

基于钽铌酸钾二次电光效应的光束偏转原理、器件及应用

刘冰, 王旭平*, 杨玉国, 卢延延, 禹化健, 吴丰年

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 钽铌酸钾(KTN)电光偏转器件具有角度大、电压低、无惯性和体积小等优点,近年来获得广泛关注。回顾了国内外 KTN 晶体器件及其应用的研究现状,阐述了基于该晶体空间电荷、组分梯度和温度梯度的电光偏转的基本原理,讨论了器件的特征参数和偏转性能的主要影响因素,介绍了几种基于 KTN 电光偏转的元器件及应用实例,总结了目前需要解决的问题及未来的发展趋势。

关键词 材料; 偏转器; 钽铌酸钾; 电光效应; 空间电荷

中图分类号 O437 **文献标志码** A

doi: 10.3788/LOP57.071609

Principles, Devices, and Applications of Beam Deflection Based on Quadratic Electro-Optic Effect of Potassium Tantalate Niobate

Liu Bing, Wang Xuping*, Yang Yuguo, Hu Yanyan, Yu Huajian, Wu Fengnian

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

Abstract Potassium tantalate niobate (KTN) electro-optic deflection devices attract much attention in recent years due to the advantages of large angle, low voltage, no inertia, and small size. The research progress of KTN crystal devices and applications at home and abroad is briefly reviewed. The basic principles of electro-optic deflection based on the space charge, composition gradient, and temperature gradient of the crystal are described. The characteristic parameters and main influencing factors of deflection properties of the devices are discussed. Several kinds of components and application examples based on KTN electro-optic deflection are introduced and the current problems and future trends are also summarized.

Key words materials; deflectors; potassium tantalate niobate; electro-optic effect; space charge

OCIS codes 160.2100; 230.2090; 120.5800; 260.1180

1 引言

光束偏转器又称光束扫描器,是按一定规律改变光束在空间中传播方向的器件。从本质上来看,光束偏转是一种通过在光束截面内引入线性相位延迟,使不同光线的等相面发生变化而导致光束传播方向发生改变的现象。光束偏转技术广泛应用于显示^[1]、传感^[2]、光存储^[3]、激光打印^[4]、显微成像^[5]和

激光加工^[6]等领域。

目前的光束偏转技术可分为机械式和非机械式两种,传统的机械式偏转通常采用转镜^[7]、振镜^[8]或微机电(MEMS)扫描镜^[9],机械部件的惯性导致扫描频率和稳定性不高,而非机械式的光束偏转技术通常采用声光偏转器件(AOD)^[10]或电光偏转器件(EOD)^[11-13],具有器件尺寸小、易于实现高频扫描的优点,尤其是电光偏转器件,在偏转角度和响应速

收稿日期: 2020-01-06; **修回日期:** 2020-01-17; **录用日期:** 2020-02-10

基金项目: 国家自然科学基金(51972179,51672164)、山东省重大科技创新工程项目(2018CXGC0412)、山东省高等学校青创科技计划(2019KJA003)、山东省自然科学基金(ZR2017MEM016)

* **E-mail:** wangxp@sdas.org

度方面比声光偏转器件更具优势,更能满足高速随机扫描领域的应用需求。

电光偏转器件是利用电光效应来改变光束在空间的传播方向,即通过外加电压在电光效应作用下使晶体折射率发生变化,从而改变光的传播方向。早期的电光偏转器件是棱镜形状的^[14],这种棱镜结构的电光偏转器的优点是可实现快速响应和连续变化的偏转,但由于偏转只发生在两种材料的界面,偏转角度通常小于 1° ^[15],要获得更大的偏转角度需要利用多个棱镜组成阵列^[16],导致器件尺寸大、结构复杂,且需要较高的驱动电压,应用受到限制。

另一种电光偏转是利用垂直于光束传播方向的折射率梯度产生的偏转实现的,通常采用特殊形状的电极^[17-19]在晶体内部制造梯度电场,电光效应作用下在垂直于光束传播方向上形成梯度折射率分布,光束会向折射率梯度增加的方向偏转,偏转角度可通过外加电压控制。梯度折射率偏转的优点在于光束偏转在传播过程中不断累积,与棱镜结构的偏转器件相比,可利用更小尺寸的器件获得更大的偏转角度。

上述两种基于棱镜结构和折射率梯度的偏转都依赖于电光效应引起的折射率变化,而电光效应根据折射率变化与外加电场的关系可分为线性电光效应和二次电光效应,由于一般晶体的二次电光效应都比线性电光效应小得多,目前商用的电光偏转器件都是基于线性电光效应的,对二次电光效应的利用甚少。但近年来,国内外报道了一系列优异的二次电光晶体材料(如 BaTiO_3 , SrTiO_3 和 $\text{Sr}_x\text{Ba}_{1-x}\text{Nb}_2\text{O}_6$)^[20-22],同样可以实现对光束传播方向的控制,而且在响应速度、偏转电压等各方面性能都比目前广泛使用的线性电光晶体材料优越很多,其中最具有代表性的便是钽铌酸钾晶体^[23]。

立方相钽铌酸钾晶体($\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$, KTN)在结构上属 $m3m$ 点群,具有对称中心,其最低阶的电光效应为二次电光效应,电光系数可达 $10^{-14} \text{ m}^2/\text{V}^2$ 量级^[23],是目前已知的具有最大二次电光效应的晶体^[24]。当温度控制在其居里点附近时,在 500 V/mm 外加电压下的折射率变化可达到 1.52×10^{-2} ,同样条件下利用铌酸锂晶体的线性电光效应得到的折射率变化只能达到 9.0×10^{-5} ^[25]。而且由于该晶体可通过调整Ta/Nb组分来改变其居里点和二次电光系数,可以针对特定应用的要求设计和优化晶体性能。近年来,KTN晶体被用于制作电光

调制器^[26]、动态光波导^[27]和高速光束扫描器^[28]等光电功能器件,展现出巨大应用潜力。

KTN晶体是钽酸钾和铌酸钾的固溶体混晶,由于其非一致熔融的特点,生长高质量的光学晶体非常困难,这限制了其发展。2003年,日本电报电话公司(NTT)在高光学均匀性KTN晶体生长方面取得突破性进展^[29],发现了基于空间电荷控制的电光偏转现象^[30],先后设计和开发出电光偏转器^[31]、调制器^[26]、变焦透镜^[32]和扫描光源^[33]等器件,并已推向商业化。美国陆军研究实验室(ARL)的Hoffman与宾夕法尼亚大学联合开展了一系列KTN电光器件的研究^[34-41],尤其在器件响应速度的提高方面取得较大突破^[38]。罗马大学的DelRe与耶路撒冷希伯来大学的Agranat等合作报道了KTN晶体中的“无尺度”光学传播效应^[42-43]和超晶格衍射现象^[44],在基于KTN的新型光学效应的研究方面做出了开创性的贡献。在国内,相关研究则主要集中在山东省科学院新材料研究所的王旭平团队和哈尔滨工业大学的周忠祥团队,王旭平团队发现了基于KTN组分梯度的电光偏转现象,并在离子掺杂型KTN晶体及器件方面开展了一系列工作^[45-48];周忠祥团队在KTN极性纳米微区的演化规律及其对电光偏转的性能调控机理研究方面取得了显著成绩^[49-51]。

本文针对基于KTN晶体二次电光效应的梯度折射率偏转,回顾了相关理论、实验、器件和应用方面的国内外研究现状,分析了主要存在的问题及发展趋势。

2 KTN晶体电光偏转的基本原理

基于垂直于光束传播方向的折射率梯度引起的电光偏转,容易获得更大的偏转角度。根据梯度折射率的产生机制不同,目前报道的KTN电光偏转主要包括三种类型:基于空间电荷形成的不均匀电场产生的光偏转、基于晶体组分梯度的光偏转和基于温度梯度的光偏转。

2.1 基于空间电荷形成的不均匀电场产生的光偏转

日本NTT公司的Nakamura等^[52]于2006年首次在钽铌酸钾晶体上发现了基于空间电荷控制的电光偏转,他们选择Ti作为电极材料并采用蒸发镀膜工艺使其与晶体形成欧姆接触,外加电压使电子注入晶体形成空间电荷并在晶体内部形成不均匀分布的空间电场,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(图1)。

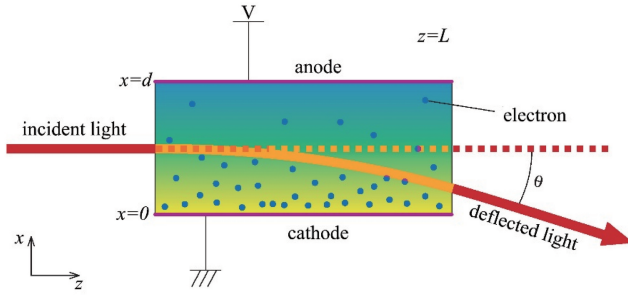

 图1 空间电荷控制的电光偏转^[52]

 Fig. 1 Space-charge-controlled electro-optic deflection^[52]

利用高斯定律和电流连续性方程并结合边界条件可以计算出晶体内部空间电荷场的分布^[53],即

$$E(x) = \frac{3}{2}E_0\sqrt{\frac{x}{d}}, \quad (1)$$

式中: E_0 为不考虑空间电荷效应的电场强度,即 $E_0=V/d$, V 、 d 、 x 分别表示外加偏转电压、电极间距和该位置与阴极的距离。

若入射光的偏振方向与电场方向平行,在二次电光效应作用下的折射率变化可表示为^[53]

$$\Delta n(x) = -\frac{1}{2}n^3s_{11}E(x)^2, \quad (2)$$

式中: n 为晶体不加电场时的折射率; s_{11} 为晶体的二次电光系数,也可以用极光系数(即极化形式的二次电光系数) g_{11} 表示为^[23,37,54]

$$s_{11} = g_{11}\epsilon_0^2(\epsilon_r - 1)^2 \approx g_{11}\epsilon_0^2\epsilon_r^2(\epsilon_r \gg 1), \quad (3)$$

式中: ϵ_0 和 ϵ_r 分别为真空介电常数和介质的相对介电常数; g_{11} 只与晶体组分及入射光的波长有关,与温度及介电常数无关。可见,二次电光系数与相对介电常数的平方成正比,通常用KTN的相对介电常数来衡量二次电光系数的大小。

当透光距离为 L 时,梯度折射率引起的光束偏转角度可表示为^[55]

$$\theta(x) = L \frac{d}{dx} \Delta n(x). \quad (4)$$

将(1)~(3)代入(4)式,得到电光偏转角度的表达式为

$$\theta(x) = -\frac{9}{8}n^3g_{11}\epsilon_0^2\epsilon_r^2\frac{L}{d}E_0^2. \quad (5)$$

(5)式中负号表示光束总是向阴极偏转,因此当外加电压反向时,电子会从反向注入,光束向相反的方向偏转。Nakamura利用 $6\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 的晶体(二次电光系数 s_{11} 为 $2.2 \times 10^{-14}\text{ m}^2/\text{V}^2$)在 $\pm 0.5\text{ kV/mm}$ 的驱动电压下获得了 $\pm 125\text{ mrad}$ (即 $\pm 7.16^\circ$)的偏转^[53]。

Nakamura等^[53]提出的这种空间电荷控制的偏

转理论模型在电场频率提高到一定幅度时,注入电子来不及响应,偏转角度便会受到影响^[56]。Miyazu等^[30]的计算表明,若KTN晶体内的电子迁移率为 $3.3\text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ^[57],在厚度为 1 mm 的晶体上外加 400 V 电压,当电场频率超过 42 kHz ,注入电子便无法到达阳极,偏转角度会大幅减小,但Miyazu等^[58]用实验证明,即使电场频率提高到 400 kHz ,偏转角度仍可基本保持不变,Nakamura的理论模型无法解释这一现象。

Miyazu等^[30]针对高频电压下的偏转提出了一种新的理论模型,采用图2所示的方式加电压,周期性插入的低频电压用于注入电荷,进入晶体内部被陷阱俘获形成空间电荷场,并在电光效应的作用下形成梯度分布的折射率;高频交流电压用于改变折射率梯度的大小,控制电光偏转的角度。这种模型下,电荷被提前注入,高频电压下可认为陷阱电荷是不动的,电光偏转的响应速度不再受电荷迁移速度的影响。

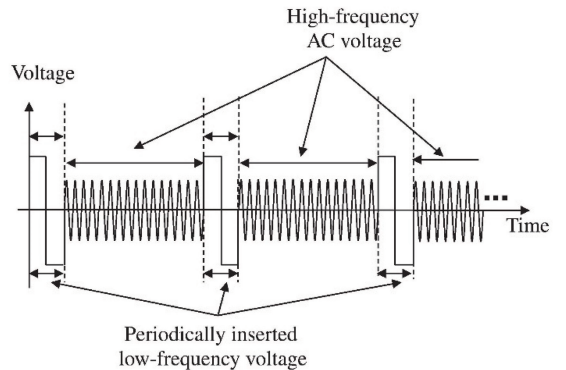

 图2 电光偏转新模型采用的电压波形^[30]

 Fig. 2 Voltage profile of new electro-optic deflection model^[30]

假设被俘获的陷阱电荷密度为 N ,根据高斯定理,晶体内部的电场分布可表示为

$$E(x) = -\frac{eN}{\epsilon} \left(x - \frac{d}{2} + \frac{\epsilon V}{eNd} \right), \quad (6)$$

式中: e 为元电荷; ϵ 为介电常数。

将(6)、(3)式代入(2)式,得到折射率变化为

$$\Delta n(x) = -\frac{1}{2}n^3 g_{11} e^2 N^2 \left(x - \frac{d}{2} + \frac{\epsilon V}{eNd} \right)^2. \quad (7)$$

将(7)式代入(4)式,得到偏转角度为

$$\theta(x) = -n^3 g_{11} e^2 N^2 L \left(x - \frac{d}{2} + \frac{\epsilon V}{eNd} \right). \quad (8)$$

新理论模型给出的偏转角度与偏转电压成正比,而空间电荷控制的偏转模型的偏转角度与电压的平方成正比。Miyazu 等^[30]用实验对新提出的模型进行了验证,采用图 2 的电压波形,其中用于电荷注入的周期性低频电压为 400 V(保持 5 ms),用于电光偏转的高频交流电压为 100 kHz 并保持 30 ms,实验结果如图 3 所示,曲线 1 很好地证明了偏转角度随外加电压的线性增长规律,但是曲线 2 和 3 中,当电压较高时这种线性出现偏离,这是由电光效应的饱和造成的^[57]。

2.2 基于晶体组分梯度的光偏转

KTN 晶体是 KNbO_3 和 KTaO_3 的固溶体混晶,其非一致熔融特性导致晶体生长时熔体和晶体组分不同,得到的晶体组分在生长方向上呈梯度变

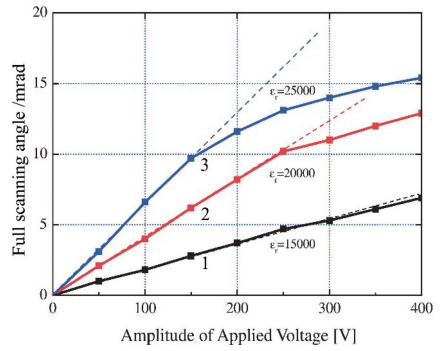


图 3 100 kHz 下的偏转角度随外加电压的变化规律^[30]

Fig. 3 Deflection angle as a function of applied voltage at 100 kHz^[30]

化^[46,59-60],形成晶体本身固有的梯度折射率。王旭平等^[45]提出了基于钽铌酸钾晶体组分梯度的光束偏转,如图 4 所示。

图 4 中晶体沿 c 向具有组分梯度,在垂直于组分梯度的 a 方向施加电压,光束中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。假设电极与晶体为肖特基接触,即没有空间电荷注入,晶体内为均匀电场 E_0 ,根据(2)式,折射率变化可表示为

$$\Delta n(z) = -\frac{1}{2}n^3(z)s_{11}(z)E_0^2, \quad (9)$$

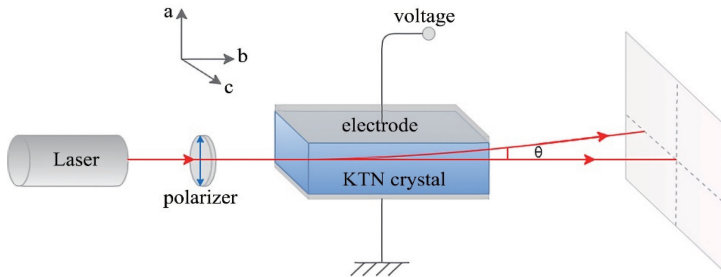


图 4 基于 KTN 组分梯度的电光偏转示意图^[45]

Fig. 4 Schematic of electro-optic deflection based on KTN composition gradient^[45]

式中: z 为组分梯度方向的坐标; $n(z)$ 和 $s_{11}(z)$ 为该方向在不加电压时的折射率和二次电光系数的分布。由(4)、(9)式得到基于组分梯度偏转的角度为

$$\theta(z) = -\frac{1}{2}LE_0^2 \frac{d}{dz} [n^3(z)s_{11}(z)]. \quad (10)$$

(10)式表明偏转角度与电压的平方成正比。Wang 等^[45]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 偏转电压条件下可以实现最大 50 mrad 的偏转,偏转角度随外加电压呈抛物线规律变化,且电压反向时偏转方向不变(图 5),与(10)式给出的规律一致。Tian 等^[61]通过人为控制原料配比、晶体尺寸和生长温度,制备了折射率梯度

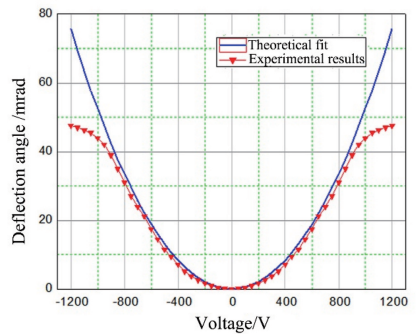


图 5 基于 KTN 组分梯度的电光偏转角度随外加电压的变化^[45]

Fig. 5 Variation in electro-optic deflection angle with applied voltage based on KTN composition gradient^[45]

为 $2.65 \times 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$ 的晶体, 利用该晶体在 313 V/mm 的外加电压条件下获得了 0.61° 的偏转。

2.3 基于温度梯度的光偏转

立方相 KTN 晶体的相对介电常数 ϵ_r 遵从居里外斯定律, 其随温度的变化可近似表示为^[62]

$$\epsilon_r = \epsilon_L + \frac{C}{T - T_c}, \quad (11)$$

式中: T 和 T_c 分别表示晶体的实际温度和居里点; ϵ_L 和 C 为拟合系数。由于晶体的介电常数和二次电光系数是随温度变化的, 根据(2)、(3)式, 折射率的变化不仅取决于外加电场, 而且还与晶体的温度有关, 因此, 在晶体内部特定方向上制造温度梯度(图 6), 同样可产生梯度折射率分布效应, 实现电光偏转。

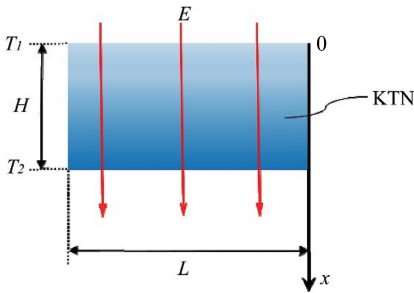


图 6 KTN 晶体温度梯度示意图^[37]

Fig. 6 Diagram of temperature gradient of KTN^[37]

Zhu 等^[37,63] 利用居里点为 22°C 、尺寸为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 的晶体, 控制两端面温度为 23°C 和 38°C , 得到偏转角度随外加电压的变化曲线, 如图 7 所示。与组分梯度的偏转类似, 偏转角度与外加电压的平方成正比, 且总是向温度高的方向偏转, 不因电压反向而改变。此外, 他们通过测试得到了这种偏转的响应时间可达到 77 ns , 认为 KTN 晶体的电容和电路中的阻抗组成的 RC 电路的时间常数限制了电光偏转的响应速度。

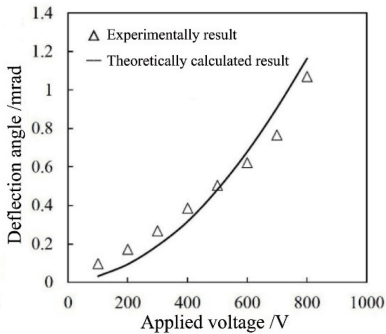


图 7 温度梯度引起的电光偏转角度随电压的变化^[63]

Fig. 7 Temperature gradient induced electro-optic deflection angle varies with applied voltage^[63]

3 KTN 晶体电光偏转的特征参数

3.1 最大偏转角度

根据(5)式, 基于空间电荷控制的电光偏转, 其偏转角度取决于外加电压、介电常数、空间电荷密度和通光长度等。NTT 公司^[52] 在厚度为 0.5 mm 、长度为 5 mm 的晶体上施加 $\pm 250 \text{ V}$ 的电压, 获得了 $\pm 125 \text{ mrad}$ (14.3°) 的偏转; 而基于 LiTaO_3 棱镜结构的偏转器件^[19], 获得 $\pm 127 \text{ mrad}$ 的偏转却需要在 15 mm 长的晶体上施加 $\pm 14.2 \text{ kV/mm}$ 的偏转电压, KTN 晶体大幅降低了电光偏转器件的驱动电压。但是传统的基于振镜、转镜和微机电系统 (MEMS) 等机械偏转器件的偏转角度可以达到 $500 \sim 1000 \text{ mrad}$ ^[64], 进一步提高 KTN 电光偏转器的偏转角度的主要方法有:

1) 增加通光距离。尽管可以直接采用更长的晶体来获得更大的偏转角度, 但受晶体光学均匀性的制约, 这种方法可能会降低光斑质量, 另外偏转的出射光束也可能被表面的金属电极阻挡, 限制最大偏转角度。Naganuma 等^[65] 提出在入射和出射端增加反射镜的方法[图 8(a)], 使光束三次通过晶体, 通光距离和偏转角度提高到原来的 3 倍。Sakamoto 等^[66] 采用两块五边形 KTN 晶体组合[图 8(b)], 光束在每块晶体中经历三次反射, 进一步大幅增加了通光长度。这些方法的意义在于可采用更小尺寸的晶体获得更大的偏转角度, 有利于器件向小型化和低功耗发展。

2) 增加偏转电压。前面提到的几种类型的 KTN 偏转器件的偏转角度都随偏转电压的增加而增大, 但由于电光效应存在饱和现象^[57], 最大偏转电压通常被限制在 600 V/mm ^[65]。

3) 提高二次电光系数。根据居里外斯定律 [(10)式], 立方相 KTN 晶体的介电常数在居里点附近取得最大值, 但是越靠近居里点, 极性微区^[67] 的出现越会引起光的散射, 降低光斑质量。为保证偏转的稳定性, 通常使晶体工作在居里点以上 2°C 左右, 但如果能克服居里点附近的散射问题, 靠近居里点可以获得角度更大的电光偏转。

DelRe 等^[68] 发现采用快速降温的方法可以减小极性微区的尺寸。利用 Li 掺杂的 KTN 晶体, 从远高于居里点的温度开始降温, 当降温速度较慢时, 纳米尺度的偶极子簇逐渐聚合成微米尺度的颗粒, 从而引起光散射, 但采用较快的降温速度时, 只有纳米尺度 ($6 \sim 17 \text{ nm}$)^[69] 的极性微区出现, 尺寸比可见

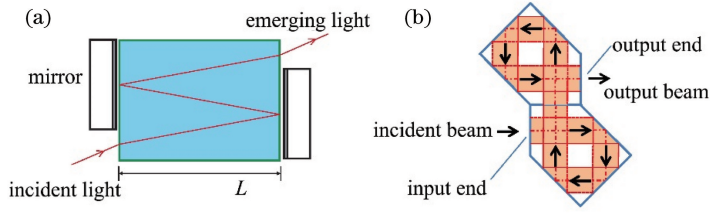


图 8 多次反射结构的 KTN 电光偏转器。(a)两次反射^[65]；(b)六次反射^[66]

Fig. 8 KTN electro-optic deflector with multiple reflection structure. (a) Reflection for twice^[65]
(b) reflection for six times^[66]

光波长小得多,散射现象得到解决。

Chang 等^[34]还发现这种快速降温的方法可以增大 KTN 晶体的二次电光系数,而且降温速度越快,这种增强效应越明显。如图 9 所示,以 0.45 °C/s 的速度对 KTN 晶体进行降温,可以得到二次电光系数 $s_{11} - s_{12}$ 为 $6.94 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{V}^2$,比之前报道^[23]的最大二次电光系数 $s_{11} = 2.2 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{V}^2$ 提高了 3 倍。

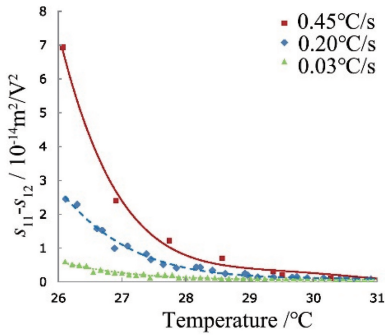


图 9 不同降温速度下的二次电光系数随温度的变化^[34]

Fig. 9 Quadratic electro-optic coefficient as a function of temperature at different cooling rates^[34]

3.2 响应时间与扫描频率

根据 Miyazu 等^[30]提出的高频电压下的电光偏转理论模型,电荷在外加电压的作用下注入晶体时被陷阱俘获形成梯度分布的电场,光束偏转的速度不受电荷迁移速度的影响,只与电光效应本身的响应速度和外加电场的频率有关。Itoh 等^[70]通过测量 KTN 晶体的介电色散特性,研究了 KTN 二次电光效应的高频响应规律,发现 KTN 电光效应的频率带宽可以达到 500 MHz,但 NTT 公司此前能实现的偏转速度却仅为 700 kHz^[71]。Zhu 等^[38]认为这种差距是由场致相变效应导致的,立方相 KTN 晶体的温度略高于居里点,外加电压的作用引起相变,使晶体转变成亚稳态的铁电相,线性电光效应取代二次电光效应,空间电荷引起的光束偏转的角度可表示为

$$\theta(x) = \frac{1}{2} L r_{33} n_e^3 \frac{eN}{\epsilon}, \quad (12)$$

式中: r_{33} 为铁电相 KTN 晶体的线性电光系数; n_e 为非常光的折射率。由(12)式可见,偏转角度和偏转速度取决于空间电荷密度和电荷迁移速度,与外加电压无关。要提高电光偏转的响应速度,需提高温度使晶体工作在真正的顺电相,实验证明采用这种方法可将偏转速度从微秒级提高到纳秒级。如图 10 所示,在居里点为 24 °C 的晶体上外加 2000 V 的电压,将工作温度从 26 °C 提高到 31 °C 后,电光偏转的响应时间从 1.5 μs 提高到了几纳秒。但是远离居里点在提高响应速度的同时会导致二次电光系数大幅下降,偏转角度减小,因此,如何平衡偏转角度与响应时间之间的关系,还有待于进一步研究。

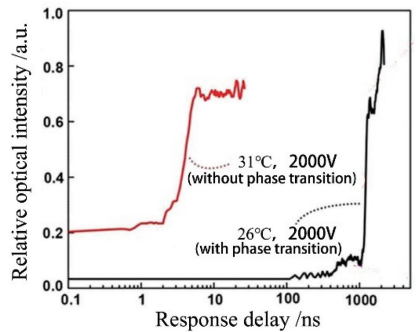


图 10 不同温度 KTN 晶体的电光偏转响应时间^[38]

Fig. 10 Response time of electro-optic rotation of KTN crystal at different temperature^[38]

3.3 分辨率(可分辨点数)

光束偏转器件的分辨率即最大可分辨点数,定义为偏转角度与光束发散角的比值。如图 11 所示,KTN 偏转器的分辨率通常只能达到 20 左右^[53,65],而传统的振镜、转镜和 MEMS 等机械偏转器件的分辨率通常超过 1000^[64]。

要拓宽 KTN 偏转器的应用领域,需通过增大偏转角度或减小光束发散角来提高其分辨率。第 3.1 节中提到的增大偏转角度的几种方法对于提高

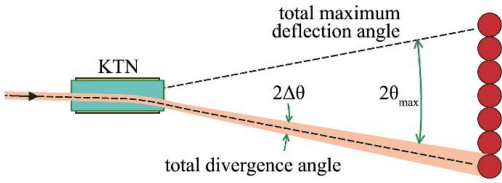


图 11 电光偏转器的可分辨点数^[65]

Fig. 11 Number of resolvable points for electro-optic deflector^[65]

分辨率同样有效,如 Naganuma 等^[65]提出的在晶体入射端和出射端增加反射镜的方法[图 8(a)]使分辨率提高到61.光束发散角的主要影响因素在于

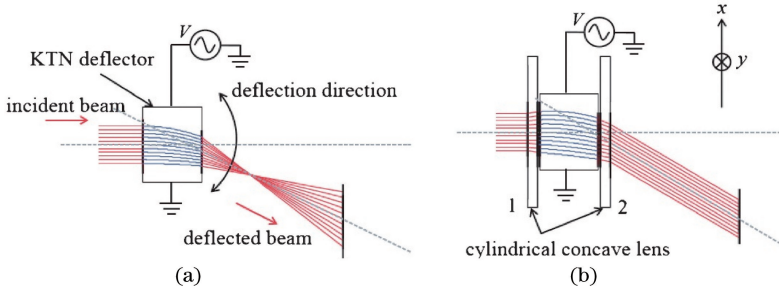


图 12 KTN 偏转光束追踪效果^[73]。(a)光束畸变;(b)光束整形

Fig. 12 Tracing result of deflected beam of KTN^[73]. (a) Beam distortion; (b) beam shaping

尽管可以采取各种方法优化 KTN 器件的分辨率,但这些优化器件的分辨率与传统光偏转器件相比仍低得多。因此,现阶段的 KTN 偏转器件只能用于对分辨率要求不高的应用领域,如医疗显微成像和光谱扫描等,其优势仍在于其响应速度和无惯性扫描的特点。

3.4 损伤阈值

激光损伤阈值是表征晶体抗激光损伤能力的重要参量,也是 KTN 晶体在雷达测距和成像等空间

梯度折射率偏转引起的光束畸变,根据(7)式,KTN 晶体的折射率变化沿电场方向呈抛物线规律分布,Imai 等^[72]也用马赫-曾德尔干涉技术从实验上证明了这一点,因此,KTN 晶体可看作是梯度折射率透镜(GRIN),在光束偏转的同时,使光束发生了会聚[图 12(a)],这种光束畸变会降低器件分辨率。Sasaki 等^[73]采用光束整形的方法,在晶体入射端和出射端各增加一个凹柱面镜[图 12(b)],平行光入射后变为发散光,到晶体中间变为会聚光,在出射端恢复成平行光,利用这种方法将 KTN 偏转器的分辨率提高到原来的 1.5 倍。

光学领域的应用中需要考量的指标。NTT 公司^[74]用 1064 nm 的连续激光进行测试,其损伤阈值大于 $2.6 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$,用脉宽为 10 ns 的脉冲激光进行测试,其损伤阈值约为 10 J/cm^2 ,与 LGS、DKDP 和 LN 等电光晶体材料相比(表 1),KTN 晶体更容易产生激光损伤,这主要是由 KTN 晶体的组分梯度产生的内应力造成的。由于目前 KTN 主要应用领域所使用的激光强度较小,对损伤阈值的要求不高,这方面的相关研究较少。

表 1 几种常用光学晶体的损伤阈值

Table 1 Damage thresholds of several optical crystals

Sample	Damage threshold / $(\text{MW} \cdot \text{cm}^{-2})$	Ratio of damage threshold of sample to damage threshold of LiNbO_3
Colorless LGS	950.00	9.5000
DKDP	3260.00	32.6000
LiNbO_3	100.00	1.0000
KTN	0.26	0.0026

4 KTN 电光偏转性能的影响因素

4.1 电极接触

空间电荷控制的电光偏转依赖于由电极注入晶体形成的不均匀分布的电场,电极中的电子要越过表面势垒进入晶体,电极与晶体形成欧姆接触是必要条件。KTN 晶体可以看作 n 型半导体,由晶体中

的氧空位作为施主提供自由电子^[75],若不考虑表面态的影响,金属与 n 型半导体形成欧姆接触的条件是金属的功函数小于半导体的功函数。Milek 等^[75]分别采用功函数为 4.33 eV 的金属 Ti 和 5.65 eV 的金属 Pt,采用蒸发镀膜制备电极,对比了两种电极材料的 $I-V$ 曲线,发现 Pt 电极只存在 nA 级电流,而 Ti 电极则可达到 μA 级且 $I-V$ 曲线符合

欧姆接触的特征,认为 Ti 电极形成欧姆接触而 Pt 电极为肖特基接触,因此,应该选用 Ti 作为 KTN 电光偏转的电极材料。

但实际上,半导体材料一般都有很高的表面态密度, n 型材料和 p 型材料与金属接触都形成势垒,而与金属功函数关系不大,因此不能单纯用功函数作为欧姆接触电极的选择依据。目前在半导体器件领域常用的制作欧姆接触的方法是用重掺杂的半导体与金属接触,使势垒区宽度变薄,电子可通过隧道效应贯穿势垒,产生相当大的隧道电流,接触电阻变得很小,可以用作欧姆接触,因此,重掺杂的半导体材料很容易与金属形成接近理想的欧姆接触,而不必考虑金属的功函数大小。实际上, Foshee 等^[76]采用 Au 电极和 Chao 等^[63]采用 Ti-Au 复合电极,都实现了空间电荷控制的光束偏转,所以 KTN 晶体形成欧姆接触的条件,比如金属材料的选择、重掺杂和热退火的影响等,还有待进一步的研究。

4.2 介电损耗

KTN 晶体在施加高频电压时,介电损耗通常会伴随热量产生,导致晶体温度升高,介电常数减小,从而使偏转角度变小。Toyoda 等^[77]研究了高频电压下 KTN 晶体的功耗以及其对电光偏转角度的影响,他们在晶体上施加 600 V 的电压,发现随着电场频率的增加,发热功耗随之增加(图 13),在所施加电压为 200 kHz 时发热功率达到 1.2 W,发热引起的温度升高会减小器件的偏转角度,因此必须通过温控来抑制这种偏转角度的退化。

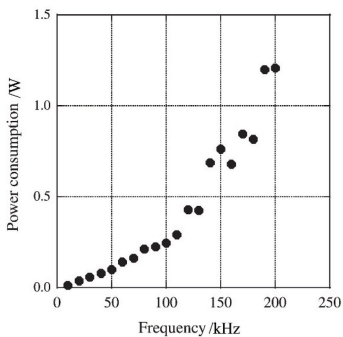


图 13 发热功耗随频率的变化^[77]

Fig. 13 Power consumption versus frequency^[77]

通常采用半导体制冷(TEC)对晶体进行温控,在早期的装置中^[77],晶体上下表面的金属电极块与晶体之间采用导电导热的软胶垫,以避免电致伸缩效应对晶体产生破坏,但是这种软胶垫容易产生较高的热阻,器件响应频率只能达到 200 kHz。后来 Sakamoto 等^[66,78]对温控装置进行了改进,如图 14

所示,金属块与 KTN 晶体之间采用导电银浆粘接,与导热绝缘体之间采用导热硅脂粘接,这种粘接方式有效减少了界面间的热阻,采用这种方法可将偏转器件的响应频率提高到 500 kHz^[66]。

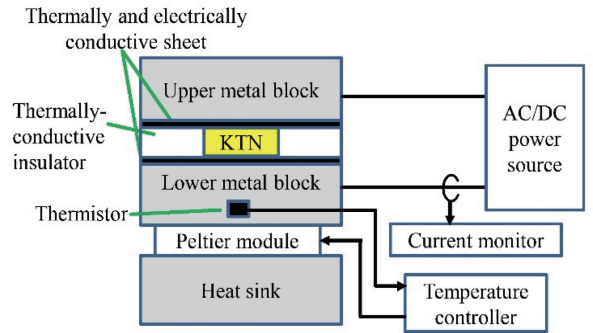


图 14 KTN 偏转器件示意图^[66]

Fig. 14 Schematic diagram of KTN deflector^[66]

4.3 空间电荷分布

实现 KTN 光束偏转的关键在于对空间电荷的控制,空间电荷是在外加电压的作用下由电极向 KTN 晶体中注入电子形成。尽管前面提到的空间电荷的分布是均匀的,但实际上由于俘获电荷产生的屏蔽效应^[79],多数注入电子聚集在阴极附近,导致阳极附近的电荷少得多。为实现对偏转器件的精确调控,需要对空间电荷的时间和空间分布规律进行深入探究。

Huang 等^[80]对 KTN 最大偏转角度和梯度折射率透镜焦距进行了测量,计算得到陷阱电荷的密度为 80 C/m^3 ,但是这样得到的电荷密度是一种平均值,无法获得电荷密度在晶体内部的分布规律。Imai 等^[79]用移相干涉法,通过测量晶体不同位置的相位延迟,获得了晶体内部陷阱电荷的分布规律,发现电荷密度随着晶体与阴极距离的增大而减小,通过增大驱动电压[图 15(a)]或者晶体的介电常数[图 15(b)]可以增加电荷的注入深度。

Imai 等^[79]还通过对电荷注入过程的描述,解释了电荷密度不均匀的原因。金属中的电子在电压的作用下由阴极注入晶体,很容易被晶体内部的局域态陷阱俘获并被限制在陷阱中,同时被俘获的陷阱电荷对后注入的电荷形成屏蔽作用,阻止电荷注入及向阳极运动,因此,尽管 Wemple 等^[81]提出室温下电荷迁移率为 $3 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$,也就是说电荷在 150 V 的电压作用下,穿过 1 mm 的 KTN 晶体在理论上需要的时间小于 $10 \mu\text{s}$,但实际上由于陷阱的俘获和屏蔽效应,电荷移动到指定的位置通常需要更长的时间和更高的电压,而且电荷一旦被陷阱捕

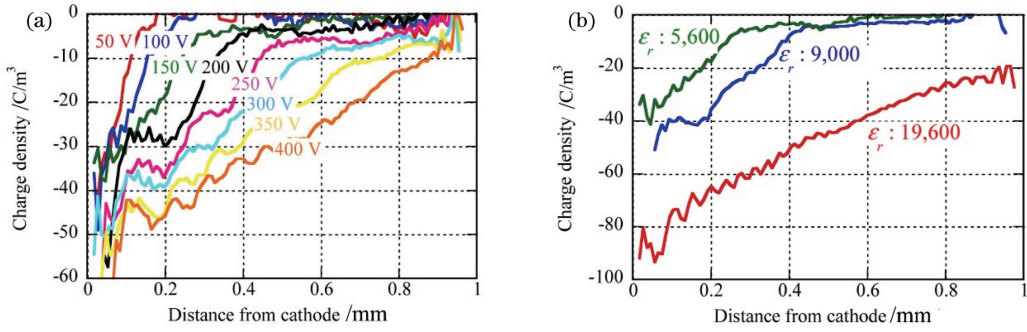


图 15 外加电压作用下 KTN 晶体中的空间电荷密度分布^[79]。(a)不同电压;(b)不同介电常数

Fig. 15 Space charge density distributions in KTN with applied voltage^[79]. (a) With different voltages; (b) with different permittivities

获,在室温下没有特定光照和电压的作用,可以持续几天保持稳定。

Imai 等^[82]通过在晶体上施加具有不同脉宽的电压,进一步探明了空间电荷分布随时间的变化规律。如图 16 所示,在电压作用下,电荷运动逐渐减慢并停止,最终的穿透深度随外加电压的增加而增加,但是电荷未必能够到达阳极,也未必能形成均匀分布的状态。要实现均匀分布的空间电荷状态,通常需要合适的陷阱密度、更大的介电常数和足够高的偏置电压。

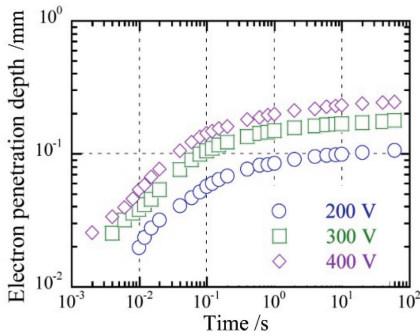


图 16 电荷穿透深度随时间的变化规律^[82]

Fig. 16 Electron penetration depth as a function of time^[82]

4.4 极性纳米微区

极性纳米微区 (PNRs) 是指弛豫型铁电体在铁电-顺电相变温度附近,尤其是高于相变温度时出现的具有局域性极化特征的纳米尺度的微结构。钽铌酸钾晶体具有 ABO₃ 型钙钛矿结构, Ta 和 Nb 原子位于每个 BO₆ 八面体的中心,其极化贡献基本都来自于 B 位 Nb⁵⁺ 离子偏心位移。

Ohta 等^[69]利用布里渊散射的方法对 KTN 晶体内部 PNRs 的尺寸随温度的变化过程进行了表征。晶体中 PNRs 的尺寸在降温过程中随温度的变

化如图 17 所示,当晶体温度远高于居里点时,由于偶极子方向的随机性,它们会相互抵消,在纳米和宏观尺度上都表现出零极化;但当晶体温度低于伯恩斯(Burns)温度 T_B 时^[83-84],布里渊散射出现了中心峰,同时晶体折射率随温度线性变化的规律发生偏离,这表明铌离子的位移使 KTN 晶体的微观局域对称性被打破,开始出现 PNRs;当温度进一步降低至临界温度 T^* 时,晶体中的 PNRs 开始产生相互作用,并且在宏观上对极化相关的光电特性产生不同的影响,这也导致低频介电系数随温度的变化曲线与居里-外斯定律产生了一定的差异;继续降低温度,PNRs 间的联系逐渐增强,尺度逐渐增大,到达居里点 T_c 时,PNRs 聚集成方向一致、极性固定的静态铁电畴,晶体完全转变为铁电相。

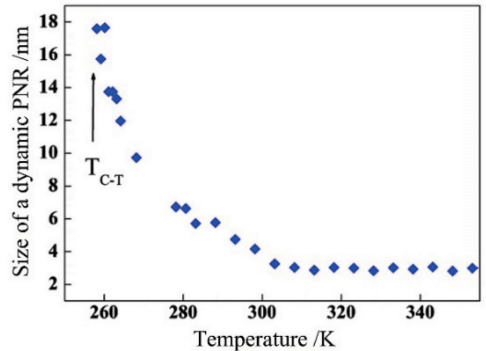


图 17 PNRs 的尺寸随温度的变化规律^[69]

Fig. 17 Size of PNRs versus temperature^[69]

PNRs 的存在使 KTN 晶体在相变点附近展现出许多优异的宏观物理特性,如大幅增强的二次电光效应^[34,36]、电致伸缩效应^[85]和折射率^[86]以及新颖的无尺度光学效应^[42]和反衍射现象^[87],这使 PNRs 可以作为一种有效的宏观物理性能调控手段,有助于优化电光偏转器件的性能,拓展其应用领域。

4.5 场致相变

KTN 晶体的场致相变^[88]是指晶体温度在居里点以上时,在外加电压的作用下发生从顺电相到铁电相的转变,这种相变是由电场使 PNRs 的极化取向趋向一致并形成铁电畴引起的,通常表现为电压作用下的居里点移动和介电增强。Knauss 等^[89]发现 100 V 外加电压可使居里点提高 3 °C。Imai 等^[88]利用介电常数随外加电压的非线性变化特性对场致相变进行了表征,图 18 是采用 Pt 电极得到的 KTN 晶体的电位移-电场强度 (D - E) 曲线。在晶体居里点以上 5.5 °C 逐渐增大电压,介电常数在 3 kV/cm 附近达到最大,其数值是不加电场时的 4 倍,而且温度越靠近居里点,越容易发生相变,这种非线性介电增强效应也越明显,当晶体温度高于某个特定温度时,这种电场引起的相变消失。

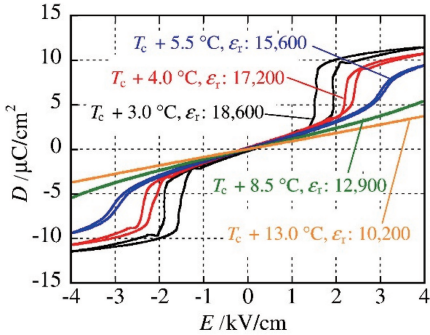


图 18 采用 Pt 电极得到的 KTN 晶体的 D - E 曲线^[88]

Fig. 18 D - E curves of KTN crystal with platinum electrode^[88]

Chen 等^[90]研究了场致相变效应对电光偏转的影响,他们采用居里点为 21.2 °C 的晶体,测试了两种温度下偏转角度随外加电压的变化规律(图 19),发现在 32 °C 时符合(8)式给出的偏转角度随电压线性增加的规律,这说明该温度下无相变发生,但在 25 °C 测试时,随着电压增加,偏转角度增大的速度越来越快。600 V 时的偏转角度是理论值的 3 倍,这种场致相变的介电增强效应有利于 KTN 晶体以更低的驱动电压获得更大的偏转角度。

Chen 等^[40]还发现场致相变与热历史有关,他们利用拉曼光谱研究了升降温过程中的场致相变特点,发现外加电压作用下得到的铁电相的拉曼光谱特征峰强度比正常铁电相的要低,这说明两种铁电相的畴结构存在差别。此外,对于居里点为 21.2 °C 的晶体,对比升温 and 降温过程中在 22 °C 时的场致相变特点,发现升温时由场致相变得到的铁电相中 PNRs 的取向比降温时的取向更加一致,再去掉电

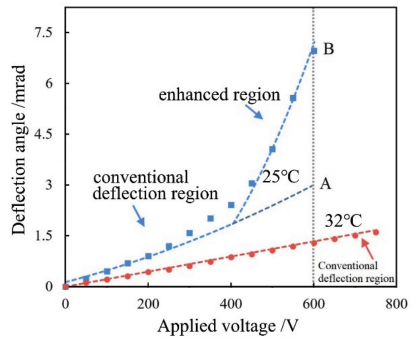


图 19 场致相变引起的偏转角度随外加电压的变化规律^[90]

Fig. 19 Deflection angle caused by field-induced phase transition varies with applied voltage^[90]

场后铁电畴仍然存在,而降温时去掉电场后畴结构消失。因此,KTN 晶体的场致相变具有与温度和热历史都有关的热弛豫特性。

4.6 电致伸缩与机电耦合效应

对多数处于顺电相的铁电体材料而言,其宏观对称性决定了其压电效应和电致伸缩效应都比较弱,但 Tian 等^[85]却发现掺 Li 的 KTN 顺电相晶体在居里点附近具有强的电致伸缩效应,越靠近晶体居里点,这种效应越明显,他们利用居里点为 21 °C 的晶体,在 26 °C 条件下,测得其电致伸缩系数 Q_{11} 为 0.12 m⁴/C²,比其他材料要大得多^[91]。这种强电致伸缩效应同样来源于晶体内部的 PNRs,与普通钙钛矿结构铁电体顺电相中由外加电场拉伸本征晶格引发的电致伸缩效应相比,诱发 PNRs 重新取向所需的电场强度要小很多^[92],这使 KTN 晶体更容易产生强电致伸缩效应,而且当交流电场下由材料应变产生的弹性波频率与该方向的本征机械共振频率相同时,还会引发电机耦合共振。通常情况下铁电体的机电耦合共振都是由压电效应引发的,但是由于 KTN 晶体在居里点附近的电致伸缩系数比一般情况下提高了 1~2 个数量级^[85],使得直接观测到由电致伸缩引发的机电耦合共振成为可能。Meng 等^[93]发现这种机电耦合共振在特定频率下可以增强晶体的表观电光效应,给晶体外加幅值仅为 10 V/mm 的交流电场,采用 Senarmont 补偿法测量晶体电光效应引起的光强调制特性,发现 740 kHz 处出现明显的光强波动幅度增大,这表明发生机电耦合共振,其根源仍然是外电场下 PNRs 的无序-有序重新排列取向。

KTN 晶体的这种电致伸缩效应总是伴随着电光效应产生,必然会对电光偏转产生影响,尽管王磊

等认为电致伸缩对电光效应只有 2.5% 的影响,但实际上在电致伸缩产生的应力变化与机电耦合、弹光效应等的共同作用下,它可能产生的影响变得更加复杂,因此有待于更加深入的研究。

4.7 光辐照

实现空间电荷控制的光束偏转,要求晶体内空间电荷达到均匀分布,且电荷密度越大,能实现的偏转角度越大,但陷阱的俘获效应和阴极附近电荷的屏蔽效应,使大量的电荷聚集在阴极附近,难以到达阳极。为了增加电荷注入深度,Zhu 等^[39]提出采用蓝光光子激发的方法,削弱电荷的俘获效应。由于 405 nm 的光子能量为 3.06 eV,接近 KTN 的带隙 3.18 eV,采用 405 nm 蓝光辐照可使电子获得更大的动能,更容易逃离量子陷阱,从而增加注入深度。他们在晶体上外加 2000 V 电压,发现无蓝光照时电流几乎为零,用 1 W 的 405 nm 蓝光照后,出现了微安级电流,且电流大小与外加电压成正比,这说明蓝光辐照可以增加电荷的迁移能力。他们还从理论和实验上证明了蓝光照射可有效增大 KTN 电光偏转的角度(图 20)。Yuzo 等^[94]发现利用 405 nm 的蓝光照,仅需几十秒的时间即可完成电荷注入,并可以 20 kHz 的频率不间断扫描且保持一个月的时间,偏转角度稳定在 160 mrad。

因此,405 nm 的蓝光辐照可以激发陷阱中的电子重新进入导带,结合电压的调控作用,既可用于重置晶体内的空间电荷分布使其回到初始状态,也可用于促使注入电子快速到达阳极形成均匀的电荷分布。

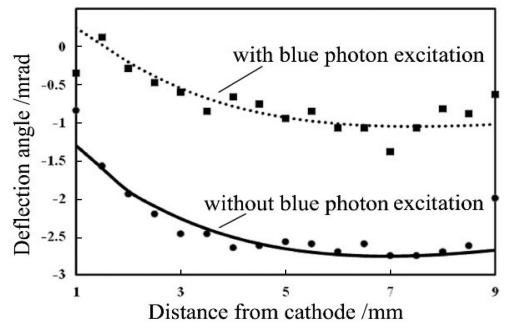


图 20 2000 V 电压下晶体中 x 方向不同位置的光束偏转角度^[39]

Fig. 20 Deflection angle at different positions in x direction with 2000 V applied voltage^[39]

5 KTN 电光偏转元器件设计及应用

5.1 KTN 变焦透镜

基于空间电荷控制的光束偏转在产生偏转效应的同时也伴随着光束会聚(见 3.3 节),Imai 等^[95]充分利用这种效应,改变电极结构,设计出一种不依赖于空间电荷的变焦透镜。如图 21 所示,在晶体上下表面制作相互平行的两对电极,电极材料选用 Pt 以阻止电荷注入,在电压的作用下,入射光中偏振方向平行于 x 轴的分量形成柱面会聚效应,平行于 y 轴的分量形成柱面发散效应,控制入射光的偏振方向便可得到所需的变焦透镜。但是这种偏振依赖性会给应用带来不便,Inagaki 等^[96]在两个相同的 KTN 变焦透镜中间加半波片,将两个偏振分量转换到相同的偏振方向,使会聚或发散效应不依赖于光的偏振。

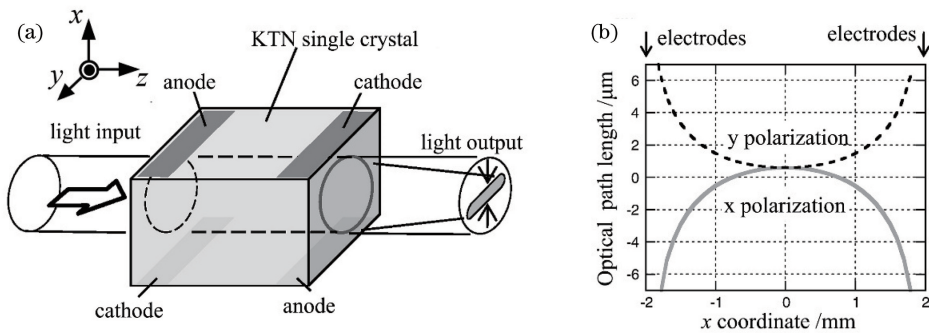


图 21 KTN 变焦透镜^[95]。(a)装置;(b) x 方向不同位置的光程

Fig. 21 Illustration of KTN varifocal lens^[95]. (a)Apparatus; (b)optical path length at different positions in x direction

与其他基于压电^[97]、声梯度^[98]和电润湿^[99]的变焦透镜相比,KTN 变焦透镜的优点在于可实现高速随机操作以及较大的通光孔径,其响应速度可达到微秒级,但其光焦度(偏折光线的的能力)比其他类型的透镜低一个数量级^[100],后来,Kawamura 等^[101]将透镜改为八边形棱镜结构,光

焦度提高了 2.5 倍。此外,Zhu 等^[102]通过将 KTN 变焦透镜的工作温度控制在不发生场致相变的临界温度以上,将器件的响应时间缩短到了 50 ns。KTN 变焦透镜的这种超高速响应和无惯性扫描的特点,使其特别适用于生物医学领域活体检测的三维成像。

5.2 基于 KTN 光束偏转的新型光开关

传统的电光开关是在两个正交偏振片中间放置电光晶体,利用强度调制实现光开关的效果,KTN 晶体也可以用于制作这种基于强度调制的光开关^[103]。实际上,利用 KTN 晶体的电光偏转效应也可以实现光开关的效果,即:在不加电场时,光束沿直线传播穿过晶体,光路为开;加电场后,光束偏离原来的传播方向,在原光束传播方向上的光路关闭。Sasaki 等^[104]利用这种思路设计了一种多通道的光开关(图 22),通过调整外加电压的大小控制光束偏转的角度,实现光束在各通道间切换的目的,开关时间达到 ms 量级。Gong 等^[105]利用 KTN 组分梯度产生的光偏转设计了一种光开关,其优点是体积小(mm 级)、消光比可调(0~1)且光谱响应范围宽(491~1064 nm)。

此外,Zhang 等^[106]还发现了一种基于 KTN 晶体光学超晶格衍射产生的光开关现象,即通过外加

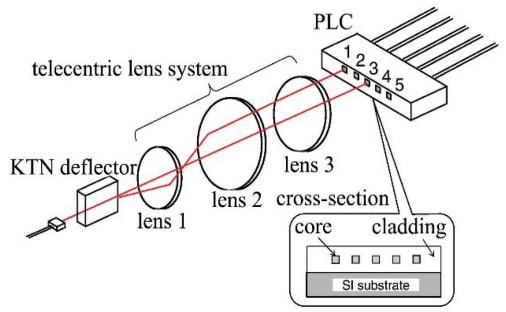


图 22 1×5 光开关实验装置示意图^[104]

Fig. 22 Schematic of experimental setup for 1×5 optical switch^[104]

电压控制 KTN 晶体的超晶格衍射光斑,使其在图 23(b)、(c)所示两种状态间切换。这种现象是由晶体本征的折射率光栅与弛豫相变过程中极化畴的共同作用下产生的,与电光效应和光偏转没有关系,但对于 PNRs 的演化机理及新型光电功能器件的设计都有指导意义。

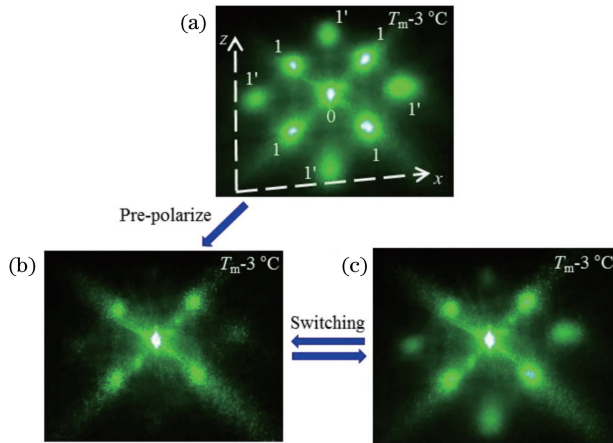


图 23 电场作用下掺铜 KTN 晶体中的超晶格光开关效应^[106]。(a)自发形成的衍射光斑;

(b)(c)加 1 Hz 方波电压后衍射光斑的两种切换状态

Fig. 23 Electric-field-induced superlattice optical switching effect in Cu-doped KTN crystals^[106]. (a) Diffraction spot induced by spontaneously formed superlattices; (b)(c) optical switching states of diffraction spot with 1 Hz square-wave voltage

5.3 波长可调谐(扫频)光源

扫频光源是指波长随时间周期性变化的激光光源,通常由调谐滤波器、谐振腔和增益介质三部分组成,如图 24 所示。KTN 晶体用于取代调谐滤波器中传统的振镜、转镜或 MEMS 等扫描器件,通过改变光栅的入射角度实现波长的快速调谐。近年来,NTT 公司开展了 150~200 kHz 范围内 KTN 扫频光源的研究^[107-108],得到了中心波长为 1320 nm、光谱范围为 110 nm、平均输出功率为 8 mW、瞬时线宽小于 0.1 nm 的可调谐激光,其扫频速度已超过目前商用扫频光源在 50~100 kHz 范围内的主流指标。

Okabe 等^[109]利用 200 kHz KTN 扫频光源设计的光学相干层析成像系统获得了草莓表面的三维光学相干断层扫描(3D-OCT)图像(图 25)。基于 KTN 晶体的 OCT 光源,是近年来 KTN 偏转器最成功的应用实例,NTT 公司已经开始对其进行商业化推广,未来通过技术手段的革新有望使其在生物医疗领域获得广泛应用。

5.4 高速光谱仪

光谱仪是利用光电倍增管探测器测量不同波长谱线强度的装置,通常由波长色散系统、狭缝和光学探测器组成。基于 KTN 偏转器设计的光谱仪

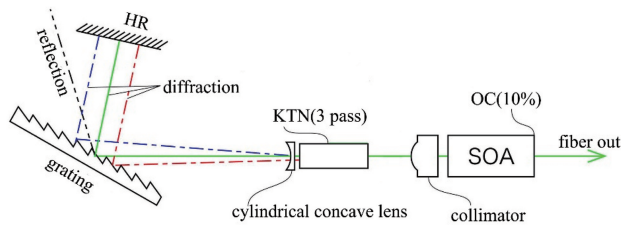


图 24 基于 KTN 电光偏转器的扫频光源装置^[33]

Fig. 24 Setup of swept light source with KTN electro-optic deflector^[33]

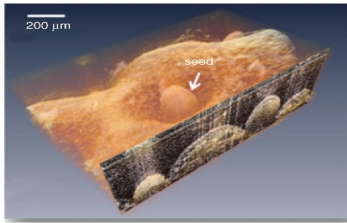


图 25 草莓表面的 3D OCT 图像^[109]

Fig. 25 3D OCT image of strawberry surface^[109]

(图 26)在保留色散棱镜、狭缝和光电倍增管探测器的前提下,用 KTN 偏转器控制光束进入色散系统的角度,由于出射角度取决于波长和入射角,可以通过控制 KTN 偏转器上的电压来控制不同波长的光通过狭缝进入探测器。NTT 公司设计的光谱仪^[110]采用了晶体尺寸为 $6\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$ 的 KTN 偏转器和 60° 的 BK7 等边色散棱镜,用波长为 $400\text{ }\mu\text{m}$ 的光对其进行测试,在可见光波段的分辨率可达 $10\sim 40\text{ nm}$,响应时间达到 ms 量级。目前该公司在利用这种高速光谱仪进行 ms 级光学脉冲和超快荧光现象的探测研究。

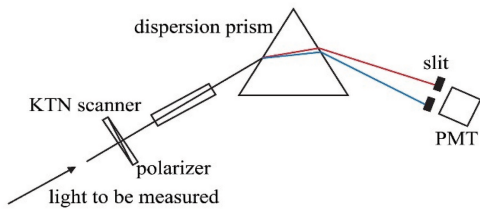


图 26 基于 KTN 光束偏转器的光谱仪示意^[110]

Fig. 26 Schematic of spectrometer using KTN optical beam deflector^[110]

5.5 非线性光学显微镜

非线性光学显微成像技术,如双光子荧光、二次或三次谐波、四波混频、受激拉曼散射和交叉相位调制技术等,因其成像焦斑比激发光的光斑更小,具有空间分辨率高、穿透深度大、更小的光损伤和光漂白等优点,在物理、化学和生物领域获得广泛应用。Isobe 等^[111]开发了一种空间重叠调制的光学显微成像技术(SPOM-NOM),能够消除散焦信号并提高三维空间分辨率,但是其图像采集时间比典型的双光子

荧光显微镜多 1000 倍。为解决这一问题,用 KTN 电光偏转器取代原有的振镜偏转器^[112],将光束指向器的调制频率由原来的 1 kHz 提高到 200 kHz 。

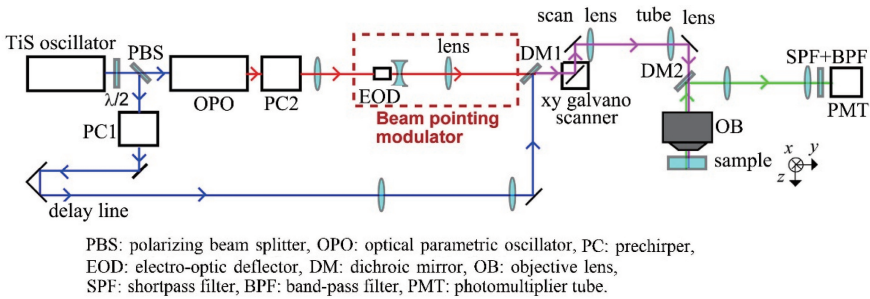
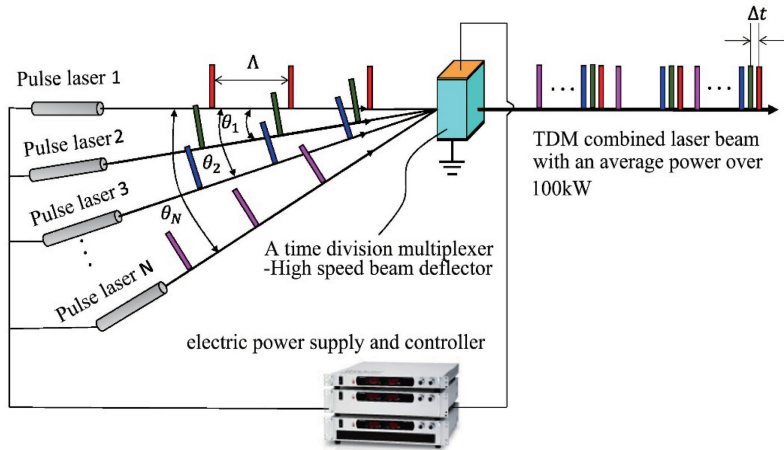
图 27 为 Isobe 等^[112]为缩短图像获取时间而设计的系统,使用具有锁模的钛宝石振荡器和光学参量放大器产生两种频率的脉冲,分别在钛宝石振荡器后面使用 SF10 棱镜对、在光参量放大器后使用 S-TIH6 棱镜对和啁啾镜,以补偿光学组件的色散。采用光学延迟线使两个频率的脉冲激光在时间上重叠、使用二向色镜使二者在空间上重叠,KTN 电光偏转器用于调制 OPO 产生的脉冲信号的光束指向,叠加产生的非线性信号被 DM2 分离出来,通过目镜聚焦在样品中,用于双光子荧光激发成像或二次谐波成像,产生的图像信号由光电倍增管通过锁相放大器进行检测。

这种采用 EOD 的 SPOM-NOM 可以提高空间分辨率并抑制散焦背景,而且加深了高度散射样品内部的成像深度,其成像速度比之前的装置提高了 200 倍,这种速度的提高有助于实现活体生物组织的实时成像。

5.6 大容量时分多路激光光束合成技术

高能激光可用作激光定向能量武器,用于销毁无人飞行器和飞行中的火箭和炮弹等,其平均功率可达到 100 kW 以上,但单孔径单横模固态激光器最大输出功率通常小于 10 kW ,Yin 等^[113]提出了一种基于纳秒级 KTN 偏转器设计的大容量时分多路激光光束合成技术,将大量脉冲激光器阵列的激光束组合在一起,形成更高能量的单孔径光束。

图 28 中的系统由激光脉冲元件阵列、用作时分多路复用器(TDM)的高速 KTN 偏转器和相应的电路驱动和控制器组成。从不同角度入射的激光,经 KTN 偏转器后,传播方向都沿同一方向传播,通过控制每个脉冲激光的脉冲延迟时间,可以将 N 个激光元件阵列的激光脉冲组合在一起。实验结果表明,KTN 偏转器可以满足 TDM 的所有要求,包括响应时间(ns 量级)、偏转精度($1\text{ }\mu\text{rad}$)、偏转孔径

图 27 空间重叠调制非线性光学显微系统^[112]Fig. 27 Spatial overlap modulation nonlinear optical microscopy^[112]图 28 时分多路复用光束合成技术^[113]Fig. 28 Illustration of time division multiplexed beam combining technique^[113]

($>1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$)和强大的光束合成能力(>1000 路)。采用这种光束组合方法,可以实现超过 100 kW 的平均功率,在激光定向能量武器和高速激光切割、焊接和印刷等制造领域可以发挥重要作用。实验还发现,KTN晶体可以承受峰值光强度为 85.7 MW/cm^2 的脉冲激光和强度为 2.4 MW/cm^2 的连续激光的长时间照射,未发现明显光损伤。

除上述器件应用之外,Xu等^[114]还提出了将KTN偏转器用于菲涅耳望远镜合成孔径激光雷达成像系统中的构想;刘博团队还提出将KTN的光强调制功能用于三维成像激光雷达系统^[115];华中科技大学的曾绍群团队曾尝试将KTN无惯性扫描技术用于双光子显微成像^[116],但受限于晶体尺寸和组分均匀性,这些想法目前还无法实现。

6 结束语

NTT公司自2003年在KTN晶体的光学质量上取得突破后,先后利用这种晶体设计出偏转器、调制器、光开关和变焦透镜等器件,尤其是在电光偏转方面开展了一系列深入、系统的研究,其中以空间电

荷控制的电光偏转器件的研究最为成功,NTT开发的商业化KTN扫频光源已用于OCT,有望最先应用于医疗显微成像领域。KTN偏转器未来应用的发展方向在于“扬长避短”,充分发挥无惯性扫描的优势,改进分辨率方面的不足,取代传统的机械偏转器件,在对高速偏转有迫切需求的应用领域发挥作用。

尽管在日本NTT公司的研究之后,国内外多个科研机构纷纷投入KTN晶体的研究,但其发展并不均衡,尤其是受晶体生长的限制,大部分研究机构并不具有制备高光学均匀性KTN晶体的能力,KTN电光偏转器的发展在目前首先要解决的仍然是晶体质量问题,即晶体的光学均匀性要满足电光偏转器的应用需求。KTN偏转器作为一种在居里点附近应用的温度敏感型光学器件,实现精确温控是开展科研和实际应用时必须解决的技术问题。不同科研工作者得到的电光偏转角度和响应速度存在较大差异甚至冲突,对于电场作用下欧姆接触的形成条件、空间电荷的运动规律以及居里点附近PNRs对电光偏转性能的调控机理等科学问题,

仍有待于进一步深入研究。近年来研究者在 KTN 晶体上新发现的无尺度光学、光波反衍射和光学超晶格等现象为 KTN 晶体发展注入了新的发展动力,未来 KTN 晶体必将吸引更多关注,并在更多领域获得应用。

参 考 文 献

- [1] He P, Liu J, Zhao T, et al. Compact large size colour 3D dynamic holographic display using liquid crystal display panel[J]. *Optics Communications*, 2019, 432: 54-58.
- [2] Chen Y, Li H J, Qiu Z, et al. Improved extended Kalman filter estimation using threshold signal detection with an MEMS electrostatic microscanner [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(2): 1328-1336.
- [3] Zhu W B, Yao J, Chao J H, et al. Alignment free all solid state angularly multiplexed holographic memory systems [J]. *Asian Journal of Physics*, 2015, 24(12): 1651-1658.
- [4] Dostalova T, Kasparova M, Karel C, et al. Intraoral scanner and stereographic 3D print in orthodontics [J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 10857: 1085706.
- [5] Sherlock B, Warren S C, Alexandrov Y, et al. *In vivo* multiphoton microscopy using a handheld scanner with lateral and axial motion compensation [J]. *Journal of Biophotonics*, 2018, 11 (2): e201700131.
- [6] Shima K, Ikoma S, Uchiyama K, et al. 5-kW single stage all-fiber Yb-doped single-mode fiber laser for materials processing [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10512: 105120C.
- [7] de Loor R. Polygon scanner system for ultra short pulsed laser micro-machining applications [J]. *Physics Procedia*, 2013, 41: 544-551.
- [8] Jaeggi B, Neuenschwander B, Hunziker U, et al. Ultra-high-precision surface structuring by synchronizing a galvo scanner with an ultra-short-pulsed laser system in MOPA arrangement [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8243: 82430K.
- [9] Ra H, Piyawattanametha W, Taguchi Y, et al. Two-dimensional MEMS scanner for dual-axes confocal microscopy [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2007, 16 (4): 969-976.
- [10] Warner A W, White D L, Bonner W A. Acousto-optic light deflectors using optical activity in paratellurite[J]. *Journal of Applied Physics*, 1972, 43(11): 4489-4495.
- [11] Chen Q B, Chiu Y, Lambeth D N, et al. Guided-wave electro-optic beam deflector using domain reversal in LiTaO₃ [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1994, 12(8): 1401-1404.
- [12] Djukic D, Roth R, Yardley J T, et al. Low-voltage planar-waveguide electrooptic prism scanner in Crystal-Ion-Sliced thin-film LiNbO₃ [J]. *Optics Express*, 2004, 12(25): 6159-6164.
- [13] Chiu Y, Stancil D D, Schlesinger T E, et al. Electro-optic beam scanner in KTiOPO₄ [J]. *Applied Physics Letters*, 1996, 69(21): 3134-3136.
- [14] Lee T, Zook J. Light beam deflection with electrooptic prisms [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1968, 4(7): 442-454.
- [15] Scrymgeour D A, Barad Y, Gopalan V, et al. Large-angle electro-optic laser scanner on LiTaO₃ fabricated by *in situ* monitoring of ferroelectric-domain micropatterning [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(34): 6236-6241.
- [16] Lotspeich J F. Electrooptic light-beam deflection [J]. *IEEE Spectrum*, 1968, 5(2): 45-52.
- [17] Bosco A, Boogert S T, Boorman G E, et al. A large aperture electro-optic deflector [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(21): 211104.
- [18] Nashimoto K, Nakamura S, Morikawa T, et al. Fabrication of electro-optic Pb (Zr, Ti) O₃ heterostructure waveguides on Nb-doped SrTiO₃ by solid-phase epitaxy [J]. *Applied Physics Letters*, 1999, 74(19): 2761-2763.
- [19] Hisatake S, Shibuya K, Kobayashi T. Ultrafast traveling-wave electro-optic deflector using domain-engineered LiTaO₃ crystal [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(8): 081101.
- [20] Takagi M, Ishidate T. Anomalous birefringence of cubic BaTiO₃ [J]. *Solid State Communications*, 2000, 113(7): 423-426.
- [21] Nakamura R, Kanematsu Y. Femtosecond spectral snapshots based on electronic optical Kerr effect [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2004, 75 (3): 636-644.
- [22] Gupta S, Paliwal A, Gupta V, et al. Study of birefringence and electro-optic effect in SBN60 thin film [J]. *Ferroelectrics*, 2018, 533(1): 35-42.
- [23] 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.

- [24] Fujiura K, Nakamura K. KTN optical waveguide devices with an extremely large electro-optic effect [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5623: 518-532.
- [25] Yagi S. KTN crystals open up new possibilities and applications[J]. *NTT Technical Review*, 2009, 7(12): 1-5.
- [26] Toyoda S, Fujiura K, Sasaura M, et al. Low-driving-voltage electro-optic modulator with novel $\text{KTA}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ crystal waveguides [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2004, 43(8B): 5862-5866.
- [27] Zhu W B, Chao J H, Wang C, et al. Design and implementation of super broadband high speed waveguide switches[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9586: 95860W.
- [28] Gong D W, Wang C Z, Wang X P, et al. Static volumetric three-dimensional display based on an electric-field-controlled two-dimensional optical beam scanner[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(26): 7067-7072.
- [29] Sawaki M, Motai H. Successful preparation of KTN crystals with the highest reported electro-optic effect and the potential for providing a great improvement in optical device performance [J]. *NTT Technical Review*, 2003, 1(9): 56-58.
- [30] 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.
- [31] Nakamura K. Optical beam scanner using Kerr effect and space-charge-controlled electrical conduction in $\text{KTA}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ crystal [J]. *NTT Technical Review*, 2007, 5(9): 1-8.
- [32] Imai T, Yagi S, Toyoda S, et al. Fast varifocal lenses based on $\text{KTA}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ (KTN) single crystal [J]. *NTT Technical Review*, 2009, 7(12): 1-5.
- [33] Okabe Y, Sasaki Y, Ueno M, et al. 200 kHz swept light source equipped with KTN deflector for optical coherence tomography [J]. *Electronics Letters*, 2012, 48(4): 201-202.
- [34] Chang Y C, Wang C, Yin S, et al. Giant electro-optic effect in nanodisordered KTN crystals [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(22): 4574-4577.
- [35] Chang Y C, Zhu W, Chao J H, et al. Super broadband ultrafast waveguide switches based on dynamic waveguiding effect [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9200: 92000X.
- [36] Chang Y C, Wang C, Yin S, 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.
- [37] Zhu W B, Chao J H, Chen C J, et al. Multi-scanning mechanism enabled rapid non-mechanical multi-dimensional KTN beam deflector [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9958: 99580R.
- [38] 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.
- [39] Zhu W B, Chao J H, Chen C 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.
- [40] Chen C J, Zhu W B, Chao J H, et al. Study of thermal and spatial dependent electric field-induced phase transition in relaxor ferroelectric crystals using Raman spectroscopy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 804: 35-41.
- [41] Zhu W B, Chao J H, Chen C J, et al. New functionalities of potassium tantalate niobate deflectors enabled by the coexistence of pre-injected space charge and composition gradient [J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 122(13): 133111.
- [42] di Mei F. Exploring scale-free optics in nanodisordered crystals [D]. Rome: Sapienza University of Rome, 2016: 15-22.
- [43] DelRe E, di Mei F, Parravicini J, et al. Subwavelength anti-diffracting beams propagating over more than 1, 000 Rayleigh lengths[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(4): 228-232.
- [44] Pierangeli D, Ferraro M, di Mei F, et al. Super-crystals in composite ferroelectrics [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 10674.
- [45] 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 $\text{KTA}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ crystal [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(5): 051910.
- [46] Wang X P, Liu B, Yang Y G, et al. Growth of KTN crystals by double crucible Czochralski method [J]. *Materials Research Innovations*, 2014, 18(5): 334-339.
- [47] Wang X P, Liu B, Yang Y G, et al. Preparation and laser modulation investigation of quadratic

- electro-optical crystal Cu: KTN with gradient refractivity effect [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2017, 468: 356-360.
- [48] Liu B, Zhang X N, Yang Y G, et al. Influence of copper oxide on properties of potassium tantalate niobate single crystals [J]. *Ceramics International*, 2016, 42(13): 15091-15093.
- [49] Tan P, Tian H, Hu C 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.
- [50] Tian H, Yao B, Hu C P, et al. Impact of polar nanoregions on the quadratic electro-optic effect in $\text{K}_{0.95}\text{Na}_{0.05}\text{Ta}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ crystals near the Curie temperature [J]. *Applied Physics Express*, 2014, 7(6): 062601.
- [51] 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: 13751.
- [52] 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.
- [53] 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.
- [54] 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.
- [55] Fowler V J, Schlafer J. A survey of laser beam deflection techniques [J]. *Applied Optics*, 1966, 5(10): 1675-1682.
- [56] Many A, Rakavy G. Theory of transient space-charge-limited currents in solids in the presence of trapping [J]. *Physical Review*, 1962, 126(6): 1980-1988.
- [57] Chen F S, Geusic J E, Kurtz S K, et al. Light modulation and beam deflection with potassiumtantalate-niobate crystals [J]. *Journal of Applied Physics*, 1966, 37(1): 388-398.
- [58] Miyazu J, Sasaki Y, Naganuma K, et al. 400 kHz beam scanning using $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ crystals [C] // *Conference on Lasers and Electro-Optics 2010*, San Jose, California. Washington, D. C.: OSA, 2010: CTuG5.
- [59] Sasaura M, Imai T, Kohda H, et al. TSSG pulling and LPE growth of $\text{KTa}_x\text{Nb}_{1-x}\text{O}_3$ for optical waveguides [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2005, 275(1/2): e2099-e2103.
- [60] Dugan A F, Doyle W M, Sutton P M. KTN concentration gradient light beam deflector [J]. *Applied Optics*, 1968, 7(3): 556-558.
- [61] Tian H, Tan P, Meng X D, et al. Variable gradient refractive index engineering: design, growth and electro-deflective application of $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2015, 3(42): 10968-10973.
- [62] Rupprecht G, Bell R O. Dielectric constant in paraelectric perovskites [J]. *Physical Review*, 1964, 135(3A): A748.
- [63] Chao J H, Zhu W B, Chen C 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.
- [64] Römer G R B E, Bechtold P. Electro-optic and acousto-optic laser beam scanners [J]. *Physics Procedia*, 2014, 56: 29-39.
- [65] Naganuma K, Miyazu J, Yagi S. High-resolution KTN optical beam scanner [J]. *NTT Technical Review*, 2009, 7(12): 1-6.
- [66] Sakamoto T, Toyoda S, Ueno M, et al. High-speed optical beam scanning using KTN crystal [C] // *IEEE CPMT Symposium Japan 2014*, November 4-6, 2014. Kyoto, Japan. IEEE, 2014: 173-176.
- [67] 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.
- [68] 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.
- [69] Ohta R, Zushi J T, Ariizumi T, et al. Order-disorder behavior of ferroelectric phase transition of $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ probed by Brillouin scattering [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(9): 092909.
- [70] 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] // *Quantum*

- Electronics and Laser Science Conference, May 22-27, Baltimore, Maryland, United States, 2005: JTuC36.
- [71] Tatsumi S, Sasaki Y, Toyoda S, et al. 700 kHz beam scanning using electro-optic KTN planar optical deflector [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9744: 97440L.
- [72] 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.
- [73] 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.
- [74] Yagi S, Fujiura K. Electro-optic KTN devices [J]. Physics Procedia, 2014, 56: 40-47.
- [75] Milek J T, Neuberger M. Principles of electrooptic modulation [M] // Linear electrooptic modular materials. Boston, MA: Springer, 1972: 5-14.
- [76] Foshee J, Tang S N, Tang Y J, et al. A novel high-speed electro-optic beam scanner based on KTN crystals [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6709: 670908.
- [77] Toyoda S, Ueno M, Yagi S, et al. First estimation of power consumption of $\text{KTa}_x\text{Nb}_{1-x}\text{O}_3$ crystal upon application of high voltage under high frequency [J]. Applied Physics Express, 2013, 6(12): 122601.
- [78] Sakamoto T, Toyoda S, Ueno M, et al. 350 kHz large-angle scanning of laser light using $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ optical deflector [J]. Electronics Letters, 2014, 50(25): 1965-1966.
- [79] Imai T, Miyazu J, Kobayashi J. Measurement of charge density distributions in $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ optical beam deflectors [J]. Optical Materials Express, 2014, 4(5): 976-981.
- [80] Huang C H, Sasaki Y, Miyazu J, et al. Trapped charge density analysis of KTN crystal by beam path measurement [J]. Optics Express, 2014, 22(7): 7783-7789.
- [81] Wemple S H, DiDomenico M, Jayaraman A. Electron scattering in perovskite-oxide ferroelectric semiconductors [J]. Physical Review, 1969, 180(2): 547.
- [82] Imai T, Miyazu J, Kobayashi J. Charge distributions in $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ optical beam deflectors formed by voltage application [J]. Optics Express, 2014, 22(12): 14114-14126.
- [83] Burns G, Dacol F H. Crystalline ferroelectrics with glassy polarization behavior [J]. Physical Review B, 1983, 28(5): 2527.
- [84] Dul'Kin E, Kojima S, Roth M. Characteristic temperatures and field effect in $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ relaxor crystals seen via acoustic emission [J]. Europhysics Letters, 2012, 97(5): 57004.
- [85] Tian H, Jia J S, Zhou Z X, et al. Large electrostrictive effect in $\text{K}_{0.99}\text{Li}_{0.01}\text{Ta}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ lead-free single crystals [J]. Physica Status Solidi A, 2012, 209(11): 2291-2294.
- [86] 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.
- [87] di Mei F, Pierangeli D, Parravicini J, et al. Observation of diffraction cancellation for nonparaxial beams in the scale-free-optics regime [J]. Physical Review A, 2015, 92: 013835.
- [88] Imai T, Toyoda S, Miyazu J, et al. Permittivity changes induced by injected electrons and field-induced phase transition in $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ optical beam deflectors [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2014, 53(9S): 09PB02.
- [89] Knauss L A, Pattnaik R, Toulouse J. Polarization dynamics in the mixed ferroelectric $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ [J]. Physical Review B, 1997, 55(6): 3472.
- [90] Chen C J, Chao J H, Lee Y G, et al. Enhanced electro-optic beam deflection of relaxor ferroelectric KTN crystals by electric-field-induced high permittivity [J]. Optics Letters, 2019, 44(22): 5557-5560.
- [91] Jin L, Luo W T, Jing R Y, et al. High dielectric permittivity and electrostrictive strain in a wide temperature range in relaxor ferroelectric $(1-x)[\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3]\text{-}x\text{Ba}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ solid solutions [J]. Ceramics International, 2019, 45(5): 5518-5524.
- [92] Pattnaik R, Toulouse J. New dielectric resonances in mesoscopic ferroelectrics [J]. Physical Review Letters, 1997, 79(23): 4677.
- [93] Meng X D, Tian H, Tan P, et al. Strong electromechanical coupling in paraelectric $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ crystals [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2017, 100(11): 5220-5225.
- [94] Yuza S, 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: 101000H.
- [95] Imai T, Inagaki T, Miyazu J, et al. A varifocal lens using an electrooptic $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ crystal with a microsecond order response time [J]. Transactions of the Japan Institute of Electronics Packaging, 2014, 7(1): 39-45.
- [96] Inagaki T, Imai T, Miyazu J, et al. Polarization independent varifocal lens using KTN crystals [J]. Optics Letters, 2013, 38(15): 2673-2675.
- [97] Michael A, Kwok C Y. Piezoelectric micro-lens actuator [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2015, 236: 116-129.
- [98] Mermillod-Blondin A, McLeod E, Arnold C B. High-speed varifocal imaging with a tunable acoustic gradient index of refraction lens [J]. Optics Letters, 2008, 33(18): 2146-2148.
- [99] Mugele F, Baret J C. Electrowetting: from basics to applications [J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 2005, 17(28): R705-R774.
- [100] Kawamura S, Imai T, Sakamoto T. Optical devices using KTN single crystals and their applications [J]. Journal of the Japanese Association for Crystal Growth, 2016, 43(3): 155-160.
- [101] Kawamura S, Imai T, Miyazu J, et al. 25-fold increase in lens power of a KTN varifocal lens by employing an octagonal structure [J]. Applied Optics, 2015, 54(13): 4197-4201.
- [102] Zhu W B, Chao J H, Chen C J, et al. Nanosecond KTN varifocal lens without electric field induced phase transition [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10382: 103820R.
- [103] Chang Y C, Yin S Z. Dynamic and tunable optical waveguide based on KTN electro-optic crystals [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8497: 84970J.
- [104] Sasaki Y, Yagi S, Kobayashi J, et al. Microsecond optical switching of five channels by KTN electro-optic deflector [J]. Electronics Letters, 2014, 50(21): 1540-1541.
- [105] Gong D W, Liang Y G, Ou W J, et al. Electric-field-controlled optical switch using Kerr effect and gradient of the composition ratio $\text{Nb}/(\text{Ta}+\text{Nb})$ [J]. Materials Research Bulletin, 2016, 75: 7-12.
- [106] Zhang X, Yang Q X, Liu H L, et al. Switching effects of spontaneously formed superlattices in relaxor ferroelectrics [J]. Optical Materials Express, 2019, 9(10): 4081-4089.
- [107] Ohmi M, Fukuda A, Miyazu J, et al. Development of novel high-speed en face optical coherence tomography system using KTN optical beam deflector [J]. Applied Physics Express, 2015, 8(2): 027001.
- [108] Ohmi M, Shinya Y, Miyazu J, et al. High-speed time-domain en face optical coherence tomography system using KTN optical beam deflector [J]. Optics and Photonics Journal, 2019, 9(5): 53-59.
- [109] Okabe Y, Sugawa Y, Ohmi M, et al. Three-dimensional high-speed optical coherence tomography system using KTN swept light source [J]. Electronics Letters, 2013, 49(16): 981-982.
- [110] Sasaki Y. High-speed spectrometer using KTN optical beam scanner [J]. NTT Technical Review, 2009, 7(12): 1-5.
- [111] Isobe K, Kawano H, Takeda T, et al. Background-free deep imaging by spatial overlap modulation nonlinear optical microscopy [J]. Biomedical Optics Express, 2012, 3(7): 1594-1608.
- [112] Isobe K, Kawano H, Kumagai A, et al. Implementation of spatial overlap modulation nonlinear optical microscopy using an electro-optic deflector [J]. Biomedical Optics Express, 2013, 4(10): 1937-1945.
- [113] Yin S S, Chao J H, Zhu W B, et al. A large capacity time division multiplexed (TDM) laser beam combining technique enabled by nanosecond speed KTN deflector [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10382: 103820P.
- [114] Xu J, Zhi Y N, Wang X P, et al. A large-angle high speed scanner based on electro-optic crystal for Fresnel telescope synthetic aperture imaging lidar [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8520: 85200V.
- [115] Tie D X. Application of KTN electro-optic crystal in 3D imaging laser radar [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018: 17-23.
帖栋修. 用于三维成像激光雷达的钽铌酸钾晶体研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2018: 17-23.
- [116] Du R. The study of axial random-access laser scanning scheme in two photon microscopy [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011: 60-89.
杜睿. 双光子轴向随机扫描方法研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2011: 60-89.