

文章编号: 0258-7025(2007)09-1190-04

# 热退偏损耗完全补偿的千赫兹电光调 Q Nd:YAG 激光器

冯永伟, 戴殊韬, 朱小磊

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要** 为了同时补偿固体增益介质的热致双折射及热透镜效应, 进一步提高重复频率 1 kHz 激光二极管(LD)侧向抽运高平均功率电光调 Q Nd:YAG 激光器的输出功率, 设计了一种完全消除热退偏损耗的双调 Q 开关谐振腔结构, 此结构在传统调 Q 谐振腔的基础上沿着偏振片的退偏方向增加了一个调 Q 谐振支路, 并使得激光从增益介质方向输出。实验结果表明, 此激光器的单脉冲能量比单 Q 开关结构的非补偿腔输出能量高出 74.7%。当侧面抽运的激光二极管输出脉冲能量达到 307 mJ 时, 激光输出能量达到 26.2 mJ, 光-光转换效率为 8.5%, 光束发散角为 1 mrad。

**关键词** 激光技术; Nd:YAG 激光器; 热退偏补偿; 电光调 Q; 热致双折射;

**中图分类号** TN 248.1 **文献标识码** A

## 1 kHz Electro-Optic Q-Switched Nd:YAG Laser with Complete Compensation of Thermally Induced Depolarization Loss

FENG Yong-wei, DAI Shu-tao, ZHU Xiao-lei

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

**Abstract** A double Q-switcher-structured resonator that can completely compensate the thermally induced depolarization loss is designed to compensate thermally induced birefringence and thermal lens effect of solid gain medium to get higher output power from a 1 kHz laser diode (LD) side-pumped electro-optic Q-switched Nd:YAG laser. We add a resonator branch along the way of the depolarization direction of the polarizer on the base of a conventional Q-switch uncompensated structure laser and the output is from the Nd:YAG crystal side. The experimental results show that, in the same situation, the pulse energy of the improved laser is 74.7% higher than that of original one. At a highest input energy of 307 mJ, the pulse energy of 26.2 mJ is obtained. The optic-optic efficiency is 8.5% and the angle of divergence is about 1 mrad.

**Key words** laser technique; Nd:YAG laser; thermally induced depolarization compensation; electro-optic Q-switch; thermally induced birefringence

### 1 引言

高平均功率、高重复频率、高光束质量的固态激光器在工业加工、军事装备、空间通信和医疗诊治等领域有着重要的应用价值。随着大功率激光二极管(LD)阵列输出性能的不断提高, 激光二极管抽运的全固态激光器(DPSSL)迅速成为激光器发展的热

点内容, 它具有效率高、性能稳定、输出光束质量好、体积小和使用方便等优点<sup>[1]</sup>。在高功率全固态激光器中, 激光二极管的抽运光谱和固体增益介质的吸收光谱能够实现匹配, 但是由于介质内的抽运光功率密度显著增强, 会出现严重的热效应, 引起热致双折射、相位畸变、热聚焦、热透镜等现象, 严重影响激

收稿日期: 2006-12-26; 收到修改稿日期: 2007-03-26

作者简介: 冯永伟(1981—), 男, 河南人, 硕士研究生, 主要从事固体激光技术、非线性频率转换技术的研究。

E-mail: ywfeng81@hotmail.com

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

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

光器的输出功率和光束质量<sup>[2~5]</sup>。随着抽运功率的增大,激光介质的热效应会越来越显著,甚至成为限制激光器性能提高的一个致命因素<sup>[6]</sup>。其中增益介质的热致双折射使激光束的偏振性明显退化,当腔内存在起偏器时,腔内损耗显著增加,将直接导致激光输出功率的下降,成为制约激光器输出功率提升的重要因素。而增益介质严重的热透镜效应将造成增益激活区内振荡模体积的缩小,激活粒子数有效利用率下降,最终限制激光器效率的提高。

目前有很多种方法来补偿热致双折射效应。最常见的是在腔内放两根相同的增益介质,并在双介质中间加一个 90° 旋转片,就可以实现该振荡器的双折射补偿,利用这一技术,已经实现了可忽略功率损耗的线偏振输出和相当于多模功率 50%~70% 的 TEM<sub>00</sub> 模输出<sup>[7]</sup>。在单棒激光谐振腔中,在棒和后反射镜之间放置 45° 法拉第旋转器,也能够起到相同的作用,实现双折射的补偿<sup>[8]</sup>,而集成了法拉第旋转器和反射镜的法拉第镜,则已被广泛地用于补偿热退偏损耗<sup>[9]</sup>。在高功率的电光调 Q Nd:YAG 激光器中,调 Q 晶体也会出现类似的热致双折射效应,其补偿方法和激光介质的热致双折射补偿方法相同。有人提出用一种环形腔结构来同时补偿调 Q 晶体和激光介质的热致双折射效应<sup>[10]</sup>,其原理是在两个相同的泡克耳斯盒之间加入 90° 旋转器,通过改变激光光束的偏振方向来同时补偿两个晶体的热致双折射效应。我们已利用双电光调 Q 晶体开展了对激光介质热致双折射效应补偿的研究,很大程度上提高了激光器的输出功率<sup>[11]</sup>。此外,当采用具有天然双折射特性的晶体作为激光介质时,由于晶体中的自然双折射效应远大于热致双折射效应,因而其热退偏效应可以忽略。而应用板条结构激光介质能够消除热退偏损耗,从而成为固体激光器的重要发展方向之一。本文针对重复频率 1 kHz 的激光二极管阵列侧面抽运的 Nd:YAG 介质热效应特性,为了实现热致双折射效应的完全补偿,设计了复合双调 Q 晶体开关凸镜全反射支路谐振腔结构,获得了高功率非偏振激光束输出。

## 2 激光器结构设计

图1为典型的没有热退偏补偿功能的电光调 Q Nd:YAG 激光器谐振腔示意图。激光介质 Nd:YAG 晶体被 32 条激光二极管阵列侧面环绕直接抽运,Nd:YAG 晶体尺寸为  $\phi 5 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$ 。作为

抽运源的激光二极管阵列阈值电流约为 20 A,单阵列最大峰值功率为 100 W (电流为 120 A),在 1 kHz 重复频率下其占空比为 20%。利用 KD\*P 晶体作为电光调 Q 晶体。激光器谐振腔长为 350 mm,平板输出耦合镜的透射率为 70%。为了补偿高功率抽运下的 Nd:YAG 晶体棒的热透镜效应,采用平凸腔设置,全反射后腔镜(HR mirror)采用凸镜,参考前期工作的理论分析实验结果<sup>[12]</sup>,实验中凸全反射镜的曲率半径为 -250 mm。

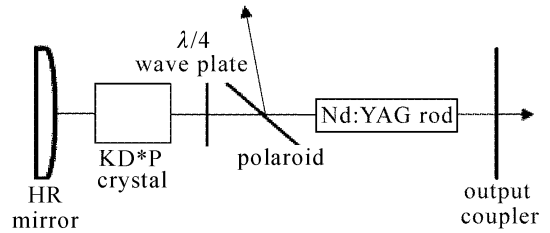


图1 传统 Nd:YAG 调 Q 固体激光器结构图  
Fig. 1 Typical Q-switched Nd:YAG solid-state laser

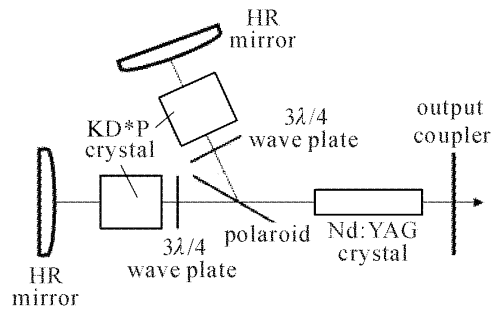


图2 热退偏补偿谐振腔结构示意图  
Fig. 2 Cavity of compensation of thermally induced depolarization

图 2 为本文采用的双调 Q 晶体热退偏补偿谐振腔设计。此腔在原来未经热退偏补偿谐振腔(称为主路)的基础上加一退偏损耗补偿支路,支路包括  $\lambda/4$  波片, KD\*P 电光调 Q 晶体和曲率半径为 -250 mm 的后腔全反镜,激光光束在支路中的传播方向与偏振片方向成布儒斯特角,对两路中的 KD\*P 电光调 Q 晶体加同步调 Q 电压,同步调 Q 电压通过一个高压信号发生器并联输出分成两路实现,能精确保证两路调 Q 电压同步。由于激光介质的热致双折射效应,激光束自增益介质出来后为部分偏振或非偏振光,当其经过偏振片后被分解为 s 和 p 偏振光,分别被偏振片反射到支路中和透过偏振片在主路中振荡。当不对两路中的 KD\*P 晶体加  $\lambda/4$  波电压时,两路中的振荡光均两次通过  $\lambda/4$  波片,产生 90° 的相位延迟,则支路中的光通过偏振片出射到腔外,主路被偏振片反射出射到腔外,两路均不能

形成振荡,无法输出激光。当对两块KD\*P晶体加上 $\lambda/4$ 波电压时,两路中的振荡光产生 $180^\circ$ 的相位延迟,偏振方向不改变,则两路中的光分别单独在两个后腔镜和输出镜间振荡,通过输出镜得到激光输出。这样,尽管增益介质存在严重的热致双折射效应,但两个偏振方向的光都能在腔内振荡,形成有效输出,谐振腔的损耗并没有增大,因此该谐振腔设计可以有效地提高激光的输出功率。

此种补偿方式与我们前期工作(文献[9])采用的补偿方式(调Q晶体段输出补偿)有所不同,调Q晶体段输出补偿输出方向为KD\*P电光调Q晶体端,并且在偏振片和激光介质中间需放置另外一个 $\lambda/4$ 波片(工作原理参见文献[9])。其所用热退偏补偿谐振腔中,被补偿的退偏损耗s分量偏振光每往返通过一次 $\lambda/4$ 波片和YAG增益介质后,大部分能量被转换成p分量偏振光而成为有效激光输出。经过多次往返,热退偏损耗就被完全补偿,并输出单一偏振(p分量)的激光脉冲。而本文中所用热退偏补偿谐振腔,两支路谐振腔参数完全一致,并允许s偏振分量和p偏振分量同时独立振荡,每次振荡s分量和p分量偏振光均能形成有效输出,热退偏损耗一次得到补偿。但是由于增益介质退偏效应的存在,两个偏振分量在增益介质内发生相互耦合,最后形成无规偏振输出。此激光器结构能同时进行热退偏和热透镜补偿,提高激光输出能量,尽管多了一条补偿支路,激光器结构仅比直线腔略显复杂。

### 3 实验结果

为了研究热致双折射的影响和两种热退偏补偿方式的效果,分别测量了对未经热退偏补偿的传统激光器、调Q晶体段输出补偿谐振腔和本文所用的非偏振输出热退偏补偿谐振腔的输出功率、偏振态、发散角和脉冲波形。实验中准连续激光二极管阵列侧向环绕抽运Nd:YAG晶体,工作重复频率为1 kHz,驱动电流脉冲宽度为 $200 \mu\text{s}$ ,Q开关的重复频率也为1 kHz。

图3为实验获得的在不同抽运能量下三种调Q谐振腔结构和图1结构静态空腔(D)(谐振腔内只存在增益介质)状态下的输出激光脉冲能量。

从图3中可以看出,当抽运脉冲能量最大为307 mJ时,未热退偏补偿的谐振腔输出脉冲能量为15 mJ(A),调Q晶体段偏振输出热退偏补偿激光器输出为21.9 mJ(B),非偏振输出热退偏补偿激光器

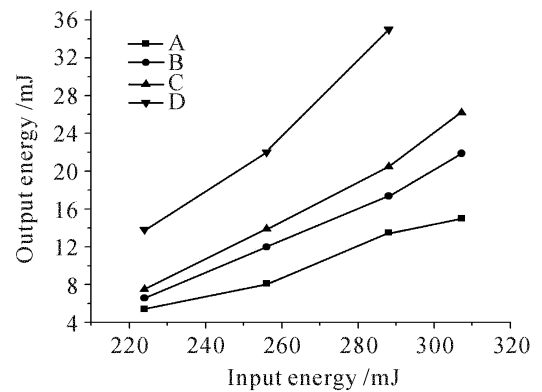


图3 输出激光脉冲能量

A: 未热退偏补偿谐振腔; B: 调Q晶体端输出补偿谐振腔;

C: 非偏振输出热退偏损耗补偿谐振腔; D: 空腔静态

Fig. 3 Output pulse energy

A: output without compensation of thermally induced depolarization; B: compensated output from Q-switched crystal side; C: unpolarized output with thermally induced depolarization

loss compensated; D: cavity of static output

输出为26.2 mJ(C),两种补偿方式比不补偿情况下的输出分别提高了46%和74.7%。在最高抽运能量时,未经热退偏补偿的谐振腔光-光转换效率为4.9%,两种补偿方式分别为7.1%和8.5%。对偏振度进行测量,发现在最大抽运能量下,输出光束的偏振度相差明显:未经热退偏补偿的谐振腔为4:1,调Q段输出热退偏补偿时为10:1,而激光介质段输出的非偏振输出热退偏补偿时为1:1。通过分析图3的实验结果可以看出,空腔静态输出的单脉冲能量和经过本文所用热退偏损耗补偿谐振腔输出的调Q单脉冲能量之比为1.7:1,充分显现了热退偏补偿的效果。

分析输出激光光束偏振特性可以看出,由于激光介质严重的热致双折射效应,激光通过增益介质之后偏振度明显下降,在未补偿谐振腔内,p偏振光单次通过增益介质后输出部分偏振光;调Q晶体段偏振输出热补偿方式能够保持较高偏振度的激光束输出,而非偏振输出热补偿方式获得偏振度为1:1的非偏振光。实验中,对谐振腔输出激光束的发散角进行测试,该平-凸谐振腔结构在最大抽运条件下,其光束远场发散角全角为1 mrad,说明本文设计的结构同时将增益介质的热透镜效应做了有效的补偿,保证了激光的光束质量。

图4(a),(b)为未热退偏补偿腔、非偏振输出热退偏补偿腔在抽运能量为307 mJ时的激光调Q脉冲波形,其脉宽分别为14.4 ns和33 ns。热退偏补偿谐振腔激光脉宽得到展宽的原因是由于进行了热退

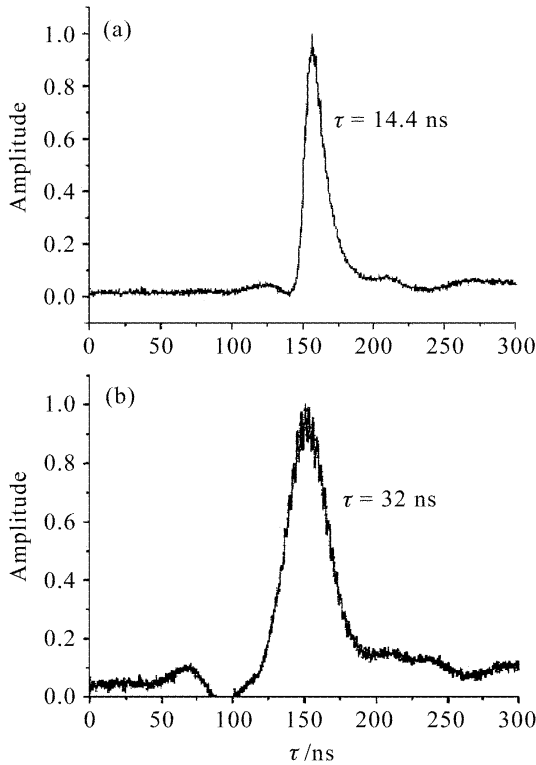


图 4 抽运能量为 307 mJ 时的脉冲

(a) 未热退偏补偿输出; (b) 激光介质段输出补偿输出

Fig. 4 Pulse at 307 mJ pump energy

(a) output without compensation of thermally induced depolarization; (b) compensated output from the laser crystal side

偏损耗补偿,使得谐振腔损耗下降明显。受实验条件限制,实验中激光二极管抽运能量比较小。当激光二极管抽运能量进一步提升,伴随着激光输出能量的增大,调 Q 激光脉冲宽度有望进一步压缩。

## 4 结 论

针对高重复频率高功率抽运下 Nd:YAG 中存在严重的热致双折射和热透镜效应的特点,设计了非偏振输出的、能同时实现热透镜和热退偏补偿的双电光调 Q Nd:YAG 激光谐振腔。实验测量了激光输出脉冲能量、激光偏振度、发散角、脉宽和脉冲波形,并对未经热补偿的谐振腔、调 Q 晶体段偏振输出热退偏补偿谐振腔、非偏振输出热退偏补偿谐振腔的激光输出特性进行了比较。通过两种补偿方式,输出能量分别提高了 46% 和 74.7%,三谐振腔光-光转换效率分别为 4.9%, 7.1% 和 8.5%。第一种补偿方式偏振度为 10:1,第二种补偿方式偏振度为

1:1,为圆偏振光,在只要求输出能量的情况下,第二种补偿方式有着更大的优点,激光远场发散角为 1 mrad。

## 参 考 文 献

- 1 Yang Aifen, Bu Yinghua, Chen Dedong *et al.*. Characteristic of liner LDs side-pumped Nd:YAG laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5):633~640  
杨爱粉,卜英华,陈德东等. 线阵激光二极管侧面抽运 Nd:YAG 激光器特性研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(5):633~640
- 2 Wang Tao, Yao Jianquan, Li Xifu *et al.*. The study on quasi-CW Nd:YAG intracavity frequency-doubled green lasers[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2002, **13**(6):575~577  
王涛,姚建铨,李喜福等. 准连续 Nd:YAG 倍频高功率绿光激光器的研究[J]. *光子·激光*, 2002, **13**(6):575~577
- 3 R. Fluck, M. R. Hermann, L. A. Hackel. Energetic and thermal performance of high-gain diode-side-pumped Nd:YAG rods[J]. *Appl. Phys. B*, 2000, **70**(4):491~498
- 4 Jiang Dongsheng, Zhou Shouhuan, Zhao Hong *et al.*. High average power double frequency operation of Nd:YAG rod lasers side pumped by diode arrays [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(4):301~303  
姜东升,周寿桓,赵鸿等. 二极管侧面抽运的高平均功率倍频 Nd:YAG 激光器[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(4):301~303
- 5 Jianghua Ji, Xiaolei Zhu, Chunyu Wang. Comparison of laser performance of electro-optic Q-switched Nd:YAG ceramic/single crystal laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(4):219~221
- 6 Yu Jin, Tan Huiming, Qian Longsheng *et al.*. Theoretical study on thermal beam focusing in longitudinally-pumped solid-state laser rods [J]. *High Power Laser and Partical Beams*, 2000, **12**(1):27~31  
余锦,檀慧明,钱龙生等. 纵向泵浦固体激光介质热透镜效应的理论研究[J]. *强激光与粒子束*, 2000, **12**(1):27~31
- 7 Inon Moshe, Steven Jackel. Correction of thermally induced birefringence in double-rod laser resonators-comparison of various methods[J]. *Opt. Commun.*, 2002, **214**(1-6):315~325
- 8 Giampiero Giuliani, Paola Ristori. Polarization flip cavities: A new approach to laser resonators[J]. *Opt. Commun.*, 1980, **35**(1):109~112
- 9 Efim Khazanov, Alexey Anastasiyev, Nikoley 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
- 10 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
- 11 Jianghua Ji, Xiaolei Zhu, Shutao Pai *et al.*. Depolarization loss compensated resonator for electro-optic Q-switched solid-state laser [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **270**(2):301~304
- 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. 机载测深激光雷达千赫兹全固态激光器设计及特性研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(9):1197~1201