

文章编号: 1001-3806(2008)01-0015-03

影响双块晶体电光开关消光比因素的分析

董 磊¹, 卓 壮², 赵圣之^{1*}

(1. 山东大学 信息学院, 济南 250100; 2. 山大鲁能中晶公司, 济南 250100)

摘要: 为了分析影响双块晶体电光开关消光比的各项因素, 采用折射率椭球方法, 进行了理论分析和实验验证。结果表明, 两晶体通光方向偏差及偏振器件透振方向偏差对消光比影响较大, 只要仔细调解上述两方面就能实现较好的电光调 Q 效果。

关键词: 光学器件; 消光比分析; 折射率椭球法; 双晶体

中图分类号: 0734.0436.4 文献标识码: A

Analysis of factors affecting extinction ratio about double-crystal electro-optic switch

DONG Lei¹, ZHUO Zhuang², ZHAO Sheng-zhi¹

(1. School of Information Science and Engineering Shandong University, Ji nan 250100, China; 2. Souldn Coretech, Ji nan 250100, China)

Abstract In order to analyze the factors affecting the contrast ratio of a electro optic switch with double crystals, the index-ellipsoid method is adopted. The experiments show that there are close dependence of the difference of light direction of double crystals and the polarization direction of the polarizers on contrast ratio. A good Q -switching effect could be obtained if the above two factors are more precisely adjusted.

Key words optical devices; contrast ratio analysis; index-ellipsoid method; double crystals

引 言

由于电光开关具有极短的开关时间和优秀的关断效果^[1]而广泛应用于各种激光调 Q 运转中^[2]。目前, 激光调 Q 技术的发展趋势是追求更短脉宽、更大的输出能量和更高的重复率, 然而传统的电光开关因存在一些难以克服的缺陷而不适于高频工作: 磷酸二氢钾热性能较差, 易潮解, 且半波电压高达 6kV, 难以做出同时满足高频和高电压的调 Q 电源; 铌酸锂高频时存在显著的压电效应, 工作频率受限于 1kHz 以下的范围^[3], 很难应用到 10kHz 以上的调 Q 开关重复率。而磷酸钛氧钾及磷酸钛氧铷 (rubidium titanyl phosphate, RTP), 正好能克服传统电光开关半波电压高和带宽窄的缺点, 很容易做成高重复率电光开关, 故受到行内专家的越来越多的关注^[4,7]。RTP 晶体比磷酸钛氧钾具有更高的电阻率和更大的工作带宽, 可以更方便地用于高重复率的调 Q 领域中^[5]。

RTP 晶体为双轴晶, 存在自然双折射。为了补偿双折射效应, 同时也为了减少温度变化对晶体折射率

的影响^[7], 通常采用双块晶体, 这使得对消光比的分析比单块晶体运用又有不同之处。目前已有对单轴晶铌酸锂单块运用时消光比影响因素的分析^[8], 但还没有对双块晶体电光运用时影响开关性能因素的报道。

本文中分析了双块晶体电光运用时的影响因素。发现两晶体通光方向的偏差对消光比的影响最大, 其次就是偏振器件透振方向的不严格正交对消光比的影响。根据本文中所得结论, 在双块晶体的电光运用中, 只要注意到仔细调节两晶体通光方向的重合和偏振器件透振方向的正交就能轻易获得开关的调 Q 运转。

1 理论分析

双块晶体以通光方向为轴旋转 90° 的补偿方案如图 1 所示 (图中 $\pm V$ 为所加正、负极电压)。下面以 RTP 为

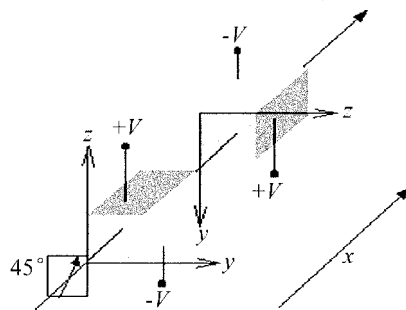


Fig 1 The scheme of double RTP crystals

作者简介: 董 磊 (1982-), 男, 硕士研究生, 主要从事非线性光学和电光开关方面的工作。

* 通讯联系人。E-mail: shengzhi_zhao@sdu.edu.cn

收稿日期: 2006-11-06 收到修改稿日期: 2006-12-18

例进行定量分析, 其主折射率分别为: $n_1 = 1.764$ $n_2 = 1.773$ $n_3 = 1.850$ ^[1]。因涉及正交偏振光在晶体中的传播理论, 故分析中采用了折射率椭球模型^[9]。

1.1 自然双折射造成出射光束不重合对消光比的影响
示意图如图 2 所示。为简化推导过程仅以入射光

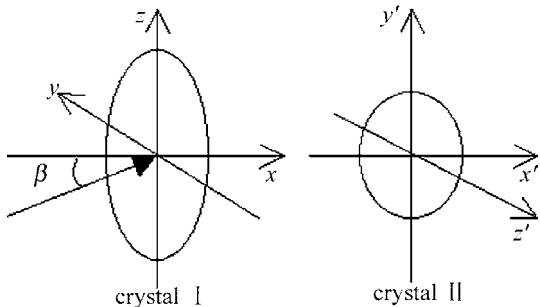


Fig 2 The effect of birefringence on contrast ratio

在晶体 I (II) 的 $x(x')$ 轴与 $z(y')$ 轴构成的入射面内为代表。垂直入射面振动的光为 e' , 在入射面内振动的光为 e'' 。设空气的折射率为 1, 晶体透光方向长度为 L 。忽略界面反射损耗和晶体吸收损耗, 由晶体内的折射定律得:

$$\sin\beta = n' \cdot \sin\alpha_1' = n'' \cdot \sin\alpha_1'' \quad (1)$$

式中, β 为入射角 (在空气中), $n', \alpha_1', n'', \alpha_1''$ 分别为在晶体 I 中 e' 光和 e'' 光的折射率和折射角, 显然在晶体 I 中 e' 光折射率 $n' = n_2$, e'' 光折射率为:

$$n'' = \frac{n_1 \cdot n_3}{(n_3^2 \cdot \sin^2\alpha_1'' + n_1^2 \cdot \cos^2\alpha_1'')^{1/2}} \quad (2)$$

根据偏振光在晶体中的传播规律^[9]及 (1) 式, (2) 式可得出经过晶体 I 后两正交光线的横向错位距离为:

$$d_I = |L \cdot (\tan\alpha_1'' - \tan\alpha_1' - \tan\alpha_1')| \quad (3)$$

同样的方法可得出经过晶体 II 后两正交光线的横向错位距离为:

$$d_{II} = |L \cdot (\tan\alpha_{II}'' - \tan\alpha_{II}' - \tan\alpha_{II}')| \quad (4)$$

(3) 式, (4) 式中 α_1', α_{II}' 为 e' 偏振光分别在晶体 I, 晶

$$M = \frac{\cos^2(\beta - \alpha') + 1 + 2\cos(\beta - \alpha') \cdot \cos\frac{2\pi}{\lambda} [(n_3 - n_2)L + n_2'L' - n_3L'']}{\cos^2(\beta - \alpha') + 1 - 2\cos(\beta - \alpha') \cdot \cos\frac{2\pi}{\lambda} [(n_3 - n_2)L + n_2'L' - n_3L'']} \quad (8)$$

式中, β 为两晶体透光方向夹角, λ 为光在真空中的波长, n_2, n_3 分别为晶体 y 轴、 z 轴的主折射率。对于电光开关, 消光比 100 左右就可有较好的开关效果^[10]。由 (8) 式可以得到当 $M = 100$ 时, $\beta = 1.4^\circ$ 。故正常使用时允许的透光方向角度偏差小于 $\pm 1.4^\circ$ 。

1.3 两晶体 z 轴不严格正交对消光比的影响

$$M = \frac{1 + 2\sin 2\beta \sin^2\beta \cos\beta \sin\left[2(n_3 - n_2)L \frac{2\pi}{\lambda}\right] + \cos^2\beta \cos 2\beta + \sin^2\beta \cos 2\beta \cos\left[2(n_3 - n_2)L \frac{2\pi}{\lambda}\right]}{1 - \cos 2\beta \cos^2\beta + \sin^2\beta \cos 2\beta \cos\left[2(n_3 - n_2)L \frac{2\pi}{\lambda}\right] - 4\sin^2\beta \cos^2\beta \cos\left[(n_3 - n_2)L \frac{2\pi}{\lambda}\right]} \quad (9)$$

体 II 中光线与光波方向的夹角, α_{II}' 和 α_{II}'' 为 e' 偏振光在晶体 II 中的折射角。当入射角为 1° 时, 两光线总偏差为 (3) 式、(4) 式之和, 约为 0.01mm, 面积偏差近似为线度偏差的平方, 为 0.0001mm², 而一般光束面积均达到 mm² 量级。故光束不重合对透过光线能量的影响很小, 即对消光比的影响很小。从此可看出小角度下, 自然双折射引起光线不重合对消光比影响很小, 可以忽略, 故在以后的分析中均不再考虑光线不重合因素。

1.2 两晶体 x 轴角度偏差对消光比的影响

为简化推导下面的分析只以两晶体有俯仰变化为例, 如图 3 所示。

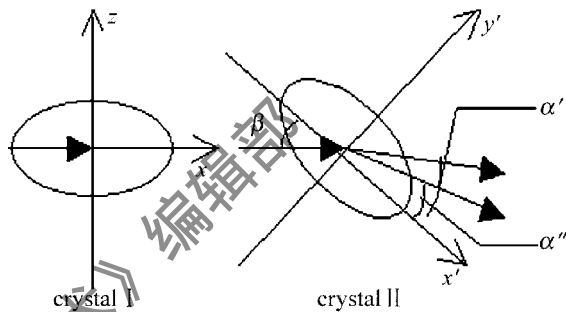


Fig 3 The effect of different x axis directions on contrast ratio

由非常光的折射率定律得:

$$1 \cdot \sin\beta = n_2' \cdot \sin\alpha' = n_3 \cdot \sin\alpha'' \quad (5)$$

折射率椭球在 $x-y$ 平面的截面方程:

$$\frac{n_2'^2 \cdot \cos^2\alpha'}{n_2^2} + \frac{n_2'^2 \cdot \sin^2\alpha'}{n_1^2} = 1 \quad (6)$$

(5) 式, (6) 式联立可得到 α', α'' 和 n_2' , 其分别为 e', e'' 偏振光在晶体 II 中的折射角及 e' 偏振光在晶体 II 中的折射率。两非常光沿光波方向的几何路径分别为:

$$L' = \frac{L}{\cos\alpha}, L'' = \frac{L}{\cos\alpha''} \quad (7)$$

由 (5) 式 ~ (7) 式和光在折射率椭球中的传播规律得出由俯仰引起的消光比为:

图 4 为两晶体 z 轴不理想正交 (所加电场不正交) 时沿光传播方向的偏振图 (图中 P_1 和 P_2 分别为两正交棱镜的偏振方向)。设晶体 I 与晶体 II 所加电场偏离正交方向的角度为 β 利用偏振光在晶体中的传播规律, 通过和 1.2 节中类似的分析得出因 z 轴不正交引起的消光比为:

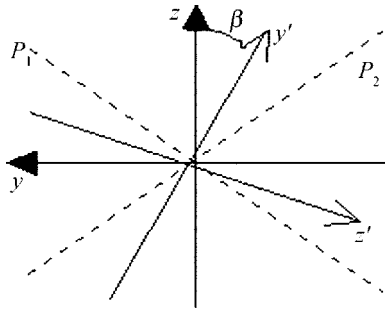


Fig 4 The polarization diagram without orthogonal z axes

式中, β 为两晶体 z 轴偏离正交的角度, λ 为光在真空中的波长, n_2, n_3 分别为晶体 y 轴、 z 轴的主折射率, L 为晶体长度。令 $M = 10Q$ 得出 $\beta = 7.7^\circ$, 即有较好开关效果时, 两晶体偏离正交方向的夹角应小于 $\pm 7.7^\circ$ 。

1.4 偏光器件透振方向不正交对消光比的影响

由线偏振光通过偏光镜透振方向的公式得^[9]:

$$I_{out} = I_0 \cos^2 \theta \quad (10)$$

式中, I_0 为入射线偏振光强, I_{out} 为出射光强, θ 为偏振光振动方向与偏光镜透振方向的夹角, 即为两偏光镜透振方向的夹角, 正交时 $\theta = 90^\circ$ 。

设两偏光镜透振方向偏离正交的角度为 δ 加电场时, $I_+ = I_0 \cos^2(\theta - \delta + 90^\circ)$, 无电场时, $I_- = I_0 \cos^2(\theta - \delta)$ 。

消光比可表示为:

$$M = \frac{I_0 \cdot \cos^2(\theta - \delta + 90^\circ)}{I_0 \cdot \cos^2(\theta - \delta)} \quad (11)$$

式中, $\theta = 90^\circ$, 当 $M = 100$ 时, $\delta = 5.7^\circ$, 故正常使用时偏光镜透振方向偏离正交的角度应小于 $\pm 5.7^\circ$ 。

2 实验

验证消光比各影响因素的实验如图 5 所示。整个

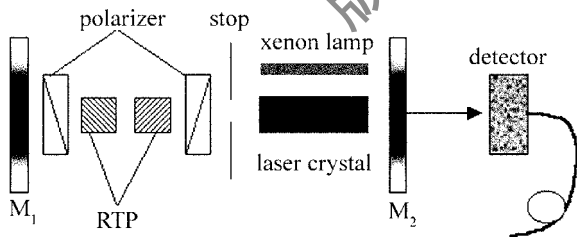


Fig 5 Experimental setup

谐振腔采用平平腔设计, 腔长 48cm。 M_1 为 $1.064\mu\text{m}$ 全反镜, M_2 为对 $1.064\mu\text{m}$ 光的透过率为 60% 的输出耦合镜。单块 RTP 晶体与 YAG 棒的尺寸分别为 $4\text{mm} \times 4\text{mm} \times 5\text{mm}$ 和 $\varnothing 6\text{mm} \times 100\text{mm}$, 其中 YAG 棒的 Nd 离子的掺杂原子数分数为 0.01。两偏振镜分别放于 RTP 晶体的两侧, 并在腔内插入光阑限制光束直径使之与 RTP 晶体有效通光孔径相匹配。探测器为 LPE-1B 型激光功率能量计。

实验中利用高消光比产生高峰值功率脉冲的特点, 测出在刚出光情况下各因素允许的角度变化范围。当在正交附近调整两晶体加电场方向时, 出光功率发生了明显变化, 相等光阈值处两光线夹角约为 16° ; 两偏光镜在正交附近摆动, 光阈值所对应两光线夹角约为 13° ; 改变两晶体通光方向时, 所对应夹角约为 3° 。当两块 RTP 晶体同时沿相同方向偏转一定角度时(相当于 1.1 节中入射角发生变化)发现输出功率不变即对开关消光比无影响。

3 结论

从上面的实验数据可以看出, 理论分析得出的各因素对 RTP 开关消光比的影响程度与实验结果有较好的吻合。这里要注意一点, 本文中的分析都是在特殊平面的前提下得出的, 实际上在考虑一般平面的情况下也有类似的情况, 只不过为了分析方便而采用了特殊平面。

总之, 理论模型可以给出双块晶体正交运用时各因素对消光比的影响程度, 这对双块晶体电光运用时获得更好更快捷的调 Q 效果有一定的指导意义。

参考文献

- [1] ROTH M, TSE IFLN M, ANGERT N. Oxide crystals for electro-optic Q-switching of lasers [J]. Glass Physics and Chemistry, 2005, 31(1): 86-95
- [2] BEIG H, QU W F, WANG X P. Experimental study of electro-optical Q-switch circuits used in Nd:YAG laser [J]. Laser Technology, 1994, 18(6): 379-381 (in Chinese).
- [3] WANG X D, BASSERAS P, DWAYNE MILLER P J. Regenerative pulse amplification in the 10kHz range [J]. Opt Lett, 1990, 15(15): 839-841.
- [4] ROTH M, ANGERT N, TSE IFLN M. On the optical quality of KTP crystals for nonlinear optical and electro-optic applications [J]. Optical Material, 2001, 16(1): 131-136
- [5] PEARCE S, IRELAND C L M, DYER P E. Solid-state Raman laser generating < 1ns multikilohertz pulses at 1096nm [J]. Opt Commun, 2005, 260: 680-686
- [6] WANG X Y, YUAN X, LI W, et al. Flux growth of large potassium titanyl phosphate crystals and their electro-optical applications [J]. J Crystal Growth, 2002, 237(1): 672-676
- [7] LI S C, SU I Z, NI W J, et al. Studies on crystal KTP (KT DPO4) electro-optic switch [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 1999, 10(2): 95-98 (in Chinese).
- [8] 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 LNO₃ [J]. Chinese Journal of Laser, 2005, 32(3): 319-322 (in Chinese).
- [9] JIANG M H. Crystalline Physics [M]. Jilin Shandong University Press, 2000, 224-244 (in Chinese).
- [10] NORMAN H, HORST W. Optical resonators [M]. New York: Springer-Verlag, 1997, 277-317