

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0016-04

脉冲电光调 Q 1319 nm Nd:YAG 激光技术

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, 四川 成都 610041)

摘要 1319 nm 激光处在大气透过窗口、光纤低损耗和接近零色散区域, 在很多领域有着广泛的应用。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 1064 nm 等其他波长的起振, 最终实现 1319 nm 激光单脉冲输出。实验得到 1319 nm 激光静态输出能量 340.9 mJ, 动态输出 76.8 mJ, 重复频率 1 Hz, 脉宽 17 ns, 束散角 2.7 mrad。结果表明, 通过镀制高选择性介质膜的方法可以实现 1319 nm 激光调 Q 脉冲输出。

关键词 激光器; Nd:YAG 晶体; 1319 nm 脉冲激光器; 选择性介质膜; 电光调 Q

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201037s1.0016

Study on Electro-Optic Q-switched Pulsed Nd:YAG Laser at 1319 nm

Chen Ren Zhai Gang Jin Feng Ma Nan Li Jing Yang Feng Shi Shunsen Lan Ge

(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract 1319 nm waveband sets in the window of air transparency and the low lossness of fiber, and it approaches to zero dispersion. It has been widely used in many fields, and has attracted much attention. The transition radiation energy level of the 1319 nm is analyzed. The critical technology of restraining resonance of 1064 nm so as to improve that of 1319 nm is discussed. A pulsed output static energy of 340.9 mJ at 1319 nm, Q-switched output energy of 76.8 mJ with pulsed-width of 17 ns and divergence of 2.7 mrad are acquired. Experimental results show that coating chosen-film can be used to generate the laser at 1319 nm.

Key words lasers; Nd:YAG crystal; 1319 nm pulsed laser; coating chosen-film; electro-optic Q-switch

1 引 言

1319 nm 激光处在大气透过窗口、光纤低损耗和接近零色散区域, 在光纤通信、激光遥感、雷达及光谱学、环境监测、大气研究、激光医疗和军事等领域有着广泛的应用, 日益受到人们的重视。

近几年医用激光技术取得长足发展, 各种波长的医用激光系统成功应用于临床疾病的诊断和治疗。其中 YAG 系列激光器以其体积小、价格低、可靠性高、光纤导光、临床使用方便以及组织作用效应丰富等特点继续扮演着重要角色。国内外研究发现, 虽然 1.3 μm 波段激光的水吸收系数较 10.6 μm CO₂ 激光, 2.97 μm Er:YAG 和 2.1 μm Ho:YAG 激光小, 但却是 1.064 μm 激光水吸收系数的 10~20 倍。由于人体组织 60%~70% 是水, 所以 1.3 μm 波段激光在人体组织的穿透能力较 1.064 μm Nd:YAG 激光浅得多, 但较 10.6 μm

CO₂ 激光稍深, 在人体组织中的穿透能力适中。1319 nm 激光在血液中穿透深度是 1064 nm 的 27 倍。所以, 对肌肉组织进行深度加热或进行含血管丰富的各类肿瘤的切除, 1319 nm 激光比 1064 nm 的更加适用。该波长激光兼具 1.064 μm 激光良好的凝固、止血作用和 10.6 μm CO₂ 激光优越的气化、切割功能。目前, 国内已生产出 1.3 μm 波段的激光治疗机, 并进行了 1.3414 μm Nd:YAP 和 1.338 μm Nd:YAG 脉冲激光的实验, 分别获得了大于 5 J 和 3.5 J 的长脉冲激光输出以及 300 mJ 的调 Q 激光输出, 在牙科、皮肤科和激光美容等领域开展临床应用^[1~3]。可见, 对于 Nd:YAG 激光器室温下输出的 1319 nm 波长, 临床应用前景被看好^[4]。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 μm 波段激光处于大气窗口, 是空间高能激光武器的主要选择^[5,6]。

收稿日期: 2010-01-18; 收到修改稿日期: 2010-03-05

作者简介: 陈仁(1981—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事全固态激光器及光参量振荡器方面的研究。

目前国内外众多单位对 1319 nm 激光器进行了研究,但大多集中在声光调 Q 连续输出上,本文主要就电光调 Q 产生高功率的脉冲 1319 nm 激光及其倍频光等相关技术进行研究。

2 理论分析

2.1 1319 nm Nd:YAG 激光振荡的速率方程

Nd:YAG 属立方晶系,是各向同性晶体,硬度大,化学性能稳定,而且热传导率高,热膨胀系数小,易长出大尺寸晶体。Nd:YAG 作为激光介质,在激发状态下主要存在 1319,1064 和 946 nm 这 3 条荧光光谱,中心波长和对应的能级跃迁及荧光分支比(每条谱线强度与总荧光强度之比)为:946 nm (${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$) (25%), 1064 nm (${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$) (60%), 1319 nm (${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$) (14%), 其中 946 nm 激光属于三能级系统,振荡阈值较高。1064 nm 和 1319 nm 激光同属于四能级系统,具有公共的跃迁上能级。在正常工作条件下,1064 nm 谱线首先起振,消耗掉大量的反转粒子数,从而抑制掉 1319 nm 谱线的振荡,所以 Nd:YAG 激光器在室温时以最强的 1064 nm 波长振荡。

为了得到 1319 nm 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。通过灯抽运 Nd:YAG,镀有高选择性介质膜的反射镜来实现 1319 nm 的激光振荡,实验证明方案可行。

图 1 标示出了 Nd:YAG 激光介质原子能级结构简图及主要跃迁过程,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。可简化得到 1319 nm 单模振荡的 Nd:YAG 理想四能级均匀加宽激光器的速率方程^[7]

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

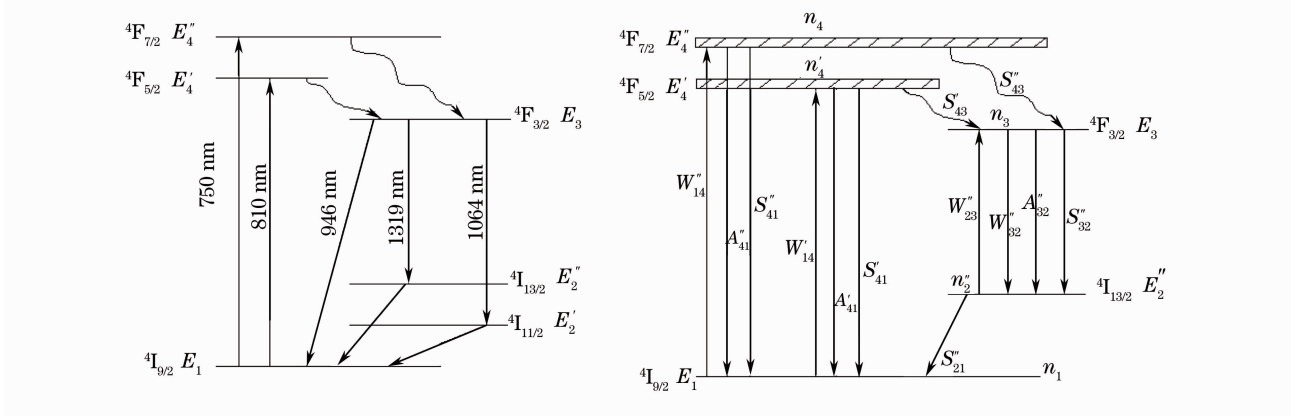


图 1 Nd:YAG 激光介质原子能级结构简图

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

式中 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辐射跃

迁几率, S_{21}' 为激光下能级 E_2' 到基态的弛豫几率, φ 表示腔内光子总数, η_1'' , η_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。

2.2 用 Opt. chamber v. 1. 3. 3(c) 软件模拟抽运光场

在激光器的抽运中使用闪光灯的主要目的是将电能转化为辐射能,并在一定的光谱带中产生高辐射强度。这里采用的抽运源是氙灯,通过调整软件中相关参数,就可能使 Nd:YAG 在荧光波长时有最大的发射,而在有效吸收带之外的所有光谱区产生最小的发射。所采用的软件是 Opt. chamber v. 1. 3. 3(c),应用该软件模拟了闪光灯抽运棒状激光介质截面光场分布的状况,如图 2 所示。从中可以看出,棒内抽运光场在接近闪光灯一边被照射得通透一些。显然,棒内的温度场、应力场不匀。这是结构所决定的,实际情况也与之相符。

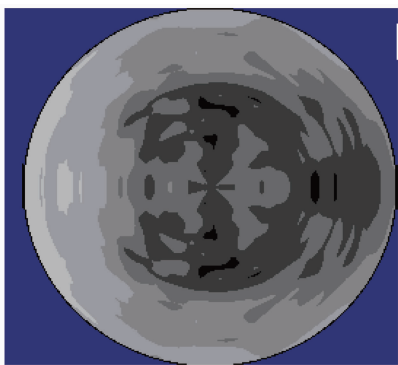


图 2 棒状介质截面光场分布的显示效果图

Fig. 2 Pump intensity distribution in a laser rod

3 实 验

3.1 实验装置

根据理论分析,欲实现 1319 nm 单波长脉冲激光输出,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。其中 M_1 是镀有 1319 nm 的全反膜及 1064 nm 和 1338 nm 的高透膜层(HR@1319nm, HT@1064 nm, HT@1338 nm); M_2 透射率为 $T=47\% @1319$ nm, HT@1338 nm, HT@1064 nm, P 为偏振片,采用 Nd:YAG 为激光介质,平-平腔结构,采用氙灯侧面抽运方式,冷却方式是水冷。

选用的 M_1 的参数为: $T=0.064\% @1319$ nm, $T=85.68\% @1338$ nm, $T=99.8\% @1064$ nm。为了抑制 1338 nm 激光波长,全反射镜镀制了对 1338 nm 窄带高透,对其他波长高反的膜系。实验室采用 $\phi 6$ mm \times 70 mm 的 Nd:YAG 晶体,并在激光棒两端镀有 1319 nm 的增透膜。

由于声光调 Q 技术不适用于高峰值功率的脉冲激光器。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 KD*P 晶体,该晶体光谱透光范围为 0.2~2.0 μ m,抗损伤阈值较高,是常用的高功率调 Q 晶体。

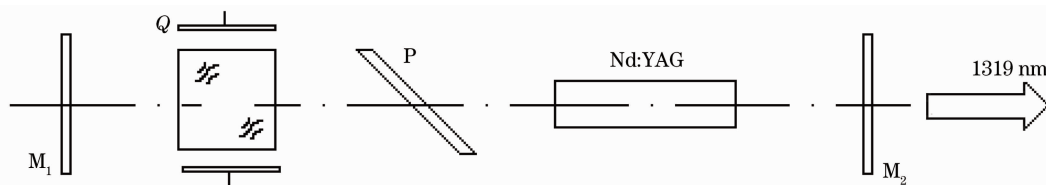


图 3 1319 nm 调 Q 脉冲激光输出的光学装置图

Fig. 3 Experimental setup of 1319 nm Q-switched pulsed laser

3.2 实验结果

利用 $\phi 6$ mm \times 70 mm 的 Nd:YAG 激光棒做了实验,频率设为 1 Hz,其静态激光结果如图 4 所示。可以从中清楚地看到,随着抽运能量的逐渐增加,其 1319 nm 激光静态输出就愈大。激光器腔长为 280 mm,重复频率 1 Hz 运转,在注入电能 40.5 J 时,1319 nm 静态激光的单脉冲最大输出达 340.9 mJ。

电光调 Q 晶体采用 KD*P,动态输出实验曲线如图 5 所示。从图中可知,随着抽运能量的增加,储能就越多,照射得越充分,于是能量的输出就越大。当抽运能量在 32 J 时, $\phi 6$ mm Nd:YAG 输出激光 50.3 mJ;继续增大抽运能量至 40.5 J 时,动态激光

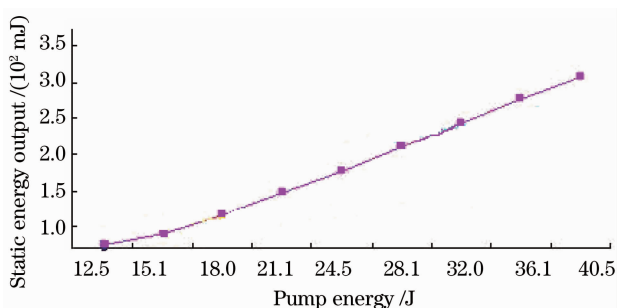


图 4 静态能量输出曲线图

Fig. 4 Static energy extraction versus pump energy
输出 76.8 mJ。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 17.72 ns。实验中,Q 开关

的速度快慢、抽运光不均匀、聚光腔内的热平衡等造成激光工作物质的热畸变等也影响了脉冲宽度^[8]。另外,用套孔法测量束散角,经计算为 2.7 mrad。

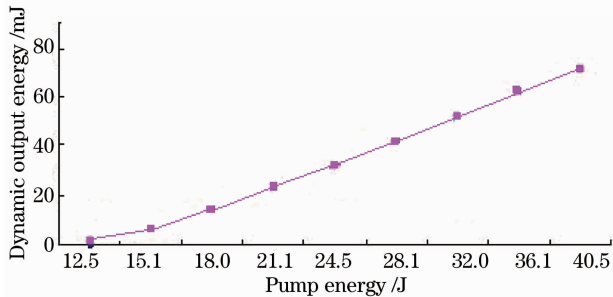


图 5 动态能量输出曲线图

Fig. 5 Dynamic energy extraction versus pump energy

4 结 论

采用镀制高选择性介质膜的方式抑制 1064 nm 的起振,最终实现 1319 nm 激光单脉冲输出。在实验中,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 1319 nm 激光静态输出能量 340.9 mJ,动态输出 76.8 mJ,重复频率 1 Hz,脉宽 17 ns,束散角 2.7 mrad。

参 考 文 献

- 1 Wang Yong, Li Zhengjia, Zhu Changhong *et al.*. A high powered red laser used in photodynamic therapy[J]. *Laser Journal*, 2003, **24**(5): 81~82
- 2 Chen Xinghai, Zheng Yi, Sun Mei. A solid-state tunable laser of Cr:LiSAF pumped by 671 nm [J]. *J. Qufu Normal University(Natural Science)*, 2003, **29**(4): 60~62
陈兴海,郑义,孙梅. 671 nm 红光泵浦 Cr:LiSAF 可调谐激光器的研究[J]. *曲阜师范大学学报(自然科学版)*, 2003, **29**(4): 60~62
- 3 Wen Wuqi, Yao Jianquan, Ding Xin *et al.*. LD pumped Nd:YAG/KTP quasi-continuous wave red light laser with 8.1 W output power[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(11): 1281~1284
温午麒,姚建铨,丁欣等. 8.1 W 全固态准连续红光 Nd:YAG 激光器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(11): 1281~1284
- 4 Zheng Quan, Chen Yingxin, Qian Longsheng. LD-pumped Nd:YAG/LBO red laser at 660 nm[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(10): 1153~1155
郑权,陈颖新,钱龙生. LD 泵浦 Nd:YAG/LBO 结构 660 nm 红光激光器[J]. *光子学报*, 2003, **32**(10): 1153~1155
- 5 Luo Shouyu, Qi Kaiguo, Zhang Zengming *et al.*. Design and characteristics of a Nd³⁺:YAG pulsed laser at 1.3 μm [J]. *Chinese J. Lasers*, 1994, **A21**(10): 778~780
罗售余,齐开国,张增明等. 1.3 μm Nd³⁺:YAG 脉冲激光器的特性与设计[J]. *中国激光*, 1994, **A21**(10): 778~780
- 6 Wei Yong, Zhang Ge, Huang Chenghui *et al.*. Output of 1319 nm and 1338 nm dual wavelength Nd:YAG pulse laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(1): 45~48
魏勇,张戈,黄呈辉等. 1319 和 1338 nm 双波长 Nd:YAG 脉冲激光输出实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(1): 45~48
- 7 Chen Yuqin, Wang Jinghuan. Principles of Lasers [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1992. 306~307
陈钰清,王静环. *激光原理*[M]. 杭州:浙江大学出版社, 1992. 306~307
- 8 Walter Koechner. Solid-State Laser Engineering[M]. Sun Wen *et al.* transl. Beijing: Science Press, 1999. 93
W.克希耐尔. *固体激光工程*[M]. 孙文等译. 北京:科学出版社, 1999. 93