

电光调 Q 双脉冲输出 Nd:YAG 全固态激光器

李 峰 王君涛 殷苏勇 朱小磊

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800)

摘要 设计了激光二极管(LD)双端面抽运传导冷却复合 Nd:YAG 晶体电光调 Q 激光器, 实现脉冲间隔可调的双 Q 脉冲输出。用两个光纤耦合输出的 LD 模块作为抽运源, 偏硼酸钡(BBO)晶体作为 Q 开关, 在一个抽运周期内两次启动 Q 开关, 获得脉冲能量大于 14 mJ, 脉宽小于等于 18 ns, 脉冲间隔 200~230 μ s 可调的双 Q 脉冲输出, 激光器重复频率 50 Hz, 光-光转换效率达到 24%。探索了用磷酸二氧钾(KD*P)调 Q 晶体开关实现稳定双脉冲输出的可行性, 通过抑制压电环效应, 消除子脉冲现象, 最终获得脉冲能量约 11 mJ, 脉宽小于等于 18 ns。

关键词 激光技术; Nd:YAG 激光器; 双脉冲激光; 磷酸二氧钾调 Q; 偏硼酸钡调 Q

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0802005

Electro-Optical Q-Switched Double-Pulse Output Nd:YAG All Solid-State Laser

Li Feng Wang Juntao Yin Suyong Zhu Xiaolei

(Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract A laser diode (LD) dual-end pumped, conductively cooled, electro-optical Q-switched composite Nd:YAG laser is designed. Double-pulse laser output with adjustable pulse interval is achieved. By using two fiber-coupled LD modules as the pumping source, β -BaB₂O₄ (BBO) crystal as the Q-switch, double-pulse laser output is acquired by opening the Q-switch twice in a pumping cycle time, and the laser is capable of producing two Q-switched 1064 nm pulses with the single pulse energy more than 14 mJ, 18 ns, the interval between the two pulses is adjustable from 200 μ s to 230 μ s at the repetition of 50 Hz, the optical-to-optical efficiency reaches 24%. Furthermore, we explore the feasibility of stable double-pulse laser output by using the Q-switched crystal KD*P, and suppressing the piezoelectric ring effect of KD*P, the sub-pulse phenomenon is removed and double-pulse laser output with 11 mJ, 18 ns, is obtained.

Key words laser technique; Nd:YAG lasers; double-pulse laser; KD*P Q-switch; β -BaB₂O₄ Q-switch

OCIS codes 140.3470; 140.3540; 140.3580; 280.1910

1 引 言

双脉冲全固态激光器在大气环境监测、精细加工、动态全息成像等领域都有较大的应用需求^[1~3]。研究表明, 采用双激光脉冲打孔技术, 在有效提高精细加工效率的同时, 又能显著地改善激光打孔的质量^[2]。但这种双激光脉冲打孔技术要求将调 Q 双脉冲间隔控制在 200 ns 以内, 否则这种优势将很难体现, 这对激光器的双脉冲控制技术提出了很高的

要求^[4]。此外, 在动态全息检测领域, 为了实现对快速事件发展过程的连续观察, 则要求双脉冲激光输出激光器作为主动成像光源^[3]。这种成像技术通常要求的双脉冲激光间隔在 1~1000 μ s 之间, 通过把微秒量级间隔的两个脉冲照明拍摄出来的两个全息图叠置在同一张全息底板上, 可以将被测物体的任何瞬态扰动都显现在双激光脉冲全息图的干涉条纹上, 因而获得被测物体的动态信息。

收稿日期: 2012-03-29; 收到修改稿日期: 2012-04-26

作者简介: 李 峰(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事双脉冲激光器技术方面的研究。E-mail: lf5322@siom.ac.cn

导师简介: 朱小磊(1966—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事固体激光器技术及激光器应用系统等方面的研究。

E-mail: xlzhu@siom.ac.cn(通信联系人)

调 Q 双脉冲激光器的另外一个重要的应用是作为差分吸收大气探测激光雷达的光发射源或光抽运源。2003 年,美国 NASA 研制成功的 Ho:Tm:YLF 双脉冲激光振荡器^[5],利用最大抽运能量为 3 J 的半导体激光阵列脉冲抽运,采用一个抽运周期两次打开调 Q 开关技术实现中红外 2.053 μm 波长的双脉冲激光输出,直接用于大气探测。该激光振荡器输出两个能量相等调 Q 脉冲,每个脉冲能量达到 66 mJ。为了进一步提升单脉冲能量,又采用主振荡功率放大技术,最终获得 600 mJ 的调 Q 双脉冲激光输出。2005 年该课题组报道的 Ho:Tm:LuLF 晶体激光器^[6],已将调 Q 双脉冲激光器输出脉冲能量提升到 1 J 量级。2008 年,在德国研制的差分吸收雷达系统(CO₂-IPDA)中^[7],研制了类似的氙灯抽运 Nd:YAG 的双脉冲调 Q 激光器,该激光器在 10 Hz 重复频率下,经过放大器放大后获得最大脉冲能量 100 mJ 的 1064 nm 双脉冲输出,脉冲宽度 8 ns。

本文根据差分吸收大气探测激光雷达抽运源的应用需求,设计了电光调 Q 双脉冲全固态激光器,比较研究了偏硼酸钡(BBO)与磷酸二氘钾(KD*P)晶体开关调 Q 双脉冲实现的可行性和性能差异。采用 BBO 晶体开关实现双脉冲输出,可获得较高的脉冲能量及光-光转换效率。而 KD*P 晶体开关由于存在严重的压电环效应,极易出现子脉冲现象,对调 Q 双脉冲的稳定输出带来严重的负面影响。

2 理论分析和实验装置

图 1 是设计的激光二极管(LD)双端面抽运双脉冲输出 Nd:YAG 激光器原理光路图。为了方便种子激光注入锁定方面的应用,谐振腔设计采用平行平面腔结构,几何腔长约为 1100 mm,U 形排布利于结构紧凑稳定。

激光增益介质采用直径为 4 mm、双端键合的 YAG/Nd:YAG/YAG 复合结构晶体棒,晶体总长 30 mm,其中掺杂部分长度为 20 mm,Nd³⁺ 掺杂原子数分数为 0.5%。采用这种复合晶体结构能有效地减小端面效应及热焦距,在实验允许的最大抽运功率内,由热透镜的焦距公式^[8],得到晶体的热焦距大于 1600 mm。由铝箔包裹的 Nd:YAG 晶体紧密夹持在紫铜热沉上,并置于谐振腔中央位置。激光器后腔镜为一平面全反镜,输出耦合镜的初始透射率为 60%。根据实验需要,电光调 Q 开关分别采用 BBO 晶体开关,或 KD*P 晶体开关。抽运源采用两

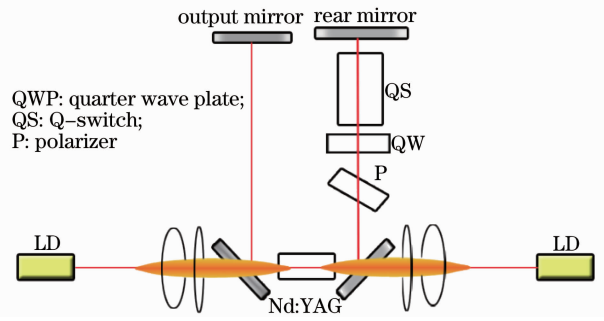


图 1 LD 双端面抽运 Nd:YAG 双脉冲激光器原理光路图

Fig. 1 Schematic of LD dual-end pumped double-pulsed Nd:YAG laser

个光纤耦合的 LD 模块,其最大输出功率为 150 W,中心波长 808 nm,光纤芯径 600 μm,数值孔径(NA)为 0.22。抽运光耦合系统的焦距比为 1:2.5 的双镜系统,耦合效率大于 95%,与振荡模体实现较好的重合。抽运 LD 模块的驱动重复频率为 50 Hz,驱动电流占空比约为 2.2%,且可调。

根据 Magni 理论^[9],激光谐振腔中的固体增益介质可以等效成一个焦距随抽运功率动态变化的热透镜。在实验设计的谐振腔结构中,增益介质处于谐振腔中央位置,此时,增益介质处振荡模光斑大小随热透镜焦距值的变化如图 2 所示,显然当热透镜焦距值小于 300 mm 时,谐振腔将进入非稳区,热透镜焦距值大于 300 mm 时,振荡模光斑直径的变化非常平缓,有利于输出能量稳定。实验过程中,在抽运脉宽 420 μs 的条件下,增益介质热焦距远大于 300 mm,确保激光器远离非稳定工作区域。

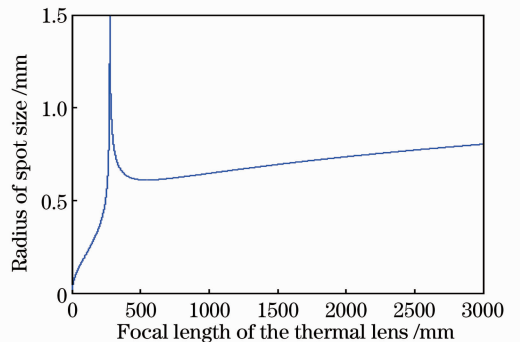


图 2 增益介质处振荡模光斑半径随热焦距变化规律

Fig. 2 Radius variation of oscillation modes' spot size versus focal length

激光器获得双脉冲输出的机制是合理控制抽运 LD 的驱动电脉冲宽度与调 Q 开关触发信号时序关系,即在一个抽运周期内,按特定的时序关系,两次开启电光开关,因而获得两个调 Q 激光脉冲输出。

在相对抽运 LD 驱动电脉冲延时一段时间后, Q 开关第一次启动, 消耗了增益介质内的反转粒子数, 输出 Q 脉冲。由于 Q 开关的快速关闭, 尽管 LD 持续抽运, 激光器低 Q 值状态腔内完全抑制子脉冲的出现, 增益介质反转粒子数重新积累, 当达到与第一次 Q 开关启动的反转值相当时, 第二次启动 Q 开关并获得调 Q 激光脉冲, 电驱动同时结束。调 Q 双脉冲各自的能量大小及相互之间时间间隔可以通过改变 LD 驱动电脉冲宽度及时序关系来主动控制, 获得需要的结果。

3 实验结果及分析

在电光晶体开关中, BBO 晶体只有微弱的压电环效应, 其工作重复频率可以达到几十千赫兹。实验过程中, 为了获得稳定的 $200 \mu\text{s}$ 间隔双调 Q 脉冲, 首先采用 BBO 晶体开关, 在 LD 抽运一个周期内, 并在接近 $200 \mu\text{s}$ 的时间间隔内, 使晶体开关两次承受加压-退压过程, 以实现双调 Q 脉冲的产生。

当抽运 LD 的电脉冲宽度为 $420 \mu\text{s}$, BBO 晶体调 Q 高压触发延时分别为 $220 \mu\text{s}$ 和 $420 \mu\text{s}$ 时, 对

应 60% 的输出耦合率, 实验获得了如图 3 所示的双 Q 脉冲序列示波照片, 图 3(a) 显示双 Q 脉冲序列。可以看出, 前后两个 Q 脉冲的峰值基本相同, 间隔为 $200 \mu\text{s}$, 调 Q 双脉冲时间间隔严格受触发信号间隔控制。改变两个高压触发信号的延时差, 就能获得不同时间间隔的调 Q 双脉冲输出。而调 Q 双脉冲输出能量的大小及相对比值则直接受抽运能量大小的影响, 在初始的小抽运输入条件下, 第一个脉冲的能量大于第二个脉冲, 随着抽运功率的增大, 第二个脉冲能量增大幅度大于第一个脉冲, 直到两个脉冲输出能量基本接近。在输入 116 mJ 抽运光的条件下, 获得最大脉冲能量输出大于 14 mJ 。图 3(b) 为 50 Hz 重复频率下输出的调 Q 双脉冲序列示波照片, 此时, 相对于 20 ms 周期, $200 \mu\text{s}$ 间隔已无法在示波照片上分辨, 调 Q 双脉冲严重重叠, 在示波照片上仅显现 50 Hz 脉冲序列。图 4 为实验测得双调 Q 激光器的输入-输出曲线, 显示了在特定驱动电流脉冲宽度的条件下, 双脉冲能量的变化趋势, 在抽运输入能量 $105 \sim 120 \text{ mJ}$ 范围内, 双脉冲能量基本保持相同。

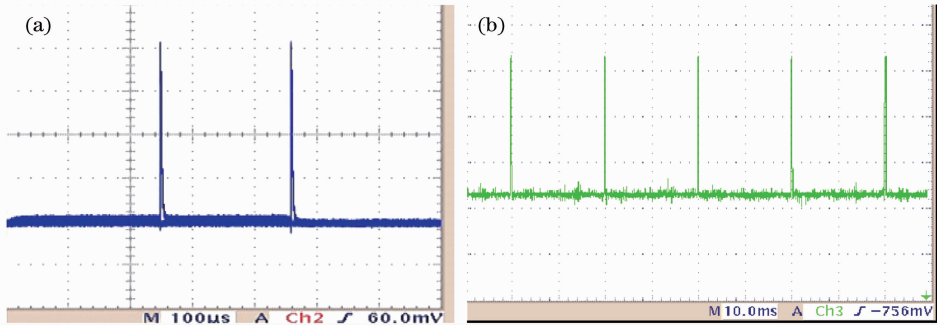


图 3 BBO 开关调 Q 双脉冲输出示波照片。(a) 调 Q 双脉冲; (b) 50 Hz 调 Q 双脉冲序列

Fig. 3 Temporal profile of BBO Q-switched laser. (a) Q-switched dual pulses; (b) 50 Hz Q-switched dual-pulse train

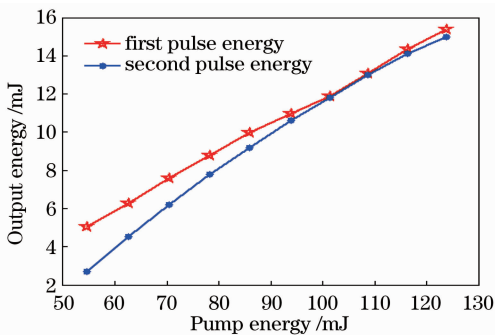


图 4 双脉冲激光器的输入-输出曲线

Fig. 4 Double pulse laser input-output curves at different pump energy

当抽运光脉冲的输入能量为 108 mJ 时, 实验对双 Q 脉冲的脉冲宽度值进行分别测量, 结果如图 5

所示。第一个调 Q 脉冲示波器显示的脉冲宽度约为 18 ns , 第二个调 Q 脉冲的脉冲宽度值约为 17.5 ns , 基本实现了两个脉冲宽度的一致。

图 6 给出该激光器输出平均功率随抽运输入平均功率的变化曲线。对于 $T=60\%$ 的输出耦合率, 当抽运电流脉冲宽度为 $420 \mu\text{s}$ 时, 该双 Q 脉冲输出激光器的斜率效率达到 31% 。在最大输出条件下, 光-光转换效率接近 24% , 此时, 用 Spiricon M^2-200 激光光束质量分析仪对激光光束质量 M^2 值进行测量, 测量结果如图 7 所示, 光束在 x 轴、 y 轴向的 M^2 值分别为 $M_x^2=1.36, M_y^2=1.35$ 。

实验中, 用 $\text{KD}^* \text{P}$ 调 Q 晶体开关替代 BBO 晶体开关研究双脉冲输出特性, 由于 $\text{KD}^* \text{P}$ 晶体本身

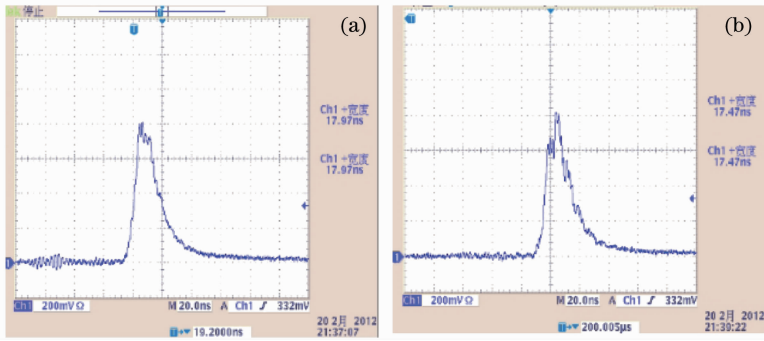


图 5 双脉冲的瞬时脉冲波形。(a)第一个脉冲;(b)第二个脉冲

Fig. 5 Temporal pulse profile of the double-pulse laser. (a) First pulse; (b) second pulse

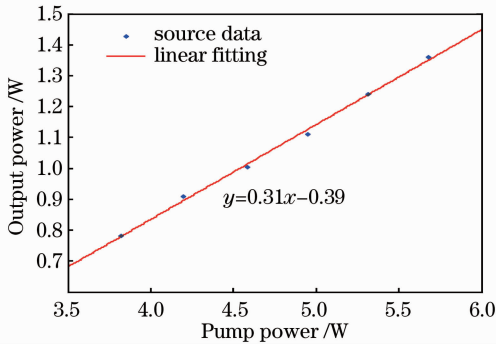


图 6 激光输出功率随抽运功率变化

Fig. 6 Q-switched laser output power as a function of pump power

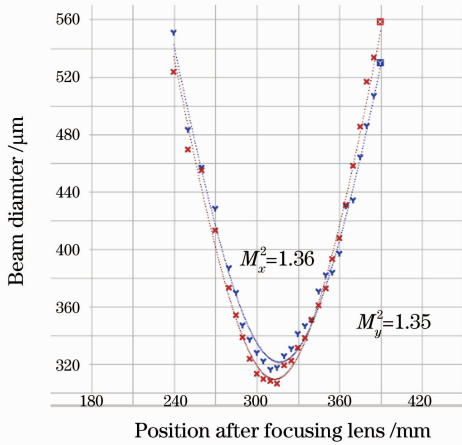


图 7 光束质量 M^2 测量图

Fig. 7 Measurement of laser beam quality M^2

存在严重的压电环效应^[10,11],原则上不适合200 μs 间隔双脉冲输出应用。当抽运能量提高到一定水平时,出现子脉冲输出现象,如图 8 所示。即在第二次 Q 开关打开信号达到之前,已有随机的调 Q 子脉冲输出。产生这种现象的原因是实验中当第一个 Q 高压完全退压后,由于压电环效应存在,KD*P 晶体双折射存在弛豫消退的过程,对于 420 μs 抽运脉宽系统,在第一个脉冲输出后的 200 μs 时间内,KD*P

晶体开关处于非完全关闭状态,随着抽运的持续,激光器能在第二次高压信号前多次达到阈值,因而输出调 Q 子脉冲。

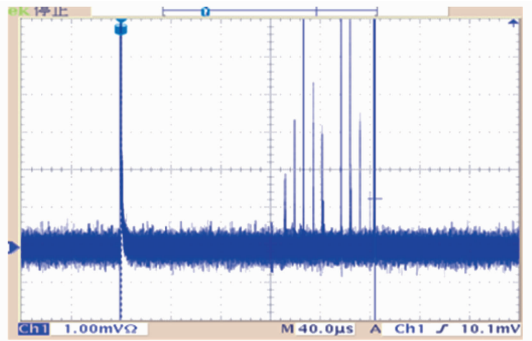


图 8 KD*P 调 Q 输出的子脉冲包络

Fig. 8 Pulse train of KD*P Q-switched laser

针对调 Q 子脉冲形成的机制,实验中通过提高激光器振荡阈值,优化第一个调 Q 信号延时时间,并降低抽运输入能量来抑制 200 μs 周期内子脉冲的出现,最终在实验上获得了类似图 3 的无子脉冲的双调 Q 脉冲序列稳定输出,最大双脉冲输出能量达到 11 mJ,调 Q 脉冲宽度小于 18 ns,激光器光光转换效率达到 21.8%。

4 结 论

在双端面抽运的传导冷却 Nd:YAG 电光调 Q 激光器中,插入 BBO 晶体开关或 KD*P 晶体开关,在 50 Hz 重复频率条件下,采用在一个抽运周期内两次启动晶体开关高压技术,成功实现了脉冲间隔在 200 μs 附近可调的调 Q 双脉冲输出,前后两个脉冲的能量和脉冲宽度能够保持基本一致。实验结果显示,BBO 晶体开关比 KD*P 晶体开关更适合在双 Q 脉冲输出机制激光器的应用。针对 KD*P 晶体开关采取的抑制压电环效应引起的子脉冲技术,在相关激光器的研制中具有参考价值。

参 考 文 献

- 1 G. J. Koch, B. W. Barnes, M. Petros *et al.*. Coherent differential absorption lidar measurements of CO₂ [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(26): 5092~5099
- 2 K. Walther, M. Brajdic, E. W. Kreutz. Enhanced processing speed in laser drilling of stainless steel by spatially and temporally superposed pulsed Nd:YAG laser radiation[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, **35**(9-10): 895~899
- 3 Li Feng, Ni Xuxiang, Wu Bizhen *et al.*. New method to realize double-pulse laser at high repetition[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1998, **27**(4): 342~347
李 峰, 倪旭翔, 吴碧珍等. 实现高重复率双脉冲激光器的新方法[J]. *光子学报*, 1998, **27**(4): 342~347
- 4 Wang Xuejun, Meng Fanyu, Li Meng *et al.*. Nanosecond dual pulse laser controlling method [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0203004
王学军, 孟繁禹, 李 猛等. 纳秒双脉冲激光的控制方法[J]. *中国激光*, 2011, **38**(2): 0203004
- 5 Jirong Yu. 600-mJ, double-pulse 2- μ m laser [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(7): 540~542
- 6 Songsheng Chen, Jirong Yu, Mulugeta Petros *et al.*. One-joule double-pulsed Ho : Tm : LuLF master-oscillator-power-amplifier (MOPA)[C]. OSA/ASSP, 2005. MD6
- 7 A. Amediek, A. Fix, M. Wirth *et al.*. Development of an OPO system at 1.57 μ m for integrated path DIAL measurement of atmospheric carbon dioxide[J]. *Appl. Phys. B*, 2008, **92**(2): 295~302
- 8 Yang Yongming, Wen Jianguo, Wang Shiyu *et al.*. Focal length of the thermal lens in LD end-pumped Nd:YAG laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12): 1769~1772
杨永明, 文建国, 王石语等. LD端面泵浦 Nd:YAG 激光器中的热透镜焦距[J]. *光子学报*, 2005, **34**(12): 1769~1772
- 9 V. Magni. Resonators for solid-state lasers with large-volume fundamental mode and high alignment stability[J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(1): 107~117
- 10 Tang Hao. Study on All-Solid State Green Laser with High Repetition Rate of Electro-Optic Q-Switcher [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2009
唐 昊. 全固态高重复率电光调 Q 绿光激光器特性研究[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2009
- 11 M. Roth, M. Tseitlin, N. Angert. Oxide crystals for electro-optic Q-switching of lasers [J]. *Glass Physics and Chemistry*, 2005, **31**(1): 85~86

栏目编辑: 宋梅梅