

文章编号: 0253-2239(2005)03-356-3

电光腔倒空激光二极管抽运 Nd:YAG 锁模激光器*

张丙元^{1,2} 李 港¹ 陈 檬¹ 于海娟¹ 夏军海¹ 郭晓萍¹ 任 锋¹ 王勇刚³ 马晓宇³

1 北京工业大学激光工程研究院, 北京 100022
2 聊城大学物理科学与信息工程学院, 聊城 252059
3 中国科学院半导体研究所, 北京 100081

摘要: 设计了一个简单的直腔, 将电光腔倒空与激光二极管端面抽运 Nd:YAG 半导体可饱和吸收镜锁模激光器结合, 实现了锁模脉冲的产生、放大和输出。在连续抽运功率5 W的条件下, 获得了脉冲宽度为11 ps的锁模单脉冲输出和脉冲宽度为200 ns的调Q脉冲输出, 腔倒空单脉冲能量为30 nJ, 重复频率为10 Hz。连续锁模运转时单个锁模脉冲的能量约为2 nJ, 利用腔倒空将单脉冲的能量提高了15倍左右。文章详细讨论了腔倒空脉冲及调Q脉冲的产生机理, 并分析了加在电光晶体上的高压电脉冲以及偏振片的偏振度对腔倒空脉冲及调Q脉冲的影响。

关键词: 激光器; 锁模激光器; 激光二极管抽运; 半导体可饱和吸收镜; 电光腔倒空

中图分类号: TN248.3⁺6 文献标识码: A

Electro Optically Cavity-Dumped Laser-Diode Pumped Mode-Locked Nd:YAG Laser with a Semiconductor Saturable Absorber Mirror

Zhang Bingyuan^{1,2} Li Gang¹ Chen Meng¹ Yu Haijuan¹ Xia Junhai¹
Guo Xiaoping¹ Ren Feng¹ Wang Yonggang³ Ma Xiaoyu³

1 College of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022
2 College of Physics Science and Information Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252059
3 Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100081

Abstract: An electro optically cavity-dumped laser diode-pumped mode-locked Nd:YAG laser with a semiconductor saturable absorber mirror is reported. In the experiment the authors employed a simple straight cavity to study the cavity dumping of the mode-locked laser. The generation, amplification and dumping of the short pulses were completed in this simple setup. With 5 W pump power the authors obtained the 11 ps single mode-locked pulse output and 200 ns Q-switched pulse output, and the single pulse energy is 30 nJ and the repetition rate is 10 Hz. The single pulse energy of cavity dumped pulse is about 15 times that of the continuous mode-locked pulse. The effect of the high voltage on the electro optical crystal and the polarization of polariser on the mode-locked pulse and the Q-switched pulse are discussed.

Key words: lasers; mode-locked laser; laser diode pumped; semiconductor saturable absorber mirror; electro-optical cavity dumping

1 引 言

高能量的超短激光脉冲, 在激光加工、雷达、激光测距、激光通信、激光核聚变等方面具有广泛的应用^[1~5]。通常情况下锁模激光振荡器直接输出的锁模脉冲能量较低, 不足以满足上述需要。要获得高能量的锁模脉冲, 需要对锁模脉冲进行再生放大, 这

种技术已经很成熟, 然而由于再生放大系统体积庞大、结构复杂、造价高等缺点, 使得它的应用受到限制。因此人们开始研究一种结构简单, 体积小, 造价低的系统。在这种系统里只有一个半导体激光器谐振腔, 实现锁模脉冲的产生、放大和输出三个过程。对此已有研究结果报道, 采用的方法也各不相同

* 北京市自然科学基金(3021001)资助课题。

作者简介: 张丙元(1974~), 男, 山东省冠县人, 讲师, 主要从事固体激光器及超短冲激光技术的研究工作。

E-mail: byzhang2008@163.com。

收稿日期: 2004-05-18; 收到修改稿日期: 2004-09-09

同^[1~4,6,7]。据我们所知,关于电光腔倒空激光二极管抽运半导体可饱和吸收镜锁模激光器的研究还未见报道。我们在以前工作的基础上^[5,8],对此进行了一系列的研究。

本文对电光腔倒空激光二极管抽运半导体可饱和吸收镜锁模激光器进行了实验研究,实现了脉冲宽度为 11 ps 的电光腔倒空脉冲输出和脉冲宽度为 200 ns 的调 Q 脉冲输出。

2 实验装置及原理

电光腔倒空激光二极管抽运 Nd:YAG 半导体可饱和吸收镜锁模激光器的结构如图 1 所示。抽运源激光二极管连续输出平均功率为 5 W,通过芯径 400 μm 光纤束耦合输出,中心波长为 808 nm, L_1 、 L_2 为准直聚焦透镜,两面镀 808 nm 的增透膜。激光晶体 Nd:YAG 的尺寸是 $\phi 3 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$,晶体的前端面镀 808 nm 增透、1064 nm 全反膜。晶体的后端面镀 1064 nm 的增透膜。晶体用铜皮包裹,置于铜块上,通水冷却。 L_3 和 L_4 为两面镀 1064 nm 的增透膜的凸透镜, L_3 是为减小腔内热透镜效应而设计的热补偿透镜。 L_4 为一聚焦透镜。通过改变 L_4 的焦距以及调节 L_4 与半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 之间的距离,可以改变入射到半导体可饱和吸收镜上的光功率密度。半导体可饱和吸收镜包括一个 12 nm 厚的 $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ 量子阱,生长温度是 500 $^{\circ}\text{C}$,反射率为 96%。半导体可饱和吸收镜粘在一个铜块上,没有专门的冷却装置。POL 为偏振片,P 方向偏振光透过率为 95%,反射率为 2%,S 方向偏振光反射率为 96%。PC 为普克尔盒,电光晶体未加电压时,通过电光晶体的偏振光方向不变,腔内总损耗最小,P 方向偏振光在腔内迅速建立激光振荡,在半导体可饱和吸收镜的调制下形成稳定

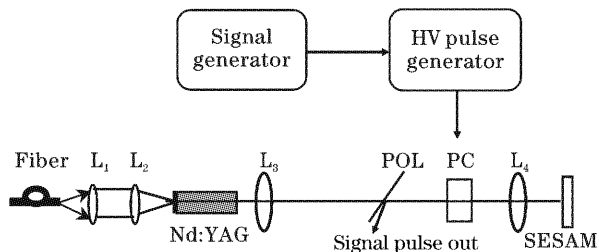


图 1 电光腔倒空激光二极管抽运半导体可饱和吸收镜锁模 Nd:YAG 激光器装置图

Fig. 1 Schematic of the electrooptically cavity-dumped laser-diode-pumped Nd:YAG laser with a semiconductor saturable absorber mirror

的连续锁模,腔内的能量开始积累。当腔内的能量积累到最大值时,给普克尔盒加 $\lambda/4$ 电压,P 方向偏振光两次通过普克尔盒,偏振面旋转 90° ,变成 S 方向的偏振光,从偏振片 POL 反射出腔外,输出与连续锁模脉冲宽度相同的单脉冲。

3 实验结果与讨论

实验过程中,在电光晶体未加高压电脉冲时,仔细调节谐振腔使得激光在腔内形成稳定的连续锁模^[5,8]。我们采用加压腔倒空方式,晶体所加的 $\lambda/4$ 电压为 3.6 kV,脉冲重复频率为 1~30 Hz 可调。图 2 是在 10 Hz 脉冲重复频率、电压脉冲宽度为 200 ns 条件下获得的光脉冲波形,其中左侧窄的峰为腔倒空锁模激光脉冲,之后有个脉冲宽度为 200 ns 的激光脉冲,实质是调 Q 激光脉冲。原因是:腔倒空过后,工作物质中的上能级粒子数开始积累,但不能形成连续锁模,而是形成调 Q,又由于偏振片对于 P 方向偏振光仍有 2% 的反射率,所以部分激光从偏振片反射出腔外而形成调 Q 激光脉冲输出,与腔倒空激光脉冲间隔 13 μs 。图 3 是我们得到的腔倒空锁模单脉冲波形,由于在实验中未采取屏蔽措施,在锁模脉冲波形后面出现一些振荡是高压电脉冲的干扰波形(见图 3)。

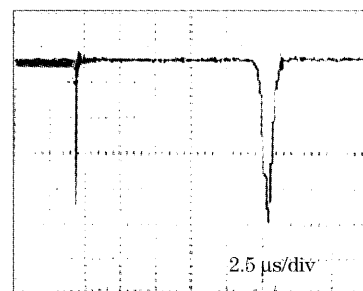


图 2 加 $\lambda/4$ 电压时腔倒空锁模脉冲和调 Q 激光脉冲的波形

Fig. 2 Oscilloscope trace of the cavity-dumping pulse and Q-switching pulse at the $V_{\lambda/4}$

在实验中发现,如果改变晶体所加脉冲电压,则腔倒空脉冲峰值功率与调 Q 激光脉冲功率随之变化,以及锁模脉冲和调 Q 脉冲的时间间隔和高度之比也随之变化,而电压重复频率的变化(1~30 Hz)对它们没有影响。当给晶体加电压偏离 $\lambda/4$ 电压时,相当于偏振片的反射率增加,腔内激光功率降低,腔倒空脉冲激光输出功率也降低。腔倒空过后上能级粒子数不断积累,当给普克尔盒加偏离 $\lambda/4$ 电压后,由于等效偏振片反射率增加,所以调 Q 脉

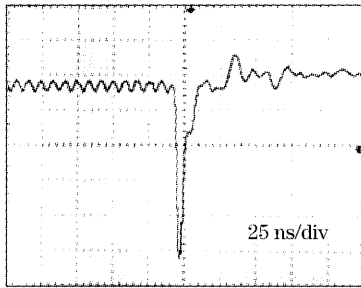


图 3 腔倒空锁模脉冲波形

Fig. 3 The single mode-locked pulse of cavity dumping

冲激光输出功率增加。此时,锁模脉冲和调 Q 脉冲的时间间隔变小,锁模脉冲和调 Q 脉冲的高度之比变小。因此调节晶体所加电压,可以控制腔倒空锁模脉冲峰值功率,但调节电压的范围不能太大,太大会导致腔内损耗过高,不能产生激光振荡;电压过低会导致高压脉冲不能产生,电压过高会导致高压脉冲发生器损坏。

实验过程中,谐振腔内经偏振片起偏的线偏振光,通过激光晶体时,由于热效应产生双折射,线偏振光退变为椭圆偏振光,当椭圆偏振光由腔镜反射通过偏振片时被起偏,其中振动方向垂直于入射面的 S 分量被反射出腔外,振动方向与入射面平行的 P 分量透过在谐振腔内振荡。P 分量线偏振光再次经过激光晶体退变为椭圆偏振光,再次经过偏振片时又被起偏,其中的 S 分量被反射出腔外损耗掉,P 分量透过。激光在谐振腔内每往返一次,就损耗很多的光能,从而大部分反转粒子数消耗在退偏损耗中,使激光器一直工作在高阈值状态。另外由于偏振片的偏振度不高致使腔倒空激光脉冲与邻近脉冲的对比值偏低,总是有一定的背景脉冲,使得腔倒空出的单脉冲能量不高。实验过程中,由于腔倒空锁模脉冲和调 Q 激光脉冲同时输出,无法测出纯腔倒空锁模脉冲的激光平均功率和它的脉冲宽度,利用能量计测出它们的总能量约为 650 μJ 。根据探测器输出电流与激光功率成正比的原理,利用从示波器上得到的脉冲波形的高度进行了推算,单脉冲能量为 30 nJ。连续锁模运转时单个锁模脉冲的能量约为 2 nJ,利用腔倒空将单脉冲的能量提高了 15 倍。

腔倒空锁模脉冲的脉冲宽度应该与未加 $\lambda/4$ 电压时连续锁模的脉冲宽度相同,利用型号为 FR-103XL 的 Femtochrome 非共线二次谐波自相关仪,测量了连续锁模脉冲的脉宽。图 4 为用 Tek400MHz 示波器记录下来的自相关曲线,其半峰全宽为 $\Delta t = 480 \mu\text{s}$ 。锁模脉冲宽度 $\tau = \Delta t \times \alpha \times$

$32(\text{ps}/\text{ms})$, α 是波形系数,按高斯函数确定,即 $\alpha = 0.707$ 。根据上述公式计算得,锁模脉宽 $\tau = 11 \text{ ps}$ 。

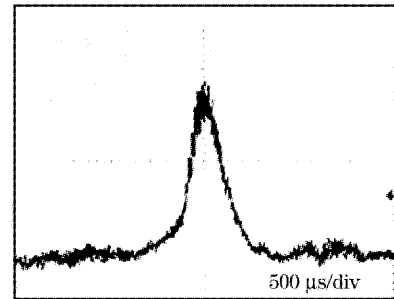


图 4 连续锁模脉冲的自相关曲线

Fig. 4 Autocorrelation trace of the continuous mode-locking

4 结 论

本文对电光腔倒空激光二极管抽运半导体可饱和吸收镜锁模激光器进行了实验研究,在这套实验装置中,实现了锁模脉冲的产生、放大和腔倒空输出,实现了脉冲宽度为 11 ps 的电光腔倒空锁模脉冲输出和脉冲宽度为 200 ns 的调 Q 脉冲输出。通过对实验结果的讨论与分析可知,提高偏振片的偏振度、减小晶体的热效应,可以进一步提高腔倒空锁模脉冲的单脉冲能量和峰值功率。

参 考 文 献

- 1 Vaclav Kubecek, Jens Biegert, Jean-Claude Diels *et al.*. Practical source of 50 ps pulses using a flashlamp pumped Nd:YAG laser and passive all-solid-state pulse control[J]. *Opt Commun.*, 2000, **177**(1~6): 317~321
- 2 M. D. Selker, R. S. Afzal, P. Reichert. A pulse transmission mode Q-switched Nd:YLF laser pumped by cylindrical microlens-collimated diode bars[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1994, **30**(7): 1616~1622
- 3 Alan D. Hays, Larry R. Marshall, Jeffrey J. Kasinski *et al.*. Laser-diode-pumped transient mode locking[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, **28**(4): 1021~1024
- 4 D. R. Walker, C. J. Flood, H. M. van Driel *et al.*. High power diode-pumped Nd:YAG regenerative amplifier for picosecond pulses[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **65**(16): 1992~1994
- 5 Bingyuan Zhang, Gang Li, Meng Chen *et al.*. Comparative study of the mode-locking of Nd:GdVO₄ and Nd:YAG laser with semiconductor saturable absorber mirrors[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(8): 477~479
- 6 G. N. Gibson, R. Klank, F. Gibson *et al.*. Electro-optically cavity-dumped ultrashort-pulse Ti:sapphire oscillator[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(14): 1055~1057
- 7 Tian Zhaoshuo, Wang Qi, Wang Yusan. Electrooptically cavity-dumped and Q-switched RF waveguide CO₂ laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(12): 1613~1616 (in Chinese)
田兆硕,王 骐,王雨三. 电光腔倒空与调 Q 射频波导 CO₂ 激光器[J]. *光学学报*, 2000, **20**(12): 1613~1616
- 8 Bingyuan Zhang, Gang Li, Meng Chen *et al.*. Passive mode locking of a diode-end-pumped Nd:GdVO₄ laser with a semiconductor saturable absorber mirror[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(19): 1829~1831