

文章编号: 1001-5078 (2006) 07-0551-04

LD 泵浦高重频腔倒空 Nd YAG 激光输出研究

曾钦勇^{1,2}, 万 勇^{1,2}, 牛瑞华², 韩 凯², 朱大勇¹

(1. 电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054; 2. 西南技术物理研究所, 四川 成都 610041)

摘 要:文中从声光腔倒空动态过程的速率方程出发, 分析了腔倒空过程中, 在光泵浦和倒空超声波脉冲序列的共同作用下, 激光增益介质的反转粒子数密度及谐振腔光场变化的动态过程。以此为基础, 讨论了声光腔倒空过程中影响激光倒空效率、激光脉冲形状等的关键因素, 在理论分析的基础上, 进行了 LD 泵浦 Nd YAG 声光腔倒空高重频激光输出的实验研究, 获得了重复频率 1.2 MHz, 脉宽 120 ns, 平均功率 9 W 的腔倒空激光脉冲。

关键词:声光腔倒空; 激光二极管; 泵浦; 重复频率

中图分类号: TN248.1⁺3 **文献标识码:** A

Research of Laser-diode-pumped High Repetition Rate Cavity Dumping Nd YAG Laser

ZENG Qin-yong^{1,2}, WAN Yong^{1,2}, NIU Rui-hua², HAN Kai², ZHU Da-yong¹

(1. School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China; 2. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: Starting from the rate equations of acoustic-optical modulated cavity dumping Nd YAG laser, the dynamical processes of the number of atoms excited to the upper laser level and the number of coherent photons in the cavity have been analyzed theoretically both in laser buildup period and dumping period. Some key parameters which affect the dumping efficiency as well as the laser pulse length have been discussed in detail. At the same time, an acoustic-optical modulated cavity dumping Nd:YAG laser continuously pumped by laser diode has been studied experimentally. High repetition rate laser pulses as high as 1.2 MHz has been achieved, the pulse width is about 120 ns, and the average laser power is 9 W.

Key words: acoustic-optical modulated cavity dumping; laser diode; pump; repetition rate

1 引言

激光腔倒空技术是获得高重复频率和纳秒激光输出的重要途径, 很多学者都对此进行了深入的实验和理论研究^[1-5], 使得该技术得到了广泛的应用。类同于 Q 开关激光器, 在腔倒空过程中, 激光谐振腔同样也在高 Q 值和低 Q 值之间周期性变换, 但不同的是, 它在谐振腔低 Q 值时获得激光脉冲输出, 而在激光脉冲间隔的时间内以光场的形式贮能, 而不是如调 Q 激光以工作物质的粒子数反转贮能。Q 开关激光器可获得的重复频率受限于激光腔内光场

的有限建立时间和重新泵浦到反转粒子数所需时间, 重频最高为几十到上百千赫兹, 而腔倒空可获得比 Q 开关激光器高得多的重复频率^[6]。在声脉冲的作用下, 在激光谐振腔内腔倒空过程是一个涉及到众多参量快速变化的过程, 包括激光的抽运, 激光介质粒子数反转, 腔内光子数和激光脉冲输出等的急剧变化, 其动态过程较为复杂, 本文从理论上对声

作者简介:曾钦勇 (1970 -), 男, 博士生, 主要从事光电对抗等方面的研究。

收稿日期: 2005-11-15

光腔倒空的动态过程进行了较深入的分析,同时,应用 LD 泵浦的 Nd YAG 激光器,采用直通式谐振腔声光腔倒空技术,获得了高稳定度、高重复频率的腔倒空激光输出。该结构相对于已有文献中所报道的折叠腔具有输出功率高、结构简单、可靠性好等优点。

2 声光腔倒空基本理论

当正弦函数超声波以速度 v_s 在介质中传播时,所带来的扰动会引起介质密度的变化,周期性的介质密度变化带来介质折射率的周期性变化,可表示为^[7]:

$$\Delta n(z, t) = \Delta n \sin(\omega_s t - k_s z) \quad (1)$$

式中, $\omega_s/k_s = v_s$, 当入射光相对声波波前以布拉格角

$$\theta_B = \sin^{-1} \frac{\lambda_0/n}{2\lambda_s} \quad (2)$$

式中, λ_0 为真空中的光波长; n 为声光介质的折射率; λ_s 为超声波长。入射到声光介质上时,光波与声波在介质中发生互作用,使光衍射,衍射光分为 0 级光和 1 级光,1 级光的衍射效率^[8]为:

$$\eta \approx \frac{M_2 P_s}{77} \left(\frac{L}{H} \right) \frac{0.633}{\lambda^2} \quad (3)$$

式中, M_2 为声光介质相对于熔石英的优值 (定义熔石英 $M_2 = 1$); P_s 是超声波功率,单位瓦; λ 是光波长,单位微米; L 为声光互作用距离,即换能器长度; H 为换能器宽度。从 (2) 式可知,为获得高的 1 级光的衍射效率,应选择高优质的声光介质和大的换能器纵横比 L/H 。

对于 Nd YAG 这样的四能级系统,其腔内反转粒子和光子满足下列速率方程^[9-10]:

$$dN/dt = R - \lambda N - \beta FN \quad (4a)$$

$$dF/dt = \beta FN - (\varepsilon + T) F \quad (4b)$$

式中, N 和 F 分别表征腔内工作物质粒子数反转密度和光子密度, R , λ 和 β 则分别表征单位时间内泵浦到上能级的粒子数、上能级原子的自发跃迁速率与受激光辐射跃迁速率。若用 Δ 表示光场在腔内循环一周的固有损耗,包括吸收、散射和衍射等损耗, γ 表示输出损耗,则 (3) 式中 $\varepsilon = \Delta/2L$ 及 $T = c\gamma/2L$, 其中 c 和 L 分别为光速和谐振腔腔长。

对连续运转的 Nd YAG 激光器,反转粒子数密度和光子密度最终趋于稳定,即 $dN/dt = 0$ 和 $dF/dt = 0$, 则由 (4) 式可求得激光输出功率为:

$$P = TF = T(\beta R - \lambda\varepsilon - \lambda T)/\beta(\varepsilon + T) \quad (5)$$

式中, P 为输出功率,对 (5) 式进行导数运算并令 $dP/dT = 0$, 即获得最大激光输出功率条件,该连续泵浦 Nd YAG 激光器的最佳工作参数如下^[10]:

$$T_m = \varepsilon(\varphi^{1/2} - 1) \quad (6a)$$

$$N_m = \varepsilon\varphi^{1/2}/\beta \quad (6b)$$

$$F_m = \lambda(\varphi^{1/2} - 1)/\beta \quad (6c)$$

$$P_m = R(1 - 1/\varphi^{1/2})^2 \quad (6d)$$

式中, $\varphi \equiv R\beta/\lambda\varepsilon$ (泵浦速率/阈值泵浦速率)。

声光腔倒空激光器的工作方式是周期性地从谐振腔中提取能量,因此,只需研究一个周期内的动态过程就足以说明问题。一个工作周期可分为两个阶段,第一阶段为光场建立期,此时声光晶体未加载超声波,不产生衍射效应,在腔内相当于一个小的插入损耗,此时谐振腔处于高 Q 值状态,输出损耗 $T = 0$ 。在泵浦的作用下,只要腔内工作物质中粒子数反转密度 N 达到阈值粒子数反转密度时,即开始振荡,产生激光。由于腔损耗很小 (腔处于高 Q 状态),激光在抽运的作用下在腔内不断产生,不断积累,腔内的激光功率不断增长。第二阶段为倒空期,此时声光调制器上加载一倒空超声波脉冲,晶体在超声波作用下,形成相位光栅,光波与相位光栅相互作用发生布拉格衍射,其一级衍射光能倒出腔外,形成一个腔倒空激光脉冲,完成腔倒空的一个周期。在倒空期, Nd YAG 激光器的反转粒子数密度 N 并无显著变化 ($< 5\%$),如图 1(c) 所示,然而,期间腔内光子数密度发生急剧改变,如图 1(d) 所示,在此期间,损耗率大于光子的增长率,输出损耗占绝对统治地位,可忽略自发辐射和受激辐射的影响,速率方程表示为:

$$dF/dt = -(\varepsilon + c\gamma/2L)F \quad (7)$$

式中, $c\gamma/2L$ 为光子在腔内循环一周的衍射损耗率,对 (7) 式积分并整理可得

$$F = F_0 \exp[-(\varepsilon + c\gamma/2L)t] \quad (8)$$

式中, F_0 为光场建立期终了时光子密度,由光场建立期光泵浦速率、激光介质上能级原子的自发跃迁速率和受激辐射跃迁速率、光腔的损耗及建立期时间等因素决定。

若定义腔内光子数下降为初始值的 0.5 的时间为激光脉冲宽度 τ ,则由 (8) 式可得:

$$\tau = 0.69/(\varepsilon + c\gamma/2L) \quad (9)$$

由 (9) 式可见,声光衍射效率对激光脉冲宽度的影响最为显著,提高声光开关的衍射效率有助于减小

激光脉冲宽度。

腔倒空动态过程如图 1所示,其中 $R(t)$ 为泵浦速率; $s(t)$ 为声光调制脉冲; $N(t)$ 为增益介质的粒子数反转。由于是谐振腔贮能,所以整个腔倒空过程中, $N(t)$ 并无显著变化, $F(t)$ 、 $P(t)$ 分别为腔内光子数密度和输出激光脉冲波形。

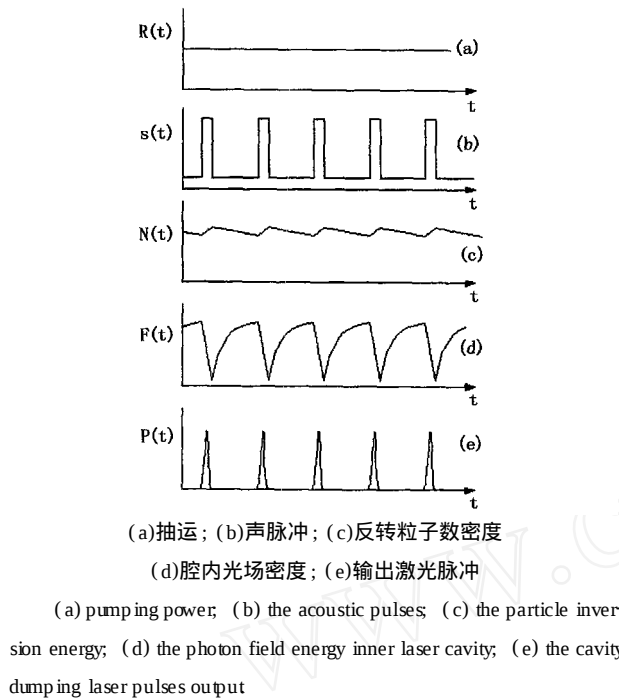


图 1 腔倒空动态过程
Fig 1 the dynamic processes of cavity dumping

3 实验及结果分析

实验装置如图 2所示,其中 1064nm全反镜片 1 和 5 构成封闭谐振腔,由激光二极管阵列泵浦 Nd YAG激光晶体,声光调制晶体上加调制超声波脉冲,其 1 级布拉格衍射将腔内激光倒出腔外,获得高重频激光输出。

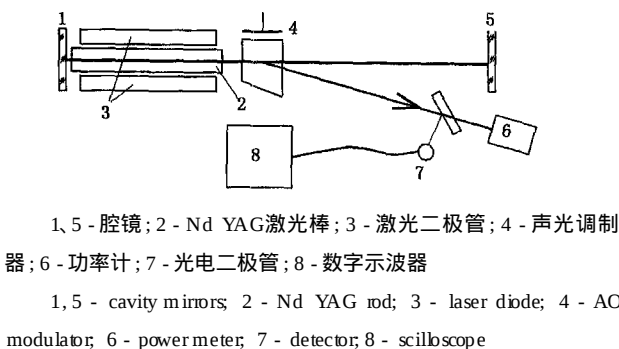


图 2 实验装置
Fig 2 schematic drawing of the experimental setup

激光谐振腔采用直通式平凸非稳腔,有利于提高输出光束质量和补偿激光晶体的热透镜效应,直通谐

振腔相对于声光腔倒空普遍采用的折叠式激光谐振腔^[8,10],其结构更加紧凑,方便调节,增加了系统的可靠性。由于没有如折叠式谐振腔那样,可以将声光调制晶体放在激光束的光腰上,因此所得到的激光脉冲宽度将相对折叠腔有所增加,但声光调制晶体不处在振荡激光的光腰处,这减小了晶体处的光功率密度,有助于提高激光输出的功率密度,而不致造成声光晶体的光损伤。实验结果也证实了这一点。

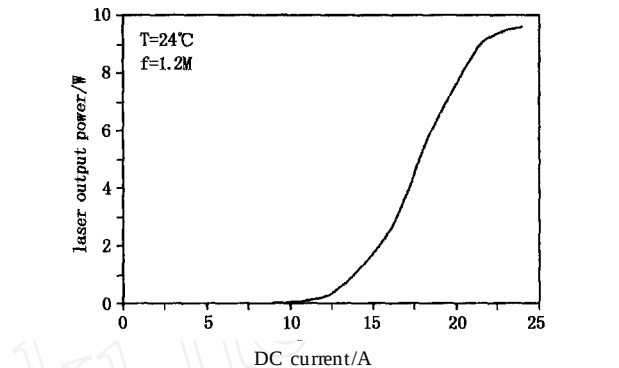


图 3 不同注入电流下激光输出功率
Fig 3 laser power output versus DC current of the diode pumping

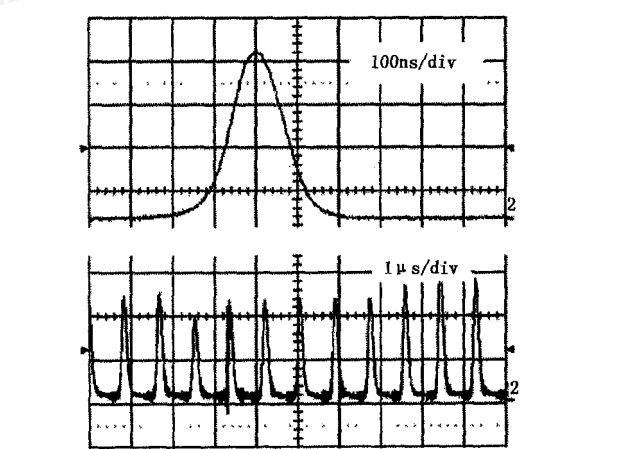


图 4 输出脉冲的示波器图
Fig 4 oscilloscope traces of the laser pulses

本装置所用激光晶体直径为 3mm、长 75mm 的 1%掺杂 Nd YAG激光棒,激光二极管中心波长 808nm,谱宽 $\leq 3\text{nm}$,泵浦模块通 24 恒温循环水,以保持激光二极管泵浦波长稳定。声光调制晶体为熔石英晶体,通光孔径 4mm。声光换能器上加载超声频率为 100MHz,调制频率 1.2MHz时,阈值电流 10A,输入电流 23A时获得平均功率 9W、脉宽 120ns的高重频激光输出,输出激光功率随激光二极管工作电流变化如图 3所示。图 4为实验中示波器采集的激光波形,波形显示激光脉冲频率变化小于 0.01%,激光脉冲幅度跳动小于 8%,脉宽跳动小于 5%。

4 结 语

讨论了声光腔倒空的动态过程,从速率方程出发,分析了在连续泵浦条件下,腔倒空过程中增益介质的反转粒子数密度和谐振腔光场的变化过程,并在理论分析的基础上,进行了声光腔倒空 Nd:YAG 高重频激光输出的实验研究,获得了重复频率 1.2 MHz、脉宽 120 ns、平均功率 9 W 的腔倒空激光脉冲,这样高稳定性与高重频的脉冲激光输出,可以在诸如激光光通信、激光成像雷达、光电对抗等领域中获得广泛应用。

参考文献:

- [1] J C van den Heuvel, F J M van Putten Short-pulse, eye-safe Nd:YAG laser using cavity-dumping[J]. IEEE J. Quant Electron, 1998, 34(5): 920 - 925
- [2] Zang Shaojun, Huang Liu, Tian Yong, et al Laser pulse width controlling in the process of cavity flows empty with slowly Q adjusting[J]. Laser Technology, 2000, 24(3): 148 - 150 (in Chinese).
- [3] Zhang Shaojun, Liu Jingwan, Huang Liu Transference process analysis of flat top laser pulse in the uneven media[J]. Engineering Science, 2002 4(6): 13 - 15 (in Chinese).
- [4] Sheng Cuixia, Zhang Xiufeng, Li Qiang, et al The research of cavity dumper driver[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2004, 27(1): 89 - 91 (in Chinese).
- [5] Bret N Flanders, David C Amett, Norbert F Scherer Optical pump-terahertz probe spectroscopy utilizing a cavity-dumped oscillator-driven terahertz spectrometer[J]. IEEE J. S T Q E, 1998, 4(2): 353 - 359
- [6] W Koechner Solid State Laser Engineering[M]. 5th ed New York: Springer-Verlag, 1999, 448 - 453
- [7] Amnon Yariv Optical electronics in modern communications[M]. 5th ed Oxford: Oxford University Press, Inc 1997, 474 - 484
- [8] Herman A Kruegle, Lothar Klein High peak power output, high PRF by cavity dumping a Nd:YAG laser[J]. Appl Opt, 1976, 15(2): 466 - 471
- [9] Qing Guangbi, Zhang Chengquan, Liu Yun Theoretical analysis of acoustic-optical cavity dumping Nd:YAG laser[J]. Laser Technology, 1991, 17(1): 16 - 22 (in Chinese).
- [10] Joseph M Moran Calculation of the minimum repetition rate of a cavity-dumped four-level laser[J]. IEEE J. Quant Electron, 1976, 12(10): 639 - 644

中国光学光电子行业协会代表团成功访问台湾

2006年6月9日~19日,由中国光学光电子行业协会秘书处联合发光二极管显示屏分会、光电器件分会、激光分会、红外分会、光学元件与仪器分会组织的“中国光学光电子行业协会赴台参观访问团”一行75人顺利对台湾进行了参观和访问。这次考察对于推动两岸光电企业交流、务实沟通光电行业信息起到积极作用。

财团法人光电科技工业协进会(简称PDA)主办的一年一届的台北光电周(6月14日~17日)包括国际光电大展、光通讯宽频展、LED照明展、精密光学展、产业及技术研讨会等活动,是台湾光电子产业最重要的年度盛会及国际行销平台。协会访问团同PDA常务董事石大成博士、PDA副执行长马松亚先生、推广组专案经理萧淑敏女士、蔡振懋先生、产业分析师汪伟恩先生、陈羿维先生等见面,双方就加强两岸光电行业的合作和互动进行了座谈。同时中国光协代表团应邀出席了6月15日的“Opto & LED联谊酒会”,代表团团长中国光学光电子行业协会秘书长王琳在酒会上致辞,并且表示欢迎台湾光电企业2006年12月来北京参加中国光协主办的北京国际光电周活动。

中国光协代表团参观了敏通企业股份有限公司,受到敏通公司杨隆荣总经理及敏通员工的热情接待。中国光协LED显示屏企业代表与聚积科技股份有限公司、台湾积体电路制造股份有限公司(简称台积电)代表就聚积公司最新产品以及台积电代工等方面进行了交流和切磋。

此次赴台考察活动的参与者多是光电行业企事业单位总经理,均来自协会会员单位。

代表团按照专业划分为:光学团、LED显示屏团、激光及光电器件团三个专业团。10天时间里,大家不仅能够与台湾光电同行交流,更可以相互深入了解,既是竞争对手,又能作为朋友。

通过此次参观访问,中国光协与PDA重拾友情,确定建立战略合作关系,今后将合作开展一系列的交流活动以及进行产业分析信息互换。双方将互相支持每年的台北光电周(6月)和北京光电周(12月)活动。中国光协与PDA秉承“光电科技服务人类”的宗旨,将共同努力为两岸光电事业的发展、光电企业的交流搭建更宽阔的舞台。

(中国光协程慧云供稿)