

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0111-04

# 提高主动调 Q 激光输出稳定性的新方法

闫平 巩马理 谢韬 刘兴占

(清华大学精密仪器与机械学系, 北京 100084)

**摘要** 提出了对主动调 Q 激光器实施光预抽运控制的新方法。该方法通过有效抑制中频噪声提高主动调 Q 激光输出稳定性。实验表明,采用光预抽运技术后,Nd:YAG 声光调 Q 激光器单脉冲能量稳定性提高约4%。在重复频率 50 Hz 时,获得了单脉冲能量为 45 μJ 的基横模激光输出,脉冲能量稳定性为 ±0.8%,脉冲开关时间抖动约 ±255 ps。

**关键词** 光预抽运, 能量稳定性, 噪声

**中图分类号** TN248.1<sup>+</sup>3 **文献标识码** A

## A New Method for Improving the Stability of Active Q-switched Lasers

YAN Ping GONG Ma-li XIE Tao LIU Xing-zhan

(Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract** A new method of optical pre-pumping was proposed for active Q-switched lasers. With the optical pre-pumping the stability of Q-switched lasers would be improved effectively by squeezing intermediate frequency noise. Experiments showed that the stability of Q-switched output pulses would be increased by 4% in the system of LD pumped acoustic-optical Q-switched Nd:YAG. At the repetition of 50 Hz, 45 μJ output energy with single fundamental mode and ±0.8% instability were achieved.

**Key words** optical pre-pumping, energy stability, noise

在众多激光应用领域,如激光计量、惯性约束核聚变激光系统、激光医学,都需要高稳定的激光光源,因此,激光器输出噪声应该尽量接近光量子噪声。从理论上二极管抽运的固体激光器为实现这一目标提供了可能。但实际上激光器的噪声高于量子噪声数个数量级。为此各国学者对各种激光器的噪声模型和稳定方法展开过大量研究<sup>[1-3]</sup>。本课题组于1999年提出了被动调 Q 预抽运激光技术<sup>[4]</sup>,有效改善了被动调 Q 激光器的稳定性。针对主动调 Q 激光器,我们在实验中发现,类似的预抽运技术同样有效。本文阐述了光预泵浦提高主动调 Q 激光器的机理和光预抽运控制方法及其实验结果。

### 1 半导体激光抽运的固体激光器噪声模型

半导体激光抽运固体激光器的噪声是由谐振腔内反转粒子数、腔内光振荡过程和抽运源诱导的噪声共同作用引起的。以激光量子理论为模型,获得的噪声功率谱密度  $V(\nu)$  表示如下<sup>[5]</sup>:

$$V(\nu) = V(\nu; V_p, \Gamma, J_i, \gamma_i, t_c)$$

其中,  $V_p(\nu)$  表示抽运光噪声功率谱,  $\Gamma$  表示抽运速率  $\Gamma = P/P_{th}$ ,  $J_i$  表示增益介质第  $i$  级能级的反转粒子数密度,  $\gamma_i$  表示受激辐射速率,  $t_c$  表示粒子在谐振腔内往返时间。

LD 抽运的固体激光器噪声功率谱可分为三个区域。在低频区,噪声主要由抽运源的功率起伏引起;在中频区(对于 Nd:YAG, 典型为几百 KHz),噪声主要由弛豫振荡引起, Freitag 认为<sup>[5]</sup>即使运用超稳定的抽运源,这一频率的噪声仍然存在。从数值计算结果可以看出,在实际固体激光系统中,由弛豫振荡引起的中频噪声超过低频噪声,占主导地位。在高频区,由于谐振腔的滤波作用,噪声谱按  $1/f^2$  衰减,当大约到 100 MHz 时,噪声接近量子噪声限,此时噪声和抽运源的稳定性和腔内粒子数无关。

### 2 光预抽运主动调 Q 输出稳定机理

调 Q 激光器由于引入 Q 开关,其稳定性比连续激光器大大下降。对于声光调 Q 器件,声光调 Q

器件外调制信号的稳定性、驱动功率的稳定性以及工作温度的稳定性,都将影响调 Q 脉冲的稳定性,这些不定因素在激光噪声谱中将主要影响低频功率稳定性,我们可以通过提高声光调制器的驱动电路和温控电路精度加以解决。但是,在中频区,每一脉冲建立和产生过程中由弛豫振荡和反转粒子数的随机性引起的噪声占有更大的比例。和连续器件相比,声光调 Q 的引入引起了腔内损耗的调制,而激光产生过程的量子放大和增益过程,对上能级反转粒子数的消耗与腔内损耗有关,因此调 Q 过程相当于对腔内反转粒子数实施了脉冲调制,调 Q 脉冲的开启时间,初始反转粒子数和剩余反转粒子数的随机性,造成了比连续激光器输出更大的噪声。常规的方法无法对此做出切实的改进。

我们提出对声光主动调 Q 实施光预抽运增益控制,此方法通过增大抽运功率实现,抽运功率足够大保证调 Q 激光器在高损耗状态时有一微小直流光输出。相对于普通调 Q 激光技术,因为存在直流光输出,我们把此技术称为光预抽运主动调 Q 技术。由于光预抽运工作在高损耗状态,不会减小调 Q 激光器的单脉冲能量,直流光成分可以在实际激光应用系统中通过接收电路滤波或其他光学方法滤掉。此方法简单易行,稳定效果好。

光预抽运主动调 Q 技术提高功率稳定性的机理如图 1 所示。由于抽运功率高于激光器高损状态的阈值抽运功率,激光器始终有直流光输出信号,换句话说,声光调 Q 开关没有处于完全关断状态,此直流光信号对提高调 Q 激光输出稳定性起到了三方面作用。

第一,稳定初始反转粒子数。由激光器理论可知:小信号稳态增益时反转粒子数近似为常数,减小了由于不确定的弛豫振荡引起的初始反转粒子数的变化。使每一个调 Q 脉冲初始时刻腔内反转粒子数  $n_i$  趋于稳定。

第二,调 Q 脉冲的建立过程趋于一致。对于普通调 Q 器件,光脉冲开始建立时,自发辐射为激光振荡提供了种子源。自发辐射具有很大的不确定性,可以看成是晶体里杂乱无章的噪声。它们在晶体里的不同位置,以不同的偏振态,不同的方向产生并放大,互相之间形成增益竞争。那些方向与谐振腔选模方向一致,并且位于增益较高位置的自发辐射在增益竞争中确立了优势,最终形成激光脉冲。因此,光脉冲建立的最初阶段,由于自发辐射增益竞争的存在,造成了光脉冲建立时间的固有不稳定性,

从而最终影响到脉冲序列的稳定性。采用光预泵浦技术时,在 Q 开关打开前,腔内光子数从  $\phi_0$  开始增加,从而越过了光脉冲建立所需时间,消除了自发辐射增益竞争所带来的随机性,在谐振腔内反转粒子数和光子数都很稳定的情况下进一步受激辐射放大,从而使脉冲序列的稳定性得以提高,并且调 Q 脉冲建立时间缩短。

第三,由 DPSSL 系统噪声理论,较高的抽运速率有利于压缩激光器噪声<sup>[6]</sup>。所以,采用预抽运技术,还可有效抑制激光器的噪声。

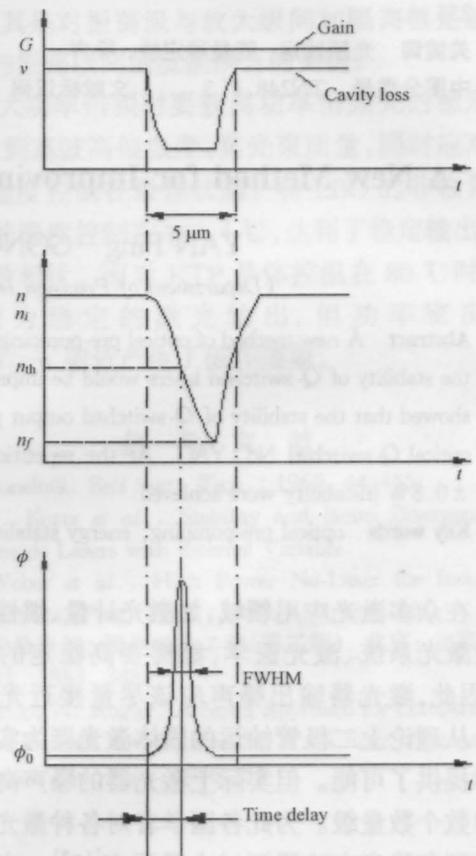


图 1 光预抽运调 Q 激光器腔内损耗  $\nu$ 、增益  $G$ 、粒子反转数  $n$  和光子密度  $\phi$  曲线

Fig.1 Intercavity loss  $\nu$ , gain  $G$ , population inversion density  $n$  and photon density  $\phi$  curve in optical pre-pumping Q-switched lasers

### 3 实验装置

以 LD 抽运的 Nd:YAG 声光调 Q 激光器验证了光预抽运技术。激光系统结构如图 2 所示。LD 抽运源为中科院半导体所生产的 HTL81M405-P2 型 5 W 带光纤耦合输出的半导体激光器,中心波长 806 nm ( $T = 19^\circ\text{C}$ ),输出光纤芯直径为  $\phi 400 \mu\text{m}$ ,数值孔径 0.22。采用端面抽运,为了保证激光器抽

运光场与激光振荡光场相匹配和保证基横模振荡, 设计了光学耦合系统, 用两个焦距为 9.8mm 的双凸

透镜完成抽运光的耦合。

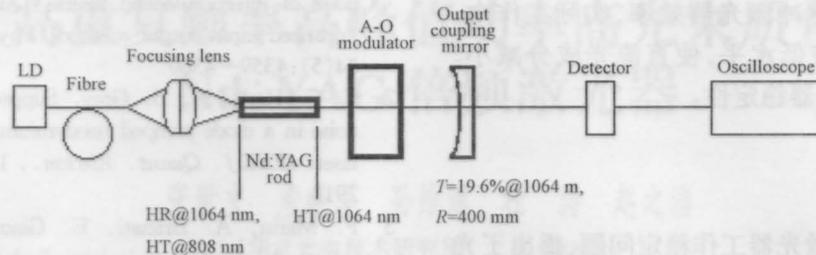


图 2 LD 抽运 Nd:YAG 声光调 Q 激光器系统图

Fig. 2 Experimental setup of LD pumping acoustic-optical Q-switched Nd:YAG laser

Nd:YAG 晶体尺寸  $\phi 3 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ ,  $\text{Nd}^{3+}$  离子掺杂浓度为 1at.-%, 谐振腔采用平凹腔, 靠近抽运光的增益介质通光表面兼作腔镜, 表面镀 1064 nm 高反、808 nm 高透膜, 输出镜为凹面镜, 对 1064 nm 激光的透过率为 19.6%, 曲率半径 400 mm。声光调制器位于腔内靠近 Nd:YAG 棒放置, 工作波长  $1.06 \mu\text{m}$ , 一级衍射效率为 40%, 声光换能器的超声频率为 70 MHz, 调制脉冲上升、下降时间小于 15 ns, 调制脉宽  $5 \mu\text{s}$ , 驱动电功率 1.5 W。

#### 4 实验结果

为了提高激光器系统的稳定性, 系统中 LD 电源的电流驱动精度约 0.1%, LD 温控精度  $\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ , 声光调制器驱动功率稳定性约 0.2%。激光增益介质由铝箔紧包置于带散热片的铜套中, 整个激

光器结构密封。使用 LPE-1B 激光功率/能量计测量静态光功率和动态平均光功率。当驱动电流 600 mA, 获得连续激光输出功率 300 mW, 静态激光器效率 30.6%, 激光器静态激光功率输出稳定性约 1.15%。这里, 稳定性定义为测量最大值与最小值之差和测量平均值之比。

当激光器工作于调 Q 状态时, 实验中用 12 GHz 快速光电探测器接收调 Q 光脉冲信号, 用 Agilent 高速存储示波器观测脉冲波形, 并进行输出脉冲峰值、脉宽的稳定性测量。这时稳定性测量相当于噪声功率全谱的测量。当抽运电流为 650 mA, 声光调 Q 重复频率 50 Hz 时, 获得单脉冲能量  $45 \mu\text{J}$  且为基横模激光输出。

声光调 Q 激光单脉冲能量稳定性实验结果如表 1 所示。

表 1 声光调 Q 激光器单脉冲能量、脉宽及稳定性实验数据

Table 1 Relative pulse energy, width and their instability in acoustic-optical Q-switched Nd:YAG laser

LD currents /mA	Q-switched laser working at cut off or not	Average output pulse /mV	output pulse Deviation $\sigma$ /mV	Instability of pulse energy	Average pulse width /ns	pulse width deviation $\sigma$ /ns	Instability of pulse width
480	yes	2044	114.6	$\pm 5.6\%$	18.54	0.544	$\pm 2.9\%$
500	no	2217	29.9	$\pm 1.3\%$	18.24	0.245	$\pm 1.3\%$
550	no	2392	41.7	$\pm 1.7\%$	19.41	0.301	$\pm 1.6\%$
600	no	2546	35.9	$\pm 1.4\%$	19.48	0.211	$\pm 1.1\%$
650	no	2489	31.0	$\pm 1.2\%$	19.36	0.255	$\pm 1.3\%$
700	no	2283	19.2	$\pm 0.8\%$	19.42	0.246	$\pm 1.3\%$

当声光调 Q 激光器工作于完全关断状态时, 调 Q 脉冲能量不稳定性为  $\pm 5.6\%$ , 此时稳定性定义为测量值的均方差  $\sigma$  和测量均值之比。当对调 Q 激光器实施光预抽运控制时, 即加大抽运功率使调 Q 激光器处于不完全关断状态, 调 Q 脉冲能量不稳定性从  $\pm 5.6\%$  提高到  $\pm 0.8\%$  (抽运电流 700 mA)。据我们所知, 在无外反馈功率稳定措施系统

中, 此稳定性结果达到声光调 Q 激光器的先进水平。

声光调 Q 激光单脉冲脉宽及其稳定性实验结果如表 1 所示。当声光调 Q 激光器工作于完全关断状态时, 调 Q 脉冲脉宽不稳定性为  $\pm 2.9\%$ , 当对调 Q 激光器实施预光抽运控制时, 调 Q 脉冲脉宽不稳定性从  $\pm 2.9\%$  提高到  $\pm 1.3\%$ 。当激光器在驱

动电流 650 mA 时, 声光调 Q 激光器脉冲半峰值宽度为 19.36 ns, 脉冲开关时间抖动约 ±255 ps。

为了提高调 Q 脉冲激光器效率, 实际工作中, 可选择光预抽运在较低水平, 使直流光成分减小。同时可获得高的激光器稳定性。

### 5 结 论

针对主动调 Q 激光器工作稳定问题, 提出了光预抽运方法。实验证明, 对主动调 Q 实施光预抽运技术后, 调 Q 脉冲序列的能量稳定性提高约 4%, 脉宽稳定性提高约 1%。可见光预抽运技术可以有效抑制主动调 Q 激光器的噪声。抑制噪声的机理主要是通过抑制中频噪声功率来实现的, 光预抽运技术有效稳定调 Q 脉冲的初始反转粒子数和控制脉冲建立过程。

### 参 考 文 献

- 1 Timothy C. Raiph, C. C. Harb, H. Bachor. Intensity noise of injection-locked lasers: Quantum theory using a linearized input-output method. *Phys. Rev. (A)*, 1996, **54**(5):4359~4360
- 2 C. C. Harb, M. B. Gray. Suppression of the intensity noise in a diode-pumped neodymium: YAG nonplanar ring laser. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1994, **30**(12):2907~2913
- 3 F. Marin, A. Branati, E. Giacobino. Squeezing and intermode correlations in laser diodes. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **75**(25):4606~4609
- 4 Weiyu Wang, Mali Gong, Guofan Jin. Dynamics of diode-pumped microchip laser passively Q-switched with Cr: YAG. *Proc. SPIE*, 1999, **3899**:448~454
- 5 I. Freitag, C. C. Harb et al.. Intensity Noise Transfer in Diode-Pumped Nd: YAG Lasers. *Advanced Solid State Lasers*, 1997, **10**:380~385
- 6 C. C. Harb, Timothy C.. Intensity-noise properties of injection-locked lasers. *Phys. Rev. (A)*, 1996, **54**(5):4370~4381



图 1 平均电流 Iavg 与脉冲宽度 Δt 的关系

图 1 平均电流 Iavg 与脉冲宽度 Δt 的关系