

文章编号: 0253-2239(2006)05-0689-4

退压式 $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ 晶体电光调 Q Nd:YAG 激光器 激光性能研究*

张少军^{1,2} 田召兵¹ 尹鑫¹ 张怀金¹ 王青圃¹ 李世忱²

(¹ 山东大学晶体材料国家重点实验室, 济南 250100)
(² 天津大学精密仪器学院, 天津 300072)

摘要: 通过对硅酸镓镧(LGS)晶体旋光性与电光效应的交互作用的理论研究,推导出晶体旋光性和电光效应共同作用下的光强表示式 $I = 1 - 4B^2 (A \sin 2\omega - C \cos 2\omega)^2$ 。利用此表示式设计计算了旋光晶体 LGS 尺寸为 $8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 电光 Q 开关在 1064 nm 波长使用时的开关电压和偏振角分别为 4995 V 和 27.3° 。将理论研究得到的结论应用于 LGS 晶体电光调 Q 的 Nd:YAG 晶体激光器的实验研究中,实验结果与理论计算结果基本一致。得到输出能量为 361 mJ,脉冲宽度为 7.8 ns 的脉冲激光输出。

关键词: 激光器件; 电光 Q 开关; 旋光性; 电光效应; 硅酸镓镧($\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$)晶体
中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

Study of a Nd:YAG Laser with Voltage-Decreased Electro-Optical Q-Switch of Optical Activity Crystal $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$

Zhang Shaojun^{1,2} Tian Zhaobing¹ Yin Xin¹ Zhang Huaijin¹ Wang Qingpu¹ Li Shichen²

(¹ State Key Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100)
(² College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract: The interaction between the optical rotation and electro-optic effect has been studied. The express equation of the emitted light intensity under the interaction of the optical rotation and electro-optic effect is given, which is $I = 1 - 4B^2 (A \sin 2\omega - C \cos 2\omega)^2$. According to the theoretical equation, the shutdown voltage and polarization plane angle for a Q-switch of $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ (LGS) crystal with the size of $8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ for the wavelength of 1064 nm are calculated to be 4995 V and 27.3° , which is validated by the experiment of a voltage-decreased electro-optical Q-switched Nd:YAG laser. The experimental results are in basic agreement with the calculation values. The output energy of 361 mJ and the pulse width of 7.8 ns are obtained.

Key words: laser device; electro-optical Q-switch; optical rotation; electro-optical effect; $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ crystal

1 引 言

多年以来,对具有旋光性和电光效应的晶体在电光开关方面的应用研究很少。这是由于长期以来,人们一直误认为用具有旋光性的晶体制作电光器件是件很复杂的事。美国光学学会 1978 年出版的《光学手册》^[1] 在评述了 ADP, KDP, BaTiO_3 , LiNbO_3 等晶体的电光性能后,谈到石英晶体时讲到:“令人感兴趣的是石英晶体的可用性及其优异的

光学性能,而不是其较大的电光效应。石英晶体具有旋光性,使得这种材料作为电光调制器的使用很复杂”。最近,我们对典型的旋光性晶体硅酸镓镧($\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$, langasite, 简称 LGS^[2,3,4])电光 Q 开关的制作进行了一系列研究,并初步取得了一些研究成果^[5,6]。文献[5,6]工作的一个基础原理是:旋光晶体中光的偏振面的旋转是相对于波矢量 k 而言的,LGS 晶体电光调 Q 开关被置于激光振荡腔中,

* 光电信息技术科学教育部重点实验室(天津大学)开放课题、山东省科技创新基金资助课题。

作者简介: 张少军(1961~),男,山东广饶县人,山东大学晶体材料研究所高级工程师,主要从事晶体物理性能、非线性光学、激光物理学、激光技术等领域的研究。E-mail: sjzhang@icm.sdu.edu.cn

收稿日期: 2005-02-01; 收到修改稿日期: 2005-07-20

经过偏振器的平面偏振光通过 LGS 晶体后,其偏振面转过了角度 Φ ,经激光腔的全反镜反射后,其偏振面转过了角度 $-\Phi$ 。由于光束来回两次通过 LGS 晶体,使因晶体旋光性产生的偏振面旋转角度为零。我们再将 LGS 晶体和激光腔的全反镜之间加入一 $1/4$ 波片, $1/4$ 波片的快慢轴之一和出射于 LGS 晶体电光调 Q 开关光束的偏振方向成 45° ,这样在激光谐振腔中就实现了关门作用。通过在 LGS 晶体电光调 Q 开关施加脉冲 $1/4$ 波电压(此电压值仅与 LGS 晶体的电光效应有关),即可实现激光谐振腔的开门,产生脉冲激光输出,从而实现了加压式 LGS 晶体电光调 Q 开关激光器的运转。以上工作中忽略了 LGS 晶体施加电场后其旋光性发生了变化。退压式电光调 Q 激光器是在上述的激光振荡腔中去掉 $1/4$ 波片,通过施加直流 $1/4$ 波电压来实现关门作用,瞬间退掉电压实现激光谐振腔的开门,产生脉冲激光输出。由于 LGS 晶体施加电场后其旋光性发生了变化,光束来回两次通过 LGS 晶体,使因晶体旋光性产生的偏振面旋转角度为零的结论已经不成立,仅仅考虑 LGS 晶体的电光效应是不能实现谐振腔关门的。

本文报道了我们应用电磁学理论对 LGS 晶体旋光性与电光效应的交互作用、以及如何利用此交互作用设计旋光晶体电光开关和调制器的研究。并将理论研究得到的结论应用于 LGS 晶体电光调 Q 的 Nd:YAG 晶体激光器的实验研究中,实验结果与理论计算结果基本一致。

2 LGS 晶体旋光性和电光效应的交互作用

LGS 晶体属三方晶系,32 点群,具有五个非零的电光系数^[7], $\gamma_{11} = -\gamma_{21} = -\gamma_{62}$, $\gamma_{41} = -\gamma_{52}$ 。在 LGS 晶体的 x 方向加电场,沿光轴 z 方向通光时,电光效应引起的折射率感应主轴不发生变化^[4]。这种情况下, xy 平面上的介电张量矩阵为^[8]

$$\begin{bmatrix} \epsilon_0 - \alpha & ig \\ -ig & \epsilon_0 + \alpha \end{bmatrix}, \quad (1)$$

(1)式中 ϵ_0 是 LGS 晶体未施加电场时的介电常量, α 是 LGS 晶体电光效应对介电张量矩阵的影响, g 是 LGS 晶体的旋光性对介电张量矩阵的影响。

介电张量矩阵的本征矢量可以分别表示为

$$\mathbf{E}_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ ik \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E}_2 = \begin{bmatrix} k \\ -i \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中

$$k = -[(\alpha^2 + g^2)^{1/2} + \alpha]/g, \quad (3)$$

介电张量矩阵的本征值分别为

$$\epsilon_1 = \epsilon_0 + (\alpha^2 + g^2)^{1/2}, \quad (4)$$

$$\epsilon_2 = \epsilon_0 - (\alpha^2 + g^2)^{1/2}, \quad (5)$$

利用(4)式和(5)式,我们可以得到本征态 \mathbf{E}_1 和 \mathbf{E}_2 的折射率差和相位差分别为

$$\Delta n' = [(\alpha^2 + g^2)/\epsilon]^{1/2}, \quad (6)$$

$$\Delta\theta = 2\pi\Delta n'l/\lambda, \quad (7)$$

当晶体未被施加外加电场时:

$$\Delta\theta_1 = 2\pi gl/(\epsilon^{1/2}\lambda) = 2\rho l, \quad (8)$$

式中 ρ 是 LGS 晶体的旋光率, l 是晶体沿 z 轴向的长度。

当 $g = 0$, 或者晶体无旋光性时:

$$\Delta\theta_2 = 2\pi\epsilon^{3/2}\gamma_{11}V(l/d), \quad (9)$$

式中 V 是施加于晶体上电压值, d 是晶体施加电压方向的长度。

根据琼斯矩阵理论^[9],LGS 晶体的琼斯矩阵可以表示为

$$\mathbf{M} = \frac{1}{1+k^2} \begin{bmatrix} 1 & k \\ ik & i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(i\Delta\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -ik \\ k & i \end{bmatrix}, \quad (10)$$

对(10)式进行整理变换后得

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} a+ib & c \\ -c & a-ib \end{bmatrix}, \quad (11)$$

其中

$$\begin{aligned} a &= \cos\phi, & b &= \varphi\sin\phi/\phi, \\ c &= -\delta\sin\phi/\phi, & \phi &= \Delta\theta/2, \\ \delta &= \Delta\theta_1/2, & \varphi &= \Delta\theta_2/2. \end{aligned} \quad (12)$$

设 ω 为入射光的偏振方向和晶体 x 方向的夹角(偏振角),入射光和出射光可以分别被表示为元矢量:

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\omega \\ \sin\omega \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} E'_x \\ E'_y \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}, \quad (14)$$

如果我们在晶体的后面放置一块全反镜使光束沿反方向传播,再次通过晶体的光波可以表示为

$$\begin{bmatrix} E''_x \\ E''_y \end{bmatrix} = M' \begin{bmatrix} E'_x \\ E'_y \end{bmatrix}, \quad (15)$$

其中

$$M' = \begin{bmatrix} a+ib & -c \\ c & a-ib \end{bmatrix}, \quad (16)$$

因此,出射光可以表示为

$$\begin{bmatrix} E'_x \\ E'_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-2b)^2 E_y + 2(abE_x + bcE_y)i \\ 2(bcE_x - abE_y)i + (1-2b^2)E_y \end{bmatrix}, \quad (17)$$

定义 β' 为检偏器和晶体 x 轴的夹角, 则出射光强的表达式为

$$I = \frac{1}{2} + \left[\left(\frac{1}{2} - 4b^2c^2 \right) \cos 2\omega + 4ab^2c \sin 2\omega \right] \cos 2\beta + \left[4ab^2c \cos 2\omega + \left(\frac{1}{2} - 4a^2b^2 \right) \sin 2\omega \right] \sin 2\beta, \quad (18)$$

在激光器中, 起偏器同时也是检偏器。所以有 $\omega = \beta'$ 。

(18) 式成为

$$I = 1 - 4b^2(asin 2\omega - ccos 2\omega)^2. \quad (19)$$

当 $b^2 = 1/2$, 并且 $\tan 2\omega = -a/c$ 时, $I = 0$ 。这表明出射光是线偏振的, 并且其偏振方向和入射光偏振方向正交。对于在激光器中的旋光性晶体电光调 Q 开关来说, 这就是施加某一电压于旋光晶体使激光腔处于关门状态。如果瞬间退掉电压, 经过偏振器的平面偏振光通过 LGS 晶体后, 其偏振面转过了角度 Φ , 经激光腔的全反射镜反射后, 其偏振面转过了角度 $-\Phi$ 。由于光束来回两次通过 LGS 晶体, 使因晶体旋光性产生的偏振面旋转角度为 0, 实现激光谐振腔的开门, 产生脉冲激光输出, 从而实现了退压式 LGS 晶体电光调 Q 开关激光器的运转。

在已知 LGS 晶体的使用波长 λ , 折射率 n_o , 旋光率 ρ , 电光系数 γ_{11} , 沿 z 轴向的长度 l , 电场方向厚度 d 的情况下。通过求解联立方程:

$$\begin{cases} b^2 = 1/2, \\ \tan \omega = -a/c, \end{cases} \quad (20)$$

即可求得实现关门时的电压 V 和偏振角 ω 。

3 LGS 晶体电光调 Q Nd:YAG 激光器的激光性能

在晶体旋光性与电光效应的交互作用的理论中, 晶体的旋光率是一个重要的参量。我们用连续的 Nd:YAG 晶体 1064 nm 激光作为光源, 采用图 1 所示的测量装置, 测量了光通过不同长度的光轴方向 LGS 晶体其偏振面旋转的角度。在图 1 的装置中, 偏振器 1 和偏振器 2 为格兰棱镜, 在不放置 LGS 晶体时使其偏振方向互相垂直, 此时光电管探测到光强为零。在光路中放置 LGS 晶体后, 由于晶体的旋光性, 出射光的偏振面发生转动, 以光束为轴转动偏振器 2, 使光电管探测到光强为零。偏振器 2 转动的

角度就是晶体的旋光角。结果如图 2 所示, 对于 1064 nm 波长, LGS 晶体的旋光率为 $1.1^\circ/\text{mm}$ 。

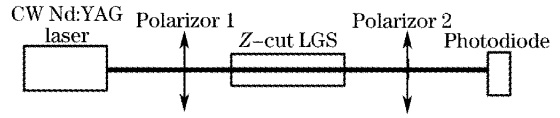


图 1 LGS 晶体偏振面旋转角的测量装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup for the measurement of the rotating angle of polarization plane of LGS crystal

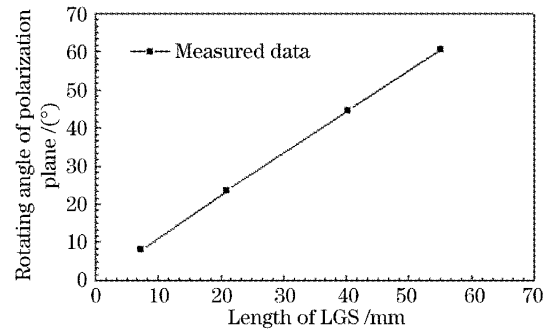


图 2 偏振面的旋转角与 LGS 晶体长度的关系

Fig. 2 Curve of rotating angle of polarization plane versus length of LGS crystal

根据我们测量的 LGS 晶体电光系数^[2] $\gamma_{11} = 2.3 \times 10^{-12}$ m/V 和旋光率数值, 我们制作的 LGS 晶体电光调 Q 开关, 其 z 方向长 $l = 25$ mm, x 方向的厚度 $w = 8$ mm, y 方向宽度 $d = 8$ mm, x 方向加电场, z 方向透光。根据(20)式, 计算了该调 Q 开关对于 Nd:YAG 1064 nm 激光器所需要的关门电压 V 和角度 ω 分别为 4995 V 和 27.3° 。

LGS 退压式电光调 Q Nd:YAG 激光器实验采用变反镜 (VRM) 输出的卡塞格伦非稳腔^[10]。这种谐振腔可以使激光器以高效率、高功率、高光束质量输出。特别是激光器工作在调 Q 或锁模状态时, 均匀场分布能抑制晶体内自聚焦产生的不良后果。结构示意图如图 3 所示。

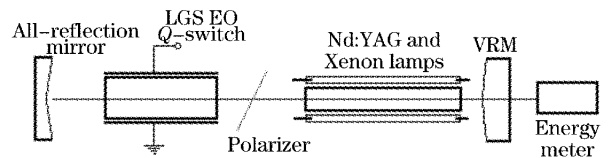


图 3 LGS 晶体调 Q 开关的激光腔结构图

Fig. 3 Schematic diagram of the laser cavity with LGS Q-switch

实验中使用的 Nd:YAG 晶体棒尺寸为 $\phi 6.35 \times 100$ mm, 两个端面镀有增透膜。采用双氙灯抽运, 重复频率为 10 Hz, 调 Q 开关驱动电源为退压式调

Q。实验中使用的能量计为美国 Molectron 公司生产的 EPM-1000 智能型能量-功率计。

实验中通过调整施加于 LGS 晶体电光调 Q 开关上的电压和转动 LGS 晶体电光调 Q 开关,使激光器输出能量为零(关门状态),测量得到的关门电压 V 和角度 ω 数值为 5000 V 和 27° ,与理论计算结果拟合得很好,从而验证了理论的正确性,实现了用旋光晶体 LGS 做的退压式调 Q 电光开关。在图 3 所示的实验装置中,LGS 晶体电光调 Q 开关不施加关门电压时,测量激光器的静态激光输出能量 E_s ,其值为 438 mJ;在 LGS 晶体调 Q 开关实施退压式调 Q 的情况下,测量激光输出能量 E_v ,其值为 361 mJ。定义为 $G=E_v/E_s$ 为动静比,其值为 82.5%。我们用 MRD500 PIN 快速光电管和 TEKTDS620B 示波器测量激光器的激光输出波形如图 4 所示。脉冲宽度为 7.8 ns。

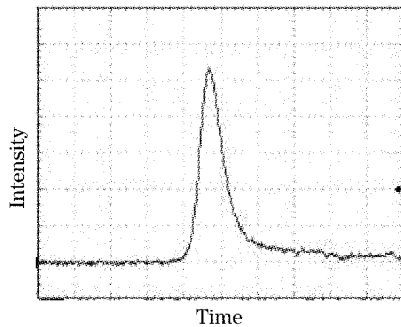


图 4 激光输出的脉冲波形

Fig. 4 Pulse profile of the laser output

4 结 论

本研究切合实际地考虑到 LGS 晶体施加电场后其旋光性发生了变化,光束来回两次通过 LGS 晶体,使因晶体旋光性产生的偏振面旋转角度为零的结论已经不成立,仅仅考虑 LGS 晶体的电光效应是不能实现谐振腔关门的事实,克服了以往对硅酸镱镧(LGS)晶体电光性能研究的不足,并实现了硅酸镱镧(LGS)晶体的退压式电光调 Q Nd:YAG 激光器可靠运转。

在实验上我们测量得到的关门电压 V 和角度 ω 数值分别为 5000 V 和 27° ,与理论计算结果拟合得很好,从而验证了理论的正确性,实现了用旋光晶体 LGS 做的退压式调 Q 电光开关。加之,LGS 晶体电光调 Q 开关,由于利用其横向电光效应,关门电压随晶体纵横比的大小可调,无需防潮装置,其损伤阈值约是 LiNbO₃ 晶体的 6 倍,关门电压随温度变化小,稳定性好。LGS 晶体电光调 Q 开关兼有 DKDP 晶体和 LiNbO₃ 晶体电光调 Q 开关的部分优点,特别适合于在中等功率激光器上工作。

参 考 文 献

- 1 Driscoll W G, William Vaughan. *Handbook of Optics* [M]. Washing: Opt. Soc. Am. Press, 1978. 146
- 2 A. A. Kaminsky, B. V. Mill, G. G. Khodzhabagyan *et al.*. Investigation of trigonal $(La_{1-x}Nd_x)_3Ga_5SiO_{14}$ crystal[J]. *Phys Stat. Sol. (A)*, 1983, **80**: 387~398
- 3 A. A. Kaminsky, I. M. Silvestroval, S. E. Sarkisov *et al.*. Investigation of trigonal $(La_{1-x}Nd_x)_3Ga_5SiO_{14}$ crystal[J]. *Phys Stat. Sol. (A)*, 1983, **80**: 607~620
- 4 Haikuan Kong, Jiyang Wang *et al.*. Growth, properties and application as an electrooptic Q-switch of langasite crystal[J]. *J. Crystal Growth*, 2003, **254**: 360~367
- 5 Yin Xin, Wang Jiyang, Zhang Shaojun. The study of the electrooptic effect of the optical active crystals in the polarized light interferometric experiment[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(12): 1484~1488 (in Chinese)
- 尹 鑫,王继扬,张少军. 旋光晶体在偏光干涉实验中电光效应的研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(12): 1484~1488
- 6 Yin Xin, Wang Jiyang, Zhang Shaojun. Study on electro-optic Q-switch of $La_3Ga_5SiO_{14}$ single crystal[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(1): 29~32 (in Chinese)
- 尹 鑫,王继扬,张少军. $La_3Ga_5SiO_{14}$ 晶体电光 Q 开关的研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(1): 29~32
- 7 Yin Xin, Wang Jiyang, Zhang Shaojun. $La_3Ga_5SiO_{14}$ single crystal Q-switch used as an electro-optic device[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(36): 7188~7190
- 8 Xiao Dingquan, Wang Min. *Crystal Physics* [M]. Chengdu: Sichuan University Press, 1989. 150 (in Chinese)
- 肖定全,王 民. 晶体物理[M]. 成都: 四川大学出版社, 1989. 150
- 9 R. Clark Jones. A new calculus for the treatment of optical systems[J]. *J. Optical Society of America*, 1941, **31**: 500~503
- 10 Zhang Fang, Zhang Pinglei, Zhou Shouhuan. Cassegrain unstable resonator with variable reflectivity mirror (VRM) output coupler[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(10): 1400~1405 (in Chinese)
- 张 放,张平雷,周寿桓. 由变反镜耦合输出的卡塞格林非稳腔激光技术研究[J]. *光学学报*, 1996, **16**(10): 1400~1405