

文章编号: 0258-7025(2010)03-0873-04

# 激光二极管侧面抽运千赫兹皮秒激光再生放大器的热特性

常 亮<sup>1</sup> 陈 檬<sup>1\*</sup> 李 港<sup>1</sup> 麻云凤<sup>3</sup> 樊仲维<sup>2,3</sup> 牛 岗<sup>2</sup> 余 锦<sup>3</sup> 刘 洋<sup>3</sup> 张 雪<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124  
<sup>2</sup> 北京国科世纪激光技术有限公司, 北京 100085  
<sup>3</sup> 中国科学院光电研究院, 北京 100080

**摘要** 研究增益介质、电光晶体在高重复频率运转条件下,其热效应对皮秒激光再生放大器的影响。对 Nd:YAG 激光晶体热致退偏和 KD\*P 电光晶体热吸收进行了测量,利用补偿元件有效地补偿了激光晶体的热致退偏,并自行设计了采用 BBO 电光晶体的再生放大器普克尔盒,实现了对皮秒激光脉冲的有效放大,获得了在 1 kHz 重复频率下单脉冲能量为 3 mJ,放大倍数为  $3 \times 10^6$  的激光二极管(LD)侧面抽运 Nd:YAG 千赫兹皮秒再生放大 1064 nm 激光输出。

**关键词** 激光技术;激光二极管侧面抽运;千赫兹;皮秒激光脉冲;再生放大

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103703.0873

## Thermal Characteristic Analysis of Laser Diode Side-Pumped Regenerative Amplifier for kHz Picosecond Laser

Chang Liang<sup>1</sup> Chen Meng<sup>1</sup> Li Gang<sup>1</sup> Ma Yunfeng<sup>3</sup> Fan Zhongwei<sup>2,3</sup> Niu Gang<sup>2</sup>  
Yu Jin<sup>3</sup> Liu Yang<sup>3</sup> Zhang Xue<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China  
<sup>2</sup> Beijing GK Laser Technology Co. Ltd, Beijing 100085, China  
<sup>3</sup> Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

**Abstract** The influence of heat effect produced by gain medium and electro-optic crystal working at high repetition rate on a regenerative amplifier is investigated in this paper. Depolarization loss induced by heat generated in Nd:YAG crystal and thermal absorption of KD\*P electro-optic crystal were measured, and a compensating element to compensate the loss of thermal depolarization was used effectively. A BBO Pockel cell for regenerative amplifier was designed by ourself, and effective amplification is obtained. An output pulse energy at 1064 nm is obtained from the picosecond laser pulse regenerative amplifier by laser diode (LD) side-pumped with 3 mJ each pulse and amplification ratio of  $3 \times 10^6$  at 1 kHz repetition rate.

**Key words** laser technique; laser diode-side-pumped; kHz; picosecond laser pulse; regenerative amplifier

## 1 引 言

自 1992 年半导体可饱和吸收镜(SESAM)发明以来<sup>[1,2]</sup>,结构简单、锁模稳定可靠、光束质量好的全固态 SESAM 锁模皮秒激光器得到了蓬勃发展和

广泛应用。

从 SESAM 锁模振荡级直接输出的皮秒激光单脉冲能量很低<sup>[3~5]</sup>,约为几纳焦耳到几百纳焦耳,无法满足应用要求。利用全固态 SESAM 锁模皮秒激

收稿日期:2009-03-26;收到修改稿日期:2009-06-05

基金项目:国家 863 计划(2008AA031901)和北京市自然科学基金(3021001)资助项目。

作者简介:常 亮(1982—),男,博士研究生,主要从事超短激光脉冲产生和放大技术方面的研究。

E-mail:constantvip@yahoo.com.cn

导师简介:李 港(1950—),男,研究员,主要从事固体激光技术及其应用领域的研究。E-mail:lig@bjut.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail:chenmeng@bjut.edu.cn

光器作种子源,采用再生放大技术,再结合半导体激光抽运技术,可实现上千赫兹重复频率、单脉冲能量达毫焦耳量级的皮秒激光脉冲输出<sup>[6~8]</sup>。目前,全固态千赫兹皮秒激光系统由于其成本低、效率高、体积小、功率大以及可靠性高,成为微加工行业理想的加工工具,并在人造卫星激光测距、非线性频率变换、国防建设、科学研究等众多领域得到越来越广泛的应用。

高重复频率再生放大器和低重复频率再生放大器的明显区别是,前者存在激光晶体与电光调制晶体的热效应问题。对于高重复频率工作的高功率皮秒再生放大器,只有有效解决激光晶体和电光晶体的热效应问题才能实现高效稳定的放大运转。本文分析了 Nd:YAG 激光晶体热致退偏和 KD\*P 电光晶体热吸收对千赫兹皮秒激光再生放大器输出功率的影响,通过加入补偿元件,补偿了 Nd:YAG 激光晶体的退偏和采用自行设计的适合千赫兹再生放大器的 BBO 电光晶体普克尔盒,构建了单脉冲能量 3 mJ 的激光二极管(LD)侧面抽运 Nd:YAG 千赫兹皮秒再生放大器。

## 2 激光晶体热致退偏效应的测量和补偿

为了定量分析 Nd:YAG 激光晶体对千赫兹运转再生放大腔造成的退偏影响,实验设计了如图 1 所示的谐振腔光路。其中 Nd:YAG 由 1 kHz 准连续(QCW)LD 侧面抽运, $M_1$  为输出镜, $M_2 \sim M_4$  为全反射镜, $P_1, P_2$  为偏振片,A 为退偏补偿元件, $PM_1, PM_2$  为功率计。首先腔内不加入退偏补偿元件 A,随着抽运功率的增加,YAG 晶体热致退偏越来越严重,此时从偏振片  $P_2$  溢出腔外的激光功率增加。分别测量了不加补偿元件 A 时,从输出镜  $M_1$  输出的激光功率  $P'_1$  及从偏振片  $P_2$  溢出腔外的激光功率  $P'_2$  和加入补偿元件 A 时,输出功率  $P''_1$  和溢出功率  $P''_2$ ,如图 2 所示。

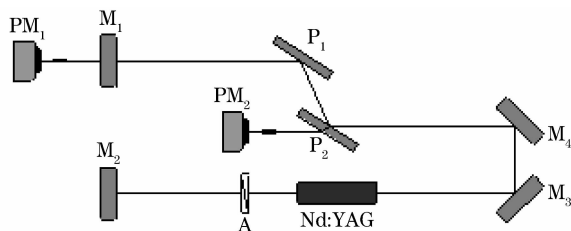


图 1 LD 侧面抽运千赫兹准连续自由运转激光腔

Fig. 1 kHz QCW laser diode side-pumped laser cavity

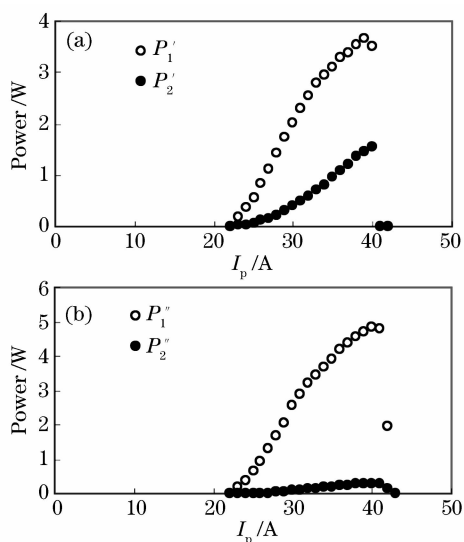


图 2 不同抽运电流下输出光功率与从偏振片  $P_2$  泄露的光功率。(a) 腔内不加退偏补偿元件 A;(b) 腔内加入退偏补偿元件 A

Fig. 2 Output power from  $PM_1$  and  $PM_2$  in different pump currents. (a) without depolarization compensation element A; (b) with depolarization compensation element A

比较图 2(a),(b)可以看出,加入退偏补偿元件的光学谐振腔输出光功率  $P''_1$  明显高于未加退偏补偿元件的光学谐振腔的输出功率  $P'_1$ ;且  $P''_1/P''_2$  值明显大于  $P'_1/P'_2$ 。这说明在千赫兹重复频率运转条件下,YAG 的退偏是非常严重的,必须加入退偏补偿元件才能保证再生放大器的高效率运转。

## 3 KD\*P 电光晶体吸收损耗及热致退偏的测定

KD\*P 晶体以其损伤阈值高、电光系数大的特点,成为再生放大器普克尔盒电光晶体的首选。但是随着重复频率的增加,即腔内平均功率较大时,KD\*P 晶体对腔内激光产生较强的热吸收(文献报道 KD\*P 晶体在输出光功率超过 2 W 时,对激光有强的热吸收,单通损耗约为 2.5%<sup>[9,10]</sup>),这使得再生放大器输出功率明显下降,并导致严重的热致退偏效应,输出光的光束质量也严重变坏。为了验证 KD\*P 晶体的热吸收和热致退偏效应,进行了如图 3 所示光路的实验。

$P_a$  为插入 KD\*P 普克尔盒之后测得的谐振腔输出的功率, $P_b$  为由于 KD\*P 晶体的热致退偏,在激光振荡过程中,从偏振片  $P_1$  漏出的激光功率。实验结果表明,当激光腔输出功率较高时(几瓦),插入 KD\*P 将带来极大的插入损耗,并且输出光功率越

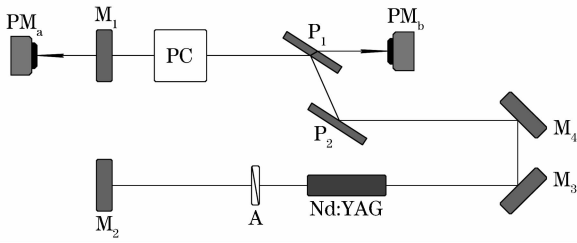


图 3 插入 KD\*P 普克尔盒的 LD 侧面抽运千赫兹准连续自由运转激光腔

Fig. 3 kHz QCW laser diode side-pumped laser cavity insert a KD\*P Pockels cell

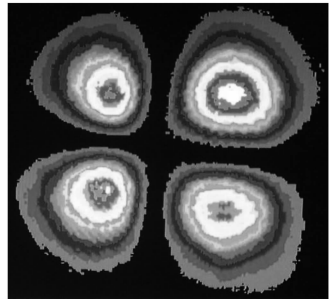


图 5 插入 KD\*P 普克尔盒后输出的光斑能量分布

Fig. 5 Output beam profile after inserting KD\*P Pockel cell

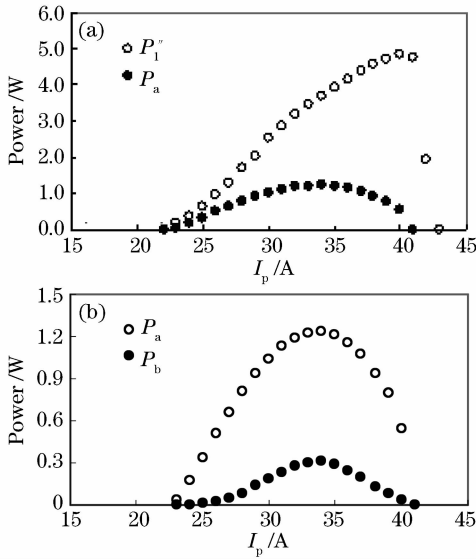


图 4 不同抽运电流下,腔内不插入普克尔盒输出光功率( $P_1'$ )与插入普克尔盒输出光功率( $P_a$ )比较(a)和插入普克尔盒输出光功率( $P_a$ )与从偏振片  $P_1$  泄露的光功率( $P_b$ )比较(b)

Fig. 4 Comparison with  $P_1'$  and  $P_a$ (a) laser cavity insert a KD\*P Pockels,  $P_a$  and  $P_b$  (b) in different pump currents

高, KD\*P 晶体的热致退偏效应越明显, 实验结果如图 4 所示。

首先在图 3 的腔内不插入 KD\*P 普克尔盒, 当抽运电流为 40 A 时, 激光输出功率达到最大, 为 4.85 W; 然后在腔内插入 KD\*P 普克尔盒, 当抽运电流为 34 A 时, 获得最大功率输出, 仅为 1.23 W。这种插入损耗是惊人的, 它极大地限制了再生放大输出光的单脉冲能量和平均功率。另外, 由于 KD\*P 晶体强的热吸收率, 使得激光输出功率越大, 普克尔盒的退偏效应越明显。图 5 为使用相干公司光束质量分析仪观测的从偏振片  $P_2$  (参见图 3) 后输出的激光光斑轮廓及能量分布图, 明显看出由于退偏导致的暗十字。

### 4 千赫兹皮秒再生放大器实验结果

为了克服 KD\*P 晶体的缺陷, 自行研制了适合千赫兹 LD 侧面抽运的 BBO 晶体普克尔盒, BBO 晶体尺寸为 3 mm × 3 mm × 20 mm,  $\lambda/4$  波长电压为 3850 V, 表示为<sup>[11]</sup>

$$V_{\lambda/4} = \frac{\lambda d}{4n_0^3 r_{22} L}$$

种子源采用自行研制的 LD 端面抽运的 SESAM 锁模激光器, 输出平均功率为 100 mW, 脉冲宽度为 7 ps, 重复频率为 100 MHz。再生放大器采用反射式线性谐振腔, 腔结构如图 6 所示, 其中偏振片  $P_3$ , 半波片(HWP), 法拉第旋光器(FR)构成了再生放大器种子光导入和放大光导出部分,  $M_1 \sim M_4$  为全反射镜, Nd:YAG 由 1 kHz 准连续 LD 侧面抽运, PC 为 BBO 普克尔盒, A 为退偏补偿元件, 本文采用的是四分之一波片(QWP)作为退偏补偿元件。

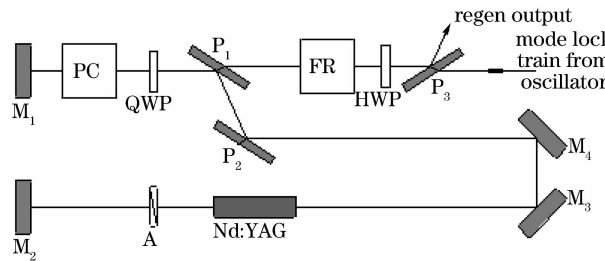


图 6 千赫兹再生放大器光路示意图

Fig. 6 Scheme of kHz regenerative amplifier laser cavity

当 LD 抽运参数分别为: 电流 53 A, 电压 16 V, 脉宽 200  $\mu$ m 时, 获得了 1 kHz 皮秒再生放大器输出, 平均功率为 3.14 W。图 7 为用光电管(GT106)和示波器(Tek3054B 500 MHz)监测的腔内种子光成长放大过程和再生放大输出的光脉冲波形, 图 8 为用光束分析仪记录的输出光斑能量分布图, 图 9 为实验获得的再生放大输出平均功率随 LD 抽运电流变化曲线。

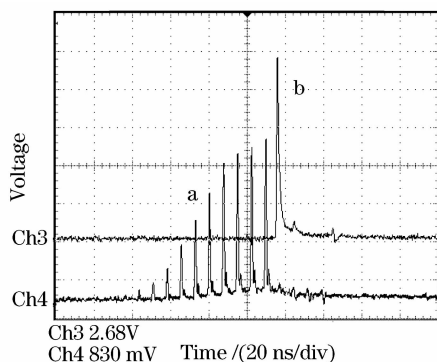


图 7 波形 a 为种子光成长放大过程, 波形 b 为再生放大输出光脉冲

Fig. 7 Trace a is pulse build up, trace b is amplifier output

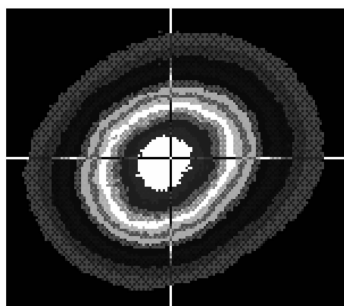


图 8 再生放大器输出光斑能量分布

Fig. 8 Beam profile of the regenerative amplifier

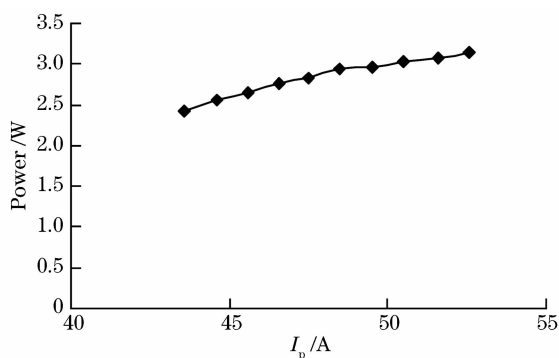


图 9 再生放大输出功率曲线

Fig. 9 Curve of output power versus pump current

上述再生放大腔采用  $KD^*P$  晶体做普克尔盒时, 在 1 kHz 重复频率下, 获得的最大输出仅为 1.2 W, 此时抽运电流为 29 A。

## 5 结 论

分析了 Nd:YAG 激光晶体热致退偏和  $KD^*P$

电光晶体热吸收特性对千赫兹运转条件下皮秒再生放大器的影响; 通过补偿 Nd:YAG 热致退偏以及采用自行研制的 BBO 普克尔盒, 获得了 1 kHz 重复频率和 LD 侧面抽运的 Nd:YAG 皮秒再生放大器, 输出平均功率达到 3 W, 单脉冲能量 3 mJ。

## 参 考 文 献

- 1 U. Keller, D. A. Miller, G. D. Boyd *et al.*. Solid-state low-loss intracavity saturable absorber for Nd:YLF lasers; an antiresonant semiconductor Fabry-Perot saturable absorber [J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(7):505~507
- 2 K. J. Weingarten, U. Keller, T. H. Chiu *et al.*. Passively mode-locked diode-pumped solid-state lasers that use an antiresonant semiconductor Fabry-Perot saturable absorber [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(8):640~642
- 3 Zhang Bingyuan, Chen Meng, Li Gang *et al.*. Study on diode-side-pumped mode-locked laser with semiconductor saturable absorber mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(1):59~62  
张丙元, 陈 檬, 李 港 等. 激光二极管侧面抽运 Nd:YAG 锁模激光器的研究 [J]. *光学学报*, 2005, **25**(1):59~62
- 4 Bingyuan Zhang, Gang Li, Meng Chen *et al.*. Flash-lamp-pumped picosecond Nd:YAG regenerative amplifier [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(12):692~693
- 5 Bingyuan Zhang, Gang Li, Meng Chen *et al.*. Comparative studies of semiconductor saturable absorber mirror mode-locking dynamics in pulsed diode-pumped picosecond Nd:GdVO<sub>4</sub> and Nd:YAG lasers [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(6):336~338
- 6 Michael J. P. Dymott, Kurt J. Weingarten. Picosecond diode-pumped laser system with 9.3 W average power and 2.3 mJ pulse energy [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(18):3042~3045
- 7 Daniel Muller, Steffen Erhard, Adolf Giesen. High power thin disk Yb:YAG regenerative amplifier [C]. OSA TOPS 2001, Advanced Solid-State Lasers, 2001. 319~324
- 8 J. Kleinbauer, R. Knappe, R. Wallenstein. A powerful diode-pumped laser source for micro-machining with ps pulses in the infrared, the visible and the ultraviolet [J]. *Appl. Phys. B*, 2005, **80**:315~320
- 9 D. R. Walker, C. J. Flood, 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
- 10 Muhammad Saeed, Dalwwo Kim, Louis F. DiMauro. Optimization and characterization of a high repetition rate, high intensity Nd:YLF regenerative amplifier [J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(12):1752~1757
- 11 Detlef Nickel, Christian Stolzenburg, Angelika Beyertt *et al.*. 200 kHz electro-optic switch for ultrafast laser systems [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2005, **76**(3):033111