

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0061-03

增益开关型 Nd³⁺:YVO₄ 微片激光器的研究

盛芳, 李东明, 陈军

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 利用增益开关技术调制 LD 抽运的 Nd³⁺:YVO₄ 微片激光器, 实现了脉宽在 60~140 ns 连续可调、高重复频率的稳定、单模激光脉冲, 重复频率在 1~1 kHz 精确可控, 能够根据不同的需要直接或整形后作为种子光源。分析了 LD 驱动电流及调制宽度对激光脉冲宽度的影响, 得出驱动电流和调制宽度的乘积越大, 所得激光脉冲宽度越窄的结论。

关键词 激光技术; 增益开关; 微片激光器; Nd³⁺:YVO₄

中图分类号 TN248.4

文献标识码 A

Study on a Gain-Switched Nd³⁺:YVO₄ Microchip Laser

SHENG Fang, LI Dong-ming, CHEN Jun

(State Key Laboratory of Modern Optical Instruments, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract Using gain-switching technique in the Nd³⁺:YVO₄ microchip laser pumped by the laser diode (LD), steady single mode laser pulse-trains with pulse-width of 60~140 ns and repetition rate of 1 kHz are obtained. The LD is driven by a repetitive modulating pulse current added on a DC bias. The repetition rate of laser output can be exactly controlled between 1 Hz and 1 kHz by changing that of the pulsed pumping current. The influence of LD driven current and modulating pulse width on the output laser pulse width is analyzed. The conclusion is that the greater the product of driven current and modulating pulse width, the narrower the laser pulse width.

Key words laser technique; gain-switching; microchip laser; Nd³⁺:YVO₄

1 引言

在调 Q、锁模以及增益开关等产生短脉冲光的常用方法中, 增益开关技术能产生稳定性较好的脉冲, 脉冲重复频率可控, 同时无需附加任何元件, 易于实现紧凑的系统。目前, 该技术已经应用在半导体激光器等激光系统中产生 ps 激光脉冲^[1-3]。但是增益开关半导体激光器的脉冲输出存在多纵模^[4]和“红移”啁啾^[4]问题。为了实现紧凑的系统, 获得单色性好、脉宽为几十~上百 ns 的高重复频率脉冲激光, 以便根据不同的需要直接或整形后作为种子光源。 $\phi 20 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的 Nd³⁺:YVO₄ 晶体两端面镀膜形成 F-P 激光谐振腔, 采用直流偏置加脉冲调制共同驱动的 LD 作为抽运源, 对 Nd³⁺:YVO₄ 微片激光器进行抽运。将增益开关技术输出脉冲稳定性和高重复频率可控的优点, 与微片激光器结构简单、输出为单模的优点结合起来, 获得了高重复频率窄脉冲单频种子激光。

2 实验原理及装置

本实验用直流偏置加脉冲调制电流驱动 LD 对 Nd³⁺:YVO₄ 微片激光器进行抽运, 连续抽运光光强接近阈值水平, 叠加于其上的抽运脉冲光使微片腔内的反转粒子数迅速超过阈值, 受激辐射迅速增强, 从而输出一个高峰值功率的激光脉冲, 而微片激光器的增益开关随着抽运脉冲光的结束迅速关闭, 反转粒子数快速降到阈值以下, 直到下一个抽运脉冲到来才重新增大, 输出下一个激光脉冲, 每次输出的激光脉冲具有相同脉宽和峰值功率。因此, 输出脉冲激光的稳定性好, 重复频率与调制脉冲电流的重复频率相同。

和调 Q 的分析类似, 可得增益开关激光脉冲宽度为^[5]

$$t_p = \frac{r^2 \eta(r)}{r-1-\ln r} \times \frac{2L}{\delta c} \quad (1)$$

式中 L 为腔长, c 为光速, δ 为腔内损耗, r 和 $\eta(r)$ 分

基金项目: 国家自然科学基金委员会、中国工程物理研究院联合基金(10076015)资助课题。

作者简介: 盛芳(1976-), 女, 浙江大学光电信息工程系博士研究生。主要研究方向为激光与非线性。

E-mail: perfume306@163.com

别为超阈度和能量抽取率, $r = n_i / n_c$, n_i, n_c 分别为初始反转粒子数密度和阈值反转粒子数密度。 $\eta(r)$ 与 r 有如下关系

$$r = \frac{1}{\eta(r)} \ln \left[\frac{1}{1 - \eta(r)} \right] \quad (2)$$

由(2)式的泰勒展开近似式可得 $\eta(r) = 2(r-1)$, 将其代入(1)式, 利用泰勒展开, 可近似得到

$$t_p \cong \frac{4r^2}{r-1} \times \frac{2L}{\delta C} = t_{p0} \times \frac{2L}{\delta C} \quad (4)$$

式中 $t_{p0} = 4r^2 / (r-1)$ 。 $2L / \delta C$ 是常数, 因此 $t_p \propto t_{p0}$, 激光脉冲宽度只与超阈度 r 有关。对于增益开关, 一般有 $1 < r < 2$, 则 $dt_{p0} / dr = 4[1 - (r-1)^{-2}] < 0$ 。因此随着 r 的增大 t_{p0} 减小, t_p 也减小。

实验中 n_c 不变, 因为 $n_c \propto \delta$ 。我们通过改变 LD

驱动电流的大小即可获得不同的初始反转粒子数 n_i 和超阈度 r , 从而获得不同脉宽 t_p 的脉冲激光输出, 超阈度越大脉宽越窄; 通过调节调制电流的频率可以精确控制脉冲激光输出的重复频率。

实验装置如图 1 所示。所用晶体为 $\phi 20 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的 $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ 晶体, Nd^{3+} 离子掺杂浓度 1at.%, 前表面镀对 808 nm 高透、对 1064 nm 高反的介质膜, 后表面镀对 1064 nm 反射率为 92% 的反射膜。抽运源为最大输出功率 20 W 的半导体激光器 (LD)。驱动电源可对 LD 加直流和脉冲电流, 脉冲电流的脉宽在 $0.6 \mu\text{s} \sim 1 \text{ ms}$ 之间可变、重复频率在 $1 \text{ Hz} \sim 3.3 \text{ kHz}$ 之间连续可调。LD 的输出光, 用一个对 808 nm 波长镀了增透膜的非球面透镜作准直, 再通过一个球面透镜将其会聚在微片晶体中央。

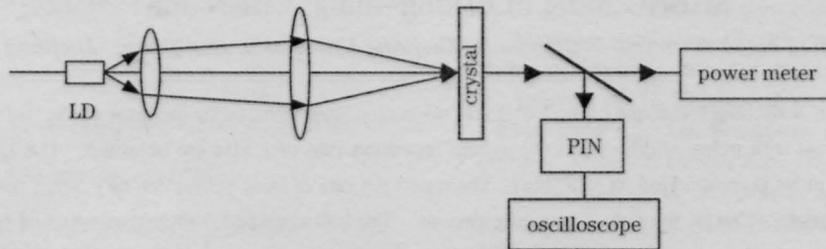


图 1 实验装置简图

Fig.1 Setup of gain-switched $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ microchip laser

3 结果与讨论

调节加在 LD 上的直流电流 (I_{CW}) 和脉冲调制电流 (I_{pulse}), 以及抽运脉宽, 在不同抽运条件下获得了不同脉宽的稳定脉冲激光输出, 如图 2 所示, 其各项参数列于表 1。最终实现了脉宽在 60~140 ns 连续可调、重复频率高达 1 kHz 的脉冲激光稳定输出。我们发现 LD 驱动电流 (直流与脉冲调制之和) 与调制脉宽的乘积 $(I_{\text{CW}} + I_{\text{pulse}}) \times \tau_{\text{pump}}$ 和激光脉冲宽度 t_p 存在这样的关系: 乘积越大 t_p 越小。分析认为对于单脉冲输出, 抽运脉宽就等于腔内反转粒子建立和积累过程所持续的时间, LD 驱动电流的两部分

之和 $(I_{\text{CW}} + I_{\text{pulse}})$ 越大抽运速率越大, 因而腔内反转粒子数单位时间的增量越多。 $(I_{\text{CW}} + I_{\text{pulse}}) \times \tau_{\text{pump}}$ 可以表示反转粒子数在其积累时间内增量的多少, 这个乘积越大腔内能够积累的反转粒子越多。抽运初期腔内反转粒子数很小、可以忽略, 则这一乘积越大, 增益开关打开时腔内反转粒子数密度越大, 超阈度 r 也越大, 根据文中第二部分的分析: r 越大 t_p 越小, 因此输出激光脉冲的宽度 t_p 应该变得越窄, 与实验现象相符。

在抽运脉宽 $16 \mu\text{s}$, $I_{\text{CW}} = 72 \text{ A}$, $I_{\text{pulse}} = 20.1 \text{ A}$ 时, 获得重复频率 1 kHz、脉宽 60 ns 的脉冲激光输出,

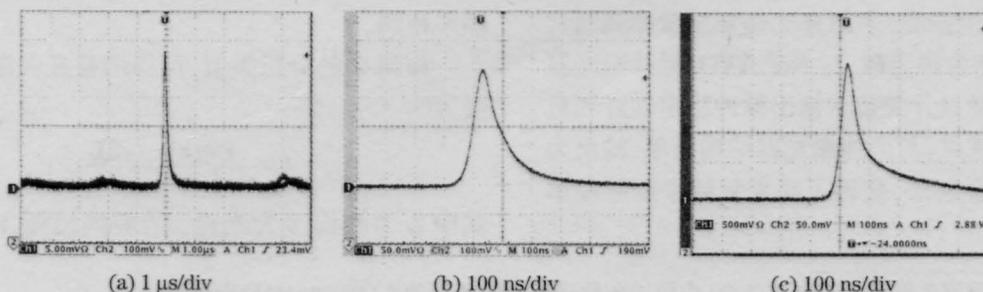


图 2 不同抽运条件下的激光单脉冲输出。(a) FWHM=140 ns; (b) FWHM=80 ns; (c) FWHM=60 ns

Fig.2 Single pulse laser output under the different pumping conditions. (a) FWHM=140 ns; (b) FWHM=80 ns; (c) FWHM=60 ns

表 1 不同脉宽的激光单脉冲输出及其抽运条件($f=1\text{ Hz}\sim 1\text{ kHz}$)
Table 1 Single pulse laser output and its pumping condition ($f=1\sim 1\text{ kHz}$)

I_{CW}/A	I_{pulse}/A	$\tau_{\text{pump}}(\text{FWHM})/\mu\text{s}$	$t_p(\text{FWHM})/\text{ns}$	$(I_{CW}+I_{pulse})\times\tau_{\text{pump}}/(\text{A}\cdot\mu\text{s})$	Pulse figure
12.8	7.9	0.6	140	12.42	Fig.2(a)
12.0	7.9	4.0	80	79.6	Fig.2(b)
7.2	20.1	16.0	60	436.8	Fig.2(c)

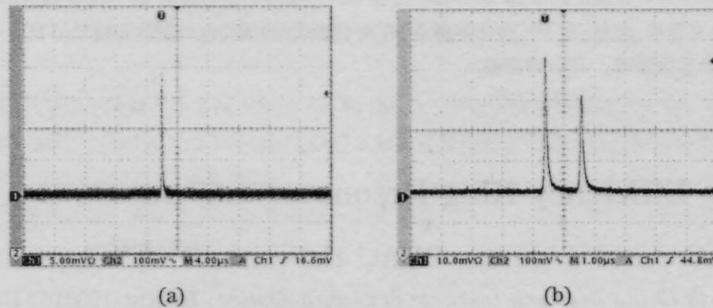


图 3 抽运脉宽 $4\ \mu\text{s}$ (FWHM), $I_{pulse}=7.9\ \text{A}$ 时,不同 I_{CW} 下的激光脉冲输出。(a) $I_{CW}=12\ \text{A}$, 单脉冲; (b) $I_{CW}=12.2\ \text{A}$, 多脉冲
Fig.3 Laser output with different I_{CW} at pumping pulse-width of $4\ \mu\text{s}$ (FWHM) and $I_{pulse}=7.9\ \text{A}$.

(a) $I_{CW}=12\ \text{A}$, single pulse output; (b) $I_{CW}=12.2\ \text{A}$, multi-pulse output

用功率计测得其平均功率约为 $1\ \text{mW}$, 计算得其单脉冲能量约为 $1\ \mu\text{J}$ 。

当抽运脉冲宽度 $4\ \mu\text{s}$ 、重复频率 $1\ \text{kHz}$, $I_{CW}=12\ \text{A}$, $I_{pulse}=7.9\ \text{A}$ 时,在示波器上观察到微片激光器的单脉冲输出,幅值稳定且与抽运光有相同的重复频率。保持抽运脉宽和 I_{pulse} 不变,增大 I_{CW} ,每个抽运脉冲对应多个激光脉冲输出且第一个输出脉冲的峰值功率也有所增大,如图 3 所示。保持抽运脉宽和 I_{CW} 不变,增大 I_{pulse} ,以及 I_{CW} 和 I_{pulse} 都不变,增大抽运脉宽时,也有多脉冲现象发生。

综上所述,驱动电流(直流与调制之和)和调制宽度的乘积越大,所得脉冲激光的脉宽越窄。改变 LD 的驱动电流和调制脉宽可获得不同脉宽的脉冲输出,其重复频率可通过调节 LD 调制电流的频率进行精确控制。在单脉冲输出的条件下,无论是增大直流电流 I_{CW} 或调制电流 I_{pulse} 还是增大调制宽度,都可能出现多脉冲现象,从而对脉冲的稳定性造成不良影响,在实际应用中应该避免多脉冲现象的发生。

实验结果表明,应用增益开关技术于 LD 抽运的 Nd³⁺:YVO₄ 微片激光器中,具有激光脉冲稳定性好、重

复频率易于控制、单模输出、系统结构紧凑等优点,所得脉冲激光能够满足一定范围内的不同需求,实现可靠、稳定的种子光源。

参 考 文 献

- 1 C. Yan, K. P. J. Reddy, R. K. Jain *et al.*. Picosecond pulse generation in CW semiconductor lasers using a novel regenerative gain-switching technique[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, 5(5): 494-497
- 2 Yang Shiquan, Meng Hongyun, Xiang Yang *et al.*. Dual-wavelength picosecond pulses generated from self-seeded gain-switched laser diode with fiber bragg grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(9): 1063-1066
杨泉,蒙红云,项阳等.双波长自注入式光纤光栅外腔脉冲半导体激光器[J]. *光学学报*, 2002, 22(9):1063-1066
- 3 G. J. Aspin, A. M. D. Ph. Gain-switched pulse generation with semiconductor lasers[J]. *IEE Proc. Part I*, 1982, 129(6):283-290
- 4 Zhong Shan, Wu Jian, Lou Caiyun *et al.*. Study on dechirping of pulses from gain-switched semiconductor laser[J]. *Chinese J. Semiconductors*, 1997, 18(10):741-747
钟山,伍剑,娄采云等.增益开关半导体激光器超短光脉冲消啁啾研究[J]. *半导体学报*, 1997, 18(10):741-747
- 5 A. E. Siegman. Lasers. University Science Books[M]. California: Mill Valley. 1986. 1008-1021