 为自由空间波长。在(1)式中, 当 m 为奇数时, 光信号将沿 port 2 输出。当 m 为偶数时, 光信号将沿 port 1 输出。对于 TE 波和 TM 波, 其对应的拍频长度不同, 即 $L_{\pi}^{\text{TE}} \neq L_{\pi}^{\text{TM}}$, 因而需要通过选择合理的结构参数, 使得 TE 波和 TM 波从不同端口输出。另外, 在设计过程中, 采用级联式多模干涉波导结构, 可有效减少器件尺寸并提高偏振分离消光比^[17]。当电极不施加调控电压时, 调控区上包层液晶光轴沿水平方向, 如图 1(b) 所示。对 TE 波和 TM 波来说, 由于液晶的双折射效应, 其调控区上包层折射率分别为 n_o 和 n_e 。由于自成像效应, TE 波光信号将从端口 1 输出, 而 TM 波将从端口 2 输出。当施加饱和电压时, 液晶光轴沿竖直方向, 如图 1(c) 所示。这时对 TE 模和 TM 模来说, 其调控区上包层液晶的折射率分别为 n_e 和 n_o , 因而 TE 模从输出端口 2 输出, TM 模从输出端口 1 输出, 从而实现对偏振光输出端口的动态调控。

对于该器件, 其制作过程与传统的有机聚合物波导类似^[18], 其不同点是上包层和下包层的制作。首先, 将两块氧化钢锡(ITO)玻璃的导电膜分别作为上下电极。然后, 在其中一块 ITO 玻璃导电膜上使用等离子体增强化学气相沉积的方法生长下包层(厚度通常大于 $5 \mu\text{m}$), 并在下包层上旋涂有机聚合

物材料, 采用光学光刻和反应离子刻蚀方法, 从而在下包层上制备出波导芯层(厚度通常为 $1 \sim 3 \mu\text{m}$)。接着, 在另一块 ITO 玻璃导电膜上旋涂聚酰胺酸, 并对其进行固化和摩擦取向。最后, 进行液晶(厚度通常为 $5 \sim 15 \mu\text{m}$)的灌注与封装。基于目前的技术水平, 实验中用到的接触式光刻和反应离子刻蚀等方法均能达到该器件结构的精度要求。

3 模拟与分析

在所设计的器件中, 波导芯层为有机聚合物材料 IPC-E(质量分数为 25%), 其折射率为 1.672; 波导下包层和上包层材料分别为 SiO_2 和向列液晶(NLC) SLC077015-000, 其中 SiO_2 材料的折射率为 1.455, NLC 材料的寻常光和非常光所对应的折射率分别为 1.472 和 1.55。条形波导的脊高和宽度分别为 $1.7 \mu\text{m}$ 和 $3 \mu\text{m}$, 其中多模区波导长度 L_1 和 L_2 分别为 $732 \mu\text{m}$ 和 $289 \mu\text{m}$, 宽度 W_1 和 W_2 分别为 $12 \mu\text{m}$ 和 $7 \mu\text{m}$, 光信号波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 。这里, 采用光束传播法(BPM-3D)对所提出的波导型可控偏振分束器的光学性能进行仿真模拟。当两端电极不施加控制电压时, NLC 的晶轴取向沿水平方向。图 2 表示该器件中 TE 波和 TM 波光信号传播的光场分布图, TE 波光信号从输出端口 port 1 输出, TM 波光信号在输出端口 port 2 输出, 从而实现 TE 波和 TM 波的检偏分离输出。经计算得出, TE 波和 TM 波的消光比分别高达 28.7 dB 和 29 dB, 光损耗分别仅为 0.024 dB 和 0.012 dB。

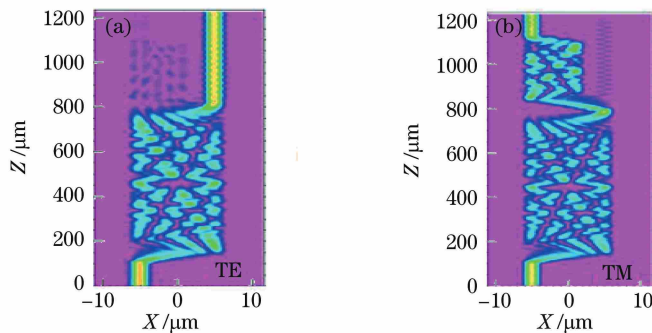


图 2 液晶晶轴沿水平方向时光信号在传播过程中的光场分布。(a) TE 波; (b) TM 波

Fig. 2 Optical field distributions of signal in process of propagating when crystal axis of liquid crystal is along horizontal direction. (a) TE wave; (b) TM wave

当控制电极施加饱和电压 $U_0 = 12 \text{ V}$ 时, NLC 的晶轴取向变为竖直方向, 图 3 为该器件中 TE 波和 TM 波光信号传播的光场分布图, TE 波光信号从 port 2 输出, TM 波光信号从 port 1 输出, 从而实现 TE 波和 TM 波的检偏分离输出。经计算得出,

TE 波和 TM 波的消光比分别高达 33 dB 和 29.6 dB, 光损耗分别仅为 0.009 dB 和 0.018 dB。上述模拟结果表明, 通过电压调控液晶的晶轴方向, 该偏振分束器能够实现动态调控 TE 波和 TM 波的输出端口。

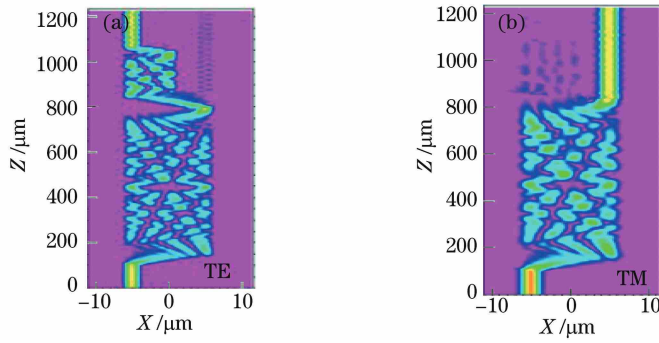


图3 液晶晶轴沿竖直方向时光信号在传播过程中的光场分布。(a) TE波;(b) TM波

Fig. 3 Optical field distributions of signal in process of propagating when crystal axis of liquid crystal is along vertical direction. (a) TE wave; (b) TM wave

实际上,光源并不是单色光,通常具有几十至上百纳米的谱宽,因而需要考虑光波长变化对器件性能的影响。假设入射光的波长 λ 变化范围为 $1.525\sim 1.565\mu\text{m}$ 。当液晶晶轴沿水平方向时,模

拟结果如图4所示,给出了不同输出端口的TE波和TM波的光功率输出随工作波长的变化关系。结果表明,器件在较大波长变化范围内偏振消光比变化较小,这在实际应用中十分有用。

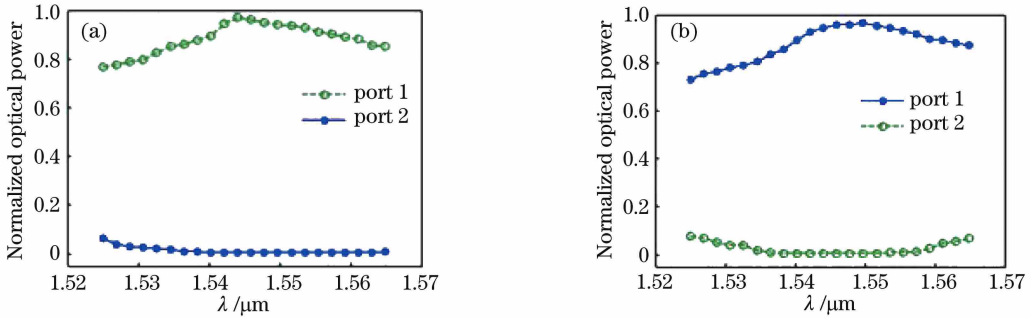


图4 归一化光功率与工作波长的关系曲线。(a) TE波;(b) TM波

Fig. 4 Normalized optical power output varying with the operation wavelength. (a) TE wave; (b) TM wave

此外,由于器件在工艺制作过程中会存在一定的偏差,因而需考察工艺偏差对其光学性能的影响。通常,基于多模干涉结构的光波导功能器件具有结构简单、工艺宽容度大等优点,这里限于论文篇幅,仅对波

导脊高变化对偏振分离性能影响进行分析,其模拟结果如图5所示,当波导脊高工艺偏差在 $\pm 0.1\mu\text{m}$ 范围内时,其光功率输出变化很小。在目前工艺水平条件下,很容易使工艺偏差控制在 $\pm 0.1\mu\text{m}$ 范围内。

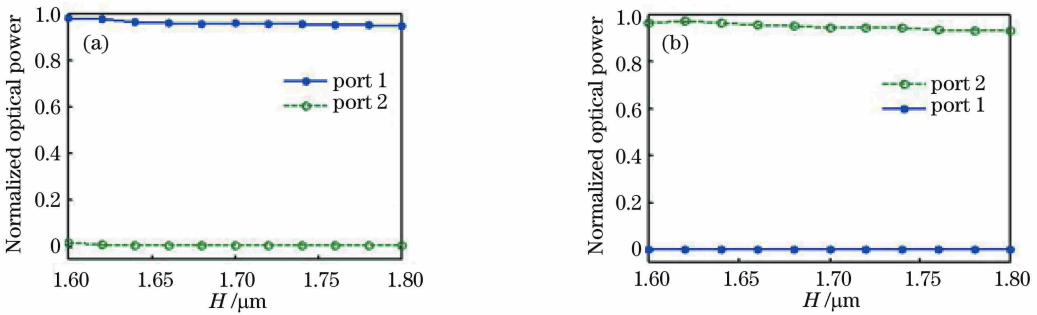


图5 归一化光功率随脊高变化关系。(a) TE波;(b) TM波

Fig. 5 Normalized optical power output varying with the rib thickness. (a) TE wave; (b) TM wave

4 结 论

采用多模干涉型波导结构,巧妙利用液晶的各

向异性特性,设计了一种偏振分离器。通过电光效应,改变液晶光轴取向,从而实现偏振光输出端口的动态可调。数值模拟结果表明,该器件能实现消光

比大于 28.7 dB 的偏振分离,同时光损耗小于 0.024 dB。该器件结构简单,制作简便,易于与其他波导功能器件集成,实现新型集成光子系统。

参 考 文 献

- [1] Wong G, Pilkington R, Harvey A R. Achromatization of Wollaston polarizing beam splitters[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(8): 1332-1334.
- [2] Li H X, Fan J Y, Su F F, *et al.* Suppressing the disturbance in the transmission spectrum of Glan-Thompson-type prism polarizers[J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(4): 428-430.
- [3] Cassan E, Do K V, Dellinger J, *et al.* Polarization beam splitting using a birefringent graded photonic crystal[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(4): 459-461.
- [4] Wang J L, Liu Y, Chen H M. Design on terahertz polarization beam splitter based on self-collimating effect of photonic crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(4): 0423001.
汪静丽, 刘洋, 陈鹤鸣. 基于光子晶体自准直效应的太赫兹偏振分束器设计[J]. *光学学报*, 2018, 38(4): 0423001.
- [5] Zhang X X, Chen H M. Design and performance analysis of photonic crystal polarizing beam splitter[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(1): 011301.
张信祥, 陈鹤鸣. 光子晶体偏振分束器的设计与性能分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(1): 011301.
- [6] Fernandes L A, Grenier J R, Herman P R, *et al.* Femtosecond laser fabrication of birefringent directional couplers as polarization beam splitters in fused silica[J]. *Optics Express*, 2011, 19(13): 11992-11999.
- [7] Soldano L B, de Vreede A I, Smit M K, *et al.* Mach-Zehnder interferometer polarization splitter in InGaAsP/InP[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1994, 6(3): 402-405.
- [8] 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.
- [9] Huang Y W, Tu Z, Yi H X, *et al.* High extinction ratio polarization beam splitter with multimode interference coupler on SOI[J]. *Optics Communications*, 2013, 307: 46-49.
- [10] Jiao Y Q, Dai D X, Shi Y C, *et al.* Shortened polarization beam splitters with two cascaded multimode interference sections[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21(20): 1538-1540.
- [11] Kim J W, Kim K J, Oh M C, *et al.* Polarization-splitting waveguide devices incorporating perfluorinated birefringent polymers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(12): 1842-1846.
- [12] Oh M C, Lee M H, Lee H J. Polymeric waveguide polarization splitter with a buried birefringent polymer[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, 11(9): 1144-1146.
- [13] Han K G, Kim S, Choi S S. Controllable integrated-optic polarization splitter-combiner[J]. *Optics Letters*, 1990, 15(2): 108-109.
- [14] Tang X G, Liao J K, Li H P, *et al.* Novel approach for controllable polarization beam splitter: design and simulation[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2013, 49(1): 43-50.
- [15] Soldano L B, Pennings E C M. Optical multimode interference devices based on self-imaging: principles and applications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1995, 13(4): 615-627.
- [16] Huang Y W, Tu Z, Yi H X, *et al.* Polarization beam splitter based on cascaded step-size multimode interference coupler[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(7): 077103.
- [17] Han L S, Liang S, Zhu H L, *et al.* A high extinction ratio polarization beam splitter with MMI couplers on InP substrate[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(7): 782-785.
- [18] Sun S Q, Niu D H, Sun Y, *et al.* Design and fabrication of all-polymer thermo-optic variable optical attenuator with low power consumption[J]. *Applied Physics A-Materials Science & Processing*, 2017, 123(10): 646.