

文章编号: 0258-7025(2010)10-2456-04

楔角 Nd:YVO₄ 晶体电光调 Q 激光器性能研究

张贇坤 陈 檬 庞庆生 常 亮 李 港

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

摘要 通过对自然双折射晶体 Nd:YVO₄ 偏振特性的研究, 采用带有楔角的 Nd:YVO₄ 晶体进行电光调 Q, 腔内可以不加入偏振片, 这种设计有简化腔内元件、缩短腔长和降低损耗的优点, 可得到更高的功率和更窄的激光脉冲宽度。实验使用尺寸 3 mm×3 mm×5 mm, 10° 楔角的 Nd:YVO₄ 晶体, 用 La₃Ga₅SiO₁₄ 晶体作为退压式调 Q 元件, 在 1 kHz 重复频率下, 获得平均输出功率 2.2 W, 脉冲宽度 6.3 ns, 光-光转换效率 39.2%, 峰值功率超过 300 kW 的激光输出。

关键词 激光器; Nd:YVO₄ 激光器; 偏振光; 电光调 Q; La₃Ga₅SiO₁₄ 晶体

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103710.2456

Study of Electro-Optic Q-Switched Nd:YVO₄ Laser with a Wedge Angle

Zhang Yunshen Chen Meng Pang Qingsheng Chang Liang Li Gang

(College of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract A design to realize electro-optic Q-switch in Nd:YVO₄ laser without polarizer is presented, in which a Nd:YVO₄ crystal with a wedge angle is used by analyzing the polarization of natural birefringent crystal. This design has the advantages of simplifying cavity components, shortening cavity length, and reducing cavity loss, and can obtain higher power and narrower pulse width. Voltage-decreased Q-switching is realized by using a La₃Ga₅SiO₁₄ crystal and a Nd:YVO₄ crystal with the size of 3 mm×3 mm×5 mm, 10° wedge angle. 2.2 W average power, 6.3 ns pulse width, optical-to-optical efficiency of 39.2%, and more than 300 kW peak power are obtained when the repetition rate is 1 kHz.

Key words lasers; Nd:YVO₄ laser; polarized light; electro-optic Q-switched; La₃Ga₅SiO₁₄ crystal

1 引 言

激光二极管(LD)抽运的高重复频率调 Q 激光器在激光通信、光存储、打标、焊接和测距雷达等方面获得了广泛应用^[1]。相比于其他调 Q 方式, 电光调 Q 可获得更窄的脉宽及稳定的输出。Nd:YVO₄ 晶体吸收系数高、受激发射截面大、抽运吸收带宽较宽; 它是自然双折射晶体, 有强的偏振吸收和强的偏振辐射特性。采用 LD 端面抽运 Nd:YVO₄ 晶体是实现高效率、高重复频率激光器的最有效的方法之一。2004 年, 中国科学院安徽光学精密机械研究所^[2]的 1 kHz 端面抽运 Nd:YVO₄ 加压式电光调 Q 激光器, 使用 BBO 晶体, 得到脉宽 20 ns 输出。2006 年, 王春雨等^[3]的端面抽运 Nd:YVO₄ 加压式

La₃Ga₅SiO₁₄ (LGS) 电光调 Q 激光器, 采用平-平腔, 腔长为 150 mm, LD 尾纤输出抽运功率 28 W, 在重复频率为 2 kHz 时, 得到 1.3 W 激光输出, 脉宽 6.5 ns, 光-光转换效率 4.6%; 在重复频率为 10⁴ Hz 时, 输出功率 5 W, 脉宽 7 ns, 光-光转换效率 18%。以上加压式电光调 Q 激光器虽然得到了窄脉宽输出, 但转换效率较低。如果选用退压式调 Q, 可提高转换效率, 但脉宽较加压式调 Q 略有加宽, 目前还未见有关 LGS 晶体千赫兹退压式调 Q 的报道。

以往文献中所述的电光调 Q 技术均要求在谐振腔中插入偏振元件, 偏振元件产生起偏和检偏的双重作用, 然而它的存在增加了腔内损耗和激光器的腔长^[4]。本文实验使用 LD 端面抽运楔角 Nd:YVO₄ 晶

收稿日期: 2009-11-09; 收到修改稿日期: 2009-12-01

作者简介: 张贇坤(1985—), 女, 硕士研究生, 主要从事全固态激光技术方面的研究。E-mail: zysxx741029@live.cn

导师简介: 陈 檬(1963—), 女, 博士, 副教授, 主要从事全固态激光技术方面的研究。E-mail: chenmeng@bjut.edu.cn (通信联系人)

体,采用 LGS 晶体千赫兹退压式调 Q 输出,省去了腔中的偏振片,激光器结构变得更加简易,实现了窄脉宽、高效率的激光输出。

2 Nd:YVO₄ 晶体偏振特性

用于端面抽运的 Nd:YVO₄ 都是沿 α 轴切割、光轴为 c 轴的双端面平行晶体,当 c 轴水平放置时,对 π 偏振抽运光有较大的吸收系数,输出 π 偏振光分量也较大,峰值比 $I_{\pi}:I_{\sigma}=6.9:1$ ^[5]。当振荡光垂直端面入射且与光轴垂直时,在双折射晶体内部 o 光和 e 光同光路,透过晶体出射后,两种偏振光在传播光路上不分开,如图 1 所示。因 π 偏振光($E//c$)与 σ 偏振光($E\perp c$)同光路振荡,若此时在腔内加入电光调 Q 元件并给电光晶体加 $\lambda/4$ 电压,两正交偏振态的光振动方向发生旋转,并不能抑制光振荡,即实现不了腔内完全关断,因此调 Q 腔中必须加入偏振元件进行起偏和检偏。

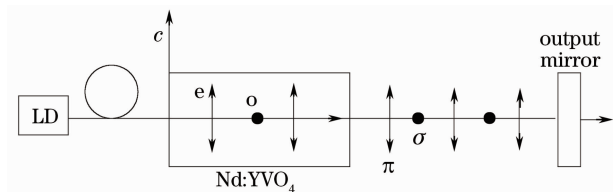


图 1 端面抽运无楔角 Nd:YVO₄ 激光谐振腔
Fig. 1 Optical scheme of end-pumped Nd:YVO₄ laser without wedge angle

在进行 Nd:YVO₄ 晶体电光调 Q 时,若让 Nd:YVO₄ 晶体沿着特殊的 π 方向线性振荡,则可代替腔内起偏器;同时需实现腔内振荡的 π 偏振光往返经过施加 $\lambda/4$ 电压的普克尔盒,偏振态旋转 90° ,再进入 Nd:YVO₄ 晶体时,不让它形成振荡回路,这样就相当于在腔内加入检偏器,即在 Nd:YVO₄ 晶体腔内可以不用加入偏振元件进行电光调 Q。

为了达到上述目的,通常采用的方法是把晶体一端切割成布儒斯特角,然而布儒斯特角的加工,需要加大晶体尺寸,这样不利于晶体均匀散热和激光器整体结构的紧凑。

3 带楔角 Nd:YVO₄ 晶体激光振荡输出特性

如果把 Nd:YVO₄ 晶体的两个端面不做成平行的,使其具有一定角度,切成楔角的激光晶体使振荡光在晶体出光面的入射角度不为 0° ,因双折射晶体对 π 和 σ 两正交偏振光有不同的折射率,则振荡光从楔

角面出射时发生不同角度偏转,使 π 偏振光与 σ 偏振光在空间分开,分别沿两条光路形成振荡。可通过选取不同位置放置输出镜,让单一偏振光起振,代替了起偏器的作用。如图 2 所示,实验使用的 Nd:YVO₄ 晶体,尺寸为 $3\text{ mm}\times 3\text{ mm}\times 5\text{ mm}$,掺杂原子数分数为 0.3% 。晶体靠近抽运的一端镀 808 nm 高透膜和 1064 nm 全反膜,另一通光面镀 1064 nm 增透膜且切成 10° 楔角。在 Nd:YVO₄ 晶体中, $n_{\pi}=2.168$, $n_{\sigma}=1.958$,入射角 $\theta=10^\circ$,根据折射定律 $n_1\times\sin\theta_1=\sin\theta_2\times n_2$,出射角 $\theta_{\pi}=22.115^\circ$, $\theta_{\sigma}=19.887^\circ$ 。实验测得两偏振光的输出光功率比为 $I_{\pi}:I_{\sigma}=5.6:1$,验证了 Nd:YVO₄ 晶体强的偏振辐射特性,因此选取功率大的 π 偏振光进行后面的实验。

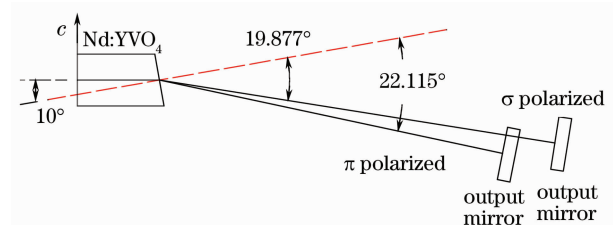


图 2 带楔角 Nd:YVO₄ 晶体振荡光路示意图
Fig. 2 Oscillation optical scheme of Nd:YVO₄ crystal with a wedge angle

用另一实验表明带楔角的 Nd:YVO₄ 晶体自身也可以代替检偏器。实验装置如图 3 所示,其中 $\lambda/4$ 波片插入光路中进行旋转,代替普克尔盒加压过程。

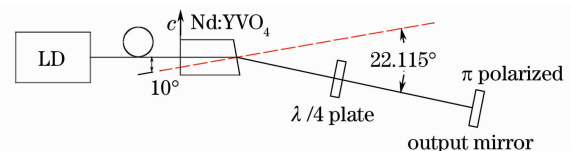


图 3 用激光晶体与 $\lambda/4$ 波片组合实现关门状态
Fig. 3 Experimental setup of laser oscillator with $\lambda/4$ waveplate

实验中,LD 端面抽运 Nd:YVO₄ 谐振腔腔长 70 mm ,未插入 $\lambda/4$ 波片时在输出镜后测得输出功率为 4 W 。插入 $\lambda/4$ 波片,此时功率计探测到光功率为 3.95 W ,旋转至适当位置可使输出功率为 0 ,实现腔内功率完全关断。

光路如图 4 所示。旋转波片至适当位置,使出射的水平偏振光(π 偏振)往返经过 $\lambda/4$ 波片后光振动方向旋转 90° ,再入射晶体楔角面时光的偏振态为与光轴垂直的 σ 偏振,入射角 $\theta=22.115^\circ$,晶体折射率 $n_{\sigma}=1.958$,则射入晶体偏折角 $\theta_1=11.085^\circ$,在晶体内部反射一周经楔角面出射时,由几

何关系计算可知此时入射角 $\theta_2 = 8.915^\circ$, 出射角 $\theta_3 = 17.664^\circ$, 出射光与腔内振荡光路不重合, 溢出

腔外, 不能形成光振荡, 此时抽运仍在继续, 上能级粒子数积累, 腔内实现了关断状态。

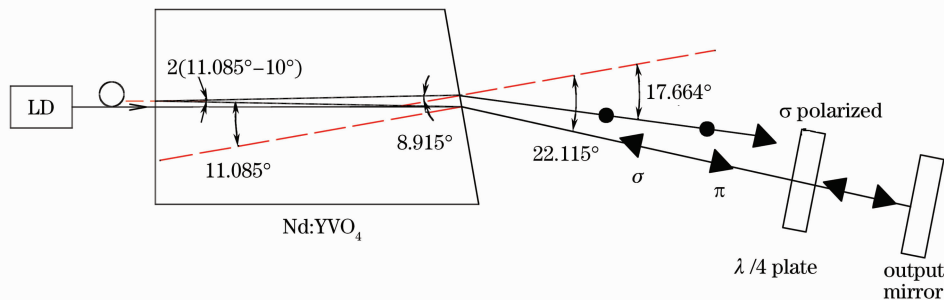


图 4 π 偏振光射入楔角 Nd:YVO₄ 晶体光路示意图

Fig. 4 Schematic of the π polarized beam path through Nd:YVO₄ crystal with a wedge angle

实验表明, 在切有楔角的自然双折射晶体 Nd:YVO₄ 谐振腔中, 仅插入可使光振动方向旋转的普克尔盒就可以实现电光调 Q。

$G = E_{s3}/E_{s2} = 80.8\%$, E_{s3} 为调 Q 运转时输出功率, 光-光转换效率为 39.2%, 单脉冲波形如图 6 所示。

4 LGS 晶体电光调 Q Nd:YVO₄ 激光器

应用旋光晶体 LGS 电光性能制作的 Q 开关, 其透光范围大, 抗光损伤阈值是 LiNbO₃ 的 9.5 倍, 具有良好的物化稳定性、小的热膨胀系数和相当大的光电系数 ($\gamma_{11} = 2.3 \times 10^{-12}$ m/V)^[6]。LGS 电光开关的应用在国内已有不少研究报道^[7,8]。

使用的 LGS 晶体, 其 Z 方向长度 $l = 40$ mm, X 方向宽度 $w = 8$ mm, Y 方向宽度 $d = 8$ mm, 横向电光效应, X 方向加电场, Z 方向透光。Nd:YVO₄ 晶体尺寸为 3 mm × 3 mm × 5 mm, 掺杂原子数分数为 0.3%, 一面镀全反膜, 另一通光面切 10° 楔角镀增透膜, 采用 LD 端面抽运, 腔长 95 mm, 实验装置如图 5 所示。调 Q 电源驱动退压式调 Q, 即加电压时腔处于关断状态, 不振荡, 退掉电压激光振荡输出。用相干公司的 Field MaxII-PM 30 功率计进行探测。

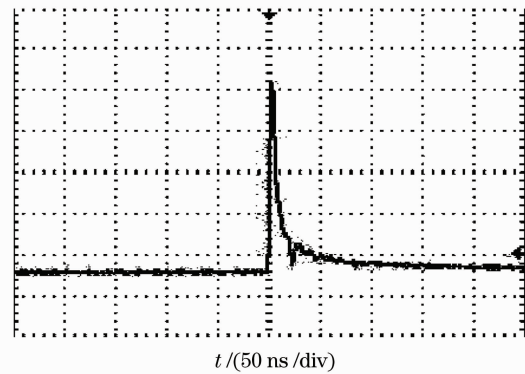


图 6 激光输出脉冲波形

Fig. 6 Pulse profile of the laser output

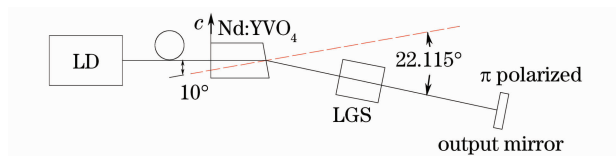


图 5 LD 端面抽运 Nd:YVO₄ 电光调 Q 实验装置图

Fig. 5 Experimental setup of LD end-pumped electro-optic Q-switched Nd:YVO₄ laser

LD 抽运重复频率为 1 kHz 时, LGS 晶体静态插入损耗 $\delta = 1 - E_{s2}/E_{s1} = 3\%$, 其中 E_{s1} 为静态运转且未加 LGS 时的输出功率, E_{s2} 为静态运转加入 LGS 后的输出功率。抽运功率为 5.65 W 时, 调 Q 运转输出功率为 2.2 W, 脉冲宽度为 6.3 ns, 动静比

5 结 论

研究了在电光调 Q 激光器中使用沿 α 轴切割、带楔角的 Nd:YVO₄ 晶体, 利用其自然双折射性质, 使 π 偏振光与 σ 偏振光不同光路, 实现单一偏振态起振, 加入 $\lambda/4$ 电压的普克尔盒进行退压式调 Q 输出, 腔内不需要加入偏振元件, 在重复频率为 1 kHz 时实现了脉冲宽度为 6.3 ns, 峰值功率为 333 kW, 光-光转换效率为 39.2% 的激光输出。此次实验由于调整架尺寸的限制未能把腔长压缩到最短, 今后可通过机械设计进一步改进, 以得到更好的输出。

激光晶体通光面楔角的大小影响两束偏振光分开的角度, 大的楔角有利于两正交偏振光的分开, 使不需要的一路光尽可能偏离振荡光路, 但对切割的角度精度并没有十分严格的要求。在实际应用中, 这种方式可缩短腔长, 降低腔内损耗。特别是在腔倒空激光器中, 脉冲宽度等于腔内的往返渡越时间, 意味着可得到更窄脉宽的激光输出。

参 考 文 献

- 1 W. Koechner. Solid-State Laser Engineering [M]. Sun Wen Transl. Beijing: Science Press, 2002. 273~274
W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙文译. 北京: 科学出版社, 2002. 273~274
- 2 Song Biao, Ma Mingjun, Huang Ye *et al.*. LD-pumped actively electro-optic Q-switching lasers with pulse repetition rates up to 5 kHz[J]. *Chinese J. Quantum Electron.*, 2004, **21**(1): 15~17
宋 标, 马明俊, 黄 晔等. LD 泵浦 5 kHz 电光调 Q 的 Nd:YVO₄ 激光器[J]. 量子电子学报, 2004, **21**(1): 15~17
- 3 Wang Chunyu, Li Xiaoli, Zang Huaguo *et al.*. Laser diode continuous-wave-pumped repetitive electro-optic Q-switched Nd:YVO₄ laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11): 1441~1446
王春雨, 李小莉, 臧华国等. 激光二极管连续抽运电光调 Q Nd:YVO₄ 激光器[J]. 中国激光, 2006, **33**(11): 1441~1446
- 4 Xie Huiming. Study of LD Side Pumped High Power All-Solid-State 532 nm, 355 nm Lasers [D]. Xi'an: Northwestern University, 2006. 37~43
解慧明. LD 侧泵高功率全固态 532 nm, 355 nm 激光器的研究[D]. 西安: 西北大学, 2006. 37~43
- 5 Yao Jianquan. All Solid State Laser and Nonlinear Optical Frequency Conversion Technology [M]. Beijing: Science Press, 2007. 59~60
姚建铨. 全固态激光及非线性光学频率变换技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007. 59~60
- 6 Wang Hao, Wang Qingpu, Zhang Xingyu *et al.*. La₃Ga₅SiO₁₄ as active electro-optic Q-switch in a pulsed Nd:LiYF laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(7): 939~942
王 浩, 王青圃, 张行愚等. La₃Ga₅SiO₁₄ 电光调 Q 的 Nd:LiYF 激光器研究[J]. 光学学报, 2005, **25**(7): 939~942
- 7 Yin Xin, Wang Jiyang, Zhang Shaojun. The study of the electro-optic effect of the optical active crystals in the polarized light interferometric experiment [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(12): 1484~1488
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
- 8 Yin Xin, Wang Jiyang, Zhang Shaojun. Study on electro-optic Q-switch of La₃Ga₅SiO₁₄ single crystal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(1): 29~32
尹 鑫, 王继扬, 张少军. La₃Ga₅SiO₁₄ 晶体电光调 Q 开关的研究[J]. 中国激光, 2004, **31**(1): 29~32