

新型电光材料调制性能研究进展

吕潇磊 赵继广 杜小平 宋一铄 张朋 张建伟

Research progress on the modulation properties of new electro-optic materials

LÜ Xiao-lei, ZHAO Ji-guang, DU Xiao-ping, SONG Yi-shuo, ZHANG Peng, ZHANG Jian-wei

引用本文:

吕潇磊, 赵继广, 杜小平, 宋一铄, 张朋, 张建伟. 新型电光材料调制性能研究进展[J]. *中国光学*, 2021, 14(3): 503–515. doi: 10.37188/CO.2020–0039

LÜ Xiao-lei, ZHAO Ji-guang, DU Xiao-ping, SONG Yi-shuo, ZHANG Peng, ZHANG Jian-wei. Research progress on the modulation properties of new electro-optic materials[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(3): 503-515. doi: 10.37188/CO.2020-0039

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2020–0039>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

钙钛矿材料在激光领域的研究进展

Research progress of perovskite materials in the field of lasers

中国光学. 2019, 12(5): 993 <https://doi.org/10.3788/CO.20191205.0993>

无扫描激光三维成像雷达研究进展及趋势分析

Research progress and trend analysis of non-scanning laser 3D imaging radar

中国光学. 2018, 11(5): 711 <https://doi.org/10.3788/CO.20181105.0711>

卤化物钙钛矿光伏材料的优化设计研究进展

Recent research progress on optimal design of halide perovskite photovoltaic materials

中国光学. 2019, 12(5): 964 <https://doi.org/10.3788/CO.20191205.0964>

基于改进的局部表面凸性算法三维点云分割

Improved local convexity algorithm of segmentation for 3D point cloud

中国光学. 2017, 10(3): 348 <https://doi.org/10.3788/CO.20171003.0348>

蒸汽辅助溶液过程制备钙钛矿材料及钙钛矿太阳能电池

Preparation of perovskite materials and perovskite solar cells by vapor-assisted solution process

中国光学. 2017, 10(5): 568 <https://doi.org/10.3788/CO.20171005.0568>

基于第一性原理的钙钛矿材料空位缺陷研究

Investigation of self-doping in perovskites with vacancy defects based on first principles

中国光学. 2019, 12(5): 1048 <https://doi.org/10.3788/CO.20191205.1048>

文章编号 2095-1531(2021)03-0503-13

新型电光材料调制性能研究进展

吕潇磊, 赵继广*, 杜小平, 宋一铄, 张朋, 张建伟
(航天工程大学电子与光学工程系, 北京 101416)

摘要:基于电光晶体的偏振调制技术在激光三维成像领域起着越来越重要的作用。受限于铌酸锂(LN)材料的低视场和高半波电压,采用传统电光调制技术难以进一步提升三维成像性能。随着钙钛矿结构电光材料制备工艺的日趋成熟,基于新型材料的电光调制技术将成为突破激光三维成像探测精度的最佳手段,铌镁酸铅-钛酸铅(PMNT)、锆钛酸镧铅(PLZT)和钽铌酸钾(KTN)3种典型材料具有优良的电光性能和介电性质;能够突破视场和半波电压的限制,但应用到电光调制领域时存在PMNT调制带宽较低、PLZT透过性能较差、KTN实际应用带宽较低等难题。未来的研究将着眼于将该调制技术的实用性,一方面通过掺杂改性等手段提升电光调制性能,另一方面通过建立性能表征模型优化系统的信噪比。

关键词:激光三维成像;钙钛矿结构材料;偏振调制

中图分类号:TN384 文献标志码:A doi: 10.37188/CO.2020-0039

Research progress on the modulation properties of new electro-optic materials

LÜ Xiao-lei, ZHAO Ji-guang*, DU Xiao-ping, SONG Yi-shuo, ZHANG Peng, ZHANG Jian-wei
(Department of Electronic Optical Engineering, Space Engineering University, Beijing 101416, China)
* Corresponding author, E-mail: zhaoyy8600@163.com

Abstract: Polarization modulation technology based on electro-optic crystals is playing an increasingly important role in the field of three-dimensional laser imaging. Due to the low field of view and high half-wave voltage of LiNiO₃ (LN) materials, it is difficult for traditional electro-optic modulation technology to further improve 3D imaging performance. As the preparation technology of perovskite-structured electro-optical materials becomes more mature, electro-optic modulation technology based on new materials will become an excellent means to create a breakthrough in the detection accuracy of laser 3D imaging. PMNT, PLZT and KTa_xNb_{1-x}O₃ (KTN) three typical materials have excellent electro-optical properties and dielectric properties that might surpass the field of view and half-wave voltage limitation. However, their applications in electro-optic modulation has lead to difficulties such as a low modulation bandwidth for PMNT, poor transmission performance for PLZT, and low practical application bandwidth for KTN. Future research will focus on the practicality of this modulation technology. The electro-optic modulation performance can be improved by doping and the signal-to-noise ratio of the system can be optimized by establishing performance characterization models.

Key words: laser 3D imaging; perovskite structural material; polarization modulation

收稿日期:2020-03-10; 修订日期:2020-04-14

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 61805284)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61805284)

1 引言

随着空间在轨任务的日益密集,激光三维成像技术在国内外得到了迅速发展。美国国防高级研究计划局(DARPA)、美国国家航空航天局(NASA)、欧洲航天局(ESA)、德国宇航中心(DLR)等多家单位利用激光三维成像技术圆满完成了非合作目标的交会对接任务^[1-6]。相较于扫描激光雷达,无扫描激光雷达省略了缓慢的机械扫描过程,利用单个脉冲即可获取目标区域的一整幅三维图像,具有成像精度高、探测距离远、成像速度快、可靠性高、抗干扰能力强等优势。国外现有的无扫描激光雷达是基于高分辨率 APD 面阵完成集混频与光电转换于一体的高性能光电成像,在 Restore-L、Phoenix 等非合作目标交会对接任务中实现了预期的科学目的,但受制于高速读出电路水平,探测性能难以进一步突破^[7]。相比而言,国内半导体器件水平相对落后,高分辨率 APD 面阵还处于研制阶段,与国外仍然有不小差距。

近年来,随着电光晶体的深入研究,特拉维夫公司的 Paul Banks、中国科学院光电技术研究所的刘博研究员和陈臻博士、航天工程大学的张朋博士、韩国先进科学技术公司的 Sungeun Jo 等单位 and 学者均探索研究了基于电光晶体偏振调制的激光三维成像和激光测距技术^[8-12],面向汽车自动驾驶、空间目标监视等领域开展了理论、实验及应用研究,实现了探测精度和探测距离进一步提高,但应用到激光三维成像领域衍生出视场角小、半波电压高的瓶颈问题,为此本文综述高性能钙钛

矿结构电光材料的研究进展,为解决相关问题提供参考。

2 适用于离轴自由光通信的新型电光材料研究

视场角的大小决定了成像系统的视野范围,是汽车自动驾驶、光学主动遥感、空间目标监视等应用中重点关注的成像性能参数^[13-15]。

现阶段基于偏振调制的激光三维成像系统,如图 1(彩图见期刊电子版)所示,偏振调制模块一般采用基于铌酸锂晶体(LN)和磷酸二氧钾(DKDP)的 Pockels 盒,以 LN 为例,它属于 $3m$ 晶体点群,作为电光原件应用时,为了避免自然双折射的影响,通常在 x_1ox_2 平面内外加电场,光沿 x_3 方向传播,此时 LN 晶体由单轴晶体变成了双轴晶体,具有线性电光性质。但 $3m$ 点群晶体在空间方向变化的过程中,表现出很明显的各向异性的特点^[16],导致 LN 调制器的光束入射角非常小,当光束偏离光轴入射时,晶体透过率明显下降,航天工程大学的卜禹铭研究了入射角度对 LN 电光调制器的影响规律。为确保电光调制器输出的中频信号幅度值满足任务需求同时输出具有良好的稳定性,晶体外光束入射角应该严格控制在 1° 范围内^[17]。在激光三维成像中,目标的不确定性会造成返回光束的不完全准直,同时较小的视场也影响接收光束的质量,使得探测性能减弱。因此,为了进一步提高激光三维成像系统的探测性能,解决探测视场小、半波电压高的技术难题,亟待探索应用于偏振调制的新型电光材料。

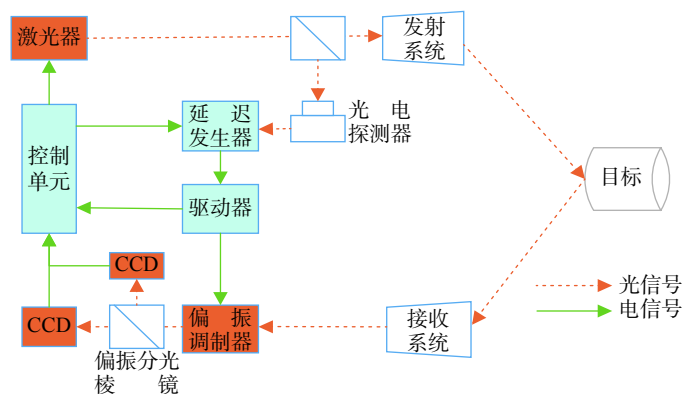


图 1 偏振调制激光三维成像系统的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 3D imaging system for polarization modulation laser

不同于 $3m$ 晶体点群材料, 钙钛矿结构材料的分子结构可以表示为 ABO_3 , 具有立方相对称结构, 各向同性。由于此类晶体对方向不敏感、不加载电压时不存在自然双折射现象, 理论上具有远大于 $3m$ 晶体点群材料的视场角。

宾夕法尼亚大学的 Yun-Ching Chang 和美国陆军实验室(ARL)的 Robert C.Hoffman 探索研究了基于钙钛矿钽铌酸钾(KTN)晶体的大视场电光调制器^[18]。他们通过将电光调制器固定在精准的旋转台上, 测量了 $\pm 30^\circ$ 范围入射角在通态(即具有半波电压的传输状态)和关态(即没有施加调制电压的闭塞状态)下的透过率, 研究结果如图2所示, 纵坐标消光比表示透射光最大功率与最小功率的比值。可见, 在入射角为 5° 时, LN 电光调制器的消光比已经衰减到零, 这意味着后端无法接收到调制信号, 不同于此, KTN 电光调制器消光比不随入射角的增大而迅速减小, 能够实现大角度离轴自由光调制, 从而有望实现更大的成像视场^[19]。

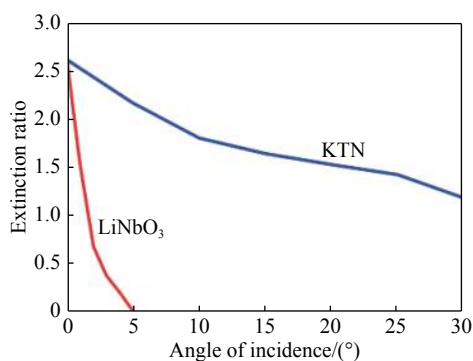


图2 晶体视场测量结果

Fig. 2 The viewing field measurement results of the crystals

综上所述, 利用钙钛矿结构材料取代传统 LN 材料是解决激光三维成像技术中电光调制视场难题的有效方法。

3 典型钙钛矿结构电光材料研究

在激光三维成像系统中, 信噪比(SNR)是衡量三维成像性能的重要指标, 定义为输出功率与噪声功率的比值^[20-22], 此处的输出功率即为电光调制器的透射光功率。

透射光功率表示为^[23]

$$I_T = \frac{1}{2} I_0 (1 - \cos \Phi) \quad (1)$$

式中 I_0 是入射光功率, Φ 指调制器的相位延迟。 Φ 可以表示为^[24]

$$\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^L (n_y - n_z) dx = \frac{\pi n_0^3 (g_{11} - g_{12}) \varepsilon^2 L V^2}{\lambda d^2} = \pi \left(\frac{V}{V_\pi} \right)^2 \quad (2)$$

式中 λ 是真空中光的波长, L 指调制光程, n_y 和 n_z 代表 y 和 z 方向的折射率, n_0 为未加电场时的折射率, V 为施加在晶体两端的电压。 V_π 是调制器的半波电压, 定义为产生 π 相位延迟所需的调制电压, 表示为

$$V_\pi = \sqrt{\frac{\lambda d^2}{n_0^3 (g_{11} - g_{12}) \varepsilon^2 L}} = \sqrt{\frac{\lambda d^2}{n_0^3 (s_{11} - s_{12}) L}} \quad (3)$$

式中 s_{11} 、 s_{12} 指电光材料的二次电光系数, ε 指电光材料的相对介电常数, g_{11} 、 g_{12} 受材料组分影响。

通过式(1)和式(2)可得, 在半波电压较低的情况下采用相同功率的调制信号就能够实现较高的相位延迟, 进而提高系统的输出光功率和信噪比。理论上, 在输出噪声一定的情况下, 调制器的半波电压从 200 V 降低到 50 V, 在 20 V 调制信号下相位延迟提高了 16 倍, 透射光功率和信噪比提高了 257 倍。

通过式(3)可知, 在系统结构一定的情况下, 半波电压由二次电光系数决定, 受介电常数影响。本文从电光调制应用出发, 讨论典型钙钛矿结构电光材料的二次电光性能和介电性质。

3.1 PMNT 材料

2002 年, 中国科学院上海硅酸盐研究所罗豪魁等人^[25]在国际上首次采用改进的 Bridgman 方法成功生长出大尺寸高质量的 PMNT 单晶, 如图3所示。2010 年, 该研究所 Lin Y 等人^[26]在 PMN-8PT 铁电单晶中观察到巨大的克尔效应, 采用紫外-可见-近红外光谱仪测得二次电光系数可达 $8.19 \times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{V}^2$ 。2011 年, 该研究所与俄罗斯科学院技术研究所合作^[27]研究了透明铁电陶瓷 PMN-25PT 的介电、光学和电光特性。结果显示, 不同 La 浓度(2%、3% 和 4%)的 PMN-25PT 都经历了扩散相变, 发现室温下 La 浓度为 3% 的 PMNT 陶瓷可以观察到 $4 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{V}^2$ 的电光效应。2012 年, 他们再度合作采用两阶段烧结法制备了 PMN-xPZT 铁电陶瓷, 发现在接近相变边

界($x = 23\%$ 、 33%),一阶相变转变为大畴铁电相,而远离边界的($x = 10\%$ 、 16%)则保持弛豫立方铁电相,其中 $x = 33\%$ 的陶瓷在高温($T > 340\text{ K}$)下具有 $1.8 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{V}^2$ 的二次电光系数^[28]。

近年来,PMNT 薄膜的制备和应用得到了快速发展。2013 年,上海师范大学的 Aiyun Liu 等人^[29]采用溶胶凝胶法制备了 0.7PMN-0.3PT 薄膜,其介电常数可达 935。2015 年,该校李国柱等人^[30]采用脉冲激光沉积法制备了相同组分的铁电薄膜,通过优化制备工艺,薄膜的相对介电常数达 2800。2017 年,西班牙马德里材料研究所的 H. El Hosiny Ali 等人^[31]为了完善 0.65PMN-0.35PT 薄膜在准同型相界附近的压电缺陷,设计了 PT-PMNT-PT 的多层薄膜,在达到 $67 \text{ pm}/\text{V}$ 高压电系数的同时,介电常数保持在 1000 附近。2018 年,西安工业大学的张德强等人^[32]采用溶胶凝胶法

制备了 $(1-x)\text{PMN}-x\text{PT}$ (x 为 0.25 和 0.4) 薄膜,在 1 kHz 频率下其相对介电常数达到了 1534 和 1800,同时通过 La 和 Pr 两类稀土元素的掺杂使 0.7PMN-0.3PT 薄膜的介电常数由原有的 1135 分别提高到了 2025 和 2398。由此可见,不同类型和组分的 PMNT 材料具有不同性能,如表 1 所示。



图 3 Bridgman 方法生长的 PMNT 单晶^[25]

Fig. 3 PMNT single crystal grown with the Bridgman method

表 1 室温下 632.5 nm 波长测得 PMNT 材料的二次电光系数和 1 kHz 电场下的介电常数

Tab. 1 The secondary electro-optic coefficient of the PMNT material measured at a wavelength of 632.5 nm at room temperature and the dielectric constant under an electric field of 1 kHz

材料	QEO系数/ $(10^{-16} \text{ m}^2/\text{V}^2)$	文献	材料	介电常数	文献
单晶PMN-8PT	8.19	[26]	薄膜PMN-30PT	2800	[30]
陶瓷PMN-25PT+4%La	8	[27]	薄膜PMN-40PT	1800	[32]
陶瓷PMN-25PT+3%La	40	[27]	薄膜PMN-30PT+La	2025	[32]
陶瓷PMN-25PT+2%La ($T = 330 \text{ K}$)	10	[27]	薄膜PMN-30PT+Pr	2398	[32]
陶瓷PMN-33PZT ($T = 340 \text{ K}$)	18	[28]			
陶瓷PMN-23PZT	6	[28]			
陶瓷PMN-10PZT ($T = 280 \text{ K}$)	2.5	[28]			

3.2 PLZT 陶瓷

1981 年,上海硅酸盐研究所孙荣明等人^[33]利用通氧热压原理制得了大尺寸 PLZT 透明陶瓷,陶瓷样品如图 4 所示。并测得 La/Ti/Zr 为 8.8/65/35 和 9.4/65/35 的 PLZT 陶瓷的二次电光系数分别为 $2.8 \times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{V}^2$ 和 $1.48 \times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{V}^2$ 。2009 年,该研究所的何夕云^[34]利用 Dy 掺杂提高了 PLZT (12/40/60)透明陶瓷的光学透过率,并使其二次电光系数达到 $5.59 \times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{V}^2$ 。2016 年,圣彼得堡理工大学的 A. V. Kniazkov^[35]利用反射光调制法对 PLZT 陶瓷样品进行测量,测得 La/Ti/Zr 为 8/65/35、9/65/35 和 10/65/35 陶瓷样品的二次电光系数均达到 $2.5 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{V}^2$ 、 $3.7 \times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{V}^2$ 、

$1.3 \times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{V}^2$ 。



图 4 锆钛酸镧铅 (PLZT) 光电陶瓷材料^[36]

Fig. 4 PLZT optoelectronic ceramic material

2016年泰国清迈大学 Apichart Limpichaipanit 等人^[37]研究了固态混合氧化法制备 Li 和 Bi 共掺杂的 PLZT 陶瓷,发现在 1200 °C 下摩尔分数为 0.15% Li 和 Bi 共掺杂 PLZT 陶瓷具有最大 7819 的介电常数。同年,他们与泰国皇家理工学院的 Siripong Somwan^[38]合作制备了 Bi₂O₃ 和 CuO 共掺杂的 PLZT 陶瓷,在 1200 °C 下摩尔分数为 0.25% 的 Bi₂O₃和 CuO 共掺杂 PLZT 陶瓷具有最大 11290 的介电常数。2018年,该校 Narit Funsueb 等人^[39]制成了 9/70/30、9/65/35 和 9/60/40 的 PLZT 陶瓷,发现 PLZT9/65/35 在 1275 °C 下烧结 4 h 介电常数可达 10539。2018年,印度 Raja Ramanna 先进技术中心的 Rachna Selvamani 等人^[40]研究发现质量分数为 0.08% Cr₂O₃ 掺杂的 PLZT 陶瓷在 1 kHz 频率下介电常数最大可达 13985。近年来,国内也积极开展 PLZT 材料的相关研究。2017年,中国地质大学的 Can Huang 等人^[41]采用部分

共沉淀法和微波烧结法制备了 PLZT 9/65/35 陶瓷,其介电常数可达 3895。2017年,大连理工大学的许文才^[42]利用溶胶凝胶法制备了 La 掺杂的 PLZT 薄膜,发现 2%La 掺杂的薄膜介电常数可达 1502.59。2018年,哈尔滨工业大学的郭有文^[43]选择了 Dy³⁺、Nd⁵⁺、Pr³⁺稀土离子进行 A 位掺杂, W⁶⁺进行 B 位掺杂,发现稀土离子掺杂可以有效提高介电性能,分别使介电常数提高了 15%、43%、24% 和 51%。2018年,华南理工大学的刘宇锋^[44]制备了掺 Sb₂O₅ 的 (Pb_{93.5}La_{6.5})(Zr₅₉Ti₄₁)_{98.4}O₃ 压电陶瓷,其介电常数达到了 6076。2018年,上海硅酸盐研究所的 Bin Zhu 等人^[45]研究发现掺 Al (x=1.50 mol%)PLZT 陶瓷在 1 kHz 频率下介电常数高达 16000。

迄今为止,多国学者已对 PLZT 材料进行了深入研究,其二次电光性能和介电性能见表 2。

表 2 室温下在 632.5 nm 波长测得 PLZT 材料的二次电光系数和 1 kHz 电场下的介电常数

Tab. 2 The secondary electro-optic coefficient of the PLZT material measured at a wavelength of 632.5 nm at room temperature and the dielectric constant under an electric field of 1 kHz

PLZT材料La/Ti/Zr	QEO系数10 ⁻¹⁶ m ² /V ²	文献	PLZT材料La/Ti/Zr	介电常数	文献
8/65/35 PLZT($\lambda=532$ nm)	25	[35]	9/65/35PLZT+0.15 mol% Li+Bi($T=348$ K)	7819	[37]
8.8/65/35 PLZT($T=258$ K)	2.8	[33]	9/65/35PLZT+0.25 mol% Bi ₂ O ₃ +CuO($T=373$ K)	11290	[38]
9/65/35 PLZT($\lambda=532$ nm)	3.7	[35]	9/65/35PLZT($T=373$ K)	10539	[39]
9.4/65/35 PLZT($T=244$ K)	1.48	[33]	7/65/35PLZT+0.08 wt% Cr ₂ O ₃ ($T=427$ K)	13985	[40]
10/65/35PLZT($\lambda=532$ nm)	1.3	[35]	薄膜PLZT+2%La($f=100$ Hz)	1502.59	[42]
11/40/60PLZT+0.1 mol%Dy($T=385$ K)	5.59	[34]	PLZT+1.50 mol%Al($T=385$ K)	16000	[45]

3.3 KTN 晶体

90年代,我国以山东大学为代表的单位开始采用熔盐法、提拉法等不同晶体工艺生长大尺寸高质量 KTN 单晶,但由于存在溶剂挥发腐蚀材料等问题,难以重复生长,设备要求苛刻。2003年,日本 NTT 公司^[46]成功生长出 4 cm×4 cm×3 cm 的大尺寸 KTN 晶体,相较于 LN 晶体,其电光系数提高了 20 倍,而半波电压仅为 1/10。2007年,NTT 公司^[47]生长的 KTN 晶体的电光系数已经达到了 2.24×10^{-14} m²/V²。2009年,山东省科学院的王旭平^[48]提出了大坩埚生长小晶体的工艺方法,改善了晶体质量,生长出 3 cm×3 cm×5 cm 大尺寸以及 Nb 含量为 0~0.5 的 KTN 晶体,其生长的 KTa_{0.75}Nb_{0.25}O₃ 和 KTa_{0.63}Nb_{0.37}O₃ 的电光系数

分别达到 6.501×10^{-15} m²/V² 和 8.6×10^{-15} m²/V²,如今山东省科学院已具备生长各组分大尺寸高质量 KTN 的能力。2013年,宾夕法尼亚大学的 Yun-Ching Chang^[49]通过对 KTa_{0.7}Nb_{0.3}O₃ 晶体进行冷却(冷却速率为 0.45 °C/s),得到了 6.94×10^{-14} m²/V² 的二次电光系数,这是迄今为止报道的最大的二次电光系数,如图 5^[50]所示。

KTN 巨大的二次电光效应被认为是由于铁电-顺电相变附近的极性纳米区域(PNRs)引起的,因此,专家学者进行了深入研究,旨在攻克 PNRs 影响机制的理论盲区。2011年, E. DelRe 等人^[51]验证了过冷掺杂铜的 KTN:Li 中可以实现无标度传播,既消除了光波传输过程中的衍射又实现了波长无关,2012年, Eugenio DelRe^[52]和

Jacopo Parravicini^[53]等人在此基础上通过反 Kovacs 效应来编程超冷历史^[54]和超冷速度^[55]实现了样品无关的无标度传播。2018 年, F. Di Mei^[56]通过实验证明 $K_{0.997}Ta_{0.64}Nb_{0.36}Li_{0.003}$ 在可见光谱的折射率大于 26, 突破了已报道的最高宽频折射率 5。他们在利用 KTN 晶体巨大电光效应的同时消除其引起的衍射, 实现高精度和高折射率的无标度光束传播, 为纳米级高精度激光成像提供了机会。

面向宽带光通信的应用需求, 哈尔滨工业大学进行了深入研究。2015 年田浩^[57]、王磊^[58]采用顶部籽晶助溶剂法(TSSG)生长了高光学质量的 $KTa_{0.61}Nb_{0.39}O_3$ 单晶, 发现其电光性能随着频率的升高而降低, 在 500 Hz 下电光系数可达 $5.96 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{V}^2$ 。为驱动 KTN 晶体在居里温度附近的相关无序现象以增强电光效应, 2016 年, 谭鹏等^[59]提出特定温度场下 PNR 重定向机制, 并使用温度梯度来操纵 PNRs, 提高电光性能。2016 年, 姚博^[60]利用塞拿蒙补偿法提出了顺电相 KTN 晶体中 PNRs 非随机取向引发各向异性分布机制。2017 年, 毛晨阳^[61]利用单光束补偿法研究了交直流电

场下晶体铁电畴取向模式的影响机制。2017 年, 谭鹏^[62]研究了不同交直流电场下纳米无序 KTN 晶体的二次和线性电光效应, 为研究 PNRs 响应机制提供重要参考, 并于 2018 年^[63]通过控制相关局域偶极子的平均尺寸和铁电畴的均匀取向来探索入射光调制方法, 优化材料的电光性能。



图 5 钽铌酸钾 ($KTa_{1-x}Nb_xO_3$, KTN) 晶体材料^[50]

Fig. 5 KTN crystal material

国内相关机构研制的 KTN 晶体二次电光性能对比如表 3 所示。

表 3 KTN 材料二次电光系数对比分析

Tab. 3 Comparative analysis of quadratic electro-optic coefficient of KTN materials

单位	KTN(Ta/Nb)	QEO系数/($10^{-16} \text{ m}^2/\text{V}^2$)	测量条件	备注
NTT公司	—	224	$T=314 \text{ K } \lambda=685 \text{ nm}$	
山东科学院	0.75/0.25	65	$\lambda=633 \text{ nm}$	调研已经达到 10^{-14} 量级
	0.63/0.37	86	室温 $\lambda=633 \text{ nm}$	
美国宾夕法尼亚大学	0.7/0.3	20	$T=299 \text{ K } \lambda=532 \text{ nm}$	Kovacs前
		694	0.45 K/s降温	Kovacs后
哈尔滨工业大学	0.61/0.39	59.6	$T=296 \text{ K } \lambda=632.8 \text{ nm}$	

3.4 钙钛矿结构电光材料的可行性分析

表 4 对比了上述钙钛矿材料的电光性能, 并

以 $1.2 \text{ mm} \times 1.2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 晶体尺寸对 3 种材料进行对比分析。

表 4 PMNT、PLZT 和 KTN 电光调制可行性分析 (附 LN 作为比较)

Tab. 4 Feasibility analysis of electro-optic modulation by PMNT, PLZT and KTN (with LN for comparison)

材料名称	有效电光系数/($\text{m}^2 \cdot \text{V}^{-3}$)	半波电压/V	调制电压/V	视场	产品成熟度
LN	6.8×10^{-12}	1 900	~600	$<5^\circ$	非常成熟
PMNT	$\sim 4 \times 10^{-15}$	~60	~20		较成熟(硅酸盐所)
PLZT	$\sim 5 \times 10^{-16}$	~160	~50		较成熟(硅酸盐所)
KTN	0.2×10^{-15}	~260	~80		较成熟(宾夕法尼亚)
	$4 \sim 9 \times 10^{-15}$	~50	~16	~ 30°	较成熟(山东科学院)
	2.24×10^{-14}	~24	~8		较成熟(NTT公司)

通过对比表4中数据可知:

(1) 钙钛矿材料可实现低电压调制

KTN 和 PMNT 的电光效应相较 LN 提高了几十至上百倍, PLZT 相较 LN 提高了 10 倍, 使得半波电压和调制电压分别降低为 LN 的几十分之一和十分之一, 因此可以满足三维成像系统的低电压调制。

(2) 钙钛矿材料具有更大的接收视场角

新型电光材料是立方相对称结构, 具有各向同性, 当不加载电压时不存在双折射现象, 因此具有远大于 LN 的接收视场角, 同时, ARL 已经通过实验验证了 KTN 电光调制器的视场角可以达到 $\pm 30^\circ$ 。

(3) 国内具有较为成熟的制备工艺

经过数十年的发展, 山东省科学院具备较为成熟的 KTN 制备工艺, 上海硅酸盐研究所具备较为成熟的 PMNT 和 PLZT 制备工艺, 大尺寸、光学均匀的电光材料为开展电光调制性能研究工作提供了基本保障, 为高性能电光调制器的实用化奠定了基础。

总之, 以 KTN 晶体、PMNT 材料、PLZT 陶瓷为代表的新型材料可以满足低电压调制和大视场的性能要求, 可以突破 LN 材料在电光调制中存在的视场角过小、半波电压过高的局限性, 解决基于偏振调制的三维成像技术现实应用的瓶颈问题, 但电光调制性能还有待进一步分析。

4 钙钛矿结构电光材料的适用性分析

4.1 PMNT 材料的电光调制分析

2014 年, 上海硅酸盐研究所张学娇等人面向高功率激光系统^[64-65], 研究了基于 PMNT 材料的新型偏振无关电光调制器, 如图 6 所示。利用琼斯矩阵推导出了各元件的输出状态, 建立了式(4)的理论模型:

$$I_{\text{out}} \propto \left| \left[\frac{E_x}{E_y} \right]_{\text{cw}} + \left[\frac{E_x}{E_y} \right]_{\text{ccw}} \right|^2 \propto \cos^2 \left(\frac{\varphi}{2} \right) \quad (4)$$

无论线偏光还是椭圆偏振光对调制器均无影响, 达到了偏振无关空间调制器的特性。但由于 PMNT 畴壁运动, 造成响应速度慢(仅为 180 ns)、光散射严重, 将其用作电光调制器只能达到 2 MHz

的调制带宽, 因此该调制器难以用于高速电光调制, 不满足纳米级激光三维成像的应用需求。

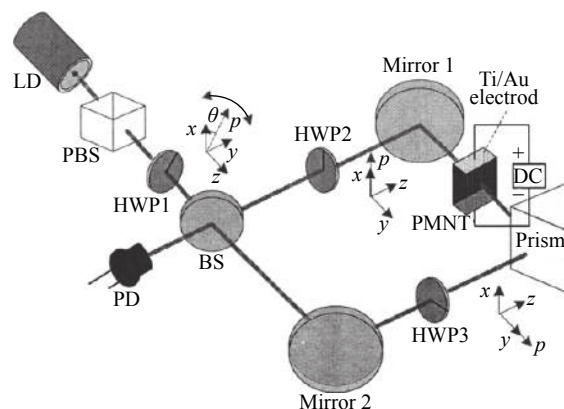


图6 一种偏振无关的电光调制器

Fig. 6 A polarization-independent electro-optic modulator

4.2 PLZT 陶瓷的电光调制分析

早在 1984 年暨南大学的宋益澄便与上海硅酸盐研究所的何晓明设计了 PLZT 电光调制器, 该调制器具有结构简单、使用方便、性能稳定的优势, 但其透过率较低(30% 以下)且半波电压较部分电光晶体高, 故并未获得广泛应用^[66]。之后, 上海硅酸盐研究所一直致力于 PLZT 电光材料的改进研究。2009 年, 何夕云团队针对 PLZT 电光调制器存在的工作电压偏高、场致滞后明显等问题^[34], 研究了 Dy 元素对 PLZT 陶瓷的掺杂改性, 发现较小量的 Dy 掺杂可以使 PLZT 材料发生晶格畸变, 晶胞趋向松弛, 极化能力增强, 使材料光学透过率和折射率明显提高, 二次电光系数也达到了 $5.59 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{V}^2$, 改善了器件的应用属性。

但是 PLZT 陶瓷存在透过率较低的缺陷, 这会造成在电光调制领域应用时, 光通过以 PLZT 陶瓷为主体的调制器后在接收端无法获取足够的调制信号, 严重影响电光调制水平。为了进一步提高 PLZT 陶瓷的透过率, 2019 年, 上海硅酸盐研究所的何夕云团队^[45]研究发现少量 Al 掺杂会促进 PLZT(8.0/69/31)陶瓷的晶粒生长。同时何夕云团队开展了如图 7 所示的透射光谱实验, 虽然比较而言, 摩尔分数为 0.5% 的 Al 掺杂提高了材料透过率, 但未能获得预期理论结果, 最大透过率仍未有明显突破。

2018 年, 哈尔滨工业大学的王文团队^[43]尝试采用 4 种稀土离子掺杂以提高 PLZT 材料性能, 其中 Nd^{3+} 掺杂摩尔分数为 3%, PLZT 陶瓷的可见

光透射率最大,如图 8(彩图见期刊电子版)所示可以达到 56.4%~65.3%。

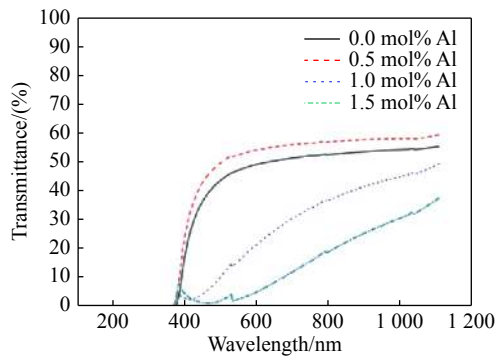


图 7 不同 Al 掺杂量的 PLZT 材料透过率与波长相对关系
Fig. 7 Relationship between the transmittance and wavelength of PLZT materials with different Al dopings

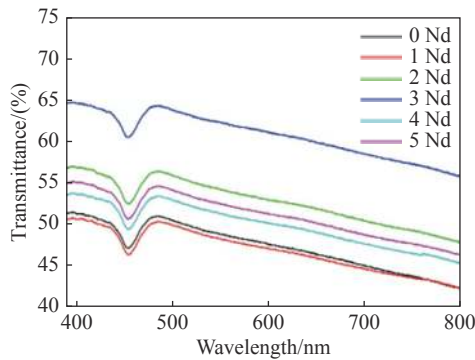


图 8 不同 Nd 掺杂量的 PLZT 材料透过率与波长相对关系
Fig. 8 Relationship between the transmittance and wavelength of PLZT materials with different Nd dopings

总之,国内以上海硅酸盐研究所为代表的研究单位对 PLZT 电光调制器进行了深入研究,通过掺杂手段提高了材料的二次电光性能、降低了半波电压、增加了透过率,有助于促进 PLZT 陶瓷在电光调制器方面的应用,但由于透过率难以突破 65%,PLZT 材料不适用于高速电光调制。

4.3 KTN 晶体的电光调制分析

1966 年,贝尔实验室的 F.S.CHEN 首次提出基于 KTN 晶体的电光调制器,见图 9(a)。通过 200 MHz 高频响应实验,验证了该电光调制器具有大带宽特性^[67]。在介电分析的基础上,通过建立如图 9(b)所示的等效电路,提出了 KTN 电光调制器的带宽由 RC 电路的响应时间决定,而不受晶体本身的限制。通过设计系统结构,作者提

出 KTN 电光调制器至少具有 300 MHz 的调制带宽,但由于光学性质均匀的高质量单晶的生长技术一直没有突破,KTN 电光调制器的发展长时间处于停滞阶段。

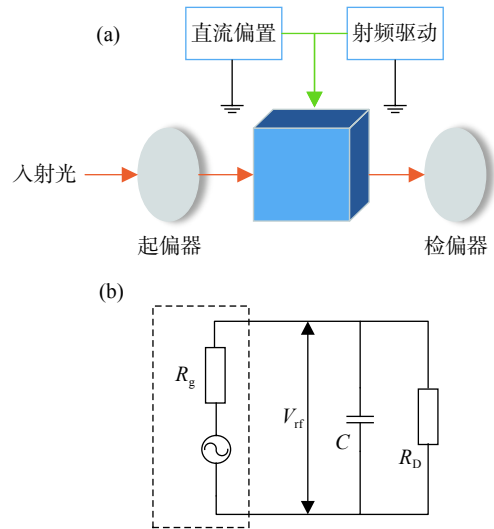


图 9 KTN 电光调制器原理示意图(a)及等效电路图(b)
Fig. 9 (a) Schematic of KTN electro-optic modulator and (b) equivalent circuit diagram

2005 年,NTT 公司的 Toshihiro Itoh 研究了顺电相 KTN 单晶的高频响应,采用射频阻抗法测量了复介电常数与频率的对应关系,结果显示,KTN 电光调制器在 400 MHz 高频下仍然有 300 pm/V 以上的电光系数,可以满足宽带电光调制应用^[68]。2013 年,NTT 公司的 Mitsuru Shinagawa 在高质量 KTN 晶体生长技术的基础上尝试研制 KTN 电场传感器,设计了如图 10 所示的带宽与系统结构相关性实验,但实际工程应用中只研究了 23 MHz 调制带宽^[24]。

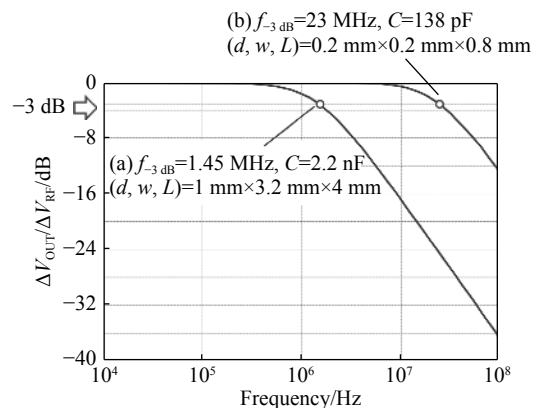


图 10 3 种 KTN 调制器的 3 dB 带宽测量
Fig. 10 3 dB bandwidth measurement of three KTN modulators

2013年, ARL的Robert C. Hoffman也进行了带宽与系统结构相关实验, 设计了3种基于不同KTN晶体的电光调制器, 3种调制器的响应时间分别达到2.12 ns、1.19 ns和4.53 ns。响应带宽理论上可以达到300 MHz^[69]。但受脉冲发生器(1 ns)限制, 无法测得响应时间的极限值, 同时提出了通过提高二次电光系数有效降低响应时间的思路。

表5分析了PMNT、PLZT和KTN材料的电光调制适用性。可见, PMNT材料的响应速度慢和光散射严重, PLZT材料的透过率低, 而KTN晶体理论上不存在上述难题, 因此更有望用于实现高速电光调制。

表5 PMNT、PLZT和KTN电光调制适用性分析
Tab. 5 Applicability analysis of different electro-optic modulations

调制器类型	调制性能		衍生难题	解决方式及效果
	低电压调制	大视场		
LN	×	×		
PMNT	√	√	响应速度慢、光散射严重 半波电压高	难以应用于高速电光调制 Dy掺杂使二次电光性能明显提高
PLZT	√	√	透过率低	Dy掺杂和Al掺杂使透过率明显提高, 但无法突破65%
KTN	√	√	实际应用调制带宽低	通过优化系统结构, 理论上可以达到ns级响应及数百兆赫兹调制带宽, 但实际仍未实现

5 发展趋势分析

基于PMNT材料的电光调制器由于材料本身的畴壁运动, 造成响应速度慢、光散射严重, 其响应速度只能达到180 ns, 带宽只有10 kHz。研究材料的微畴影响机理, 通过掺杂等手段研究畴壁的影响规律, 寻求调制带宽的增强方法是该材料实现实用化的关键。

基于PLZT陶瓷的电光调制器由于材料本身的透过率只能达到65%, 无法满足高分辨率的应用需求。目前国内外专家学者已经研究了PLZT陶瓷的Dy和Al掺杂改性, 通过掺杂不同元素可以使晶胞松弛、晶格稀松, 促进晶粒生长, 提高材料的透过性能和二次电光性能。对于掺杂改性而

言, 掺杂量的增加会使性能逐渐降低, 那么不同特性元素的掺杂研究将是改善透过率的关键。

相比于PMNT材料和PLZT陶瓷因材料属性限制了电光调制器的带宽性能和透过性能, 基于KTN晶体的电光调制器带宽不受KTN材料限制, 同时透过率高、透过范围广、光学均匀性较高, 理论上具有优异的电光调制性能, 近年来日本NTT公司和ARL等单位也探索制作了相应的调制器。为了进一步促进该类调制器的实用化, 目前基于KTN晶体的电光调制器有两个发展方向: 一是增加二次电光系数和调制带宽以改善调制性能; 二是建立性能表征模型, 减小噪声以提高信噪比。

针对KTN晶体的调制性能, 希伯来大学、罗马大学、哈尔滨工业大学等多家单位均对KTN晶体微观特性进行了研究^[52,54,59,63,70-71], 通过实验与理论相结合探索研究了掺杂和快速降温对性能的影响规律。研究发现铜、锂、锰等不同离子掺杂能够控制PNR的动态响应, 实现无标度光学, 从而实现超高分辨率成像, 同时不同降温速度和降温历史使PNR具有不同的重定向机制^[72], 可以调节光偏振, 减小光散射, 增强电光效应。因此, 从微观层面分析并定量表征掺杂改性和快速冷却的影响规律, 进一步提升二次电光性能和带宽等将是未来的研究热点。

此外, 受温度、电场频率和电压等因素影响, KTN晶体性能会发生显著变化。定量表征KTN器件调制性能的影响因素是实用化的首要难题, 除此之外, 研究KTN器件本身的相位调制噪声和电光调制过程中产生的残余幅度调制噪声的抑制方法, 将是KTN晶体衍生器件实用化的关键所在。

6 结束语

KTN晶体具有电光系数大、调制带宽高、各向同性等优异性能, 基于此材料的电光调制器在激光三维成像领域有着广阔的应用前景。以低半波电压、大视场的电光调制器为需求牵引, 以突破传统LN电光调制器调制电压高、视场角小等瓶颈问题为目的, 提出基于新型电光材料的电光调制技术, 并分析相关技术的研究进展。通过钙钛矿结构电光材料与传统3m晶体点群材料的对

比分析,并重点关注 PMNT 材料、PLZT 陶瓷和 KTN 晶体 3 种典型钙钛矿材料。理论上,基于钙钛矿材料的电光调制技术能够突破传统 LN 电光调制器在激光三维成像应用时视场低、半波电压高的瓶颈。

若使新型电光材料的电光调制技术走向实用,PMNT 材料还需要克服材料本身的畴壁运动对响应速度和调制带宽的限制,PLZT 陶瓷还需要解决材料本身存在的低透过率难题,相比而言,KTN 晶体二次电光系数大、透过性能好、调制带宽不受材料本身限制,具有更优异的电光调制

性能。

经过数十年发展,KTN 晶体已经具有成熟的制备工艺,对于材料性能的研究也取得了丰富的科学成果,近年来多国专家学者深入研究的掺杂改性和快速冷却技术也为进一步提高调制性能指明了方向。但从激光三维成像领域的实用性来看,缺乏适用于定量分析的理论模型,在复杂工作环境下难以表征其调制性能和调制噪声,致使基于 KTN 晶体的电光调制方法仍然有技术瓶颈。相信在不远的将来,通过学者们的深入探索研究,这些瓶颈一定能够突破。

参考文献:

- [1] 赵炜渝,邢宁. 美国航天创新项目发展分析[J]. 中国航天, 2015(3): 23-27.
ZHAO W Y, XING N. Analysis of the development of US space innovation projects[J]. *Aerospace China*, 2015(3): 23-27. (in Chinese)
- [2] 王雪瑶,宋博. 美国国防高级研究计划局启动“地球同步轨道卫星自主服务”项目[J]. 国际太空, 2016(11): 33-38.
WANG X Y, SONG B. U.S. DARPA started the RSGS program[J]. *Space International*, 2016(11): 33-38. (in Chinese)
- [3] TICKER R L, CEPOLLINA F, REED B B. NASA's in-space robotic servicing[C]. *Proceedings of the AIAA SPACE 2015 Conference and Exposition, AIAA*, 2015: 4644.
- [4] STRUBE M, HENRY R, SKELETON E, et al.. Raven: an on-orbit relative navigation demonstration using international space station visiting vehicles[C]. *American Astronautical Society Guidance and Control Conference, American Astronautical Society*, 2015.
- [5] GALANTE J M, VAN EEPOEL J, D'SOUZA C, et al.. Fast Kalman filtering for relative spacecraft position and attitude estimation for the raven ISS hosted payload[R]. AAS 16-045, 2016.
- [6] FORSHAW J L, AGLIETTI G S, NAVARATHINAM N, et al.. Remove DEBRIS: An in-orbit active debris removal demonstration mission[J]. *Acta Astronautica*, 2016, 127: 448-463.
- [7] MCMANAMON P F, BANKS P S, BECK J D, et al.. Comparison of flash lidar detector options[J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(3): 031223.
- [8] ECKERSLEY S, SAUNDERS C, LOBB D, et al.. Future rendezvous and docking missions enabled by low-cost but safety compliant Guidance Navigation and Control (GNC) architectures[C]. *Proceedings of The 15th Reinventing Space Conference, British Interplanetary Society*, 2017.
- [9] 陈臻. 基于偏振调制的激光三维成像方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
CHEN ZH. Research on three-dimensional active imaging with polarization -modulated method[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese)
- [10] CHEN ZH, LIU B, LIU E H, et al.. Electro-optic modulation methods in range-gated active imaging[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(3): A184-A190.
- [11] ZHANG P, DU X P, ZHAO J G, et al.. High resolution flash three-dimensional LIDAR systems based on polarization modulation[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(13): 3889-3894.
- [12] JO S, KONG H J, BANG H, et al.. High resolution three-dimensional flash LIDAR system using a polarization modulating Pockels cell and a micro-polarizer CCD camera[J]. *Optics Express*, 2016, 24(26): A1580-A1585.
- [13] 何子清,葛超,王春阳. 基于最小二乘配置的光学镜头畸变校正方法[J]. *液晶与显示*, 2019, 34(3): 302-309.
HE Z Q, GE CH, WANG CH Y. Optical lens distortion correction method based on least square configuration[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2019, 34(3): 302-309. (in Chinese)
- [14] 于国栋. 靶场光学镜头畸变校正方法研究[J]. *液晶与显示*, 2017, 32(3): 227-233.
YU G D. Distortion correction method for optical lens of the range[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*,

- 2017, 32(3): 227-233. (in Chinese)
- [15] 李新娥, 班皓, 沙巍, 等. 一种大视场TDICCD相机的多传感器图像配准方法[J]. *液晶与显示*, 2014, 29(4): 644-648.
LI X E, BAN H, SHA W, *et al.*. Registration method of large field view and multi-sensor images of TDICCD cameras[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(4): 644-648. (in Chinese)
- [16] 王越, 蒋毅坚. 3 m点群晶体纵向压电性能的研究[J]. *人工晶体学报*, 2004, 33(3): 399-402.
WANG Y, JIANG Y J. Crystal orientation dependence of longitudinal piezoelectric properties for 3 m point group crystals[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2004, 33(3): 399-402. (in Chinese)
- [17] BU Y M, ZENG Z Y, DU X P, *et al.*. Theoretical research on new photoelectric mixing technology based on electro-optical modulation[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10964: 109640I.
- [18] CHANG Y C, WANG CH, YIN SH 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.
- [19] 王菲菲, 邵喜斌. 负型液晶在ADS广视角技术中的应用[J]. *液晶与显示*, 2016, 31(8): 760-767.
WANG F F, SHAO X B. Application of negative LC in ADS wide view technology[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(8): 760-767. (in Chinese)
- [20] YADA M, ISHIHARA Y, NAOE T, *et al.*. Noise reduction method for electro-optic measurement system using variable gain amplifier[C]. *Proceedings of 2017 IEEE Region 10 Conference, IEEE*, 2017: 1969-1972.
- [21] ZHANG J, NELSON J S, CHEN ZH P. Removal of a mirror image and enhancement of the signal-to-noise ratio in Fourier-domain optical coherence tomography using an electro-optic phase modulator[J]. *Optics Letters*, 2015, 30(2): 147-149.
- [22] PAN X J, CAI Y, ZENG X K, *et al.*. A terahertz EO detector with large dynamical range, high modulation depth and signal-noise ratio[J]. *Optics Communications*, 2017, 391: 135-140.
- [23] 卜禹铭, 杜小平, 曾朝阳, 等. 无扫描激光三维成像雷达研究进展及趋势分析[J]. *中国光学*, 2018, 11(5): 711-727.
BU Y M, DU X P, ZENG ZH Y, *et al.*. Research progress and trend analysis of non-scanning laser 3D imaging radar[J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(5): 711-727. (in Chinese)
- [24] SHINAGAWA M, KOBAYASHI J, YAGI S, *et al.*. Sensitive electro-optic sensor using $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ crystal[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, 192: 42-48.
- [25] 罗豪魁, 徐海清, 王评初, 等. 新型压电单晶PMNT的生长和性能研究[J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2002, 7(6): 98-99, 104.
LUO H S, XU H Q, WANG P CH, *et al.*. Growth and properties of a new typical piezoelectric sircgle crystal PMNT[J]. *Journal of Harbin University of Science and Technology*, 2002, 7(6): 98-99, 104. (in Chinese)
- [26] LIN Y T, REN B, ZHAO X Y, *et al.*. Large quadratic electro-optic properties of ferroelectric base $0.92\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-0.08\text{PbTiO}_3$ single crystal[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, 507(2): 425-428.
- [27] KAMZINA L S, WEI R, ZENG J T, *et al.*. Effect of the La concentration on the dielectric and optical properties of the transparent ferroelectric ceramics $75\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3-25\text{PbTiO}_3$ [J]. *Physics of the Solid State*, 2011, 53(8): 1608-1613.
- [28] KAMZINA L S, RUAN W, LI G R, *et al.*. Transparent ferroelectric ceramics $\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3-x\text{PbZr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47}\text{O}_3$: Dielectric and electro-optical properties[J]. *Physics of the Solid State*, 2012, 54(10): 2024-2029.
- [29] LIU A Y, HAN H L, WEI L L, *et al.*. Microstructure and electrical properties of PMNT thin films prepared by a modified sol-gel process[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 9068: 90680R.
- [30] 李国柱. PMN-PT 单晶及薄膜的光电转换性能研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2015.
LI G ZH. Photoelectric conversion properties of PMN-PT single crystals and thin films[D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2015. (in Chinese)
- [31] EL HOSINY ALI H, JIMÉNEZ R, RAMOS R, *et al.*. The role of PbTiO_3 layers in piezoelectric multilayer composite films based on $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-\text{PbTiO}_3$ [J]. *Thin Solid Films*, 2017, 636: 730-736.
- [32] 张德强. 溶胶凝胶法制备 PMNT 薄膜及性能研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2018.
ZHANG D Q. Synthesis and properties of PMNT thin films prepared by sol-gel method[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2018. (in Chinese)
- [33] 孙荣明, 郑芝凤, 祝炳和. 用氧化物原料制备大尺寸PLZT透明陶瓷[J]. *硅酸盐*, 1981(3): 16-20.
SUN R M, ZHENG ZH F, ZHU B H. Preparation of large-size PLZT transparent ceramics from oxide raw materials[J]. *Chinese Journal of Ceramics*, 1981(3): 16-20. (in Chinese)
- [34] 何夕云, 张勇, 郑鑫森, 等. 镉掺杂锆钛酸铅透明陶瓷的结构和电光性能[J]. *光学学报*, 2009, 29(6): 1601-1604.

- HE X Y, ZHANG Y, ZHENG X S, *et al.*. Structure and electro-optical property of the Dy³⁺ doped lanthanum zirconate-titanate ceramics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(6): 1601-1604. (in Chinese)
- [35] KNAZKOV A V. Electro-optic study of PZT ferroelectric ceramics using modulation of reflected light[J]. *Technical Physics*, 2016, 61(4): 631-634.
- [36] 中国科学院上海硅酸盐研究所. 锆钛酸镧铅 (PLZT) 光电陶瓷材料[EB/OL]. (2018-07-12)[2020-02-27]. http://www.sic.ac.cn/glbm/kjfbz/sdhzc/xmzs/201202/t20120220_3442451.html.
- [37] LIMPICHAIPANIT A, NGAMJARUROJANA A. Effect of Li and Bi co-doping and sintering temperature on dielectric properties of PLZT 9/65/35 ceramics[J]. *Ceramics International*, 2017, 43(5): 4450-4455.
- [38] SOMWAN S, NGAMJARUROJANA A, LIMPICHAIPANIT A. Dielectric, ferroelectric and induced strain behavior of PLZT 9/65/35 ceramics modified by Bi₂O₃ and CuO co-doping[J]. *Ceramics International*, 2016, 42(9): 10690-10696.
- [39] FUNSUEB N, NGAMJARUROJANA A, TUNKASIRI T, *et al.*. Effect of composition and grain size on dielectric, ferroelectric and induced strain behavior of PLZT/ZrO₂ composites[J]. *Ceramics International*, 2018, 44(6): 6343-6353.
- [40] SELVAMANI R, SINGH G, TIWARI V S, *et al.*. Dielectric and piezoelectric properties of Cr₂O₃-doped PLZT (7/65/35) hot pressed ceramics[J]. *Materials Today Communications*, 2018, 15: 100-104.
- [41] HUANG C, XU J M, FANG ZH, *et al.*. Effect of preparation process on properties of PLZT (9/65/35) transparent ceramics[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 723: 602-610.
- [42] 许文才. 锆钛酸铅压电薄膜的制备和表征[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- XU W C. Fabrication and characterization of lead zirconate titanate piezoelectric thin films[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [43] 郭有文. PLZT 陶瓷的制备及其掺杂改性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- GUO Y W. Preparation and doping modification research of PLZT ceramics[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018. (in Chinese)
- [44] 刘宇锋. PLZT 压电陶瓷的弛豫特性和压电特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- LIU Y F. Studies of relaxation and piezoelectric properties of PLZT ceramics[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [45] ZHU B, CAO ZH D, HE X Y, *et al.*. The effect of Al doping on ferroelectric and dielectric properties of PLZT transparent electro-optical ceramics[C]. *Proceedings of 2018 Chinese Materials Conference on Physics and Techniques of Ceramic and Polymeric Materials, Springer*, 2018: 205-211.
- [46] 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.
- [47] IMAI T, SASAURA M, NAKAMURA K, *et al.*. Crystal growth and electro-optic properties of KTa_{1-x}Nb_xO₃[J]. *NTT Technical Review*, 2007, 5(9): 1-8.
- [48] 王旭平. KTN 系列晶体的生长及其性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2008.
- WANG X P. Growth and properties investigation of KTN series crystals[D]. Ji'nan: Shandong University, 2008. (in Chinese)
- [49] DI GERONIMO E, BORNAND V, PAPET P. Elaboration and characterization of potassium niobate tantalate ceramics[J]. *Ceramics International*, 2017, 43(1): 953-960.
- [50] 山东省科学院新材料研究所. 钽铌酸钾 (KTa_{1-x}Nb_xO₃, KTN) 晶体[EB/OL]. [2020-02-27]. http://crysten.51sole.com/companyproductdetail_7677292.htm.
- [51] 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.
- [52] DELRE E, PARRAVICINI J, PARRAVICINI G, *et al.*. Wavelength-insensitive negative optical permittivity without nanofabrication in transparent nonlinear dipolar glasses[C]. *Proceedings of 2012 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), IEEE*, 2012: 1-2.
- [53] PARRAVICINI J, AGRANAT A J, CONTI C, *et al.*. Equalizing disordered ferroelectrics for diffraction cancellation[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(11): 111104.
- [54] PARRAVICINI J, CONTI C, AGRANAT A J, *et al.*. Programming scale-free optics in disordered ferroelectrics[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(12): 2355-2357.

- [55] PIERANGELI D, PARRAVICINI J, DI MEI F, *et al.*. Photorefractive light needles in glassy nanodisordered KNTN[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(6): 1657-1660.
- [56] DI MEI F, FALSI L, FLAMMINI M, *et al.*. Giant broadband refraction in the visible in a ferroelectric perovskite[J]. *Nature Photonics*, 2018, 12(12): 734-738.
- [57] TIAN H, YAO B, WANG L, *et al.*. Dynamic response of polar nanoregions under an electric field in a paraelectric $\text{KTa}_{0.61}\text{Nb}_{0.39}\text{O}_3$ single crystal near the para-ferroelectric phase boundary[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 13751.
- [58] 王磊. 相界附近钽铌酸钾晶体的电光响应特性及其机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
WANG L. The study of electro-optic response and mechanism in potassium tantalate niobate near the phase boundary[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [59] TAN P, TIAN H, HU CH P, *et al.*. Temperature field driven polar nanoregions in $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(25): 252904.
- [60] 姚博. 钽铌酸钾晶体居里温度附近临界特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
YAO B. Critical properties of potassium tantalate niobate crystal near the curie temperature[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [61] 毛晨阳. 相变温度附近钽铌酸钾晶体的电光响应研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
MAO CH Y. The study of electro-optical response of potassium tantalate niobate crystal near phase transition temperature[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [62] TAN P, TIAN H, MAO CH Y, *et al.*. Field-driven electro-optic dynamics of polar nanoregions in nanodisordered $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ crystal[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(1): 012903.
- [63] TAN P, TIAN H, WANG Y, *et al.*. Impact of dipolar clusters on electro-optic effects in $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ crystal[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(20): 5009-5012.
- [64] ZHANG X J, YE Q, CAI H W, *et al.*. Polarization-independent electro-optic modulator based on PMNT electrically-controlled birefringence effect and Sagnac interferometer[J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 57: 5-8.
- [65] ZHANG X J, YE Q, QU R H, *et al.*. High-power electro-optic switch technology based on novel transparent ceramic[J]. *Chinese Physics B*, 2016, 25(3): 034202.
- [66] 宋益澄, 何晓明, 郭乃健. PLZT电光调制器[J]. 光电子·激光, 1984(4): 37-40.
SONG Y CH, HE X M, GUO N J. PLZT electro-optic modulator[J]. *Journal of Optoelectronics-Laser*, 1984(4): 37-40. (in Chinese)
- [67] 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.
- [68] ITOH T, SASAURA M, TOYODA S, *et al.*. High-frequency response of electro-optic single crystal $\text{KTa}_x\text{Nb}_{1-x}\text{O}_3$ in paraelectric phase[C]. *Proceedings of 2005 Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science and Photonic Applications Systems Technologies, Optical Society of America*, 2005: JTuC36.
- [69] CHANG Y C, YIN SH ZH, HOFFMAN R C, *et al.*. Broadband large field of view electro-optic modulators using potassium tantalate niobate (KTN) crystals[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8847: 88470L.
- [70] GUMENNIK A, KURZWEIL-SEGEV Y, AGRANAT A J. Electrooptical effects in glass forming liquids of dipolar nano-clusters embedded in a paraelectric environment[J]. *Optical Materials Express*, 2011, 1(3): 332-343.
- [71] KABESSA Y, YATIV A, ILAN H E, *et al.*. Electro-optical modulation with immunity to optical damage by bipolar operation in potassium lithium tantalate niobate[J]. *Optics Express*, 2015, 23(4): 4348-4356.
- [72] 王骁乾, 沈冬, 郑致刚, 等. 液晶光控取向技术进展[J]. *液晶与显示*, 2015, 30(5): 737-751.
WANG X Q, SHEN D, ZHEN ZH G, *et al.*. Review on liquid crystal photoalignment technologies[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(5): 737-751. (in Chinese)

作者简介:



吕潇磊(1992—), 男, 山东威海人, 博士研究生, 2017年于航天工程大学获得硕士学位, 主要从事目标光学探测、航天任务分析与设计方面的研究。
E-mail: Ray_lxl@163.com



赵继广(1967—), 男, 山东五莲人, 博士, 教授, 博士生导师, 1992年于国防科技大学获得学士学位, 2010年于装甲兵工程学院获得博士学位, 主要从事目标光学探测、航天任务分析与设计等方面研究。E-mail: zhaoyy8600@163.com