

文章编号: 1001-3806(2010)05-0603-04

## 1319nm Nd:YAG 脉冲电光调 Q 激光器的研究

陈仁, 翟刚, 金锋, 马楠, 李晶, 杨峰, 时顺森, 兰戈  
(西南技术物理研究所, 成都 610041)

**摘要:** 为了研究脉冲输出波长为 1319nm 的 Nd:YAG 激光器, 通过分析 Nd:YAG 激光介质的辐射跃迁能级, 采用镀制高选择性介质膜的方法抑制 1064nm 等其它波长的起振, 最终实现 1319nm 激光单脉冲输出。实验中采用闪光灯抽运、水冷 Nd:YAG 激光器, KD\*P 调 Q, 平平腔结构, 获得 1319nm 激光静态输出能量 340.9mJ, 动态输出 76.8mJ, 重频 1Hz, 脉宽 17ns, 束散角 2.7mrad。结果表明, 通过镀制高选择性介质膜的方法可以实现 1319nm 激光调 Q 脉冲输出。

**关键词:** 激光器; 1319nm 脉冲激光器; Nd:YAG 晶体; 电光调 Q

**中图分类号:** TN248.1      **文献标识码:** A      **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.05.008

### Study on pulsed electro-optic Q-switched Nd:YAG laser at 1319nm

CHEN Ren, ZHAI Gang, JIN Feng, MA Nan, LI Jing, YANG Feng, SHI Shun-sen, LAN Ge  
(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** In order to study pulsed electro-optic Q-switched Nd:YAG laser at 1319nm, the transition radiation energy level of Nd:YAG crystal was analyzed. A single pulsed laser at 1319nm was acquired after restraining laser oscillator of wavelength at 1064nm through coating chosen film on the mirror. In a configuration of lamp pumped, water-cooled Nd:YAG with KD\*P as electro-optic Q-switched, pulsed output static energy of 340.9mJ at 1319nm, Q-switched output energy of 76.8mJ with pulsed-width of 17ns and divergence of 2.7mrad were acquired. Experimental results show that coating chosen-film can be used to obtain laser at 1319nm.

**Key words:** lasers; 1319nm pulsed laser; Nd:YAG crystal; electro-optic Q-switched

## 引言

1319nm 激光对人眼相对安全, 它处在大气透过窗口、光纤低损耗和接近零色散区域, 在光纤通讯、激光遥感、雷达及光谱学、环境监测、大气研究、激光医疗和军事上等领域有着广泛的应用前景, 日益受到人们的重视。

激光武器是 21 世纪夺取制空权和控制空间的重要的新概念武器, 其中 1.3 $\mu$ m 波段激光处于大气窗口, 是空间高能激光武器的主要选择。由于 1319nm 激光与高能氧碘化学激光器 (chemical oxygen-iodine laser, COL) 的输出波长 1315nm 十分接近, 所以高光束质量的 1319nm 激光可以用作 COL 的信标光源; 又因 COL 污染剧烈、运行成本高, 因而 1319nm 的 Nd:YAG 激光器可用于模拟 COL 的输出, 用在军队的平时训练、激光防护研究和激光对抗上。另外, 为了对抗 1064nm 的 Nd:YAG 激光干扰, 大多数可见光、近红

外侦测设备的光学窗口都对 1064nm 激光镀制了全反射膜, 于是 1319nm 激光的使用将使该对抗措施失效<sup>[1-7]</sup>。

鉴于此, 目前国内外众多单位对 1319nm 激光器进行了研究, 但主要集中在声光调 Q 连续输出上, 作者主要利用电光调 Q 技术产生高峰值功率的脉冲 1319nm 激光及其倍频光等相关技术。

## 1 系统设计

Nd:YAG 作为激光介质, 在激发状态下主要存在 1319nm, 1064nm 和 946nm 这 3 条荧光光谱。其中, 1064nm 和 1319nm 激光属于 4 能级系统, 具有公共的跃迁上能级, 发射截面分别为  $8.80 \times 10^{-20} \text{m}^2$  和  $1.50 \times 10^{-20} \text{m}^2$ 。在正常工作条件下, 荧光强度较强的 1064nm 谱线首先起振, 消耗掉大量的反转粒子数, 从而抑制掉 1319nm 谱线的振荡。为了得到 1319nm 波长的激光, 只有通过选频措施, 在该谐振腔中插入标准具或色散棱镜, 或以特殊设计的谐振腔反射镜作为输出镜, 或使用镀有高选择性介质膜的反射镜来实现特定波长的振荡。作者通过灯抽运 Nd:YAG, 选择镀有高选择性介质膜的反射镜来实现 1319nm 的

作者简介: 陈仁 (1981-), 男, 助理工程师, 主要从事全固态激光器及 OPO 参变振荡器等方面的研究工作。

E-mail: ciomchenren@126.com

收稿日期: 2009-09-04; 收到修改稿日期: 2009-12-28

激光振荡,再利用磷酸钛氧钾 (potassium titanyl phosphate, KTP) 倍频产生 660nm 激光输出,实验证明方案可行。

### 1.1 1319nm Nd:YAG 激光振荡的速率方程

图 1 是 Nd:YAG 激光介质原子能级结构简图及主

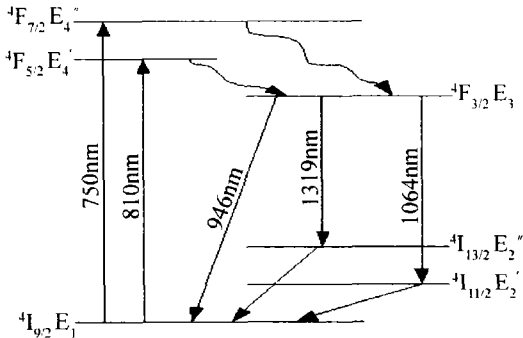


Fig. 1 Simplified energy level diagram of Nd:YAG materials

要跃迁过程。其中参与相互作用过程的能级被简化为 4 个,即基态  $E_1$ ,抽运带  $E_4$  (含  $E_4'$ ,  $E_4''$ ),激光跃迁的上能级  $E_3$  和下能级  $E_2$  (含  $E_2'$ ,  $E_2''$ ),对于该激光介质在原子能级的结构分析,有多个抽运带基于从抽运带到激光上能级  $E_3$  的衰变(弛豫)过程是快速的。图 2 是 1319nm 波长激光原子能级跃迁的过程。在图 2

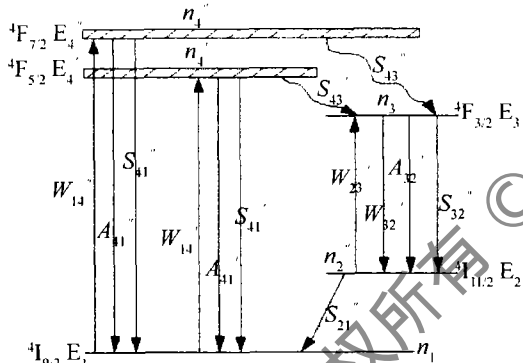


Fig. 2 Amplified energy level diagram of Nd:YAG materials

中,将其简化成两个抽运带的情况,并忽略了  $E_4 \sim E_1$  间的受激跃迁以及  $E_4 \rightarrow E_2$  和  $E_3 \rightarrow E_1$  间的各可能跃迁。 $n_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) 表示各能级粒子数目; $W_{14}'$  ( $W_{14}''$ ) 表示单位时间内基态  $E_1$  上的原子被抽运到抽运带  $E_4'$  ( $E_4''$ ) 上的几率; $A_{41}'$  ( $A_{41}''$ ) 及  $S_{41}'$  ( $S_{41}''$ ) 分别表示原子从  $E_4'$  ( $E_4''$ ) 能级返回到  $E_1$  的自发辐射和无辐射跃迁几率; $S_{43}'$  ( $S_{43}''$ ) 为原子从  $E_4'$  ( $E_4''$ ) 到激光上能级  $E_3$  的弛豫几率; $W_{32}''$  为激光上、下能级间在单模光场激励下的受激跃迁几率; $S_{32}''$  及  $A_{32}''$  为  $E_3$  至  $E_2''$  能级间的无辐射跃迁和自发发射跃迁几率; $S_{21}''$  为激光下能级  $E_2''$  到基态的弛豫几率。可简化得到 1319nm 单模振荡的 Nd:YAG 理想 4 能级均匀加宽激光器的速率方程<sup>[8]</sup>:

$$\begin{cases} \frac{dn_1}{dt} = n_2'' S_{21}'' - n_1 W_{14}'' \\ \frac{dn_3}{dt} = n_4'' S_{43}'' - B_a'' \varphi \Delta n - n_3 \frac{A_{32}''}{\eta_2''} \\ \frac{dn_4}{dt} = n_1 W_{14}'' - \frac{n_4'' S_{43}''}{\eta_1''} \\ n \approx n_1 + n_3 \\ \frac{d\varphi}{dt} = B_R n_3 V_a (\varphi + 1) - \frac{\varphi}{\tau_R} \\ \Delta n = n_3 - \frac{g_3}{g_2} n_2'' \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\varphi$  表示腔内光子总数, $\eta_1''$ ,  $\eta_2''$  分别表示  $E_4'$  和  $E_4''$  能级向激光上能级  $E_3$  跃迁的量子效率和激光上下能级间跃迁的荧光效率, $B_R$  表示在激光腔内由振荡模中一个光子所引起的受激辐射跃迁几率, $B_a''$  表示在该介质中分配到一个模的平均自发辐射的跃迁几率, $V_R$  表示腔内模体积,有  $V_a/V_R = B_R/B_a = \eta_c$ ,  $\eta_c$  称为激光腔的填充系数, $\tau_R$  为振荡模管制在腔内的有限平均寿命。忽略自发辐射对腔内光子总数  $\varphi$  的贡献,考虑到 4 能级系统  $\Delta n \approx n_3$ ,  $\frac{dn_4}{dt} \approx 0$ ,得到原子集居数密度反转及腔内总光子数的速率方程组为:

$$\begin{cases} \frac{d\Delta n}{dt} = (n - \Delta n) W_{14}'' \eta_1 - B_R \varphi \Delta n - \frac{\Delta n A_{32}''}{\eta_2''} \\ \frac{d\varphi}{dt} = (V_a B_R \Delta n - \frac{1}{\tau_R}) \varphi \end{cases} \quad (2)$$

式中,第 1 个式子表明在激光器中影响振荡模光子总数变化速率的因素包括 3 项,第 1 项是自发辐射的贡献,第 2 项为受激跃迁的贡献,最后一项是光腔损耗的影响。

### 1.2 阈值分析

1319nm 与 1064nm 这两条激光谱线都属于 4 能级激光系统,根据激光器功率的阈值表达式<sup>[9]</sup>:

$$P_{th} = \frac{h\nu V}{\eta_0 \eta \sigma \tau} \left[ \alpha + \frac{1}{2L} \ln \left( \frac{1}{RR'} \right) \right] \quad (3)$$

式中, $\nu$  为对应发射光的频率, $\eta_0$  为抽运光被晶体吸收的效率, $\eta$  为晶体吸收光功率转换成相应频率荧光的效率, $\alpha$  为激光在谐振腔内的非透射损耗, $L$  为激光工作物质的长度, $V$  为激光工作物质的体积, $\sigma$  和  $\tau$  分别为激光受激发射截面和激光上能级粒子寿命, $R$  和  $R'$  分别为两腔镜对腔内运转光的反射率。由于 1064nm 和 1319nm 两个波长的辐射共用同一激光上能级,可知它们的激光上能级寿命相同,即  $\tau$  是同一数值。由阈值公式可知,通过调整  $\alpha, R, R'$  各参量,使得 1319nm 的

振荡阈值低于1064nm波长的振荡,即可选择合适的腔镜透过率来增大1064nm波长在谐振腔内的损耗,最终实现1319nm的运转。

## 2 实验

### 2.1 实验装置

根据之前的分析,欲实现1319nm单波长脉冲激光的输出,采用在谐振腔镜上镀高选择性介质膜来实现,其基本结构示意图如图3所示。采用氙灯抽运方式,

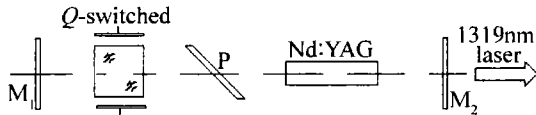


Fig. 3 Experimental set-up

水冷的工作模式,激光介质选用Nd:YAG,平平腔结构。对部分光学元件的介绍如下。

2.1.1 镜片  $M_1$  由于1319nm谱线与1064nm谱线相比,其发射截面小得多,故实现1319nm的激光振荡难度比实现1064nm的激光振荡难度更大。为了获得1319nm的激光振荡,必须抑制Nd:YAG晶体中最强的1064nm谱线和1319nm附近的1338nm谱线的振荡。故而要求该薄膜对1064nm激光高透、对1319nm激光高反,并使1338nm谱线的透射率比1319nm的透射率高,以保证1319nm的激光振荡。选用的  $M_1$  的参量为  $T = 0.064\% @ 1319\text{nm}$ ,  $T = 85.68\% @ 1338\text{nm}$ ,  $T = 99.8\% @ 1064\text{nm}$ 。

2.1.2 Nd:YAG 激光棒 实验室采用了东骏公司生产的双掺Nd:YAG晶体。加工精度:平面度小于  $1/(10\lambda)$ ;平行度小于  $10''$ ;垂直度小于  $3''$ ;光洁度BⅢ;端面1反射率小于0.2%,端面2反射率小于0.2%;消光比34.9dB;并在激光棒两端镀有1319nm的增透膜。

2.1.3 镜片  $M_2$  在方案设计中,只允许1319nm激光在谐振腔中振荡,于是就应该尽量避免1338nm激光和1064nm激光振荡的发生,这就要求在输出片  $M_2$  上镀1338nm和1064nm的高透膜。实验室选用的膜片参量是  $T = 47\% @ 1319\text{nm}$ ,  $T = 87\% @ 1338\text{nm}$ ,  $T = 99.8\% @ 1064\text{nm}$ 。

2.1.4 偏振片 P 对于实验中所用的1319nm偏振片P,测量了它的偏振度  $\gamma$ :

$$\gamma = \frac{E_p - E_s}{E_p + E_s} = 96.4\% \quad (4)$$

式中,  $E_p$  为 p 偏振光的能量,  $E_s$  为 s 偏振光的能量。

2.1.5 电光 Q 开关 目前对1319nm调Q激光的研究集中在声光调Q技术,但它不适用于高功率的脉冲激光器。相比之下,利用电光调Q技术可以实现

兆瓦级的脉冲激光输出。实验中采用退压调Q方式,调Q晶体采用磷酸二氢钾 (dehydrated potassium dihydrogen phosphate,  $KD^*P$ ) 晶体,该晶体光谱透光范围为  $0.2\mu\text{m} \sim 2.0\mu\text{m}$ ,抗损伤阈值较高,是常用的高功率调Q晶体。测得  $KD^*P$  在1319nm波长下的初始透过率  $T = 83\%$ 。

### 2.2 实验结果

利用  $\varnothing 4\text{mm} \times 60\text{mm}$ ,  $\varnothing 5\text{mm} \times 70\text{mm}$ ,  $\varnothing 6\text{mm} \times 70\text{mm}$  3种规格的Nd:YAG激光棒,分别做了实验。在实验中,激光器以1Hz频率运转,水冷,其静态激光结果如图4所示。

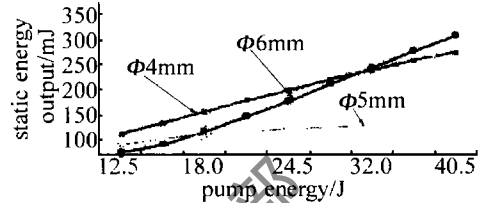


Fig. 4 Static energy extraction from radius with pump energy

从图4可以清楚看到,激光棒越粗,其起振阈值就越高;在抽运能量比较低的情况下,激光棒直径越大其静态激光输出越小;但是随着抽运能量的逐渐增加,其1319nm激光静态输出就愈大。当激光器腔长为280mm,采用  $\varnothing 6\text{mm} \times 70\text{mm}$  Nd:YAG晶体,1Hz运转,在注入电功率40.5J时,重复频率为1Hz,此时1319nm静态激光的最大输出达340.9mJ/pulse。

调Q晶体采用  $KD^*P$  晶体,100  $\mu\text{F}$  的储能电容,不同直径激光棒的动态输出实验结果如图5所示。从

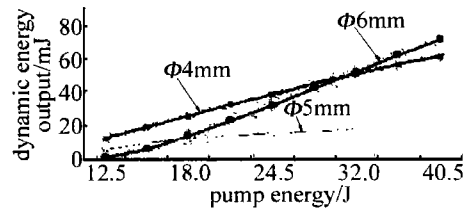


Fig. 5 Dynamic energy extraction from radius with pump energy

图中可知,在抽运能量比较小的阶段,由于小棒被照射的更充分,容易起振;随着抽运能量的增加,大棒的储能就越多,照射得越充分,于是能量的输出就越大了。当抽运能量在32J时,  $\varnothing 4\text{mm}$  Nd:YAG输出激光17mJ;而此时  $\varnothing 5\text{mm}$  Nd:YAG输出激光48.6mJ,  $\varnothing 6\text{mm}$  Nd:YAG输出激光50.3mJ;继续增大抽运能量,  $\varnothing 6\text{mm}$  Nd:YAG输出激光就逐渐大于  $\varnothing 5\text{mm}$  Nd:YAG输出激光了,40.5J抽运时激光输出已达76.8mJ。用光电探测器接收并通过Tektronix TDS2024存储示波器显示输出光的脉冲波形,测得激光脉冲宽度为17.72ns,如图6所示。实验中, Q 开关的速度快慢、抽运光不均匀程度等造成激光工作物质的热畸变等也影响了脉冲宽度。

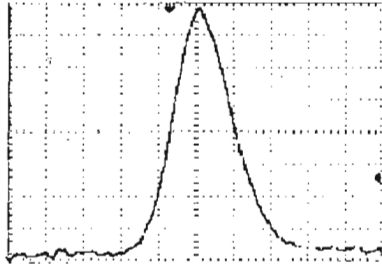


Fig. 6 Temporal profile of pulse

用 WDG30 型光栅单色仪测量输出的激光,测得其中心波长为 1318.2nm。在 1064nm、1338nm 波长附近,没有发现相应的激光输出。可见,采用镀制高选择性介质膜的方式实现 1319nm 激光脉冲输出一种有效手段。

另外,用套孔法测量了激光发散角,约为 2.7mrad。

图 7 是动静比关系图。从图中可知,开始阶段,激

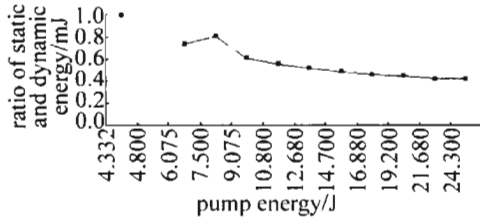


Fig. 7 Ratio of static and dynamic energy

光棒的储能因闪光灯的抽运作用而增加;随着抽运能量的增大,动静比成下降趋势,究其原因是反转粒子数因抽运效率的下降和自发辐射损耗的增大而减小<sup>[10]</sup>。

### 3 结 论

作者采用镀制高选择性介质膜的方式抑制 1064nm

的起振,最终实现 1319nm 激光单脉冲输出。实验中采用闪光灯抽运、水冷 Nd:YAG 激光器, KD\*P 调 Q, 平平腔结构, 获得 1319nm 激光静态输出能量 340.9mJ, 动态输出 76.8mJ, 重频 1Hz, 脉宽 17ns, 束散角 2.7mrad。下一步将通过优化谐振腔腔型, 改变输出镜透过率大小等参量等来提高激光输出的效率和性能, 并对倍频红光做进一步的研究。

### 参 考 文 献

- [1] LUO Sh Y, QI K G, ZHANG Z M, *et al.* Design and characteristics of a Nd<sup>3+</sup>:YAG pulsed laser at 1.3μm[J]. Chinese Journal of Lasers, 1994, 21(10):778-780(in Chinese).
- [2] WANG T, YAO J Q. Study on CW Nd:YAG laser at 1319nm[J]. Laser Journal, 2003, 24(4):20-22(in Chinese).
- [3] JIANG H L, ZOU J W, NIE J S. Application and research development of 1.319μm laser[J]. Electro-optic Technology Application, 2006, 21(4):1-3(in Chinese).
- [4] JIANG G G, LI Zh J. 62W CW 1.32μm Nd<sup>3+</sup>:YAG laser[J]. Optoelectronics · Laser, 1998, 9(5):434-435(in Chinese).
- [5] ZHAI H J, LI B Q, DA X Y. Reconstruction of a Nd:YAG laser from 1.06μm to 1.32μm[J]. Chinese Journal of Lasers, 1995, 22(11):806-810(in Chinese).
- [6] MA Y, WANG W M, PANG Y, *et al.* Design analysis on 1319nm Nd:YAG three-longitudinal-mode pulse laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(s0):151-154(in Chinese).
- [7] WEI Y, ZHANG G, HUANG C G, *et al.* Output of 1319nm and 1338nm dual wavelength Nd:YAG pulse laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(1):45-48(in Chinese).
- [8] CHEN Y Q, WANG J H. Principles of lasers[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1992:306-307(in Chinese).
- [9] SHEN H Y. Dual wavelength crystal laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 1994, A21(5):334-340(in Chinese).
- [10] KOECHNER W. Solid-state laser engineering[M]. Beijing: Science Press, 1999:93(in Chinese).

请向邮局订阅 2011 年度《激光技术》!

国内邮发代号:62-74;国内统一刊号:CN51-1125/TN