

氩离子激光器同步泵浦染料激光器

刘玉璞 张影华 张国轩 傅宝祥
(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

研究了氩离子激光器的声光锁模参数。对 4880 Å 和 5145 Å 均获得了较稳定的锁模运转。锁模平均功率~300 mW, 脉冲宽度~200 ps, 脉冲强度起伏小于5%。用这台氩激光器同步泵浦一台折迭式象散补偿腔染料激光器, 实现了同步锁模输出。在 5840 Å 处, 其脉冲宽度小于10 ps, 平均功率~20 mW。波长调谐范围是 5700~6200 Å, 并着重研究了腔长或频率失调对锁模的影响。

可调谐、超短脉冲激光器的研究和应用大大地扩展了人们在物理、化学、生物学和工程技术中的研究领域。最近出现的微微秒光谱学就是一个十分活跃、十分有发展前途的课题。它使时间分辨光谱学已扩展到 $10^{-12} \sim 10^{-13}$ 秒的领域, 为精确地研究物理、化学和生物学中以前无法分辨的超快速光学过程提供了令人鼓舞的可能性, 并已在分子和晶格的非辐射弛豫、半导体中载流子动力学和生物过程的原初反应等方面取得了一些可喜的成果^[1]。目前普遍认为, 连续波可调谐超短脉冲激光器是微微秒光谱学最理想的工具, 用声光主动锁模的氩离子(或氪离子)激光同步泵浦的染料激光器是目前获得长时间稳定运转的连续波可调谐超短光脉冲序列的有效方法, 近几年来在国际上很受重视^[2]。本文为了开展微微秒光学和超快速过程研究, 进行了氩离子声光主动锁模和同步泵浦激光技术的实验研究, 所用实验装置

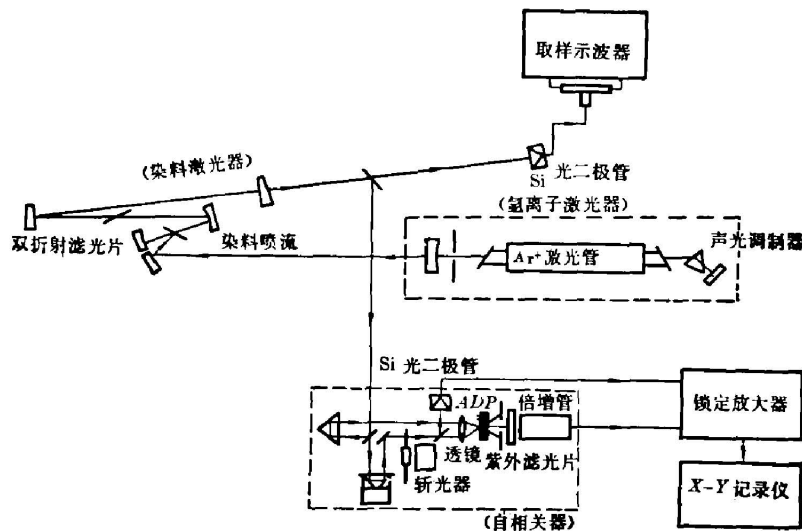


图1 氩离子同步泵浦染料激光器实验装置

Fig. 1 The experimental set-up for a dye laser synchronously pumped by an Ar⁺-laser

收稿日期: 1982年5月24日, 收到修改稿日期: 1982年8月25日

系统如图 1 所示。

一、氩离子激光器声光主动锁模

氩离子激光器的增益线型主要取决于 Ar^+ 在放电等离子体中的多普勒效应,基本上是非均匀加宽的。用波长选择器选出的单一谱线(如 5145 \AA),线宽一般为 $5000 \sim 10000 \text{ MHz}$ 。所以,尽管控制在基横模运转,在自由振荡情况下,对于一个 $1 \sim 2 \text{ m}$ 的谐振腔,也可能有几十个纵模参加振荡。这些模的强度和相位呈现出强烈的随机起伏。但如果在这种多纵模激光器腔内引入一个随时间周期变化的扰动,以等于或几倍于纵模间隔的频率调制激光的损耗、光程或增益,都可能使这些纵模以完全确定的振幅和相位耦合起来,这时激光器将运转于脉冲再生振荡器状态,产生以光速向前传播的波包脉冲列。对于非均匀加宽的氩离子激光器,这种锁模激光器的输出将呈现以下的特点:

1. 输出功率为一重复周期近似等于纵模间隔的脉冲序列;
2. 脉冲宽度近似等于脉冲列周期的 $\frac{1}{N}$ (N 为锁定的纵模数目);
3. 锁模光脉冲的纵模频谱呈现稳定的、规则的分布。

为了实现和维持稳定的锁模,腔长和调制频率的稳定性十分重要,并且要实现二者的精确匹配。本文采用具有腔长稳定结构的 360 型氩激光器,设计了一个适合于这种激光器的三转轴并有腔长延伸机构的锁模头。用频率稳定度优于 10^{-7} , 频率步进为 1 Hz 的频率合成器信号经射频功率放大器驱动拉曼-奈斯型声光棱镜,从而很好地解决于氩离子腔长、调制器谐振频率以及驱动信号源三者间的精确匹配。在此基础上,适当控制氩离子激光器腔内增益、输出耦合率和调制深度,在调制频率为 95.622 MHz 附近,对 5145 \AA 和 4880 \AA 均得到了稳定可靠的锁模运转^[3]。用响应时间为 300 ps 的 MRD-510 光二极管和上升时间为 350 ps 的 SQ-12 A 取样示波器可观测到稳定的锁模脉冲列,如图 2 所示。光脉冲示波图半宽为 500 ps 。另外,为了进一步了解锁模情况,还用共焦球面扫描干涉仪研究了锁模输出的纵模谱结构。在 5145 \AA 增益包络内观测到有 >42 个锁定的纵模。由于所用 WSS-II 扫描干涉仪的自由光谱范围只有 4 GHz ,从图 3 可看到两侧已有迭级现象。由这些测量可知,锁模氩离子的脉冲宽度 $\sim 200 \text{ ps}$ 。

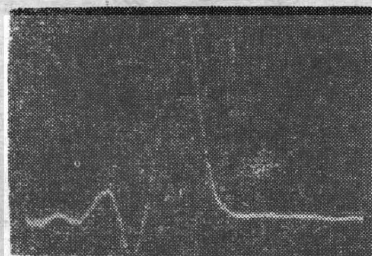


图 2 氩离子锁模脉冲,时标: 476 ps/cm
Fig. 2 Pulse of a mode-locked
Ar⁺-laser time-base 476 ps/cm

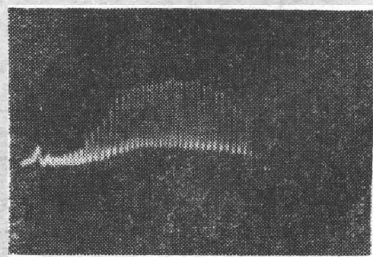


图 3 锁模氩离子输出的纵模谱
Fig. 3 Mode spectrum from a mode-
locked Ar⁺-laser

二、同步泵浦锁模原理

所谓同步泵浦激光器有时也称同步锁模激光器。就连续波方式而言,典型的就是将氩离子(或氦离子)激光器先主动锁模,产生亚毫微秒脉冲序列,再去泵浦连续染料激光器(如 Rh6G),调整染料激光器腔长,使染料光脉冲与泵浦光脉冲同步地到达染料喷流,通过激光染料介质的同步激发和受激退激发,形成增益调制,以实现染料激光器的强迫同步锁模。其物理图像大致如下:(以 Ar^+ 和 Rh6G 为例)在染料激光器腔长与氩离子激光器腔长基本相等情况下,当 Ar^+ 锁模脉冲列中的一个脉冲到达染料喷流,由于 Rh6G 的荧光寿命只有几个 ns,比泵浦 Ar^+ 脉冲 τ_p (100~200 ps) 长得多,所以在泵浦脉冲时间内的自发辐射可忽略, Rh6G 的增益 G 将跟随着泵浦脉冲强度的时间积分而增长(图 4)。短而强的 Ar^+ 脉冲使 Rh6G 介质有很陡的增益上升斜率,如在此时没有染料光脉冲到达喷流, Rh6G 介质的增益将很快地接近并超过腔的损耗 L ,在泵浦脉冲过后缓慢地衰减;但如在泵浦脉冲时间内有 Ar^+ 脉冲列中以前的脉冲泵浦所产生的染料光脉冲正好同步地返回到喷流,这时已处于反转状态的染料介质,在入射的染料光脉冲作用下产生受激辐射,使其增益迅速降到腔损耗 L 以下(这是因为 Rh6G 的受激跃迁截面很大, 10^{-16}cm^2 ,比普通气体介质的截面 10^{-19}cm^2 大 10^3)使染料脉冲的尾部受到一个净损耗。正是由于染料介质的这种很陡的增益上升斜率和增益饱和效应所产生的增益调制作用,使在腔内往返运行的染料光脉冲被非线性放大、整形和同步,压缩了脉冲的前后沿。同时,腔长失调引起的染料脉冲相对于泵浦的时间漂移也将被非线性放大形成的脉冲移动所补偿,经过多次往返,当染料脉冲的振幅和相位达到完全确定的稳态时,就将产生比泵浦 Ar^+ 脉冲窄得多的同步锁模染料光脉冲。

显然,锁模过程和所产生的染料光脉冲的性质与泵浦光脉冲的性质(脉宽 τ_p 和强度),染料介质的性质(尤其是激发态寿命和受激跃迁截面)、腔的损耗 L 和腔内带宽 ω_c ,特别是 Ar^+ 光脉冲与 Rh6G 光脉冲的同步失配参数 δT ($\delta T = T_p - T_d$, T_p 、 T_d 分别为泵浦和染料光脉冲重复周期)都有密切关系。

三、同步泵浦锁模实验

用锁模氩离子激光的连续波亚毫微秒脉冲列同步泵浦一台折迭式象散补偿腔染料激光器(图 1)。激光染料是溶在乙二醇中的若丹明 6G,浓度为 $(1\sim 2) \times 10^{-3} \text{M/l}$,用单片 0.6 mm 的双折射滤光片调谐,用基于 ADP 晶体中非共线二次谐波的扫描自相关器测量锁模脉冲宽度。当用平均功率 200~350 mW 的 5145 Å 氩脉冲列泵浦时,已得到平均功率

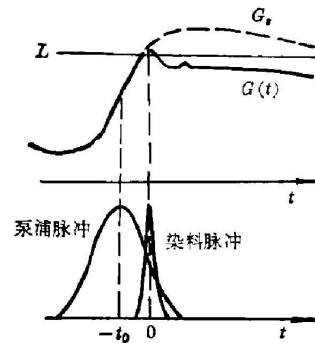


图 4 在泵浦脉冲和染料脉冲作用下,介质增益 G 随时间的变化
Fig. 4 Schematic of the time variation of the gain G due to passage of the pumping and dye pulses through the dye jet

~20 mW 的同步锁模输出(在 5840 Å 处), 脉冲峰功率起伏小于 5%, 脉冲宽度小于 10 ps, 可达到 4~5 ps(图 5)。

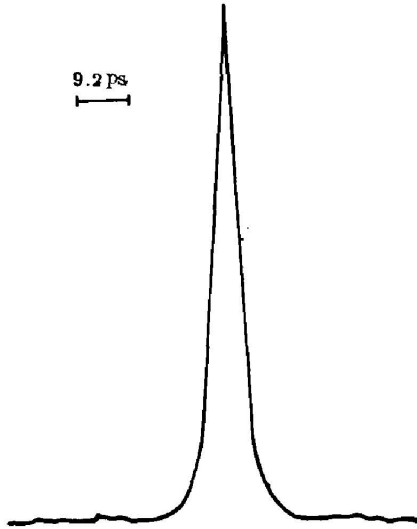


图 5 同步泵浦染料激光器输出脉冲的自相关曲线
Fig. 5 An autocorrelation trace of the pulses from the synchronously pumped dye laser

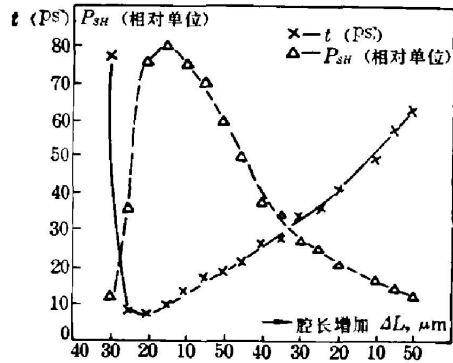


图 6 染料腔失调 ΔL 对脉冲宽度 t 和二次谐波功率 P_{SH} 的影响
Fig. 6 The effects of the dye cavity length detuning on the pulse width and second harmonic power

实验发现, 要得到短而稳定的同步锁模脉冲, 泵浦 Ar^+ 激光脉冲的稳定性十分重要, 而且要适当控制染料激光器的增益-损耗比。在本工作中着重研究了腔长或频率失调对同步锁模的影响: 通过精密移动染料激光器输出腔镜来改变腔长匹配, 也在小范围内(不至影响 Ar^+ 锁模)改变声光调制器驱动频率作了相应的频率失调实验。如从图 6 所看到的: 1. 染料脉宽和二次谐波强度对失配是很敏感的。在最佳匹配位置附近几个微米的变化已有明显的影响。它要比对平均功率的影响强烈得多。二次谐波极大值所对应的染料腔长比最小脉宽对应的腔长要长几个微米, 而最大平均功率所对应的腔长则还要长得多。2. 在最佳匹配位置两侧, 失配的影响是不对称的(图 6, 7), 图 7 中的自相关曲线下的数字为腔长调节鼓轮的读数, 数字增加, 腔长缩短, 随着腔长拉长, 脉冲逐渐变宽, 而当染料腔长比最佳值缩短时, 脉冲变化非常激烈, 很快出现次脉冲并使脉冲底部明显增宽。这些用同步锁模机理都是容易理解的。因为介质的最大增益位于泵浦峰值之后, 其前沿陡峭, 后沿平缓(图 4), 实现最佳锁模所对应的最大增益调制作用应出现在泵浦峰值之后增益刚超过损失不久的某一时刻。但随着腔长的进一步拉长, 染料脉冲将在增益极大值之后到达染料介质, 脉冲前沿比峰值处会得到更强的放大, 尾部则又得不到充分的损耗, 增益调制作用减弱, 故脉冲变宽。由于增益在极大值之后的变化是平缓的, 所以, 在这个方向失配的影响是较和缓的; 当腔长比最佳值缩短时, 染料光脉冲前部会过早地到达喷流, 得不到进一步放大, 而泵浦脉冲在染料光脉冲前部通过后才到达喷流, 增益极大落到染料脉冲的后部, 由于继续存在的泵浦作用, 使染料介质增益在第一次衰减以后仍能维持或恢复到损耗线以上, 从而使染料脉冲有长而低的“尾巴”, 或出

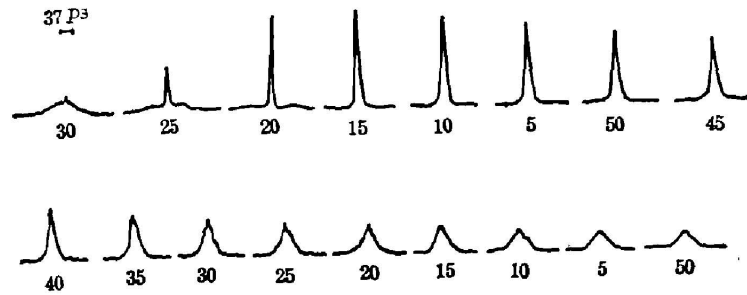


图7 染料激光器腔长失调的影响

Fig. 7 The effects of the dye cavity length detuning

现亚结构,或出现多脉冲。由于增益前沿陡峭,所以,在这个方向失配是非常敏感的,并且很快就可能达到 $G=L$ 点,振荡将变得很不稳定,甚至淬灭。3. 由于氩离子激光脉冲重复频率主要是由驱动声光调制器的射频信号源控制的,所以频率失配自然也会产生类似于腔长失配时的效应,即频率增加,染料脉冲较慢地变宽,而频率减小时,脉冲变化很激烈。实验完全证实了这一点,对于我们的激光器,驱动源频率变化几十赫兹已有影响,改变几百赫兹时,染料脉冲发生强烈变化。

实验中也观察到腔长调谐现象,即随着染料腔长拉长,输出波长向长波移动。这是由于 Rh6G 在 Ar^+ 光脉冲泵浦后,随着延时的增加其荧光产生红移^[4]。谱线宽度也稍有变化。本文所用激光器输出线宽为几埃到十埃的量级,而在不锁模时线宽是十分之几埃,与输出功率有关。同步泵浦时的调谐性能与自由振荡连续波染料激光器没有多大区别,只是在输出功率低时调谐范围稍窄些,但仍有 400 Å 以上。

由上面的结果可看出,要获得稳定的同步泵浦锁模运转,对实验装置各部分的要求较严格,除要仔细地选择各参数间的恰当匹配以外, Ar^+ 锁模须十分稳定,染料激光器腔长和声光调制频率均须稳定在 10^{-6} 以内。另外,实验室环境也要很安静,过大的温度起伏、气流和噪声都会使锁模稳定性变坏。我们的激光器在仔细调整和环境安静的情况下,可以作到长达几十分钟,以至 2~3 小时的连续稳定运转。

实验中所用声光调制器是李士英组提供的,陆雨田在声光电源方面给予很多帮助,刘海清为我们设计了声光锁模头,殷光裕、金德运在氩离子激光脉冲示波测量方面给予热情协助,在此均表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] C. V. Shank, E. P. Ippen *et al.*; *Picosecond Phenomena*, Springer Series in Chemical Physics 4 (Proceeding of The First International Conference on Picosecond Phenomena, Hilton Head, South Carolina, USA, May 42-26, 1978).
R. M. Hochstrasser, W. Kaiser *et al.*; *Picosecond Phenomena II*, Springer Series in Chemical Physics 14 (Proceeding of The Second International Conference on Picosecond Phenomena, Cape Cod, Massachusetts, USA, June 18-20, 1980).
- [2] G. R. Fleming, G. S. Bedderd; *Opt. & Laser Techn.*, 1978, 10, No. 5 (Ocy), 257.
J. R. Ryan, L. S. Goldberg *et al.*; *Opt. Commun.*, 1978, 27, No. 1 (Oct), 127.
R. K. Jain, C. P. Ausschitt; *Opt. Lett.*, 1978, 2, No. 5 (May), 117.

- D. M. Kim, J. Kuhl *et al.*; *Opt. Commun.*, 1978, **27**, No. 1 (Oct), 123.
J. M. Halfout, A. Olsson *et al.*; *A. P. L.*, 1981, **39**, No. 6 (Sep), 463.
[3] 刘玉璞, 张国轩等; 《激光》, 1982, **9**, No. 7 (Jul), 491.
[4] M. M. Malley, G. Mourou; *Opt. Commun.* 1974, **10**, No. 4 (Apr), 323.

A dye laser synchronously pumped by Ar⁺ laser

LIU YUPU ZHANG YINGHUA ZHANG GUOXUAN AND FU BAOXIANG
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 24 May 1982, revised 25 August 1982)

Abstract

The parameters for a cousto-optic mode-locking of an Ar⁺-laser investigated. The stable mode-locked operations at 4880 Å and 5145 Å have been obtained. The average power is up to 300 mW. The pulse-width is about 200 ps. The fluctuation of the pulse amplitudes is less than 5%. A dye laser with an astigmatically compensated cavity synchronously pumped by this Ar⁺-laser has been operated. Its pulse-width is less than 10 ps, and the average power is about 20 mW at 5840 Å. The pulses of mode-locked dye laser are wavelength tunable over the range 5700~6200 Å. Particularly, the effects of the mismatch of the cavity length or frequency on the mode-locking behaviour are emphasized.