

与聚合物光波导混合集成的薄膜偏振分束器

翟羽萌 王 瑾 陆云清 许 吉 付 旭

南京邮电大学光电工程学院, 江苏 南京 210003

摘要 基于光学薄膜的偏振效应和多光束干涉效应设计了由多层二氧化钛(TiO₂)-二氧化硅(SiO₂)薄膜结构组成的偏振分束片,提出了在聚合物光波导中混合集成的方案,并采用时域有限差分(FDTD)数值法优化了方案中的结构设计。在聚合物材料基底上制备了TiO₂-SiO₂多层薄膜偏振分束片,并将此薄膜偏振分束片嵌入聚合物光波导的沟槽中,从而实现了结构紧凑的偏振分束器。而后对此混合集成偏振分束器进行了实验表征,实验表明该器件在C波段上的插入损耗低于2.5 dB,偏振消光比大于25 dB。这样混合集成的偏振分束器不仅可用于现有的偏振控制光学系统中,而且充分发挥了薄膜偏振分束片的优势,可为实现小型化、高度集成的偏振分束器提供新方案和更多的自由度。

关键词 集成光学; 光通信; 薄膜; 偏振分束器

中图分类号 TN256 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.1113002

Polarization-Beam Splitter based on Thin-Film Element Hybridly Integrated in Polymer Waveguide

Zhai Yumeng Wang Jin Lu Yunqing Xu Ji Fu Xu

*College of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications,
Nanjing, Jiangsu 210003, China*

Abstract Based on the polarization effects and multiple-beam interference effects of optical thin films, a polarization beam splitter (PBS) consisting of multiple TiO₂-SiO₂ thin film layers is designed, then the hybrid-integration scheme within an optical waveguide is proposed and the integration structure is optimized with finite-difference time-domain (FDTD) numerical method. The hybrid integration is realized as follows. The multiple TiO₂-SiO₂ thin film layers are deposited on a substrate made of polymer material, while a slot is fabricated in the polymer waveguide. The thin film element is then inserted in this slot to assemble a compact and hybridly integrated PBS. This hybrid integrated PBS is also characterized experimentally. The results show that, in the C-band (1530 nm to 1565 nm), the device insertion loss is smaller than 2.5 dB, and the polarization splitting ratio is higher than 25 dB. Such a hybridly integrated PBS can be used in present polarization-control optical systems. It also exploits the advantages of the thin film polarization element, thus provides novel schemes and more degrees of freedom, to realize miniaturized and densely integrated PBS.

Key words integrated optics; optical communications; thin films; polarization beam splitter

OCIS codes 130.5460; 230.1360; 230.5440; 250.5460

1 引 言

在飞速发展的偏振复用相干光通信系统中,偏振分束器(PBS)是一个基本且重要的器件^[1],其功能是将1束2个偏振方向的光分成2束线偏振光,从而在光学系统中实现对光偏振态的有效控制。传统的偏振分束器是利

收稿日期:2015-06-23;收到修改稿日期:2015-07-07

基金项目:江苏省自然科学基金项目(BK20131383)、江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(SJLX_0361)、教育部留学回国人员科研启动基金(105757)

作者简介:翟羽萌(1990—),女,硕士研究生,主要从事光通信与光信息处理方面的研究。E-mail: 15850796881@163.com

导师简介:王 瑾(1972—),男,博士,教授,主要从事光通信与光信息处理方面的研究。

E-mail: jinwang@njupt.edu.cn(通信联系人)

用双折射晶体实现的^[2]。理想的偏振分束器除性能优越外,还应集成度高,这些要求推进了在微纳尺寸结构(如光波导)中实现PBS的研究。国内外已报道了许多基于光波导的PBS结构,如多模干涉结构(MMI)^[3-5]、直接耦合结构(DCs)^[6-9]、马赫-曾德尔干涉仪结构(MZIs)^[10-11]。然而,这些结构通常很复杂,不仅会引入较大的额外损耗,而且制造困难。因此,目前PBS发展的关键是在实现制作工艺简单及高成品率的同时保证较高的集成度。

随着光学薄膜材料及镀膜技术的发展,光学薄膜的偏振效应和干涉效应是实现PBS的重要方式之一^[12]。一方面,光学薄膜允许同时对光场矢量振动方向平行于入射面的P偏振态光和光场矢量振动方向垂直于入射面的S偏振态光的相位及反射率和透射率进行控制,可以实现宽角度、宽波段的偏振分束功能;另一方面,制作薄膜(TF)片的工艺相对简单、成熟且成品率高。因此,以薄膜偏振分束片(TF-PBS)替代传统的偏振光学元件,并在光波导中集成薄膜偏振分束片,可以使得光学系统更加紧凑,提供其他方法所不能得到的更多自由度。这是目前实现小型化、高度集成PBS的一种可行的解决方案。

本文研究及设计了基于光学薄膜的偏振分束片,在聚合物基底上沉积了TiO₂-SiO₂的多层光学薄膜,并将此薄膜偏振分束片嵌入到聚合物光波导中,实现了结构紧凑、性能优良的混合集成偏振分束器。在对此混合集成偏振分束器的实验表征中,由于采用了聚合物基底并使用紫外可固化聚合物溶剂将偏振分束片固定在聚合物光波导中,从而将整个器件在C波段上(1530~1565 nm)的插入损耗降低在2.5 dB之内,偏振分光比大于25 dB。

2 工作原理及结构设计

2.1 光学薄膜偏振分束片

光学薄膜中的偏振分束功能是基于布儒斯特(Brewster)角和薄膜干涉原理实现的^[13]。当光倾斜入射至光学薄膜且入射角度大于布儒斯特角,则S偏振态光束在界面上发生反射及透射,如果用两种高、低折射率材料构建多层薄膜,并通过选择适当的薄膜厚度,可使被多层薄膜反射的S偏振态光束发生相长性干涉,从而被完全反射;由于偏振效应的存在,膜系结构对P、S偏振态的光具有不同的等效折射率,通过适当地选取薄膜材料和基底材料,使膜系结构对P偏振态光的等效折射率与衬底材料的折射率相等,则P偏振态光束可以完全透射薄膜和基底。

本文设计了由多层TiO₂-SiO₂薄膜结构组成的偏振分束片,如图1所示。在设计薄膜偏振片时,薄膜材料的选择十分重要,应考虑的因素有薄膜的透明度、折射率、机械牢固性、化学稳定性和温度稳定性。目前比较常用的高、低折射率的材料组合是TiO₂-SiO₂,因为这2种材料在1550 nm附近的光学特性比较好,并都可采用离子束辅助沉积技术制备薄膜。

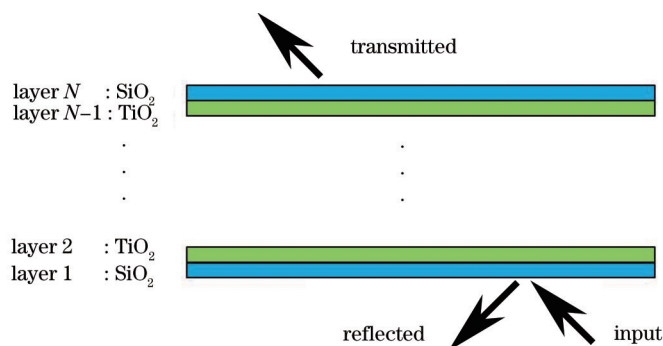


图1 由多层TiO₂-SiO₂材料构成的薄膜偏振片

Fig.1 Structure of thin-film PBS consisting of multiple TiO₂-SiO₂ layers

采用光学薄膜膜系设计软件计算并优化了薄膜偏振分束片的透射光谱,其中TiO₂在1550 nm的折射率取为2.36,膜层平均厚度为255 nm, SiO₂的折射率取为1.49,膜层平均厚度为176 nm。经过优化后的透射谱如图2所示。可以看到,在1500~1620 nm波长范围内,P偏振态的光束(P-polarized beam)可以完全透射,而S偏振态的光束(S-polarized beam)基本被反射了,且在此波长范围的偏振消光比(PER)大于36 dB,表现出了较好的偏振分束性能。值得一提的是,这些膜层的厚度要控制到0.5 μm精度之内;否则,不仅多层薄膜的相长性干涉会受到影响,导致S偏振态光束的不被完全反射,而且膜系结构的等效折射率也会改变,进而导致P偏振态光束的不完全透射。

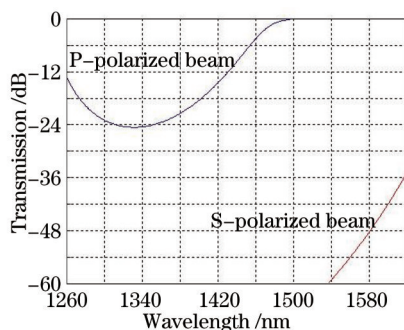


图2 计算得到的多层TiO₂-SiO₂薄膜偏振片的透射谱

Fig.2 Calculated transmission of thin-film PBS consisting of multiple TiO₂-SiO₂ layers

2.2 PBS与光波导混合集成

为实现结构紧凑的PBS并充分发挥薄膜偏振分束片的自由度,提出了在聚合物光波导中混合集成的方案。如图3所示,此方案在聚合物波导中构建1个45°角沟槽,实现偏振分束功能的多层薄膜将生长在聚合物材料基底(substrate)上,然后嵌入到这个沟槽中;作为基底的聚合物材料是选取了与聚合物波导芯层同样的材料,可降低透射过来的偏振光与光波导的耦合损耗。

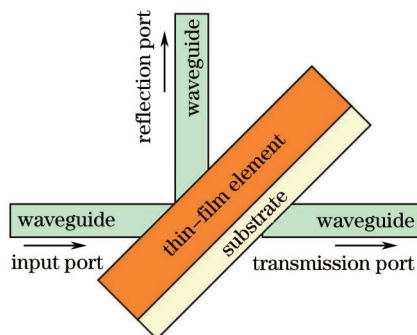


图3 薄膜偏振片在光波导中混合集成的方案

Fig.3 Hybrid integration scheme of thin-film PBS with optical waveguide

用时域有限差分(FDTD)数值法模拟了不同偏振态的入射光在这个混合集成PBS中的传输特性,如图4所示,其中多层TiO₂-SiO₂薄膜偏振片的结构参数来自图2对应的设计。图4中的入射波长为1550 nm,当入射光的偏振态为横电波(TE)时,入射光束基本完全透射,而偏振态为横磁波(TM)的入射光基本完全被反射。当入射光的偏振态分别为TE或TM,改变入射光波长时,模拟得到的混合集成后的薄膜偏振分束器的传输谱,如图5所示。比较图2与图5可以看到,采用光学薄膜膜系设计软件及FDTD数值法计算得到的传输谱基本一致,在波长范围(1500~1620 nm)内,薄膜偏振分束片与聚合物光波导混合集成仅带来较低的耦合损耗。实际上,当入射波长为1550 nm时,入射端口到透射端口的传输损耗约为1.4 dB,而入射端口到反射端口的传输损耗仅约为0.2 dB。这表明提出的混合集成方案合理可行。

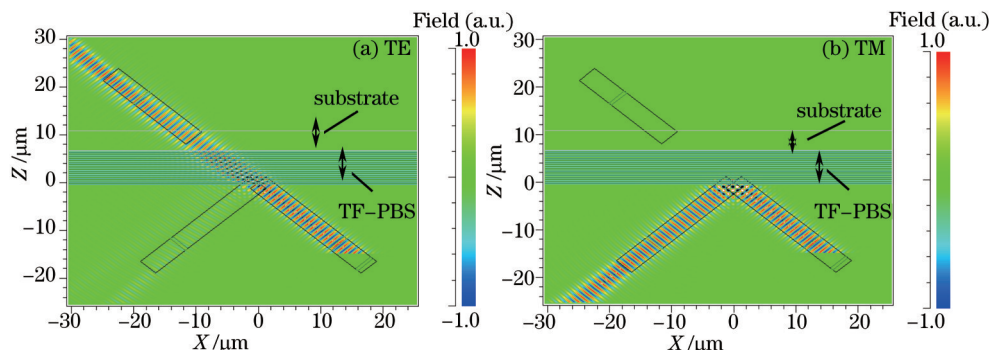


图4 不同入射光偏振态下混合集成薄膜偏振分束器在入射波长为1550 nm时的模拟传输结果。(a)TE;(b)TM

Fig.4 Simulated transmission results of a thin-film PBS hybridly integrated in optical waveguide at the wavelength of 1550 nm under different states of polarization of input light. (a) TE; (b) TM

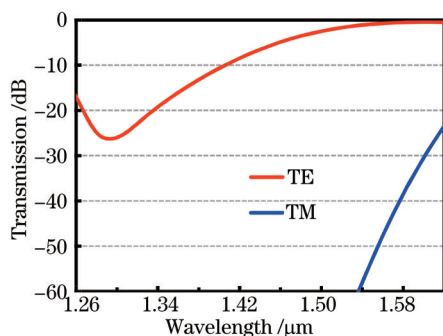


图5 入射光偏振态为TE或TM时,混合集成薄膜偏振分束器传输谱的模拟结果

Fig.5 Simulated transmission spectra of a thin-film PBS hybridly integrated in optical waveguide, as the states of polarization of input light are TE or TM

3 混合集成PBS的实验表征

根据第2节的结构参数设计,采用离子束辅助沉积技术在聚合物材料基底上制备了TiO₂-SiO₂多层薄膜,而聚合物光波导是采用反应离子刻蚀技术(RIE)制备的,多层薄膜加上聚合物基底的总厚度约为11 mm。在完成薄膜制备后,利用激光切割出大小合适的薄膜偏振分束片,而后,使用气泵式真空吸笔吸附薄膜偏振分束片并将其嵌入至光波导中。本文中波导芯层和包层的聚合物材料是ChemOptics公司的商用材料^[14],此聚合物材料具有较好的稳定性,其折射率分别为1.47和1.45,所制备的单模波导横截面尺寸为12.25 mm²。波长为1550 nm时,光波导损耗大约为0.7 dB/cm。同时采用反应离子刻蚀技术在此单模波导上刻蚀了沟槽,其中沟槽深至波导芯层下方约10 nm处,而沟槽宽度约14 nm,这既方便地嵌入薄膜偏振分束片,又利于薄膜偏振分束片角度的调整。实际上,在波导中嵌入薄膜偏振分束片时,通过对PBS反射端输出光的实时检测,将薄膜偏振分束片的角度调整到45°,从而保证PBS的工作。为将偏振分束片固定在聚合物光波导中,使用紫外可固化聚合物溶剂^[15],其折射率与波导芯层基本一致,从而降低由沟槽引入的额外损耗。

对如图6(a)所示的混合集成PBS进行了实验表征,图6(b)给出了入射光分别为TE或TM时,器件损耗的测量结果。由于实验设备所限,测量的波长范围是从1520~1620 nm。可以看到,在这个波长范围上,该混合集成PBS的插入损耗小于3.2 dB;尤其在C波段上(1530~1565 nm)插入损耗小于2 dB,见图6(b)右边小图,而偏振消光比基本都在25 dB以上。这样混合集成的PBS器件满足了现有偏振控制器件的性能要求^[1]。

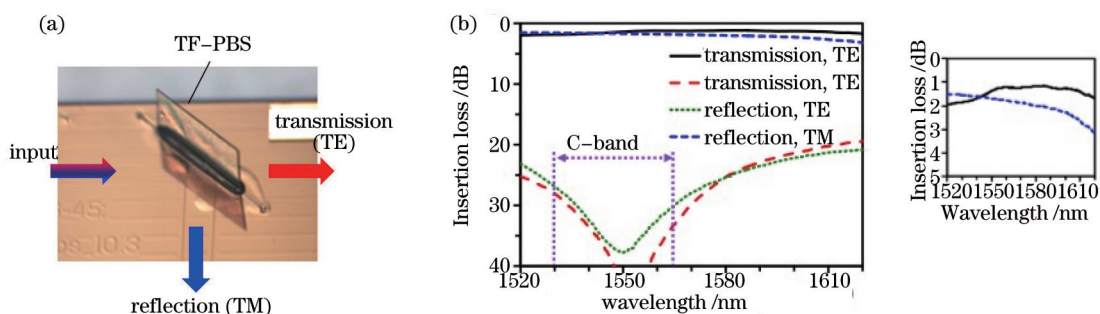


图6 与光波导混合集成薄膜偏振分束器。(a)实物图;(b)测量结果

Fig.6 (a) Picture and (b) measurement results of a thin-film PBS hybridly integrated in optical waveguide

4 结 论

基于光学薄膜的偏振效应和干涉效应设计了由多层TiO₂-SiO₂薄膜结构组成的偏振分束片,并采用FDTD数值法优化设计,提供了切实可行的在聚合物光波导中混合集成的方案。采用离子束辅助沉积技术在聚合物材料基底上制备了TiO₂-SiO₂多层薄膜偏振分束片,并将此薄膜偏振分束片嵌入到聚合物光波导中,使用折射率与波导芯层基本一致的紫外可固化聚合物溶剂固定薄膜偏振分束片,降低了由沟槽引入的额外损耗。实验表征中,整个器件在C波段上(1530~1565 nm)的插入损耗低于2 dB,偏振消光比大于25 dB。这样结构紧凑的

混合集成偏振分束器不仅可用于现有的偏振控制光学系统中,而且可以充分发挥薄膜偏振分束片工艺相对简单及成熟的优势,为实现小型化、高度集成的偏振分束器提供新方案和更多的自由度。

参 考 文 献

- 1 OIF. Implementation agreement for integrated dual polarization intradyne coherent receivers[EB/OL]. (2010-04-16). http://www.oiforum.com/public/documents/OIF_DPC_RX-01.0.pdf.
- 2 Li Cuili, Sun Xiaobing, Wang Han, *et al.*. Accuracy analysis of simultaneous polarized measurement based on polarizing beam splitter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 0412004.
李翠丽, 孙晓兵, 王 涵, 等. 基于偏振分束组件的同时偏振探测精度分析[J]. *光学学报*, 2014, 34(4): 0412004.
- 3 Rahman B M A, Somasiri N, Themistos C, *et al.*. Design of optical polarization splitters in a single-section deeply etched MMI waveguide[J]. *Appl Phys B*, 2001, 73(5-6): 613-618.
- 4 Jiao Yuqing, Dai Daoxin, Shi Yaocheng, *et al.*. Shortened polarization beam splitters with two cascaded multimode interference sections[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2009, 20(21): 1538-1540.
- 5 Yang Wei, Xu Yue, Li Yanping, *et al.*. A compact and wide-band polarization beam splitter based on wedge-shaped MMI coupler in silicon-on-insulator[C]. *Optical Fiber Communication Conference*, 2015: W2A. 12.
- 6 Tu Xiaoguang, Ang S S N, Chew A B, *et al.*. An ultracompact directional coupler based on GaAs cross-slot waveguide[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2010, 22(17): 1324 - 1326.
- 7 Dai Daoxin, Wang Zhi, Bowers J E. Ultrashort broadband polarization beam splitter based on an asymmetrical directional coupler[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(13): 2590-2592.
- 8 Qiu Huiye, Su Yuxia, Yu Ping, *et al.*. Compact polarization splitter based on silicon grating-assisted couplers[J]. *Opt Lett*, 2015, 40(9): 1885-1887.
- 9 Mao Yanping, Ji Minning, Liu Zhen, *et al.*. Research of twin-core optical fiber polarization beam splitter with input and output waveguide[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(5): 0505001.
毛艳萍, 季敏宁, 刘 珍, 等. 带输入、输出端口的双芯光纤偏振分束器研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(5): 0505001.
- 10 Soldano L B, Vreede A H, Smit M K, *et al.*. Mach-Zehnder interferometer polarization splitter in InGaP/InP[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1994, 6: 402-405.
- 11 Augustin L M, Hanfoug R, Vandertol J J G M, *et al.*. A compact integrated polarization splitter/converter in InGaAsP-InP[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2007, 19(17): 1286-1288.
- 12 Fan Zhengxiu. Development and recent progress of optical thin films[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900131.
范正修. 光学薄膜及其进展[J]. *光学学报*, 2011, 31(9): 0900131.
- 13 Venghaus H, Grote N. *Fibre Optic Communication: Key Devices*[M]. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.
- 14 ChemOptics Corporation. Technical documentations: ZPU12-RI & ZPU13-RI[R/OL]. Korea, 2010, <http://www.chemoptics.co.kr>.
- 15 Wang Lei, Li Ran, Niu Xiaoyan, *et al.*. Research and fabrication of an ultraviolet curable polymeric arrayed waveguide grating with nonlinear cladding[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(8): 0805002.
王 雷, 李 然, 牛小艳, 等. 非线性包层结构紫外固化聚合物阵列波导光栅研制[J]. *中国激光*, 2013, 40(8): 0805002.

栏目编辑: 王晓琰