

面向空间光通信的电光材料光束偏转研究现状及应用前景

李富豪 赵继广 张建伟 段永胜 刘冰

Research status and application prospects of beam deflection using electro-optic materials towards space laser communication

LI Fu-hao, ZHAO Ji-guang, ZHANG Jian-wei, DUAN Yong-sheng, LIU Bing

引用本文:

李富豪, 赵继广, 张建伟, 段永胜, 刘冰. 面向空间光通信的电光材料光束偏转研究现状及应用前景[J]. *中国光学*, 优先发表. doi: 10.37188/CO.2025-0154

LI Fu-hao, ZHAO Ji-guang, ZHANG Jian-wei, DUAN Yong-sheng, LIU Bing. Research status and application prospects of beam deflection using electro-optic materials towards space laser communication[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.37188/CO.2025-0154

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0154>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

空间激光通信组网技术与应用研究进展

Research progress of space laser communication networking technology

中国光学 (中英文). 2025, 18(3): 429 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0140>

高精度电光调制椭偏应力传感系统

High-precision electro-optic modulated ellipsometric stress sensing system

中国光学 (中英文). 2025, 18(3): 691 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0222>

面向自由空间光通信波前校正的改进模拟退火算法

Improved simulated annealing algorithm for wavefront correction in free-space optical communication

中国光学 (中英文). 2025, 18(4): 784 <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0028>

同时测试波导传输损耗和弯曲损耗的方法

Method for the simultaneous measurement of waveguide propagation loss and bending loss

中国光学 (中英文). 2023, 16(5): 1177 <https://doi.org/10.37188/CO.EN.2022-0027>

单波长激光通信终端的隔离度

Isolation of single wavelength laser communication terminals

中国光学 (中英文). 2023, 16(5): 1137 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0253>

径向高斯涡旋光束阵列在大气中传输的闪烁指数分析

Scintillation index analysis of radial Gaussian vortex beam array propagation in the atmosphere

中国光学 (中英文). 2025, 18(1): 142 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0098>

文章编号 2097-1842(xxxx)x-0001-14

面向空间光通信的电光材料光束偏转 研究现状及应用前景

李富豪¹, 赵继广¹, 张建伟^{1*}, 段永胜¹, 刘冰²

(1. 航天工程大学, 北京 怀柔 101416;

2. 齐鲁工业大学山东省科学院新材料研究所, 山东 济南 250014)

摘要: 电光光束偏转技术具有低功率、小型化、可控性好等优点, 相比于机械式光束偏转、声光光束偏转和液晶光束偏转技术, 更容易满足空间激光通信快速、稳定的现实应用需求。本文系统总结了一些应用广泛的新型电光材料(铌酸锂、锆钛酸铅钽、钽铌酸钾)在光束偏转方面的国内外研究进展, 根据不同电光材料的偏转特性, 从应用模式和关键指标方面分析比较了各类材料光束偏转技术的特点, 展望了各类电光材料光束偏转技术在空间光通信领域的应用前景, 指出了目前亟待解决的困难, 为下一步的研究工作指明了方向。

关键词: 电光光束偏转技术; 铌酸锂; 锆钛酸铅钽; 钽铌酸钾; 空间光通信

中图分类号: TH74 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2025-0154 CSTR: 32171.14.CO.2025-0154

Research status and application prospects of beam deflection using electro-optic materials towards space laser communication

LI Fu-hao¹, ZHAO Ji-guang¹, ZHANG Jian-wei^{1*}, DUAN Yong-sheng¹, LIU Bing²

(1. Department of Electronic and Optical Engineering, Space Engineering University, Beijing 101416, China;

2. Advanced Materials Institute, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences),
Jinan 250014, China)

* Corresponding author, E-mail: 1240688300@qq.com

Abstract: Electro-optic beam deflection technology possesses advantages such as low power consumption, miniaturization, and good controllability. Compared with mechanical beam deflection, acousto-optic beam deflection, and liquid crystal beam deflection technologies, it is more easily able to meet the practical application requirements of rapidity and stability in space laser communication. This paper systematically summarizes the domestic and international research progress of several widely applied novel electro-optic materials (such as lithium niobate, lead lanthanum zirconate titanate, and potassium niobate tantalate) in the field of beam deflection. Based on the intrinsic deflection characteristics of different electro-optic materials, the features of corresponding beam deflection technologies are comprehensively analyzed and compared from the perspectives of application configurations and key performance metrics. Furthermore, the application pro-

收稿日期: 2025-12-11; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 中文基金

Supported by

spects of these electro-optic material-based beam deflection technologies in space optical communication are discussed, the urgent challenges that need to be addressed currently are highlighted, and the directions for future research endeavors are clarified.

Key words: electro-optic beam deflection technique; LN; PLZT; KTN; space laser communication

1 引言

空间激光通信是指在卫星平台或者其他处在空间环境的平台之间,通过激光光束实现无线远程自由的信息传输,从而达到通信的目的。微波通信由于频段低、带宽受限,难以实现海量信息传输的要求,而空间激光通信具有低功耗、传输速率高、信息容量大、抗电磁干扰能力强、保密性高等优点,成为突破传统微波通信容量瓶颈,构建下一代天地一体化高速信息网络的核心技术方向,在国防安全、空间探测、地球观测、全球宽带接入等领域展现出巨大的战略与应用价值^[1]。然而,将激光通信的优势从理论转化为稳定可靠的工程应用,面临两大核心挑战:远距离传输(千公里至万公里)与提升通信速率(向 Tbps 量级迈进)。目前激光空间通信能够实现最高传输距离 80000 km,最高传输通信速率为 1.8 Gbps^[2],相较于下行通信传输(10 Gbps)仍有一定差距。

克服上述挑战的关键在于建立并维持可靠的激光星间链路(Inter-Satellite Link, ISL)。星间激光通信链路处于复杂的动态环境中,卫星平台的轨道运动、姿态调整、平台微振动、热变形以及穿越大气层时的湍流效应,均会引入指向误差。为实现更远的传输距离和更快的通信传输速率,需要建立稳定的激光星间链路,激光星间链路的建立主要依赖捕获、跟踪和瞄准(Acquisition, Tracking and Pointing, ATP)系统。ATP 系统主要包含两大核心功能:快速捕获(Acquisition)和高精度跟踪(Tracking & Pointing)^[3]。快速捕获是指在短时间内(毫秒级)、大初始不确定区域(视场角高达 100 mrad)完成对方信标的探测与粗对准^[4];高精度跟踪是指在窄光束通信状态下,实时、高精度(微弧度甚至亚微弧度量级)地补偿动态扰动,维持光束稳定指向,确保通信光斑在探测器上的位置和能量集中度满足高速通信需求,如低波前畸变、高指向稳定性。支撑 ATP 系统实现这两项

核心功能的核心器件是光束偏转器,因此大偏转角、高响应速度、高精度以及出色的输出光斑质量等是考量光束偏转器应用在空间激光通信中的关键指标。

作为 ATP 系统中负责精确操控光束方向的核心伺服器件,光束偏转器根据实现光束扫描与控制的物理机理,可分为两大类技术:机械式光束偏转技术和非机械式光束偏转技术。其中,机械式光束偏转技术有扫描振镜(Galvanometer Scanners)^[5-7]、快速控制反射镜(Fast Steering Mirrors, FSM)^[8-11]和微机电系统变形镜(Deformable Mirrors, DM)^[12-14]等类型;此类技术通常成熟度较高,扫描范围较大,但在响应速度、微重力环境适应性、功耗、抗冲击振动以及运动部件可靠性等方面存在固有局限。非机械式光束偏转技术是利用声、光、电等物理效应对光波进行直接调制实现无惯性的光束偏转,主要包括声光偏转(Acousto-Optic Deflection, AOD)^[15-21]、基于液晶材料的电控光束偏转(SLM)^[22-33]以及基于电光(Electro-Optic, EO)效应的偏转。非机械式光束偏转技术具有无惯性、响应快、控制灵活、低功耗、易于集成等理论优势。

在如今多元化光束偏转技术谱系中,电光光束偏转技术凭借其物理原理的独特性——利用电光效应(如普克尔斯效应或克尔效应)通过外电场直接调制材料折射率,进而实时控制光波前相位,理论上可实现 GHz 响应速度的无惯性光束控制方案。这种高速潜能,以及无宏观运动部件的特性,使其在解决 ATP 的高速动态扰动补偿方面展现出引人关注的潜力,为在光子芯片上实现小型化、轻量化的高速光束扫描系统提供了重要途径。

因此,基于电光偏转技术的高速、无惯性的独特属性以及在空间 ATP 系统中潜在的关键作用,本文对电光光束偏转技术从偏转角、响应速度、精度以及输出光斑质量等关键指标进行全面、深入和批判性的评估。概述国内外高性能电

光偏转技术在材料、结构等方面的最新突破, 对比分析不同材料、不同结构电光偏转技术的技术指标, 系统性总结当前制约光束偏转技术在空间 ATP 中应用的核心瓶颈, 并分析亟待解决的问题以及展望未来的发展趋势。

2 电光光束偏转技术研究进展

2.1 铌酸锂晶体光束偏转研究进展

2.1.1 基于温度效应的铌酸锂晶体光束偏转研究进展

自 1965 年美国贝尔实验室 Ballman 首次使用“提拉法”生长出均匀性良好的铌酸锂(LiNbO_3 , LN)晶体, 经过生长工艺的改善和提高^[34-36], 高质量 LN 晶体已经被广泛应用于对光束的精准操控, 包括波导型光子集成电路、光开关、光信号调制和偏转等诸多领域。当 LN 晶体的温度发生变化时, 晶体内部的电偶极子会重新排列, 导致内部极化的改变, 这种现象称为热释电效应。其建立的内部电场通过电光效应引起折射率的变化, 这种热释电—电光耦合的调控机制可实现对光束的偏转操控, 如图 1(a) 所示。Bernal 设计了波导型六边形空气孔阵列的 LN 光子晶体超棱镜, 利用热释电效应产生内部电场, 这种结构使得工作波长在 1565 nm 处实现了慢光传播, 使热释电调控

灵敏度显著提升。当温度从 15 °C 到 25 °C 变化时, 实现了 1.23 μm 的光束位移^[37], 相当于外加电压 100 V 时的偏转角变化, 如图 1(b) 所示。通过双光束干涉在纯 LN 晶体上制备周期性的一维光子晶格结构, 采用珀耳帖元件实现双侧独立控温, 如图 1(c) 所示。光子晶格几何形状使得入射光束呈明暗间隔条纹分布, 当晶体两侧具有温差时, 由于自聚焦和自散焦现象, 入射光束会沿热流方向产生离散圆弧斑, 引起光线弯曲。该方案利用热释电效应和热光效应的协同作用, 在 45 °C 温度和 ± 5 °C 侧向温差条件下, 成功观测到光束向冷侧偏转并形成圆形离散孤子的现象, 且偏转方向总是朝向温度低的一侧^[38]。另一种波导型 LN 光束偏转技术整合了热光效应和电场效应, 通过微结构锯齿电极设计, 可在电光模式和热光模式双模式下工作, 结构如图 1(d) 所示。电光模式通过施加电压利用 Pockels 效应产生非均匀折射率调制, 光束偏转位移可实现 0.75 $\mu\text{m}/\text{V}$, 响应速度可实现 2.5 GHz; 热光模式通过电极发热产生温度梯度, 利用热光效应实现折射率调制, 光束位移距离明显高于电光模式, 但此模式的响应频率受到限制, 高于 1 kHz 时将无法跟随驱动信号。这种结构可在无外加偏压条件下便能实现高效率、低电压的光束控制, 并可根据实际需求实现光束偏转的多场景应用^[39]。

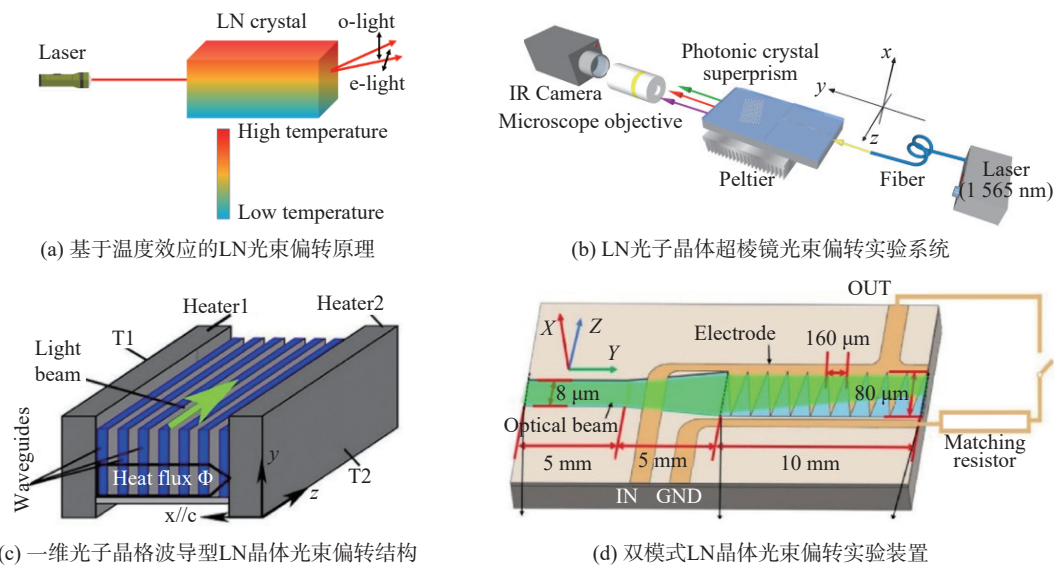


图 1 基于温度效应的铌酸锂晶体光束偏转技术

Fig. 1 LN crystal beam deflection technology based on temperature effect. (a) The principle of LN beam deflection based on the temperature effect. (b) LN photonic crystal superprism beam deflection experimental system^[37]. (c) One-dimensional photonic lattice waveguide-based LN crystal beam deflection structure^[38]. (d) Dual-mode LN crystal beam deflection experimental setup^[39].

2.1.2 基于电光效应的铌酸锂晶体光束偏转研究进展

基于电光效应的 LN 晶体光束偏转技术可通

过设计晶体结构和电极结构来实现。Bosco 曾设计了一种双曲线状电极混合结构铌酸锂偏转器, 如图 2(a) 所示。

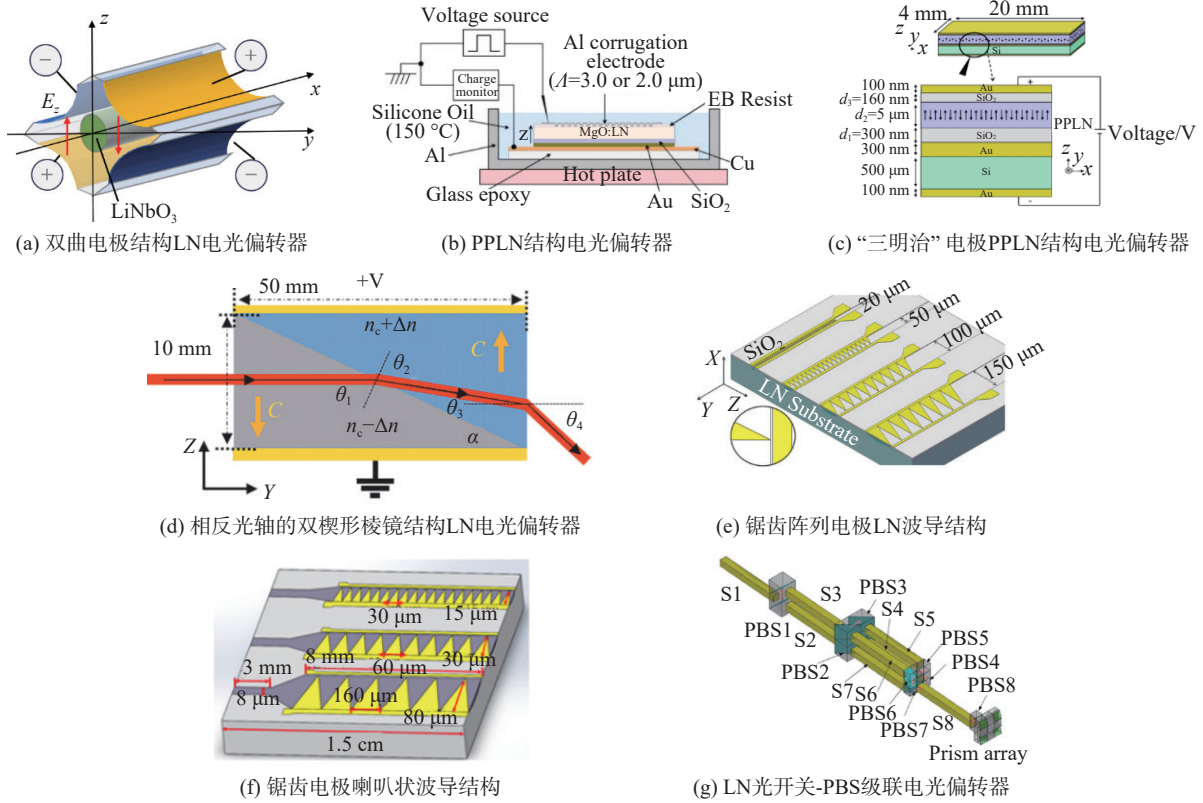


图 2 基于电光效应的铌酸锂晶体光束偏转技术

Fig. 2 LN crystal beam deflection technology based on electro-optic effect. (a) Hyperbolic electrode structure LiNbO₃ electro-optic deflector. (b) PPLN structure electro-optic deflector^[40]. (c) 'Sandwich' electrode PPLN structure electro-optic deflector^[41]. (d) Opposite optical axes double wedge prism structure LN electro-optic deflector^[43]. (e) Sawtooth array electrode LN waveguide structure^[44]. (f) Sawtooth electrode trumpet waveguide structure^[45]. (g) LN optical switch - PBS cascaded electro-optic deflector^[46].

该电光偏转器双曲线形电极结构, 将两个圆柱形 MgO:LN 晶体插入聚合物支架中心, 为降低光折变效应, 选用掺杂 5 mol.%MgO 的 LN 晶体, 外加电压在 LN 晶体内部建立梯度折射率分布, 可实现 5.4 mm 大孔径的光束偏转, 并在外加电压 5 kV, 通光长度为 90 mm 条件下, 偏转角达到 1.2 mrad^[40]。另一种尝试是在 0.2 mm 厚的 MgO:LN 晶体薄片上覆盖波纹结构铝电极, 通过调控铁电畴反转在晶体内部形成具有周期性的折射率光栅结构, 如图 2(b) 所示。当激光以布拉格角入射时, 通过电压可调控衍射光功率。在 3 μm 周期结构、405 nm 激光波长、50 V 驱动电压、1.66° 入射角条件下, 最大衍射效率达到 80%^[41]。为进一步降低该结构的驱动电压, 降低 LN 晶体厚度至数

微米形成平面波导结构以增强光场稳定传输是最直接的方法; 还可通过设计“三明治”结构电极(金电极/SiO₂/PPLN/SiO₂/硅基底)来减弱电压衰减, 如图 2(c) 所示。在 4.6 V 驱动电压下, e 偏振光最大衍射效率提高到 98%, 理论上响应速度能实现 MHz 量级, 但由于硅制基底氧化形成的寄生电阻, 实际上响应速度仅实现了 5.7 kHz^[42]。此外, 相反光轴方向的 LN 双棱镜对称结构被用来降低由热效应造成的偏转精度误差, 如图 2(d) 所示, 针对高偏转精度的空间探测需求, 通过仿真测试, 当入射光为 1064 nm 时, 该结构在 5 V 电压下可达到 5 nrad 精度, 在封装后的器件实验测试条件下, 在 1.5 kV/mm 电场下最大实现 1.88 mrad 偏转, 从理论和实践验证了 LN 同时兼顾高精度和

大偏转的可行性^[43]。对波导型光束偏转结构, 探索新电极结构和波导是提高其性能的有效方法, 例如锯齿状电极^[44]和喇叭状波导结构^[45], 在一定程度上实现了低驱动电压和大偏转角度的效果, 如图 2(e) 和 (f) 所示。另一种基于电光效应的 LN 晶体光束偏转技术是将体型 LN 电光开关与偏振分光棱镜(PBS)构成二进制控制单元, 通过在 LN 电光开关上施加半波电压实现光束偏转方向 90° 旋转, 进而控制光束传播路径。进一步通过 m 级级联实现 2 m 个偏转点位, 并结合棱镜实现远场大视场角 1.5°×1.5° 覆盖, 如图 2(g) 所示。该偏转器具有 30 ms 的响应时间, 理论响应时间可低至 1 ns。由于多级 PBS 的影响, 光束偏转效率低, 光束通过最高级棱镜后的光强为初始光束的 62.7%^[46]。

2.2 PLZT 电光陶瓷光束偏转研究进展

锆钛酸铅镧(PLZT)陶瓷是在锆钛酸铅(PZT)

的基础上, 用镧(La)部分取代铅(Pb)点位形成的一种具有钙钛矿结构的透明铁电材料, 因其具有较大的电光系数($\sim 3.8 \times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{V}^2$)、宽光学透射范围(可见光至中红外)和亚微秒级响应速度^[47-48], 在光束偏转领域有着重要应用。目前基于 PLZT 陶瓷的电光偏转器存在两种结构: 基于棱镜或等效棱镜的 PLZT 光束偏转器和基于光学相控阵的 PLZT 光束偏转器。

2.2.1 基于电光棱镜的 PLZT 光束偏转技术

基于棱镜或等效棱镜的 PLZT 光束偏转器的最大特点是三角形电极结构。通过外加电场作用, 在体型 PLZT 陶瓷内形成类似棱镜的折射率变化, 使光束在电极边缘界面处发生偏转。如图 3(a) 所示, Toshio 使用 PLZT 陶瓷加工了一种具有棱镜形状的光束偏转器, 在电场强度为 900 V/mm 条件下实现了 1.2° 的偏转角^[49]。

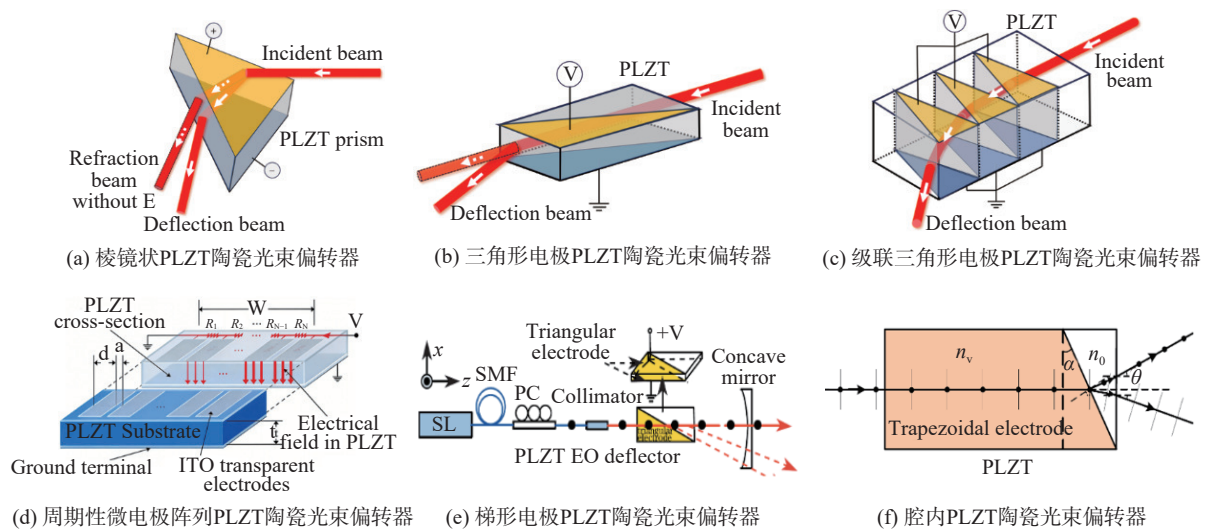


图 3 PLZT 陶瓷光束偏转器

Fig. 3 PLZT-based ceramic beam deflector. (a) Prism-shaped PLZT ceramic beam deflector. (b) Triangular electrode PLZT ceramic beam deflector. (c) Cascaded triangular electrode PLZT ceramic beam deflector. (d) Periodic microelectrode array PLZT ceramic beam deflector^[52]. (e) Trapezoidal electrode PLZT ceramic beam deflector^[53]. (f) Intracavity PLZT ceramic beam deflector^[54].

棱镜效应也可通过设计电极结构来实现, 将 PLZT 陶瓷加工成长方体, 在垂直光束传播方向的晶体面上设计三角形电极, 如图 3(b) 所示。在电光效应作用下可等效成棱镜, 光线在棱镜的界面处发生折射, 通过控制电场强度动态调整棱镜的等效折射率, 可实现光束偏转角的连续调节^[50]。为进一步提高偏转角度, 将三角形电极串联, 设计

成具有级联电极结构的 PLZT 光束偏转器是一种有效方法, 如图 3(c) 所示。这种级联电极结构使得电场作用区域延长, 光束在单片 PLZT 内经历多次偏转累积, 在 700 V/mm 的电场条件下, 将偏转角提高了 66%^[51]。基于电极串联的思想, 在 PLZT 陶瓷薄片上设计周期性微电极阵列来实现连续光束扫描, 如图 3(d) 所示。与等效棱镜的光

束偏转原理不同,它在周期性电极上施加渐变电压以形成横向电场梯度,利用线性电光效应造成折射率梯度分布,通过相位延迟累积实现光束的连续偏转,在外电压 700 V,晶体厚度 0.4 mm, 通光长度 20 mm 的条件下,实现了 0.04° 的偏转角,在频率 30 Hz、电压 500 V 条件下,测得的响应时间为 37.92 ns,可通过降低 RC 常数,实现更快的响应速度^[52]。图 3(e) 是外腔二极管激光器 (ECDL) 与单模光纤 (SMF) 的耦合装置,输出的激光经过具有平行三角形 Ti/Pt/Au 电极结构的 PLZT 电光陶瓷,在 1000 V/mm 条件下,可实现 5.8 mrad 的偏转角,响应时间仅为 120 ns,具有良好的高斯分布和线偏振特性,优于光学相控阵技术^[53]。基于腔内 PLZT 电光陶瓷偏转器除了在 PLZT 电光陶瓷晶体上施加三角形电极,还存在一种梯形电极结构,图 3(f) 所示。该结构主要用于无模跳可调谐激光器设计领域,来解决传统机械调谐外腔二极管激光器存在的调制频率低、可靠性差等问题^[54]。

2.2.2 基于光学相控阵的 PLZT 电光偏转技术

基于光学相控阵的 PLZT 光束偏转器,在 PLZT 电光陶瓷上刻蚀条状电极阵列,当入射光在 PLZT 上传播时会分成多道光束,如图 4(a) 所示。这些光束在远场形成干涉条纹,此时对各个

电极单元施加不同外加电压,使各道光束产生不同的相位差,实现光束偏转。Talbot 从理论上分析了具有光栅电极结构的 PLZT 陶瓷,基于相控阵天线原理,通过电极电压序列在 PLZT 孔径上诱导阶梯状折射率分布,能够实现对光束的偏转控制^[55]。James 设计了一种基于 PLZT 的 32 通道相控阵电光偏转器,电极设计采用铬/金电极,周期 400 μm ,间隙 40 μm ,支持全波电压,通过编程模拟线性相位剖面,实现光束偏转。这种单极相控阵需要大量控制线路,增加了系统的复杂度,通过对齐级联架构可减小控制线数量,如图 4(b) 所示。Stage1 由重复的 M1 通道子阵列构成,支持离散角度偏转,Stage2 覆盖 Stage1 的 M2 通道大阵列,提供连续角度条件,总控制线数降低至 $M1+M2$,分辨率提升至 $M1\times M2$,实现了对数级复杂度压缩。该级联系统在 633 nm HeNe 激光下实现 100 ns 亚微秒级切换速度和全波电压 318 V,并通过离散偏移偏置协议将控制线从 32 减少至 12,验证了高效连续扫描能力^[56]。此外还有利用光刻溅射方法制备的 8 单元周期条状电极阵列 PLZT 相控阵电光偏转器,如图 4(c) 所示。输出光束在远场干涉,在 7.2 m 远场、580 V 电压条件下,中心条纹偏转角达到了 2.35 mrad^[57]。

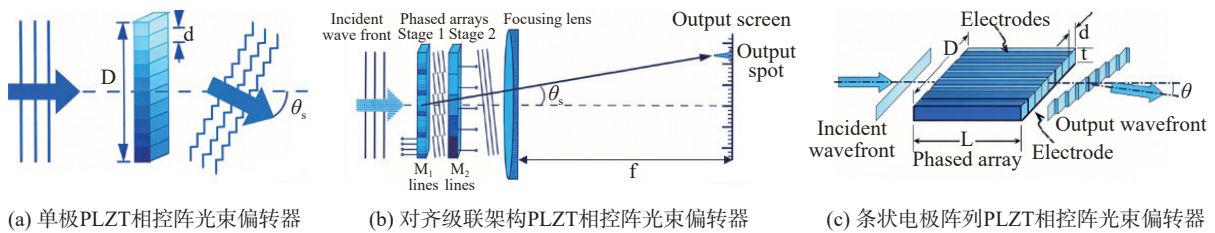


图 4 PLZT 相控阵光束偏转器

Fig. 4 PLZT-based phased array beam deflector. (a) Unipolar PLZT phased array beam deflector^[56]. (b) Alignment-level cascaded architecture PLZT phased array beam deflector^[56]. (c) Strip-shaped electrode array PLZT phased array beam deflector^[57].

2.3 钽铌酸钾晶体光束偏转研究进展

钽铌酸钾 ($\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$, KTN) 晶体是由钽酸钾 (KTaO_3 , KT) 和铌酸钾 (KNbO_3 , KN) 组成的钙钛矿型固溶体,可通过调节 Nb 组分浓度 x 值灵活控制晶体的居里温度和电光响应特性。由于极性纳米区域 (Polar nanoregion, PNR) 的存在, KTN 晶体拥有巨大的二次电光系数 ($2\times 10^{-15}\text{m}^2/\text{V}^2$), 在 400 nm-4000 nm 范围具有优异的透光性,覆盖可

见光到中红外波段。基于 KTN 晶体的光束偏转器分为两类: 基于组分梯度的光束偏转器和基于空间电荷控制的光束偏转器。

2.3.1 基于组分梯度的 KTN 晶体光束偏转器

KTN 晶体在生长过程中的非一致熔融特性会导致晶体组分在生长方向上呈梯度变化,形成晶体本身固有的梯度折射率,而光束在体型晶体中发生偏转的现象从本质上归因于折射率梯度导

致光束波前相位的累积差异。基于此原理, 山东省科学院的王旭平提出了基于组分梯度的 KTN 晶体光束偏转器。晶体沿 c 轴具有组分梯度, 在垂直组分梯度的 a 轴方向施加电压, 光束在平行于电场方向的偏振分量会在组分梯度的方向上发生偏转。实验测得 KTN 晶体在生长方向上的组分梯度为 $5 \times 10^{-3} \text{mm}^{-1}$, 对应的折射率梯度为 $31.5 \times 10^{-3} \text{mm}^{-1}$, 在 1200 V 偏转电压条件下通过电光效应可以实现 50 mrad 的偏转^[58]。传统单 KTN 晶体仅能实现一维光束偏转, 通过空间电荷与组分梯度协同作用, 空间电荷梯度与组分梯度垂直可实现二维光束偏转。

2.3.2 基于空间电荷控制的 KTN 晶体光束偏转器

日本 NTT 公司最早提出基于空间电荷控制的 KTN 晶体光束偏转技术, 已将 KTN 光束偏转

器实现了商业化, 产品能够实现大角度任意偏转 ($120 \times 96 \text{ mrad}$), 并且扫描频率可实现 100 kHz, 是目前性能最突出的光束偏转器, 此光束偏转技术被认为是最热门主流的方向之一。

基于空间电荷控制的 KTN 晶体光束偏转原理如图 5(a) 所示, Ti 作为电极材料通过蒸发镀膜工艺与晶体形成欧姆接触, 外加电压将电子注入晶体被量子阱捕获形成空间电荷, 并在晶体内部形成梯度分布的空间电场, 在二次电光效应的作用下形成折射率梯度分布, 引起光束偏转。日本 NTT 公司最初的光束偏转实验验证了其优异的偏转性能, 在 500 V/mm 静态电场、5 mm 作用长度的条件下, 实现了 $7.16^\circ (\pm 123 \text{ mrad})$ 的偏转范围^[59]。光束偏转角是 KTN 晶体的一个核心指标, 大偏转角意味着高分辨率以及大视场。

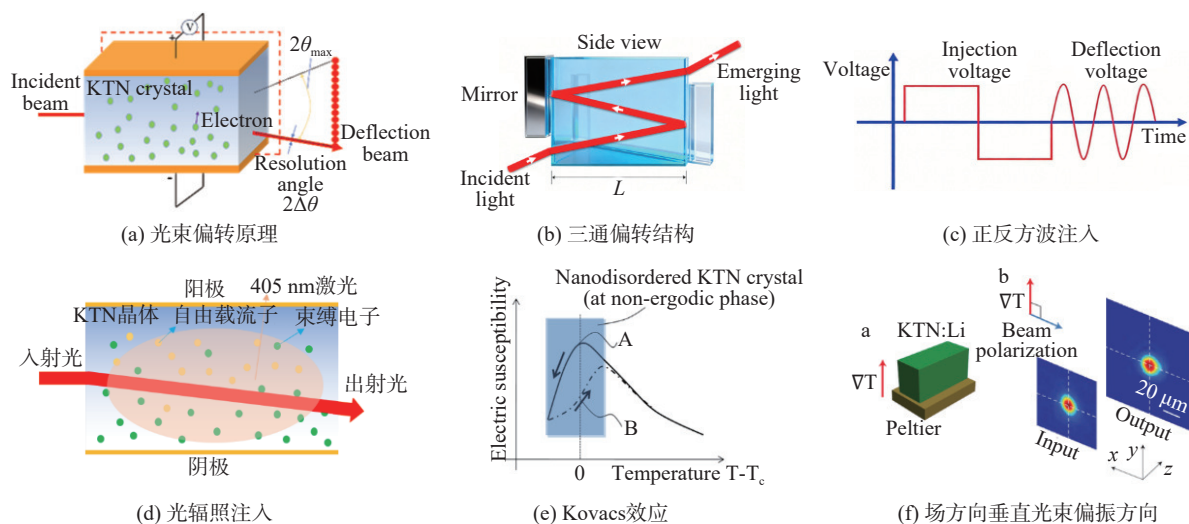


图 5 基于空间电荷控制的 KTN 晶体光束偏转器

Fig. 5 KTN beam deflector based on space-charge control. (a) Principle of beam deflection. (b) Three-way deflection structure. (c) positive and negative square wave injection. (d) Optical irradiation injection. (e) Kovacs effect^[71]. (f) The direction of the field is perpendicular to the polarization direction of the light beam^[64].

光束偏转角度在低电场区间随着外加电压的增加而增大, 但电光效应的饱和效应使得偏转角在高电场区间增长会变得缓慢直至趋向平坦^[60], 由于电压过高会导致晶体损伤或者裂解, 因此偏转电压通常被限制在 600 V/mm 以内。

从光束偏转方程来看, 光束偏转角与晶体长度呈正比, 那么采用更长的晶体可实现更大的偏转角度, 但更长的晶体一方面晶体的均匀性会变差, 导致出射光斑质量的降低, 另一方面出射的偏转光束容易被两侧电极阻挡, 影响偏转角度的提

升。解决此问题的一种有效方法是在 KTN 晶体的入射面和出射面镀高反射膜, 形成多通结构偏转器, 如图 5(b) 所示。在不改变晶体长度条件下, 通过反射可将通光长度和偏转角度提高 2 倍^[61]。还有一种方法是设计五边形 KTN 晶体组合, 如图所示, 光束通过经历 6 次反射有效增加了通光长度^[62]。

向 KTN 晶体注入电子需具备两个条件: 一是电极材料的功函数较低, 二是电极与 KTN 晶体形成欧姆接触。Ti 金属材料的功函数较低

(3.84 eV), 并且单金属 Ti 材料性质稳定易获得, 但是导电性较差; Au 功函数虽然较高(5.1eV), 但是具有优良的导电性能, 因此一般采用 Ti/Au 复合电极作为偏转器的电极材料^[63]。还有一种电极配置是正负异种电极, 此条件下偏置态能显著影响电子注入能否实现。以 Ti-Au 异种电极为例, 当 Au 作为负极时, Au-KTN 界面形成肖特基接触, 电子难以逸出实现注入; 当 Ti 作为负极时, Ti-KTN 界面形成欧姆接触, 电子顺利注入^[64]。除此之外, 还有液态镓铟合金 (EGaIn)-金 (Au) 电极配置也表现出类似的效应^[65]。正负异种电极注入电子时还需考虑温度效应, 这是因为温度升高会增强载流子的热激发, 从而增加捕获电子的数量。由于注入电子对电场产生的屏蔽效应, 电子的注入深度受到限制, 使得电子难以到达阳极。解决该问题的方法有两种: 一是对电场的设计, 采用低频的正反方波作为注入电压, 保证电荷从双向注入, 以改善电子注入的均匀性, 如图 5(c) 所示; 二是采用激光辐照的方法, KTN 晶体带隙能量约为 3.1 eV, 对蓝紫光波段具有很强的吸收能力, 电子吸收光子的能量跃迁至激发态, 形成电子-空穴对, 完成空间电荷的注入, 这种光辐照+电场的联合注入方式能够有效克服电子的屏蔽效应, 提高空间电荷的注入密度和深度, 从而提高光束偏转角^[66-68], 如图 5(d) 所示。需要注意的是光辐照的强度, 过高的光功率会降低畴反转能力, 导致偏转角度的下降^[69]。近年来, 研究学者开始重点关注带电畴壁 (CDW), 在铁电相低温区, CDW 可以以头对头、尾对尾的特殊结构较为稳定的存在, 其会诱导局域带弯曲, 形成高迁移率导电通道, 大大降低了载流子复合概率, 导致 KTN 晶体具有较高的光电响应特性^[70]。未来有望诱导该畴壁结构以克服电子的屏蔽效应。

根据 KTN 晶体的介电温度谱, 介电常数在居里温度附近达到最大值, 单从偏转方程看, 可将 KTN 晶体的工作温度设置在居里温度 T_c 来实现偏转角的增益, 但实际上, 此状态下的 KTN 晶体内部铁电畴尺寸较大, 对光束的散射较严重从而降低出射光斑质量。此外施加电压容易导致 KTN 晶体发生相变, 介电常数会骤减, 导致偏转角急速下降, 因此 KTN 晶体的工作温度一般设置在 T_c 以上 3 °C 附近。设置温度在 T_c 以上 3 °C,

还有一个原因是居里温度附近的场致相变会导致偏转速率的降低^[71]。随着认识的深入, 研究学者发现对 KTN 晶体进行快速降温, 通过 Kovacs 效应会导致 T_c 附近的介电常数明显提升^[72], 如图 5(e) 所示。但此时 KTN 晶体内部的 PNR 处在一种非热力学平衡状态, 这种增益效应仅能维持数分钟。由此可见, 温度策略不是一种可靠的方法。此外, T_c 的空间不均匀性会造成局域介电常数的不均匀性, 研究学者利用扫描非线性介电显微镜发现了局域介电常数的微小变化会导致偏转角度的显著差异, 这种差异导致光束偏转角的位置依赖性^[73]。因此, 制备均匀 T_c 分布的 KTN 晶体是实现高质量光束偏转的关键前提。PNR 在电场的作用下会发生简谐伸缩运动或 $\pi/2$ 翻转运动, 具有明显的运动频率特征, 当电场的频域与 PNR 运动的特征频率匹配时, 介电常数会发生明显的激增现象。通过 PNR-电场的共振特征, 可有效增加 KTN 晶体的光束偏转角^[74-75]。由于 PNR 的多尺度分布, 特征频率存在明显的离散分布, 因此利用 PNR-电场发生共振提高介电常数的方法仅适用于较窄的频率区间。从晶格动力学角度也可以评估和调控 KTN 晶体的介电特性, 拉曼光谱的 ν_3 模式的偏移可以表征自发极化, 该模式表示沿极轴方向氧八面体的顶部和底部两个氧离子与中心 B 位离子发生相对位移振动, 导致 B-O 键发生反对称伸缩, 短 B-O 键在电场拉伸应力作用下会变短, 进一步增强极化, 并通过 pseudo-Jahn-Teller 效应揭示了可以通过掺杂工程提高介电性能^[76]。

KTN 晶体光束偏转技术的另一个关键参数是偏转速度。光束偏转的响应速度不受电子迁移率的限制, 而是由电光效应的响应速度决定的^[77-78]。KTN 晶体的电光响应时间在 ns 量级, 理论上可达 GHz 量级的偏转速度, 由于 RC 常数的限制, 偏转速率仅能实现 MHz 或 kHz^[79]。

光斑质量是 KTN 晶体光束偏转器的另一个关键技术指标。由于 KTN 晶体固有的光学不均匀性, 当光束传播方向平行于 KTN 生长方向时, 光斑质量达到最佳, 否则会发生严重的退化变形^[61]。在空间电荷注入模式下, 折射率沿电场方向呈抛物线型分布, 因此 KTN 晶体具有抛物线棱镜的性质^[80], 光束在发生偏转的同时发生汇聚, 造

成出射光发散成大光斑光束, 在 KTN 晶体前后放置两个焦距相同的柱面偶透镜, 通过光束整形方法可有效解决这个问题^[81]。影响光斑质量的外部因素包括 PNR 的空间尺度与排列方式、光束强度、光束偏振等。当 PNR 空间尺度较大且排列无序时, 光束会受到较严重的散射畸变, 对 KTN 晶体进行快速降温以及场方向垂直光束偏振方向时利用 PNR 的非线性效应能够获得较高的光斑质量^[64], 如图 5(f) 所示。随着光束强度的增加, 光折变效应形成的空间电荷场造成 KTN 晶体内部折射率扰动, 偏转光斑会随着时间的累积发生畸变^[82]。

3 各类电光材料偏转性能特点及发展趋势分析

3.1 基于 LN 晶体的电光偏转

铌酸锂基电光偏转技术以其成熟的晶体生长工艺和较高的电光系数著称, 适用于高频调制场景, 典型响应时间可达纳秒级。其优势在于稳定性强、光学均匀性好。基于温度效应的 LN 光束偏转技术在较小温差可实现较大角度的偏转, 能量消耗低、不依赖外加电场, 响应时间较长, 在高厚度晶体中偏转效果不明显; 基于电场效应的 LN 偏转技术, 体型结构需要 kV 量级的驱动电压, 集成度不足, 易受热光效应干扰; 波导型结构依赖折射率光栅通过衍射原理实现, 对入射角敏感, 易造成能量的损失。当前发展趋势聚焦于薄膜化与异质集成, 例如通过溶胶-凝胶法、分子束外延法等技术制备铌酸锂薄膜, 结合硅光子学平台实现紧凑型偏转器, 将驱动电压降至数十伏, 同时提升带宽至数十 GHz。

3.2 基于 PLZT 晶体的电光偏转

基于 PLZT 晶体的电光偏转技术以快速响应(微秒级)和低驱动电压($<50\text{ V}$)为突出特点, 得益于其高电光系数和陶瓷材料的易加工性。但 PLZT 材料的一个显著特点是内部存在空间尺度较大的畴壁结构, 光散射比较严重, 光能量透过率较低; 大尺寸畴壁翻转速度较慢, 使得偏转速度难以提高。基于光学相控阵的偏转技术偏转精度较高, 具有很好的光束分辨率且可实现大角度偏转。但存在响应时间较长、光束衍射效率较低的

缺点。近年来, 发展趋势转向纳米结构优化和复合设计, 例如采用溶胶-凝胶法制备 PLZT 薄膜以减少散射。研究热点还集中在使用交流电场调控畴结构以减小畴壁带来的光散射效应, 增强晶体的透明性。

3.3 基于 KTN 晶体的电光偏转

基于 KTN 晶体的电光偏转技术凭借极高的电光系数和宽动态范围, 能实现大角度偏转($>1^\circ$), 适用于高精度光束扫描。从晶体的材料特性看, 由于介电常数对温度极为敏感, 主要挑战在于温度敏感性——需精确控温至居里温度附近(约 -5°C 至 20°C)以维持性能。另外, KTN 晶体生长难度大、成本高, 以 $4\text{ mm}\times 3.2\text{ mm}\times 1.2\text{ mm}$ 尺寸为例, 日本 NTT 公司的售价达 2 万人民币。尽管晶体生长受温度、原材料纯度、磁场等多种因素影响, 通过金属离子掺杂工程是改善 KTN 晶体的生长工艺的可能途径之一。例如, 掺杂 Li 离子能够促进 KTN 晶体的生长, 可能是未来 KTN 晶体生长工艺改善的突破方向。从偏转技术角度看, 基于空间电荷控制的光束偏转技术核心是空间电荷的注入, 均匀分布、大密度的空间电荷是高性能光束偏转的关键。光生载流子效应使得光辐照技术能够在一定程度上改善电注入技术的弊端, 因此光电联合注入方式可能是未来改善空间电荷注入的技术趋势, 但需要注意的是联合注入方式必定会引入系统的复杂度, 在系统集成性和小型化方面应当加以优化。

各类电光偏转技术的偏转精度、响应速度等关键参数如表 1 所示。为满足空间光通信的应用需求, 基于电光效应的 LN 晶体光束偏转器, 体型结构需克服驱动电压过高的问题, 以避免产生大的能量开销, 波导型结构需克服入射角敏感的问题, 以避免光束能量的过多损失; 基于温度效应的 LN 晶体光束偏转器由于热传导的固有局限, 难以应用在空间光通信; 基于光学相控阵的 PLZT 晶体光束偏转器需克服衍射效率低的问题, 以避免光束能量的过多损失。基于空间电荷控制的 KTN 晶体光束偏转器需克服温度敏感的问题, 另外由于 KTN 晶体高昂的价格, 为实现 KTN 晶体的国产化以及降低在空间光通信应用的成本, 需要进一步改善生长工艺。

表 1 电光材料光束偏转性能对比
 Tab. 1 Comparison of beam deflection performance among electro-optic materials

Material type and Structure	LN		PLZT		KTN	
	Temperature Effect Deflection	Electric Field Effect Deflection		Electro-optic Prism Type	Phased Array	Cubic crystal
		Irregular Electrode structure	Waveguide Structure			
Electro-optic coefficient		$31 \times 10^{-12}(\text{m/V})$		$1.5\text{-}2.5 \times 10^{-16}(\text{m}^2/\text{V}^2)$		$10^{-14}\text{-}10^{-12}(\text{m}^2/\text{V}^2)$
Deflection sensitivity	59.3 mrad/K ^[37]	0.13 mrad/kV/mm ^[40]	6.4 mrad/kV/mm ^[45]	29.07 mrad/kV/mm ^[50]	--	500 mrad/kV/mm ^[59]
Driving voltage	--	1000 V	~20 V	100-1000 V	<100 V ^[56]	~100 V
Response speed	< 1 kHz	GHz	MHz	GHz	MHz	700 kHz-GHz
Deflection accuracy	1-10 μrad	$10^{-2}\mu\text{rad}$ ^[43]		10-100 μrad	μrad	μrad
Whether meet the requirements of space laser communication	Most scenarios are not suitable, but extreme environment	Difficult to meet low-power consumption requirement	Have the potential to meet the requirement, but the angle sensitivity need to be overcome	Difficult to meet low-power consumption requirement	Have the potential to meet the requirement, but light scattering needs to be overcome	Have the potential to meet the requirements, but the impact of temperature sensitivity and optical inhomogeneity need to be overcome

4 结束语

本文面向空间激光通信的应用需求,从偏转角度、响应速度、偏转精度以及光斑质量等方面总结分析了 LN、PLZT 和 KTN 三种电光材料在光束偏转领域的性能特点,展望了三种晶体的发展趋势。LN 晶体具有优良的光学均匀性以及高速响应的优势,但也存在驱动电压高以及入射角敏感的固有短板,未来 LN 晶体的薄膜化与异质结集成,结合薄膜 LN 和入射角不敏感材料有望弥补以上短板;PLZT 晶体具有材料易加工,驱动电压低以及偏转角大的突出特点,但也存在畴壁带来较严重的光散射问题,采用交流电场调控畴

结构以减小畴壁带来的光散射效应,增强晶体的透明性,改善光斑质量是未来推动 PLZT 晶体应用在空间光通信的可能途径;KTN 晶体具有偏转角度大、响应速度快、偏转精度高、驱动电压低的明显优势,但也存在温度敏感,光学均匀性不易获得的问题,采用精确的温度控制装置解决温度敏感的问题,以及通过离子掺杂工程改善 KTN 晶体的生长工艺,有望促使 KTN 晶体在空间激光通信广泛地应用。另外,未来随着晶体生长工艺的突破、微纳结构设计的创新以及异质集成技术的成熟,高性能光束偏转器的研发应当摒弃"单一材料解决所有问题"的思维,转而采用"材料-结构-系统"协同优化的策略,充分发挥每类电光晶体的潜力,推动电光偏转技术进入新纪元。

参考文献:

- [1] 郑运强,刘欢,孟佳成,等.空基激光通信研究进展和趋势以及关键技术[J].*红外与激光工程*,2022,51(6):202104. ZHENG Y Q, LIU H, MENG J CH, *et al.*. Development status, trend and key technologies of air-based laser communication[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(6): 202104. (in Chinese).
- [2] 李锐,林宝军,刘迎春,等.激光星间链路发展综述:现状、趋势、展望[J].*红外与激光工程*,2023,52(3):202203. LI R, LIN B J, LIU Y CH, *et al.*. Review on laser intersatellite link: current status, trends, and prospects[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(3): 202203. (in Chinese).
- [3] 温涛.无线激光通信中 ATP 关键技术研究[D].长沙:国防科学技术大学,2006. WEN T. *Study on the key techniques of an acquisition tracking and pointing system in wireless laser communication*[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006. (in Chinese).
- [4] 焦仲科.星间激光通信若干关键技术研究[D].成都:中国科学院光电技术研究所,2017. JIAO Z K. *Research on key technologies in intersatellite optical communication*[D]. Chengdu: Institute of Optical and Electronics Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese).
- [5] 陈飞.大功率 Nd:YAG 激光振镜扫描系统的研究[D].武汉:华中科技大学,2011.

- CHEN F. *Study on high power Nd: YAG laser scanning galvanometer system*[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2011. (in Chinese).
- [6] MINCUZZI G, REBIÈRE A, LE GOAEC B, *et al.*. Beam engineering for high throughput material processing with high power, femtosecond lasers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 10906: 109061B.
- [7] MINCUZZI G, AUDOUARD E, BOURTEREAU A, *et al.*. Pulse to pulse control for highly precise and efficient micromachining with femtosecond lasers[J]. *Optics Express*, 2020, 28(12): 17209-17218.
- [8] KLUK D J, BOULET M T, TRUMPER D L. A high-bandwidth, high-precision, two-axis steering mirror with moving iron actuator[J]. *Mechatronics*, 2012, 22(3): 257-270.
- [9] 邵兵, 孙立宁, 曲东升, 等. 自由空间光通信 ATP 系统关键技术研究[J]. *压电与声光*, 2005, 27(4): 431-433.
SHAO B, SUN L N, QU D SH, *et al.*. Research on the key technology of ATP system for free space optical communication[J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2005, 27(4): 431-433. (in Chinese).
- [10] 向思桦, 陈四海, 吴鑫, 等. 基于新型压电驱动器的激光扫描器[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(1): 67-70,75.
XIANG S H, CHEN S H, WU X, *et al.*. Laser scanners based on novel piezoelectric actuators[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(1): 67-70,75. (in Chinese).
- [11] 袁刚, 王代华, 李世栋. 大角度压电式快速控制反射镜[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(8): 2258-2264.
YUAN G, WANG D H, LI SH D. Piezoelectric fast steering mirror with large excursion angle[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(8): 2258-2264. (in Chinese).
- [12] BAI Y H, YEOW J T W, WILSON B C. Design, fabrication, and characteristics of a MEMS micromirror with sidewall electrodes[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2010, 19(3): 619-631.
- [13] AFRANG S, MOBKI H, HASSANZADAN M, *et al.*. Design and simulation of a MEMS analog micro-mirror with improved rotation angle[J]. *Microsystem Technologies*, 2019, 25(3): 1099-1109.
- [14] 汪为民, 王强. 140 单元 MEMS 变形镜研制及测试分析[J]. *光电工程*, 2018, 45(3): 170698.
WANG W M, WANG Q. Development and characterization of a 140-element MEMS deformable mirror[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(3): 170698. (in Chinese).
- [15] ANTONOV S N, VAINER A V, PROKLOV V V, *et al.*. Extension of the angular scanning range of the acousto-optic deflector with a two-element phased-array piezoelectric transducer[J]. *Technical Physics*, 2013, 58(9): 1346-1351.
- [16] ANTONOV S N. Acousto-optic deflector of depolarized laser radiation[J]. *Technical Physics*, 2016, 61(1): 134-137.
- [17] ANTONOV S N. Acousto-optic deflector with a high diffraction efficiency and wide angular scanning range[J]. *Acoustical Physics*, 2018, 64(4): 432-436.
- [18] PELED I, KAMINSKY R, KOTLER Z. Acousto-optics bandwidth broadening in a Bragg cell based on arbitrary synthesized signal methods[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(16): 5065-5073.
- [19] 张泽红, 陆川, 何晓亮, 等. 磷化镓声光偏转器[J]. *压电与声光*, 2014, 36(5): 694-697.
ZHANG Z H, LU CH, HE X L, *et al.*. Study on acousto-optic deflector based on gallium phosphide[J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2014, 36(5): 694-697. (in Chinese).
- [20] 张泽红, 何晓亮. 反常大带宽声光偏转器[J]. *压电与声光*, 2016, 38(6): 837-839.
ZHANG Z H, HE X L. Abnormal acousto-optic deflector with large-bandwidth[J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2016, 38(6): 837-839. (in Chinese).
- [21] 夏茜, 陈清华, 张泽红, 等. 高频声光偏转器的抗静电研究[J]. *压电与声光*, 2021, 43(1): 51-53,58.
XIA Q, CHEN Q H, ZHANG Z H, *et al.*. Study on antistatic of high frequency acousto-optic deflector[J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2021, 43(1): 51-53,58. (in Chinese).
- [22] PENG F L, LEE Y H, LUO Z Y, *et al.*. Low voltage blue phase liquid crystal for spatial light modulators[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(21): 5097-5100.
- [23] LI S Q, XU X W, VEETIL R M, *et al.*. Phase-only transmissive spatial light modulator based on tunable dielectric metasurface[J]. *Science*, 2019, 364(6445): 1087-1090.
- [24] 张健, 徐林, 吴丽莹, 等. 液晶光学相控阵可编程光束偏转研究[J]. *光子学报*, 2008, 37(8): 1497-1502.
ZHANG J, XU L, WU L Y, *et al.*. Programmable beam steering based on liquid crystal optical phased array[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(8): 1497-1502. (in Chinese).
- [25] WANG X R, WU L, XIONG C D, *et al.*. Agile laser beam deflection with high steering precision and angular resolution using liquid crystal optical phased array[J]. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2018, 17(1): 26-28.

- [26] SHI L, SHI J R, MCMANAMON P F, *et al.*. Design considerations for high efficiency liquid crystal decentered microlens arrays for steering light[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(3): 409-421.
- [27] KIM J, OH C, ESCUTI M J, *et al.*. Wide-angle nonmechanical beam steering using thin liquid crystal polarization gratings[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7093: 709302.
- [28] KIM J, MISKIEWICZ M N, SERATI S, *et al.*. High efficiency quasi-ternary design for nonmechanical beam-steering utilizing polarization gratings[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7816: 78160G.
- [29] KIM J, MISKIEWICZ M N, SERATI S, *et al.*. Demonstration of large-angle nonmechanical laser beam steering based on LC polymer polarization gratings[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8052: 80520T.
- [30] KIM J, MISKIEWICZ M N, SERATI S, *et al.*. Nonmechanical laser beam steering based on polymer polarization gratings: design optimization and demonstration[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(10): 2068-2077.
- [31] XIANG X, KIM J, ESCUTI M J. Bragg polarization gratings for wide angular bandwidth and high efficiency at steep deflection angles[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 7202.
- [32] 黄帅佳. 聚合物网络液晶器件及其光线偏转应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
HUANG SH J. *The beam steering applications of polymer network liquid crystal devices*[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017. (in Chinese).
- [33] 李松振. 液晶偏振光栅的设计及其光偏转特性研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
LI S ZH. *Design of liquid crystal polarization grating and study of its beam deflection characteristics*[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese).
- [34] 王忠敏. 铌酸锂晶体的发展简况[J]. *人工晶体学报*, 2002, 31(2): 173-175.
WANG ZH M. Study on development of lithium niobate crystal[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2002, 31(2): 173-175. (in Chinese).
- [35] 刘金龙, 李惠章, 施仲坚, 等. 铌酸锂大单晶的生长及其性能[J]. *物理学报*, 1983, 32(4): 473-480.
LIU J L, LI H ZH, SHI ZH J, *et al.*. Growth and properties of large LiNbO₃ crystals[J]. *Acta Physica Sinica*, 1983, 32(4): 473-480. (in Chinese).
- [36] 孔宝国, 解学文. $\phi 150 \sim 190$ mm [10.4] 向铌酸锂大单晶的生长[J]. *上海硅酸盐*, 1989(4): 176-177.
KONG B G, XIE X W. $\phi 150 \sim 190$ mm [10.4] growth of large lithium niobate single crystals[J]. *Shanghai Institute of Ceramics*, 1989(4): 176-177. (in Chinese) (查阅网上资料, 未找到对应英文翻译信息, 请确认).
- [37] BERNAL M P, AMET J, SAFIOUI J, *et al.*. Pyroelectric control of the superprism effect in a lithium niobate photonic crystal in slow light configuration[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(7): 071101.
- [38] LIU Y Q, QI X Y, LU Y, *et al.*. Observation of beam deflection in one-dimensional photonic lattice in LiNbO₃ crystal accompanied with self-focusing and self-defocusing nonlinearities[J]. *Physics Letters A*, 2016, 380(1-2): 322-325.
- [39] CAI L, CHENG H D, YU J H, *et al.*. Lithium niobate optical beam deflectors operating at both electro-optic and thermo-optic modes[J]. *Optics Communications*, 2023, 529: 129093.
- [40] BOSCO A, BOOGERT S T, BOORMAN G E, *et al.*. A large aperture electro-optic deflector[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(21): 211104.
- [41] TOSHIYUKI I, TOSHIKI S. Fabrication of MgO: LiNbO₃ domain inverted structures with short period and application to electro-optic Bragg deflection modulator[C]. *2013 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEOPR)*, IEEE, 2014: 1-2.
- [42] MHAOUECH I, CODA V, MONTEMEZZANI G, *et al.*. Low drive voltage electro-optic Bragg deflector using a periodically poled lithium niobate planar waveguide[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(18): 4174-4177.
- [43] 赵卫岗, 呼新荣, 葛锦蔓, 等. 基于铌酸锂晶体的光束精密指向控制技术(特邀)[J]. *光子学报*, 2025, 54(2): 0254104.
ZHAO W G, HU X R, GE J M, *et al.*. Precise beam pointing control technology based on lithium niobate crystal (invited)[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2025, 54(2): 0254104. (in Chinese).
- [44] WANG Y, ZHOU S X, HE D H, *et al.*. Electro-optic beam deflection based on a lithium niobate waveguide with microstructured serrated electrodes[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(20): 4739-4742.
- [45] TIAN F P, LU H H, SUI ZH, *et al.*. Electro-optic deflection in a lithium niobate quasi-single mode waveguide with microstructured electrodes[J]. *Optics Express*, 2018, 26(23): 30100-30107.
- [46] YAN A M, ZHI Y N, SUN J F, *et al.*. Design and experiment of a large aperture digital beam deflector based on electro-

- optic crystal switch array[J]. *Applied Physics B*, 2012, 107(2): 421-427.
- [47] HAERTLING G H, LAND C E. Hot-pressed (Pb, La)(Zr, Ti)O₃ ferroelectric ceramics for electrooptic applications[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1971, 54(1): 1-11.
- [48] SADA T, INOUE M, UCHINO K. Photostriction in PLZT ceramics[J]. *International Journal of High Technology Ceramics*, 1988, 4(1): 91.
- [49] UTSUNOMIYA T, NAGATA K, OKAZAKI K. Prism-type optical deflector using PLZT ceramics[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1985, 24(S3): 169.
- [50] UTSUNOMIYA T, NAGATA K, OKAZAKI K. Optical deflector using PLZT ceramics[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1985, 24(2): 281-283.
- [51] UTSUNOMIYA T. Optical deflector with tandem electrodes using PLZT ceramics[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1989, 28(S2): 164.
- [52] SONG Q W, WANG X M, BUSSJAGER R, *et al.*. Electro-optic beam-steering device based on a lanthanum-modified lead zirconate titanate ceramic wafer[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(17): 3155-3162.
- [53] GAO M, YE Q, DONG Z R, *et al.*. Beam steering of external cavity diode laser by an intracavity electro-optic ceramic deflector[J]. *Chinese Optics of Letters*, 2011, 9(8): 081406.
- [54] SUN Y G, WEI F, CHEN D J, *et al.*. Design of a mode-hop-free tunable external cavity diode laser with a PLZT electro-optic ceramic deflector[C]. *Proceedings of the International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2011*, 2011: 819231. (查阅网上资料, 未找到出版者信息, 请确认).
- [55] TALBOT P J. Design and simulation of PLZT-based scanning grating lobe optical array generators[J]. *Optics Communications*, 1995, 113(4-6): 378-384.
- [56] THOMAS J A, LASHER M, FAINMAN Y, *et al.*. A PLZT-based dynamic diffractive optical element for high speed, random-access beam steering[J]. *Proceedings of the SPIE - the International Society for Optical Engineering*, 1997, 3131: 124-132.
- [57] YE Q, DONG Z R, QU R H, *et al.*. Experimental investigation of optical beam deflection based on PLZt electro-optic ceramic[J]. *Optics Express*, 2007, 15(25): 16933-16944.
- [58] WANG X P, LIU B, YANG Y G, *et al.*. Anomalous laser deflection phenomenon based on the interaction of electro-optic and graded refractivity effects in Cu-doped KTa_{1-x}Nb_xO₃ crystal[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(5): 051910.
- [59] NAKAMURA K, MIYAZU J, SASAURA M, *et al.*. Wide-angle, low-voltage electro-optic beam deflection based on space-charge-controlled mode of electrical conduction in KTa_{1-x}Nb_xO₃[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(13): 131115.
- [60] CHEN F S, GEUSIC J E, KURTZ S K, *et al.*. Light modulation and beam deflection with potassium tantalate-niobate crystals[J]. *Journal of Applied Physics*, 1966, 37(1): 388-398.
- [61] NAKAMARA K, MIYAZU J, YAGI S. High-resolution KTN optical beam scanner[J]. *NTT Technical Review*, 2009, 7(12): 21-26.
- [62] SAKAMOTO T, TOYODA S, UENO M, *et al.*. High-speed optical beam scanning using KTN crystal[C]. *IEEE CPMT Symposium Japan 2014*, IEEE, 2014: 173-176.
- [63] NAKAMARA K, MIYAZU J, SASAKI Y, *et al.*. Space-charge-controlled electro-optic effect: optical beam deflection by electro-optic effect and space-charge-controlled electrical conduction[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 104(1): 013105.
- [64] CHAO J H, ZHU W B, CHEN CH J, *et al.*. High speed non-mechanical two-dimensional KTN beam deflector enabled by space charge and temperature gradient deflection[J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 15481-15492.
- [65] NI L F, LI X J, ZHAO ZH B, *et al.*. Reversible rectification of microscale ferroelectric junctions employing liquid metal electrodes[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(25): 29885-29893.
- [66] SASAKI Y, TOYODA S, SAKAMOTO T, *et al.*. Electro-optic KTN deflector stabilized with 405-nm light irradiation for wavelength-swept light source[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10100: 101000 H.
- [67] ZHU W B, CHAO J H, CHEN CH J, *et al.*. Photon excitation enabled large aperture space-charge-controlled potassium tantalate niobate (KTN) beam deflector[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(13): 132901.
- [68] CHEN CH J, SHANG A N, LEE Y G, *et al.*. Anomalous bi-directional scanning electro-optic KTN devices with UV-

- assisted electron and hole injections[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(19): 5360-5363.
- [69] SHANG A N, LIU R J, LEE Y G, *et al.*. Electro-optic fs pulsed laser deflection in KTN crystals using UV illumination[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(4): 1040-1043.
- [70] SAKAMOTO T, IMAI T, SASAURA M, *et al.*. In-plane distribution of huge local permittivity of $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ estimated from local phase transition temperatures and spatially averaged permittivity[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2024, 95(7): 073712.
- [71] ZHU W B, CHAO J H, CHEN CH J, *et al.*. Three order increase in scanning speed of space charge-controlled KTN deflector by eliminating electric field induced phase transition in nanodisordered KTN[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 33143.
- [72] CHANG Y C, WANG CH, YIN S ZH, *et al.*. Kovacs effect enhanced broadband large field of view electro-optic modulators in nanodisordered KTN crystals[J]. *Optics Express*, 2013, 21(15): 17760-17768.
- [73] JIN L J, LIU B, LIU N SH, *et al.*. Charged domain walls enhanced photoelectric response of KTN crystals under UV irradiation[J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2025, 7(17): 8227-8235.
- [74] ZHANG J W, DU X P, ZHAO J G, *et al.*. The novel mechanism for field-enhanced effect of the dielectric response in relaxor KTN crystal[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2022, 54(11): 727.
- [75] ZHANG J W, DU X P, ZHAO J G, *et al.*. Discrete electro-optic effect induced by multiscale nanoresonators[J]. *Optical Materials*, 2022, 127: 112271.
- [76] XING B H, WANG Y, HU CH P, *et al.*. Polarization- and stress-related lattice dynamics in solid-solution perovskite ferroelectrics[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2025, 211: 244-253.
- [77] MIYAZU J, IMAI T, TOYODA S, *et al.*. New beam scanning model for high-speed operation using $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ crystals[J]. *Applied Physics Express*, 2011, 4(11): 111501.
- [78] ITOH T, SASAURA M, TOYODA S, *et al.*. High-frequency response of electro-optic single crystal $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ in paraelectric phase[C]. *Proceedings of the Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science and Photonic Applications Systems Technologies*, Technical Digest (CD), 2005: JTuC36.
- [79] SHANG A N, LIU R J, LEE Y G, *et al.*. Higher speed, wider angle linear electro-optic deflection via domain engineered KTN crystals[J]. *Optical Materials Express*, 2023, 13(4): 903-915.
- [80] IMAI T, UENO M, SASAKI Y, *et al.*. Analyses of optical rays in KTN optical beam deflectors for device design[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(25): 7277-7285.
- [81] SASAKI Y, OKABE Y, UENO M, *et al.*. Resolution enhancement of $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ electro-optic deflector by optical beam shaping[J]. *Applied Physics Express*, 2013, 6(10): 102201.
- [82] DELRE E, SPINOZZI E, AGRANAT A J, *et al.*. Scale-free optics and diffractionless waves in nanodisordered ferroelectrics[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(1): 39-42.

作者简介:



李富豪（1999—），男，山东新泰人，博士研究生，2021年就读于航天工程大学，主要从事光电信息处理等方面的研究。E-mail: RichLee@hgd.edu.cn



张建伟（1993—），男，河北衡水人，博士，助理研究员，2018年毕业于航天工程大学获得硕士学位，2022年毕业于航天工程大学获得博士学位，主要从事空间态势感知、目标光学测量方面的研究。E-mail: 1240688300@qq.com