

文章编号: 0258-7025(2007)06-0791-06

被动调 Q 固体激光器上转换效应的数值模拟

梁 田, 丁 征, 齐文宗

(四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064)

摘要 在主动调 Q 固体激光器上转换效应(ETU)理论的基础上,给出了包含上转换效应项的被动调 Q 固体激光系统的耦合速率方程组。采用变步长龙格-库塔数值方法,针对 Nd:YAG 激光晶体和 Cr⁴⁺:YAG 可饱和吸收体,对上转换效应对输出脉冲参数的影响进行了数值分析。在低抽运功率条件下,上转换效应对输出脉冲的能量和峰值功率影响较大;在高抽运功率条件下,上转换效应对平均输出功率影响较大。在抽运功率逐渐增加的过程中,上转换效应对输出脉冲能量和峰值功率的影响逐渐减弱,对输出激光的脉冲宽度(FWHM)和重复频率的影响则可以被忽略。数值计算结果与实验所得结果基本一致。

关键词 激光器;被动调 Q;上转换;数值计算;速率方程

中图分类号 TN 248.1;O 437 **文献标识码** A

Numerical Simulations of Upconversion Effects in Passively Q-Switched Solid-State Lasers

LIANG Tian, DING Zheng, QI Wen-zong

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

Abstract Based on the theories of the energy-transfer upconversion (ETU) effects in actively Q-switched solid-state lasers, coupling passively Q-switched rate equations including ETU parameters are established. The ETU effects in the Nd:YAG laser crystals and the Cr⁴⁺:YAG saturable absorbers are numerically simulated by a variation stepping Runge-Kutta method. The pulse energy and peak power are affected obviously at low pump power, and average power is affected obviously at high pump power. The effects of ETU on the pulse energy and peak power are decreased with the pump power increasing. And the effect to the pulse duration (full width at half maximum) and the repetition rate can be neglected with the pump power increasing. The numerical calculation results are coincident with the experiments.

Key words lasers; passively Q-switch; energy-transfer upconversion; numerical calculation; rate equations

1 引 言

调 Q 固体激光器是应用最广泛的激光器之一,它能提供脉宽为几十纳秒至几纳秒、峰值功率达吉瓦量级甚至更高的强激光脉冲输出。调 Q 技术分为主动调 Q 和被动调 Q 两种:主动调 Q 通常采用电光晶体或声光晶体作为光开关,这要求配备额外的高压脉冲电源或高频驱动信号源,使系统的结构变得比较复杂,成本也比较高。而被动调 Q 系统具有结构简单、价格便宜、便于批量生产等优点,逐渐引起

人们的广泛关注。近年来国内外很多实验研究^[1~4]相继采用 Cr⁴⁺:YAG 或 GaAs 作为可饱和吸收体,从而在激光二极管(LD)抽运的 Nd:YAG 晶体上获得了高重复频率的调 Q 脉冲输出。在激光二极管抽运功率逐渐增强的过程中,还观察到了脉冲输出功率先升后降的现象^[5,6]。以往的实验^[1~9]考虑到热沉积、转换效率和稳定性等因素,一般都工作在低功率抽运条件下。但因为各种因素造成的损耗使得输出功率不会很大,这就限制了它的应用范围。因此在要求输出功率有较宽调节范围的条件,特别是

收稿日期:2006-12-07;收到修改稿日期:2007-02-01

作者简介:梁 田(1982—),男,四川人,硕士研究生,主要从事激光技术方面的研究。E-mail:lt16caep@126.com

导师简介:齐文宗(1967—),男,吉林人,副研究员,博士后,主要从事激光薄膜光热及损伤特性方面的研究。

E-mail:qiwenzong@sohu.com

有高功率输出需求的应用场合中,考虑高抽运功率下的上转换效应的影响十分必要。

本文在 Siegman^[10] 所建立的被动调 Q 耦合速率方程组中引入了上转换效应项,并利用 Matlab 语言和自适应变步长龙格-库塔数值方法,对 Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 固体激光器中上转换效应的影响进行了分析和讨论。说明了被动调 Q 激光器存在最佳抽运功率值点,及上转换效应是造成输出不稳定和转换效率下降的原因之一。

2 基本理论

上转换过程是指处于激发态的粒子与其他基态或激发态粒子之间的一种能量传递过程,其最主要的两种分别是俄歇上转换和交叉弛豫过程。如图 1 所示,以四能级 Nd:YAG 的跃迁过程为例,俄歇上转换过程^[11]是指当采用 808 nm 左右的抽运光时, Nd³⁺ 基态吸收能量跃迁到 ⁴F_{3/2} 能级。然后通过能量转移过程,将能量传递给另一个同处于 ⁴F_{3/2} 能级的 Nd³⁺,使得在低能态 ⁴F_{3/2} 能级的粒子跃迁到高能态 ²G_{9/2} 上,而自身则弛豫到低能级 ⁴I_{9/2} 上;交叉弛豫过程^[11]是指激发态 ⁴F_{3/2} 上的一个原子的部分能量传递给未激发原子,使这两个原子都跃迁到 ⁴I_{15/2} 能级上。上述两个过程都会引起增益介质中有效增益系数的下降和热量的沉积,进而导致输出脉冲能量减小,并影响系统的稳定性。

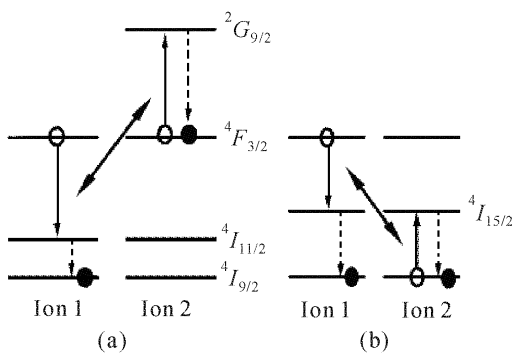


图 1 上转换过程

(a) 俄歇上转换; (b) 交叉弛豫过程

Fig. 1 Energy-transfer upconversion processes

(a) Auger upconversion; (b) cross relaxation

被动调 Q 耦合速率方程组是基于激光介质基态或激发态粒子数与谐振腔内光子数之间的相互制约关系而建立起来的。根据 Siegman^[10] 的被动调 Q 激光器理论,考虑到可饱和吸收体激发态吸收等因素后速率方程组^[6] 可写为

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{\phi}{t_r} \left\{ 2\sigma\Delta n l_g - 2\sigma_{gs}n_{gs}l_s - 2\sigma_{es}n_{es}l_s - \left[\ln\left(\frac{1}{R}\right) + 2\alpha_{sc}(l_g + l_s) \right] \right\} + \frac{r_1\Delta n}{t_g}, \quad (1)$$

$$\frac{d\Delta n}{dt} = R_p - \gamma\sigma\phi\Delta n - \frac{\Delta n}{t_g}, \quad (2)$$

$$\frac{dn_{gs}}{dt} = -\sigma_{gs}c\phi n_{gs} + \frac{n_{es}}{t_s}, \quad (3)$$

$$n_{gs} + n_{es} = \frac{\ln(1/T_0)}{\sigma_{gs}(l_g + l_s)}, \quad (4)$$

式中 ϕ 为腔中光子数密度; Δn 为激光介质反转粒子数密度; n_{gs} 为可饱和吸收体基态粒子数密度; n_{es} 为可饱和吸收体激发态粒子数密度; $t_r = 2L/c$ 为光在谐振腔中往返一周所需要的时间, L 为谐振腔光学长度; t_g 为激光介质上能级粒子寿命; t_s 为饱和吸收体恢复时间; σ 为激光介质受激发射截面面积; σ_{es} , σ_{gs} 分别为可饱和吸收体的基态和激发态的吸收截面面积; l_g 为激光介质长度; l_s 为可饱和吸收体在谐振腔轴线方向上的长度; R 为输出镜反射率; α_{sc} 为激光器的散射损耗, 典型值为 0.002 cm^{-1} ; c 为真空中的光速; γ 为反转衰减因子, 对于三能级系统为 2, 对于四能级系统为 1, 本文中取 1^[12]; T_0 为可饱和吸收体的初始透射率; r_1 为 TEM₀₀ 模内自发辐射光子数与全部自发辐射光子数之间的比值, 本文取 $r_1 = 10^{-12}$ 进行^[13] 计算; R_p 为抽运速率, 可表示为

$$R_p = \frac{P_{abs}}{h\nu\pi\omega_p^2(l_g + l_s)}, \quad (5)$$

式中 P_{abs} 为晶体吸收的抽运功率; h 为普朗克常量; ν 为抽运光频率, 这里采用 808 nm 的激光二极管抽运; ω_p 为抽运光斑半径。

依据 Guyot 等^[7] 的工作, 考虑到上转换效应的影响, 针对上能级粒子密度 n_2 , 有^[5]

$$\frac{dn_2}{dt} = R_p - \frac{n_2}{t_g} - Wn_2^2 - \frac{c}{\eta}n_2\sigma R_p, \quad (6)$$

式中 W 为上转换参量, 本文采用 Guy 等^[11] 的参数值 $W = 5 \times 10^{-17} \text{ cm}^3/\text{s}$ 。将 (6) 式与 (2) 式结合, 则 (2) 式修正为

$$\frac{d\Delta n}{dt} = R_p - \gamma\sigma\phi\Delta n - \frac{\Delta n}{t_g} - Wn_2^2. \quad (7)$$

由方程 (1), (3), (4), (5) 和 (7) 所组成的联立方程组, 即为考虑上转换效应的被动调 Q 耦合速率方程组。在反转粒子数密度等参数已知的条件下, 单次脉冲能量可表示为^[14]

$$E = \frac{h\nu A}{2\sigma\gamma} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \ln\left(\frac{n_i}{n_f}\right), \quad (8)$$

式中 E 为脉冲能量; A 为工作介质内光束横截面积;

n_i 为脉冲建立前的反转粒子数密度, n_f 为脉冲产生后剩余的激光上能级反转粒子数密度。

采用变步长龙格-库塔数值方法, 在 Matlab 环境下, 针对 Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG, 对上转换效应的影响进行仿真计算。计算参数如表 1 所示。

表 1 速率方程中的计算参数

Table 1 Calculation parameters of rate equations

σ / cm^2	2.8×10^{-19} [12]	l_g / cm	0.5
$\sigma_{gs} / \text{cm}^2$	8.7×10^{-19} [12]	l_s / cm	0.25
$\sigma_{es} / \text{cm}^2$	2.2×10^{-19} [12]	T_0	0.80
$t_g / \mu\text{s}$	230 [12]	R	0.94
$t_s / \mu\text{s}$	3.4 [12]	A / cm^2	1.54×10^{-4}
L / cm	1	$w_p / \mu\text{m}$	70

3 数值模拟

3.1 上转换效应对反转粒子数密度的影响

图 2 为考虑和不考虑上转换效应的初始反转粒子数密度 n_i 随时间演化规律之间的对比情况。可以看出, 在不同抽运功率情况下, 上转换效应对 n_i 的影响都很小, 可以忽略。

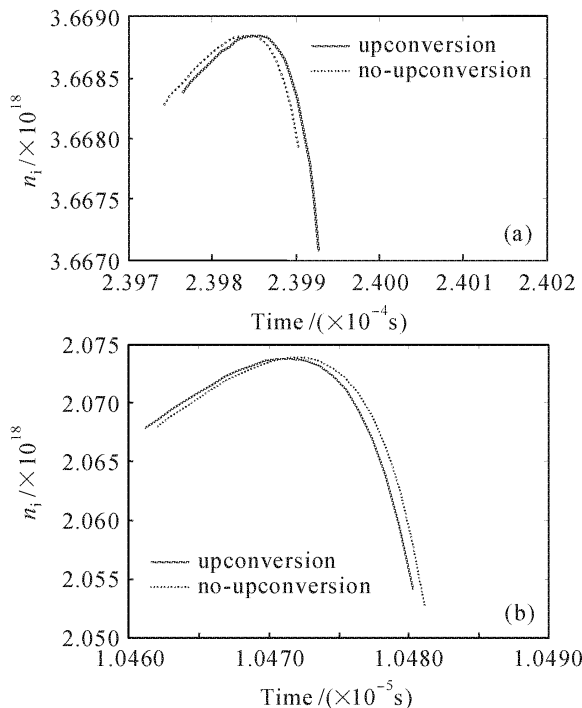


图 2 n_i 随时间的变化

(a) 1 W 抽运; (b) 40 W 抽运

Fig. 2 Changes of initial population inversion density n_i

(a) 1 W pumped; (b) 40 W pumped

图 3 为考虑和不考虑上转换效应的最终反转粒子数密度 n_f 随时间演化规律之间的对比情况。可以看出, 在抽运功率较低的情况下, 上转换效应对 n_f

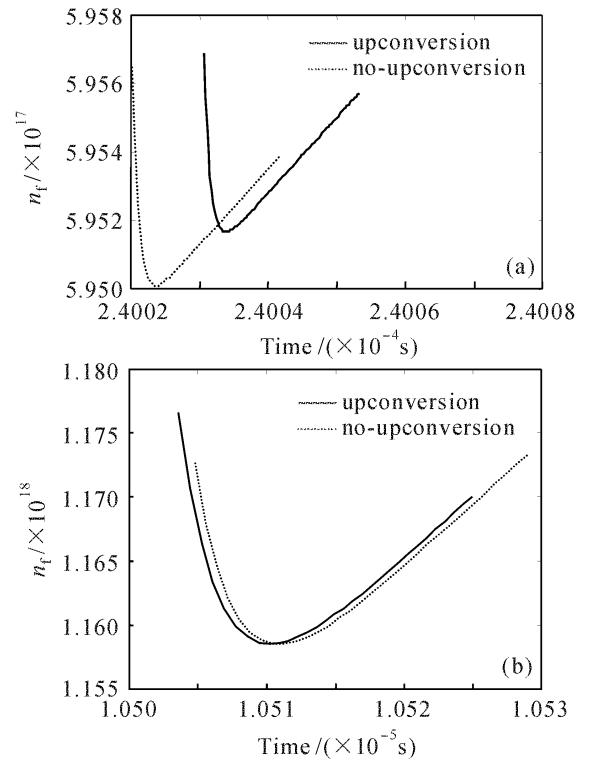


图 3 n_f 随时间的变化

(a) 1 W 抽运; (b) 40 W 抽运

Fig. 3 Changes of final population inversion density n_f

(a) 1 W pumped; (b) 40 W pumped

的影响比较大。而随着抽运功率的逐渐增加, 这种影响将会逐渐减弱。

3.2 上转换效应对重复频率和脉宽的影响

从图 4(a), (b) 可以看出, 随着抽运功率的增加, 重复频率基本上呈现出一种线性增长的规律, 而脉冲宽度则近似地呈现出一种线性下降的规律。在整个过程中, 二者受上转换效应的影响均较小。

3.3 上转换效应对输出脉冲能量和功率的影响

从图 5(a), (b) 可以看出, 当抽运功率较低时, 上转换效应对输出脉冲能量和峰值功率的影响都比较大; 当抽运功率较高时, 上转换效应的影响随着抽运功率的增加而逐渐减小。当抽运功率达到一定值时, 这种影响几乎完全可以被忽略。由图 5(a), (b) 还可以看出, 被动调 Q 激光器上转换效应的最大值点几乎就是它的最佳抽运功率值点。当抽运功率超过这个最佳值时, 则会出现脉冲能量、峰值功率以及转换效率明显下降的现象。

引起脉冲能量以及转换效率明显下降的原因有两点: 1) 尽管上转换效应对激光上能级反转粒子数密度的影响在逐渐减弱, 但上转换效应的影响并未消失, 而是会进一步引起激光器热损耗的迅速增加, 导致脉冲能量输出和转换效率明显下降。2) 在抽

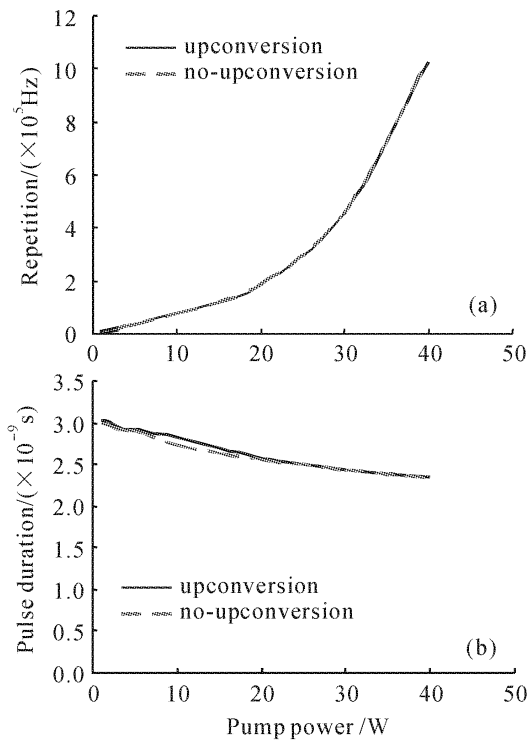


图 4 重复频率(a)和脉宽(b)随抽运功率的变化
Fig. 4 Change of repetition rate (a) and pulse duration (b)

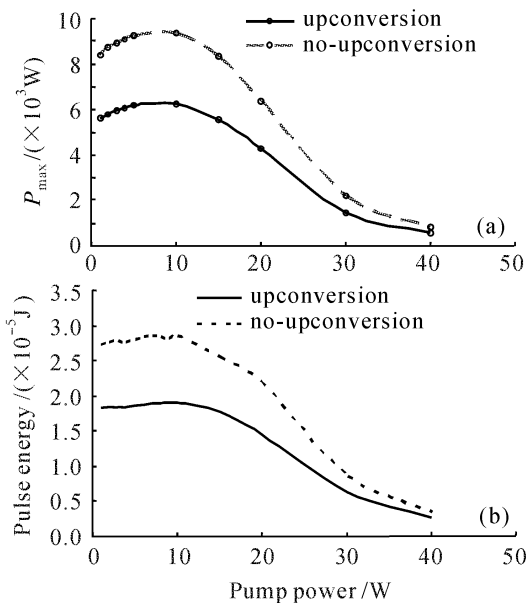


图 5 脉冲峰值功率(a)和脉冲能量(b)随抽运功率的变化

Fig. 5 Change of peak power (a) and pulse energy (b)

运功率不断增加的过程中,重复频率也按照一定的比率增加。当重复频率达到一定值时,就会出现脉冲周期与可饱和吸收体的恢复时间可比拟的情况。这就使可饱和吸收体工作在比低抽运功率时的初始透射率 T_0 还要高的初始透射率 T'_0 下,从而导致腔内储能水平降低和单次脉冲输出能量降低。

从图 6 可以看出,随着抽运功率的增加,上转换

效应对平均输出功率的影响在逐渐增强。虽然在高抽运功率条件下,上转换效应对脉冲能量的影响随着抽运功率的增加而逐渐减弱,但由于重复频率增加得很快,因此上转换效应对平均输出功率的影响也就增强了。

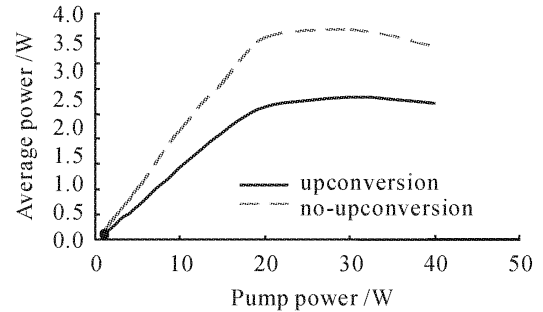


图 6 脉冲平均功率随抽运功率的变化
Fig. 6 Change of average power

此外,上转换效应会在晶体内引起大量的热沉积,使热透镜效应明显增大。这些都对激光器的稳定输出十分不利。因此单纯依靠提高抽运功率来提高输出功率的办法是十分有限的。这时应该采用上转换效应小的激光晶体,尽量减少上转换效应的影响,才能使激光器高效稳定地输出高功率脉冲。

4 实验及结果分析

实验装置如图 7 所示。抽运源采用光学整形后的激光二极管光纤耦合系统,纤芯直径为 $400 \mu\text{m}$,采用半导体制冷的温控系统。在抽运电流 30 A 下可获得最大抽运功率 8 W 。耦合系统采用直径为 1.8 mm ,节距数为 0.22P 的自聚焦透镜将抽运光耦合进激光晶体。Nd:YAG 晶体尺寸为 $\phi 3 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$, Cr^{4+} :YAG 晶体尺寸为 $\phi 3 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$,初始透射率为 85% 。在 Nd:YAG 晶体一个端面镀对 808 nm 高透和对 1064 nm 全反膜,并作为谐振腔的一个端镜;另一端面和 Cr^{4+} :YAG 晶体两个端面镀对 1064 nm 增透膜。选用平面输出镜 M ,反射率 90% ,腔长 15 mm 。实验中,对激光晶体用紫铜块夹

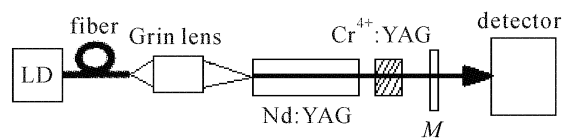


图 7 Nd:YAG/ Cr^{4+} :YAG 被动调 Q 激光器
实验装置示意图

Fig. 7 Arrangement of Nd:YAG/ Cr^{4+} :YAG passively Q-switched laser experiment setup

住,用于晶体散热。使用雪崩光电探测器进行波形探测,并在带宽为1 GHz的示波器上显示波形。

重复频率及输出功率随抽运功率的变化,及其与理论模拟计算结果的对比情况如8图所示。在抽运功率5.2 W条件下,理论计算出脉宽为9.1 ns,与图9中的实验值9.85 ns基本吻合。

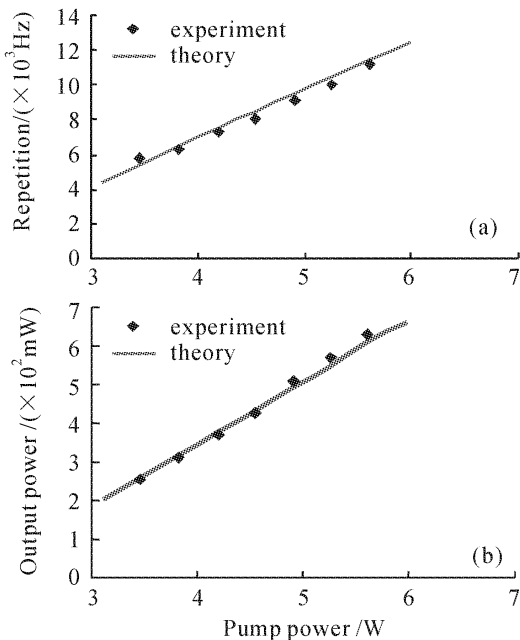


图8 实验值与理论值的比较

(a) 重复频率; (b) 输出功率

Fig. 8 Comparison of the experimental results and theory results

(a) repetition; (b) average output power

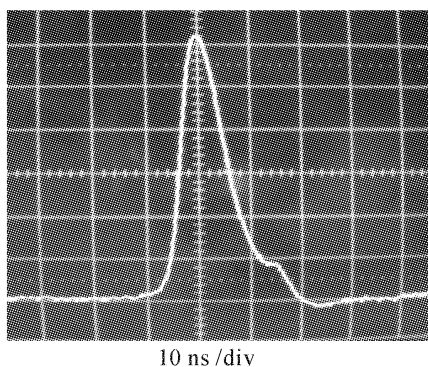


图9 实验获得的脉冲波形

Fig. 9 Temporal profile of single-pulse in experiment

实验观察到在大功率抽运(约7 W)条件和未采取散热装置的情况下,激光输出只能维持3~5 s,紧接着就观察到黄色的荧光。产生这种现象的原因是热效应使得激光器失调。热透镜效应使法布里-珀罗(F-P)谐振腔变成了非稳腔。荧光产生的原因正是由于上转换效应。

综上所述,上转换效应的存在会引起激光介质

有效增益系数的下降和热量的沉积,进而导致输出激光脉冲能量的减小,并会影响到系统的稳定性。而减少上转换效应的方法是增强激光器的散热能力,并在一定的范围内控制激光晶体的掺杂浓度。因为降低掺杂浓度可以减少粒子能量转移的机会,从而达到削弱上转换效应的目的。

5 结 论

基于 Siegman 的被动调 Q 耦合速率方程理论和 Lan 等^[8]的主动调 Q 上转换效应理论,给出了包含上转换效应项的被动调 Q 激光系统的耦合速率方程组。针对 Nd:YAG 激光晶体和 Cr⁴⁺:YAG 可饱和吸收体,对上转换效应的影响等进行了数值仿真,说明了被动调 Q 激光器存在最佳抽运功率值点,及上转换效应是造成输出不稳定和转换效率低的原因。并得出在低抽运功率条件下,上转换效应对输出脉冲的能量和峰值功率等的影响较大;在高抽运功率条件下,上转换效应对平均输出功率影响较大。而在抽运功率逐渐增加的过程中,上转换效应对输出激光的脉冲宽度和重复频率的影响都可以被忽略。这为今后开展的高功率输出激光二极管抽运固体激光器的优化设计提供了必要的理论参考。

参 考 文 献

- 1 J. J. Zayhowski, C. Dill III. Diode-pumped passively Q-switched picosecond microchip lasers [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19** (18):1427~1429
- 2 Ou Pan, Yan Ping, Gong Mali *et al.*. LD-pumped passively Q-switched Nd³⁺:YAG microchip laser and its stability [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(12):1465~1469
欧攀,闫平,巩马里等. 激光二极管抽运的被动调 Q Nd³⁺:YAG 微晶片激光器及其稳定性[J]. *光学学报*, 2002, **22**(12):1465~1469
- 3 Qi Yunfeng, Lou Qihong, Zhang Yinghua *et al.*. Study on Ti:sapphire end-pumped Nd:YAG ceramic laser passively Q-switched by Cr⁴⁺:YAG [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(11):1449~1454
漆云凤,楼祺洪,张影华等. Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q Nd:YAG 陶瓷激光器的研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(11):1449~1454
- 4 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
- 5 Wang Jiaxian, Zhuang Xinwei. Cr⁴⁺:YAG high repetition rate passively Q-switched Nd:YVO₄ laser pumped by laser diode [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(4):494~497
王加贤,庄鑫巍. LD 抽运 Cr⁴⁺:YAG 高重复率被动调 Q Nd:YVO₄ 激光器[J]. *光子学报*, 2006, **35**(4):494~497
- 6 E. Villafana R., Alexander V. Kir'yanov. Comparative analysis of CW-pumped Nd:YVO₄ lasers passively Q-switched with LiF:F₂⁻ and YAG:Cr⁴⁺ crystals [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **242**:241~252
- 7 Y. Guyot, H. Manaa, J. Y. Rivoire *et al.*. Excited-state-

absorption and upconversion studies of Nd³⁺-doped single crystals Y₃Al₅O₁₂, YLiF₄, and LaMgAl₁₁O₁₉ [J]. *Phys. Rev. B*, 1995, **51**(2):784~799

8 Y. P. Lan, Y. F. Chen, S. C. Wang. Repetition-rate dependence of thermal loading in diode-end-pumped Q-switched lasers; influence of energy-transfer upconversion [J]. *Appl. Phys. B*, 2000, **71**:27~31

9 Zhang Xinlu, Ju Youlun, Wang Yuezhu. Laser-diode-pumped acoustooptic Q-switched Tm, Ho: YLF laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8):1172~1176
张新陆,鞠有伦,王月珠. 激光二极管抽运 Tm, Ho: YLF 晶体声光调 Q 激光器[J]. *光学学报*, 2005, **25**(8):1172~1176

10 Anthony E. Siegman. Lasers [M]. Mill Valley: University Science Books, 1986. 1024~1026

11 S. Guy, C. L. Bonner, D. P. Shepherd *et al.*. High-inversion densities in Nd:YAG; upconversion and bleaching [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(5):900~909

12 W. Koechner. Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang trans.. Solid-State Laser Engineering [M]. Fifth Edition. Beijing: Science Press, 2003. 40
W. 克希耐尔 著,孙文,江泽文,程国祥等译. 固体激光工程 [M]. 第五版. 北京:科学出版社, 2003. 40

13 Shi Guang, Liao Yun, Wang Yunxiang *et al.*. The optimal analysis of Siegman rate equations of passively Q-switched microchip laser [J]. *Laser Technology*, 2005, **29**(6):636~638
时光,廖云,王云祥等. 微片被动调 Q 激光器的 Siegman 方程组的优化分析[J]. *激光技术*, 2005, **29**(6):636~638

14 John J. Degnan. Optimization of passively Q-switched lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(11):1890~1901



· 广告 ·



康奥(中国)医疗公司诚聘

康奥公司于 1996 年在中国上海注册,是集激光医疗产品、医用耗材的科研投入、产品开发、产品销售、医疗投资于一体的现代化企业集团。公司总部位于上海,下设北京、广州、成都办事处。
为了满足公司业务迅速扩展的需要,高薪诚邀有理想,有激情的医疗行业精英加盟,共创美好事业。

高级半导体全固态高功率激光研发工程师(工作地点:闵行)

主要职责:

- 1) 全固体高功率半导体激光器、光学部分的研究;
- 2) 元器件部件的选型和采购;
- 3) 对生产、市场等相关部门提供技术支持;
- 4) 研究国内外产品的相关电气标准和法规制定产品的相关标准。

任职要求:

- 1) 激光/光电子专业本科以上;
- 2) 熟悉激光器工作原理和技术,能够熟练调节激光器及其光路;
- 3) 有 3 年以上的半导体泵浦固体高功率激光研发经验;
- 4) 有医疗激光背景者优先;
- 5) 能熟练使用英语,有较强的沟通能力;
- 6) 有较强的独立工作能力和团队协作精神。

飞秒激光高级研发工程师(工作地点:闵行)

主要职责:

- 1) 飞秒激光器的研发;
- 2) 元器件部件的选型和采购;
- 3) 对生产、市场等相关部门提供技术支持;
- 4) 研究国内外产品的相关电气标准和法规制定产品的相关标准。

任职要求:

- 1) 激光/光电子专业本科以上;
- 2) 熟悉激光器工作原理和技术,能够熟练调节激光器及其光路;
- 3) 有 3 年以上的半导体泵浦固体高功率激光研发经验;
- 4) 了解飞秒激光的应用,有医疗激光背景者优先;
- 5) 能熟练使用英语,有较强的沟通能力;
- 6) 有较强的独立工作能力和团队协作精神。

一经录用后,公司将提供具竞争力的薪酬政策、员工福利及优越的事业发展机会。请将个人简历、照片、身份证和相关证明复印件邮寄至如下地址:上海市延安东路 700 号港泰广场 2507-2509 室,人力资源部收,邮编:200001 (邮寄请在信封左下角注明应聘职位)。E-mail: doreen@shanghai-conbio.com