

## 双晶电光 Q 开关消光比的研究

商继芳<sup>1\*</sup>, 李清连<sup>2</sup>, 孙兴<sup>1</sup>, 陈铃<sup>1</sup>, 杜文静<sup>1</sup>, 李留帮<sup>3</sup><sup>1</sup>河南工程学院材料工程学院河南省电子陶瓷材料与应用重点实验室, 河南 郑州 451191;<sup>2</sup>南开大学物理科学学院, 天津 300071;<sup>3</sup>郑州卓而泰新材料科技有限公司, 河南 郑州 450016

**摘要** 双晶匹配电光 Q 开关能够利用晶体的最大有效电光系数, 大幅降低半波电压, 具有重要的应用价值, 但其消光比易受多种因素的制约。系统分析了影响双晶电光 Q 开关消光比的各个因素, 建立了包含光学不均匀性、晶向偏离、两晶体温度变化、长度偏差及温差等参数的系列相位延迟公式, 由此分析计算了各因素的容差范围。结果表明: 光学不均匀性、两晶体的长度偏差和温差是影响消光比的关键因素; 当仅考虑单一变量时, 消光比与此变量的平方成反比; 同时, 晶体长度对消光比也有显著影响, 当光学不均匀性、晶向偏离、温差一定时, 消光比与晶体长度的平方成反比。制备了两种不同尺寸的双晶钽酸锂电光 Q 开关, 实验证实长度较短的 Q 开关的双晶匹配质量更好, 消光比更高, 其消光比主要受光学不均匀性的限制。研究结果可为高消光比双晶电光 Q 开关的研制提供重要指导。

**关键词** 激光光学; 光开关器件; 电光调 Q; 双晶匹配; 消光比; 钽酸锂晶体

中图分类号 O734 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL231006

## 1 引言

高峰值功率窄脉宽激光在激光加工、光电探测、非线性光学和医疗等领域中都有着广泛的应用<sup>[1-4]</sup>。调 Q 技术是获得脉冲激光的主要方式之一, 其中, 电光调 Q 技术由于具有开关速率高、关断能力强、主动可控、激光器与其他仪器容易实现高精度同步等优势, 在短脉冲激光系统中得到了广泛应用<sup>[5-6]</sup>。

电光晶体是决定电光调 Q 开关性能的关键元件。目前, 已实现实用化的电光晶体主要有铌酸锂 (LiNbO<sub>3</sub>, LN)、磷酸二氘钾 (KD<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, DKDP) 和磷酸铊氧铷 (RbTiOPO<sub>4</sub>, RTP) 晶体<sup>[7]</sup>。LN 晶体和 DKDP 晶体作为单轴晶体, 用作电光 Q 开关时多采用沿光轴方向通光的调制方式, 采用单块晶体即可实现电光调 Q, 但这种方式无法利用晶体的最大有效电光系数, 导致半波电压较高<sup>[8]</sup>。若沿非光轴方向通光, 则存在自然双折射且受温度影响较大, 需要采用两块晶体配对使用以补偿自然双折射及温度效应的影响<sup>[9]</sup>。RTP 晶体是近年来新投入使用的一种电光晶体, 其作为双轴晶体, 应用时也需要采用两块晶体配对以补偿自然双折射<sup>[10]</sup>。此外, 钽酸锂 (LiTaO<sub>3</sub>, LT) 晶体和 LN 晶体结构类似, 也有着优良的电光性能, 生长技术成熟, 容

易生长成大尺寸高光学质量的晶体, 并且其损伤阈值远高于 LN 晶体<sup>[11]</sup>。但由于 LT 晶体的电光系数 ( $\gamma_{22}$ ) (约为  $0.1 \text{ pm} \cdot \text{V}^{-1}$ ) 很小<sup>[12]</sup>, 故无法与 LN 调 Q 开关一样, 采用沿光轴方向通光、沿  $x$  轴方向施加电场的调制方式。当沿其他方向通光时, 也必须采用两块晶体配对以补偿自然双折射。目前关于 LT 晶体用作电光调 Q 器件的报道较少。

综上所述, 受晶体生长技术和晶体自身属性的限制, 实现实用化的电光晶体较少, 双晶体匹配是制备低半波电压电光 Q 开关的重要手段, 但这种方式对晶体的光学质量、加工精度、温控精度等提出了更高的要求。目前关于双晶电光 Q 开关消光比的影响因素及其容差范围的研究较少。董磊等<sup>[13]</sup>仅分析了两晶体通光方向偏差及偏振器件透振方向偏差对双晶电光开关消光比的影响。李清连等<sup>[14]</sup>估算了制备双晶 LT 电光 Q 开关时, 通光方向晶向角偏差和尺寸偏差应满足的指标要求, 但未给出具体的分析过程。以上分析不够系统, 限制了双晶电光 Q 开关的开发及应用。

本文以双晶 LT 电光 Q 开关为例, 系统研究了影响双晶电光 Q 开关消光比的各因素, 确定了晶体光学质量、加工参数、温控精度等应满足的指标要求。在此基础上, 采用光学冷加工工艺, 利用同盘抛光方式制备

收稿日期: 2023-07-11; 修回日期: 2023-08-27; 录用日期: 2023-09-25; 网络首发日期: 2023-11-13

基金项目: 国家自然科学基金 (51902087, 52202618)、河南省科技攻关项目 (232102210168)、天津市自然科学基金青年项目 (S22QND945)、河南省青年人才托举工程项目 (2021HYTP004)、河南工程学院横向课题 (HKJ2023079)

通信作者: \*shangji@haue.edu.cn

了两种不同尺寸的双晶 LT 电光 Q 开关,并对 Q 开关的双晶匹配质量和消光比进行了检测。

## 2 理论分析

为了利用最大的有效电光系数,根据 LT 晶体在不同电场方向下的电光特性<sup>[15]</sup>,采用沿  $z$  轴方向施加电场、沿  $x$  轴方向通光的调制方式。施加电场后,晶体的电感应主轴仍和原主轴重合。为补偿自然双折射,两块晶体绕  $x$  轴相对旋转  $90^\circ$ ,外加电场极性相反,如图 1 所示。利用 LT 晶体的自然双折射特性和电光效应,可求出激光通过两晶体后的总相位差<sup>[14]</sup>,两本征偏振方向分别沿  $y$  轴和  $z$  轴方向。根据电光调 Q 原理,激光偏振方向  $P$  应与  $z$  轴成  $45^\circ$ 。

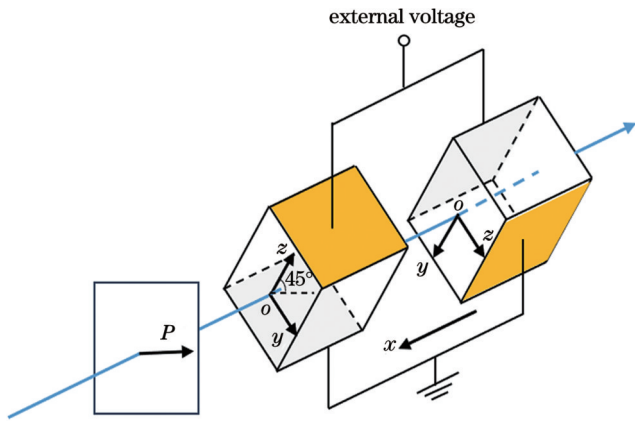


图 1 双晶 LT 电光 Q 开关结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of double-crystal LT electro-optic Q-switch

在实际应用中,受晶体光学不均匀性、加工偏差、温度变化等的影响,两块晶体中不同区域的光学路径长度和双折射率都可能存在差异,从而导致由自然双折射引起的相位差无法完全补偿,进而影响调 Q 效果,下面逐一进行分析。

### 2.1 光学不均匀性的影响

LT 晶体是一种非化学计量比固液同成分共熔化合物,晶体缺陷结构复杂,存在光学不均匀性<sup>[16]</sup>。通常,采用提拉法生长的晶体沿生长方向的光学均匀性更差。为简化分析,仅考虑沿生长方向的光学不均匀性。本实验所用 LT 晶体为  $z$  向生长,设光学不均匀性为  $\phi$ ,取晶体 1 的晶轴坐标系为统一的物理坐标系,则两晶体中的自然双折射可分别表示为

$$n_o - n_{e1} = (n_o - n_e)_o + \phi z, \quad (1)$$

$$n_o - n_{e2} = (n_o - n_e)_o + \phi y, \quad (2)$$

不加电压时,激光通过两晶体后的总相位差为

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} [(n_o - n_{e1}) - (n_o - n_{e2})] L = \frac{2\pi L \phi}{\lambda} (z - y), \quad (3)$$

式中: $n_e$  为 e 光的折射率; $n_o$  为 o 光的折射率; $n_{e1}$ 、 $n_{e2}$  分

别为两块晶体中 e 光的折射率; $(n_o - n_e)_o$  为坐标原点的自然双折射; $y$  和  $z$  分别为晶体 1  $y$  轴和  $z$  轴方向的坐标值; $\lambda$  为激光波长; $L$  为单块晶体通光方向的长度。对于 1/4 波电压电光调 Q,偏振镜同时用于起偏和检偏,电光晶体相当于置于平行偏振镜间,相应的透过光强为

$$i = i_o - i_o \sin^2 \delta = \frac{i_o}{2} [1 + \cos(2\delta)], \quad (4)$$

式中: $i_o$ 、 $i$  分别为输入光束和输出光束的光强分布。激光光强一般呈准高斯分布,这里仅考虑 TEM<sub>00</sub> 模,设输入激光光强分布为

$$i_o = I_o \frac{1}{\pi r_o^2} \exp\left(-\frac{y^2 + z^2}{r_o^2}\right), \quad (5)$$

式中: $I_o$  为入射总光强; $r_o$  为高斯光束的光斑半径。则输出光强  $I$  为

$$I = \frac{I_o}{2} \iint \frac{1}{\pi r_o^2} \exp\left(-\frac{y^2 + z^2}{r_o^2}\right) [1 + \cos(2\delta)] dy dz. \quad (6)$$

令  $m = \frac{4\pi L \phi}{\lambda}$ , 可求得结果为

$$I = \frac{I_o}{2} \left[1 + \exp\left(-\frac{m^2 r_o^2}{2}\right)\right]. \quad (7)$$

当在晶体上施加 1/4 波电压时,激光通过两晶体后的总相位差将附加  $\pi/2$ ,代入式(6),可求得施加电压后的输出光强为

$$I = \frac{I_o}{2} \left[1 - \exp\left(-\frac{m^2 r_o^2}{2}\right)\right]. \quad (8)$$

因此,双晶电光 Q 开关的消光比( $E_{xt}$ )为

$$E_{xt} = \frac{1 + \exp\left(-\frac{m^2 r_o^2}{2}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{m^2 r_o^2}{2}\right)}. \quad (9)$$

一般地,电光 Q 开关的消光比达到 100:1 以上时可以满足应用需求。设激光波长为 1064 nm,激光光斑半径为 2.5 mm,由式(9)可以求出:当单块晶体长度为 10 mm 时,若要使消光比达到 100:1,光学均匀性须优于  $6.8 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-1}$ ;当单块晶体长度为 5 mm 时,光学均匀性须优于  $1.36 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$ 。晶体长度对消光比的影响显著,在光学均匀性为  $10^{-5} \text{ cm}^{-1}$ ,光斑半径为 2.5 mm 的条件下,当单块晶体长度为 5 mm 时,消光比可以达到 183:1,但当晶体长度为 10 mm 时,消光比仅为 45:1。由式(9)可以得出,当消光比达到 10:1 以上时,  $-m^2 r_o^2/2$  项为小量,因此有  $\exp(-m^2 r_o^2/2) \approx 1 - m^2 r_o^2/2$ ,由此可求得消光比  $E_{xt}$  为

$$E_{xt} \approx \frac{4}{m^2 r_o^2} = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 L^2 \phi^2 r_o^2}. \quad (10)$$

可见,当光学均匀性一定时,消光比基本与晶体长度的平方成反比。同样地,当晶体长度一定

时,消光比基本与光学不均匀性的平方成反比。由式(9)求出的消光比与晶体长度以及光学不均

匀性之间的关系如图 2 所示,可见与上述分析结果一致。

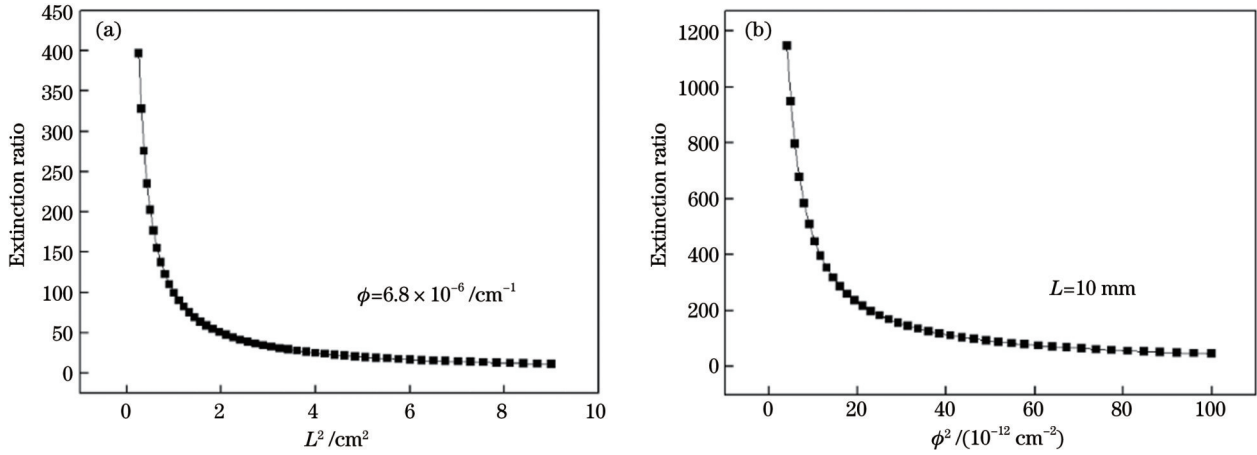


图 2 消光比计算结果。(a)消光比随晶体长度的变化;(b)消光比随光学不均匀性的变化

Fig. 2 Calculation results of extinction ratio. (a) Extinction ratio versus crystal length; (b) extinction ratio versus optical inhomogeneity

## 2.2 晶向偏离的影响

受加工精度的影响,晶轴和晶体端面法线之间总会存在偏差,一方面相位差会受到影响,另一方面晶体中的本征偏振方向也会发生偏离,进而影响消光比。这里讨论两种特殊的情况,即仅有相位差变化和仅有本征偏振方向变化。

### 2.2.1 仅有相位差变化

当激光在晶轴坐标系  $xoy$  面或  $xoz$  面内传播时,只有相位差发生变化。设激光传播方向与两晶体的  $x$  轴的夹角分别为  $\theta_1, \theta_2$ , 在  $yo_z$  面的投影与晶体 1 的  $y$  轴的夹角为  $\varphi$ , 由折射率椭球理论<sup>[17]</sup>可以求得激光通过 Q 开关后的相位差为

$$\delta = \frac{2\pi L}{\lambda} \left( \sqrt{\frac{1}{\beta_{22}^{(1)}}} + \sqrt{\frac{1}{\beta_{11}^{(2)}}} - \sqrt{\frac{1}{\beta_{11}^{(1)}}} - \sqrt{\frac{1}{\beta_{11}^{(2)} \sin^2 \theta_2 + \beta_{22}^{(2)} \cos^2 \theta_2}} \right), \quad \varphi = 0, \quad (11)$$

$$\delta = \frac{2\pi L}{\lambda} \left( \sqrt{\frac{1}{\beta_{11}^{(1)} \sin^2 \theta_1 + \beta_{22}^{(1)} \cos^2 \theta_1}} + \sqrt{\frac{1}{\beta_{11}^{(2)}}} - \sqrt{\frac{1}{\beta_{11}^{(1)}}} - \sqrt{\frac{1}{\beta_{22}^{(2)}}} \right), \quad \varphi = 90^\circ, \quad (12)$$

式中:  $\beta_{11}^{(i)}, \beta_{22}^{(i)}$  (晶体编号  $i, j=1, 2$ ) 分别为晶体 1 和晶体 2 的介质隔离率张量的分量,  $\beta_{11}^{(i)} = \frac{1}{n_o^2} + \gamma_{13} E^{(i)}$ ,  $\beta_{22}^{(i)} = \frac{1}{n_e^2} + \gamma_{33} E^{(i)}$ ,  $\gamma_{13}, \gamma_{33}$  为电光系数,  $E^{(i)}$  为外加电场。由于两块晶体上所加的电场极性相反,故两块晶体的  $\beta_{11}^{(i)}, \beta_{22}^{(i)}$  不同。

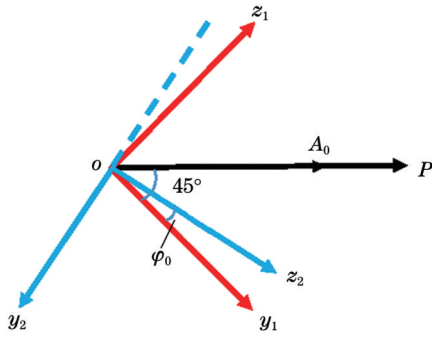
无外加电压与施加 1/4 波电压时的透过率的比值即为 Q 开关的消光比。结合式(11)、(12)和平行偏振系统的透过率公式<sup>[18]</sup>, 代入 LT 晶体的各参数<sup>[19]</sup>, 可以求得: 当激光波长为 1064 nm、单块晶体长度为 10 mm 时,

要使消光比达到 100:1,  $\theta_1, \theta_2$  应小于  $1.3^\circ$ , 当单块晶体长度为 5 mm 时,  $\theta_1, \theta_2$  应小于  $1.9^\circ$ 。此外可以求得, 当晶向偏离角一定时, 消光比与晶体长度的平方基本成反比。

### 2.2.2 仅有本征偏振方向变化

设激光严格沿着  $x$  轴方向传播, 但两晶体的  $z$  轴不严格正交, 晶体 1 的  $y$  轴和晶体 2 的  $z$  轴之间存在夹角  $\varphi_0$ 。当激光通过两晶体时, 本征偏振方向仍分别沿  $y$  轴和  $z$  轴方向, 且相位差未发生变化, 本征偏振方向示意图如图 3 所示。根据偏振光在晶体中的传播规律, 激光往返两次通过双晶电光 Q 开关和偏振镜时, 偏振分量变化为

$$\left\{ \begin{array}{ll} A_0 \cos 45^\circ \sin^2 \varphi_0 \sin(\omega t + \delta_1 + \delta'_1 + \delta'_1 + \delta_1), & P \rightarrow y_1 \rightarrow y_2 \rightarrow y_2 \rightarrow y_1 \\ -A_0 \cos 45^\circ \sin \varphi_0 \cos \varphi_0 \sin(\omega t + \delta_1 + \delta'_1 + \delta'_1 + \delta_2), & P \rightarrow y_1 \rightarrow y_2 \rightarrow y_2 \rightarrow z_1 \\ -A_0 \sin 45^\circ \sin \varphi_0 \cos \varphi_0 \sin(\omega t + \delta_2 + \delta'_1 + \delta'_1 + \delta_1), & P \rightarrow z_1 \rightarrow y_2 \rightarrow y_2 \rightarrow y_1 \\ A_0 \sin 45^\circ \cos^2 \varphi_0 \sin(\omega t + \delta_2 + \delta'_1 + \delta'_1 + \delta_2), & P \rightarrow z_1 \rightarrow y_2 \rightarrow y_2 \rightarrow z_1 \\ A_0 \cos 45^\circ \cos^2 \varphi_0 \sin(\omega t + \delta_1 + \delta'_2 + \delta'_2 + \delta_1), & P \rightarrow y_1 \rightarrow z_2 \rightarrow z_2 \rightarrow y_1 \\ A_0 \cos 45^\circ \cos \varphi_0 \sin \varphi_0 \sin(\omega t + \delta_1 + \delta'_2 + \delta'_2 + \delta_2), & P \rightarrow y_1 \rightarrow z_2 \rightarrow z_2 \rightarrow z_1 \\ A_0 \sin 45^\circ \sin \varphi_0 \cos \varphi_0 \sin(\omega t + \delta_2 + \delta'_2 + \delta'_2 + \delta_1), & P \rightarrow z_1 \rightarrow z_2 \rightarrow z_2 \rightarrow y_1 \\ A_0 \sin 45^\circ \sin^2 \varphi_0 \sin(\omega t + \delta_2 + \delta'_2 + \delta'_2 + \delta_2), & P \rightarrow z_1 \rightarrow z_2 \rightarrow z_2 \rightarrow z_1 \end{array} \right. \quad (13)$$

图 3 两晶体  $z$  轴不正交时本征偏振方向示意图Fig. 3 Schematic of eigen polarization directions when  $z$  axes of two crystals are not orthogonal

式中:  $\omega$  为光波的角频率;  $t$  为时间;  $A_0$  为入射激光的振幅;  $\delta_1$  和  $\delta_1'$  分别为沿  $y$  方向的偏振光通过晶体 1 和晶体 2 后产生的相位延迟量;  $\delta_2$  和  $\delta_2'$  为沿  $z$  方向的偏振光产

生的相位延迟量。利用光波的叠加原理<sup>[20]</sup>, 可分别求出沿  $y_1, z_1$  方向的偏振光的合振幅  $A_1, A_2$  及相位  $\psi_1, \psi_2$ 。沿  $y_1, z_1$  方向的偏振光在  $P$  方向的分量叠加后的合振幅  $B$  为

$$B^2 = (A_1 \cos 45^\circ)^2 + (A_2 \sin 45^\circ)^2 + 2A_1 A_2 \cos 45^\circ \sin 45^\circ \cos(\psi_2 - \psi_1). \quad (14)$$

由此可求得透过率  $T = B^2/A_0^2$ 。设激光波长为 1064 nm, 代入 LT 晶体的各参数, 可求得当单块晶体长度为 10 mm 时, 要使消光比不小于 100:1,  $\varphi_0$  角应小于  $3.1^\circ$ , 单块晶体长度为 5 mm 时,  $\varphi_0$  角应小于  $2.9^\circ$ 。

### 2.3 温度和晶体尺寸的影响

设两块晶体的长度分别为  $L_1, L_2$ , 温度变化分别为  $\Delta T_1, \Delta T_2$ , LT 晶体的双折射率温度系数为  $\kappa$ , 沿  $x$  轴方向的热膨胀系数为  $\alpha$ 。则不加电场时, 温度变化下的总相位差为

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \left[ (n_o - n_e)_0 + \kappa \Delta T_1 \right] L_1 (1 + \alpha \Delta T_1) - \frac{2\pi}{\lambda} \left[ (n_o - n_e)_0 + \kappa \Delta T_2 \right] L_2 (1 + \alpha \Delta T_2) - \frac{2\pi}{\lambda} (n_o - n_e)_0 \Delta L - \frac{2\pi}{\lambda} \left[ \alpha (n_o - n_e)_0 + \kappa \right] (L_2 \Delta T + \Delta L \Delta T_1), \quad (15)$$

式中:  $\Delta L = L_2 - L_1$ ;  $\Delta T = \Delta T_2 - \Delta T_1$ ; 二阶小项已忽略不计。式(15)中第一项反映了两晶体长度偏差对相位差的影响, 第二项反映了晶体长度、两晶体温度变化、长度偏差和温差等因素对相位差的综合影响。当两块晶体的温度变化相同时, 若两晶体长度没有偏差, 则温度变化不会影响相位差, 因此不会影响消光比。但若两块晶体长度存在偏差, 则温度变化也会影响消光比。若两块晶体的温度变化不同, 则必然会影响消光比, 且影响程度和单块晶体长度相关。此外, 可以证明, 当施加电场时, 由电场引起的附加相位差随温度的变化可以忽略不计<sup>[21]</sup>。下面对各情况进行定量分析。

#### 2.3.1 两晶体温度变化相同但存在长度偏差

当两晶体无温度变化, 仅存在长度偏差时, 由式(15)和透过率公式可以求出, 要使消光比大于 100:1, 两晶体的长度偏差必须在  $5.6 \mu\text{m}$  以下, 消光比基本与长度偏差的平方成反比。在相关应用领域, 调 Q 激光系统往往要经历一个较宽的温度范围<sup>[22]</sup>, 工作温度范围通常为  $-40 \sim 65^\circ\text{C}$ , 当存在长度偏差时, 该温度变化将影响消光比。假设两晶体的长度偏差为  $5 \mu\text{m}$ , LT 晶体的双折射率温度系数  $\kappa$  约为  $10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , 沿  $x$  轴方向的线膨胀系数  $\alpha$  约为  $10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , 则当温度变化为  $-65^\circ\text{C}$  时, 消光比由 127:1 变为 85:1。要使 Q 开关的消光比在此温度变化下始终不低于 100:1, 则两晶体的长度偏差应小于  $4.6 \mu\text{m}$ 。

#### 2.3.2 两晶体温度变化不同

设两块晶体尺寸没有偏差, 但温度变化不同。当温差为  $0.1^\circ\text{C}$  时, 由式(15)和透过率公式可以求得, 当单块晶体长度为 10 mm 时, 消光比为 286:1, 单块晶体

长度为 5 mm 时, 消光比为 1147:1, 可见消光比和晶体长度的平方成反比。同样地, 可以求得消光比与温差的平方成反比。要使消光比大于 100:1, 当晶体长度为 10 mm 时, 温差应小于  $0.16^\circ\text{C}$ , 当晶体长度为 5 mm 时, 温差应小于  $0.33^\circ\text{C}$ , 即允许的温差范围和晶体长度成反比。

## 3 实验研究

### 3.1 双晶 LT 电光 Q 开关的制备

基于上述分析, 制备了双晶 LT 电光 Q 开关。为了使配对用晶体的光学均匀性尽可能一致, 两块晶体选自同一晶棒的同一纵向深度且径向对称的位置。综合考虑通光口径、半波电压、消光比等因素, 制备了两种规格的调 Q 开关, 单块晶体尺寸分别为  $9 \text{ mm} \times 9 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  ( $y \times z \times x$ ) 和  $9 \text{ mm} \times 9 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  ( $y \times z \times x$ ), 分别标记为  $\text{LT}_1$  和  $\text{LT}_2$ 。采用同盘抛光光学加工工艺保证两块匹配晶体的长度偏差、晶向偏离满足应用要求。加工完成后, 采用准静态测量仪对  $z$  轴正负向进行了标定, 并在晶体两  $z$  面镀制 Ti/Au 电极, 在两  $x$  面镀制 1064 nm 增透膜。

采用“半固定”弹性支架对两晶体进行装配固定, 其由两个夹角为  $90^\circ$  的 V 形槽和一个底座构成。调节 V 形槽的俯仰角使两晶体的通光方向重合, 外加电场方向相互垂直。在两电极面引出导线用以施加电场。由于两晶体的温差容量较小, 为保证两晶体温度变化的一致性, 同时减少可能诱发激光损伤的晶体端面污染, 在装调好的 Q 开关外加罩子, 装配好的 LT 调 Q 开关如图 4 所示。

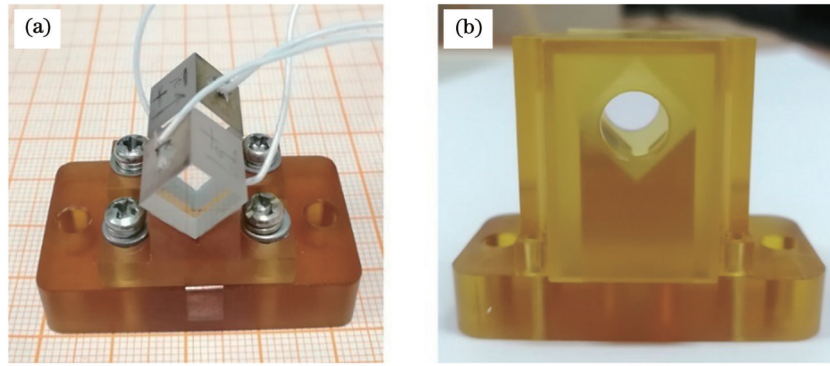


图4 装配好的双晶LT电光Q开关。(a)半固定弹性支架装配;(b)外加罩子封装

Fig. 4 Assembled double-crystal LT electro-optic Q-switch. (a) Semi-fixed elastic holder; (b) external cover

### 3.2 锥光干涉检测

采用锥光干涉技术<sup>[23]</sup>对晶体的光学质量以及两晶体的匹配程度进行检测。光源采用波长为632.8 nm的氦氖激光,利用毛玻璃使激光变为发散光束,待测晶体置于正交偏振镜间,偏振镜的透振方向与两晶体的y轴或z轴方向成45°角。由于LT晶体的双折射率比较小,测试时尽量使毛玻璃靠近晶体,使发射角足够大,以产生完整的干涉图样。平移晶体,观察通光面内不同区域的锥光干涉图样,从而对单块晶体的光学均匀性以及两块晶体的匹配质量进行判断。

### 3.3 消光比测试

采用偏光法测量了LT电光Q开关的动态消光比。光源采用波长为1064 nm的Nd:YAG脉冲激

光,重复频率为1 Hz,光斑直径为5 mm,发散角约为6 mrad,输出能量波动小于3%。激光为偏振光,偏振方向沿水平方向。激光依次通过LT电光Q开关、检偏镜后,用激光能量计测量透过能量。在电光Q开关上施加可调直流高压,研究透过能量随外加电压的变化,最大透过能量( $E_{\max}$ )与最小透过能量( $E_{\min}$ )的比值即为开关的动态消光比。改变检偏镜的透振方向,使其分别与入射激光的偏振方向平行和垂直,分别测量平行偏光和正交偏光下的动态消光比。

## 4 实验结果与分析

### 4.1 晶体光学质量

图5为长度为10 mm的LT晶体分别沿y轴和z轴

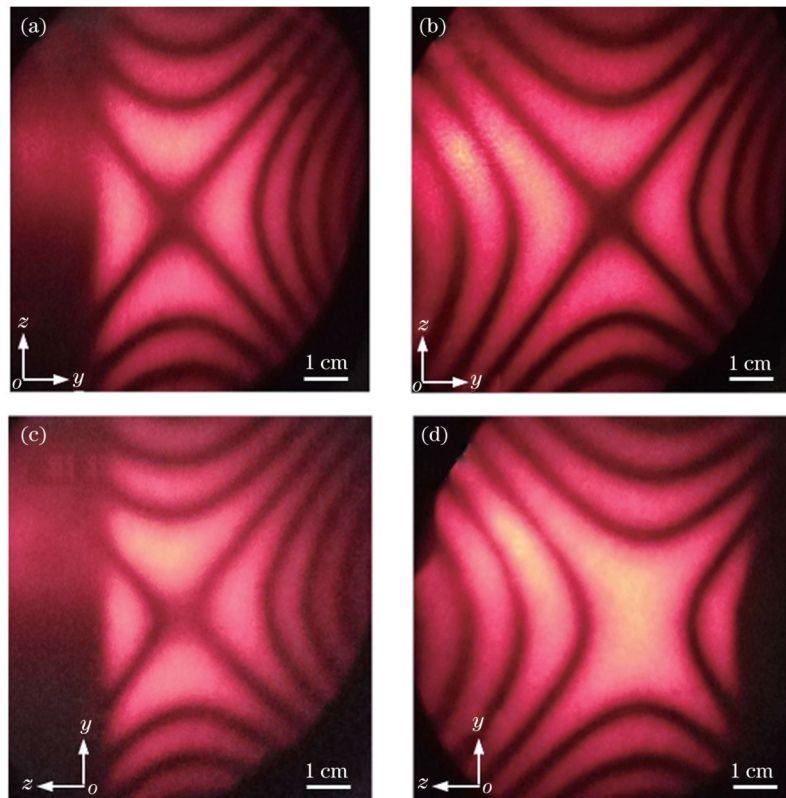


图5 LT晶体通光面不同区域的锥光干涉图样。(a)(b)y轴方向差异最大的干涉图样;(c)(d)z轴方向差异最大的干涉图样

Fig. 5 Conoscopic interference patterns in different regions of light passing surface of LT crystal. (a)(b) Interference patterns with maximum difference along y-axis; (c)(d) interference patterns with maximum difference along z-axis

方向差异最大的锥光干涉图样。沿  $y$  轴方向的干涉图样差异较小,而沿  $z$  轴方向的干涉图样存在明显差异,并且各晶体的锥光干涉图样具有相同的变化规律,说明差异并非是加工导致的,而是与晶体自身的光学不均匀性有关,不均匀性主要表现在  $z$  轴方向(即生长方向)上,由此也说明仅分析晶体生长方向上的光学不均匀性对消光比的影响是可行的。根据锥光干涉原理和 LT 晶体的双折射特性可以得出:当沿  $x$  轴方向通过的激光产生的光程差( $\Gamma_0$ )为波长  $\lambda$  的整数倍或半波长的奇数倍时, $z$  轴方向的第一级暗条纹的间距与  $y$  轴方向的基本相等,当  $0 < \Gamma_0 - N\lambda < 0.5\lambda$  ( $N$  为整数)时, $z$  轴方向的第一级暗条纹的间距小于  $y$  轴方向的第一级暗条纹的间距,当  $0.5\lambda < \Gamma_0 - N\lambda < \lambda$  ( $N$  为整数)时反之。根据这一规律,结合图 5(c)和图 5(d)可估算出两位置处对应的光程差  $\Gamma_0$  的差异小于  $\lambda/2$ ,由此

可求出两处双折射率差小于  $3.164 \times 10^{-5}$ ,两处距离约为 8 mm,因此晶体的光学均匀性为  $10^{-5} \text{ cm}^{-1}$  量级。

#### 4.2 双晶体匹配质量

图 6 为两块双晶 LT 电光 Q 开关通光面内差异最大的锥光干涉图样。可以看出:LT<sub>2</sub> 匹配较好,通光面内不同区域的锥光干涉图样几乎无差异,中间呈十字分布,中心为暗区,说明两晶体在整个通光面内的双折射均匹配较好,由自然双折射引起的相位差实现了较好的补偿;LT<sub>1</sub> 没有达到较理想的匹配,图 6(a)中干涉图样中间呈十字分布,中心为暗区,说明对应位置处两块晶体的双折射匹配较好,而图 6(b)中干涉图样中间没有形成十字分布,而是呈双曲线,中心为亮区,说明对应位置处由自然双折射引起的相位差没有实现完全补偿。晶体通光方向的长度越长,光学不均匀性的影响越明显,这与理论分析结果一致。

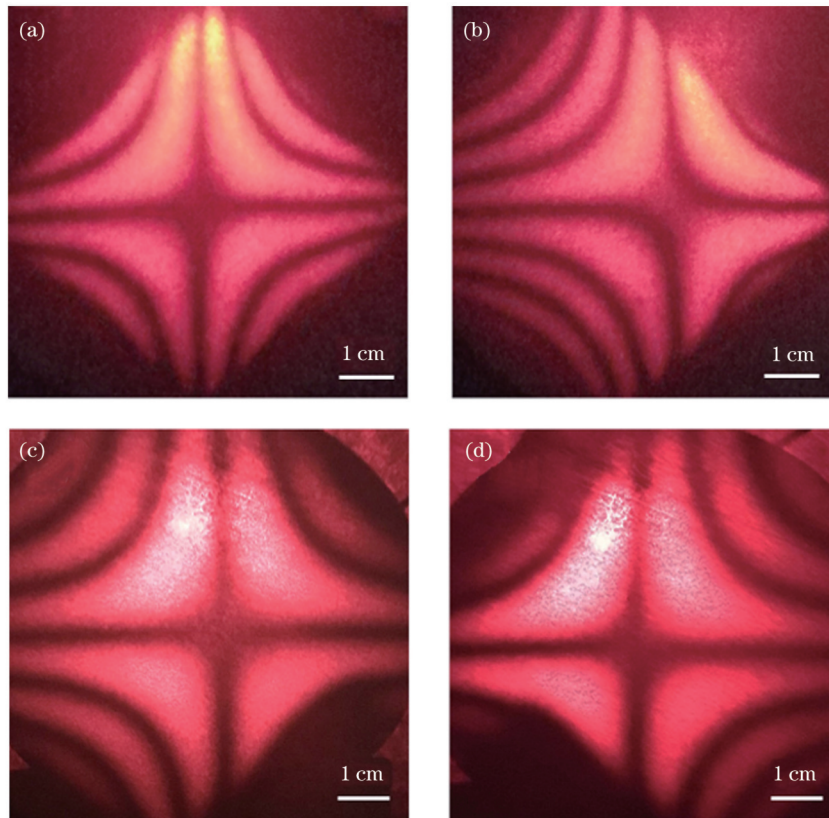


图 6 双晶 LT 电光 Q 开关通光面不同区域差异最大的锥光干涉图样。(a)(b)LT<sub>1</sub>; (c)(d)LT<sub>2</sub>

Fig. 6 Conoscopic interference patterns with maximum difference in different regions of light passing surface of double-crystal LT electro-optic Q-switch. (a)(b) LT<sub>1</sub>; (c)(d) LT<sub>2</sub>

#### 4.3 消光比

首先对系统的消光比进行了测量。光路中先不插入 LT 调 Q 开关,调节使检偏镜的透振方向( $P_2$ )分别与激光偏振方向( $P_1$ )平行和垂直,平行时透过能量  $E_{\max}$  与垂直时透过能量  $E_{\min}$  的比值即为系统消光比。表 1 为测得的系统消光比和两块 LT 电光 Q 开关的动态消光比,可见消光比测量结果和锥光干涉检测结果一致,LT<sub>2</sub> 匹配较好,相应的消光比也更高。但是,这

两块 LT 调 Q 开关的消光比均不太高,分析认为主要是晶体自身的光学均匀性不高导致的。此外,根据理论分析可知,消光比和晶体长度的平方成反比。但从表 1 可以看出,LT<sub>2</sub> 的消光比仅是 LT<sub>1</sub> 的 3 倍左右,并不符合这一关系,分析认为:一方面是由于消光比受到诸多因素的影响,该现象是各因素综合作用的结果;另一方面,对于 LT<sub>2</sub> 电光 Q 开关,单块晶体的纵横比小于 1,外加电压时晶体内部的电场分布不均匀<sup>[24]</sup>,从而影

响消光比。

表 1 系统消光比和 LT 电光 Q 开关的动态消光比

Table 1 System extinction ratio and dynamic extinction ratios of LT electro-optic Q-switches

Configuration	$E_{min}$ /mJ	$E_{max}$ /mJ	Extinction ratio
System	0.34	167	491:1
$P_1 \perp P_2$ , $LT_1$	5.60	155	28:1
$P_1 \perp P_2$ , $LT_2$	1.95	161	83:1
$P_1 // P_2$ , $LT_1$	5.70	150	26:1
$P_1 // P_2$ , $LT_2$	2.00	162	81:1

## 5 结 论

以双晶 LT 电光 Q 开关为例,系统分析计算了光学不均匀性、晶向偏离、晶体尺寸、温度变化、两晶体长度偏差及温差等因素对双晶电光 Q 开关消光比的影响,明确了消光比为 100:1 时各因素的容差范围。结合晶体生长和光学加工的实际难度,探明了光学不均匀性、两晶体长度偏差和温差是影响消光比的关键因素,当仅考虑单一变量时,消光比与此变量的平方成反比,因此必须严格控制。同时,晶体长度也对消光比有显著影响,当光学不均匀性、晶向偏离、两晶体温差一定时,消光比与单块晶体长度的平方成反比。基于上述研究,为了保证两晶体长度偏差、晶向偏离等满足应用需求,采用同盘抛光光学加工工艺制备了两种不同长度的双晶 LT 电光 Q 开关。通过检测晶体的光学质量、Q 开关的双晶匹配质量和消光比,证实晶体通光方向的长度越短,两晶体匹配越好,消光比越高。但是,受晶体光学不均匀性的影响,制备的两块 LT 调 Q 开关的消光比均不太高。后续通过提高晶体的光学均匀性,有望获得高消光比双晶 LT 电光 Q 开关。研究结果对高消光比双晶电光 Q 开关的研制具有重要指导作用。

## 参 考 文 献

[1] 孙小燕, 梁昶, 张伟, 等. 超短脉冲激光加工在微电/光互连领域的应用研究进展[J]. 中国激光, 2022, 49(10): 1002502.  
Sun X Y, Liang C, Zhang W, et al. Application of ultrashort pulse laser manufacturing in microelectrical/optical interconnection[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(10): 1002502.

[2] Zhang X W, Li H S, Guo Q M, et al. Modeling of laser optical detection system for detecting target's sensitivity and analysis of the impact of optical heterodyne detection performance[J]. Optik, 2021, 243: 167411.

[3] Wang X H, Jia K P, Chen M W, et al. 2  $\mu\text{m}$  optical frequency comb generation via optical parametric oscillation from a lithium niobate optical superlattice box resonator[J]. Photonics Research, 2022, 10(2): 509-515.

[4] 申玉, 宗楠, 温雅, 等. 新颖的中红外 6.45  $\mu\text{m}$  激光医疗应用及光源研究进展(特邀)[J]. 光电技术应用, 2022, 37(1): 10-18.  
Shen Y, Zong N, Wen Y, et al. Review on novel 6.45  $\mu\text{m}$  laser

scalpel, the medical applications and laser sources (invited)[J]. Electro-Optic Technology Application, 2022, 37(1): 10-18.

[5] 吕世威, 朱占达, 刘大鹏, 等. 高效率 LD 角侧泵浦 Nd: YAG 电光调 Q 激光器[J]. 中国激光, 2022, 49(17): 1701004.  
Lü S W, Zhu Z D, Liu D P, et al. High-efficiency LD corner-side-pumped Nd: YAG electro-optical Q-switched laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(17): 1701004.

[6] Ma L L, Li C Y, Sun L Y, et al. Submicrosecond electro-optical switching of one-dimensional soft photonic crystals[J]. Photonics Research, 2022, 10(3): 786-792.

[7] 郑大怀, 吴婧, 商继芳, 等. 电光调 Q 晶体研究进展[J]. 中国科学: 技术科学, 2017, 47(11): 1139-1148.  
Zheng D H, Wu J, Shang J F, et al. Progress on electro-optic crystals for Q-switches[J]. Scientia Sinica: Technologica, 2017, 47(11): 1139-1148.

[8] Shang J F, Yang J F, Hao H S, et al. Compact low-voltage electro-optic Q-switch made of  $\text{LiNbO}_3$ [J]. Optics Express, 2020, 28(15): 22287-22296.

[9] 吴婧, 李清连, 张中正, 等. 基于双晶匹配的低压铌酸锂电光削波器的研究[J]. 中国激光, 2022, 49(7): 0708001.  
Wu J, Li Q L, Zhang Z Z, et al. Low half-wave voltage lithium niobate electro-optic slitter based on dual crystal matching[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(7): 0708001.

[10] Yu Y J, Chen X Y, Wang C, et al. High repetition rate 880 nm diode-directly-pumped electro-optic Q-switched Nd:  $\text{GdVO}_4$  laser with a double-crystal RTP electro-optic modulator[J]. Optics Communications, 2013, 304: 39-42.

[11] Roth M, Tseitlin M, Angert N. Oxide crystals for electro-optic Q-switching of lasers[J]. Glass Physics and Chemistry, 2005, 31(1): 86-95.

[12] Salvestrini J P, Abarkan M, Fontana M D. Comparative study of nonlinear optical crystals for electro-optic Q-switching of laser resonators[J]. Optical Materials, 2004, 26(4): 449-458.

[13] 董磊, 卓壮, 赵圣之. 影响双块晶体电光开关消光比因素的分析[J]. 激光技术, 2008, 32(1): 15-17.  
Dong L, Zhuo Z, Zhao S Z. Analysis of factors affecting extinction ratio about double-crystal electro-optic switch[J]. Laser Technology, 2008, 32(1): 15-17.

[14] 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.  
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.

[15] 方启万. 铌酸锂电光调制研究[J]. 邮电研究, 1979(2): 39-65.  
Fang Q W. Study on electro-optic modulation of lithium niobate[J]. Study on Optical Communications, 1979(2): 39-65.

[16] Kostriiskii S M, Aillerie M, Bourson P, et al. Raman spectroscopy study of compositional inhomogeneity in lithium tantalate crystals[J]. Applied Physics B, 2009, 95(1): 125-130.

[17] 母国光, 战元龄. 光学[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2023.  
Mu G G, Zhan Y L. Optics[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2023.

[18] 宋哲, 刘立人, 周煜, 等. 入射光偏振方向对  $\text{LiNbO}_3$  晶体近光轴电光调制的影响[J]. 中国激光, 2005, 32(3): 319-322.  
Song Z, Liu L R, Zhou Y, et al. Effect of the polarization direction of incident light on electro-optic modulator for light propagating near the optic axis in  $\text{LiNbO}_3$ [J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(3): 319-322.[知网中文]

[19] 尼科略相. 非线性光学晶体: 一份完整的总结[M]. 王继扬, 译. 北京: 高等教育出版社, 2009.  
Nikogosyan D N. Nonlinear optical crystals: a complete survey[M]. Wang J Y, Transl. Beijing: Higher Education Press, 2009.

[20] 廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.  
Liao Y B. Polarization optics[M]. Beijing: Science Press, 2003.

[21] Shang J F, Sun J, Li Q L, et al. Single-block pulse-on electro-optic Q-switch made of  $\text{LiNbO}_3$ [J]. Scientific Reports, 2017, 7: 4651.

- [22] Jundt D H. Temperature-stable lithium niobate electro-optic Q-switch for improved cold performance[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9251: 92510F.
- [23] 商继芳, 孙军, 张勇军, 等. 一种锥光干涉和近光轴调制结合测量晶体电光系数的方法[J]. 人工晶体学报, 2015, 44(11): 2925-2930.  
Shang J F, Sun J, Zhang Y J, et al. A method to measure electro-optic coefficients of crystals by combining conoscopic interference and near optical axis electro-optic modulation[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2015, 44(11): 2925-2930.
- [24] 尚辉. 激光器 DKDP 开关晶体电光性能的研究报告[D]. 济南: 山东大学, 2008.  
Shang H. Research report on electro-optical properties of laser DKDP switching crystal[D]. Jinan: Shandong University, 2008.

## Research on Extinction Ratio of Double-Crystal Electro-Optic Q-switch

Shang Jifang<sup>1\*</sup>, Li Qinglian<sup>2</sup>, Sun Xing<sup>1</sup>, Chen Ling<sup>1</sup>, Du Wenjing<sup>1</sup>, Li Liubang<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Henan Key Laboratory of Electronic Ceramic Materials and Application, College of Materials Engineering,

Henan University of Engineering, Zhengzhou 451191, Henan, China;

<sup>2</sup>School of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China;

<sup>3</sup>Zhengzhou Zhuoertai New Material Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450016, Henan, China

### Abstract

**Objective** Electro-optic (EO) Q-switching technology has been extensively used to fabricate pulsed lasers. Its advantages of a faster switching rate, better hold-off ability, and controllable repetition rates enable the generation of energetic short laser pulses. To date, practical EO crystals include LiNbO<sub>3</sub> (LN), LiTaO<sub>3</sub> (LT), KD<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> (DKDP), and RbTiOPO<sub>4</sub> (RTP). To achieve a low driving voltage, the laser must propagate along the non-optical-axis direction of these crystals, which introduces additional phase retardation induced by natural birefringence. Using a second crystal that is rotated 90° with respect to the first crystal is necessary to compensate for the natural birefringence and its strong thermal fluctuations. However, achieving double-crystal EO Q-switches with a high extinction ratio is difficult because both crystals should have high transverse optical homogeneity and should be carefully matched. The matching quality may be affected by numerous factors, including the optical inhomogeneity of the crystals, optical processing accuracy, and temperature changes. To date, factors affecting the extinction ratio of double-crystal EO Q-switches have not been systematically studied, limiting the development and application of double-crystal EO Q-switches. In this study, we comprehensively analyze the factors affecting the extinction ratio and fabricated double-crystal LT EO Q-switches.

**Methods** First, using double-crystal LT EO Q-switches as examples, we analyze the factors that affect the extinction ratio of double-crystal EO Q-switches. To maximize the EO effect, an LT Q-switch is fabricated from two *x*-cut LT crystals with light propagating along the *x* axis and voltage applied along the *z* axis. A set of analytical phase-shift formulas that consider the optical inhomogeneity, crystallographic orientation deviation, length deviation, and temperature change of the two matching crystals are derived. Combined with the transmittance formula for the parallel-polarization system, the tolerances of these factors are calculated using an extinction ratio of 100:1. Accordingly, we fabricate two LT EO Q-switches with aperture of 9 mm×9 mm and lengths of 10 mm and 5 mm, respectively. The matching crystals are polished using the same polishing lap to ensure that the deviations in length and orientation satisfy the requirements. Each face of the crystals is finely ground, and the *x* surface is precisely polished and coated with anti-reflection films at 1064 nm. The *z* surface is then plated with gold and chromium. The two matching crystals are packaged in an elastic holder. The matching quality and extinction ratios are measured and characterized.

**Results and Discussions** According to univariate analysis, the extinction ratio of double-crystal EO Q-switches is strongly related to the optical inhomogeneity, crystallographic orientation deviation, and the length and temperature differences of the two matching crystals. The extinction ratio is inversely proportional to the square of the optical inhomogeneity [Fig. 2(b)] and those of the length and temperature differences when the other parameters are kept constant. In addition, the crystal length significantly affects the extinction ratio. When the optical inhomogeneity, crystallographic orientation deviation, and temperature difference are set, the extinction ratio is inversely proportional to the square of the crystal length [Fig. 2(a)]. In addition, even the same change in temperature in the two matching crystals may affect the extinction ratio when a difference in crystal length is observed. To achieve an extinction ratio of 100:1 under a crystal length of 10 mm, laser spot radius of 2.5 mm, and wavelength of 1064 nm, the optical homogeneity must be better than  $6.8 \times 10^{-6}/\text{cm}$ , the *x* and *z* orientation deviations should be less than 1.3° and 3.1°, respectively, the length difference should be less than 4.6 μm, and the temperature difference must be less than 0.16 °C. For the two prepared LT EO Q-switches (Fig. 4), the shorter switch exhibits a better matching quality and higher extinction ratio (Fig. 6). The extinction ratio of the shorter LT Q-switch is approximately three times that of the longer switch (Table 1). However, the extinction ratios of both Q-switches are



low due to poor optical homogeneity (Fig. 5).

**Conclusions** Using double-crystal LT EO  $Q$ -switches as an example, we systematically analyze the factors affecting the extinction ratio and calculate their tolerances. Based on the theoretical results and practical difficulties of crystal growth and optical processing, the optical inhomogeneity and length and temperature differences are verified as critical factors that must be strictly controlled. In addition, the extinction ratio is found to be inversely proportional to the square of the crystal length when the optical inhomogeneity, crystallographic orientation deviation, and temperature difference are constant. Accordingly, we prepare two double-crystal LT EO  $Q$ -switches with different lengths. A shorter LT  $Q$ -switch is verified to have a better matching quality and higher extinction ratio. However, the extinction ratios of both  $Q$ -switches are low due to poor optical homogeneity. Double-crystal LT-EO  $Q$ -switches with high extinction ratios can be achieved using crystals with high optical quality. This work can be of significance in guiding the development of double-crystal EO  $Q$ -switches with high extinction ratios.

**Key words** laser optics; optical switching devices; electro-optic  $Q$ -switching; double-crystal matching; extinction ratio; lithium tantalate crystal