

基于双晶匹配的低压铌酸锂电光削波器的研究

吴婧^{1,2,4}, 李清连^{1,3,4}, 张中正^{1,2,4}, 孙军^{1,2,4*}, 张玲^{1,3,4}, 隋展⁵, 许京军^{1,2,4}¹南开大学弱光非线性光子学教育部重点实验室, 天津 300457;²南开大学物理科学学院, 天津 300071;³南开大学泰达应用物理研究院, 天津 300457;⁴山西大学极端光学协同创新中心, 山西 太原 030006;⁵中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海 201800

摘要 分析了电光削波器半波电压的关键影响因素,发现使用具有较大有效电光系数的电光晶体、合理设计晶体的横纵比是降低器件半波电压的有效手段;在此基础上,设计并制备出低半波电压的铌酸锂电光削波器。采用沿铌酸锂晶体 x 轴通光、 z 轴加电的横向电光工作模式,并利用双晶匹配的方式消除自然双折射的影响。匹配后两块晶体通光面的光学质量良好,直流高压下测得的半波电压约为 900 V,动态消光比达 200 : 1。使用幅值为 800 V、脉宽为 0.95 ns、重复频率为 1 Hz 的脉冲高压驱动电光削波器工作时,从 1064 nm 连续激光中获得了脉宽为 1.46 ns、重复频率为 1 Hz 的激光脉冲输出。

关键词 非线性光学; 铌酸锂晶体; 电光效应; 双晶匹配; 削波器

中图分类号 O734

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202249.0708001

1 引言

电光削波器是一种基于电光效应的激光脉冲整形器件,在激光放大系统的前级系统、非线性光学系统、激光精细加工等方面应用广泛^[1-2]。目前商用的削波器包括由氧化磷酸二氢钾(DKDP)、低温相偏硼酸钡(β -BBO)、磷酸氧钛铷(RTP)、磷酸氧钛钾(KTP)等^[3-5]电光晶体制成的削波器件,受晶体切型和工作方式影响,通光口径通常为 2~20 mm,半波电压为几千伏甚至上万伏,极高的半波电压对驱动电源的制备及性能提出了巨大的挑战。对驱动电源而言,当输出较低的电压时,不仅可以相对容易地获得快上升沿、窄脉宽的电脉冲,有利于提高器件的重复频率,降低整个器件的功耗,还可以减少对系统内其他电子器件的干扰。因此,降低半波电压对于提升电光削波器的整体性能有积极作用。

除半波电压低之外,性能优异的电光削波器还应具备消光比高、透过波段宽、物化性能稳定、温度

稳定性高、成本低等优势,而器件的性能主要取决于电光晶体的性质。目前可实用化的电光晶体各有优缺点^[6]。DKDP 晶体具有良好的非线性效应和电光效应,但纵向电光效应使得半波电压较高,且易潮解,需要特殊封装或涂制防潮膜^[7-8],从而增加了器件的插入损耗。 β -BBO 晶体的有效电光系数较小^[9],导致半波电压过高,且沿光轴方向生长速度慢,难以获得高质量、大尺寸的晶体。RTP 晶体因无压电效应、可工作于高重复频率激光系统受到广泛关注,且有效电光系数($\gamma_{e1} = 23 \sim 26$ pm/V, $\gamma_{e2} = 20 \sim 23$ pm/V)较大^[10],器件的半波电压较低,但由于生长技术尚不成熟,高光学质量的晶体尺寸较小,晶体价格昂贵。KTP 晶体的电光性质^[11]与 RTP 晶体相似,但由于电导率较高,高电压工作下易产生类电解损伤^[12],这就限制了其在电光器件方面的实际应用。铌酸锂(LN)晶体^[13]的综合性能优良,具有光透过范围宽、电光系数大、工作温度范围宽、不潮解、易生长大尺寸单晶、易进行光学加

收稿日期: 2021-08-03; 修回日期: 2021-08-30; 录用日期: 2021-09-02

通信作者: *sunjun@nankai.edu.cn

工等优势,但缺点是激光损伤阈值较低,这限制了其在高功率激光系统中的应用。钽酸锂(LT)晶体与 LN 晶体结构相似,与 LN 晶体相比,LT 晶体的优势在于激光损伤阈值较高^[14],但光轴方向电光系数小^[15]($\gamma_{22} \approx 1.0 \text{ pm/V}$),不能采用类似 LN 晶体的光轴通光、横向调制方式工作,这就限制了 LT 晶体的电光应用。电光削波器所工作的激光系统功率一般较低,对晶体的激光损伤阈值要求不高,综合考虑,本文选用同成分的 LN 晶体作为核心部件进行电光削波器的设计和制备。

本文分析了电光削波器半波电压的关键影响因素,发现使用具有较大有效电光系数的电光晶体、合理设计晶体的横纵比是降低器件半波电压的有效手段。在此基础上,设计并制备了基于双晶匹配的低半波电压的 LN 电光削波器,并对其光学质量、半波电压、消光比、削波性能等进行了测试与表征。

2 理论分析

LN 晶体属于三方晶系,无对称中心,存在一次

电光效应,其电光系数是 6×3 的张量矩阵,表示为

$$\gamma_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & -\gamma_{22} & \gamma_{13} \\ 0 & \gamma_{22} & \gamma_{13} \\ 0 & 0 & \gamma_{33} \\ 0 & \gamma_{51} & 0 \\ \gamma_{51} & 0 & 0 \\ -\gamma_{22} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中,几个常用系数的测量值^[16]为 $\gamma_{13}^S = 8.6 \text{ pm/V}$, $\gamma_{33}^S = 30.8 \text{ pm/V}$, $\gamma_{22}^S = 3.4 \text{ pm/V}$ 。

通常用折射率椭球来描述光在各向异性晶体内传播的规律。当未加电场时, LN 晶体的折射率椭球可表示为

$$\frac{1}{n_o^2}x^2 + \frac{1}{n_e^2}y^2 + \frac{1}{n_e^2}z^2 = 1, \quad (2)$$

式中: n_o 为 o 光折射率; n_e 为 e 光折射率; x 、 y 、 z 轴是折射率椭球 3 个互相垂直的主轴, z 轴平行于 LN 晶体的光轴。

当受到外加电场 $\mathbf{E}(E_x, E_y, E_z)$ 作用时,折射率椭球方程可表示为

$$\left(\frac{1}{n_o^2} - \gamma_{22}E_y + \gamma_{13}E_z\right)x^2 + \left(\frac{1}{n_o^2} + \gamma_{22}E_y + \gamma_{13}E_z\right)y^2 + \left(\frac{1}{n_e^2} + \gamma_{33}E_z\right)z^2 - 2\gamma_{22}E_xxy + 2\gamma_{51}E_yyz + 2\gamma_{51}E_xzx = 1. \quad (3)$$

通过(3)式可求出沿不同主轴方向加电场时晶体的电光特性^[17]。当沿 LN 晶体 z 轴方向加电场时,可应用其较大的有效电光系数 $\gamma_c = \gamma_{33} - \frac{n_o^3}{n_e^3}\gamma_{13}$, 在 1064 nm 波段工作时, $n_o = 2.232$, $n_e = 2.156$, $\gamma_c \approx 21.8 \text{ pm/V}$ 。

当沿 z 轴方向加电、沿 x (或 y) 轴方向通光进行横向电光应用时,由于沿晶体的非光轴方向通光,存在自然双折射现象,不利于应用,一般通过控制温度变化^[18]或两块晶体匹配^[19]的方法消除自然双折射产生的影响。但是,温控法装置复杂、控温精度要求高,并不适合工程应用;而双晶匹配法不仅可以消除自然双折射的影响,还能提高器件的温度稳定性^[20],因此本文采用双晶匹配的方案,如图 1 所示。

两块尺寸相同的晶体绕通光方向(x 或 y 轴)旋转 90° ,电压加在 z 轴方向,两块晶体所加电压极性相反,方向相互垂直,激光偏振方向和晶体 z 轴成 45° ,激光通过两块晶体的相位差为

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda}(\gamma_{33}n_e^3 - \gamma_{13}n_o^3) \frac{l}{d}U, \quad (4)$$

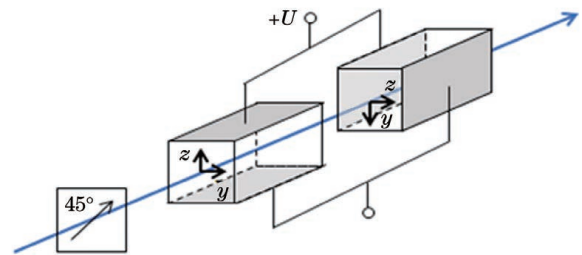
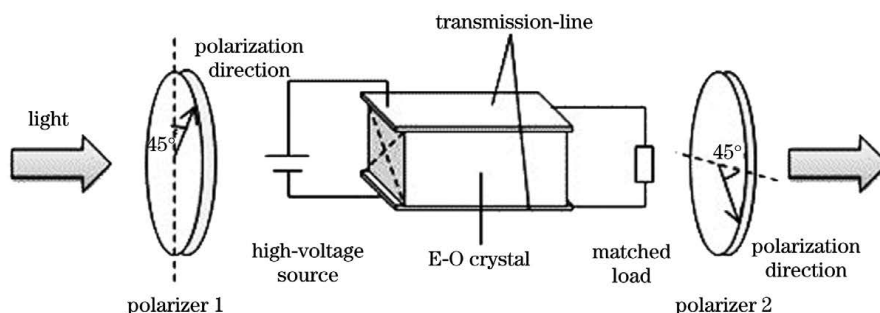


图 1 LN 双晶匹配补偿自然双折射方案
Fig. 1 Scheme of double LN crystals for natural birefringence compensation

式中: l 为单块晶体通光方向的长度; d 为晶体加电方向的厚度; λ 为应用激光的波长; U 为晶体上施加的电压。当 $\delta = \pi$ 时,晶体的半波电压为

$$U_\pi = \frac{\lambda d}{2n_e^3 \gamma_c l}. \quad (5)$$

为了使电光削波器可以在较高的频率下工作,同时克服渡越时间的影响,采用一种行波调制器的结构^[21],如图 2 所示。将电信号以行波的形式加在晶体上,使得光波与电信号在晶体内具有相同的相速度,令光波波前在通过晶体的过程中受到的电压

图 2 行波电光调制器^[21]Fig. 2 Traveling wave electro-optic (E-O) modulator^[21]

处处相同,即可克服渡越时间的影响。

3 实验及装置

3.1 电光削波器的设计与制备

根据电光削波器的要求进行器件设计。首先,确定晶体的外形尺寸,根据器件的特性阻抗为 50Ω ,半波电压在 1000 V 以下,消光比达到 $200:1$,激光光束直径为 1 mm 等要求,计算得到两块晶体的尺寸($x \times y \times z$)为 $9.0 \text{ mm} \times 4.3 \text{ mm} \times 3.0 \text{ mm}$,半波电压的理论计算值为 730 V ,有效通光孔径为 2.5 mm 。然后,按照阻抗匹配的原则进行器件的结构设计。

电光削波器的消光比与晶体的光学均匀性、加工精度等因素有关,双晶匹配的工作方式对此要求更高。因此,在晶圆上选择对称位置的晶体毛坯,保证两块晶体具有相近的光学均匀性,利用同盘抛光^[22]的光学冷加工工艺保证两块晶体的轴向精度、通光面平行度、通光面平面度等指标一致,最大限度地减少器件消光比受到的不良影响。在晶体的两个 x 面镀制 1064 nm 增透膜,透过率达 98.5% 以上,在两个 z 面镀制金-钛复合电极膜。

将晶体装配于由弹性材料制成的支架中,如图 3 所示,弹性支架可以固定晶体,同时减少所引入的应

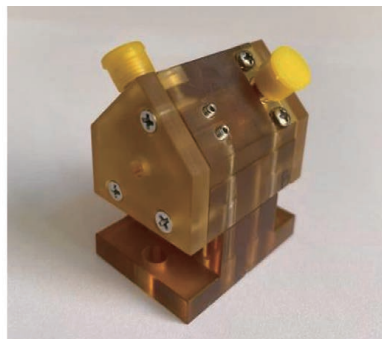


图 3 封装后的 LN 晶体

Fig. 3 Packaged LN crystal

力^[23]。起偏器和检偏器采用由偏硼酸钡(α -BBO)晶体制成的格兰激光棱镜,通光孔径为 $8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$,通光面均镀制 1064 nm 增透膜,消光比可达 $10^6:1$ 。LN 电光削波器的整体装配如图 4 所示。

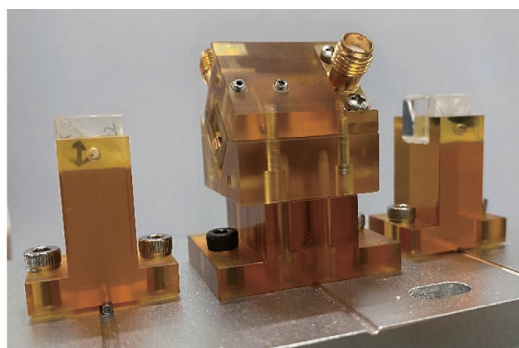


图 4 LN 电光削波器

Fig. 4 LN electro-optic splitter

3.2 晶体光学质量检测

采用锥光干涉法表征匹配晶体的光学质量,可以从宏观方面反映两块晶体通光面内的整体情况,综合体现晶体本身的光学均匀性和加工精度。

搭建锥光干涉测试系统,观察不加电压及施加直流高压时两块匹配 LN 晶体的锥光干涉图。选择氦氖激光器(中心波长为 633 nm)作为光源,利用透过率适中的毛玻璃片发散光束,该光束透过电光削波器后被光屏接收,从光屏上可以观察干涉图样。用高压直流电源($0 \sim 5000 \text{ V}$ 连续可调)为 LN 晶体供电。

3.3 动态消光比及半波电压测试

将 1064 nm 连续光激光器作为光源,光束直径为 1.5 mm ,发散角小于 0.3 mrad 。采用高压直流电源为 LN 电光削波器供电,用激光功率计(分辨率为 0.01 mW)测量透过光功率。将两偏振镜的偏振方向夹角分别设置为 90° (垂直)或 0° (平行),通过改变外加电压大小,获得透过光功率与器件驱动电压的变化关系,测得的最大透过光功率 I_{max} 和最小

透过光功率 I_{\min} 的比值即为器件的动态消光比,即

$$E_r = \frac{I_{\max}}{I_{\min}} \quad (6)$$

在上述两偏振方向相互垂直的偏振镜系统中,最大透过光功率对应的外加电压为半波电压;相反,在平行偏振系统中,最小透过光功率对应的外加电压为半波电压。

3.4 削波性能测试

利用 1064 nm 连续光激光器进行实验研究,激光光束经缩束准直后直径为 1.5 mm,通过由起偏器 P1、LN 晶体组、检偏器 P2 组成的电光削波器,最后被硅偏压探测器接收,由示波器输出波形。电光削波器由高压脉冲电源驱动。实验装置如图 5 所示。

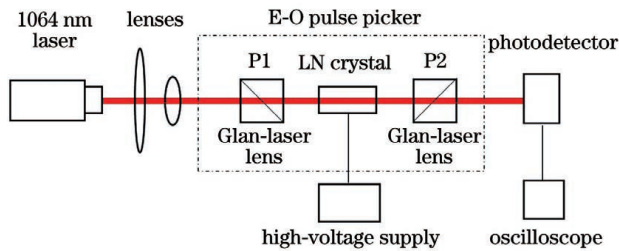


图 5 削波实验装置

Fig. 5 Setup of slitting experiment

4 结果与讨论

4.1 晶体光学质量

图 6 所示为 LN 电光削波器的锥光干涉图样,电压值为器件的半波电压。当不加电时, LN 电光开关的锥光图样为两组相交的双曲线,中心重合(即

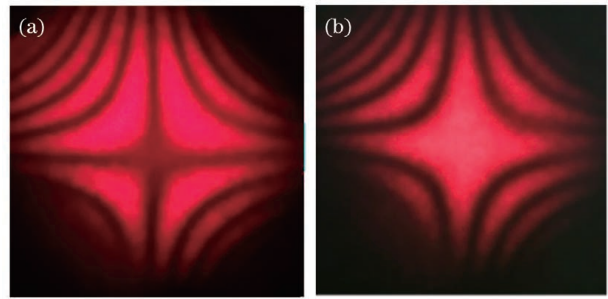
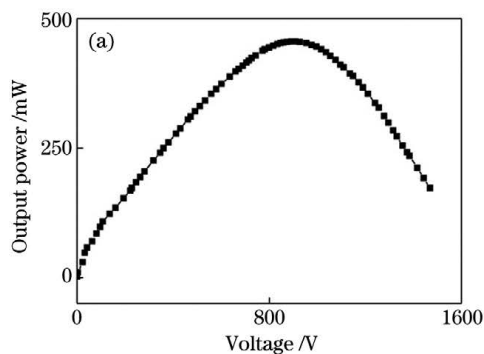


图 6 LN 电光削波器的锥光干涉图。(a)不加电;

(b)加直流高压

Fig. 6 Conoscopic interference pattern of LN electro-optic splitter. (a) Power off; (b) power on with DC voltage

消光),干涉条纹对称无畸变,在通光面范围内两块 LN 晶体匹配良好。给晶体施加半波电压后,双曲线中心分离呈亮区,干涉条纹对称无畸变,说明匹配晶体加电后的光学质量良好。从锥光干涉图样来看,该器件的光学质量可以满足电光应用需求。

4.2 动态消光比及半波电压

图 7 所示为透过光功率随外加电压的变化关系。在正交偏振系统中,外加电压从 0 开始逐渐增加,透过光功率逐渐增大,当外加电压为半波电压时透过光功率达到最大值;在平行偏振系统中,外加电压为半波电压时透过光功率为最小值。测试结果如表 1 所示:当 $P_1 \perp P_2$ 时,半波电压为 906 V,消光比为 228:1;当 $P_1 // P_2$ 时,半波电压为 925 V,消光比为 254:1。正交偏光系统和平行偏光系统的测试结果基本一致。

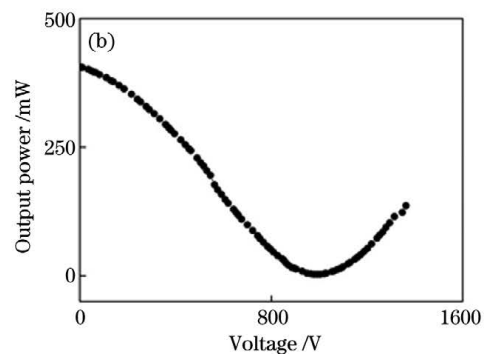


图 7 透过光功率随外加电压的变化。(a) $P_1 \perp P_2$; (b) $P_1 // P_2$

Fig. 7 Relationship of output light power with applied voltage. (a) $P_1 \perp P_2$; (b) $P_1 // P_2$

表 1 动态消光比测试结果

Table 1 Results of dynamic extinction ratio test

Relationship between the polarization directions	I_{\min}/mW	I_{\max}/mW	Extinction ratio	Half-wave voltage /V
$P_1 \perp P_2$	2.0	457	228:1	906
$P_1 // P_2$	1.6	406	254:1	925

Note: The system extinction ratio is $10^4:1$.

4.3 削波性能

高压脉冲电源的指标由器件的需求指标确定。经估算,为获得脉宽为 1 ns 的激光脉冲,电脉冲的脉宽应小于 1 ns。电压幅值由晶体的半波电压确定,理论计算得到 LN 晶体的半波电压约为 730 V,外加直流高压测得的半波电压约为 900 V,考虑到不同晶体的差异性和加工精度的差别,测量的动态半波电压常比理论计算值高,且由于电光系数在高频和低频下测量值有差异,直流高压条件下测得的半波电压通常比脉冲高压驱动时测得的半波电压高,因此将脉冲高压幅值确定为 800 V。高压脉冲电源输出电信号的脉宽实测值为 0.95 ns,幅值实测值为 803 V,重复频率为 1 Hz,图 8 所示为高压脉冲电源的输出波形。

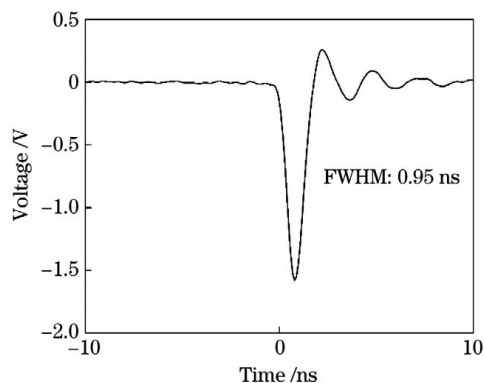


图 8 高压脉冲电源的输出波形

Fig. 8 Output waveform of high-voltage pulse power supply

在图 5 所示的系统中进行实验,采用 LN 电光削波器对 1064 nm 连续激光进行削波,获得了重复频率为 1 Hz、脉宽为 1.46 ns、上升沿约 0.8 ns 的脉冲输出,如图 9 所示。

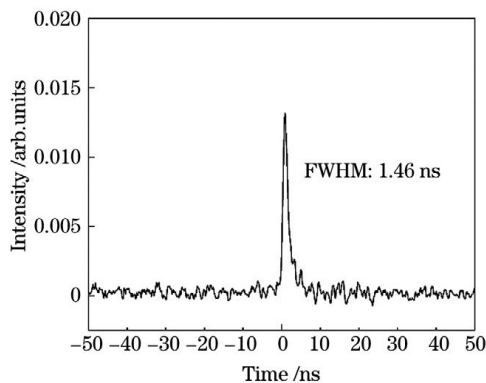


图 9 削波后的激光脉冲

Fig. 9 Laser pulse after slitting

5 结 论

针对目前电光削波器半波电压较高的问题,分

析认为影响半波电压的关键因素是有效电光系数和晶体尺寸。利用 LN 晶体较大的电光系数 γ_{33} ,选择 x 轴通光、 z 轴加电的横向电光工作模式,利用双晶匹配的方式消除自然双折射的影响。根据阻抗匹配、半波电压、消光比、通光孔径等因素确定了晶体尺寸,对晶体加工、镀膜后进行器件装配,并对器件的通光面光学质量、消光比、半波电压以及削波性能等进行实验研究。在 1064 nm 连续激光光源、直流高压驱动的条件下,测得器件的消光比达 200 : 1,半波电压约 900 V;用重复频率为 1 Hz、幅值为 800 V、脉宽为 0.95 ns 的脉冲高压驱动其工作时,从 1064 nm 连续激光中获得了重复频率为 1 Hz、脉宽为 1.46 ns 的激光脉冲输出。利用这种电光削波器获得的激光脉冲波形与驱动电源输出的电脉冲波形有关,后续可以进一步缩小电脉冲宽度,以期获得更窄脉宽的激光脉冲。

参 考 文 献

- [1] Kobayashi T. Generation of ultrafast laser pulses by electrooptic modulation[J]. Electronics and Communications in Japan, 1992, 75(5): 12-24.
- [2] Zhao Z, Mernick K, Costanzo M, et al. An ultrafast laser pulse picker technique for high-average-current high-brightness photoinjectors[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 2020, 959: 163586.
- [3] Mang Y P, Ouyang B, Zhang B J, et al. High performance single pulse selector for mode-locked lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 1992, 19(8): 561-565.
莽燕萍, 欧阳斌, 张秉钧, 等. 高性能激光单脉冲选择器[J]. 中国激光, 1992, 19(8): 561-565.
- [4] Lu X Q, Chen S H. A system for arbitrary shaping of Q switch laser pulses using KTP poekels cell and microstrip transmission lines[J]. Chinese Journal of Lasers, 1999, 26(8): 691-695
卢秀权, 陈绍和. 用低压 KTP 普克尔盒和微带传输线进行调 Q 长脉冲的任意整形[J]. 中国激光, 1999, 26(8): 691-695
- [5] Hu Y, Zhao X Q, Xue Q X, et al. BBO electro-optical switch for UV laser pulse clipping [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(11): 111401.
胡云, 赵学庆, 薛全喜, 等. 用于紫外激光的 BBO 电光削波开关[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(11): 111401.
- [6] Wang J Y, Guo Y J, Li J, et al. Progress in electro-optic crystal research[J]. Materials China, 2010, 29

- (10): 49-58.
王继扬, 郭永解, 李静, 等. 电光晶体研究进展[J]. 中国材料进展, 2010, 29(10): 49-58.
- [7] Wang X D, Tian B T, Niu Y Y, et al. Preparation of moisture-proof protective coatings for KDP/DKDP crystals[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(S1): 370-374.
- [8] Xiong H, Li H Y, Tang Y X. Study on stability of SiO₂-based moisture-resistant antireflective coatings [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(12): 3116-3120.
熊怀, 李海元, 唐永兴. 疏水性 SiO₂ 基减反膜稳定性研究[J]. 中国激光, 2010, 37(12): 3116-3120.
- [9] Yin X, Liu Y G, Cheng R P. The electro-optic properties β -BBO single crystal[J]. Applied Laser, 1995, 15(6): 246.
尹鑫, 刘耀岗, 程瑞平. β -BBO 晶体的电光性能[J]. 应用激光, 1995, 15: 246.
- [10] Cheng X F, Wang Y, Wang Z P. Optical and electrical properties of RTP crystal [J]. China Measurement & Test, 2014, 40(1): 9-13.
程秀凤, 王营, 王正平. RTP 晶体光学和电学性能研究[J]. 中国测试, 2014, 40(1): 9-13.
- [11] Bierlein J D, Vanherzeele H. Potassium titanyl phosphate: properties and new applications [J]. Journal of the Optical Society of America B, 1989, 6(4): 622-633.
- [12] Shen D Z. Progress in E-O research for KTP crystals [J]. Journal of Synthetic Crystals, 2001, 30(1): 28-35.
沈德忠. KTP 晶体的电光研究进展[J]. 人工晶体学报, 2001, 30(1): 28-35.
- [13] Sun J, Hao Y X, Zhang L, et al. Brief review of lithium niobate crystal and its applications [J]. Journal of Synthetic Crystals, 2020, 49(6): 947-964.
孙军, 郝永鑫, 张玲, 等. 铌酸锂晶体及其应用概述[J]. 人工晶体学报, 2020, 49(6): 947-964.
- [14] He C J, Li W L, Wang J M, et al. Growth and optical properties of lithium tantalate single crystals doped with indium and neodymium[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(1): 0116003.
赫崇君, 李伟立, 王吉明, 等. 钽掺杂铌酸锂单晶的生长及光学性能[J]. 光学学报, 2018, 38(1): 0116003.
- [15] Wang G T, Hu B Q, Shu Q M, et al. Measurement on the electrooptic coefficients of LiTaO₃:Ti crystals [J]. Journal of Synthetic Crystals, 1991, 20(2): 189-192.
王公堂, 胡伯清, 舒启茂, 等. LiTaO₃:Ti 晶体电光系数测量[J]. 人工晶体学报, 1991, 20(2): 189-192.
- [16] Turner E H. High-frequency electro-optic coefficients of lithium niobate[J]. Applied Physics Letters, 1966, 8(11): 303-304.
- [17] Fang Q W. Research on lithium niobate electro-optic modulation[J]. Study on Optical Communication, 1979(2): 39-65.
方启万. 铌酸锂电光调制研究[J]. 邮电研究, 1979(2): 39-65.
- [18] Lu X Q, Chen S H. KTP electro-optic switch[J]. Chinese Journal of Lasers, 1999, 26(4): 321-324.
卢秀权, 陈绍和. KTP 电光开关[J]. 中国激光, 1999, 26(4): 321-324.
- [19] Liu X F, Gao Y W, Huang Y Z, et al. Q-switched characteristics of RTP crystals [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2008, 6(1): 15-17.
刘晓峰, 高彦伟, 黄永宗, 等. RTP 晶体的调 Q 特性研究[J]. 光学与光电技术, 2008, 6(1): 15-17.
- [20] Biazzo M R. Fabrication of a lithium tantalate temperature-stabilized optical modulator[J]. Applied Optics, 1971, 10(5): 1016-1021.
- [21] Lan X J. Laser technology [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2009: 24-25.
蓝信钜. 激光技术[M]. 3 版. 北京: 科学出版社, 2009: 24-25.
- [22] Li Q L, Shang J F, Wu J, et al. Fabrication of lithium tantalate crystals electro-optic Q-switch[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2019, 48(5): 812-816.
李清连, 商继芳, 吴婧, 等. 铌酸锂电光调 Q 晶体开关的制备研究[J]. 人工晶体学报, 2019, 48(5): 812-816.
- [23] Wang F Z, Chen B, Sun J, et al. Research on lower stress lithium niobate electro-optical Q-switches[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2013, 42(7): 1315-1318, 1322.
王富章, 陈彬, 孙军, 等. 低应力铌酸锂电光调 Q 开关的研究[J]. 人工晶体学报, 2013, 42(7): 1315-1318, 1322.

Low Half-Wave Voltage Lithium Niobate Electro-Optic Slitter Based on Dual Crystal Matching

Wu Jing^{1,2,4}, Li Qinglian^{1,3,4}, Zhang Zhongzheng^{1,2,4}, Sun Jun^{1,2,4*}, Zhang Ling^{1,3,4},
Sui Zhan⁵, Xu Jingjun^{1,2,4}

¹ MOE Key Laboratory of Weak-Light Nonlinear Photonics, Nankai University, Tianjin 300457, China;

² School of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China;

³ TEDA Institute of Applied Physics, Nankai University, Tianjin 300457, China;

⁴ Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China;

⁵ Shanghai Institute of Laser Plasmas, China Academy of Engineering Physics, Shanghai 201800, China

Abstract

Objective Electro-optic slitter is a type of laser pulse shaping device based on electro-optic effect. It is widely used in laser amplification systems, nonlinear optical systems, laser fine machining, and other applications. At present, there are commercial slitters made of DKDP, BBO, RTP, KTP, and other electro-optical crystals. These slitters are affected by crystal cutting type and working mode, whose aperture is between 2 and 20 mm, and the half-wave voltage is several thousand volts or even ten thousand volts. The extremely high half-wave voltage greatly affects the preparation and performance of the driving power supply. However, it is relatively easy to obtain an electrical pulse with fast-rising time and narrow pulse width at low voltage for the driving power supply, thereby improving the repetition frequency of the device, reducing the power dissipation of the whole device, and reducing electromagnetic interference to other electronic devices in the system. Therefore, reducing the half-wave voltage positively improves the overall performance of the electro-optical slitter. The advantages and disadvantages of DKDP, BBO, RTP, KTP, and LN crystals are compared. From the requirements of the electro-optical slitter, LN crystal, as the core component of the electro-optical slitter, is selected for designing and preparing the slitter. In this study, we design and fabricate a low half-wave voltage LN electro-optic slitter.

Methods The electro-optic effect theory provides the electro-optic characteristics of LN crystal when an electric field is applied along each axis. The electro-optic effect is maximized using 90° x -cut crystals with radiation propagating and control voltage applied along the x - and z -axes, respectively. Also, we achieve a compensation of natural birefringence using two LN crystals whose z -axes are rotated relative to one another by 90° . A low half-wave voltage LN electro-optic slitter is fabricated and the optical quality, half-wave voltage, extinction ratio, and slitting performance of the slitter are measured and characterized.

Results and Discussions After processing and coating, LN crystals are packaged in an elastic holder (Fig. 3). The electro-optic slitter consists of two Glan-laser lenses with orthogonal polarization directions and a set of LN crystals (Fig. 4). By observing the conoscopic interference pattern of two matched LN crystals without electricity and applying a DC high voltage, the optical quality of the x faces of the LN crystal is good (Fig. 6). Also, the extinction ratio of the slitter is measured in the orthogonal polarized and parallel polarized systems. In the orthogonal polarization system, the output optical power increases with increased voltage and reaches the maximum value at the half-wave voltage. In the parallel polarization system, the output power is minimum at the half-wave voltage (Fig. 7). The half-wave voltage is measured at ~ 900 V under DC high voltage with a dynamic extinction ratio of 200 : 1 (Table 1). When the electro-optic slitter is driven by a pulsed high voltage of 800 V, 0.95 ns, and 1 Hz (Fig. 8), a 1.46 ns, 1 Hz laser pulse output is obtained from a 1064 nm continuous wave laser (Fig. 9).

Conclusions In this study, we investigate the key factors affecting the half-wave voltage of an electro-optic slitter. Results show that an effective method for reducing the voltage is applying the crystal with large effective electro-optic coefficient and designing the transverse/longitudinal ratio of the crystal. Thus, a low half-wave voltage LN electro-optic slitter is designed and fabricated. Furthermore, the electro-optic effect is maximized using 90° x -cut crystals with radiation propagating along the x -axis and the control voltage applied along the z -axis. Also, compensation of natural birefringence is achieved using two LN crystals whose z -axes are rotated relative to one another by 90° . The optical quality of the z -faces of the LN crystal is good. The half-wave voltage is measured at

~900 V under DC high voltage, and the dynamic extinction ratio is 200 : 1. Upon driving the electro-optic slitter using a pulsed high voltage of 800 V, 0.95 ns, and 1 Hz, we obtain a 1.46 ns, 1 Hz laser pulse output from a 1064 nm continuous wave laser. The output laser pulse waveform of the electro-optic slitter is related to the electrical pulse waveform of the driving power supply. For future work, we hope to obtain a laser pulse with a narrower pulse width by reducing the width of the electrical pulse.

Key words nonlinear optics; lithium niobate crystal; electro-optic effect; dual crystal matching; slitter