

文章编号: 0258-7025(2007)03-0337-04

双调 Q 开关热退偏补偿全固态激光器

戴殊韬, 纪江华, 朱小磊

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 为了有效地补偿激光二极管(LD)侧向抽运 1000 Hz 重复率电光调 Q Nd:YAG 激光器棒状增益介质内存在的热致双折射损耗,设计了一种新颖的双调 Q 晶体开关复合谐振腔结构。实验结果表明,设计的双调 Q 晶体开关结构 Nd:YAG 激光器输出激光脉冲能量比单调 Q 晶体开关结构的非补偿腔输出能量提高了 56%,当侧面抽运半导体激光器输出功率达到 450 W 时,激光输出达到 30 mJ/pulse,输出光束偏振度优于 10:1,激光脉冲宽度约 14 ns。并获得 6.7% 的光-光转换效率。通过对双调 Q 开关激光谐振腔进行建模,并用求解速率方程对其特性进行理论分析,所得的计算结果与实验结果基本吻合。

关键词 激光技术;全固态激光器;电光调 Q;退偏补偿;速率方程

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

Novel Double Q-Switcher Structure for Thermal Induced Depolarization Compensation in All-Solid-State Laser

DAI Shu-tao, JI Jiang-hua, ZHU Xiao-lei

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

Abstract In this paper, a novel double Q-switcher structure is designed in order to compensate the thermal induced birefringence in the active medium of 1 kHz laser diode (LD) side-pumped electro-optic Q-switched Nd:YAG laser. The experiment result shows that pulse energy of the double Q-switch Nd:YAG laser is 56% higher than the same situation in single Q-switch uncompensated structure. When the laser output power is up to 450 mJ, pulse energy of 30 mJ is obtained, the extinction ratio of beam is better than 10:1, the pulse duration is about 14 ns, and the optical-to-optical conversion efficiency is 6.7%. At the same time, the novel cavity is modelled and numerically calculating is made by using rate equations, the results are accorded with the experiment.

Key words laser technique; all-solid-state-laser; electro-optic Q-switch; depolarization compensation; rate equation

1 引言

在激光技术众多应用领域中,如激光雷达、激光加工、非线性光学等领域,都需要高峰值功率、高重复频率、窄脉宽、小发散度的全固态脉冲激光器。高重复频率激光二极管(LD)抽运的电光调 Q 全固态 Nd:YAG 激光器能很好地满足这些要求。这方面的研究工作国外已经有了很多报道^[1,2]。然而,随着激光二极管抽运功率的提高,激光增益介质的热效应引起的热透镜效应和热致双折射损耗将严重限制

激光器的输出能量和光束质量,其中,因增益介质的热致双折射引起的热退偏损耗是影响激光器效率的重要因素^[3]。

目前已经有多种方法来补偿激光棒中产生的热致双折射效应^[4~8]。这些技术是比较常用的补偿圆柱激光棒中热致双折射的方法。如果采用自然双折射晶体作为激光介质,则不需要此类补偿,因为自然双折射很大,热应力引起的折射率变化可以忽略不计。因此在某些应用中,Nd:YLF 和 Nd:YAlO₃ 材料具有一定的优势。另外,应用板条结构激光介质

收稿日期:2006-05-25;收到修改稿日期:2006-11-17

作者简介:戴殊韬(1983—),男,浙江人,硕士研究生,主要从事固体激光技术及非线性频率变换技术的研究。

E-mail:daishutao@gmail.com

导师简介:朱小磊(1966—),男,浙江人,研究员,主要从事固体激光技术及激光器应用系统的研究。

E-mail:xlzhu@mail.siom.ac.cn

特殊的 Z 字形传输路径的固体激光器能够消除一阶热聚焦、应力双折射和热退偏,从而得到比棒状工作物质更好的光束质量和更高的平均功率。目前板条激光器也是固体激光器的一个研究热点^[9,10]。

本文针对 1000 Hz 重复频率的激光二极管阵列侧面抽运的电光调 Q 全固态 Nd:YAG 激光器的特性,设计了双调 Q 晶体开关的热退偏补偿谐振腔结构,即在传统调 Q 谐振腔的基础上沿着偏振片的退偏损耗输出方向附加一个调 Q 全反射支路。首先在理论上通过求解其速率方程,初步分析了双调 Q 开关热退偏补偿谐振腔的输出性能。然后在实验上比较了补偿腔与未加补偿腔结构的单调 Q 开关激光器的输出。在相同的抽运条件下,本文设计的补偿腔结构激光器明显地提高了输出能量,并且保持了激光器的线偏振输出,为后续的倍频等工作创造了良好的条件。

2 结构设计及理论分析

图 1 是双调 Q 开关热退偏补偿 Nd:YAG 激光器的谐振腔结构。振荡器为激光二极管阵列直接抽运的 Nd:YAG 晶体,晶体棒尺寸为 $\phi 5 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$,共 45 条激光二极管阵列环绕抽运(每组 9 条激光二极管阵列(LDA)围一周,共 5 组串接),每个激光二极管阵列设计标称最大输出峰功率 60 W(驱动电流 70 A),占空比为 1/5。激光从调 Q 晶体 KD*P 端输出,谐振腔腔长为 400 mm。最佳输出率耦合由实验确定,实验选用耦合输出率为 70%。为了补偿激光棒在高功率抽运条件下严重的热透镜效应,把谐振腔设计成平-凸非稳腔结构,一方面非稳腔可以增大振荡模体积,降低腔内激光功率密度,有效利用增益激活区;另一方面当激光器处于高功率抽运工作状态时,平-凸非稳腔可以有效补偿增益介质的热透镜效应,使得有源谐振腔最终变成动态稳腔,提高激光器的工作稳定性。根据激光器的腔长、

热透镜焦距以及谐振腔稳定性条件,取全反后腔镜的曲率半径为 -200 mm ^[11,12]。

双调 Q 晶体开关结构对激光介质热退偏补偿功能是由附加的一个 Q 开关支路实现的。该退偏补偿支路包含一个 $\lambda/4$ 波片, KD*P 电光调 Q 晶体和平面后腔全反镜,支路结构排布与主腔调 Q 排布一致,支路中的激光束传播方向与偏振片成布儒斯特角。为了实现偏振分量的转换,在凸面全反射镜和激光晶体之间放置了一个 $\lambda/4$ 波片,使其快轴与腔内偏振片的 s 或 p 偏振平面成 45° 。激光器工作时,腔内两个调 Q 晶体同步实施加电压/退电压。当 Q 开关不加 $\lambda/4$ 电压的时候,激光束在两个支路中往返传输时都将产生 90° 的相位迟滞,因此不能够通过偏振片起振, Q 开关处于关闭状态。而当 Q 开关同时加 $\lambda/4$ 电压的时候,激光束在两个支路中往返传输时都将产生 180° 的相位迟滞,因此偏振态保持不变。激光束通过偏振器后分解成 p 分量和 s 分量, p 分量沿着主光轴光路而耦合输出,退偏损耗 s 分量则反射进入补偿支路,被反射回激光晶体后再两次经过 $\lambda/4$ 波片,偏振态发生 90° 旋转,变成 p 分量,这样就可以通过偏振器输出。由于高功率抽运激光棒存在严重的热致双折射,偏振光经过激光棒后将不再保持线偏振。在传统的激光器中,将有一部分激光能量因热退偏而损耗,双调 Q 开关热退偏补偿腔,则使之转变成有效的能量输出。

从双调 Q 晶体开关热退偏补偿谐振腔激光脉冲形成机制可以看出,由于补偿支路的存在,激光振荡模将两次往返经过激光增益介质才从输出镜输出,因此其腔内反转粒子数密度 n 和光子密度 ϕ 的速率方程可近似为^[13,14]

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

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{4\sigma_{21}n\phi}{t_r} - \frac{\phi}{t_c}, \quad (2)$$

其中 $t_r = 4l_1/c$ 为光在双腔内的渡越时间, $t_c = t_r/[L + \ln(1/R)]$, L 为谐振腔的往返损耗, R 为输出耦合镜的反射率; l_1 为主路单腔长度, l 为激光介质长度; ω_p 为抽运功率, σ_{21} 为上激光能级的受激发射截面, τ_2 为上能级自发辐射寿命; c 为光速, n_0 为总粒子数密度。

微分方程(1)和(2)分别表示谐振腔内光子密度随时间的变化和激活介质中反转粒子数密度随时间的变化,解上述方程,可以得到 Q 开关激光器输出能量的表达式

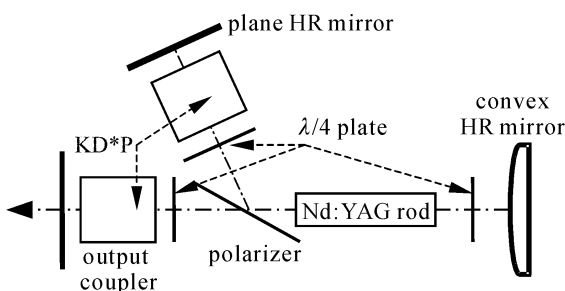


图 1 双 Q 开关热退偏补偿谐振腔

Fig. 1 Resonator with depolarization loss compensation

$$E_{\text{out}} = \frac{h\nu A}{4\sigma_{21}} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \ln\left(\frac{n_i}{n_f}\right), \quad (3)$$

式中 $h\nu$ 为辐射光子能量, A 为有效光束截面。 $n_i = n_0 \omega_p \tau_2 [1 - \exp(-t_p/\tau_2)]$, $n_f = \frac{1}{4\sigma_{21}l} \left(L + \ln\frac{1}{R}\right)$, t_p 为抽运脉冲持续时间, n_f 由超越方程 $n_i - n_f = n_i \ln(n_i/n_f)$ 进行数值求解。

设计的双调 Q 晶体开关结构的 Nd:YAG 激光器中, $h\nu_p = 24.6 \times 10^{-20}$ J, $h\nu = 18.8 \times 10^{-20}$ J, $t_p = 200 \mu\text{s}$, $n_0 = 1.38 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, $\tau_2 = 230 \mu\text{s}$, $\sigma_{21} = 6.5 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ [3]。通过数值计算求解上述关联方程组, 得到图 2 所示的激光脉冲输出能量随抽运能量的变化曲线。

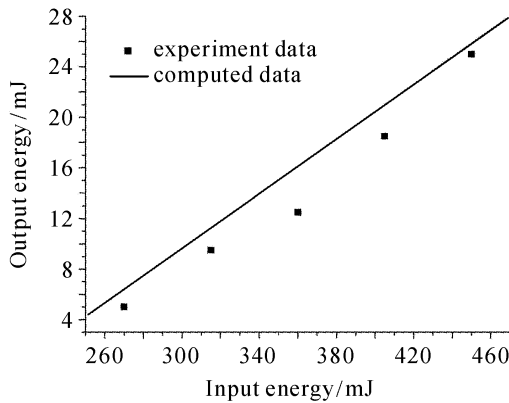


图 2 模拟计算所得的输出能量随抽运能量的变化
Fig. 2 Computed output energy with different input energy

3 实验结果及讨论

为了研究热效应的影响以及热退偏补偿结构的实际效果, 对设计的退偏补偿谐振腔和传统非补偿谐振腔结构分别测量了激光器的输出功率、脉冲波形以及偏振态。实验中激光二极管阵列对 Nd:YAG 晶体做 1 kHz 的准连续重复脉冲抽运, Q 开关的重复频率也为 1 kHz。图 3 所示为不同抽运水平下, 两种腔的输出脉冲能量。

从图 3 中可以看出, 在相同的实验条件下, 当最大抽运能量为 450 mJ 时, 非补偿谐振腔输出脉冲能量为 16 mJ, 斜率效率为 6.7%; 而热退偏补偿谐振腔输出激光脉冲能量达 25 mJ, 比非补偿腔高出 56%, 其斜率效率达到 10.8%。此时将输出耦合率提高到 80%, 激光脉冲输出能量高达 30 mJ。实验中对输出激光束的偏振度进行测试, 在输出能量最大时, 上述两种腔结构输出激光束的偏振度均接近 10:1。此时, 激光束的远场发散角为 1.3 mrad。

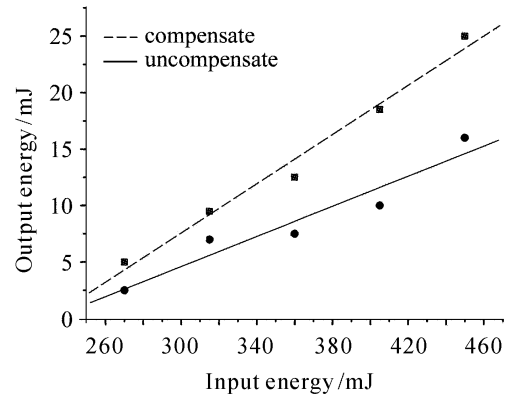


图 3 实验测得的 Q 脉冲输出能量
Fig. 3 Experimental output energy

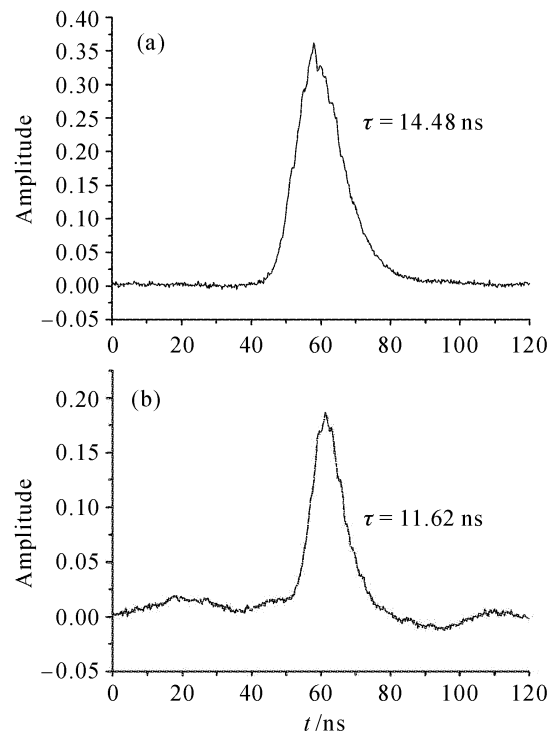


图 4 抽运能量分别为 360 mJ(a) 和 410 mJ(b) 时热退偏补偿谐振腔输出的脉冲波形
Fig. 4 Pulse profiles with an pump energy of 360 mJ (a) and 410 mJ (b) of compensated resonator

图 4(a), (b) 分别为双调 Q 开关热退偏补偿 Nd:YAG 激光器在抽运能量为 360 mJ, 410 mJ 时的激光调 Q 脉冲波形, 激光脉冲宽度分别为 14.48 ns 和 11.62 ns。很明显, 抽运能量越高, 获得的调 Q 脉冲越窄。同样在 360 mJ 的抽运条件下, 非补偿谐振腔输出脉冲宽度为 12.9 ns。可以看出, 由于热退偏补偿结构减少了谐振腔的损耗, 导致了输出调 Q 激光脉冲宽度展宽现象的出现。

4 结 论

针对高重复频率高功率的固体激光器中热致退

偏损耗严重的特点,在分析各种热退偏补偿方法的基础上设计了一种新颖的双调 Q 开关谐振腔结构,利用速率方程初步分析了谐振腔特性,并实验研究了该激光器的输出能量、远场发散角、脉冲波形和输出激光偏振度等特性。通过与传统单调 Q 谐振腔激光器的输出结果比较,显示双调 Q 晶体开关热退偏补偿谐振腔不仅能有效提高输出能量,而且确保输出光束有良好的偏振度,其光束远场发散角为 1.3 mrad,基本实现了对固体增益介质的热退偏损耗及热透镜效应的补偿。

参 考 文 献

- 1 J. J. Zayhowski, C. Dill III. Diode-pumped microchip lasers electro-optically Q switched at high pulse repetition rates [J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(17):1201~1203
- 2 Jianghua Ji, Xiaolei Zhu, Chunyu Wang *et al.*. Comparison of laser performance of electro-optic Q-switched Nd:YAG ceramic/single crystal laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(4):219~221
- 3 Walter Koechner. Solid-State Laser Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002. 40, 366~374
W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 北京:科学出版社, 2002. 40, 366~374
- 4 W. C. Scott, M. de Wit. Birefringence compensation and TEM₀₀ mode enhancement in a Nd:YAG laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1971, **18**(1):3~4
- 5 Maik Frede, Ralf Wilhelm, Martina Brendel *et al.*. High power fundamental mode Nd:YAG laser with efficient birefringence compensation [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(15):3581~3589
- 6 Efim Khazanov, Alexey Anastasiyev, Nikolay Andreev *et al.*. Compensation of birefringence in active elements with a novel Faraday mirror operating at high average power [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(15):2947~2954
- 7 S. Z. Kurtev, O. E. Denchev, S. D. Savov. Effects of thermally induced birefringence in high-output-power electro-optically Q-switched Nd:YAG lasers and their compensation [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(3):278~285
- 8 Martin Ostermeyer, Guido Klemz, Philipp Kubina *et al.*. Quasi-continuous-wave birefringence-compensated single- and double-rod Nd:YAG lasers [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(36):7573~7582
- 9 T. J. Kane, R. C. Eckardt, R. L. Byer. Reduced thermal focusing and birefringence in Zig-Zag slab geometry crystalline lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1983, **QE-19**(9):1351~1354
- 10 Richard B. Kay, Demetrios Poullos. Q-switched rate equations for diode side-pumped slab and zigzag slab lasers including Gaussian beam shapes [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2005, **41**(10):1278~1284
- 11 Ou Qunfei, Chen Jianguo, Feng Guoying *et al.*. Analyses of transient temperature and thermal stress distribution in ring laser diode array pumped laser rod [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(6):803~807
区群飞,陈建国,冯国英等. 环形激光二极管抽运棒状激光器中瞬态温度和热应力分析[J]. 光学学报, 2004, **24**(6):803~807
- 12 Ma Huijun, Li Xiaoli, Zhu Xiaolei *et al.*. Investigation on the characteristic of kHz all-solid-state laser for airborne lidar ocean survey [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(9):1197~1201
马惠军,李小莉,朱小磊等. 机载测深激光雷达 kHz 全固态激光器设计及特性研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(9):1197~1201
- 13 P. Kundu, A. D. Shaligram, V. N. Saxena. Numerically calculated Q-switched laser output characteristics of high-power diode-laser-pumped Nd:YAG laser [C]. *SPIE*, 1989, **2989**:81~87
- 14 J. J. Degnan. Theory of the optimally coupled Q-switched laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1989, **25**(2):214~220