

波导型可调控检偏器设计与模拟

王亚新, 毛强, 唐雄贵

湖南师范大学物理与信息科学学院低维量子结构与调控教育部重点实验室, 湖南 长沙 410006

摘要 波导型可调控检偏器是集成光子系统中的核心元器件之一,其输出偏振态具有动态调控特性,在集成光子系统中具有重要的应用价值。提出了一种新型波导型可调控检偏器,该器件采用偏折倒脊型波导结构,利用液晶材料的各向异性和大双折射特性并基于电光效应实现对光束偏振态的调控,完成横电波和横磁波的可调控输出。采用光束传播法对所提器件的光学特性进行了模拟分析,模拟结果表明,该新型波导型可调控检偏器的消光比高达 29.8 dB,光损耗仅为 0.002 dB,且该器件对波长和制作工艺误差 insensitive。所提器件具有动态调控简便、易于设计和制作、结构简单等诸多优点,在集成光子系统中具有广阔的应用前景。

关键词 集成光学; 可调控性; 检偏器; 液晶材料; 光束传播法

中图分类号 O436.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.011301

Design and Simulation of Controllable Polarization Analyzer Based on Waveguide Structures

Wang Yaxin, Mao Qiang, Tang Xiongwei

Key Laboratory of Low Dimensional Quantum Structures and Quantum Control, College of Physics and Information Science, Hunan Normal University, Changsha, Hunan 410006, China

Abstract A controllable polarization analyzer based on waveguide structures is one of core components in integrated photonic systems, whose output polarization state can be dynamically manipulated, and it has an important application value in integrated photonic systems. A novel controllable polarization analyzer based on deflection ridge waveguide is proposed. With the anisotropy and large birefringence of the liquid crystal material, the controllable output of transverse electric wave and transverse magnetic wave can be realized based on the electro-optical effect. The optical performance of the proposed device is numerically demonstrated by beam propagation method. The results show that the extinction ratio of the proposed system is 29.8 dB and the optical loss is only 0.002 dB, and the proposed device is insensitive to wavelength and fabrication error. The proposed device has the advantages such as simple dynamic control, easy design and fabrication and simple structure, which has wide applications in integrated photonic systems.

Key words integrated optics; controllability; polarization analyzer; liquid crystal material; beam propagation method

OCIS codes 130.3120; 130.1750; 130.5440

1 引言

波导型偏振功能器件是集成光子系统中不可或缺的核心单元器件。在集成光子系统中,通常存在

偏振模式色散、偏振相关损耗、偏振相关增益等诸多偏振效应,易导致信号波动、幅度噪声和波形失真等问题,从而严重影响光通信系统的性能,因此需设计和制作偏振功能器件以改善集成光子系统的性能。

收稿日期: 2017-07-21; 收到修改稿日期: 2017-08-18

基金项目: 湖南省自然科学基金(2016JJ2087)、研究生创新基金(CX2016B205)

作者简介: 王亚新(1989—),女,硕士研究生,主要从事集成光学及波导光学方面的研究。

E-mail: 1226516378@qq.com

导师简介: 唐雄贵(1974—),男,博士,副教授,主要从事集成光学及微光学等方面的研究。

E-mail: tangxg@hunnu.edu.cn(通信联系人)

基于此,国内外研究人员提出了多种不同的方案^[1-7]。具有不同结构和工作原理的波导型偏振功能器件通常属于静态型传统元器件,其偏振输出不能通过在线动态调控,这不仅使其应用领域和范围受到较大限制,而且在器件设计和制作中与其他光子器件集成时也将产生新的问题。

近年来,波导型可调控偏振功能器件引起了科研工作者的极大兴趣。设计和制作可调控偏振功能器件不仅能解决光子系统中不同功能器件的偏振效应,同时还可解决因制作工艺误差引起的器件性能下降的问题。可调控偏振功能器件还可用于对集成光子系统在不同状态下的不同偏振光的传输损耗进行在线监测。此外,在偏振复用通信技术和偏振光时域反射技术中,需要利用可调控偏振功能器件对偏振态进行在线调控;在量子通信中,对量子信息进行编码和解码的过程均需要利用可调控偏振功能器件来完成,器件性能的高低将直接影响通信速率和误码率。目前,有关可调控偏振功能器件的实现方案有很多^[8-10],但这些器件通常适用于自由空间光传输和光纤系统中的偏振调控,而目前有关用于集成光子系统偏振调控方面的报道较少。因此,探索波导型偏振功能器件调控过程的新原理、新方法与新技术,对于提高集成光子系统性能或发展新型功能的光子系统具有重要意义。

可调控检偏器是一种重要的光子功能器件,可用于动态地获得横电(TE)/横磁(TM)偏振光。获得 TE/TM 偏振光的方法有多种,按可调控检偏器的结构形式主要分为体光学元件型结构^[11]、光栅型结构^[12-13]、光纤型结构^[14]和波导型结构^[15]。已报道的波导型可调控检偏器通常存在设计与制作难度大、稳定性差、不易集成以及对结构参数和波长变化敏感等缺点。具有体光学元件型结构和光栅型结构的检偏器,适用于实现全息、干涉光刻、成像等的自由空间光学系统,但不适用于集成光子系统。光纤型结构主要用于实现偏振监测和偏振复用的光纤通信系统,但同样不适用于集成光子系统。

基于目前存在的问题,通过充分考虑波导结构器件的特点与优势,设计了一种新型波导型可调控检偏器。该器件利用液晶的各向异性光学特性和晶轴可调控特性,通过电场调控改变调控区域液晶的折射率,完成 TE 波和 TM 波的动态检偏输出,从而实现光信号不同偏振态的在线检偏。

2 结构设计

该波导型可调控检偏器由倒脊型光波导和用于

调控的液晶构成,波导型可调控检偏器原理结构图如图 1(a)所示,图 1(b)、(c)分别为波导在图 1(a)中 A_1A_2 、 B_1B_2 位置处的横截面图。第一偏折波导、第二偏折波导与轴之间的夹角分别为 θ 和 2θ ,夹角 θ 满足^[16-17]

$$0 < \theta < \min\left(\arccos \frac{N_1^{\text{TE}}}{N_2^{\text{TE}}}, \arccos \frac{N_1^{\text{TM}}}{N_2^{\text{TM}}}\right), \quad (1)$$

式中 N_1^{TE} 和 N_2^{TE} 分别为 TE 波在液晶材料和波导芯层材料中的等效折射率, N_1^{TM} 和 N_2^{TM} 分别为 TM 波在液晶材料和波导芯层材料中的等效折射率, $\min(\cdot)$ 表示取最小值。器件上包层、芯层和下包层分别采用有机聚合物材料 UV-15、SU-8 和 UV-15,其折射率分别为 n_1 、 n_2 和 n_1 。选择有机聚合物材料 UV-15、SU-8 和 UV-15 的原因是它们具有良好的光学、机械和力学特性,且热稳定性与化学稳定性较好。如图 1 所示,蓝色的调控区采用向列相液晶材料 E7,其折射率关系满足 $n_e > n_2 > n_o \approx n_1$,具有正双折射性,其中 n_o 和 n_e 分别为寻常光和非寻常光的折射率。调控区包层材料上下两面分别为上电极和下电极,电极结构为微带线电极结构。采用有限元法对液晶部分在不同电压下的电场分布进行模拟分析,结果表明,随着上下电极间施加电压的增大,液晶内的电场强度增大,所施加的调控电压范围宜在 $0 \sim 200$ V 之间^[18]。液晶晶轴初始取向在波导平面内,与直波导方向平行。光信号通过锥形光纤耦合进入直波导,沿波导向前传播。当电极施加调控电压 U 时,液晶晶轴由水平方向转向竖直方向, TM 波在调控区波导内因存在泄漏损耗而急剧衰减,但 TE 波因全内反射会沿偏折波导继续向前传播,经弯曲波导后从输出直波导输出,从而完成对 TE 波的检偏;反之,当电极不施加调控电压时,TE 波在调控区因存在泄漏损耗而急剧衰减,从而实现 TM 波的检偏,因此可实现光信号不同偏振态的可调控检偏输出。所设计的波导型可调控检偏器为倒脊型偏折波导结构,有利于降低工艺制作难度。所用材料均为有机聚合物,采用光学光刻和反应离子刻蚀的方法制作波导,且通常采用灌注工艺制成液晶膜层。

在检偏器的结构设计中,消光比是表征器件光学特性的重要参数,TE 波和 TM 波的消光比表达式分别为

$$E_{\text{RTE}} = 10 \lg \frac{P_{\text{out}}^{\text{TE}}}{P_{\text{out}}^{\text{TM}}}, \quad (2)$$

$$E_{\text{RTM}} = 10 \lg \frac{P_{\text{out}}^{\text{TM}}}{P_{\text{out}}^{\text{TE}}}, \quad (3)$$

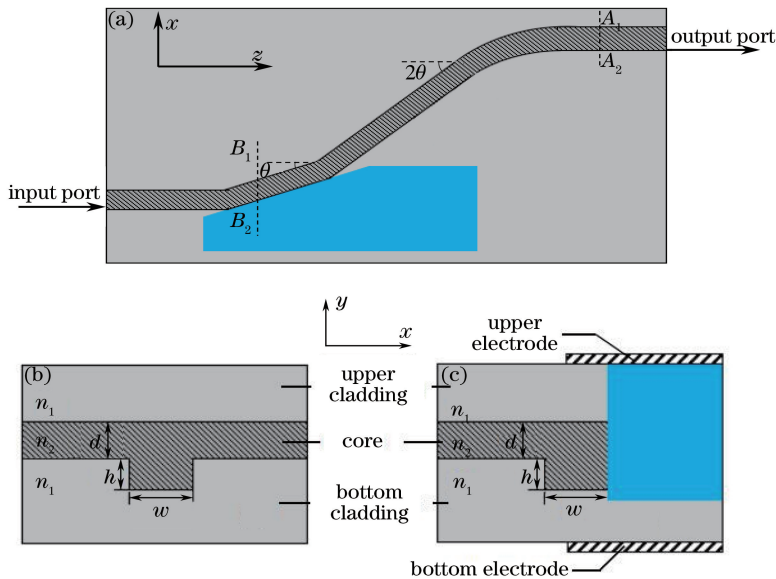


图 1 (a)波导型可控检偏器原理结构图;(b) A_1A_2 位置处的波导横截面图;(c) B_1B_2 位置处的波导横截面图

Fig. 1 (a) Structural schematic of controllable polarization analyzer based on waveguide structure;

(b) cross-sectional view of waveguide at position of A_1A_2 ; (c) cross-sectional view of waveguide at position of B_1B_2

式中 $P_{\text{out}}^{\text{TM}}$ 和 $P_{\text{out}}^{\text{TE}}$ 分别为 TM 波和 TE 波的输出光功率。此外,光损耗也是衡量器件质量的重要性能指标,光损耗的大小由光模场失配和光散射所引起的损耗决定,光损耗的表达式为

$$E_{\text{LTE}} = -10 \lg \frac{P_{\text{out}}^{\text{TE}}}{P_{\text{in}}^{\text{TE}}}, \quad (4)$$

$$E_{\text{LTM}} = -10 \lg \frac{P_{\text{out}}^{\text{TM}}}{P_{\text{in}}^{\text{TM}}}, \quad (5)$$

式中 E_{LTE} 和 E_{LTM} 分别为 TE 波和 TM 波的光损耗; $P_{\text{in}}^{\text{TE}}$ 和 $P_{\text{in}}^{\text{TM}}$ 分别为 TE 波和 TM 波的输入光功率。

3 模拟与分析

在光通信系统中,假定光信号的工作波长为 1550 nm。所设计的器件中,波导芯层为有机聚合物材料 SU-8,其折射率为 1.672;波导包层材料为有机聚合物材料 UV-15,其折射率为 1.5。调控区材料为液晶材料 E7,其寻常光和非寻常光所对应的折射率分别为 1.500 和 1.685。波导芯层厚度 $d = 0.6 \mu\text{m}$,脊高 $h = 0.9 \mu\text{m}$,宽度 $w = 5 \mu\text{m}$,偏向角 θ 为 1.2° 。为降低计算成本并缩短计算时间,采用有效折射率法将三维波导等效为二维平板波导^[19]。对于 TE 波,波导芯层和包层区域的等效折射率分别为 1.6100 和 1.6428;对于 TM 波,波导芯层和包层区域的等效折射率分别为 1.6020 和 1.6397;这种差异是由波导的双折射效应引起的。在调控区,当控制电极不施加调控电压时,液晶的晶轴取向沿水

平方向,则 TE 波和 TM 波所对应的等效折射率分别为 1.6553 和 1.5000;当控制电极施加调控电压 U_0 时,液晶中产生电场,液晶的晶轴由水平方向变为竖直方向,则 TE 波和 TM 波所对应的等效折射率分别为 1.5000 和 1.6521,液晶材料的光学各向异性为可控检偏器的实现提供了物质基础。

采用光束传播法对所提出的波导型可控检偏器的光学性能进行仿真^[19]。当控制电极不施加调控电压时,液晶的晶轴取向为初始方向,即沿水平方向。当液晶晶轴取向沿水平方向时,光信号在传播过程中的光场分布如图 2 所示。此时,对于 TE 波和 TM 波,光损耗分别为 29.800 dB 和 0.003 dB,消光比高达 29.797 dB,TE 波光信号因光损耗大而未输出,TM 波光信号完全输出,即实现对 TM 波的检偏。当控制电极施加饱和电压 U_0 时,液晶材料的晶轴取向发生改变,即与初始方向相垂直,液晶晶轴取向沿竖直方向时光信号在传播过程中的光场分布如图 3 所示。此时,对于 TE 波和 TM 波,光损耗分别为 0.002 dB 和 29.600 dB,消光比高达 29.598 dB, TM 波光信号因光损耗大而未输出,TE 波光信号完全输出,从而实现了对于 TE 波的检偏。上述模拟结果表明,通过电压调控液晶的晶轴方向,该器件能实现对不同偏振光信号的检偏。

通常情况下,入射光信号存在一定的谱宽,约为几十至上百纳米,假设入射光信号的波长范围为 1500~1600 nm,可得液晶晶轴取向沿水平方向时

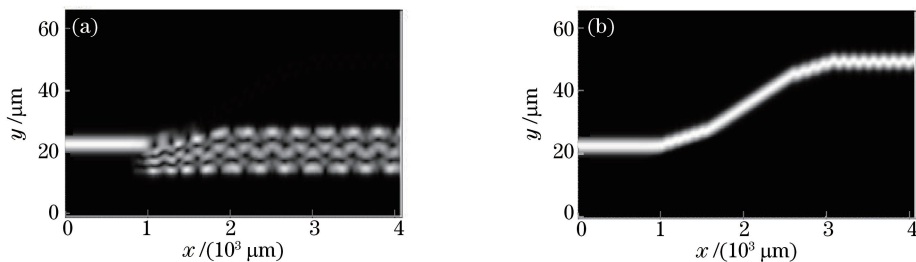


图 2 液晶晶轴取向沿水平方向时光信号在传播过程中的光场分布。(a) TE 波;(b) TM 波

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

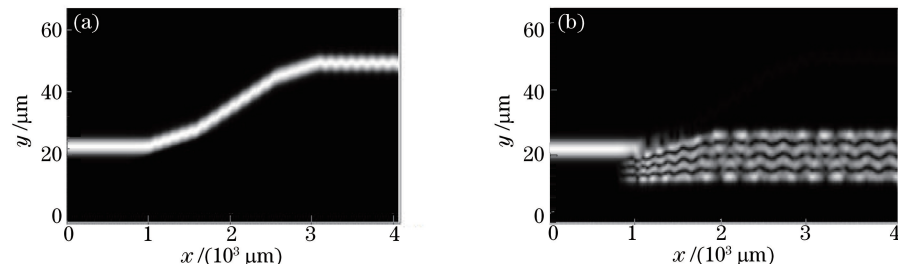


图 3 液晶晶轴取向沿垂直方向时光信号在传播过程中的光场分布。(a) TE 波;(b) TM 波

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

归一化光功率随工作波长的变化如图 4(a) 所示。模拟结果表明,当液晶的晶轴取向沿垂直或水平方向时,随着工作波长的变化,输出光功率基本不变。因此,该器件的波长依赖性很低,这对于其实际应用十分有利。此外,由于器件在制作过程中存在工艺偏差,因此需对工艺偏差对光学性能的影响进行分析。分别假设其波导宽度和波导脊高的工艺偏差范围为 $-0.5 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 和 $-0.1 \sim 0.1 \mu\text{m}$,得到液晶晶轴取向沿水平方向时,归一化光功率随线宽误差 Δw 和波导脊高偏差 Δh 变化的模拟结果如图 4(b)、(c) 所示。模拟结果表明,其光功率输出受

工艺误差变化的影响很小,在目前工艺技术条件下,波导线宽误差和波导脊高误差较易控制在 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 和 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 内,这种特性有利于降低波导型可控检偏器的工艺制作难度和制作费用。需要指出的是,当在调控区无调控电压时,液晶的晶轴初始取向通常有 2° 的角度偏差,并不严格平行于水平方向^[20]。在上述模拟中,假设液晶晶轴的初始方向与水平方向平行。数值模拟结果表明,晶轴小角度偏差对 TE 波和 TM 波光信号的光学性能的影响很小,这是由于液晶具有大双折射特性。因此,这种液晶取向角度偏差对器件性能的影响可忽略不计。

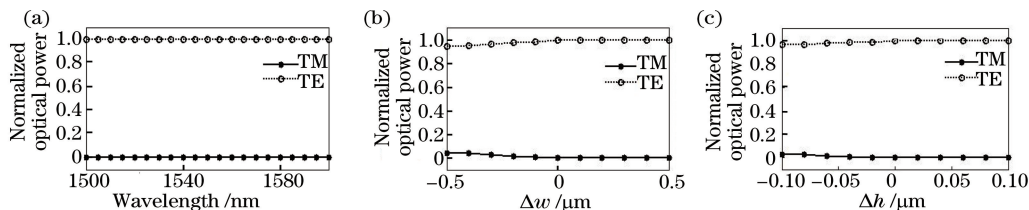


图 4 液晶晶轴取向沿水平方向时的归一化光功率。(a) 归一化光功率随工作波长的变化;

(b) 归一化光功率随线宽误差的变化;(c) 归一化光功率随波导脊高偏差的变化

Fig. 4 Variation in normalized optical power when crystal axis of liquid crystal is along horizontal direction.

(a) Variation in normalized optical power with wavelength; (b) variation in normalized optical power with linewidth error; (c) variation in normalized optical power with deviation of waveguide rib thickness

4 结 论

提出了一种新型可控波导型检偏器,通过采

用多段偏折倒脊型波导结构,利用液晶的双折射效应和电光效应实现了偏振检偏的动态调控。该器件不仅能实现 TE 波的检偏输出,也能实现 TM 波的

检偏输出,且 TE/TM 波偏振光的输出可动态转换。采用光束传播的方法对该器件检偏过程中的消光比和器件制作工艺偏差进行了模拟分析。模拟结果表明,该器件不仅具有高消光比,而且对波长的依赖性以及制作工艺要求较低。因此,该新型可调控检偏器在集成光子系统中具有重要的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Shen B, Wang P, Polson R, *et al.* An integrated-nanophotonics polarization beamsplitter with $2.4 \times 2.4 \mu\text{m}^2$ footprint [J]. *Nature Photonics*, 2015, 9 (6): 378-382.
- [2] Corrielli G, Crespi A, Geremia R, *et al.* Rotated waveplates in integrated waveguide optics [J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 4249.
- [3] Dai D X. Silicon polarization beam splitter based on an asymmetrical evanescent coupling system with three optical waveguides [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(20): 3281-3287.
- [4] Chang K W, Huang C C. Ultrashort broadband polarization beam splitter based on a combined hybrid plasmonic waveguide [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 19609.
- [5] Dai D X, Bowers J E. Novel concept for ultracompact polarization splitter-rotator based on silicon nanowires [J]. *Optics Express*, 2011, 19(11): 10940-10949.
- [6] Liu L, Ding Y H, Yvind K, *et al.* Efficient and compact TE-TM polarization converter built on silicon-on-insulator platform with a simple fabrication process [J]. *Optics letters*, 2011, 36(7): 1059-1061.
- [7] Wong G, Pilkington R, Harvey A R. Achromatization of Wollaston polarizing beam splitters [J]. *Optics Letters*, 2011, 36 (8): 1332-1334.
- [8] Floess D, Chin J Y, Kawatani A, *et al.* Tunable and switchable polarization rotation with non-reciprocal plasmonic thin films at designated wavelengths [J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4(5): e284.
- [9] Guan C Y, Li S Q, Shen Y Z, *et al.* Graphene-coated surface core fiber polarizer [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(2): 349-353.
- [10] Alonso-Ramos C, Halir R, Ortega-Monux A, *et al.* Highly tolerant tunable waveguide polarization rotator scheme [J]. *Optics Letters*, 2012, 37 (17): 3534-3536.
- [11] Jia L X, Liow T Y, Song J F, *et al.* Compact optical polarization rotators based on an asymmetric silicon waveguide [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(22): 2229-2232.
- [12] Wang B, Zhou C H, Wang S Q, *et al.* Polarizing beam splitter of a deep-etched fused-silica grating [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(10): 1299-1301.
- [13] Zhu Z H, Guo C C, Liu K, *et al.* Electrically tunable polarizer based on anisotropic absorption of graphene ribbons [J]. *Applied Physics A*, 2014, 114 (4): 1017-1021.
- [14] Peng H, Su Y, Li Y Q. Evolution of polarization properties in circular birefringent fiber Bragg gratings and application for magnetic field sensing [J]. *Optical Fiber Technology*, 2012, 18(4): 177-182.
- [15] Sánchez L, Lechago S, Sanchis P. Ultra-compact TE and TM pass polarizers based on vanadium dioxide on silicon [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(7): 1452-1455.
- [16] Tang X G, Liao J K, Li H P, *et al.* A novel scheme for $1 \times n$ optical power splitter [J]. *Optics Express*, 2010, 18(21): 21697-21704.
- [17] Tang X G, Liao J K, Li H P, *et al.* Design for Y-branch waveguides with wide angle and low loss [J]. *Optoelectronics Letters*, 2009, 5(6): 401-404. .
- [18] Tang X G, Tong W, Liao J K, *et al.* Design and simulation for tunable bifocal microlens [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(11): 112302. 唐雄贵, 童伟, 廖进昆, 等. 可变双焦微透镜设计与模拟 [J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(11): 112302.
- [19] Kawano K, Kitoh T. Introduction to optical waveguide analysis: Solving Maxwell's equations and the Schredinger equation [M]. New York: Wiley, 2001: 20-23, 50-58.
- [20] Vanbrabant P J M, Beeckman J, Neyts K, *et al.* Finite element optical modeling of liquid crystal waveguides [J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(8): 081204.