

钽铌酸钾晶体的电控偏转色散特性

李小凯^{1,2}, 宋丽培^{1,2*}, 刘伟伟^{1,2}

¹南开大学现代光学研究所, 天津 300350;

²天津市微尺度光学信息技术科学重点实验室, 天津 300350

摘要 钽铌酸钾(KTN)晶体具有很高的二次电光系数,响应速度快,因此可以作为高速电光开关的材料,能在较低电压下快速产生大的光束偏转角。但是 KTN 晶体的色散问题制约了其作为电光开关在宽光谱范围内的应用。探讨了外加电压、温度及波长对偏转特性的影响,发现同时调节电压和温度的方法可以平衡光束偏转角和色散,为 KTN 晶体用于宽波段光束偏转提供参考。

关键词 物理光学; 钽铌酸钾晶体; 电光开关; 光束偏转; 色散

中图分类号 O734+.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0826001

Dispersion Characteristics of Potassium Tantalate Niobate Crystal Based on Electronically Controlled Beam Deflection

Li Xiaokai^{1,2}, Song Lipei^{1,2*}, Liu Weiwei^{1,2}

¹Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300350, China;

²Tianjin Key Laboratory of Micro-Scale Optical Information Science and Technology, Tianjin 300350, China

Abstract The potassium tantalate niobate (KTN) crystal has a high quadratic electro-optic coefficient and a fast response speed; therefore, it can be used to develop a high-speed electro-optic switch, which can quickly achieve a large beam deflection angle at a low voltage. However, the dispersion problem of the KTN crystal limits its application as an electro-optic switch in a wide spectral range. We investigate the effects of control voltage, temperature, and wavelength on the deflection characteristics of the KTN crystal, and find that simultaneous adjustment of voltage and temperature can balance the beam deflection angle and dispersion. This study provides guidance to the application of KTN crystals in wide-waveband beam deflection.

Key words physical optics; potassium tantalate niobate crystal; electro-optic switch; beam deflection; dispersion

OCIS codes 260.1180; 160.2100; 230.2090

1 引言

光开关在光学诸多领域中发挥着重要的作用。常见的光开关有机械式、微机械系统(MEMS)及液晶光、磁光、声光和电光式开关^[1-3]。机械式光开关是一种机械操控光学镜面的物理移动的光开关,这种光开关的缺点显而易见,开关速度相对较慢,容易磨损。MEMS光开关凭借大规模的集成化、低插入损耗、低串扰、多端口数及低偏振依赖损耗等优势而具有巨大的吸引力,然而这一类型的开关机制也是基于移动部件的^[4-5]。液晶光开关具有低的驱动电压和功率损耗、不需要移动部件的优势,然而结构

很复杂,并且响应时间一般在毫秒量级^[6]。基于法拉第效应的磁光开关因缺乏具有超快响应时间和大的法拉第旋光性的磁光材料,一直没有在光学领域得到广泛应用^[7]。声光开关是一种基于声光效应的光开关,被用于激光器的调Q、远距离通信的信号调制、光谱中的频率控制,这种开关的响应时间虽能达到纳秒,但插入损耗非常大、成本高。电光开关是一种通过介质的电光效应对光进行操控来实现开关功能的光开关,响应速度可达纳秒,可以对光波的相位、振幅、频率及偏振进行调控,除此之外,这一类型的开关在波分复用(WDM)网络、功率操控及数据监测等领域扮演着十分重要的角色。

收稿日期: 2019-12-05; 修回日期: 2019-12-31; 录用日期: 2020-01-06

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0504400)、国家自然科学基金(61605092)、天津市自然科学基金(19JCYBJC16800)

* E-mail: gm_imo@nankai.edu.cn

电光开关材料钽铌酸钾(KTN)晶体是钽酸钾 KTaO_3 (KT) 和铌酸钾 KNbO_3 (KN) 的固溶体混晶, 是目前已知的具有最大二次电光效应的晶体之一, 其二次电光系数可以达 $10^{-14} \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-2}$ 量级^[8]。目前市场上具有代表性的铌酸锂电光开关的工作波长主要集中在近红外和中远红外, 工作波长范围有限, 即便是定制的开关, 也只能针对特定单波长。波长范围的限制归因于电光晶体的色散问题, 因此本文在可见-近红外波段对 KTN 电光晶体的偏转色散特性进行了研究。对 KTN 晶体在可见-近红外波段光束的偏转特性进行了分析, 对不同波长下光束偏转与外加电压和温度的关系进行了实验研究, 发现电压和温度双重调控的作用可以产生抑制晶体电致光束偏转色散的效果。实验结果为 KTN 晶体在非单一波长环境中高速光束偏转和高速光开关中的应用提供了参考。

2 基本原理

2.1 光束偏转原理

在众多电光材料中, KTN 晶体凭借大的二次电光效应备受关注^[8]。一束光沿着 z 轴方向通过 KTN 晶体, 沿 y 轴方向给 KTN 晶体两端施加固定电压, 如图 1 所示。

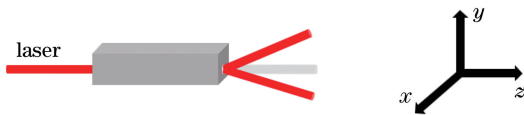


图 1 光束偏转示意图

Fig. 1 Schematic of beam deflection

由外电场导致的折射率变化量表示为

$$\Delta n = -\frac{1}{2} n_0^3 S_{ij} E^2 = -\frac{1}{2} n_0^3 g_{ij} \epsilon_0^2 \epsilon_r^2 E^2, \quad (1)$$

式中: n_0 为未加电场时的折射率; S_{ij} 为克尔常数; g_{ij} 为有效二次电光系数, 当入射光的偏振方向与外加电场的方向平行时, $g_{ij} = g_{11}$, 当入射光的偏振方向与外加电场的方向垂直时, $g_{ij} = g_{12}$; ϵ_0 为真空介电常数; ϵ_r 为相对介电常数。因此, Δn 可以通过外加电场控制^[9-10], 即

$$\Delta n = \begin{cases} \Delta n(E), & E \neq 0 \\ 0, & E = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

利用这一开关特性可以制作由电场控制的光开关。

通过调控钽和铌两者的配比, 可以得到合适的居里温度, 并且不同的控制温度会改变晶体的介电特性。

KTN 晶体作为一个二次电光晶体材料, 其 ϵ_r

与温度 T 的关系式^[11] 遵循居里-韦斯定律, 即

$$\epsilon_r = \frac{C}{T - T_c}, \quad (3)$$

式中: T_c 为居里温度; C 为居里常数。通过测量 $\epsilon_r - T$ 的关系曲线, 得到 KTN 晶体的居里温度值。

由 Sellmeier 方程推导得到描述 KTN 晶体折射率与波长关系的经验等式, 即

$$n^2 = a' + \frac{b'}{\lambda^2 - c'} - d' \times \lambda^2. \quad (4)$$

式中: a' 、 b' 、 c' 及 d' 的值与晶体有关, 可以利用由椭圆光谱仪测得的晶体折射率数据对 (4) 式进行最小二乘法拟合得到, 进而精确得到不同波长对应的折射率。根据参考文献^[12] 可知, KTN 晶体的折射率随波长的增大而迅速减小, 且数值大小在 2.20~2.45 之间。

最终的偏转角度可以表示为

$$\theta \approx -\frac{1}{2} n_0^3 g_{ij} \epsilon_0^2 \epsilon_r^2 \frac{l}{d} E^2, \quad (5)$$

式中: 除了 g_{ij} (参考文献^[13] 中近似取 0.136 ± 0.010), n_0 值为 2.20~2.45, $\epsilon_0 = 8.854187817 \times 10^{-12} \text{ F/m}$; 根据实验测得的介电常数与温度的曲线可知, 将温度控制在居里温度附近时, ϵ_r 数值大约为 2.65×10^4 ; 晶体的长度 l 为 4.82 mm; 横向厚度 d 为 1.25 mm。外加电压 $U = E \times d$, 最后可以推出 θ 与 U^2 的比例系数在 $0.98 \times 10^{-7} \sim 1.36 \times 10^{-7}$ 量级, 为接下来的实验提供了一定的参考。

2.2 光束偏转实验方法

实验光路如图 2 所示, 宽波段光束由超连续光源(波长范围为 475~1075 nm)发出, 经过滤光片, 使只有中心波长在特定值的窄波段光透过, 半波片用于调整光的偏振方向, 并结合偏振片确保入射光束的偏振方向与外加电压的方向相同, 使得入射光束沿外加电压的方向发生偏转。温控仪用来控制施加在 KTN 晶体上的温度。光束偏转角由 CCD 相机接收到的光斑相对于无外加电压时的位置偏离量和相机像面到晶体输出端截面的距离计算得到。外加电压的大小由直流高压电源控制。

3 实验结果与参数分析

3.1 居里温度的测量

首先测量实验用的 KTN 晶体的相对介电常数 ϵ_r 与温度 T 的关系曲线如图 3 所示。KTN 晶体的 ϵ_r 随温度的升高而增加, 在 33 °C 左右到达峰值后, 随温度的增加而开始减小, 因为峰值对应的位置是

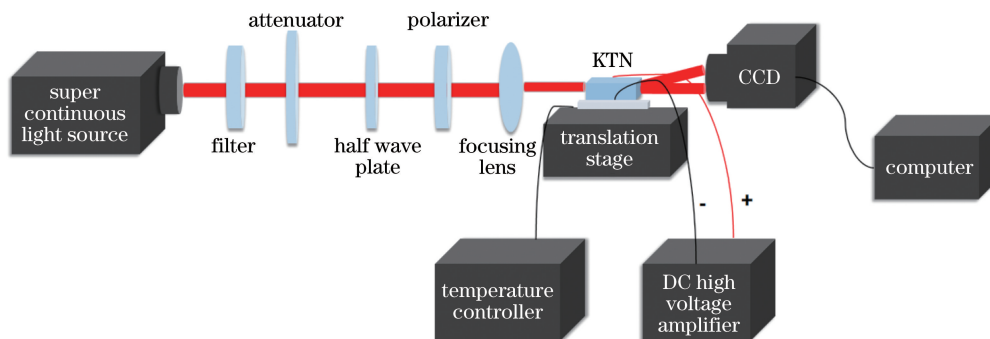


图 2 光束偏转系统

Fig. 2 Beam deflection system

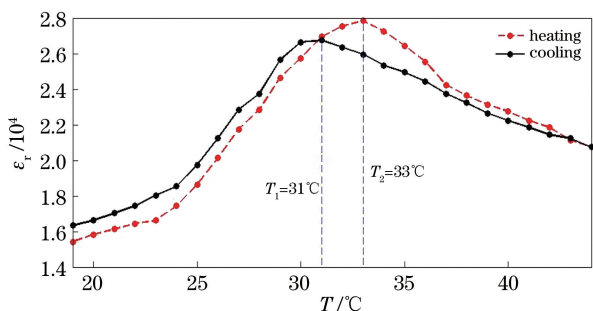


图 3 ϵ_r 与 T 的关系曲线

Fig. 3 Relationship between ϵ_r and T

相变临界温度点,因此居里温度在 33 °C 左右,如图 3 中虚线所示。同理,降低温度也有类似的关系曲线,如图 3 中实线所示。但不同的是,在升温 and 降温两个过程中,温度对 KTN 晶体的介电特性影响是不同的。

3.2 外加电压对偏转角度的影响

为探讨 KTN 晶体作为光束偏转器件和光开关在宽波段的响应特性,研究外加电压对偏转角度的影响。以居里温度邻近处 33.5 °C,波长为 532 nm、650 nm 为例,实验结果如图 4 所示。

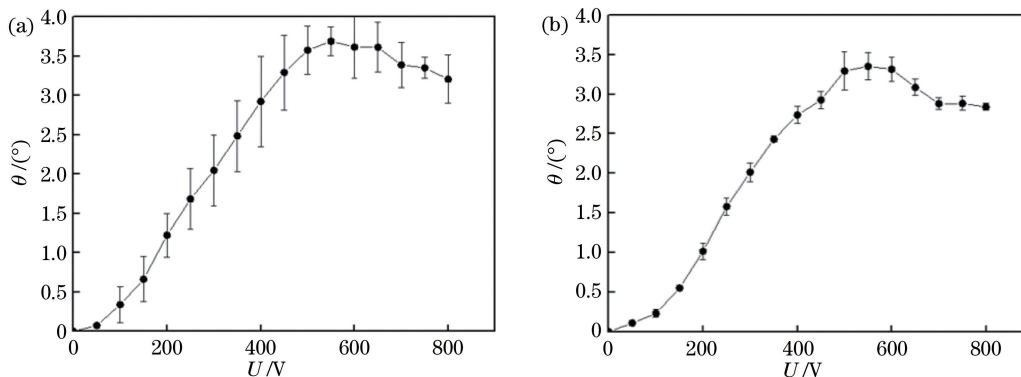


图 4 不同波长下 θ 与 U 的关系。(a) 532 nm;(b) 650 nm

Fig. 4 Relationship between θ and U at different wavelengths. (a) 532 nm; (b) 650 nm

从图 4 可知,偏转角度首先随电压的增加而增大,这符合预期,当电压增大到一定值时,偏转角度开始随电压的增加而减小到持平。这是由于 KTN 晶体在外加电压很大的时候会发生电场诱导相变,居里温度值发生变化,进而影响晶体的介质特性^[14]。因此在探究波长色散对光束偏转特性影响时,外加电压不超过图 4 曲线中拐点对应的电压,即 600 V。

3.3 不同温度下偏转角度与外加电压的关系

理论上,当施加在 KTN 晶体上的温度为居里温度时,光束有最大偏转角^[15-16]。在 3.2 节的基础上进一步探讨不同温度下偏转角度和外加电压的关

系。由于 3.2 小节的结果表明外加电压应小于 600 V,因此在 0~600 V 内,每隔 50 V 进行测试,测试的温度为 33.5, 35, 37, 40 °C,波长为 532 nm。由图 5 可以看出:四个温度下的偏转角度都随外加电压的增加而增大,并且温度越接近居里温度,偏转角度越大,这符合理论预期;两个过程的偏转角度变化曲线在相同温度时非常接近,只是降温过程中的角度偏转略低于升温过程。从图 3 也可以看出,当温度略高于居里温度时,升温过程对应的相对介电常数要比降温过程对应的大,因而二次电光效应也大,相同条件下的光束偏转特性更好一些。

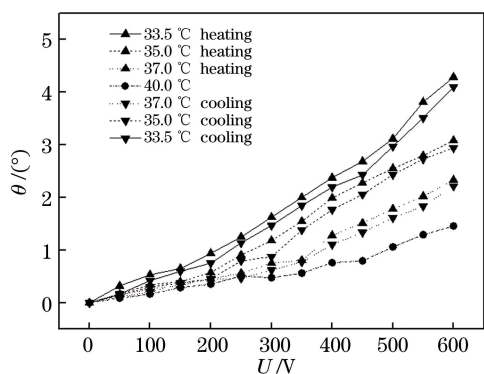


图 5 升温与降温过程中 θ 与 U 的关系

Fig. 5 Relationship between θ and U under heating process and cooling process

3.4 波长对偏转角度的影响

最后研究外加电压和温度对 KTN 晶体色散特性的调控。KTN 晶体的温度分别控制在 33.5 °C 和 35 °C, 波长分别为 490, 532, 570, 650, 780, 950 nm。

实验结果如图 6 所示, 可以看出, 在相同的温度条件下, 偏转角度与入射波长呈反比关系, 即光束偏转角度随入射波长的增大而减小。当波长小于 570 nm 时, 偏转角度随波长呈现出较大的变化, 即色散明显; 当波长大于 570 nm 时, 偏转角度随波长的变化比较平缓, 即色散较小。而且, 随着外加电压的升高, 偏转角度整体增大, 小于 570 nm 波段的色散更加明显。

对比 33.5 °C 和 35 °C 两种情况。35 °C 时短波段(570 nm 以下)的色散情况要明显好于 33.5 °C 时的情况, 尤其是在外加电压为 500 V 和 600 V 时, 短波段的色散抑制作用明显, 而长波段的色散在两个温度下差别不大。表 1 为两个温度下光束偏转角的差异, 其中数值指的是在不同外加电压和温度下, 短波段和长波段光束偏转角的标准偏差与长波段偏转角均值的比值。由表 1 可见, 当外加电压为 300 V 和 400 V 时, 33.5 °C 和 35 °C 两个温度下短波段和长波段的偏转差异相近; 当外加电压为 500 V 和 600 V 时, 35 °C 下短波段的偏转色散比 33.5 °C 时明显减小, 降低为 1/4~1/3, 而长波段的偏转色散略有增大, 但仅有 0.06 左右, 并且与 35 °C 短波段的色散相近。因此选择外加电压为 500 V 或 600 V, 控制温度为 35 °C, 就可以有效地抑制波长造成的偏转角差异, 即色散的影响。另外 300 V 下光束的偏转角很小, 如 35 °C 时偏转角只有 0.2°~0.3°, 而 500 V (或 600 V) 下的光束偏转角在 1.2° 以上, 因此虽然 300 V 时 KTN 晶体产生的色散小, 但仍需根据偏转

角度的需要选择合适的参数, 以同时满足偏转角度和色散的需求。

表 1 不同 U 和 T 下, 不同波段对应的偏转角度偏差

Table 1 Deflection angle deviation corresponding to each waveband at different U and T

U/V	$T=33.5\text{ }^{\circ}\text{C}$		$T=35\text{ }^{\circ}\text{C}$	
	490-570 nm	570-950 nm	490-570 nm	570-950 nm
300	0.085	0.100	0.092	0.089
400	0.067	0.079	0.091	0.119
500	0.215	0.038	0.078	0.063
600	0.276	0.026	0.071	0.055

从图 6 还可以发现, 驱动电压在 500 V 和 600 V 时, 短波段的色散在 35 °C 时相比 33.5 °C 有明显减小, 长波段的色散差异变化不明显。

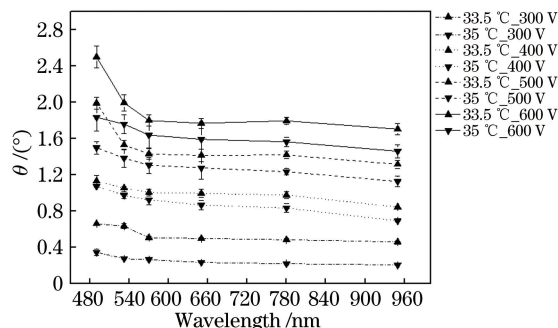


图 6 不同 U 和 T 下 θ 与波长的关系

Fig. 6 Relationship between θ and wavelength at different U and T

针对温度这一影响因素, 在 33.5, 35, 37, 40 °C 四组不同温度下, 探究偏转角度与入射波长的关系, 如图 7 所示。

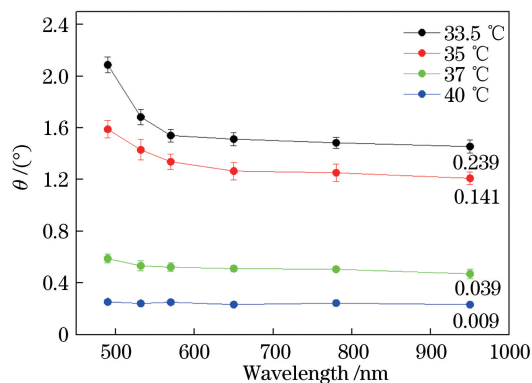


图 7 U 为 500 V 时不同 T 下 θ 与波长的关系

Fig. 7 Relationship between θ and wavelength at different T when U is 500 V

由图 7 可知, 温度升高, 色散减小, 同时偏转角度也整体减小。图 7 右侧标出了这四个温度下光束偏转角在 490~950 nm 波长范围内的标准偏差, 似

乎温度升高更有利于抑制色散。但是仔细分析发现,35 °C 和 33.5 °C 时短波段的色散虽然比 37 °C 和 40 °C 时高(分别为 0.189 和 0.100 及 0.070 和 0.026),但是光束的偏转角度整体提高了近 7 倍。

4 分析与讨论

KTN 晶体作为光束偏转系统的核心部分,通过施加电压和控制温度来实现光束的偏转。首先测量了 KTN 晶体的相对介电常数与温度的关系曲线,用于确定 KTN 晶体的居里温度值,发现升温过程和降温过程对应的曲线未重合,说明温度的变化对 KTN 晶体的介电特性影响是不同的。然后在固定温度(居里温度附近,33.5 °C)下,测量了偏转角度与外加电压的关系曲线,偏转角度随外加电压的增大先增大后减小,这是因为外加电压增大到一定值时,晶体会发生电场诱导相变,晶体的居里温度值发生变化,为了保证晶体不会发生相变,施加的外加电压不超过 600 V。最后分别从升温 and 降温两个过程探究了不同温度下偏转角度与外加电压的关系曲线,当外加电压一定时,随着温度升高,偏转角度减小,而且升温过程对应的光束偏转角度大于降温过程,这可以由晶体的相对介电常数与温度的关系曲线得到。因为 KTN 晶体的介电特性对温度特别敏感,实验中用的温控仪在控制晶体的温度时有 ± 0.1 °C 的变化,显示温度具有一定的延迟时间。如何更精确地控制晶体的温度并实时显示,是后期需要考虑的问题。

本文主要探讨了 KTN 晶体在可见和近红外波段的偏转色散特性。从外加电压和温度这两个影响因素出发,测量了晶体的偏转角度与波长的关系曲线。当控制晶体的温度和外加电压不变时,偏转角度与波长呈反比关系,随着波长的增大,偏转角度有一个先快速减小而后缓慢减小的趋势;当控制温度不变时,外加电压增大,偏转角度整体增大,但短波段(490~570 nm)的偏转差异增大,长波段(570~950 nm)的偏转差异不明显;当温度和外加电压都变化时,虽然外加电压增大,短波段的偏转差异也增大,但偏转角度值也增大。可以在光束偏转角度值相近的情况下,通过选择合适的控制温度,来减小短波段的光束偏转差异。

从表 1 可以看出,当小的偏转角度满足需要时,可以使用小的电压控制,如 300 V,色散引起的角度偏差也小;但是如果需要大的偏转角,则需要增加控制电压,此时将控制温度从居里温度附近(晶体的居

里温度为 33 °C)调高至 35 °C 就可以有效降低色散,如在 600 V 电压下偏转角度提高到 1.6° 以上,而偏转角度的偏差降低到 0.08 以下,甚至低于控制电压为 300 V 时的值。因此根据对角度值的需求,选择合适的温度和外加电压就可以调控光束的整体偏转角度及色散范围,以满足宽波段电致光束偏转或光开关的需求。

因实验条件的限制,主要讨论了 490~950 nm 波段范围的偏转色散特性,后期可以拓宽研究的波段范围,在更宽波段范围内对 KTN 晶体的偏转色散特性进行探究,以面向更广泛的应用。

5 结 论

主要探讨了宽波段下外加电压和温度对光束偏转色散的影响。通过同时调控外加电压和温度,将 KTN 晶体的温度控制在 35 °C,外加电压控制在 600 V 时,可以实现在 490~950 nm 波段范围内大的偏转角度和小的偏转角度差异(即色散)。实验结果为基于 KTN 的电光开关在宽波段的实际应用提供了指导。

参 考 文 献

- [1] Wu Y. Study of electrodeflector based on potassium tantalate niobate [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014: 1-10.
吴忧. 基于钽铌酸钾晶体的电控光束偏转特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014: 1-10.
- [2] Liu B, Wang X P. Progress on application of quadratic electro-optic effect of KTN crystals [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(2): 261-266.
刘冰, 王旭平. 钽铌酸钾晶体二次电光效应的应用研究进展 [J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(2): 261-266.
- [3] Mao C Y. The study of electro-optic response of potassium tantalate niobate crystal near phase transition temperature [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017: 1-18.
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: 1-18.
- [4] Chen R T, Nguyen H, Wu M C. A high-speed low-voltage stress-induced micromachined 2×2 optical switch [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1999, 11(11): 1396-1398.
- [5] Lin L Y, Goldstein E L. Opportunities and challenges for MEMS in lightwave communications [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum

- Electronics, 2002, 8(1): 163-172.
- [6] Shen T Z, Hong S H, Song J K. Electro-optical switching of graphene oxide liquid crystals with an extremely large Kerr coefficient [J]. Nature Materials, 2014, 13(4): 394-399.
- [7] Kemmet S, Mina M N, Weber R J. Current-controlled, high-speed magneto-optic switching [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46 (6): 1829-1831.
- [8] Chang Y C, Wang C, Yin S Z, et al. Giant electro-optic effect in nanodisordered KTN crystals [J]. Optics Letters, 2013, 38(22): 4574-4577.
- [9] Agranat A J, Secundo L, Golshani N, et al. Wavelength-selective photonic switching in paraelectric potassium lithium tantalate niobate [J]. Optical Materials, 2001, 18(1): 195-197.
- [10] 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.
- [11] Agranat A J, Razvag M, Balberg M, et al. Holographic gratings by spatial modulation of the Curie-Weiss temperature in photorefractive $\text{K}_{1-x}\text{Li}_x\text{Ta}_{1-y}\text{Nb}_y\text{O}_3:\text{Cu}$, V [J]. Physical Review B, 1997, 55(19): 12818-12821.
- [12] Yao B, Tian H, Hu C P, et al. Wavelength dependence of electro-optic effect in paraelectric potassium sodium tantalate niobate single crystal [J]. Applied Optics, 2013, 52(34): 8229-8232.
- [13] Geusic J E, Kurtz S K, van Uitert L G, et al. Electro-optic properties of some ABO_3 perovskites in the paraelectric phase [J]. Applied Physics Letters, 1964, 4(8): 141-143.
- [14] Zhu W B, Chao J H, Chen C 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: 33143.
- [15] Nakamura 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.
- [16] 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 $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ [J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(13): 131115.