

# 主动锁模和调Q Nd:YAG激光倍频同步泵浦染料激光器特性研究

丘志仁 周学聪 林位林

(中山大学, 广州, 510275)

**摘要:** 本文介绍一种主动锁模和调Q Nd:YAG 激光倍频同步泵浦可调谐染料激光器。由此激光器已获得脉冲宽度为70ps, 脉冲能量为0.1 $\mu$ J, 调Q重复率达7kHz, 调谐范围为580~610nm 的微微秒脉冲, 本文还研究了这一激光器的时间和频谱特性, 分析了腔长失配对脉宽和中心波长的影响。

Studies on a picosecond dye laser synchronously pumped by  
a mode-locked and Q-switched Nd:YAG laser

Qiu Zhiren, Zhou Xuecong, Lin Weizhu

(Zhongshan University)

**Abstract:** A picosecond dye laser synchronously pumped by an active mode-locked and Q-switched Nd:YAG laser is reported. Tunable laser pulses with pulse duration of 70ps, pulse energy of 0.1 $\mu$ J and tunable range of 580~610 nm have been generated from this dye laser. The temporal and frequency characteristics of the laser, especially, the influences of the cavity length mismatch on the pulse duration and the center pulse wavelength are studied.

## 一、引 言

在时间分辨激光光谱学研究中, 人们往往需要具有较高能量而且波长可调的超短激光脉冲, 以激发和探测有关的物理和化学过程, 为此产生了各种各样的激光系统。其中最常用的方法是采用激光放大或腔倒空技术, 以获得脉冲能量在亚微焦耳量级以上的微微秒或毫微微秒脉冲<sup>[1~3]</sup>。然而, 这一类激光器装置复杂, 造价昂贵, 且激光放大系统的频率也受调Q重复率的限制, 不易提高, 不利于信号的探测。

本文介绍一种采用主动锁模和调Q的Nd:YAG激光倍频同步泵浦染料激光器。其输出为调Q锁模脉冲列, 脉冲宽度为70ps, 脉冲能量达到亚微焦耳量级, 调谐范围为580~610nm, 且调Q频率达7kHz。该激光器的泵浦源Nd:YAG激光器采用声光调制主动锁模和高重复率的机械调Q, 提高了锁模的稳定性和脉冲峰值功率, 从而提高了倍频转换效率, 有效地泵浦了染料激光器, 获得具有较高脉冲能量的可调谐微微秒脉冲。为开展凝聚态和其它

物质中的超快动力学过程研究提供了有力工具。

### 二、实验装置与结果

主动锁模和调Q Nd : YAG激光倍频同步泵浦染料激光器的实验装置如图1所示。它由泵浦源Nd : YAG激光器和染料激光器两部分组成。Nd : YAG激光器采用热不灵敏腔的平-平腔设计,以获得最大的基横模功率。声光调制锁模器(ML)采用喇曼-奈斯衍射和驻波工作方式,由本校科仪厂研制的锁相声光驱动器驱动,调制频率为 $f_m = 50\text{MHz}$ ,调制频率的长期稳定性达 $10^{-7}$ 。

当驱动功率为2W时,调制器的动态调制度为65% (对He-Ne激光)。锁模器和YAG棒皆采用恒温冷却,以使其长期稳定工作。激光器的腔长由计算机控制的精密导轨调节。当激光器的腔长和调制频率相匹配时,在YAG增益线宽内的所有纵模振荡受损耗调制而锁定,获得窄的激光脉冲输出。由于YAG棒中的非线性自相位调制效应,在声光调制器不加驱动源的情况下,亦曾观察到弱的锁模效应,即所谓自锁模效应。这一效应已被利用于建造新型的锁模激光器<sup>[4]</sup>。同样,如果声光驱动频率包络中有起伏,或腔长与调制频率失配,输出激光脉冲便含有不规则的调Q脉冲,称自调Q效应,这却是应该避免的,因为无规的调Q尖脉冲会损坏倍频器等光学元件。为了获得高的脉冲能量和改善锁模的稳定性,我们在激光腔内置一斩波式机械调Q装置<sup>[5]</sup>,调Q频率为7kHz,Q开关的时间常数是根腔内不同时出现多个调Q脉冲的条件而设计的,机械调Q的优点是装置简单,效率高,且易获得高的调Q频率。采用主动锁模和调Q不仅能获得较高的脉冲能量,而且减少了YAG棒的热畸变、腔长变化及电源起伏等不稳定因素的影响,使激光器能稳定地工作。图2a为调Q锁模Nd : YAG激光器输出的调Q脉冲示波图形;图2b为每个调Q脉冲内包含的锁模脉冲列,调Q脉冲宽度为 $0.5\mu\text{s}$ ,锁模脉冲的间隔为 $10\text{ns}$ ,每列脉冲包含有约50个锁模脉冲。调Q锁模脉冲总的平均功率为3W,

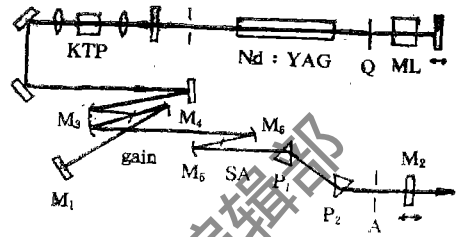


Fig. 1 Schematic of a dye laser synchronously pumped by a mode-locked and Q-switched Nd : YAG laser

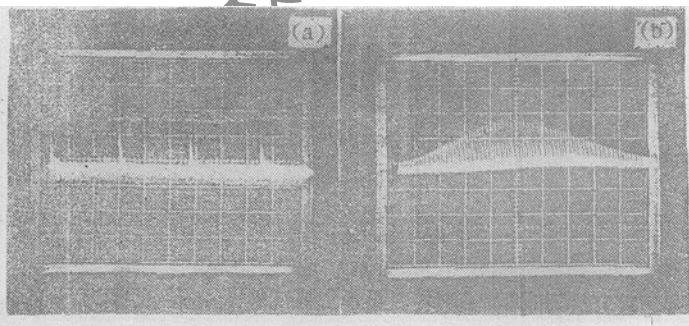


Fig.2 The oscilloscope traces of the pulses from a mode-locked and Q-switched Nd : YAG laser a—Q-switched pulses (50μs/div) b—mode-locked pulse train within the envelope of the Q-switched pulse (0.1μs/div)

比连续波锁模时要小,但脉冲的峰值功率却提高了近100倍。同时,在连续波锁模时,当输出功率增大时,曾在锁模脉冲示波图形中观测到小部分直流背景;而在调Q锁模情况下,却没有这现象。这可能是调Q输出减少了腔内增益积累,锁模更加彻底之故。由自相关器测得调Q锁模脉冲的全半宽度

(FWHM)与连续波锁模时相近,约200ps。这是因为锁模脉冲宽度主要决定于调制频率 $f_m$ 、增益介质的线宽和调制深度。我们试图用增加声光调制器驱动功率的方法来提提高调制深度,但实际效果并不显著。这可能是由于喇曼-奈斯型声光调制器达到了最大衍射效率所限。如果采用布拉格型声光调制器,将会获得较高的调制深度,有利于脉冲的压缩。同时,如果采用较高的调制频率,脉冲宽度亦会减少。另外,增加调Q脉冲宽度,以增加锁模脉冲个数,或采用预锁模的方法<sup>[9]</sup>将会有利于获得窄的脉冲。

由调Q锁模Nd:YAG激光器输出的 $1.06\mu\text{m}$ 脉冲经KTP倍频器后获得平均功率约为600mW的 $0.53$ 倍频光。再同步泵浦染料激光器。染料激光器为六镜二棱镜线型结构。增益介质为Rh6G的乙二醇溶液喷膜,厚度约为 $100\mu\text{m}$ ,Rh6G浓度为 $1 \times 10^{-3}\text{mol}$ 。凹面反射镜 $M_3$ , $M_4$ 和 $M_5$ , $M_6$ 的曲率半径分别为100mm和50mm。 $M_1$ 为全反射镜, $M_2$ 为耦合输出镜,透过率为3%。腔内一对布儒斯特角放置的棱镜 $P_1$ , $P_2$ 和光阑A主要用作染料激光调谐。由于在第二个棱镜 $P_2$ 和输出镜 $M_2$ 之间,波长不同的振荡在空间上分开。因此,只要在垂直光束的方向上调节光阑的位置即可方便地改变激光器的工作波长。采用棱镜对调谐还有补偿群速度色散的作用。染料激光器的腔长与泵浦脉冲重复周期的匹配由调节输出镜 $M_2$ 的位置来控制,染料激光器输出的时间和频谱特性由快速示波器和计算机控制的分光计记录。输出脉冲宽度用精密自相关器测量<sup>[7]</sup>。下面我们讨论染料激光器的时间和频谱特性。

### 三、染料激光器的输出特性

和连续波主动锁模Nd:YAG激光倍频同步泵浦染料激光器情况一样,当染料激光器腔长与泵浦脉冲重复周期相匹配时,腔内振荡得到同步放大而产生短的激光脉冲。图3为染料激光器输出的脉冲列的示波图形。每一列约有30多个脉冲,比泵浦脉冲列的数目略小。锁模脉冲之间间隔为10ns。脉冲宽度为130ps,脉冲列的重复频率为7kHz。总的平均功率为75mW。

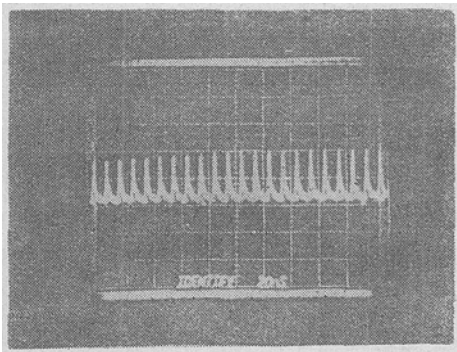


Fig. 3 Pulse train generated from the synchronously pumped dye laser (10ns/div)

根据同步泵浦锁模理论,染料激光器输出脉宽 $\tau$ 为<sup>[8]</sup>

$$\tau \propto (\tau_c \tau_p / \omega_c)^{1/2} \quad (1)$$

式中, $\tau_p$ 为泵浦光脉冲宽度; $\omega_c$ 为激光腔频带宽; $\tau_c$ 为小信号增益时间, $\tau_c = -\frac{1}{2} d^2 G_s /$

$dt^2|_{t=0}$ ;  $G_s$ 为小信号增益。因此,要获得较窄的脉宽,须进一步压缩泵浦脉宽 $\tau_p$ ,增加激光腔有效带宽 $\omega_c$ ,提高泵浦功率和增加输出耦合来减少小信号增益时间 $\tau_c$ 。由于调Q包络内锁模脉冲数目的限制,染料激光脉冲宽度的压缩作用要比连续波锁模同步泵浦时小,一般染料激光脉冲约为泵浦光脉冲宽度的一半。为了进一步压缩脉宽,我们在染料激光器腔内加进饱和吸收体DO DCI的乙二醇溶液,其浓度为 $2 \times 10^{-3}\text{mol}$ ,脉冲的宽度得到进一步压缩,减少至为泵浦脉冲的三分之一。输出平均功率亦有所降低,为20mW,单脉冲能量约为 $0.1\mu\text{J}$ 。图4a所示为染料激光脉冲在600nm处的强度自相关曲线,由此可计得脉冲的全半宽度为70ps(假定脉冲形状为双曲正弦型)。作为比较,图4b示出了泵浦脉冲( $1.06\mu\text{m}$ )的强度自相

关曲线,其全半宽度为200ps。实验中观察到,脉冲宽度随饱和吸收体 DO DCI 的浓度增加而减少,进一步增加饱和吸收体浓度将可能获得更短的脉冲。

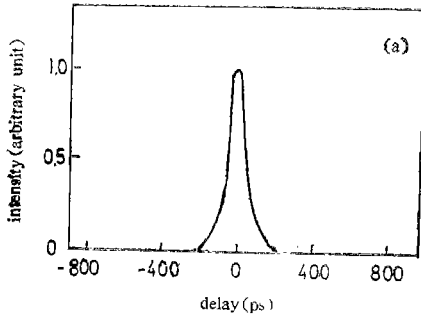


Fig. 4a Intensity autocorrelation traces of the picosecond pulses from the dye laser at 600nm

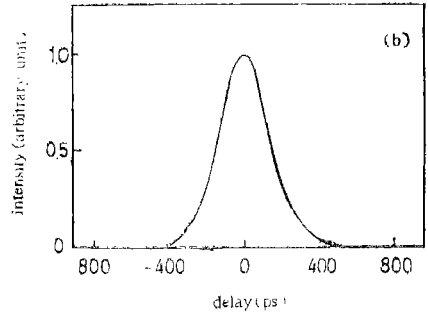


Fig. 4b Intensity autocorrelation traces of the picosecond pulses from the mode-locked and Q-switched Nd:YAG laser at 1.06 $\mu$ m

同时为了维持激光稳定运转并产生较短脉冲,必须保持染料激光腔长与泵浦激光腔长精确匹配。实验中发现,其腔长失谐量约为150 $\mu$ m时,激光仍维持振荡。失谐增加时,输出脉冲宽度增加,激光光谱中心向短波移动,最大位移量达10nm。图5所示为染料激光输出中心波长随腔长失谐量的变化关系。这与Chesnov等人报导的15nm光谱移动量相近,但后者所对应的腔长失谐量较前者小。这可能是由于前者脉宽较宽,对腔长变化没有那么灵敏。由图

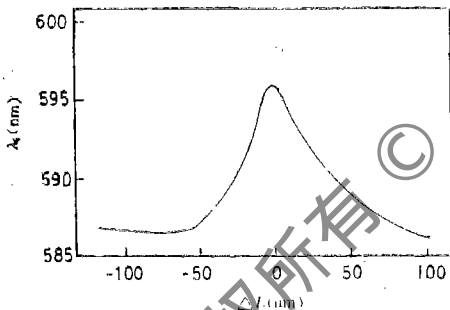


Fig. 5 Variation of center pulse wavelength  $\lambda_0$  versus cavity length mismatch  $\Delta L$

5可见,实际上,当正向或负向增加染料激光腔长失谐量时,中心波长都向短波移动,脉冲宽度增加。对这一频谱特性解释如下:正向增加腔长失谐量时,染料激光脉冲相对泵浦脉冲被延长了,它们在增益介质处获得更多的增益。这个净增益使饱和吸收染料容易被漂白而导致染料激光中心波长移向短波长(蓝移),光谱宽度变窄,脉宽展宽;反之,向负方向增加染料激光腔长失谐量时,染料激光脉冲相对泵浦脉冲被提前了,只有在增益带宽内传播得较慢的较短波长的染料光脉冲得到泵浦放大,因而波长也蓝移,光谱宽度迅速减少,脉宽展宽。若进一步增大失谐量(正向或负向),染料激光将停止振荡。这是由于染料脉冲得到的增益下降到起振阈值之下,或者说与染料激光器失谐量相应的匹配波长范围已超过增益线宽之故。

#### 四、结 论

我们采用自制和国产元器件研制成功主动锁模、机械调Q Nd:YAG激光倍频同步泵浦可调谐染料激光器,获得了调谐范围为580~610nm,脉冲宽度为70ps,单脉冲能量为0.1 $\mu$ J的可调谐微微秒脉冲,并研究了其输出的时间和频谱特性。与连续波同步泵浦染料激光器相比较,这种激光器具有脉冲峰值功率大,调Q重复率高,运行可靠,造价低的优点,不失为瞬

态激光光谱研究的有力工具。目前,这种激光器的脉冲宽度还比较宽。进一步的措施,例如减少泵浦脉冲的宽度,增加饱和吸收体的浓度等,将有助于获得较短的可调谐脉冲。

### 参 考 文 献

- [1] Adram R S, Arthurs E G, Bradley D J *et al.* Opt Commun, 1974; 12: 133
- [2] Sizer H T, Kafka J D, Dilling III I N *et al.* IEEE J Q E, 1933; QE-13: 131
- [3] Fork R L, Shirk C V, Yeh R *et al.* IEEE: J Q E, 1933; QE-19: 503
- [4] Spence D E, Keen P N, Sibbett. Opt Lett, 1991; 16: 42
- [5] Schilliger H, Penzkofer A. Opt Commun, 1988; 68: 45
- [6] Minkovsiki N I, Mirtehev T P, Tomov I V. Opt Commun, 1991; 81: 199
- [7] 林位株, 丘志仁, 徐文成 *et al.* 应用光学, 1990; 10: 114
- [8] Ausschnitt C P, Jain R K. A P L, 1973; 32: 727
- [9] Chesnoy J, Fini L. Opt Lett, 1935; 11: 635

\*

\*

\*

作者简介: 丘志仁,男,1963年7月出生。讲师。现从事超快激光技术及其凝聚态中的应用研究。

周学聪,女,1957年12月出生。研究生。从事超快激光光学和半导体中超快过程研究。

林位株,男,1937年7月出生。副教授。1984~1987年在美国MIT进修,一直从事超快激光光学、光谱学、非线性光学等的教学和科研工作。

收稿日期: 1992年5月22日。

· 简 讯 ·

## 《激光技术》走向世界 刊登的论文收入Ei

在国家科委、中国国际图书贸易总公司的指导和帮助下,经过本刊第五届编辑委员会全体委员和编辑部全体同仁的不懈努力,得到广大新老论文作者的真诚合作,《激光技术》继在国内被作为“中国科技论文统计用期刊”、被国内各家著名文摘刊物作为引用文献源之后,又获得了新的进展,受到国际权威文摘刊物收录,初步实现了本刊第五届编委会制订的奋斗目标:“走向世界,进入国际激光文献之林!”

1884年创刊的美国The Engineering Index Monthly (Ei《工程索引(月刊)》),是具有有机读数据库和传统印刷出版物的国际公认四大权威文摘刊物之一(其他是《物理文摘》、《化学文摘》和《医学文摘》),1992年,该刊已开始批量收录《激光技术》1991年发表的主要论文,收录的论文包括题目和由该刊作者编写的详细摘要,还有第一作者姓名及单位名称,其余作者姓名,本刊汉语拼音,年卷期页。

根据初步检索的结果表明:1992年内Ei入选《激光技术》1991年发表的论文作者94人次,论文30篇。我们向这94位作者表示祝贺,在新的一年里,希望广大新老作者继续把更新更高水平的学术、技术成果论文,交本刊发表,让全世界激光界了解您为国争光的成果!

来信来稿请寄: 610041 成都市238信箱209分箱 《激光技术》编辑部

(本刊通讯员 供稿)