

文章编号: 1001-3806(2012)01-0001-04

低驱动电压的铌酸锂电光开关研究

付博 张大勇 骆永全 罗飞 沈志学

(中国工程物理研究院 流体物理研究所 绵阳 621900)

摘要: 为了降低电光开关的驱动电压,采用将铌酸锂晶体置于法布里-珀罗腔内的方法进行了实验研究,得到了电光开关透过特性随驱动电压的变化关系。结果表明,与采用正交偏振片的电光开关相比,法布里-珀罗电光开关的驱动电压大幅降低,由约2.1kV下降到约580V,产生光脉冲的上升沿明显缩短,由284 μ s减少至128 μ s。理论计算了法布里-珀罗电光开关透过特性随驱动电压的变化关系,计算结果与实验结果符合得较好。

关键词: 光学器件;电光开关;法布里-珀罗;铌酸锂

中图分类号: TN29 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.01.001

Study on LiNbO₃ electro-optical switches with low driving voltage

FU Bo, ZHANG Da-yong, LUO Yong-quan, LUO Fei, SHEN Zhi-xue

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: In order to reduce the driving voltage of an electro-optical switch, a LiNbO₃ crystal was placed in a Fabry-Perot cavity and the transmissive characteristics of this Fabry-Perot electro-optical switch was investigated experimentally. The results showed that the driving voltage of the Fabry-Perot electro-optical switch was ~580V, which was much lower than the half-wave voltage of an electro-optical switch used as orthogonal polarizer, ~2.1kV. Moreover, the rising time of the Fabry-Perot electro-optical switch, 128 μ s, was shorter than that of a switch used as orthogonal polarizer, 284 μ s. Theoretical analysis of transmitted characteristic dependence on driving voltage was performed, and the results were in accordance with the experimental results.

Key words: optical devices; electro-optic switch; Fabry-Perot; lithium niobate

引言

电光开关具有开关时间短、重复频率高、输出脉宽窄、同步性能好、工作稳定等诸多优点,是目前激光器上应用最为广泛的一类调Q开关^[1-7]。然而,电光开关的基本结构决定了它一些难以克服的缺点,比如电光晶体的半波电压较高,通常使用的LiNbO₃^[2-3], KDP^[4-5]的半波电压为2000V~8000V,这不仅会对周边的其它电子元器件造成干扰,对操作人员的人身安全产生威胁,同时还对电源和激光器工作环境提出了较为苛刻的要求。如果要降低加在电光晶体上的驱动电压,就要增加电光晶体的尺寸,但这会使激光器谐振腔的插入损耗变大,况且大尺寸的晶体也不易生长。另外,在外加强电场的作用下,晶体内部会产生机械应力,使晶体的折射率发生变化,即所谓的弹光效应。加

在晶体上的电压越高,晶体内的应力越大,弹光效应就越明显。当晶体上的高压瞬时退除时,晶体形变不会立即消除,导致晶体的电光调制存在一个渐变过程,使激光器的损耗衰减时间大于巨脉冲的建立时间,造成调Q开关输出性能的下降。以上因素都制约了电光开关重复频率的进一步提高,从而在一定程度上限制了其应用范围。

MACHINTOSH^[8-9]提出了一种基于法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)标准具的调Q开关,利用压电陶瓷驱动F-P腔的一个反射镜,改变F-P腔的长度和透过率,实现了激光输出。ZAYHOWSKI^[10-11]等人则在F-P腔中放入LiTaO₃晶体,形成电光调Q开关,并将其直接与激光晶体耦合在一起,实现了微晶片激光器。在国内,WANG^[12]等人也对这种微晶片激光器的工作特性进行了研究。然而,他们的研究工作更加注重F-P开关应用于激光器时所能达到的输出功率、重复频率、脉冲宽度等指标,却并未对这种F-P开关自身的工作原理和性能进行详细介绍。因此,本文中对这种F-P电光开关开展了实验研究,在驱动电压、开关响应时间等方面与采用正交偏振片的传统电光开关进行了比较,并基于晶体光学和多光束干涉的相关理论,分

基金项目:中国工程物理研究院科学技术发展基金资助项目(2009B0401042)

作者简介:付博(1980-)男,博士,副研究员,主要研究方向为激光与物质的相互作用。

E-mail: fubo@mail.nankai.edu.cn

收稿日期:2011-06-28;收到修改稿日期:2011-07-06

析了开关透过率随驱动电压、激光波长的变化规律,同时指出了这种 F-P 电光开关用于激光调 Q 和光强调制器件时应该注意的问题。

1 F-P 电光开关实验研究

F-P 电光开关的工作原理是:在 F-P 腔内插入具有电光效应的材料,如电光晶体、有机聚合物等,通过调节材料上的外加电压,利用材料的电光效应改变 F-P 腔在通光方向上的有效折射率,即改变 F-P 腔的光学长度,从而改变相邻光束间的光程差,实现对 F-P 腔透过率和反射率的控制。

本文中使用的材料是商用调 Q 开关上的同成分 LiNbO₃ 晶体, F-P 电光开关的实验光路如图 1 所示。晶体放置在反射镜 M₁ 和 M₂ 组成的 F-P 腔中,反射镜上镀有反射率为 99% 的介质膜。激光经 $\lambda/2$ 波片后正入射到反射镜 M₁ 上,通过 F-P 腔后被探测器接收。LiNbO₃ 晶体的光轴与激光传输方向平行,外加电压沿 y 方向,晶体的尺寸为 9mm × 9mm × 25mm。 $\lambda/2$ 波片的作用是使激光的偏振方向沿晶体 y 方向。偏振片 P 的作用是提高开关比,其偏振方向与入射激光偏振方向平行。实验中所用光源为 Coherent 的 Verdi 激光器,波长为 532nm,线宽为 5MHz;晶体驱动电源的最高输出电压为 3kV,最高重复频率为 5kHz,电脉冲前沿为 400ns。

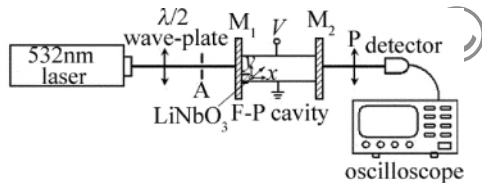


Fig. 1 Experimental setup of a Fabry-Perot electro-optical switch, A—aperture; M₁, M₂—mirror; P—polarizer

图 2 中给出了重复频率为 100Hz 时,激光透过 F-P 电光开关后的光强信号。图 2a 为采用典型横向电光调制配置的正交偏振片电光开关的实验结果,加在晶体上的半波电压为 2.1kV;图 2b 为 F-P 电光开关的实验结果,晶体的驱动电压为 580V。可以看出,采用

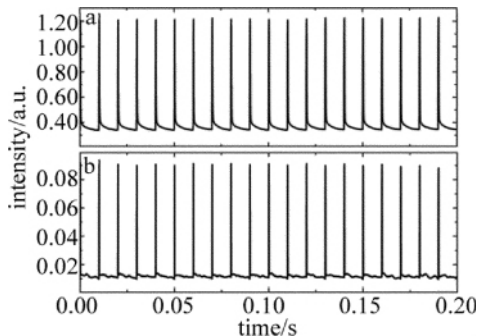


Fig. 2 Transmitted pulse train of electro-optical switches a—orthogonal polarizer switch b—Fabry-Perot switch

同一晶体时, F-P 电光开关的驱动电压要远低于正交偏振片电光开关的半波电压。

将图 2 中两种电光开关产生的光脉冲进行比较,如图 3 所示。可以发现:正交偏振片电光开关的光脉冲上升沿(透射光强度从最低值上升到最高值所需的时间)为 284 μ s,下降沿(透射光强度由最高值下降到 1/e 所需的时间)为 128 μ s;而 F-P 电光开关的光脉冲上升沿为 128 μ s,比前者缩短了一半以上,下降沿为 104 μ s。由此可见,与正交偏振片电光开关相比, F-P 电光开关的响应时间要明显缩短,这对于制作响应速度更快的开关器件是十分有利的,此外,将 F-P 电光开关用于激光器调 Q 时,还有利于压缩脉冲宽度。前面提到,偏振片 P 的作用主要是为了提高器件的开关比。图 4a 和图 4b 中分别给出了有无偏振片 P 时,激光经过 F-P 开关后的透过率曲线。通过计算可以得到:使用偏振片时,开关比约为 57;而不使用偏振片时,开关比仅为 17。这主要是由于晶体自身的不均匀性以及晶体光轴与入射光的传播方向、偏振方向失配,导致激光在晶体中多次传输后出射光的偏振度下降。

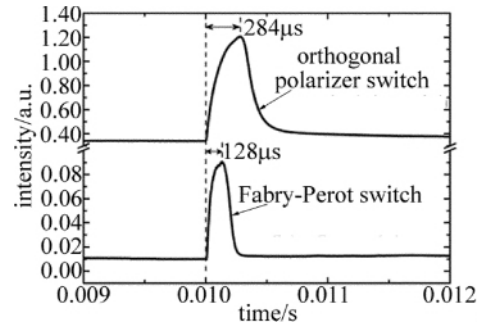


Fig. 3 Single pulse shape of electro-optical switches

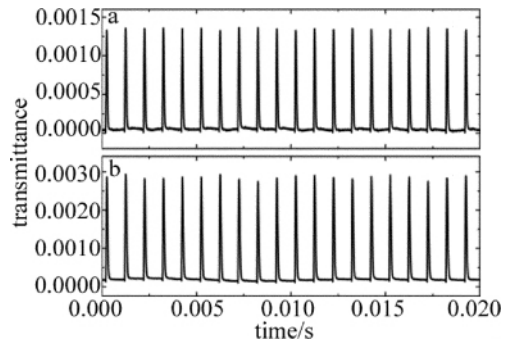


Fig. 4 Transmitted pulse train of a Fabry-Perot electro-optical switches a—with polarizer b—without polarizer

实验中使用的电源最高脉冲重复频率为 5kHz,在此条件下加在晶体上的最高电压仅为 325V。图 5 中给出了此时激光经过 F-P 开关后的透射信号波形,可以看出,激光经过 F-P 开关后产生的光脉冲信号的均匀性较好,只是由于驱动电压偏低,开关比仅达到 20。

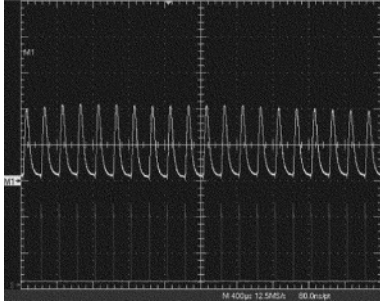


Fig. 5 Oscilloscope trace of transmitted pulse train of a Fabry-Perot electro-optical switches

2 分析与讨论

对于实验中所使用的横向电光调制配置 将 LiNbO_3 晶体置于两正交偏振片之间,晶体 x 方向和 y 方向均与偏振片的偏振方向成 45° ,光沿着 z 方向传播,外加电场为 $E(0 E_y 0)$ 则晶体的折射率椭球变为:

$$\left(\frac{1}{n_o^2} - \gamma_{22}E_y\right)x^2 + \left(\frac{1}{n_o^2} + \gamma_{22}E_y\right)y^2 + \frac{1}{n_e^2}z^2 + 2\gamma_{51}E_y yz = 1 \quad (1)$$

式中 n_o 和 n_e 为晶体 o 光和 e 光的主折射率 γ_{22} 和 γ_{51} 为晶体的电光系数。通过旋转主轴消除交叉项 yz ,得到新坐标系下的折射率椭球方程为:

$$\frac{1}{n_{x'}^2}x'^2 + \frac{1}{n_{y'}^2}y'^2 + \frac{1}{n_{z'}^2}z'^2 = 1 \quad (2)$$

式中,新坐标系下的主折射率为:

$$\begin{cases} n_{x'} = \frac{n_o}{(1 - n_o^2 \gamma_{22} E_y)^{1/2}} \approx n_o + \frac{1}{2} n_o^3 \gamma_{22} E_y \\ n_{y'} = \frac{n_o}{(1 + n_o^2 \gamma_{22} E_y)^{1/2}} \approx n_o - \frac{1}{2} n_o^3 \gamma_{22} E_y \\ n_{z'} = n_e \end{cases} \quad (3)$$

由于光是沿着 z 方向传播的,它在 x' 和 y' 方向偏振分量的折射率分别为 $n_{x'}$ 和 $n_{y'}$,两个偏振分量之间的相位延迟为:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi L}{\lambda} (n_{x'} - n_{y'}) = \frac{2\pi L n_o^3 \gamma_{22} E_y}{\lambda} = \frac{2\pi L n_o^3 \gamma_{22} V}{\lambda d} \quad (4)$$

式中 λ 为激光波长 L 为通光方向上的晶体长度 d 为加电方向上的晶体厚度 V 为外加电压。令 $\Delta\varphi = \pi$,由 (4) 式可以得到半波电压为:

$$V_\pi = \frac{\lambda d}{2L n_o^3 \gamma_{22}} \quad (5)$$

若取 $d=9\text{mm}$ $L=25\text{mm}$ $n_o=2.325$ $\gamma_{22}=3.4 \times 10^{-12}\text{m/V}$, $\lambda=532\text{nm}$,计算得出 $V_\pi=2.2\text{kV}$,与实验中测得的半波电压 2.1kV 基本一致。

对于具有 F-P 标准具结构的光学腔,在考虑腔内介质吸收的情况下,其透过率表达式为:

$$T = \frac{(1 - R)^2 e^{-2\alpha L}}{(1 - R e^{-2\alpha L})^2 + 4R e^{-2\alpha L} \sin^2(\delta/2)} \quad (6)$$

式中 R 为 F-P 腔两端平板反射镜的光强反射率 α 为腔内介质的吸收系数 $\delta = \frac{4\pi n L \cos\theta}{\lambda}$ 为相邻光束之间的光程差 θ 为激光入射角度 n 为激光在 F-P 腔内介质中的折射率。

实验中激光束正入射到 F-P 标准具的反射镜上,偏振沿着 y 方向,则激光在晶体中的有效折射率为 (3) 式中的 $n_{y'}$ 。取 $d=9\text{mm}$, $L=25\text{mm}$, $n_o=2.325$, $\gamma_{22}=3.4 \times 10^{-12}\text{m/V}$, $\lambda=532\text{nm}$, $R=0.99$, $\alpha=0.02\text{cm}^{-1}$,可以得到 F-P 标准具的透过率随 LiNbO_3 晶体外加电压的变化关系,如图 6 所示。由图可知,随着外加电压的变化,透过率曲线出现多个透射峰,其中每个峰从最大值降至 2% 所对应的电压变化约为 600V ,远低于仅使用横向电光调制时的半波电压 2.2kV ,这一点与实验结果符合较好。图 7 中给出了 F-P 电光开关在不同驱动电压下的波长选择特性。从图中可以看出,当驱动电压变化约 600V 时,透射谱恰好向短波方向平移一个透射峰,开关对 532nm 波长由低透过率变为高透过率。

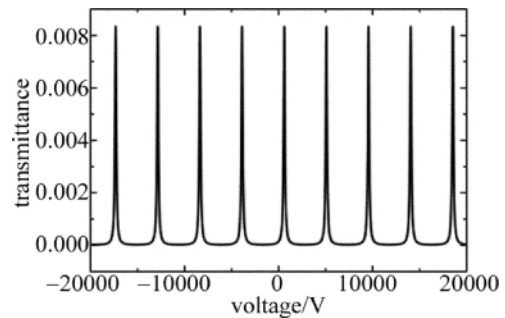


Fig. 6 Transmittance dependence on voltage for a Fabry-Perot electro-optical switches

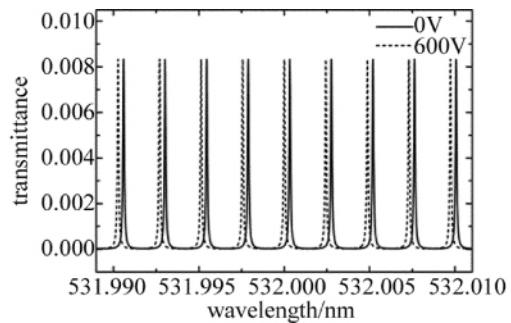


Fig. 7 Transmittance dependence on wavelength for a Fabry-Perot electro-optical switches

通常情况下,由于激光器的工作介质存在一定的增益带宽,所以其输出的谱线也存在一定的频率宽度。需要注意的是:当 F-P 电光开关用于激光的调幅控制

时,就要求 F-P 腔透射谱线的宽度大于激光光源的线宽,即实现开关控制时 F-P 腔的透射谱线覆盖激光器的全部输出波长,以保证不会出现“漏光”现象;如果将 F-P 电光开关用于激光器调 Q 时,则要求 F-P 腔透射谱线的宽度小于激光器工作介质的增益带宽,从而实现选模和压缩线宽的作用。F-P 标准具的透射谱线宽度^[13]为:

$$\Delta\nu = \frac{c}{2\pi nL} \frac{1-R}{R} \quad (7)$$

式中 c 为真空中的光速。将实验参量代入(7)式,可得到 F-P 电光开关的透射谱线宽度约为 8.3 MHz,大于激光器的输出线宽 5 MHz,因此,可以对激光器的整个输出频谱实现开关调制。

3 结 论

对一种基于 F-P 标准具的电光开关进行了实验研究,通过将 LiNbO_3 晶体放在 F-P 腔内,利用晶体的电光效应改变 F-P 腔内的有效折射率,实现了对透射光强的控制。实验结果表明,这种电光开关的驱动电压远低于使用正交偏振片的电光开关的半波电压,响应时间也大幅缩短。基于晶体光学和多光束干涉的相关理论,分析了开关透过率随驱动电压、激光波长的变化规律,计算结果与实验结果基本符合。作者旨在对比 F-P 电光开关与采用正交偏振片的电光开关在驱动电压、响应时间等方面的差别,并未对电光材料类别、几何尺寸、驱动电源、电极、引线等进行优化设计,因此,F-P 电光开关的性能指标尚有较大的提升空间,可望通过开展深入研究取得更佳的结果。

参 考 文 献

- [1] ZHOU B K, GAO Y Zh, CHEN J R, *et al.* Laser principle [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000: 221-223 (in Chinese).
- [2] LI Zh J, HU W H, LI X F, *et al.* A compact high-efficiency air-cooled Q -switched Nd:Ce:YAG laser [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2001, 12(4): 382-384 (in Chinese).
- [3] HUANG Ch H, ZHANG G, WEI Y, *et al.* 1.3414 μm Nd:YAlO₃ Q -switched pulse laser [J]. Laser Journal, 2006, 27(2): 26-27 (in Chinese).
- [4] NING G B, LIANG Zh, ZHAO Zh M, *et al.* High repetition rate electrooptical Q -switching of CW Nd:YAG laser [J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(11): 1481-1485 (in Chinese).
- [5] WEN W Q, FU R L, SUN J T, *et al.* Active Q -switch Nd:YAG lasers end-pumped by QCW-LD [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2002, 13(10): 994-996 (in Chinese).
- [6] FENG Y W, DAI Sh T, ZHU X L. 1kHz electro-optic Q -switched Nd:YAG laser with complete compensation of thermally induced depolarization loss [J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(9): 1190-1193 (in Chinese).
- [7] CHEN R, ZHAI G, JIN F, *et al.* Study on pulsed electro-optic Q -switched Nd:YAG laser at 1319nm [J]. Laser Technology, 2010, 34(5): 603-606 (in Chinese).
- [8] MACHINTOSH I W. Repetitive Q -switching of a continuously pumped Nd:YAG laser using a Fabry-Perot interferometer [J]. Physics Letters, 1969, A28(7): 497-498.
- [9] MACHINTOSH I W. Double etalon Q -switching of a continuously pumped Nd:YAG laser [J]. Applied Optics, 1969, 8(10): 1991-1998.
- [10] ZAYHOWSKI J J, DILL III C. Diode-pumped microchip lasers electro-optically Q -switched at high pulse repetition rates [J]. Optics Letters, 1992, 17(17): 1201-1203.
- [11] ZAYHOWSKI J J, DILL III C. Coupled-cavity electro-optically Q -switched Nd:YVO₄ microchip lasers [J]. Optics Letters, 1995, 20(7): 716-718.
- [12] WANG Y X, HUANG L, GONG M L, *et al.* Low voltage driving coupled-cavity electro-optically Q -switched microchip lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(s1): 9-12 (in Chinese).
- [13] ZHAO K H, ZHONG X H. Optics [M]. Beijing: Peking University Press, 1982: 338-340 (in Chinese).

[1] ZHOU B K, GAO Y Zh, CHEN J R, *et al.* Laser principle [M].