

利用高速 GaAs 光电导开关实现腔倒空激光脉冲输出

朱少岚^{1,2} 赵 卫¹ 刘百玉¹ 施 卫³ 杨延龙^{1,2}

¹中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119
²中国科学院研究生院, 北京 100049
³西安理工大学应用物理系, 陕西 西安 710048

摘要 腔倒空技术是一种有效产生大能量、短脉冲激光输出的调 Q 技术,其产生的 Q 开关激光脉冲的宽度主要由谐振腔腔长决定。大孔径半绝缘 GaAs 光电导开关(PCSS)是一种可耐高压的光控开关,具有响应速度快、时间抖动小、耐压高、暗电阻大、导通电阻小等特点,将其直接作为控制腔倒空激光器的光反馈回路和高电压开关,在腔长为 20 cm 的氙灯抽运 Nd:YAG 电光调 Q 激光器上实现了激光波长 1064 nm、单脉冲能量 15 mJ、脉冲半峰全宽(FWHM)为 1.7 ns 的腔倒空激光脉冲稳定输出,脉冲宽度峰峰值抖动优于 7%,能量峰峰值抖动优于 3%。

关键词 激光技术;电光调 Q;腔倒空;稳定腔;GaAs 光电导开关;Nd:YAG 激光器

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0502003

Cavity Dumped Laser Using Fast GaAs Photoconductive Switch

Zhu Shaolan^{1,2} Zhao Wei¹ Liu Baiyu¹ Shi Wei³ Yang Yanlong^{1,2}

¹State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China
²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
³Department of Applied Physics, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China

Abstract Cavity dumping is an effective technique for generating Q-switched laser pulses of relatively large energy and extremely short time duration, and the width of Q-switched pulses is primarily a function of the oscillator cavity length. The solid state lateral semi-insulating GaAs photoconductive semiconductor switch (PCSS) has the unique ability to handle high power at very fast response time with very little timing jitter. A novel and effective technique of cavity dumping laser for generating short Q-switched laser pulses with a GaAs PCSS is presented. In a flashlamp pumped Nd:YAG laser with 20 cm long stable resonator, 1.7 ns short laser pulses have been obtained, and the pulse to pulse duration instability is less than 7% and energy instability is less than 3%.

Key words lasers technique; electro-optical Q-switched; cavity dumping; stable resonator; GaAs photoconductive switch; Nd:YAG laser

OCIS codes 140.3540; 140.3538; 140.3460; 140.3530; 140.3580

1 引 言

大能量、窄脉宽的激光脉冲在工业加工、激光测距和科学研究等方面均具有广泛的应用。一般的激光调 Q 技术很难同时满足这两者的要求,如灯泵或半导体激光抽运的电光调 Q 或声光调 Q 激光器,虽然可以产生大能量的激光脉冲,但其脉冲宽度一般

均在 5 ns 以上^[1~4]。半导体激光抽运的微片激光器虽然可产生几纳秒^[5~7],甚至几十皮秒的激光脉冲,但其单脉冲能量一般在微焦耳量级^[6]。

腔倒空技术是一种有效产生大能量、短脉冲激光输出的调 Q 技术。与一般的调 Q 激光技术相比,其优点在于产生的 Q 开关激光脉冲的脉宽主要是

收稿日期: 2010-12-02; 收到修改稿日期: 2011-01-21

基金项目: 国家自然科学基金(60878060)资助课题。

作者简介: 朱少岚(1978—),男,博士研究生,主要从事全固态脉冲激光技术及应用等方面的研究。

E-mail: slzhu@opt.ac.cn

导师简介: 赵 卫(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事超快光学技术方面的研究。E-mail: weiz@opt.ac.cn

谐振腔腔长的函数,而不是激光介质增益特性的函数^[8]。从理论上来说,只要 Q 开关的开关速度足够快,那么腔倒空输出的调 Q 激光脉冲宽度就等于激光在腔内的往返渡越时间。一般的腔倒空控制电路通常采用闸流管、火花隙、晶闸管等快速高压开关或雪崩晶体管电路来实现^[8~11]。这些高压开关器件和电路往往需与光电探测器结合使用,用光电探测器监测腔内光强变化,作为光反馈回路,为高压开关器件或电路提供触发信号。这样的腔倒空控制电路通常都存在着时间延时长、开关速度慢,且时间抖动较大等问题,从而导致很难在简单的腔型结构中产生脉冲宽度小于 3 ns 的稳定腔倒空激光脉冲输出,而往往需采用复杂的腔型结构来克服这些问题^[12]。

大孔径半绝缘 GaAs 光电导开关(PCSS)是一种可承受上万伏偏置电压、具有皮秒量级响应速度、受照射光强控制的光控开关^[13,14]。当无光照时,光电导开关处于截止状态,内阻非常大,可达百兆欧姆以上;当照射光强足够大时,光电导开关处于完全导通状态,内阻只有几十欧姆左右,此时的光强称为饱和光强,若负载的阻抗足够大,可认为此时负载上的电压基本等于光电导开关上的偏置电压;当照射光强小于饱和光强时,光电导开关的内阻随着光强的增大而呈线性减少,负载上的电压随光强增加而增加^[13]。因此,可用光电导开关直接替换腔倒空控制电路中的光反馈和开关电路,用能量较大的调 Q 激光脉冲前沿将光电导开关快速饱和,控制 Q 开关输出窄脉冲激光,不但简化了整个调 Q 控制电路,缩短输出激光脉冲的宽度,而且使得输出的激光脉冲非常稳定。

2 实验装置

基于大孔径半绝缘 GaAs 光电导开关的腔倒空激光器原理图如图 1 所示。激光器采用水冷的氙灯抽运工作方式,脉冲重复频率最高为 30 Hz。激光器的谐振腔为稳定腔,腔长为 20 cm,由曲率半径为 3 m 的凹面全反镜 M1 和反射率为 95% 的平面部分反射镜 M2 组成。从反射镜 M2 输出 5% 的振荡光主要用于触发 GaAs 光电导开关,以控制普克尔盒电光 Q 开关实现腔倒空激光输出。为了缩短腔长以获得更短的激光脉冲输出,采用长度为 50 mm、直径为 4 mm 的 Nd:YAG 晶体为增益介质。谐振腔内的调 Q 光学元件由布儒斯特角放置的偏振片和 KD*P 普克尔盒电光 Q 开关组成。调 Q 控制电路由高压电源、快速高压开关电路、电极间隙 3 mm 的

大孔径 GaAs 光电导开关、电阻 R 以及阻抗 50 Ω 的同轴电缆等组成。

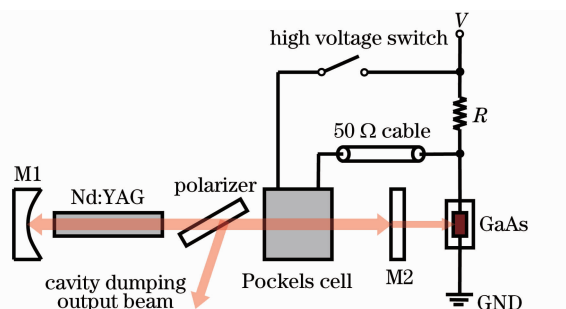


图 1 腔倒空激光器原理示意图

Fig. 1 Schematic of the cavity dumping laser

激光器的工作过程如下:开始时,GaAs 光电导开关因无光照而处于截止状态,其电阻处于高阻抗状态;同时,高压开关电路也处于断开状态。因此,当将高压电源的输出电压调节到 KD*P 普克尔盒的 1/4 波长电压时,KD*P 普克尔盒两电极之间的电压差为 1/4 波长电压,相当于普克尔盒关闭。此时,谐振腔处于低 Q 值、高损耗状态,氙灯开始抽运,激光增益介质上能级开始积累反转粒子数。当上能级反转粒子数达到最大值时,高压开关电路闭合,高压电源的 1/4 波长电压同时也加到了 KD*P 普克尔盒的另一端电极,此时,普克尔盒两电极之间的电压差为零,相当于普克尔盒打开,谐振腔处于高 Q 值,低损耗状态,激光开始在谐振腔内快速建立振荡。若将 GaAs 光电导开关光屏蔽起来,则激光器从反射镜 M2 输出调 Q 激光脉冲;若激光在腔内形成振荡的同时,从反射镜 M2 输出的激光也照射到 GaAs 光电导开关上,则 GaAs 光电导开关的阻值开始变小,当输出激光的功率达到一定程度时,GaAs 光电导开关的阻值达到最小,处于光饱和状态,此时可认为 GaAs 光电导开关处于完全导通状态。由于 GaAs 光电导开关在完全导通时的电阻非常小,与电阻 R 的阻值相比可以忽略,可认为普克尔盒这端的电极通过一定长度的 50 Ω 同轴电缆产生恰当的时间延时后直接接地,电位为零。在这种情况下,普克尔盒两端电极的电压差再次变为 1/4 波长电压,相当于普克尔盒关闭。此时,透过偏振片的偏振激光两次通过普克尔盒后,其偏振方向旋转了 90°,与偏振片的偏振方向垂直,因此,腔内的激光能量在谐振腔内振荡一个来回后,从偏振片侧面反射输出,该输出激光脉冲即为腔倒空输出的激光脉冲。若 GaAs 光电导开关的导通速度小于激光在谐振腔内的来回渡越时间,则输出的激光脉冲宽度等于激光

在腔内的往返渡越时间,为 $\tau=1.33$ ns。

在实验中,可通过调节 $50\ \Omega$ 同轴电缆的长度或光电导开关与腔镜 M2 之间的距离,令产生的电延迟时间或光延迟时间等于光电导开关完全导通的时刻和腔内激光功率密度达到最大值的时刻之间的时间差,使得普克尔盒刚好在谐振腔内的激光功率密度达到最大值的时刻关闭,将腔内的能量完全“倒出”腔外,以获得最大能量的腔倒空激光脉冲输出。

3 实验结果与讨论

实验中,所有的激光脉冲波形均采用 LeCroy 公司 $6\ \text{GHz}$ 带宽、 $20\ \text{GHz}$ 采样率的 WaveMaster 8600A 实时数字示波器和 THORLABS 公司的上升时间为 $1\ \text{ns}$ 的 DET210 光电探测器进行测量;激光脉冲能量采用 Gentec-EO 公司的双模式能量/功率计及 ED-200L+ 能量探头进行测量。激光器采用氙灯脉冲抽运工作方式,氙灯电源的充放电电容值为 $15\ \mu\text{F}$,最高偏置电压为 $800\ \text{V}$,通过调节偏置电压的大小,可改变氙灯的抽运能量。

在腔倒空的工作过程中,GaAs 光电导开关的动作是由调 Q 激光脉冲的前沿控制的,其开关速度取决于调 Q 激光脉冲的上升时间和能量,因此,调 Q 激光脉冲的特性,特别是脉冲前沿对腔倒空输出的激光脉冲起着决定性的作用。为了获得调 Q 激光脉冲输出,将 GaAs 光电导开关遮挡,则从反射镜 M2 直接输出的激光脉冲即为调 Q 输出的激光脉冲。激光器输出的调 Q 激光脉冲的脉宽及上升时间随激光电源抽运电压的变化情况如图 2 所示,图中所有数据均为 50 个脉冲的统计平均值。可看出,输出激光的脉冲宽度和脉冲上升时间随着抽运电压(抽运能量)的增加而缩短,且脉冲上升时间减小的变化要小于脉冲宽度的变化。但同时在测量中发现,当抽运电压大于 $650\ \text{V}$ 后,随抽运电压的增加,脉冲上升时间基本保持不变,而且输出的激光脉冲稳定性将随着抽运电压的增加而变差。如在抽运电压为 $500\sim 600\ \text{V}$ 时,输出激光脉冲的能量峰峰值抖动约为 7% ,脉冲宽度峰峰值抖动为 11% ;当抽运电压增加到 $700\ \text{V}$ 时,输出激光脉冲的能量峰峰值抖动变为 15% ,脉冲宽度峰峰值抖动变为 36% 。导致出现这种现象的原因主要有两方面:1)偏振片和普克尔盒组成的 Q 开关的消光比有限,当抽运电压大于 $650\ \text{V}$ 后,在 Q 开关还没打开之前,激光增益已大于腔内损耗,在腔内形成弱的激光振荡,消耗上能级的反转粒子数,导致腔内净增益系数不能继续增

大;2)为了尽量缩短谐振腔腔长以获得窄脉冲输出,腔内无任何控制横模模式的措施,激光振荡为多横模运转,当抽运电压大于 $650\ \text{V}$ 后,激光模式竞争加剧。在实验中也观察到随着抽运电压的增加,输出光斑模式逐渐变差。因此,为了获取稳定的腔倒空激光脉冲输出,将抽运电压的输出范围设定在 $450\sim 600\ \text{V}$ 。

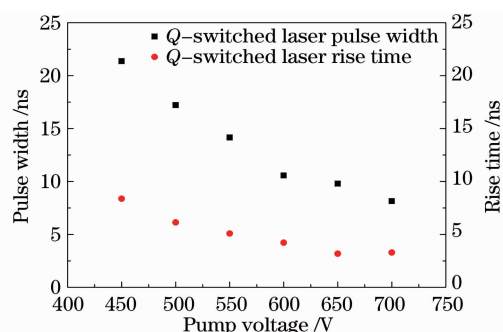


图 2 调 Q 激光脉冲宽度及上升时间随抽运电压的变化
Fig. 2 Pulse width and rise time of the Q-switched laser versus the pump voltage

在腔倒空的工作过程中,让从反射镜 M2 输出的调 Q 激光脉冲直接照射到 GaAs 光电导开关,则腔倒空激光脉冲从偏振片的侧面输出。可以通过调节光电导开关与反射镜 M2 之间的距离,或者调节同轴电缆长度来控制光电导开关的导通时间,以优化腔倒空输出的激光脉冲。经调节后,腔倒空输出的激光脉冲的脉冲宽度和上升时间随抽运电压增加的变化如图 3 所示,图中所有数据均为 50 个脉冲的统计平均值。虽然 GaAs 光电导开关的导通速度是由调 Q 激光脉冲的前沿来控制的,但从图 3 可看出,随着抽运电压的增加和调 Q 激光脉冲上升时间的缩短,腔倒空激光脉冲的脉冲上升时间也在缩短,且腔倒空激光脉冲的上升时间要远小于调 Q 激光脉冲的脉宽。例如,在 $600\ \text{V}$ 的抽运电压下,调 Q 激光脉冲的上升时间为 $4.2\ \text{ns}$,而腔倒空激光脉冲的上升时间仅为 $1.1\ \text{ns}$ 。其主要原因是当触发的光脉冲能量超过一定值后,工作在线性工作区的 GaAs 光电导开关将产生光饱和,其内阻将不再发生变化^[13]。利用光电导开关的这一特性,当触发的激光脉冲能量远大于光电导开关的饱和光能量时,光电导开关将在激光脉冲的前沿,且激光能量等于饱和光能量处产生饱和,相当于此时的光电导开关已完全打开,而无需等到激光脉冲的功率达到峰值时开关才完全打开。但是过大的触发激光脉冲能量容易使光电导开关工作非线性区^[14],导致开关的不可控,同时容易损坏光电导开关。

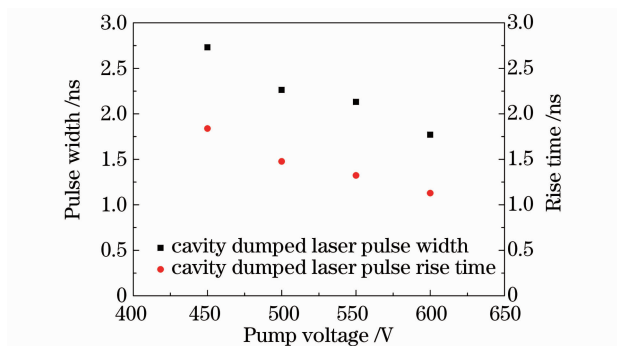


图 3 腔倒空激光脉冲宽度及上升时间随抽运电压的变化

Fig. 3 Pulse width and rise time of the cavity dumped laser versus the pump voltage

当抽运电压为 600 V 时,直接调 Q 输出的激光脉冲宽度为 10.6 ns,脉冲宽度峰峰值抖动为 11%,单脉冲能量为 19.7 mJ,单脉冲能量峰峰值抖动为 7%。在此条件下,获得了脉宽为 1.7 ns 稳定腔倒空激光脉冲输出,如图 4 所示。连续 100 个腔倒空激光脉冲叠加的波形如图 5 所示,可以看出,输出的腔倒空激光脉冲非常稳定,100 个激光脉冲的平均脉宽为 1.75 ns,脉宽峰峰值抖动为 6.8%;在同样条件下,用能量计连续测量 100 个激光脉冲进行统计,其单脉冲能量平均值为 15.3 mJ,能量峰峰值抖动为 2.6%。

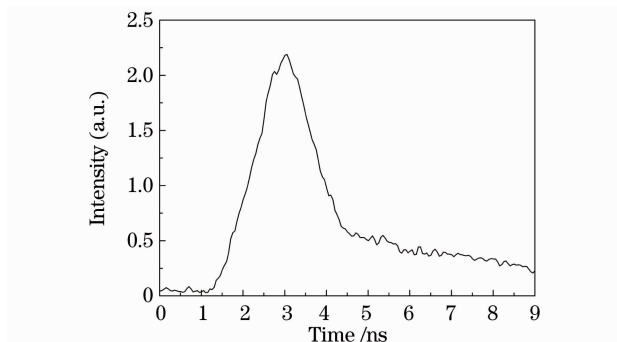


图 4 1.7 ns 腔倒空激光脉冲

Fig. 4 Cavity dumped laser pulse with 1.7 ns pulse width

4 结 论

利用大孔径半绝缘 GaAs 光电导开关的高速响应、耐高压、暗电阻大、导通电阻小等特性,代替腔倒空控制电路中的光反馈电路和高压电开关,同时实现快速光反馈和高压控制两种功能,具有响应速度快、延迟时间短、时间抖动小等优点。最终在腔长为 20 cm 的 Nd:YAG 调 Q 激光器上获得了脉冲宽度为 1.7 ns、单脉冲能量约为 15 mJ 的 1064 nm 激光

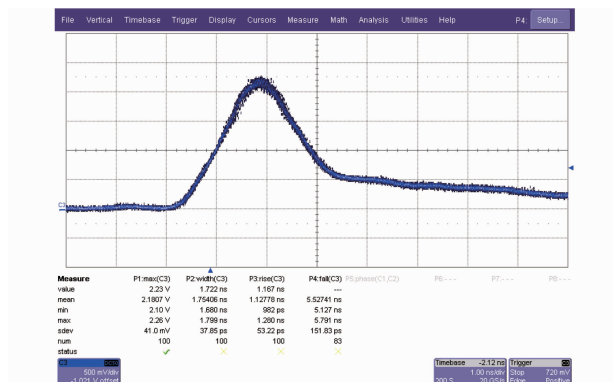


图 5 连续 100 个腔倒空脉冲的叠加波形

Fig. 5 Continual 100 cavity dumped laser pulses

脉冲输出,脉冲宽度接近激光在谐振腔内的往返渡越时间,其脉冲宽度峰峰值抖动优于 7%,能量峰峰值抖动优于 3%。

参 考 文 献

- Zhu Xiaolei, Tang Hao, Li Xiaoli *et al.*. Recent progresses of LD pumped solid state lasers with high repetition rate electro-optic Q-switch[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1654~1659
- 朱小磊, 唐 昊, 李小莉 等. 高重复频率电光调 Q 全固态激光器研究进展[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1654~1659
- Yi Hengyu, Ye Yidong, Zhou Zhiqiang *et al.*. High beam-quality Q-switched repetitive mini laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2318~2322
- 易亨瑜, 叶一东, 周志强 等. 小型高光束质量电光调 Q 重复频率激光器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2318~2322
- Yan Ying, Zhang Hengli, Li Jing *et al.*. LD pumped acoustic-optic Q-switched Nd:YVO₄ slab laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1162~1165
- 闫 莹, 张恒利, 李 静 等. 激光二极管抽运声光调 Q Nd:YVO₄ 板条激光器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1162~1165
- Tang Hao, Zhu Xiaolei, Meng Junqing *et al.*. High repetition rate short pulse width LGS electro-optic Q-switched Nd:YVO₄ laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 137~141
- 唐 昊, 朱小磊, 孟俊清 等. 高重复频率窄脉宽 LGS 电光调 Q Nd:YVO₄ 激光器[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 137~141
- John J. Zayhowski. Microchip lasers[J]. *Optical Materials*, 1999, **11**(2-3): 255~267
- B. Braun, F. X. Kärtner, G. Zhang *et al.*. 56-ps passively Q-switched diode-pumped microchip laser[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(6): 381~383
- Dong Jun, Ma Jian. Advances in passively Q-switched Yb³⁺-doped laser materials microchip solid-state lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2278~2288
- 董 俊, 马 剑. 被动调 Q 掺 Yb³⁺ 激光材料固体微片激光器的研究进展[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2278~2288
- Arthur A. Vuylsteke. Theory of laser regeneration switching[J]. *J. Appl. Phys.*, 1963, **34**(6): 1615~1622
- W. R. Hook, R. P. Hilberg, R. H. Dishington. A TVR laser oscillator using a single Pockels cell for Q-switching and synchronized cavity dumping[J]. *Proc. IEEE*, 1966, **54**(12): 1954~1955
- S. Dong, W. Krause, F. Völker *et al.*. Fast λ/4 and λ/2 voltage Pockels cell driver for an internally seeded and cavity dumped regenerative laser amplifier[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1986, **57**(4): 539~543
- Dong Xiaogang, Li Liangyu, Yan Sixian. Producing mono-pulse

- laser of nanosecond burst-length by cutting-apart from Q-beam self-triggered[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4): 465~469
- 董小刚, 李良钰, 晏思贤. 调 Q 激光自触发斩波产生纳秒脉宽单脉冲激光[J]. *中国激光*, 2007, **34**(4): 465~469
- 12 D. Milam, R. A. Bradbury, A. Hordvik *et al.*. Production of intense subnanosecond pulses by cavity dumping[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1974, **QE-10**(1): 20~25
- 13 Ruan Chi, Zhao Wei, Chen Guofu *et al.*. The characteristics of GaAs and InP photoconductive semiconductor switch[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(3): 405~411
- 阮 驰, 赵 卫, 陈国夫 等. GaAs 与 InP 半导体光导开关特性实验研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(3): 405~411
- 14 W. Shi, X. B. Zhang, Q. Li *et al.*. High gain lateral semi-insulating GaAs photoconductive switch triggered by 1064 nm laser pulses[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2002, **19**(3): 351~354