

文章编号: 0258-7025(2006)11-1441-06

激光二极管连续抽运电光调 Q Nd:YVO₄激光器

王春雨, 李小莉, 臧华国, 朱小磊, 陆雨田

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 报道了全固态激光器连续抽运高重复率电光调 Q 的实验和理论分析结果。用 LGS(La₃Ga₅SiO₁₄) 晶体作电光调 Q 元件, 在激光二极管(LD)端面抽运 Nd:YVO₄ 激光器中实现了较高重复率的电光调 Q 输出。实验中在 10⁴ Hz 重复率下, 抽运功率为 28 W 时, 平均功率超过 5 W, 脉冲宽度为 7 ns, 峰值功率为 70 kW, 并对不同重复率时的脉冲输出进行了比较, 在低重复率下, 脉宽 < 6.5 ns, 峰值功率超过 100 kW。在理论上, 通过对连续抽运时的电光调 Q 速率方程进行修正, 并考虑放大自发辐射(ASE) 的影响, 对调 Q 激光器的储能过程和脉冲输出特性进行了模拟, 所得结果和实验数据能够很好地吻合。最后, 利用 LasCad 软件对晶体的热效应进行了模拟, 并利用临界稳定腔方法对热焦距进行了测量, 测量和模拟结果基本一致。

关键词 激光器; Nd:YVO₄ 激光器; 电光调 Q; 速率方程; 放大自发辐射; 高重复率

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

Laser Diode Continuous-Wave-Pumped Repetitive Electro-Optic Q-Switched Nd:YVO₄ Laser

WANG Chun-yu, LI Xiao-li, ZANG Hua-guo, ZHU Xiao-lei, LU Yu-tian

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract A laser diode (LD) continuous-wave (CW) end-pumped high repetition rate electro-optic (EO) Q-switched Nd:YVO₄ laser was experimentally and theoretically studied. In experiments, using LGS(La₃Ga₅SiO₁₄) single crystal as an EO Q-switch, with 28 W pump power, an output pulse train with 70 kW peak power, about 7 ns pulse duration and more than 5 W average power was obtained at 10⁴ Hz repetition rate. And the Q-switched output performance at different repetition rate was compared. In theory, by solving the amendatory actively Q-switched rate equations, taking amplified spontaneous emission (ASE) into account, a series of results consistent with experiments were achieved. In the last, the thermal lens effect of end-pumped solid state laser was simulated by LasCad software and measured through experiments, the calculation results were almost identical to the experimental values.

Key words lasers; Nd:YVO₄ laser; electro-optic Q-switch; rate-equations; amplified spontaneous emission; high repetition rate

1 引言

激光二极管(LD)抽运的固体激光器(DPSSL)光-光转换效率高、光束质量好、结构紧凑、寿命长、使用和维护方便, 在众多领域中都得到了广泛应用。

尤其是连续抽运的重复 Q 开关固体激光器, 在通信、测距等空间领域以及打标、抛光、焊接等微加工应用中都是一种广泛使用的激光系统。声光 Q 开关和被动 Q 开关比较适合连续抽运重复调 Q 运转, 容易获得较高的重复频率, 因此常用的重复调 Q 激光

收稿日期: 2006-03-27; 收到修改稿日期: 2006-06-01

作者简介: 王春雨(1974—), 男, 黑龙江肇东人, 中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生, 主要从事激光二极管抽运固体激光器及相关器件的研究。E-mail: wangchy74@hotmail.com

导师简介: 陆雨田(1943—), 男, 江苏常州人, 中国科学院上海光学精密机械研究所研究员, 博士生导师, 目前主要从事激光物理与激光技术方面的研究。E-mail: luyutian@mail.shcnc.ac.cn

器都是以声光 Q 开关和被动 Q 开关为调 Q 元件的^[1~4]。但声光 Q 开关由于开关速度慢,形成的脉冲宽度一般比较宽;而被动 Q 开关工作稳定性很差,不利于应用。电光 Q 开关可以弥补上述不足,得到稳定的窄脉冲输出,在应用中有独特的优势。由于电光调 Q 需要在腔内插入起偏器、检偏器及泡克尔斯盒等元件,大大增加了谐振腔损耗,因此高增益低阈值和偏振输出的 Nd:YVO₄ 晶体具有特殊的优势,目前关于激光二极管抽运的固体激光器连续抽运电光高重复率调 Q 的报道几乎都是以 Nd:YVO₄ 为增益介质的^[5~8]。文献[9]为了实现 1.5 μm 波段输出而采用了 Er:YAG 为增益介质。理论方面,早在 1970 年,R. B. Chesler 等^[10]就曾对连续抽运声光重复调 Q 的 Nd:YAG 激光器进行了分析,尽管其结果具有普遍的指导意义,但在电光调 Q 的 Nd:YVO₄ 激光器中,仍会有一些不同,而且在连续抽运条件下,当重复率低于 10⁴ Hz 时,由于储能时间长,因此放大自发辐射(ASE)对上能级储能的影响也会比较严重,必须加以考虑。此外,尽管 Nd:YVO₄ 的偏振输出避免了多余的热致双折射,大大减小了退偏损耗,但由于其导热性能差,在连续抽运条件下,严重的热透镜效应仍将限制激光器以较高的输出功率和较高的重复率工作,因此有必要对其进行分析讨论。

本文将从理论和实验两方面对激光二极管连续端面抽运电光重复调 Q 的 Nd:YVO₄ 激光器进行研究,并对该激光器的热透镜效应进行分析和测量。

2 连续抽运电光调 Q 实验

实验装置如图 1 所示,激光二极管尾纤发出的光经过光学系统聚焦后,从 Nd:YVO₄ 晶体的一个端面进行抽运,Nd:YVO₄ 晶体的尺寸为 4 mm × 4 mm × 8 mm,原子数分数为 0.87%,电光调 Q 元件为山东大学生长的 LGS(La₃Ga₅SiO₁₄)^[11,12] 晶体,它和四分之一波片及检偏器一起构成 Q 开关。实验采用平-平腔结构,输出耦合透过率为 $T = 48.5\%$,腔长为 150 mm。利用这一腔结构,在 10⁴ Hz 重复率下,在激光二极管尾纤输出的抽运功率为 28 W 时,得到了平均功率超过 5 W 的激光输出,单脉冲能量为 0.5 mJ,脉冲宽度为 7 ns,峰值功率超过 70 kW,最大光-光转换效率为 18%。相同抽运条件下,在重复频率小于 4 × 10³ Hz 时,最大脉冲能量可达 0.72 mJ,脉冲宽度小于 6.5 ns,相应的峰值功率超过 100 kW。图 2 给出了 28 W 抽运功率时,实验测得

的脉冲能量、峰值功率、脉冲宽度以及平均功率随重复率的变化关系。由图 2 可见,当重复率低于 4 × 10³ Hz 时,脉冲峰值功率和脉冲能量基本为一常数,当重复率大于 6 × 10³ Hz 时,二者随重复率的增大基本呈线性下降。平均功率则呈现相反的变化趋势,在低重复率时,平均功率线性增长,但当重复率超过 8 × 10³ Hz 时,增长趋于缓慢。而脉冲宽度在低重复率时基本保持不变,在重复率较高时有变大趋向。这些结果都是在理论上可以预计的,下面就通过对连续抽运的调 Q 速率方程进行优化和求解来对此进行细致的分析。

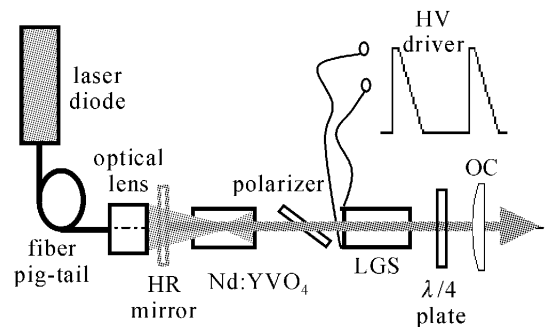


图 1 激光二极管端面抽运电光调 Q Nd:YVO₄ 激光器装置图

Fig. 1 Schematic diagram of LD end-pumped EO Q-switched Nd:YVO₄ laser

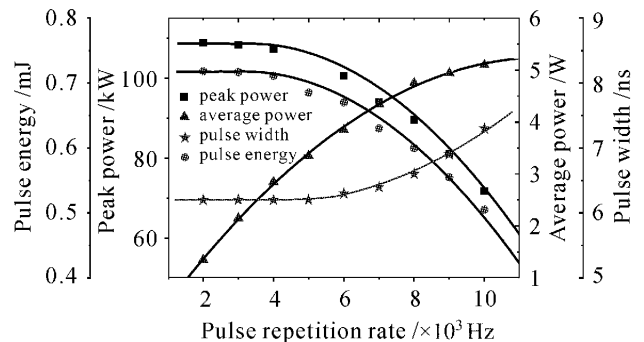


图 2 调 Q 脉冲输出性能随重复率的变化关系

Fig. 2 Q-switched output performance versus repetition rate at 28 W pump power

3 连续抽运电光调 Q 的速率方程分析

调 Q 运转的激光器中,理想四能级系统的反转粒子数密度 n 和腔内光子密度 ϕ 随时间演化的过程由微分方程给出^[13~15]

$$\frac{dn}{dt} = -\sigma_{21}\phi n - \frac{n}{\tau_2}(1 + \sigma_e l_e n) + \omega_p(n_0 - n), \quad (1)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{2\sigma_{21}n\phi l}{t_r} - \frac{\phi}{t_c}, \quad (2)$$

式中 σ_{21} 为激光发射频率处的受激发射截面; τ_2 为上

能级自发辐射寿命; w_p 为抽运速率; l 为增益介质长度; t_r 为谐振腔的特征时间, $t_r = 2l_1/c$, l_1 为谐振腔长度, c 为光速; $t_c = t_r/[L + \ln(1/R)]$ 为腔内光子寿命, L 为腔损耗, R 为输出镜反射率; n_0 为总粒子数密度; σ_e, l_e 为考虑放大自发辐射时引入的项, 分别为平均自发辐射截面和平均光子路径长度。文献 [15] 曾分析了放大自发辐射对上能级储能以及脉冲输出性能的影响, 而且可以预测, 当抽运持续时间长时, 放大自发辐射的影响会愈发严重, 在这里会看到

放大自发辐射在连续抽运重复调 Q 激光器中将扮演更加重要的角色。

在单脉冲运转时, 每一次脉冲发射后, 剩余反转粒子数 n_i 有足够的时间弛豫到 0, 因此初始反转粒子数 n_i 只与抽运参数有关, 但在连续抽运情况下, 稳定运转时, n_i 是以 n_t 为初始值建立的, 因此它的解是与脉冲发射过程相关联的。以 n_t 为初始值求解 (1) 式可以得到

$$n(t) = n_0 \frac{(2w_p\tau_2 - bn_t/n_0) - (2w_p\tau_2 - an_t/n_0)\exp(-kt/\tau_2)}{(a + 2gn_t/n_0) - (b + 2gn_t/n_0)\exp(-kt/\tau_2)}, \quad (3)$$

式中 $a = (1 + w_p\tau_2) + k$,

$$b = (1 + w_p\tau_2) - k,$$

$$k = \sqrt{(1 + w_p\tau_2)^2 + 4w_p\tau_2 g},$$

$g = \sigma_e l_e n_0$, 定义为放大自发辐射参量。 n_i 与 n_t 之间可通过如下超越方程联系起来

$$n_i - n_t = n_t \ln(n_i/n_t), \quad (4)$$

n_t 为阈值反转粒子数密度, 它由谐振腔的损耗决定

$$n_t = \frac{1}{2\sigma_{21}l} [\ln(\frac{1}{R}) + L], \quad (5)$$

一旦 n_i 给定, 调 Q 脉冲的峰值功率 P_{\max} , 脉冲能量 E 和脉冲宽度 Δt 都可以通过速率方程求得

$$P_{\max} = \frac{h\nu A}{2t_c\sigma_{21}(n_i - n_t)} \ln(\frac{1}{R}) \ln(\frac{n_i}{n_t}) \times \{n_i - n_t[1 + \ln(n_i/n_t)]\}, \quad (6)$$

$$E = \frac{h\nu A}{2\sigma_{21}} \ln(\frac{1}{R}) \ln(\frac{n_i}{n_t}), \quad (7)$$

$$\Delta t = t_c \frac{n_i - n_t}{n_i - n_t[1 + \ln(n_i/n_t)]}, \quad (8)$$

$h\nu$ 为激光光子能量, A 为激光束截面积。利用表 1 给出的参数求解速率方程就可以得到上述各物理量

表 1 模拟中用到的激光器参数

Table 1 Laser parameters used in simulation

Parameter	Value
Speed of light c / (cm/s)	3×10^{10}
Laser cross section σ_{21} / cm ²	15.6×10^{-19}
Upper level lifetime τ_2 / μ s	100
Gain medium length l / cm	0.8
Nd doping density n_0 / cm ⁻³	1.37×10^{20}
Cavity length l_1 / cm	32
Laser beam section A / cm ²	0.008
Pump power P_p / W	28
Normalized pump rate $w_p\tau_2$	0.011
Total internal loss, L	0.2
Pump photon energy $h\nu_p$ / J	24.6×10^{-20}
Emission photon energy $h\nu$ / J	18.8×10^{-20}

的值, 主要结果示于图 3~图 5 中。图 3 给出了抽运功率一定时, 不同重复率和不同 g 值时反转粒子数随时间的演化过程。图 4 为不同 g 值时 ($g = 0$ 为不考虑放大自发辐射时的情况), 输出脉冲特性随重复率的变化关系, 由于峰值功率和能量的曲线是相

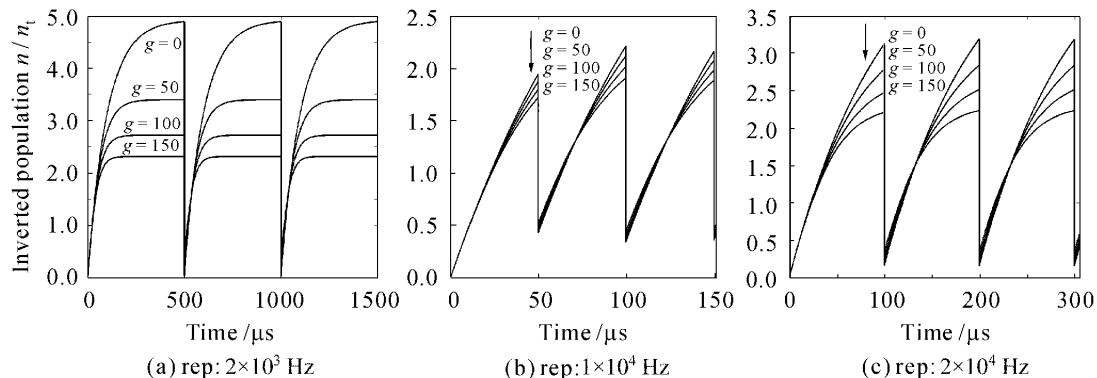


图 3 反转粒子数密度随时间的演化过程 (抽运功率 $P_p = 30$ W)

Fig. 3 Temporal evolution of inverted population density at different value of ASE parameter (at pumping power $P_p = 30$ W)

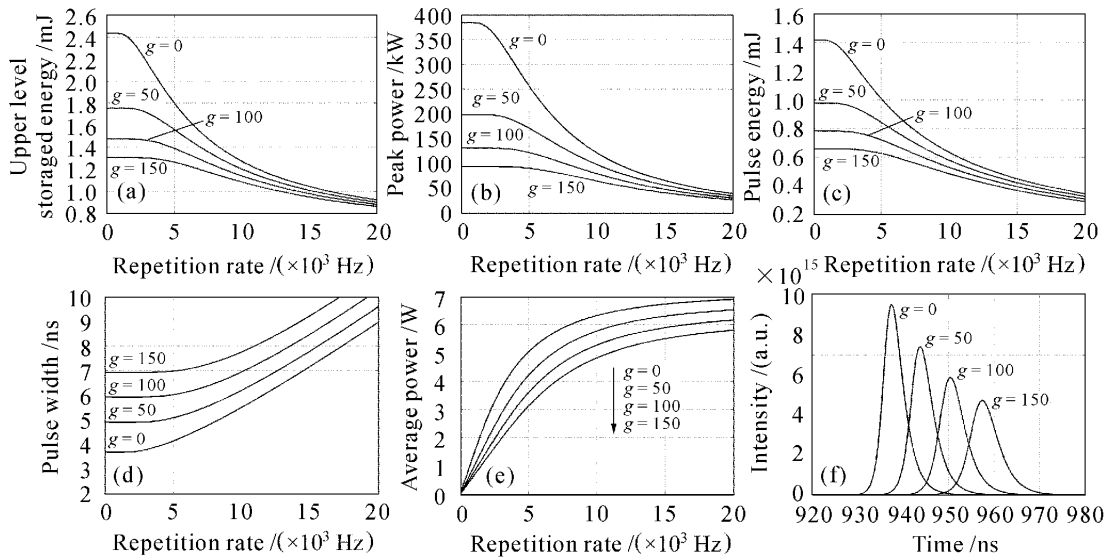


图 4 考虑放大自发辐射时调 Q 激光器上能级储能(a),峰值功率(b),脉冲能量(c),脉冲宽度(d),平均功率(e)随重复率的变化关系以及重复率为 10^4 Hz 时的脉冲波形(f)(模拟抽运功率 $P_p = 28$ W)

Fig. 4 Simulated Q-switched upper level storage energy (a), peak power (b), pulse energy (c), pulse width (d), average power (e) as functions of repetition rate and pulse waveform at 10^4 Hz (f) when ASE parameter g takes different values (simulating pump power $P_p = 28$ W)

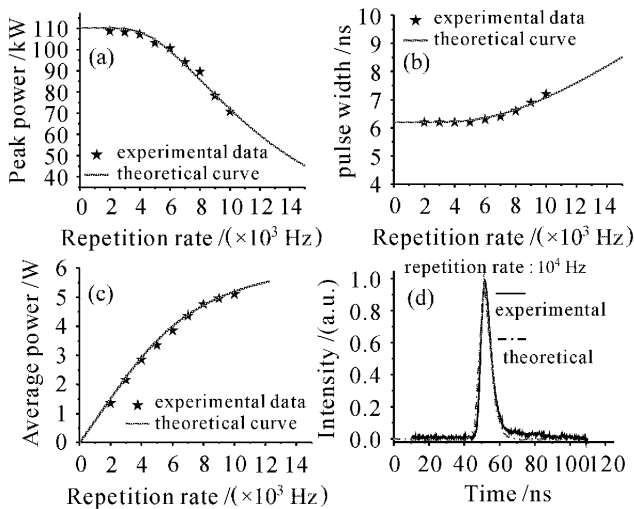


图 5 放大自发辐射参量 $g = 126$ 时脉冲峰值功率(a),脉冲宽度(b),平均功率(c)及脉冲波形(d)的理论与实验比较

Fig. 5 Comparison of theory and experiment results when ASE parameter $g = 126$
(a) peak power; (b) pulse width;
(c) average power; (d) pulse waveform

似的,因此图中没有给出。由图可见,放大自发辐射在低重复率时影响很大,而在重复率高时,影响逐渐变小,当重复率超过 2×10^4 Hz 时,放大自发辐射的影响就可以忽略。文献[15]给出了 g 的估计值为 120,通过模拟发现当 g 值取 126 时,计算所得到的结果与实验结果吻合得很好(图 5)。此外从图 4 可以看出,在一定的抽运功率下,平均功率随重复率升

高而增大,但当重复率增大到一定程度时,平均功率的增长变得缓慢并趋于饱和,在 Q 开关引入的附加损耗可以忽略时,该饱和值就是连续工作的输出功率。需要指出的是,在抽运功率一定的情况下,虽然 Q 开关的频率可以在驱动源允许条件下无限制地增大,但由于重复率增大时,每一次抽运的储能时间缩短,因而上能级储能减小,当重复率增大到一定数值时,激光脉冲的发射重复率将跟不上 Q 开关的频率,激光器将以 Q 开关频率的分数倍(1/2,1/3 等)发射激光脉冲。要想让激光器以正常的重复率工作,必须增大抽运功率或者减小谐振腔的损耗(如增大输出镜反射率)。

4 热透镜效应

由上面的讨论,只要抽运功率和 Q 开关的开关频率没有限制,激光器原则上可以以任意高的重复率工作。但事实上,抽运功率是不可能无限加大的,除了抽运源本身的限制和腔内元件的抗损伤能力外,严重的热透镜效应是限制抽运功率进一步加大的主要因素。有关连续端面抽运条件下激光介质热透镜效应的理论研究和实验报道很多,但由于端面抽运时,抽运光沿径向的分布是递减的,而且在入射端面处由于受热较大,针对不同的冷却方式,会产生比较严重的端面形变,因此想用一个普适的解析表达式来描述热透镜焦距的大小是困难的。为了针对

本文的抽运结构进行分析,用 LasCad 软件对晶体内的温度分布进行模拟,计算热透镜焦距,并用非稳腔法^[16,17]进行了实验测量。在 LasCad 模拟中,抽运光束腰直径取 630 μm,全角发散度取 0.260 rad,聚焦位置在进入晶体端面 2 mm 处(以上均为实验测量值)。在给定抽运功率下,通过有限元分析和折射率拟合后,LasCad 会自动生成热透镜,其热焦距 f 值可通过谐振腔的稳定性因子求得,如采用图 6 的平-平腔结构,设后腔镜距晶体的距离为 l_1 ,晶体距输出镜距离为 l_2 ,忽略晶体的长度,该热透镜腔的热稳定条件容易从往返矩阵得出: $(\frac{l_1 l_2}{l_1 + l_2} < f < l_1)$ $\cup (f > l_2)$,在端面抽运时,一般 $l_2 \gg l_1$,因此前面的稳定区范围很小,稳定性条件为 $f > l_2$ 。因此改变输出镜的位置,当谐振腔由稳腔变为非稳腔时,晶体距输出镜的距离即为有效热透镜焦距的数值。改变抽运功率重复计算就可以得到热透镜焦距随抽运功率的变化曲线。利用这一原理,也可以从实验上来测量有激光输出时的热透镜焦距。在实验中,固定 l_2 不变,通过改变抽运电流来寻找谐振腔的临界稳定点,在稳腔时,激光输出功率随抽运功率的变化基本上是线性增大的,但当电流继续增大,接近临界点时,激光输出很不稳定,直到变为非稳腔时,功率迅速下降,但不会完全降为 0(这和文献[17]的测量结果略有不同),而是稳定在一个较小值附近,但光

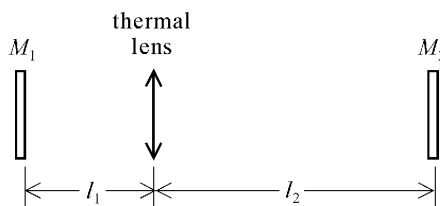


图 6 等效热透镜腔示意图

Fig. 6 Schematic of laser cavity with thermal lens

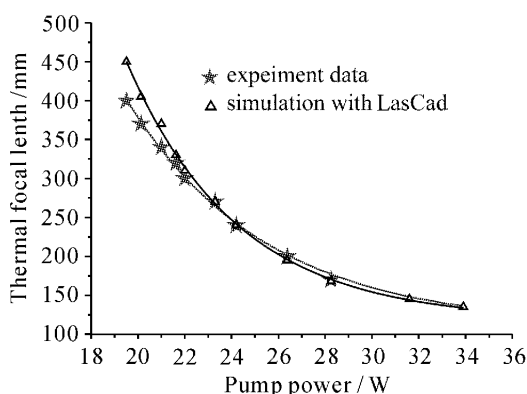


图 7 热透镜焦距的实验测量和理论模拟结果比较
Fig. 7 Experiment and simulation value of thermal focal length at different pump power

束质量明显变差。改变 l_2 的值,激光功率突变时对应的抽运电流也相应地变化,因此, l_2 的大小即为相应抽运条件下的热焦距值。图 7 分别给出了用 LasCad 模拟和实验测量得到的热焦距值,二者基本吻合。分析表明,在本文所用激光二极管所能提供的最大抽运功率(28 W)下,热透镜焦距为 170 mm,已经很接近腔的临界稳定点(工作腔长 160 mm, l_2 约等于 150 mm)。

5 结 论

报道了激光二极管连续端面抽运电光调 Q Nd:YVO₄ 激光器不同重复频率时的实验结果,并通过速率方程的修正和求解从理论上进行了分析,结果表明,在激光二极管连续抽运重复调 Q 的 Nd:YVO₄ 激光器中,要想得到较高的峰值功率,重复频率应该低一些,但当重复频率过低时,由于放大自发辐射的影响,激光器的效率将显著下降,因此以 $4 \times 10^3 \sim 5 \times 10^3$ Hz 为宜;在平均功率为主要指标时,工作重复率应尽量高一些,但当重复率高于 $15 \times 10^3 \sim 20 \times 10^3$ Hz 时,平均功率不再增大,而过高的重复率必将对 Q 开关的驱动源提出更高的要求,不仅增加了成本,也降低了系统的可靠性,因此除非特定的高重复率是系统的应用指标之一,否则 $15 \times 10^3 \sim 20 \times 10^3$ Hz 就是系统的最佳工作重复率。此外在要求高重复率时,由于热透镜效应限制了抽运功率的进一步加大,从而可能成为高重复率工作的一个限制条件,因此在设计抽运和谐振腔结构时也是必须要考虑的。

参 考 文 献

- 1 Chuanbo Gong, Changshui Chen, Bian Wu *et al.*. All solid state passively Q-switched frequency-doubled intra-cavity Nd:GdVO₄/KTP laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(2):94~96
- 2 Haifeng Pan, Heping Zeng. Passively Q-switched Nd:GdVO₄ solid-state lasers with stabilized repetition rates [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(9):520~523
- 3 Yang Chengwei, Huo Yujing, He Shufang *et al.*. LD pumped high efficiency high repetition rate Nd:YAG ceramic laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(5):593~596
杨成伟,霍玉晶,何淑芳等. 激光二极管抽运的高效高重复率 Nd:YAG 陶瓷激光器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(5):593~596
- 4 Feng Lichun, Huo Yujing, He Shufang *et al.*. LD pumped acousto-optically Q-switched 532 nm laser with high repetition rate [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(4):461~465
冯立春,霍玉晶,何淑芳等. 激光二极管抽运声光调 Q 高重复率 532 nm 激光器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(4):461~465
- 5 H. L. Zhang, P. Shi, D. J. Li *et al.*. Diode-end-pumped, electro-optically Q-switched Nd:YVO₄ slab laser and its second-

- harmonic generation [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(9):1681~1684
- 6 S. Pearce, C. L. M. Ireland, P. E. Dyer. Solid-state Raman laser generating <1 ns, multi-kilohertz pulses at 1096 nm [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **260**(2):680~686
 - 7 Gary Y. Wang, H. Jiang, J. Zhao. Low-voltage electro-optic Q switching of 1.06- μm microlasers by PLZT [C]. Proc. of CLEO'98. 485~486
 - 8 Y. H. Chen, Y. C. Huang. Actively Q-switched Nd:YVO₄ laser using an electro-optic PPLN crystal as the laser Q-switch [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(16):1460~1461
 - 9 K. Spariosu, V. Leyva, R. A. Reeder *et al.*. All-solid-state 12 Watt CW and actively Q-switched Er:YAG laser operating at 1645 nm [C]. *SPIE*, 2005, **5707**:151~164
 - 10 R. B. Chesler, M. A. Karr, J. E. Geusic. An experimental and theoretical study of high repetition rate Q-switched Nd:YAlG lasers [C]. *Proc. IEEE*, 1970, **58**(12):1899~1914
 - 11 Wang Hao, Wang Qingpu, Zhang Xingyu *et al.*. La₃Ga₅SiO₁₄ as active electro-optic Q-switch in a pulsed Nd:LiYF laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(7):939~942
王浩,王青圃,张行愚等. La₃Ga₅SiO₁₄电光调Q的Nd:LiYF激光器研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(7):939~942
 - 12 Yin Xin, Wang Jiyang, Zhang Shaojun. Study on electro-optic Q-switch of La₃Ga₅SiO₁₄ single crystal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(1):29~32
 - 尹鑫,王继扬,张少军. La₃Ga₅SiO₁₄晶体电光Q开关的研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(1):29~32
 - 13 J. J. Degnan. Theory of the optimally coupled Q-switched laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1989, **25**(2):214~220
 - 14 Norman P. Barnes, Brian M. Walsh. Amplified spontaneous emission—application to Nd:YAG lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1999, **35**(1):101~109
 - 15 Wang Chunyu, Lu Yutian, Zhu Xiaolei. Effect of amplified spontaneous emission on performance of all solid state laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4):433~437
王春雨,陆雨田,朱小磊. 放大自发辐射对全固态激光器调Q性能的影响[J]. *中国激光*, 2006, **33**(4):433~437
 - 16 Zhang Chaobo, Song Feng, Meng Fanzhen *et al.*. Measurement of the laser diode end-pumped solid laser's thermal focal length by using the curve of output [J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, **51**(7):1517~1520
张潮波,宋峰,孟凡臻等. 利用输出功率测量激光二极管端面抽运的固体激光器热透镜焦距[J]. *物理学报*, 2002, **51**(7):1517~1520
 - 17 Zhang Xingyu, Zhao Shengzhi, Wang Qingpu *et al.*. Study on thermal lens of Nd:YAG laser pumped by a laser diode [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(9):777~781
张行愚,赵圣之,王青圃等. 激光二极管抽运的激光器热透镜效应研究[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(9):777~781