

连续激光二极管抽运的 调 Q 高重复率 Nd·YAG 激光器研究*

王石语^{1), 2)} 过 振¹⁾ 文建国¹⁾ 蔡德芳¹⁾ 陈 梁¹⁾

1), 西安电子科技大学技术物理系, 西安 710071
2), 西安交通大学电波所, 西安 710048

摘 要 报道了由 15 W 连续激光二极管端面抽运的 Nd·YAG 激光器, 自由运转时输出功率达到 4.5 W, 斜效率达到 44%, 声光调 Q 的重复率由 3~65 kHz 可变。10 kHz 时, 峰值功率达到 28 kW, 脉宽 8 ns。还分析了激光二极管抽运的声光调 Q 高重复率激光器设计中的几个重要因素。从理论上分析了不同频率时激光单脉冲能量、斜效率产生区别的主要原因。

关键词 激光二极管抽运, 调 Q 开关, 高重复率。

1 引 言

激光二极管抽运调 Q Nd·YAG 激光器效率高, 热耗小。使用大功率激光二极管作为抽运源, 可以获得高重复率、大峰值功率的窄脉冲激光。这种激光器结构紧凑, 稳定性好, 寿命长, 有着广泛的应用前景。目前常使用的调 Q 方法, 有电光调 Q 、被动调 Q 、声光调 Q ^[1-7]。电光调 Q 的速度快, 但要用到高压电源, 某些场合应用不便; 被动调 Q 重复率很高, 但重复率的稳定性不太好, 重复率的连续调节不容易做到; 声光调 Q 可以克服上述缺点, 得到比较理想的高重复率输出激光。在国内文献的报道中^[8-12], 激光二极管抽运的声光调 Q 激光器, 已经达到 30 kHz 的重复率; 当重复率为 1 kHz 时, 获得最窄的脉宽为 12 ns、最高峰值功率为 12.1 kW^[12]。我们综合考虑激光二极管抽运的声光调 Q 激光器设计中的各种因素, 采用 15 W 连续激光二极管抽运 Nd·YAG 晶体, 研制出重复频率 3~65 kHz 连续可调的声光调 Q Nd·YAG 激光器。在 3 kHz 重复频率时, 获得最窄脉冲宽度 6.4 ns, 最大峰值功率 60.4 kW; 10 kHz 重复频率时, 获得脉冲宽度为 8 ns, 峰值功率为 28 kW; 在 50 kHz 重复频率时, 获得脉冲宽度为 27 ns, 峰值功率为 2.25 kW。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示。

激光二极管由一维线状排列的 24 个发光区组成, 每个发光区域为 $200\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$, 相邻区域的间隔为 $190\ \mu\text{m}$, 24 个发光区域的总长度为 10 mm, 二极管激光的发散角为 $40^\circ \times 10^\circ$ 。对于这样的激光必须经过空间整形才可用以端面抽运。

* 国家自然科学基金资助课题 (60078022)。

收稿日期: 1998-12-07; 收到修改稿日期: 1999-06-25

整形技术包括两个部分。第一步采用多根光纤耦合技术,将 24 个光斑分别耦合进 24 根独立的光纤,将光纤输出端按圆状排列,获得直径 1.16 mm、发散角 16° 的端面输出。第二步采用组合透镜对该光束耦合,获得图 2 形状的抽运光空间分布。图内 D 为抽运光束在晶体表面处的直径。

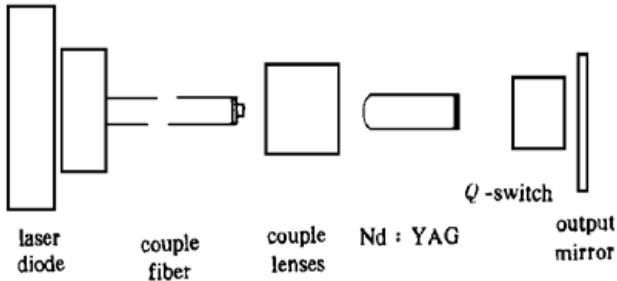


Fig. 1 The test device

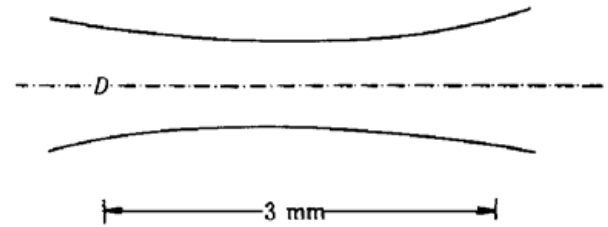


Fig. 2 The shape of pumping laser beam

谐振腔采用凹平结构,声光晶体采用 SF_6 材料。选择 SF_6 是基于短谐振腔的考虑。这种材料的声光优值 $M_2 = 4.51 \times 10^{-18} \text{ s}^3/\text{g}^{[13]}$ 。根据公式^[13]

$$\eta = \frac{\pi^2 M_2 L}{2\lambda^2 H} P, \quad (1)$$

式中, $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, L 为声光晶体的通光长度, H 为宽度, P 为超声功率。取 $P = 10 \text{ W}$, $L = 16 \text{ mm}$, 设计出衍射效率 $\eta \approx 40\%$ 的声光开关。该调 Q 系统电脉冲上升时间 40 ns , 电脉冲宽度 $3 \mu\text{s}$ 。采用这种高声光优值材料,在保证衍射效率的基础上,缩短了声光晶体通光长度,进而缩短了谐振腔长度。

3 影响器件性能的因素

3.1 抽运光密度对激光脉冲的影响

在抽运功率确定的情况下,激光介质吸收长度内平均抽运光斑大小,对调 Q 激光输出产生非常明显的影响。本文研究了抽运光斑的直径 D 对激光阈值电流和脉冲宽度的影响。在保持瑞利长度为 3 mm 的条件下实验结果如图 3、图 4 所示。

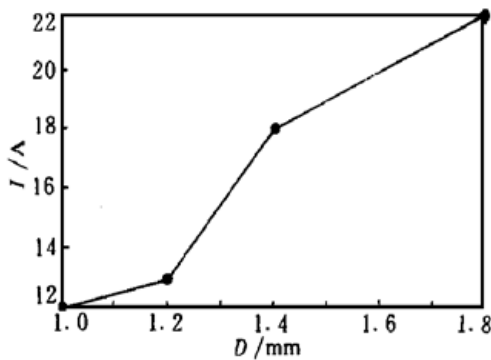


Fig. 3 The threshold current versus pumping beam's diameter

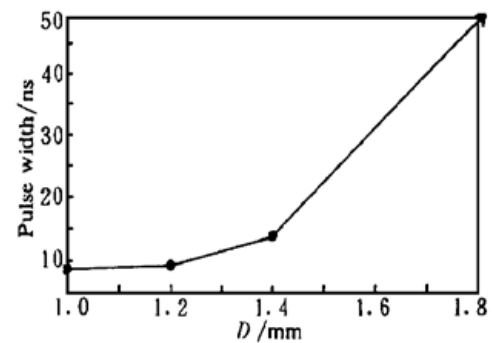


Fig. 4 The pulse width versus the pumping beam's diameter

由图 3 可以看出,随着抽运光斑直径的增加,阈值电流变大。由图 4 可以看出抽运功率确定时,增大抽运光直径,脉冲宽度变大。

根据图 3 和图 4 的数据我们将抽运光的直径调节到 0.8 mm 左右。

3.2 调 Q 脉冲的建立时间与超声波开关时间的匹配问题

在声光调 Q 的过程中,涉及到两个时间。一个是由超声波开始消失到 Q 脉冲形成所需要的时间,称为脉冲建立时间 T_D ^[14]。在这段时间激光系统需要积累起足够的光子数以激发突发的受激辐射。另一个时间是作用于激光光束的超声场完全消失所需要的时间,称为超声波开关时间 T_s (包括高频电路关断时间和超声波渡越时间)。在本文的短谐振腔中, T_D 接近于 T_s 。为了获得峰值功率大、宽窄度的脉冲,我们在实验装置中尽量减小前端面的振荡光光束半径 $2w$, 以使得 T_s 比较小。

3.3 凹-平腔结构的优越性

如前所述,为了保证调 Q 效果,前端面 w 应选择较小值。但是,在 YAG 晶体的后端面振荡光光束直径 $2w'$ 不能同抽运光直径相差太远,以免影响输出功率。选择凹-平腔,使得谐振腔的后端面 $2w'$ 较大,前端面 $2w$ 较小。实际装置中后端面的凹面镜效果由二方面因素决定。一方面我们将 YAG 晶体后端面做成球面,另一方面由于端面抽运的热透镜效应集中在后端面,也可以等效成一个凹面镜。两者综合的效果可以利用激光发散角的值来推测。

由文献 [15] 可以导出前端面(束腰)处:

$$w = \frac{2\lambda}{\pi\theta} \quad (2)$$

后端面:

$$w' = w \left[1 + \left(\frac{M}{\pi w} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (3)$$

根据实验数据,抽运功率 15 W 时,发散角 $\theta = 3.5 \times 10^{-3}$, 于是有 $2w = 0.38 \text{ mm}$, $2w' = 0.49 \text{ mm}$ 。

4 实验结果

在图 1 所示的结构中,选用以下数据进行实验,腔长 8.5 cm, 输出镜透过率为 15%, 抽运光光斑直径 0.8 mm。

图 5 为 10 kHz 重复频率时示波器显示的调 Q 脉冲波形。图 6 给出了自由运转及不同重复频率时,激光平均输出功率与注入电流的关系曲线,斜率效率见表 1。图 7 为不同重复频率下,调 Q 脉冲宽度与注入电流的关系曲线。

图 8 为注入电流 25 A 时,峰值功率、脉冲宽度随重复频率变化的实验曲线。在频率为 3 kHz 时,峰值功率达到 60.4 kW, 脉冲宽度 6.4 ns。

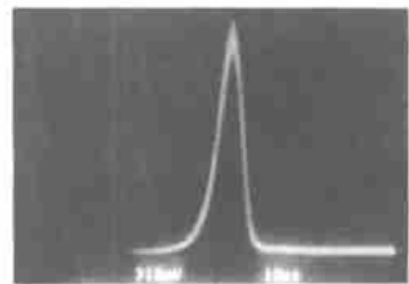


Fig. 5 The output pulse of 10 kHz at the drive current 25 A

Table 1. The slope efficiency versus the pulse repetition rate

repetition rate/kHz	3	5	8	10	30	50	65	free operation
slope efficiency/%	13	19	22	23	26	33	36	44

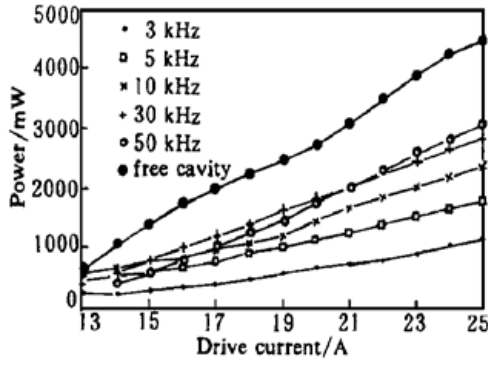


Fig. 6 The output power versus the drive current at different pulse repetition rate

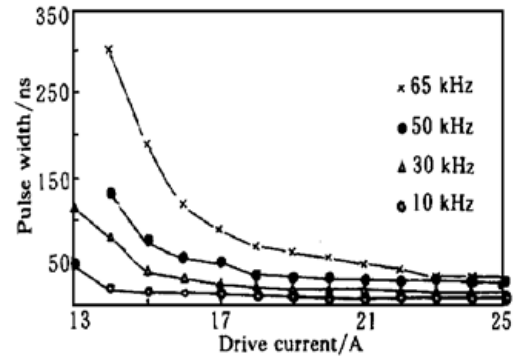


Fig. 7 The pulse width versus the drive current at different pulse repetition rate

在调 Q 的过程中, 保持抽运功率不变, 随着重复频率的变化, 单脉冲能量有着非常大的区别。图 9 给出了注入电流为 25 A 时, 不同频率下的单脉冲能量实验值。

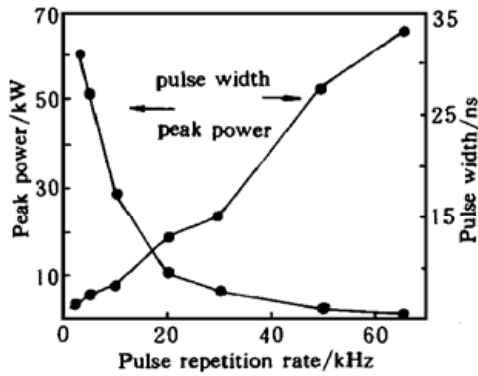


Fig. 8 Peak power and pulse width versus the repetition rate at the drive current 25 A

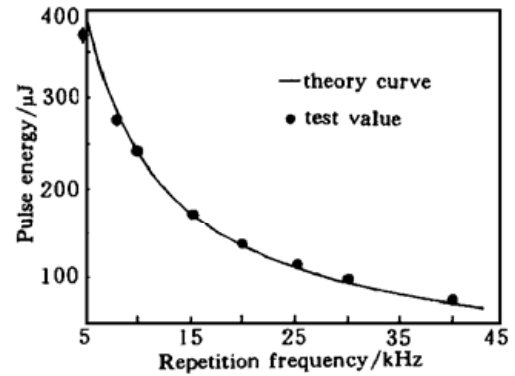


Fig. 9 The pulse energy versus the pulse repetition frequency

为了研究这种现象, 分析在 Q 开关打开以前, 反转粒子的积累过程。引入参数 P_N 表示在这种抽运状态下, 单位时间抽运到激光上能级的粒子数; N 表示某时刻的反转粒子数, τ 为上能级寿命。于是

$$dN = (-\frac{1}{\tau}N + P_N) dt, \tag{4}$$

该方程的解为

$$N = C_0 \exp(-\frac{t}{\tau}) + \tau P_N, \tag{5}$$

取初始积累时的上能级粒子数为 N_1 , 即有

$$N = (N_1 - \tau P_N) \exp(-\frac{t}{\tau}) + \tau P_N. \tag{6}$$

假设 Q 开关打开以后, 大于 N_1 的粒子全部产生受激跃迁, 于是产生的激光光子数为

$$\Phi = k(N - N_1) = k(\tau P_N - N_1)[1 - \exp(-\frac{t}{\tau})], \tag{7}$$

式中 k 为转换系数。假设在不同重复率时, P_N 、 N_1 相同, 则不同重复率的单脉冲能量间的关系符合函数 $[1 - \exp(-\frac{t}{\tau})]$ 给出的比例系数。以重复率 $f = 10 \text{ kHz}$ 时的单脉冲能量实验数据代入上式推导出其他频率时的单脉冲能量, 作理论曲线于图 9 可以看出同实验值符合得较

好。

从表 1 可以看出随着重复频率的减小,斜率效率有降低的趋势,这可以认为在反转粒子的积累过程中,部分反转粒子以非受激跃迁的形式跃迁回基态所致。为了验证这一点,作如下理论计算。在斜效率的计算中,用到平均功率。利用上面给出的单脉冲能量,可以计算出不同频率时的平均功率

$$P_f = k(N - N_1)H\nu f, \quad (8)$$

将 N 的表达式代入,则有

$$P_f = k(P_N\tau - N_1)h\nu[1 - \exp(-\frac{t}{\tau})]f, \quad (9)$$

于是斜效率可计算如下

$$\epsilon = \frac{P_f}{\Delta E} = \frac{1}{\Delta E}k(P_N\tau - N_1)h\nu f[1 - \exp(-\frac{t}{\tau})]. \quad (10)$$

根据 (10) 式,由 $f = 20$ kHz 时的斜效率可以外推其他频率的斜效率,将理论计算值和表 1 中的有关实验值绘成图 10,可以看出理论值和实验值符合得非常好。在图 10 中没有考虑 $f > 40$ kHz 以上的情况,这是因为在用高频调制时使用了不同的谐振腔,故失去了对比的意义。

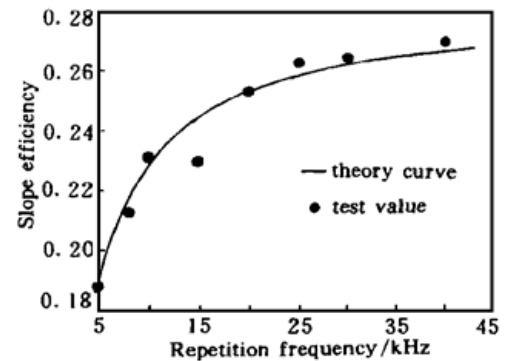


Fig. 10 The slope efficiency versus the pulse repetition frequency

结 论 综上所述,本文采用连续激光二极管抽运 Nd:YAG,获得 4.5 W 的 $1.064 \mu\text{m}$ 激光输出,斜效率达 44%。采用 SF₆ 声光调 Q 开关,在重复率 10 kHz 时,脉冲宽度 8 ns,峰值功率 28 kW,斜效率 28%。重复率最高达到 65 kHz。研究了连续激光二极管抽运固体声光调 Q 激光器的几个关键问题,通过调整抽运光斑形状和谐振腔结构,在高重复率调 Q 激光器中获得了窄脉冲激光输出。本文从理论上分析了不同重复率时影响单脉冲能量、斜效率的因素,理论值和实验结果吻合。

参 考 文 献

- [1] Gerstenberger D C, Drbsshoff A, Wallace R W. High-peak-power operation of a diode-pumped Q-switched Nd:YAG laser. *Opt. Lett.*, 1990, **15** (7) : 124~ 126
- [2] Tidwell S C, Seamans J F, Hamilton C E. Efficient, 15-W output power, diode-end-pumped Nd:YAG laser. *Opt. Lett.*, 1991, **16** (8) : 584~ 586
- [3] Zayhowski J J, Dill III C. Diode-pumped microchip lasers electro-optically Q switched at high pulse repetition rates. *Opt. Lett.*, 1992, **17** (17) : 1201~ 1203
- [4] Chen Y C, Li Shiqun, Lee K K *et al.*. Self-stabilized single-longitudinal-mode operation in a self-Q-switched Cr, Nd:YAG lasers. *Opt. Lett.*, 1993, **18** (17) : 1418~ 1419
- [5] Kajava T T, Geata A L. Q switching of a diode-pumped Nd:YAG lasers with GaAs. *Opt. Lett.*, 1996, **21** (16) : 1244~ 1246
- [6] Afzal R, Yu A W, Zayhowski J J *et al.*. Single-mode high-peak-power passively Q-switched diode-pumped Nd:YAG lasers. *Opt. Lett.*, 1997, **22** (17) : 1314~ 1316
- [7] 陈 伟, 徐 军, 杨香香等. Cr:YAG 被动调 Q 连续 Nd:YAG 激光的稳定性. *中国激光*, 1998, **25** (1) : 7~ 11

- [9] 周复正, 朱三义, 马建伟等. 量子阱激光二极管抽运固体 Nd·YLF 激光器的调 Q. 中国激光, 1992, **19** (12) : 881~ 885
- [10] 胡文涛, 周复正, 陈有明等. LD 抽运 Nd·YAG 激光器的连续激光输出和高重复频率调 Q. 光学学报, 1994, **14** (12) : 1281~ 1284
- [11] 陈有明, 周复正, 胡文涛等. 准连续 60 W 半导体激光侧面抽运声光调 Q Nd·YAG 板条激光器研究. 光学学报, 1995, **15** (5) : 540~ 543
- [12] 生卫东, 吴 峰, 刘宏伟等. 激光二极管抽运的高重复频率 Nd·YAG 激光器. 光学学报, 1996, **16** (5) : 595~ 597
- [13] 徐介平. 声光器件的原理设计 and 应用. 北京: 科学出版社, 1982. 67, 340
- [14] Walter Koechner. *Solid-State Laser Engineering*, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1996. 459~ 462, 487~ 489
- [15] 沈 柯. 激光原理教程, 北京: 北京工业学院出版社, 1986, 189~ 191, 303

CW Diode Laser Pumped Q-Switched High Repetition Rate Nd·YAG Laser

Wang Shiyu^{1), 2)} Guo Zhen¹⁾ Wen Jianguo¹⁾
Cai Defang¹⁾ Chen Liang¹⁾

1), *Applied Physics Department, Xidian University, Xi'an 710071*
2), *Microwave Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049*

(Received 7 December 1998; revised 25 June 1999)

Abstract A 15 W CW diode laser end-pumped Nd·YAG laser is reported. The output power of 4.5 W and the slope efficiency of 44% are obtained in free running cavity. By using Q-switch the peak power of 28 kW and pulse width of 8 ns are obtained at repetition rate of 10 kHz. The repetition rate varied from 3 kHz to 65 kHz. Several important factors in cavity design are analyzed. The dependences of pulse energy and slope efficiency on the repetition rates are analyzed. The theory conclusions fit well with the experimental results.

Key words diode laser pumping, Q-switch, high repetition rate.