

文章编号:1007-2780(2024)05-0697-10

液晶包层波导技术研究进展

刁志辉^{1,2,3,4}, 毕泽坤^{1,2,3,4}, 范维方^{1,2,3,4}, 蔚云慧^{1,2,3,4}, 穆全全^{1,2,3,4*}

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;
3. 中国科学院 光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033;
4. 中国科学院大学, 北京 101408)

摘要:液晶包层波导以波导为载体、以液晶为工作物质,包层中的液晶通过倏逝波调控芯层中的波导模式。相比于传统液晶器件,液晶包层波导能够巧妙解耦光线调制距离与液晶层厚度,并基于表面层液晶作用显著降低液晶回弹时间,具有调制幅度大、响应速度快的优势。本文综述了液晶包层波导技术在光束扫描、傅里叶变换光谱领域的研究进展,并展望了液晶包层波导技术在可重构光子器件领域的应用前景。不同的宏观应用表现均源于液晶包层对波导模式的微观调控。凭借独特的工作方式,液晶包层波导赋予了宏观应用新的技术优势。本综述为新型液晶光束调控方法提供一种重要的研究思路。

关键词:液晶;波导;光调控

中图分类号:O734;O753+.2 文献标识码:A doi:10.37188/CJLCD.2024-0056

Research progress on liquid crystal cladding waveguide technology

DIAO Zhihui^{1,2,3,4}, BI Zekun^{1,2,3,4}, FAN Weifang^{1,2,3,4}, YU Yunhui^{1,2,3,4}, MU Quanquan^{1,2,3,4*}

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China;
2. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun 130033, China;
3. Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China)

Abstract: The liquid crystal cladding waveguide uses the waveguide as the carrier and liquid crystal as the working substance. The liquid crystal in the cladding regulates the waveguide mode in the core layer through evanescent waves. Compared with traditional liquid crystal devices, liquid crystal cladding waveguides can cleverly decouple the light modulation distance and the thickness of the liquid crystal layer, and significantly

收稿日期:2024-02-28;修订日期:2024-03-19.

基金项目:长春市国家重点实验室(学科类)重大专项(No.23GZZ07);国家重点研发计划(No.2021YFB3600300);吉林省全国重点实验室(学科类)重大专项(No.SKJ202402022)

Supported by Changchun State Key Laboratory Major Project(No.23GZZ07); National Key R&D Program of China (No.2021YFB3600300); Jilin State Key Laboratory Major Project (No.SKJ202402022)

*通信联系人, E-mail:muquanquan@ciomp.ac.cn

reduce the liquid crystal rebound time based on the action of surface layer liquid crystals. It has the advantages of large modulation amplitude and fast response speed. This article reviews the research progress of liquid crystal cladding waveguide technology in the fields of beam scanning and Fourier transform spectroscopy, and looks forward to the application prospects of liquid crystal cladding waveguide technology in the field of reconfigurable photonic devices. Different macroscopic application performances are derived from the microscopic control of the waveguide mode by the liquid crystal cladding, and its unique working method gives new technical advantages to macroscopic applications. This review will provide an important research idea for new liquid crystal beam control methods.

Key words: liquid crystal; waveguide; light regulation

1 引言

液晶同时具有液体的流动性和晶体的各向异性,通过分子指向的精准构筑与动态驱动,可以实现对光的主动调控。光波导是基于折射率差异化结构形成的光传输通道,是集成光学的基础。液晶与光波导相结合,可同时发挥两者的技术优势,实现一种动态可调的集成光学元件。

液晶包层波导以固体材料为芯层,液晶位于包层并通过倏逝波作用调控芯层中的波导模式。作为一种高效、快速、可片上集成的液晶调控方法,受到国内外的广泛关注,研究人员开展了一系列研究工作。相较于其他实现方法,液晶包层波导在光束扫描、傅里叶变换光谱方面展现出了独特的技术优势。本文对液晶包层波导技术在光束扫描、傅里叶变换光谱领域的发展历程进行论述,并对其在可重构光子器件领域的应用前景提出展望。本综述为基于液晶包层波导的新型光束调控方法提供了重要的研究思路。

2 液晶包层波导的工作特点

如图 1 所示,依据液晶在波导中的位置,液晶波导可分为液晶芯层波导和液晶包层波导^[1]。液晶芯层波导以液晶为芯层、以固体材料为包层,芯层中的液晶可直接调控其内部的波导模式。对比两类液晶波导,液晶芯层波导中液晶对于波导模式的调控要更为直接,但受限于液晶层的有序度问题,波导模式传输过程中存在较大散射损耗,一般大于 9 dB/cm^[1]。与之相对的,液晶包层波导的散射损耗要小很多,一般小于 1.5 dB/cm^[2],这也使其更易获得较高的能量利用率和较大的调制幅度。

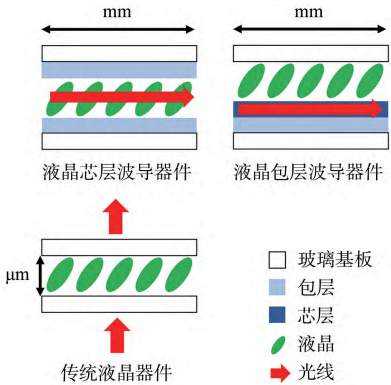


图 1 液晶芯层波导、液晶包层波导与传统液晶器件对比。
Fig. 1 Comparison of liquid crystal core waveguide, liquid crystal cladding waveguide and traditional liquid crystal devices.

与传统液晶器件的工作方式相比,液晶包层波导具有以下特点:

(1)液晶调制幅度大。在传统液晶器件中,光线的传输方向往往沿着液晶层厚度方向,液晶与光线的作用距离取决于液晶层厚度,其值在微米量级^[3-4];而在液晶包层波导中,光线的传输方向平行于液晶平面,这就使液晶的调制距离不受液晶层厚度制约,只取决于光线在波导中的传输距离,很容易实现厘米级的光线传输长度,能够显著提升液晶的调制幅度。

(2)液晶响应速度快。在传统液晶器件中,液晶的响应速度由体效应决定,尤其是液晶撤电后的回弹速度往往在毫秒量级^[3];而在液晶包层波导中,由于倏逝波的穿透深度仅在波长量级,只有表面层的液晶能够对芯层中的光束起到调制作用,表面层液晶在锚定能的作用下,能够在撤电后快速回弹,提高响应时间,其值一般在微秒量级^[5]。

因此,相比于传统液晶器件,液晶包层波导提供了一种新型的、大调制、快速光束调控方法。相应地,液晶包层波导在器件制备环节也提出了更高的要求。比如,波导层的粗糙度需要严格控制以减小传输损耗^[6],为此,液晶取向需采用光控等无接触取向方式,摩擦取向则会引起膜层粗糙度劣化。

3 液晶包层波导在光束扫描领域的研究进展

光束扫描器是一种用于光束精密指向控制的光学元件,作为激光雷达中的核心部件,在激光通信、遥感成像、天基目标探测等国防领域,以及智能交通、智慧家庭、卫星导航等民用领域具有广阔的应用前景和重要的应用价值^[7]。传统的光束扫描器一般依靠伺服转台等机械装置通过直接改变光轴的方向来实现光束的偏转控制,存在结构复杂、体积庞大、能耗高等缺点^[8]。随着现代光电系统向智能化、集成化、低功耗方向的发展,

传统机械式光束偏转技术已难以满足应用需求^[9]。20世纪末以来,微机电系统(MEMS)、声光晶体、光学相控阵等一系列光束扫描技术被研发出来,各自具有独特的工作特点,但也存在技术短板。MEMS虽然提高了器件的集成度,但仍有机械抖动和磨损的问题,降低了器件的鲁棒性和使用寿命^[10]。声光晶体具有较快的扫描速度,但扫描光斑离散,存在扫描盲区。光学相控阵具有全固态(无机械运动部件)优势,但能量利用率较低,这主要体现在两个方面:一是由于衍射作用,光斑存在栅瓣、旁瓣问题,降低了主光斑的能量比例^[11];二是主光斑的能量利用率会随着扫描角度的增大而急剧下降^[12-13]。因此,如何在兼顾器件全固态的同时实现无盲点、高能量利用率、大角度的光束扫描,成为一个具有科学意义与实用价值的研究课题。

针对这一研究课题,液晶包层波导技术提出了一种独特的解决方法。图2为基于液晶包层波导的光束扫描技术的发展历程,其中列出了几个重要的节点成果。

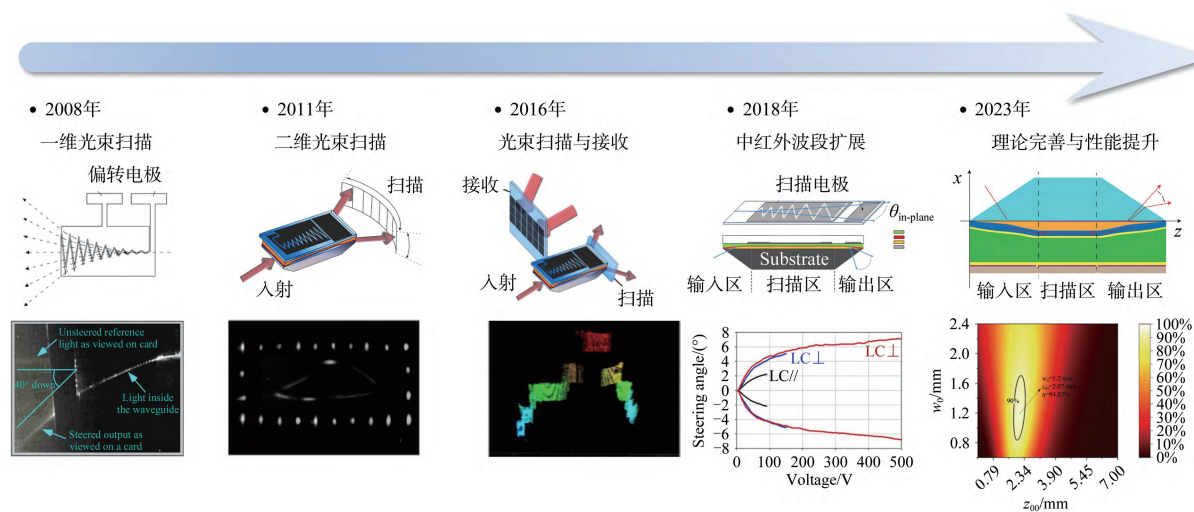


图2 基于液晶包层波导的光束扫描技术的发展历程^[2,5,14-16]

Fig. 2 Development history of beam scanning technology based on liquid crystal cladding waveguide^[2,5,14-16]

2008年,美国的Vescent Photonics公司^[14]首次报道了基于液晶包层波导的光束扫描技术,在3个控制电极的作用下实现了 $\pm 40^\circ$ 的一维光束扫描,在实验上验证了液晶包层波导在光束扫描应用的可能性。为进一步扩展扫描维度,2011年,Vescent Photonics^[5]以掺杂硅为导电基底、氧化硅为包层、氮化硅为芯层,将棱镜耦合结构与

一维扫描结构相结合,基于光线的折射与棱镜耦合过程,在100 V驱动电压下实现了 $40^\circ \times 10^\circ$ 的二维光束扫描,光束耦合效率达90%。为了实现更大的扫描角度,2015年,Vescent Photonics^[17]尝试将液晶包层波导光束扫描器与液晶偏振光栅级联,利用后者的角度放大作用,实现扫描角度连续扩展,采用两片偏振光栅将原本的扫描角度

扩大到了4倍。在光束扫描的基础上,2016年,Vescent Photonics^[16]进一步基于液晶包层波导光束扫描器搭建了固态激光雷达系统,通过系统集成与实验测试,实现了 $20^{\circ} \times 5^{\circ}$ 视场范围内的光束扫描与探测,验证了该类器件在固态激光雷达领域的应用潜力。Vescent Photonics公司的研究多集中于近红外波段,为满足更多样的光束扫描需求,2018年,美国海军研究实验室^[17]将液晶包层波导光束扫描器的工作波段由近红外拓展到中红外波段,基于硫系材料,在 $4\text{ }\mu\text{m}$ 波长下通过500 V电压驱动实现了 $14^{\circ} \times 0.6^{\circ}$ 的二维光束扫描,能量利用率为3%。为进一步完善理论架构、提升器件性能,2023年,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所^[2]开展了相关研究。首先,针对液晶包层波导中驱动电压高的问题,厘清其内在原因为掺杂硅基底存在电导率与吸收损耗

相互制约问题^[18]:较低的掺杂浓度虽然会降低吸收损耗,但也会降低电导率、提高驱动电压。结合这一分析,提出了耦合基底和导电层可独立表征与控制的液晶包层波导结构,在提高电导率的同时降低吸收损耗,成功将光束扫描的驱动电压由百伏降低为30 V。然后,针对现有Ulrich棱镜耦合理论无法准确描述液晶包层波导中光束耦合过程的问题,基于液晶连续弹性体理论、多层波导理论构建了满足液晶特性的液晶包层波导物理模型,提出了扩展棱镜耦合分析方法,首次在理论上给出了可以实现100%耦合效率的衬底层、芯层渐变构型,如图3(a)所示。此外,通过理论与实验验证相结合的方法,厘清了传统Ulrich棱镜耦合理论下难以获知的人射光斑束腰、入射位置、入射角度对耦合效率的影响规律,如图3(b)~(d)所示。

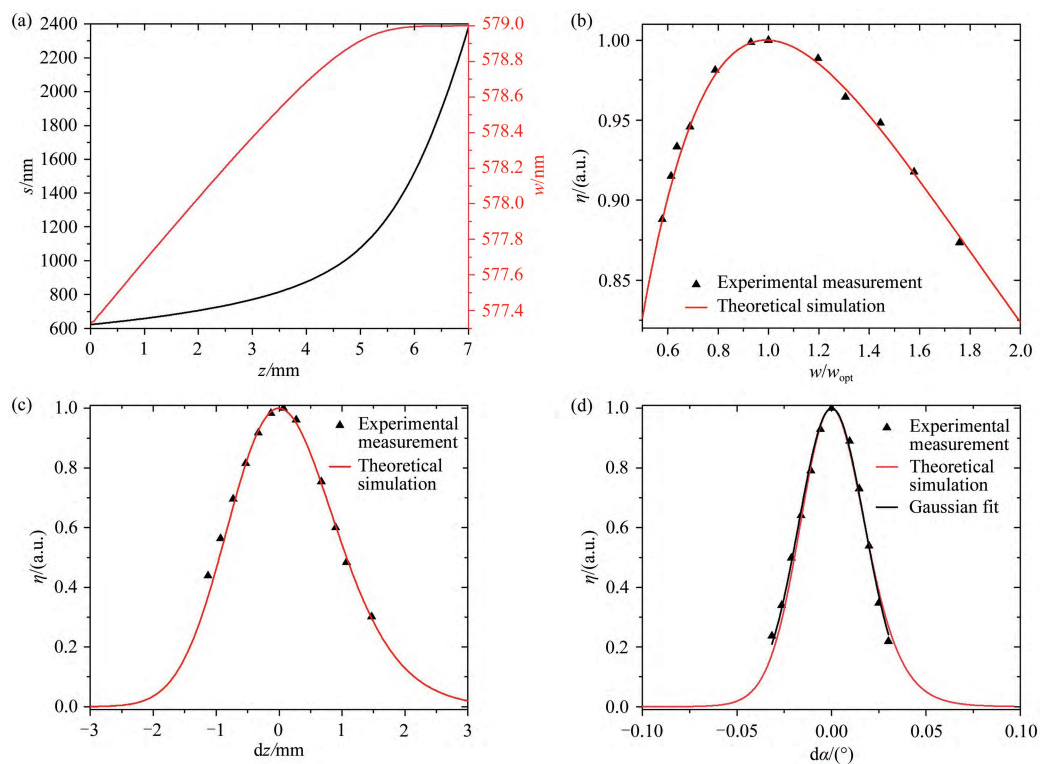


图3 (a) 最佳衬底层、芯层构型; (b)~(d) 光斑束腰、入射位置、入射角度对耦合效率的影响。

Fig. 3 (a) Optimal coupling structure; (b)~(d) Influence of spot beam waist, incident position and incident angle on coupling efficiency.

图4为基于液晶包层波导实现光束扫描的器件结构与工作原理图。器件在 z 轴方向为层叠式结构,由下至上分别为:耦合基底、波导衬底层、波导芯层、液晶取向层、液晶波导包层以及带有

液晶取向层和电极层的玻璃盖板。耦合基底在作为器件支撑结构的同时还用于实现光束由自由空间向波导层的耦合。在耦合基底之上,波导衬底层、波导芯层、液晶取向层和液晶包层构成了

4层波导结构,用于光线的传输与调制。器件在 y 轴方向上分为3个功能区:耦合输入区、扫描控制区和耦合输出区。自由空间的准直光束在耦合基底与波导衬底层界面处发生全反射,在满足相位匹配条件后,通过倏逝波作用在波导芯层中激发出波导模式,并沿着芯层传播。由于波导衬底层具有厚度渐变的特点,光线在耦合进波导后将不再返回到耦合基底中,因此可以达到90%以上的耦合效率^[19]。光束在两个维度上发生偏转的机制各不相同。在 x - y 平面内,光束偏转依赖于

扫描控制区的图案化电极,区域化液晶驱动能够在波导中等效地形成若干个折射界面,且界面两侧的折射率差值能够随液晶的驱动程度连续变化,因此可以控制光束发生连续偏转。在 y - z 平面内,光束偏转依赖于棱镜耦合过程,在耦合输出区,根据棱镜耦合的相位匹配条件,不同有效折射率的波导模式对应着不同的耦合输出角度,液晶场致转动能够使光在 y - z 平面连续偏转。经过扫描控制区与耦合输出区电极的复合调制,光线最终可在电场控制下实现二维连续偏转。

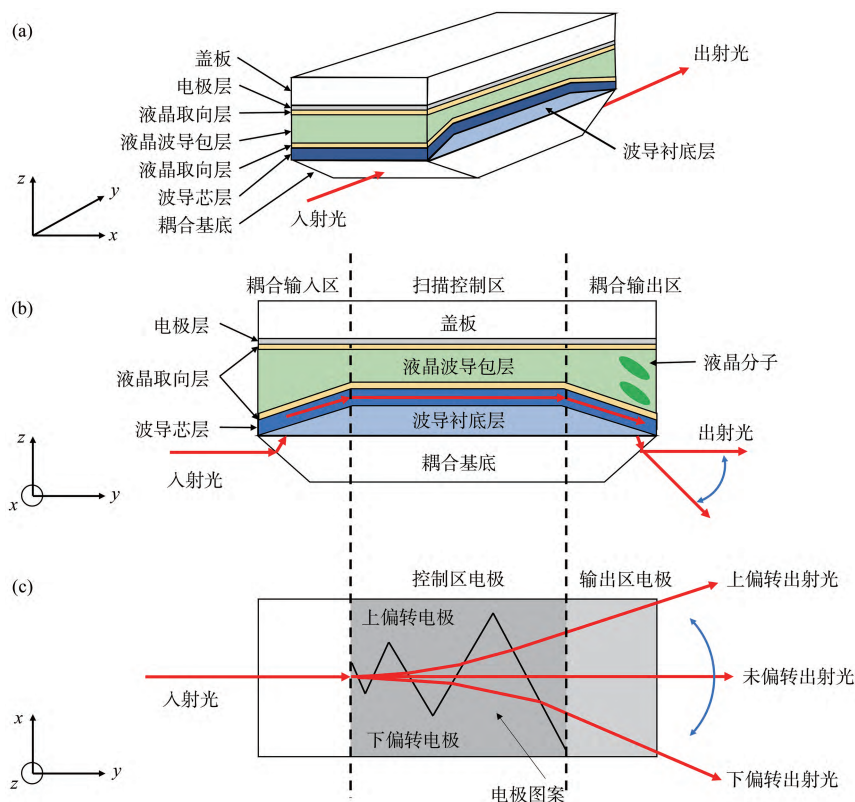


图4 基于液晶包层波导的光束扫描技术的器件结构与工作原理。(a)整体结构图;(b) y - z 平面截面图;(c) x - y 平面电极层结构图。

Fig. 4 Device structure and working principle diagram of beam scanning technology based on liquid crystal cladding waveguide. (a) Overall structure diagram; (b) Cross-sectional view of y - z plane; (c) Structure diagram of x - y plane electrode layer.

基于液晶包层波导的光束扫描技术相比于MEMS、光学相控阵等其他扫描技术,具有以下特点:

(1)可片上集成。器件整体构建于光波导之上,体积小巧,结构紧凑,具备了优秀的共形能力。

(2)全固态。光束扫描依赖于液晶材料自身的光电各向异性,不存在任何机械运动部件及磨

损问题,具有较好的鲁棒性。

(3)无栅瓣、旁瓣问题。光线偏转过程基于折射与棱镜耦合过程,无衍射作用,不会产生栅瓣、旁瓣,保证扫描光斑的能量集中。

通过对其发展历程的论述不难发现,液晶包层波导光束扫描技术向着更高扫描维度、更大扫描角度、更宽应用波段方向快速发展,展现出了

较强的技术延展性与适应性。为实现更高性能的光束扫描,液晶包层波导光束扫描技术仍需在以下方面开展工作:

(1)光束扫描机制。在现有的液晶包层波导光束扫描器中,光束的偏转依赖于图案化电极构造的折射界面,想要实现更大扫描角度,则要提高界面数量,但这会延长光线的传输距离,引起严重的散射损耗。为此,需要在液晶包层波导中探索新的扫描机制,在保持电极结构紧凑、不额外损失能量利用率的前提下,扩展液晶包层波导的扫描角度。

(2)液晶驱动方式。如图 5 所示,现有的液晶包层波导光束扫描技术的扫描线性度较差,具体体现在两方面:光束偏转过程的非线性和光束偏转与偏回的不对称性。这两方面都与表面层液晶的动态驱动特性相关,而传统研究多聚焦在液晶的体效应上。因此,需要探索表面层液晶的动态调控机制并研究相应的驱动方式,以实现高线性度的光束扫描。

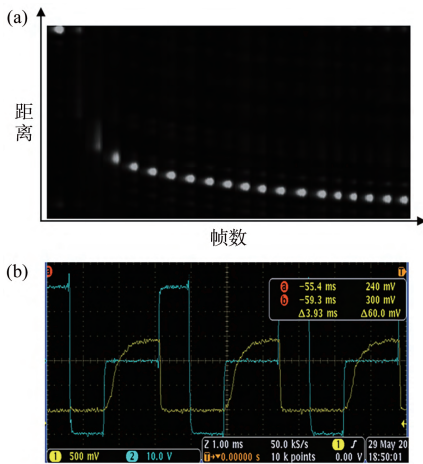


图 5 液晶包层波导中光束扫描的线性度表现。(a) 光束偏转过程的非线性;(b) 光束偏转与偏回的不对称性。

Fig. 5 Beam scanning linearity performance in liquid crystal cladding waveguides. (a) Nonlinearity of the beam deflection process; (b) Asymmetry of beam deflection and deflection.

4 液晶包层波导在傅里叶变换光谱领域的研究进展

傅里叶变换光谱仪(Fourier transform spec-

trometer, FTS)是一种基于傅里叶变换技术、由干涉效应获得光谱信息的光学检测器件,它能够对固体、液体、气体等各类物质进行定性、定量分析,具有多通道(Fellgett's)和高光通量优势(Jacquinot's),是现代光谱技术的重要分支^[20],在化学分析、生物检测、环境监测、空间探测等高新技术领域具有重要的应用潜力,且对其在便携性、稳定性、低功耗等方面提出了更高的要求^[21]。传统 FTS 多基于迈克尔逊干涉结构构建,由分立器件组成并包含高精度机械式动镜驱动系统,存在体积大、稳定性差、功耗高等问题,已无法满足光谱检测的发展要求^[22]。

2008 年,美国 NASA 喷气实验室^[23]基于液晶包层波导提出了一种可片上集成的、全固态 FTS。其器件结构如图 6 所示,整体为直波导结构,信号光由端面入射,初始振动方向在 x - z 平面上且与 z 轴呈 -45° (图 6 中红色双箭头实线),光线在耦合进波导后产生等强度的横电基模(TE 基模,电场沿图 6 中蓝色虚线方向振动)和横磁基模(TM 基模,电场沿图 6 中紫色虚线方向振动)。在外加电场作用下,具有光电各向异性的液晶分子发生场致转动,通过合理设计液晶分子的初始取向角度与转动角度,可以使液晶对波导模式有效折射率的调节作用仅施加于 TM 基模,从而使 TE 基模和 TM 基模在传播过程中具有不同的光程。具有一定光程差的 TE 基模和 TM 基模在输出波导后经由偏振片作用发生偏振干涉,并由探测器记录其干涉强度。通过改变外加电场强度,

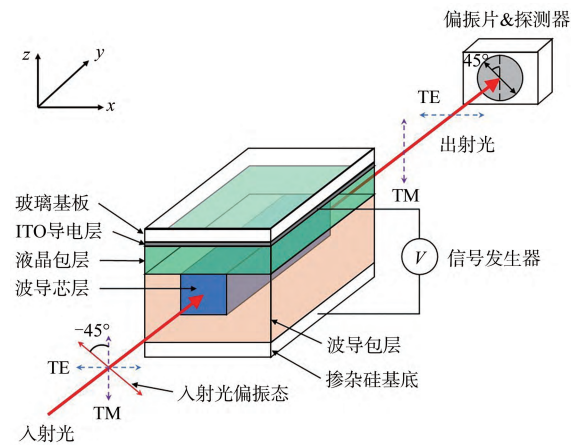


图 6 液晶包层波导 FTS 结构图
Fig. 6 Structural diagram of liquid crystal cladding waveguide FTS

就能够控制 TE 基模和 TM 基模之间的光程差,从而在探测器端获得随光程差变化的干涉图,然后经傅里叶变换即可获得光谱信息。2011 年,美国 NASA 团队^[24]对液晶包层波导 FTS 中的色散问题进行了研究。色散问题指的是不同波长所具有的最大光程差不同,该问题会使恢复光谱中存在波长漂移,从而造成错误的光谱信息。针对这一问题,该团队在波导中引入了一个色散补偿区,通过额外的电场控制以减轻色散问题的影响。2012 年,美国 NASA 团队^[25]搭建了液晶包层波导 FTS 原理样机,以超级发光二极管为光源对乙炔气体进行检测,结果表明,液晶包层波导 FTS 能够准确识别乙炔气体并实现了中心波长 1 525 nm、光谱带宽 150 nm、光谱分辨率 5 nm 的光谱测量。

根据器件的工作方式,液晶包层波导 FTS 属于时间调制型 FTS^[26]。同类型的技术方案还有铌酸锂波导 FTS 和硅基波导 FTS。表 1 给出了 3 类时间调制型 FTS 的代表性结果,其中铌酸锂波导 FTS 结果来自中国科学院电子学研究所团队^[27]。该团队于 2015 年基于铌酸锂晶体的 Ti 内扩散法制备了马赫-增德尔干涉结构(Mach-Zehnder Interferometer, MZI),通过调节两臂的折射率来获取可变光程差,在 4.5 cm 调制距离下,通过 60 V 电压驱动获得了约 16 μm 的最大光程差,可实现中心波长 1 400 nm、光谱带宽 400 nm、光谱分辨率 30 nm 的光谱测量。硅基波导 FTS 结果源于加州大学团队^[28],该团队于 2018 年针对硅波导 FTS 的热光非线性、热膨胀和色散等效应进行了系统研究,并基于 MZI 实现了中心波长 1 546 nm、光谱带宽 56 nm、光谱分辨率 3.05 nm 的光谱探测。

从表 1 可以看到,得益于液晶材料优异的电控双折射特性,液晶包层波导 FTS 具有最大的光程调制能力(每厘米传输距离下的光程调制量),

在光谱分辨率提升方面具有优秀潜力。为实现更好的光谱探测性能,液晶包层波导 FTS 可在以下方面开展工作:

(1)波导结构。在 FTS 中,光谱探测性能主要由波导结构光学特性决定。比如,为避免高阶波导模式对干涉信号的影响,波导结构的单模调制带宽决定了光谱的探测带宽;波导结构所能达到的最大光程调制量决定了光谱的探测分辨率^[6]。因此,需要从光束的耦合、传输、调制过程入手,探索新型高效的波导结构,以实现大带宽、高分辨率的光谱探测。

(2)光谱恢复方法。在 FTS 中,干涉信号往往不能直接通过傅里叶变换获得光谱信息,而是需要引入光谱恢复方法对其中的一些误差或问题进行校正,比如相位误差、色散、非线性采样问题等。其中相位校正与液晶包层波导的零光程差特性有关,色散校正与液晶包层波导最大光程差的色散特性有关,傅里叶变换则要考虑由于液晶包层波导光程差电驱动特性所带来的非线性采样问题。因此,需要结合液晶包层波导的动态光学特性探索最佳的光谱恢复方法,以获得准确、高效的光谱信息。

5 液晶包层波导在可重构光子器件领域的应用展望

随着大数据、5G 移动通信、人工智能、物联网等领域的迅速发展,人类社会对信息量的需求日益提高,宽带网络容量呈现急剧增长态势,作为其核心支撑的光互连系统面临重大挑战。相比于传统电互连方式,光互连具有极高的时间空间带宽积、功耗低、延迟小、抗干扰等优势,作为缓解通信瓶颈的下一代解决方案,受到了广泛关注^[29]。光互联系统中最为核心的就是具有高度集成的光互联芯片^[30],它以波导为基础,通过调节波导模式的传输状态,实现波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)、偏分复用(Polarization Division Multiplexing, PDM)、模式复用(Mode Division Multiplexing, MDM)等复用技术,以提高通信容量。为了能够提高集成度与功能化,片上可重构光子器件应运而生。

片上可重构光子器件能够在不改变波导固

表 1 3 类时间调制型 FTS 的代表性结果

Tab.1 Representative results of three types of time-modulated FTS

调制类型	铌酸锂-电调	硅-热调	液晶-电调
光谱带宽/nm	400	56	150
光谱分辨率/nm	30	3.05	5
光程调制能力/ ($\mu\text{m}\cdot\text{cm}^{-1}$)	3.6	200	300

有结构的前提下,通过电场、热场等外加场强作用,具有波导模式调制能力,进而实现多种功能。现有的片上可重构光子器件多基于硅系材料^[31],利用自身的热光、电光效应改变波导的传输特性,比如光开关、单模-多模转换、偏振转换等。该类片上可重构光子器件面临着一个重要问题:功耗问题,该问题同样是光电子芯片向更高集成度和更大尺寸发展需要解决的一个关键问题^[32]。硅系材料的驱动功耗普遍在 mW 量级,其功耗来源于开关引擎保持开关某一状态所需的能量、补充工艺误差的热调谐相位补偿器以及控温/散热组件的耗能等。随着集成度的提高,其功耗将几何增长,对驱动电路提出了更高的要求。因此,在我国“十四五”规划的整体布局中就明确了“光电子器件需向低功耗发展”的研究理念^[33]。

相比于 mW 量级的硅基体系,液晶包层波导的驱动功耗往往要更低,一般在 μW 量级^[5],这无疑为片上可重构器件低功耗的发展提供了一条新思路。2009 年,香港城市大学^[34]在聚合物芯层上制备液晶包层,利用液晶转动下产生的导模与泄露模的相互转换,在片上实现了可调光衰减器:10 V 驱动电压下,对 1 550 nm 光束具有 24 dB 的衰减范围,这有助于解决光通信网络中的信道间功率匹配问题。2010 年,美国的 Vescent Photonics^[35]将液晶与硅基谐振环结合,以液晶调制代替硅材料调制,实现了低功耗片上光调控。谐振环结构由两条 90° 夹角的直波导和一个圆环波导构成,其中液晶在包层中调控圆环波导,以实现直波导间光束的耦合。实验结果表明,在 1 550 nm 波长下,驱动功耗小于 50 μW 时,能够产生 9 个谐振峰,可用于实现片上光开关功能。

根据第二章的描述,具有特定图案的电极能够在液晶包层波导中实现光路传输方向的调节,

那么更进一步地,利用液晶显示、液晶空间光调制器中已十分成熟的像素化驱动电路代替固定图案电极,就有望通过实时生成图案化电场,在同一液晶包层波导结构中实现多种功能的波导模式调制(如图 7 所示),从而获得可重构、可编程的片上式光子器件,助力集成光芯片的发展与应用。

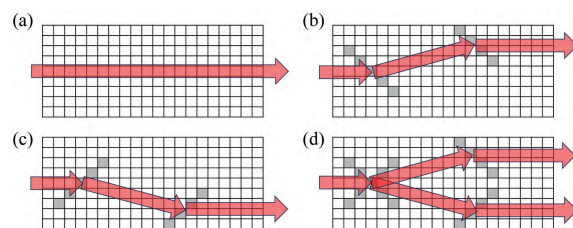


图 7 基于像素化驱动电路的可重构液晶包层波导应用设想:(a)~(d)可控光路由。

Fig. 7 Application ideas of reconfigurable liquid crystal cladding waveguide based on pixelated driving circuit: (a)~(d) controllable optical routing.

6 结 论

本文介绍了液晶包层波导技术在光束扫描、傅里叶变换光谱、可重构光子器件领域的研究进展。不同的宏观应用表现均源于液晶包层对于波导模式的微观调控,并凭借其独特的工作方式与高效、快速的光调控特点,赋予了宏观应用新的技术优势。在光束扫描领域,液晶包层波导可实现大角度、二维光束连续扫描,在光刻、激光雷达、成像显示等领域具有重要应用价值;在傅里叶变换光谱领域,液晶包层波导具有优秀的光程调制能力,有望实现高分辨率光谱探测;在可重构光子器件领域,液晶包层波导具有更低的驱动能耗,有利于实现更高集成度、更大尺寸的光电子芯片。

参 考 文 献:

- [1] ZHANG X M. Liquid-crystal-based planar waveguide devices for optical interconnects [D]. Hong Kong, China: Hong Kong Polytechnic University, 2017.
- [2] BI Z K, MU Q Q, DIAO Z H, *et al.* Design of prism coupling structure for liquid crystal cladding waveguide beam steerer [J]. *Optics Express*, 2023, 31(15): 24678-24690.
- [3] YANG D K, WU S T. *Fundamentals of Liquid Crystal Devices* [M]. 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2015.
- [4] 黄璞,薛长颖. 液晶传感技术用于有机磷农药快速检测的研究进展[J]. *分析化学*, 2023, 51(10): 1557-1570.

- HUANG P, XUE C Y. Progress of liquid crystal sensors for rapid detection of organophosphorus pesticides [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2023, 51(10): 1557-1570. (in Chinese)
- [5] DAVIS S R, ROMMEL S D, FARCA G, *et al.* A new photonics technology platform and its applicability for coded aperture techniques [C]//*Proceedings of SPIE 8165, Unconventional Imaging, Wavefront Sensing, and Adaptive Coded Aperture Imaging and Non-Imaging Sensor Systems*. San Diego: SPIE, 2011: 81651E.
- [6] OKAMOTO K. *Fundamentals of Optical Waveguides* [M]. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier, 2021.
- [7] ZOHRABI M, LIM W Y, CORMACK R H, *et al.* Lidar system with nonmechanical electrowetting-based wide-angle beam steering [J]. *Optics Express*, 2019, 27(4): 4404-4415.
- [8] HE Z Q, GOU F W, CHEN R, *et al.* Liquid crystal beam steering devices: principles, recent advances, and future developments [J]. *Crystals*, 2019, 9(6): 292.
- [9] HOY C, STOCKLEY J, SHANE J, *et al.* Non-mechanical beam steering with polarization gratings: a review [J]. *Crystals*, 2021, 11(4): 361.
- [10] 陈敬业,时尧成. 固态激光雷达研究进展[J]. 光电工程, 2019, 46(7): 190218.
CHEN J Y, SHI Y C. Research progress in solid-state LiDAR [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(7): 190218. (in Chinese)
- [11] 马阎星,吴坚,栗荣涛,等. 光学相控阵技术发展概述[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(10): 20201042.
MA Y X, WU J, SU R T, *et al.* Review of optical phased array techniques [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(10): 20201042. (in Chinese)
- [12] 胡婕,杜升平,郭弘扬. 基于液晶光学相控阵的光束扫描研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(11): 110002.
HU J, DU S P, GUO H Y. Research progress on beam scanning based on liquid crystal optical phased array [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(11): 110002. (in Chinese)
- [13] 牛启凤. 液晶相控阵光束偏转关键技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2020.
NIU Q F. Research on technology of liquid crystal phased array beam deflection [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [14] DAVIS S R, FARCA G, ROMMEL S D, *et al.* Analog, non-mechanical beam-steerer with 80 degree field of regard [C]//*Proceedings of SPIE 6971, Acquisition, Tracking, Pointing, and Laser Systems Technologies XXII*. Orlando: SPIE, 2008: 69710G.
- [15] DAVIS S R, ROMMEL S D, GANN D, *et al.* A lightweight, rugged, solid state laser radar system enabled by non-mechanical electro-optic beam steerers [C]//*Proceedings of SPIE 9832, Laser Radar Technology and Applications XXI*. Baltimore: SPIE, 2016: 98320K.
- [16] FRANTZ J A, MYERS J D, BEKELE R Y, *et al.* Chip-based nonmechanical beam steerer in the midwave infrared [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2018, 35(12): C29-C37.
- [17] DAVIS S R, ROMMEL S D, JOHNSON S, *et al.* Liquid crystal clad waveguide laser scanner and waveguide amplifier for LADAR and sensing applications [C]//*Proceedings of SPIE 9365, Integrated Optics: Devices, Materials, and Technologies XIX*. San Francisco: SPIE, 2015: 93650N.
- [18] DEGALLAIX J, FLAMINIO R, FOREST D, *et al.* Bulk optical absorption of high resistivity silicon at 1 550 nm [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(12): 2047-2049.
- [19] ULRICH R. Optimum excitation of optical surface waves [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1971, 61(11): 1467-1477.
- [20] 翁诗甫,徐怡庄. 傅里叶变换红外光谱分析[M]. 3版. 北京: 化学工业出版社, 2016.
WENG S F, XU Y Z. *Fourier Transform Spectrum Analysis* [M]. 3rd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2016. (in Chinese)
- [21] YANG Z Y, ALBROW-OWEN T, CAI W W, *et al.* Miniaturization of optical spectrometers [J]. *Science*, 2021, 371(6528): eabe0722.
- [22] ZHANG L C, CHEN J M, MA C W, *et al.* Research progress on on-chip Fourier transform spectrometer [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2021, 15(9): 2100016.
- [23] CHAO T H, LU T T, DAVIS S R, *et al.* Compact liquid crystal waveguide based Fourier transform spectrometer

- for in-situ and remote gas and chemical sensing [C]//*Proceedings of SPIE* 6977, *Optical Pattern Recognition XIX*. Orlando: SPIE, 2008: 69770P.
- [24] CHAO T H, LU T T, DAVIS S R, *et al.* Monolithic liquid crystal waveguide Fourier transform spectrometer for gas species sensing [C]//*Proceedings of SPIE* 8055, *Optical Pattern Recognition XXII*. Orlando: SPIE, 2011: 805506.
- [25] CHAO T H, LU T T, DAVIS S R, *et al.* Compact liquid crystal waveguide Fourier transform spectrometer for real-time gas sensing in NIR spectral band [C]//*Proceedings of SPIE* 8398, *Optical Pattern Recognition XXIII*. Baltimore: SPIE, 2012: 83980H.
- [26] GUAN Q Z, LIM Z H, SUN H Y, *et al.* Review of miniaturized computational spectrometers [J]. *Sensors*, 2023, 23(21): 8768.
- [27] 李金洋. 铌酸锂波导傅里叶变换光谱仪的光谱重建方法及光谱分辨率研究[D]. 北京:中国科学院电子学研究所, 2015.
- LI J Y. Study of spectral retrieval method and spectral resolution for LiNbO₃ waveguide Fourier transform spectrometer [D]. Beijing: Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)
- [28] SOUZA M C M M, GRIECO A, FRATESCHI N C, *et al.* Fourier transform spectrometer on silicon with thermo-optic non-linearity and dispersion correction [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 665.
- [29] AGRELL E, KARLSSON M, CHRAPLYVY A R, *et al.* Roadmap of optical communications [J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(6): 063002.
- [30] SUN C, WADE M T, LEE Y, *et al.* Single-chip microprocessor that communicates directly using light [J]. *Nature*, 2015, 528(7583): 534-538.
- [31] 涂鑫,陈震旻,付红岩. 硅基光波导开关技术综述[J]. 物理学报, 2019, 68(10): 104210.
- TU X, CHEN Z M, FU H Y. Review of silicon photonic switches [J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(10): 104210. (in Chinese)
- [32] 周林杰,陆梁军,郭展志,等. 集成光开关发展现状及关键技术(特邀)[J]. 光通信研究, 2019(1): 9-26.
- ZHOU L J, LU L J, GUO Z Z, *et al.* Development status and key technologies of integrated optical switches [J]. *Study on Optical Communications*, 2019(1): 9-26. (in Chinese)
- [33] 孙玲,冯帅,朱广宇. “光学和光电子学”领域 2021 年度国家自然科学基金项目申请与资助情况综述[J]. 光电工程, 2021, 48(12): 210380.
- SUN L, FENG S, ZHU G Y. Proposal application, peer review and funding of optics and optoelectronics in 2021: an overview [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2021, 48(12): 210380. (in Chinese)
- [34] XU Y, UDDIN M A, CHUNG P S, *et al.* Polymer planar waveguide device using inverted channel structure with upper liquid crystal cladding [J]. *Optics Express*, 2009, 17(10): 7837-7843.
- [35] DAVIS S R, FARCA G, ROMMEL S D, *et al.* Liquid crystal waveguides: new devices enabled by $>1\,000$ waves of optical phase control [C]//*Proceedings of SPIE* 7618, *Emerging Liquid Crystal Technologies V*. San Francisco: SPIE, 2010: 76180E.

作者简介:



刁志辉,男,博士,副研究员,2015年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事液晶波导方面的研究。E-mail: diaozh@ciomp.ac.cn



穆全全,男,博士,研究员,2010年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事液晶光学调控技术、自适应光学技术和智能光学成像等方面的研究。E-mail: muquanquan@ciomp.ac.cn