

文章编号: 0258-7025(2007)04-0475-06

# 增益开关型微片激光器的时间特性

胡 淼, 陈 军, 葛剑虹\*, 陈哲敏, 汪 莎

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘要** 从速率方程出发, 采用在直流抽运上叠加脉冲抽运的方式, 建立激光二极管(LD)抽运的增益开关型 Nd:YVO<sub>4</sub> 微片激光器的数学模型, 并给出不同抽运条件下输出脉冲的时间特性。数值研究结果表明, 当直流抽运速率、脉冲抽运速率和抽运脉宽的变化量在 10% 以内时, 输出脉宽变化不大, 而脉冲个数变化较大且与抽运参数呈非线性单调递增关系。利用建立的实验装置, 测量了在不同激光二极管驱动电流和调制脉宽时输出脉冲的时间特性, 发现驱动电流的增幅在 10% 以内时, 输出脉宽变化小于 5%, 但输出脉冲个数增加较为明显, 且实验结果与数值模拟结果相符。

**关键词** 激光技术; 微片激光器; 抽运条件; 增益开关; 时间特性; 脉冲个数

**中图分类号** TN 248.1 **文献标识码** A

## Temporal Characteristics of the Gain-Switched Microchip Laser

HU Miao, CHEN Jun, GE Jian-hong, CHEN Zhe-min, WANG Sha

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

**Abstract** Based on the rate equation, a mathematic model of laser diode (LD) pumped gain-switched Nd:YVO<sub>4</sub> microchip laser under pre-pumping together with pulse pumping mechanism is presented. This model well shows the temporal characteristics of output pulses when the pumping parameters vary slightly. The results of numerical simulation indicate that the width of the output pulses changes little when the increase of pumping parameters is below 10%, however, the number of the output pulses increases rapidly and has a nonlinear monotone increasing relation with the pumping parameters. The experimental results of such gain-switched microchip laser are measured under the corresponding pumping conditions. It is found that the numerical and experimental results match with each other very well.

**Key words** laser technique; microchip laser; pumping conditions; gain-switched; temporal characteristics; pulse numbers

## 1 引 言

随着激光二极管(LD)的发展, 激光二极管抽运的增益开关型固体激光器以其诸多优点在激光雷达、生物学、光通信及非线性光学等许多领域中已有着广泛的应用<sup>[1~9]</sup>。过去几年里, 极短脉冲抽运的增益开关型可调谐蓝宝石激光器更是一度成为热点<sup>[1~3]</sup>。在此基础上, 增益开关型微片激光器作为

一种性能优良的种子光源也有相应报道<sup>[4~8]</sup>。过去在这方面的研究, 主要集中在抽运条件大幅度变化的范围, 例如在当抽运速率从阈值附近增加到几倍甚至几十倍于阈值时输出单脉冲的特性如脉宽、峰值功率变化等<sup>[4~6]</sup>。但实际上由于微片激光器腔长短, 其输出特性对抽运条件的微小变化也极为敏感。这种抽运条件的微小变化虽然对单脉冲的一些特性

**收稿日期:** 2006-10-13; **收到修改稿日期:** 2006-11-13

**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)资助项目。

**作者简介:** 胡 淼(1982—), 男, 浙江永嘉人, 博士研究生, 主要从事半导体激光器、固体激光器技术研究。

E-mail: iofuturelin@hotmail.com

**导师简介:** 陈 军(1946—), 女, 浙江宁波人, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为固体激光器及非线性技术。

E-mail: chenjun1@zju.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: jianhong@zju.edu.cn

如脉宽、幅值作用并不明显,但是能使输出脉冲个数发生剧变。本文将建立基于小幅度变化的直流抽运速率、脉冲抽运速率和抽运脉宽等抽运参数的理论模型,讨论微片激光器在抽运条件微小变化时,输出脉冲的时间特性,并将模型的数值计算结果与实验结果相比较。

## 2 理论分析

增益开关是通过调节介质反转粒子数密度实现的。先用直流抽运将腔内反转粒子数维持在阈值之下的一定水平,然后叠加脉宽远小于激光上能级寿命的脉冲抽运,形成瞬间超过阈值的反转粒子数状态,引发受激辐射发射激光脉冲。控制抽运脉冲在激光脉冲发射后截止,则系统仅发射一个尖峰。如此重复,激光脉冲便以抽运源的脉冲重复频率输出。此时如果抽运脉宽或抽运速率有正向偏移或人为增加一个微小量,每个抽运周期内便会出现两个甚至多个脉冲输出。以四能级 Nd:YVO<sub>4</sub> 微片激光器为例,  $\varphi$  为腔内光子数密度,  $n_{\text{tot}}$ ,  $\Delta n$ ,  $\sigma$ ,  $\tau_f$ ,  $l$  分别为增益介质总粒子数、反转粒子数密度、受激发射截面、上能级寿命和介质长度。  $\mu$  为介质折射率,  $v$  为介质中光速,  $\tau_c = l/(\mu\delta)$  为腔内光子寿命。  $\delta = \frac{1}{2}\ln(\frac{1}{R}) + \delta_0$  为腔内单程损耗,  $\frac{1}{2}\ln(\frac{1}{R})$  为由于激光输出造成的损耗,  $\delta_0$  为热致衍射损耗<sup>[10]</sup>。对于规格为  $\phi 20 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$  的微片激光器中固有衍射损耗极小,可以忽略不计。因此对于四能级激光器增益开关效应的速率方程可表示为

$$\frac{d\Delta n}{dt} = [W_p \text{rect}(t/t_p) + W_D](n_{\text{tot}} - \Delta n) - \sigma_{21} \nu \varphi \Delta n - \Delta n/\tau_f, \quad (1)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \sigma_{21} \nu \varphi \Delta n - \varphi/\tau_c + B\Delta n/\tau_f, \quad (2)$$

$W_D$  和  $W_p$  为直流抽运速率和脉冲抽运速率并与入射到晶体上的抽运光功率成正比,  $t_p$  为脉冲宽度,  $B \approx (\frac{\omega_0}{l})^2/(4\pi)$  为自发辐射进入激光模式的比例,  $\omega_0$  为输出激光束的束腰宽度。式(1)为增益介质中反转粒子数密度随时间变化的速率方程;式(2)为腔内光子数密度随时间变化的速率方程。令(2)式中  $\frac{d\varphi}{dt} = 0$ , 并考虑  $B$  在出光阈值时的作用可忽略不计,得到在出光阈值时的反转粒子数密度  $n_t$  为

$$n_t = \frac{1}{\sigma_{21} \nu \tau_c}, \quad (3)$$

同样得到直流抽运阈值

$$W_t = \frac{n_t}{(n_{\text{tot}} - n_t)\tau_f} \approx \frac{n_t}{n_{\text{tot}}\tau_f}. \quad (4)$$

为便于讨论,定义归一化的反转粒子数密度  $\Delta n^*(t) = \Delta n(t)/n_t$ , 腔内光子数密度  $\varphi^*(t) = \varphi(t)/n_t$ , 总粒子数密度  $n_{\text{tot}}^* = n_{\text{tot}}/n_t$ , 脉冲抽运速率  $W_p^* = W_p/W_t$ , 直流抽运速率  $W_D^* = W_D/W_t$ 。根据式(3),(4)和归一化条件将(1),(2)方程简化为

$$\frac{d\Delta n^*}{dt} = \frac{[W_p^* \text{rect}(t/t_p) + W_D^*]}{\tau_f} \left(1 - \frac{\Delta n^*}{n_{\text{tot}}^*}\right) - \frac{\varphi^* \Delta n^*}{\tau_c} - \frac{\Delta n^*}{\tau_f}, \quad (5)$$

$$\frac{d\varphi^*}{dt} = \frac{\varphi^* \Delta n^*}{\tau_c} - \frac{\varphi^*}{\tau_c} + B \frac{\Delta n^*}{\tau_f}, \quad (6)$$

式(5),(6)中  $\Delta n^*$  的初值可以根据  $W_D^*$  确定,  $\varphi^*$  的初值设定为  $10^{-6} \varphi_{\text{max}}^*$ 。输出功率  $p(t)$  与腔内光子数密度  $\varphi^*(t)$  成正比<sup>[5,6]</sup>。

## 3 数值模拟

### 3.1 棒状增益介质和微片激光器的增益开关

由于谐振腔长短不同,棒状增益介质和微片激光器增益开关的输出时间特性有较大区别,图1即

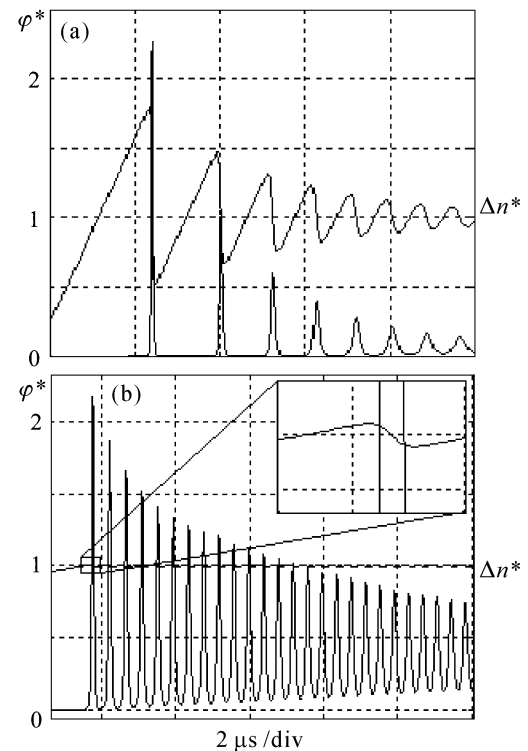


图1 激光棒(a)和微片激光器(b)的输出时间特性  
Fig. 1 Output temporal characteristics of laser rod (a) and microchip laser (b)

理想状态下 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光棒和微片激光器在抽运速率为 3 倍于阈值的长脉冲抽运下, 归一化反转粒子数  $n^*(t)$  和腔内光子数  $\varphi^*(t)$  的时间特性。激光棒的尺寸  $\phi 10 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ , 微片的尺寸  $\phi 20 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ ; 其他参数相同分别是折射率  $\mu = 1.96$ , 对  $1.064 \mu\text{m}$  激光的吸收系数  $a = 0.02 \text{ cm}^{-1}$ ; 抽运光和激光束腰宽度都为  $100 \mu\text{s}$ ; 全反射镜透射率  $T = 0$ , 输出镜反射率  $R = 0.92$ 。

图 1(a), (b) 的共同点是输出脉冲和反转粒子数表现出阻尼振荡的特性, 原因是随着时间的推移, 一部分脉冲的能量变成稳定态的能量, 脉冲幅值变小<sup>[11,12]</sup>。

两者的区别是: 1) 固体激光棒阻尼振荡效果明显大于微片激光器, 在激光棒中脉冲序列幅值迅速降低、脉宽迅速扩大、脉冲间隔缩小; 而在微片激光器中仅输出脉冲序列的幅值有明显变化(但还是小于固体激光棒中的幅值变化), 输出脉宽和脉冲间隔在前 10 个脉冲变化很小, 经计算脉冲间隔保持在  $350 \text{ ns}$ , 脉冲半峰全宽(FWHM)保持在  $40 \text{ ns}$  左右。2) 微片激光器发射脉冲时的反转粒子数  $\Delta n^*$  在阈值附近, 远低于激光棒发射脉冲, 特别是首脉冲时的反转粒子数水平——将近 2 倍于阈值。3) 总体来讲相对于激光棒, 微片激光器中发射激光脉冲的时间间隔较短。

上述区别的原因是: 微片激光器腔长短, 自发辐射光子进入激光模式比例  $B \approx \left(\frac{\omega_0}{l}\right)^2 / (4\pi)$  非常大, 激光在腔内单次往返的时间远小于激光棒中单次往返的时间, 导致在相同反射率输出镜时微片激光器更容易输出激光脉冲。于是相对于激光棒, 微片能在反转粒子数超过阈值后很短时间就能输出激光脉冲, 随后反转粒子数又落到阈值之下(但反转粒子数仍在阈值附近)。周而复始, 反转粒子数在阈值附近以较小幅度振荡并发射脉冲序列, 脉冲序列的阻尼也相对较小。在激光棒中自发辐射光子进入激光模式的比例  $B \approx \left(\frac{\omega_0}{l}\right)^2 / (4\pi)$  大大减少; 脉冲在腔内的单次往返时间长。因此建立脉冲特别是第一个脉冲时需要更高反转粒子数水平, 往往是在  $\Delta n^*$  超过阈值许多, 于是相应发射脉冲序列时阻尼也较大, 如图 1(a)。

因此微片激光器在发射激光序列时阻尼较小, 特别是前 10 个脉冲的脉宽和脉冲间隔几乎保持不变; 相对于激光棒有明显的上下波动的反转粒子数

密度, 如图 1(a), 微片激光器中的反转粒子数密度上下波动幅度较小, 如图 1(b); 同样微片激光器发射的激光单脉冲能量也小得多, 脉冲序列间隔相应也短。

### 3.2 增益开关微片激光器的输出脉冲与小幅度变化抽运条件的关系

抽运条件主要包括: 直流抽运速率、脉冲抽运速率、抽运脉宽和抽运频率。在模拟中保持直流抽运和脉冲抽运速率在小范围内变化, 使输出脉冲宽度变化可以忽略不计<sup>[5,6,11,12]</sup>, 确保抽运条件的变化只对输出脉冲个数产生影响。同时将抽运脉冲重复频率保持在  $1 \text{ kHz}$ , 抽运脉宽小于  $30 \mu\text{s}$ , 所以还可以将抽运脉冲序列分立成单个抽运周期来考虑(以下讨论都在一个抽运周期内)。于是抽运源的三个可变抽运参量分别为: 直流抽运速率  $W_D^*$ , 脉冲抽运速率  $W_p^*$  和抽运脉宽  $t_p$ 。

3.2.1 固定直流抽运速率  $W_D^*$  和抽运脉宽  $t_p$ , 输出脉冲个数随脉冲抽运速率  $W_p^*$  的增加而增加, 首脉冲的输出时延随  $W_p^*$  的增加而缩短。

图 2(a) 为固定  $W_D^* = 0.75$ ,  $t_p = 20 \mu\text{s}$ , 当  $W_p^*$  从  $0.66$  增加到  $0.77$ , 即整体抽运速率由  $1.41$  增加到  $1.52$  时, 在单个抽运周期内输出的激光脉冲从 1 个

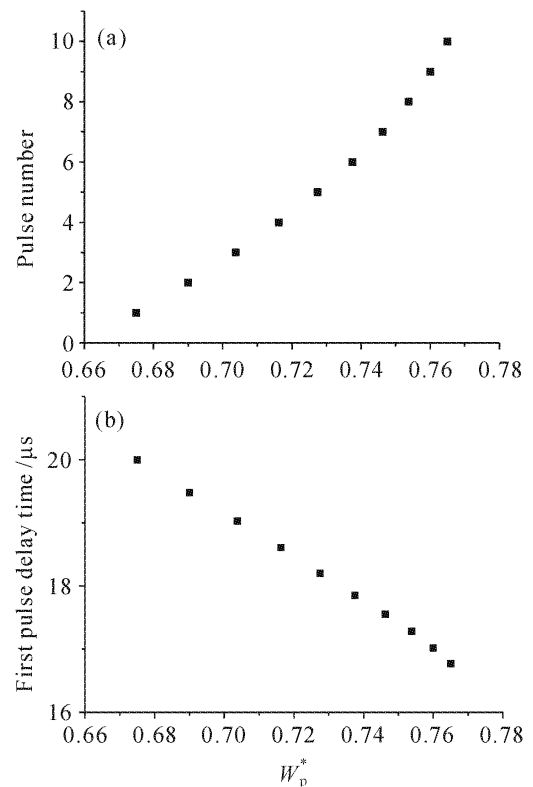


图 2 输出脉冲的个数(a)和首脉冲输出时延(b)与脉冲抽运速率  $W_p^*$  的关系

Fig. 2 Relationship of the pulses number (a) and the first pulse delay time (b) to  $W_p^*$

增加到 10 个。这种增加趋势是非线性的,主要原因是:随着时间的推移,阻尼振荡使一部分脉冲的能量变成稳定态的能量,脉冲幅度减少,并使脉冲间隔缩短(如图 1),使脉冲的增加速度加快。

图 2(b)显示随着  $W_p^*$  和整体抽运速率的增加,首脉冲的输出时延缩短。所以在固定的抽运脉宽内将有更多的时间使得反转粒子数再次增大并超过阈值,产生更多子脉冲。为此也可以说多脉冲输出与抽运脉宽和输出时延的时间差相关。从变化趋势上看,首脉冲时延的缩短程度随  $W_p^*$  的增加减弱,即首脉冲时延缩短程度随脉冲个数的增加而减弱。这是因为阻尼振荡使输出脉冲序列间隔缩短造成的。这与图 2(a)的结论一致。

3.2.2 固定脉冲抽运速率  $W_p^*$  和抽运脉宽  $t_p$ , 输出脉冲个数随直流抽运速率  $W_D^*$  增加而增加,首脉冲的输出时延随直流抽运速率  $W_D^*$  的增加而缩短。

图 3(a)为固定  $W_p^* = 0.66, t_p = 20 \mu\text{s}$ , 当  $W_D^*$  从 0.75 到 0.81 变化时,在单个抽运周期内输出的子脉冲从 1 个增加到 10 个。比较图 3(a)和图 2(a), 在 10 个脉冲输出时图 3 中整体的抽运速率(1.47 倍),比图 2 中的整体抽运速率(1.52 倍)小。这是因为当  $W_D^*$  增加,微片激光器的预抽运水平和整体的

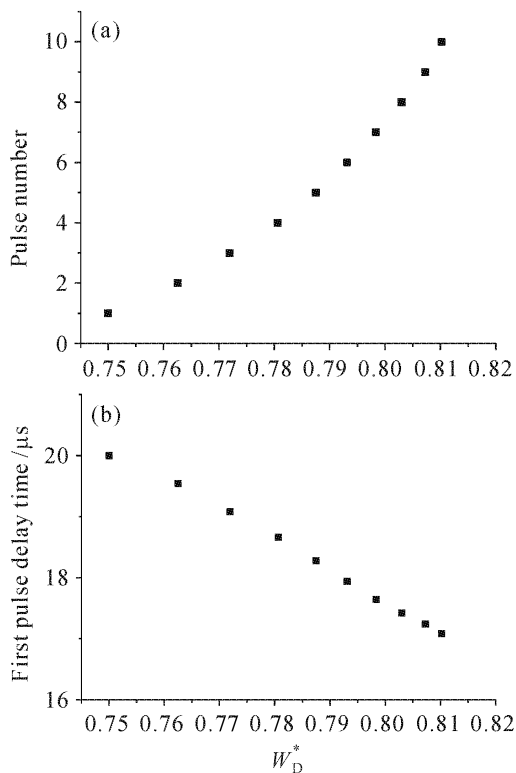


图 3 输出脉冲的个数(a)和首脉冲输出时延(b)与直流抽运速率  $W_D^*$  的关系

Fig. 3 Relationship of the pulses number (a) and the first pulse delay time (b) to  $W_D^*$

抽运速率都提高;而增加  $W_p^*$  仅提高激光器的整体抽运水平,对预抽运并无贡献。在较高的预抽运水平下,反转粒子数到达阈值所需要叠加的脉冲抽运速率更低,即所需的整体抽运水平更低。所以图 3 中在相对较高预抽运速率下,同样输出 10 个脉冲的时候所要求的整体抽运速率相对于图 2 要低。

同样从图 3 中看出脉冲个数随着  $W_D^*$  增加趋势也是非线性的,主要原因也是阻尼振荡使脉冲序列的能量减小的缘故,首脉冲的输出时延的非线性减小也说明了这个问题。

3.2.3 固定脉冲抽运速率  $W_p^*$  和直流抽运速率  $W_D^*$  时,输出脉冲个数随脉冲抽运脉宽  $t_p$  的增加而增加,首脉冲的输出时延不变。

图 4(a)为固定  $W_p^* = 0.66, W_D^* = 0.75$ , 当  $t_p$  从  $20 \mu\text{s}$  到  $24 \mu\text{s}$  变化时输出脉冲个数从 1 个增加到 10 个,其趋势同样是非线性的,也是因为阻尼振荡造成脉冲间隔缩短。图 4(b)中的首脉冲时延不变,因为在  $W_p^*, W_D^*$  不变的情况下,  $t_p$  的变化不会对首脉冲的输出时延产生任何影响。

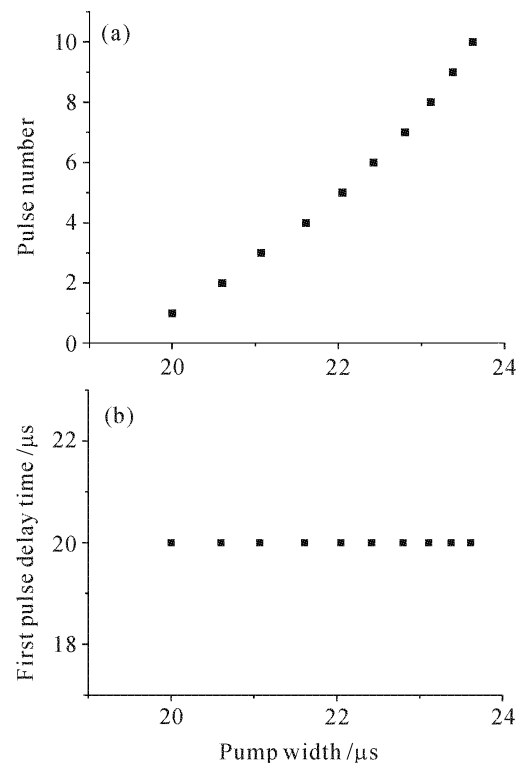


图 4 输出脉冲的个数(a)和首脉冲输出时延(b)与脉冲抽运宽度  $t_p$  的关系

Fig. 4 Relationship of the pulses number (a) and the first pulse delay time (b) to the pulses pump width  $t_p$

## 4 实验装置和结果

实验原理装置如图 5 所示,增益介质为掺杂原

子数分数 1% 的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体, 尺寸为  $\phi 20 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 。晶体通光方向两端面均为平面, 平行度小于  $5''$ , 一端镀  $1.064 \mu\text{m}$  全反膜 ( $R > 99.8\%$ ) 作为谐振腔的全反射后腔镜, 同时在这一端镀  $808 \text{ nm}$  增透膜 ( $T > 96\%$ )。另一端面镀  $1.064 \mu\text{m}$  高反膜 ( $R = 92\%$ ), 作为谐振腔的输出镜。谐振腔长度即为晶体通光方向, 厚度为  $1 \text{ mm}$ 。

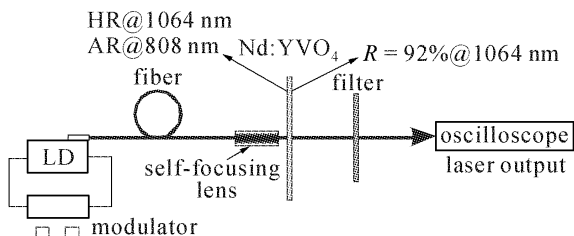


图 5 实验装置图

Fig. 5 Experimental setup

实验中抽运源是光纤耦合输出激光二极管, 波长为  $808 \text{ nm}$ , 通过外接控制接口与信号发生器相连, 可以在直流电流基础上叠加调制脉冲电流共同驱动激光二极管实现连续光基础上的脉冲光输出。其中调制脉冲电流的脉宽在  $0.8 \mu\text{s} \sim 1 \text{ ms}$  之间, 重复频率在  $1 \text{ Hz} \sim 4 \text{ kHz}$  之间连续可调, 驱动电流总和不得超过  $35 \text{ A}$ 。抽运光脉冲的脉宽和重复频率与调制电流的脉宽和重复频率相同。抽运光耦合系统采用一个自聚焦透镜, 耦合效率为  $85\%$ 。实验中将直流抽运电流保持在  $5.6 \sim 6.0 \text{ A}$ , 脉冲抽运电流保持在  $6.0 \sim 6.4 \text{ A}$ , 在此范围内激光二极管的输出功率与输入电流保持严格线性关系。

在接收方向上采用光电二极管 (PIN) 接收  $1.064 \mu\text{m}$  激光脉冲, 在示波器上显示脉冲波形, 如图 6 所示。实验中微片直流电阈值, 可以由仅加直流抽运时光电二极管刚输出信号或者上转换片上刚看到光斑时的电流决定, 实验测得为  $8.0 \text{ A}$ 。

图 6(a) 是激光二极管的调制电流为  $5.6 + 6.0 \text{ A}$ , 抽运脉宽为  $20 \mu\text{s}$  时, 单个激光脉冲即理想增益开关输出的情况。图 6(a) 中激光脉冲在抽运脉冲下降沿后大约  $600 \text{ ns}$  发射, 同时观察图 6(b), (c), (e) 中最后输出的子脉冲也在抽运脉冲下降沿后  $600 \text{ ns}$  左右发射。主要是因为系统的整体时延造成的 (系统电路时延约  $580 \text{ ns}$ )。

图 6(b) 是固定脉冲抽运电流为  $6.0 \text{ A}$  和抽运脉宽为  $20 \mu\text{s}$ , 增加直流抽运电流从  $5.6 \sim 6.0 \text{ A}$ , 输出脉冲个数不断增加, 当直流抽运电流增加到  $6.0 \text{ A}$  时, 即抽运电流增加到  $6.0 + 6.0 \text{ A}$  时有 10 个

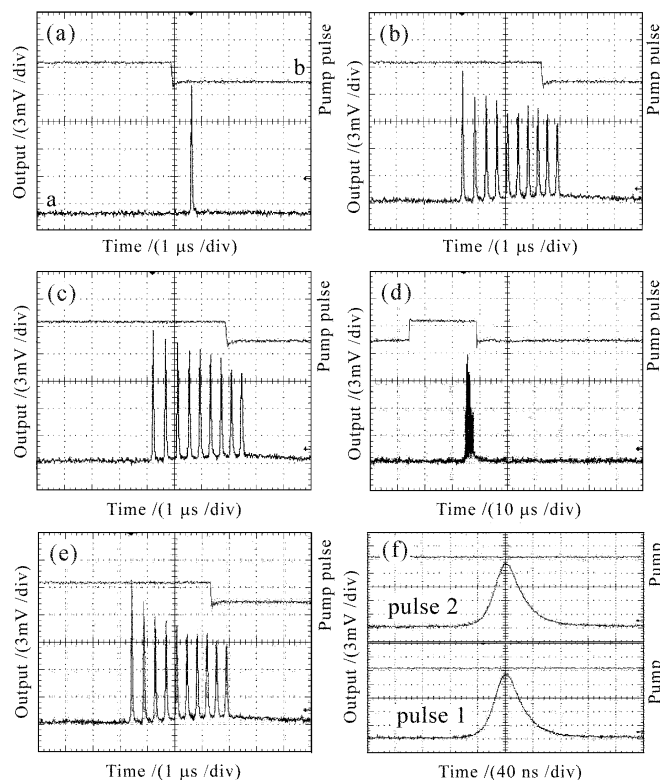


图 6 不同激光二极管输入电流下的激光脉冲输出 ((a) ~ (e)) 和实验中最小脉宽 (上), 最大脉宽 (下) 的比较 (f) 上半部分为抽运脉冲; 下半部分是激光脉冲

Fig. 6 Laser output pulses with different LD input current (a) ~ (e), and comparison between the minimum (upper) and maximum (lower) of the laser pulse FWHM (f)

pumping pulses are in upper and laser pulse are in the lower

脉冲输出。输出脉冲序列的幅度正如模拟计算所得随着时间的推移变得更小, 脉冲间隔也变得更小。

图 6(c) 是抽运电流为  $5.6 + 6.4 \text{ A}$ , 抽运脉宽为  $20 \mu\text{s}$  时的输出波形。发现图 6(b) 和 (c) 中的整体抽运电流相同且都为  $12 \text{ A}$ , 但发现图 6(c) 中输出的脉冲个数为 9 个, 图 6(b) 中为 10 个。这是因为虽然图 6(c) 中整体抽运电流与图 6(b) 相同, 但由于图 6(c) 预抽运水平较低, 其反转粒子数从较低预抽运水平到达阈值所需要时间要比图 6(b) 中长, 从而在相同的抽运脉宽时发射比较少的子脉冲。实验结果和理论计算结果基本一致。

图 6(d) 和 (e) 是固定直流抽运和脉冲抽运电流在  $5.6 + 6.0 \text{ A}$ , 增加脉冲抽运宽度从  $20 \mu\text{s}$  到  $23 \mu\text{s}$ , 如图 6(e), 输出脉冲个数从 1 个到 10 个, 如图 6(d)。同样在脉冲序列中发现其幅度符合计算中随时间减少的趋势。而且在图 6(d) 和 (e) 中可以看到首脉冲的时延是不变的, 这与数值计算结果也比较吻合。

图 6(f) 是实验中最小和最大激光脉冲半峰全宽的比较, 其最小值 pulse1 出现在调制电流为  $5.6 + 6.0$  A 时为 40 ns, 最大值 pulse2 出现在调制电流为  $5.6 + 6.4$  A 时为 42 ns。二者相差幅度小于 5%。

## 5 结 论

从速率方程出发, 考虑预抽运(直流抽运)和加脉冲抽运的情况下的增益开关微片激光器, 通过理论计算出当直流抽运速率, 脉冲抽运速率和抽运脉宽小幅度增加时输出的脉冲宽度变化不大, 但在输出子脉冲个数上变化较为明显。计算结果还表明子脉冲数目增加的速率是非线性的, 输出首脉冲时延迟随直流抽运速率和脉冲抽运速率减少也是非线性的。针对这种情况进行了实验, 实验结果和理论计算结果有较好的吻合。

### 参 考 文 献

- 1 Iain T. McKinnie, AnnMarie L. Oien, Don M. Warrington *et al.*.  $Ti^{3+}$  ion concentration and  $Ti:sapphire$  laser performance [J]. *J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(7):1221~1230
- 2 Zhou Fuzheng, Ma Guobin, Shen Liqing *et al.*. Study on the ps gain-switching a semiconductor laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 1994, **43**(4):580~589  
周复正, 马国彬, 沈丽青等. 半导体激光器的微微秒增益开关特性研究[J]. *物理学报*, 1994, **43**(4):580~589
- 3 Wu Qiuyang, Xu Bing, Zhang Zhengquan *et al.*. Analysis of the temporal performance of a gain-switched four-level laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(8):673~676  
吴秋阳, 徐冰, 张正泉等. 增益开关型四能级激光器的时间特性分析 [J]. *中国激光*, 1998, **A25**(8):673~676
- 4 Sheng Fang, Li Dongming, Chen Jun *et al.*. Study on a gain-switched  $Nd^{3+}:YVO_4$  microchip laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(Suppl.):61~63  
盛芳, 李东明, 陈军等. 增益开关型  $Nd^{3+}:YVO_4$  微片激光器的研究 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(增刊):61~63
- 5 Sheng Fang, Chen Jun, Ge Jianhong *et al.*. Effect of pumping conditions on output characteristics of a gain-switched  $Nd^{3+}:YVO_4$  laser [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(4):28~31  
盛芳, 陈军, 葛剑虹等. 抽运条件对  $Nd^{3+}:YVO_4$  增益开关激光器输出特性的影响 [J]. *光电工程*, 2005, **32**(4):28~31
- 6 Fang Sheng, Jun Chen, Jianhong Ge. Gain-switching of a LD end-pumped  $Nd^{3+}:YVO_4$  microchip laser [C]. *SPIE*, 2005, **5628**:176~181
- 7 Jun Zhou, Ting Yu, Jingzi Bi *et al.*. Diode pumped injection seeded  $Nd:YAG$  laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(5):292~293
- 8 Xu Fanghua, Ma Lili, Wang Zhengping *et al.*. Laser diode-pumped  $Nd:GdVO_4$  microchip laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(9):1166~1168  
徐方华, 马丽丽, 王正平等. 激光二极管抽运  $Nd:GdVO_4$  微片激光器 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(9):1166~1168
- 9 Li Haifeng, Zhou Rui, Zhao Pu *et al.*. 1386 nm continuous wave output from laser diode end-pumped 1386 nm  $Nd:YVO_4$  laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7):1069~1072  
李海峰, 周睿, 赵璞等. 激光二极管端面抽运  $Nd:YVO_4$  实现 1386 nm 连续波激光输出 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(7):1069~1072
- 10 Walter Koechner. *Solid-State Laser Engineering* [M]. Beijing: Science Press, 2002. 352~410  
W. 克希耐尔. *固体激光工程(中译本)* [M]. 北京: 科学出版社, 2002. 352~410
- 11 D. M. Sিনnett. An analysis of the maser oscillator equations [J]. *J. Appl. Phys.*, 1962, **33**(4):1578~1581
- 12 F. J. McClung, R. W. Hellwarth. Characteristics of giant optical pulsations from ruby [C]. *Proc. IEEE*, 1963, **51**(1):46~53