

40 $\mu\text{m}$ . 在洗印正片时,可变化显影液的浓度、显影时间、曝光时间来控制黑度和衬度。

总之,要获得一张高质量的形貌图,必须考虑过程中每一步对分辨率极限的贡献。尽量使各因素的影响大致差不多。这样,可以估计最后达到的分辨率。同时,整个过程中每一步都要十分细致、小心,才能保证形貌照片的高分辨率和质量。

## 参 考 文 献

- [1] 许顺生,物理, 8(1979), 306.
- [2] 许顺生等,物理, 9(1980), 434.
- [3] 周衡南等,物理, 9(1980), 427.
- [4] A. R. Lang, In *Diffraction and Imaging Techniques in Material Science*, eds. S. Amelinckx et al., North-Holland, (1978), 623.
- [5] R. W. James, *The Optical Principles of the Diffraction of X-rays*, G. Bell and Sons LTD, (1945).

## 激光器锁模的一些技术问题

孟绍贤 蒲朝顺 杨义  
龚维燕 张伟清 康玉英

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

超短脉冲激光产生以来,引起了广泛的注意,大大推进了许多科学技术的发展<sup>[1]</sup>。但是如何获得所需波长的好的锁模,仍是值得认真讨论的问题。我们将以钕玻璃锁模激光器为例,提出获得好的锁模的一些技术要求,这些要求原则上也适用于紫外或红外锁模激光器。

### 1. 腔结构的选择

我们在实验中,先后选用驻波腔和行波腔(如图1和图2所示)。对于驻波腔又先后采用

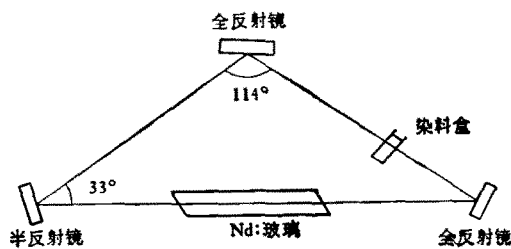


图1 驻波腔锁模激光器

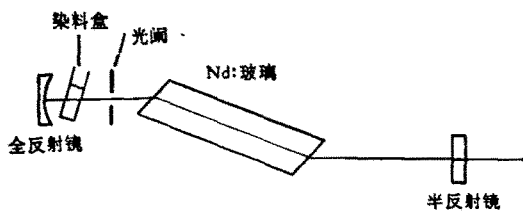


图2 行波腔锁模激光器

平面平行腔和半共焦腔。

行波腔振荡条件为

$$RTe^{\sigma N_1 l} = 1, \quad (1)$$

其中 $R$ 为输出镜反射率, $T$ 为染料的透过率, $\sigma$ 为工作物质的受激发射截面, $N_1$ 为反转粒子数, $l$ 为工作物质长度。

驻波腔振荡条件为

$$RT^2 e^{2\sigma N_2 l} = 1, \quad (2)$$

$N_2$ 为反转粒子数。在我们的实验条件下, $R = 50\%$ ,  $T = 50\%$ ,  $\sigma = 3 \times 10^{-20}$  厘米<sup>2</sup>,  $l = 15$  厘米,由此可求出

$$\frac{N_1}{N_2} = 1.3, \quad (3)$$

即行波腔要求的泵浦强度约为驻波腔的1.3倍。我们的实验证实了这个理论结果。

行波腔为双向输出,若外加一个全反射镜或腔内加法拉第旋转器,同样可获得单向输出。行波腔锁模脉冲序列发展比驻波腔慢,且脉冲序列较长,每个脉冲强度较低。行波腔为获得偏振输出,只要使一全反射镜和光束方向成布儒斯特角;而驻波腔,则需要把工作物质两端磨成布儒斯特角,或把染料盒及一平行平板放成与光束方向成布儒斯特角。行波腔和驻波腔两

者偏振状态彼此垂直。

## 2. 单横模要求

为了获得单横模,我们采用半共焦腔,凹面镜曲率半径为3米,腔长取1.5米。基模模斑半径为

$$W(\alpha) = \sqrt{\frac{L\lambda}{\pi}(1 + \alpha^2)}, \quad (4)$$

这里 $L$ 为腔长, $\lambda$ 为波长, $\alpha = \frac{Z}{L}$ , $Z = 0$ 取为

输出平板处。在全反射镜处,模斑半径为1毫米,我们在腔内靠近全反射镜处加 $\phi 2$ 毫米孔保证了单横模。此时光束发散度为

$$\theta = \sqrt{\frac{\lambda}{\pi L}} = 0.5 \text{ 毫弧度}。 \quad (5)$$

平行平面腔通过腔长调整,同样可获得好的方向性,但模式不稳定。

## 3. 子腔的避免

在锁模器件中,避免任何与腔平行的子腔是十分重要的,输出腔板一般为楔形 $30'$ 到 $3^\circ$ 。在为平行平板时,则形成为平板时间间隔的多列脉冲。双光子荧光照片如图3所示。染料盒也要放成布儒斯特角。



图3 输出腔板为平板时的多列脉冲双光子荧光结构

## 4. 膜层破坏问题

由于锁模脉冲功率较高,一般功率密度为 $10^9$ — $10^{10}$ 瓦/厘米<sup>2</sup>。因此,在使用一般蒸发膜时,全反射膜层较容易破坏。这种破坏只能用光压造成破坏来解释,光压为

$$p = \frac{I}{c}(1 + \rho), \quad (6)$$

这里 $I$ 为光强, $\rho$ 为反射镜的反射系数, $c$ 为光速。电子枪镀膜代替蒸发膜,就不出现这种破坏。

## 5. 染料及溶剂的选择

我们的实验采用十一甲川或五甲川。十一甲川碳氢键较长,在光照下容易断裂。其吸收峰在0.98微米,激光振荡波长1.059微米,在

其吸收曲线变化较陡部分,因此造成锁模不稳定。而五甲川碳氢键较短,其吸收峰在1.049微米,因此锁模稳定性好于十一甲川。染料溶液透过率选取50—70%比较恰当。染料溶液太浓时,造成纵模损耗,锁定模式数减少,造成不完全锁模,甚至只有调 $Q$ 作用;太淡时,锁模系列拉得很长,且不容易获得稳定输出。

十一甲川的溶剂我们选用丙酮,它的非线性折射系数 $n_2$ 为 $6.8 \times 10^{-13}$ 静电单位。五甲川用丙酮做溶剂不能得到好的锁模。用二氯乙烷做溶剂也有一定缺点,一是它的化学异构体较多,二是它容易和水反应生成盐酸,从而失效,二氯乙烷的 $n_2$ 为 $18 \times 10^{-13}$ 静电单位。用氯苯做溶剂也有一定缺点,它的 $n_2$ 为 $160 \times 10^{-13}$ 静电单位,因此最好采用薄染料盒。

## 6. 染料盒厚度及位置选择

染料盒一般选取1—15毫米厚,锁模效果看不出明显差别,但对半共焦腔,用厚染料盒不易调整。

染料漂白由工作物质自发辐射的波动峰引起。自发辐射方向性差,为了降低振荡阈值和增加稳定性,染料盒应靠近工作物质,对半共焦腔染料盒同时要靠近凹面镜。

## 7. 光泵控制问题

为了获得好的稳定锁模,光泵要控制稍微高于阈值,此时锁模脉冲序列如图4所示。如超过阈值较多,则出现多列脉冲如图5所示。为保证锁模重复性好,要求电源电压稳定性好。

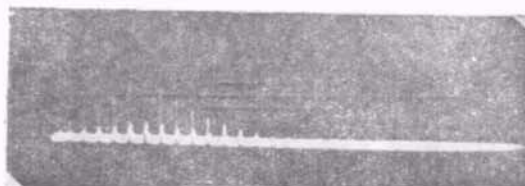


图4 锁模脉冲序列

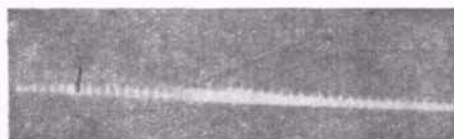


图5 锁模的多列脉冲

### 8. 脉冲宽度的改变及测量

钕玻璃锁模激光器, 其荧光带宽为 300 厘米<sup>-1</sup>, 原则上可获得 0.2 微微秒脉冲, 但由于各种损耗形成的纵模选择性, 脉冲宽度大于此。我们用  $\phi 10 \times 150$  毫米棒, 平行平面腔获得了 1—2 微微秒脉冲, 如图 6 所示。用  $\phi 10 \times 220$  毫米棒, 半共焦腔获得了 5 微微秒脉冲。当在腔内加上 0.2, 0.6, 3.2 毫米标准具时, 可获得加宽的脉冲, 最宽达 200 微微秒。



图 6 锁模脉冲的双光子荧光

锁模脉冲序列中, 各个脉冲宽度是不同的, 我们采用序列脉冲双光子荧光测的脉冲宽度是总体效果。

双光子荧光对比, 一般达不到理论值的 3:1。若相碰的两束光强有稍许差别如<sup>[3]</sup>

$$I_1 = (1 + \alpha)I_2, \quad (7)$$

则相碰荧光为

$$f(\tau) = 1 + \frac{4(1 + \alpha)^2}{1 + (1 + \alpha)^4} \cdot \frac{\langle I_1(t)I_1(t + \tau) \rangle}{\langle I_1^2(t) \rangle}, \quad (8)$$

若取  $\alpha = 0.2$ , 则峰值处荧光  $f = 2.85$ , 背底  $f = 1$ , 对比比变为 2.85:1。如再考虑荧光衰减, 则对比比还要下降。我们观察到若丹明 6G 的酒精溶液, 荧光衰减就很厉害。

### 9. 三阶非线性的影响

对锁模有影响的三阶非线性效应有自聚焦, 自位相调制和双光子吸收<sup>[4, 5]</sup>。

在超短脉冲作用下, 光束在工作物质中形成自聚焦距为

$$Z = \frac{1}{2} r \sqrt{\frac{n_2}{\delta n}}, \quad (9)$$

这里  $r$  是光束半径,  $\delta n = n_2 \langle E^2 \rangle = rI$ 。非线性折射系数  $n_2$  和  $r$  之间的关系为

$$r(\text{厘米}^2/\text{瓦}) = (4\pi 10^7/cn)$$

$$\cdot n_2(\text{静电单位}), \quad (10)$$

$r$  为实用上的非线性折射系数,  $n$  为介质折射率。自聚焦可造成工作物质的破坏。

自位相调制为

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda L \delta n}{c \tau}, \quad (11)$$

$L$  为工作物质长度,  $\tau$  为脉冲宽度。自位相调制引起光谱加宽。

在高光强下, 由于工作物质对激光的双光子吸收会使锁模脉冲序列中高强度脉冲呈受衰减。

$$\frac{dI}{dx} = -\beta I^2, \quad (12)$$

其中  $\beta = \sigma NL$ ,  $\sigma$  为双光子吸收截面, 对钕玻璃  $\sigma$  取  $1.3 \times 10^{-32}$  厘米<sup>4</sup>/瓦,  $N$  为钕离子浓度, 我们取为  $2.83 \times 10^{20}$  厘米<sup>-3</sup>。可求出

$$I = \frac{I_0}{1 + \sigma NL I_0}, \quad (13)$$

$I_0$  为起始光强,  $I$  为经过工作物质的输出光强, 双光子吸收造成的损耗率为

$$\frac{I_0 - I}{I_0} = \frac{\sigma NL I_0}{1 + \sigma NL I_0}, \quad (14)$$

表 1 锁模激光器中非线性影响计算

	$\phi 10 \times 150$ 毫米	$\phi 10 \times 220$ 毫米	$\phi 20 \times 500$ 毫米
$E$ (毫焦耳)	400	80	2000
$\tau$ (微微秒)	5	5	5
$r$ (厘米)	0.5	0.09	1
$N$ (个)	40	40	40
$I_0$ (瓦/厘米 <sup>2</sup> )	$2.5 \times 10^9$	$1.6 \times 10^{10}$	$3.2 \times 10^9$
$Z$ (厘米)	290	20	500
$\Delta\lambda$ (埃)	1.2	11	6
$I$ (瓦/厘米 <sup>2</sup> )	$2.2 \times 10^9$	$0.7 \times 10^{10}$	$2 \times 10^9$
$\frac{I_0 - I}{I_0}$ (%)	12	57.5	37

根据我们的实验结果, 计算总结于表 1。从表 1 我们看出半共焦腔容易产生自聚焦, 我们在实验上亦看到在棒的输出端附近有时出现自聚焦破坏。它的自位相调制和双光子吸收损耗亦是严重的, 为了减少自作用影响, 工作物质不要太长, 150 毫米长较为合适, 另外应尽量靠近凹面镜, 否则锁模阈值不稳定, 锁模系列不规

整。

我们在实验上也观察到  $\phi 20 \times 500$  毫米棒由于非线性损耗,使脉冲序列强幅度部分衰减。其照片如图 7 所示。长棒由于热形变和自发辐射增益大,及非线性影响,锁模脉冲信噪比较低。

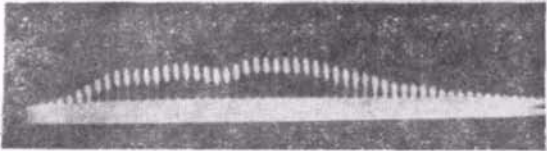


图 7 非线性损耗造成锁模系列的不规则

若采用输出为凹面镜的半共焦腔或采用曲率较大的凹面镜作为一个腔面,它即可减弱非线性效应影响,又能保证腔的稳定性。

### 10. 锁模的光谱特性

在锁模激光的发展过程中,脉冲逐渐增强,自位相调制将引起光谱加宽,激光介质增益是频率的函数,增益系数为

$$\alpha(\omega) = \frac{\alpha_0}{\left(\frac{\omega - \omega_0}{\Delta\omega}\right)^2 + 1}, \quad (15)$$

增益为

$$G = e^{\alpha(\omega)L}, \quad (16)$$

式中  $\alpha_0$  为激光中心频率增益系数,  $\Delta\omega$  为工作物质荧光带宽,  $\omega - \omega_0$  为激光带宽。显然随

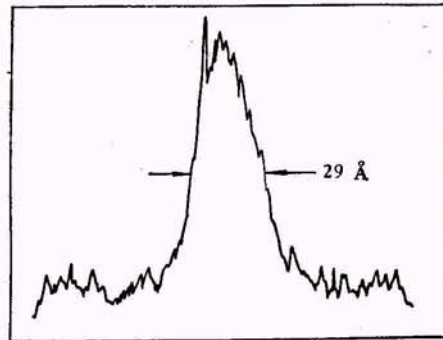


图 8 锁模激光光谱

着频率加宽增益下降。我们实验测得半共焦腔输出脉宽为 5 微微秒时的光谱如图 8 所示,光谱半宽度为 29 埃。它引起脉冲序列前部和后部脉冲宽度不同,后部比前部宽度大 2 倍,且在后部宽脉冲上有一窄的尖峰。宽的底部是由于增益损耗,尖峰是由于频率加宽。

### 参 考 文 献

- [1] 孟绍贤, 激光, 6-4 (1979), 1.
- [2] 固体激光导论编写组, 固体激光导论, 上海人民出版社, (1975), 554.
- [3] M. A. Duguay, *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-6 (1970), 725.
- [4] R. C. Eckardt, *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-10 (1974), 48.
- [5] M. S. Demokan, *International Journal of Electronics*, 41 (1976), 421.

## 《应用声学》杂志启事

由中国电子学会应用声学学会主编的《应用声学》杂志于 1982 年 1 月创刊,它是以介绍声学技术在各领域中的应用为主的学术性刊物。本刊着重报道与国民经济、国防建设及人民生活有密切联系的声学应用的研究成果和新技术新发展。本刊的目的是促进应用声学各有关分支学科之间(如超声学、电声学、噪声控制、水声学、语言通讯等)的相互渗透,促进新成果的推广应用、加强科研单位、有关院校和工业部门的学术交流。

欢迎广大读者订阅和为本刊撰写稿件。来稿请寄:北京中关村路 5 号《应用声学》编辑部。订购处:全国各地邮局或北京朝内大街 137 号科学出版社发行科。本刊第一期尚有部分过刊,需购者请与编辑部接洽。

《应用声学》编辑部