

# 用扫描干涉仪观察 Ar<sup>+</sup> 激光器主动锁模的某些特性

袁树忠 关信安 夏顺宝 董孝义

(南开大学现代光学研究室)

**提要:** 设计并制成了一台适用于 Ar<sup>+</sup> 激光器的扫描干涉仪, 用它观察了主动锁模 Ar<sup>+</sup> 激光器频域的某些特性, 拍摄到激光器在锁模状态下清晰的纵模频谱。实测干涉仪的分辨本领为 30 兆赫, 精细常数为 150。

## Observation of some characteristics of actively modelocked Ar<sup>+</sup> lasers using scanning interferometer

Yuan Shuzhong Guan Xingan Xia Shuabo Dong Xiaoyi

(Modern Optics Laboratory, Nanjing University)

**Abstract:** A scanning interferometer for Ar<sup>+</sup> lasers has been developed, some frequency domain characteristics of actively mode-locked Ar<sup>+</sup> lasers were observed by using this scanning interferometer, frequency spectrum of longitudinal mode of Ar<sup>+</sup> lasers in mode-locked state was photographed. Resolution of 30 MHz for the scanning interferometer was measured experimentally with a finesse of 150.

研究激光器的锁模现象, 既可以从时域的角度来进行, 也可以从频域的角度来进行。前者用高速光电二极管及示波器观测锁模产生的超短光脉冲, 方法简单而直观, 但目前国内多受设备的响应速度限制, 不易得到预期的结果。后者则用扫描干涉仪摄取锁模后激光器诸纵模的频谱, 它除了给出频域的种种信息外, 还可以根据这些信息(如锁定的模的数目, 谱的线型……)推算出时域的某些特性(如脉冲宽度、上升时间……等等)。所用的扫描干涉仪可根据被研究的激光器的特性自行设计和制作。

### 一、适用于 Ar<sup>+</sup> 激光器的扫描干涉仪的设计

在设计中要确定两个主要参数: (1) 根据激光器的带宽确定干涉仪的自由光谱区, 然后确定腔长; (2) 确定精细常数, 这需从加工和装调精度来考虑。

#### 1. 自由光谱区 $\Delta\lambda$ (或 $\Delta\nu$ )

共焦球面干涉仪的干涉方程式是

$$4nL = m\lambda \quad (1)$$

收稿日期: 1980年6月17日。

其中  $n$  是两反射镜间的折射率,  $L$  是两反射镜间的距离;  $m$  是正(或负)整数;  $\lambda$  是波长。从公式(1)看出, 干涉仪谐振波长  $\lambda$  是  $L$  的函数。当  $L$  变化  $\lambda/4$  时, 变化了一个干涉级次。这时, 称波长范围变化了一个自由光谱区。

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{4nL} \quad (2.a)$$

$$\Delta\nu = \frac{C}{4nL} \quad (2.b)$$

对于适用于  $\text{Ar}^+$  激光器的扫描干涉仪来说, 在无前置单色仪的条件下, 为尽量提高仪器的分辨率而又不发生光谱区的重迭, 可取自由光谱区等于或略大于激光器的带宽, 即

$$\Delta\nu \geq \nu_D = 7.16 \times \sqrt{\frac{T}{\mu_0}} \times \frac{10^{-7}}{\lambda} C \quad (3)$$

式中  $T$  是绝对温度,  $\mu_0$  是原子量。选  $\Delta\nu = 4500$  兆赫

## 2. 分辨本领和精细常数

对波长  $\lambda$  的光, 干涉仪的分辨极限(或称仪器带宽)为  $\delta\lambda$ , 其分辨率定义为

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = \frac{\nu}{\delta\nu} \quad (4)$$

扫描干涉仪属于多光束干涉, 为了表征对多光束干涉有贡献的有效数, 引进精细常数, 定义为自由光谱区与分辨极限之比, 即

$$F = \frac{\Delta\nu}{\delta\nu} \quad (5)$$

$F$  表征了自由光谱区内可分辨的光谱单元数目, 其大小与反射镜反射率、反射镜表面规整度有关, 是标志干涉仪性能的重要参量, 用来分析  $\text{Ar}^+$  激光器频谱。用时它的精细常数起码要大于一个多普勒带宽内纵模的数目。我们所用的激光器腔长为 1.4 米左右, 相应的纵模间距为 110 兆赫左右, 所以纵模数目  $N$  约为 40。选取  $F > 2N$  得  $F = 100$ 。

也可以从干涉仪的仪器宽度来决定精细常数。为分辨出每一条谱线, 仪器宽度  $\delta\nu$  应小于相邻两纵模的间隔, 实际上取

$$\delta\nu \leq \left(\frac{1}{2} \sim \frac{1}{3}\right) \Delta\nu \quad (6)$$

对于我们的激光器,  $\Delta\nu \approx 110$  兆赫, 故取  $\delta\nu = 40$  兆赫, 相应的精细常数为 100, 这与前面的结果是一致的。

## 3. 离焦误差 $|\varepsilon|_{\max}$

在加工和装调过程中, 使反射镜间隔达到真正的共焦是非常重要的, 否则干涉仪就成了对称球面腔, 它有严重的退简并, 不论是轴上照明还是离轴照明, 干涉仪的性能都会严重下降。然而真正的共焦是理论上的, 实际的加工总有一定的共焦偏离量。Hercher 根据他的理论分析, 给出共焦偏离量的表达式

$$|\varepsilon|_{\max} = \frac{\pi r}{2(m+n+1)F} \quad (7)$$

$r$  是反射镜曲率半径,  $(m+n+1)$  是干涉级次的整数部分,  $F$  是精细常数。当  $r = 20$  毫米,  $F = 200$ ,  $(m+n+1)$  取 30 时, 算出

$$|\varepsilon|_{\max} = 5\mu!$$

我们从两个方面来保证这一公差: 一是用精密螺纹来调整, 二是选用殷钢来制造干涉仪的腔体及反射镜座。

为了使温度变化对干涉仪腔长的影响达到最小, 在结构上我们采用腔体和压电陶瓷向相反的方向膨胀来相互补偿(见图 1)。

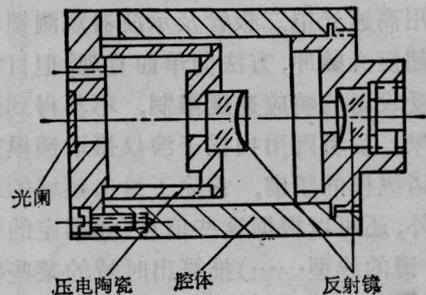


图 1 腔体结构示意图

$$\begin{aligned} \text{腔长变化} \quad \Delta L = & (L_{\text{铜}} \times \alpha_{\text{铜}} - L_{\text{瓷}} \times \alpha_{\text{瓷}} \\ & - L_{\text{钢}} \times \alpha_{\text{钢}}) \times \Delta t \end{aligned}$$

腔体用  $4J_{36}$  钢  $\alpha$  为  $1.5 \times 10^{-6}$   
 压电陶瓷  $\alpha$  为  $2.3 \times 10^{-6}$   
 反射镜用熔石英  $\alpha$  为  $0.21 \times 10^{-6}$   
 设温度变化  $10^\circ\text{C}$ 。代入我们给的数据。

$$\Delta L \approx 0.1 \text{ 微米} \ll 5 \text{ 微米}$$

#### 4. 结构工艺参数的选取

(1) 腔长  $L$ ，把  $\Delta\nu = 4500$  兆赫代入公式 (2.b)。

$$L = \frac{3 \times 10^{11}}{4 \times 4.5 \times 10^9} = 16.67 \text{ 毫米}$$

根据我们的现有条件，取  $r = L = 17.17$  毫米。这样自由光谱区  $\Delta\nu \approx 4400$  兆赫，接近 4500 兆赫。

反射镜口径  $\phi = 10$  毫米。

(2) 反射镜的反射率：这是影响精细常数的一个主要因素。它们的关系如下：

$$F = F_R \times 0.6 \approx \pi/2(1-R) \quad (8)$$

代入  $F = 100$   $R \approx 97.4\%$

为了弥补其它因素对精细常数的影响，我们取反射率  $R > 99\%$ 。

(3) 反射镜面的规整度：这是影响精细常数的另一个主要因素。Hercher 提出了要达到球面形状的  $\lambda/F$  要求。如果  $F \geq 100$ ，那末就要求镜面达到  $< \lambda/100$  的要求是很困难的。根据我们的使用要求，采用了牺牲发光度保证高精细常数的办法。加了一个  $0.5 \sim 0.8$  毫米的光阑。这样在  $\phi 10$  毫米整体范围内保证  $0.5$  个光圈的加工质量。而在  $\phi 1$  毫米的中心范围内达到  $\lambda/200$  的规整度是没什么问题的。

实际加工出来的干涉  $F$  达到了 150；说明以上的选取是合适的。

## 二、实验结果与分析

我们的实验工作主要是用这台扫描干涉仪观察在锁模与不锁模状态下  $\text{Ar}^+$  激光器的纵模谱，与此同时，测定了干涉仪本身的指标。

### 1. 自由运转状态下 $\text{Ar}^+$ 激光器的纵模谱

利用自制的扫描干涉仪，拍摄到  $\text{Ar}^+$  激光器在自由运转状态下的纵模谱，如图 2。显然它属于统计起伏的模频谱<sup>[4]</sup>，这和腔长相同的 He-Ne 激光器的纵模谱大不一样，后者是属于时间上稳定、相邻诸纵模清晰可辨的频谱。产生这样的差别，并非是我们的干涉仪分辨能力差，而是  $\text{Ar}^+$  激光器本身出现的模与模之间的强耦合所致。

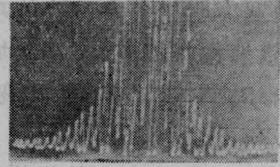


图 2

由于自由运转下  $\text{Ar}^+$  激光器的纵模谱是统计起伏的，因此很难根据它来检验扫描干涉仪的主要指标。国内有人曾在腔内放入标准具，通过选模获得“清晰”的纵模谱，然后依据它来测定干涉仪的指标，显然这样做是欠周全的。

### 2. 在主动锁模状态下 $\text{Ar}^+$ 激光器的纵模谱

利用自制的扫描干涉仪，拍摄到在声光主动锁模状态下  $\text{Ar}^+$  激光器的纵模谱，如图 3。用约 55 兆赫的讯号驱动放在腔内的声光调制器，以调幅的方式对激光器的损耗进行调制，调制频率准确地等于  $\text{Ar}^+$  激光器相邻两纵模间隔，这时，相邻的纵模间的强耦合不再是无规则的而是有确定的位相及振幅，相应地，它的纵模谱不再是统计起伏的，而是振幅按照增益线型变化，相邻各模清晰可辨的分立谱。

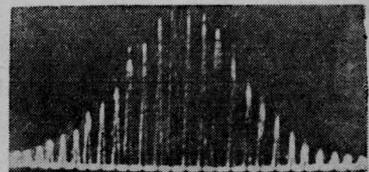


图 3

由图3数出被锁定的模的数目  $N \sim 20$ , 然后根据脉冲宽度  $t = 1/N \cdot \Delta f$ , 算出脉冲宽度  $t \sim 450$  微微秒。这个数据证实了我们用高速示波器估算得的脉冲宽度是合理的。

### 3. 锁模 Ar<sup>+</sup> 激光器在失谐状态下的纵模谱

我们曾从时域的角度对主动锁模 Ar<sup>+</sup> 激光器的失谐作过测量, 对腔长 1.4 米的 Ar<sup>+</sup> 激光器, 腔长失谐范围不大于 100 微米, 频率失谐范围为 (3~4) 千赫左右, 在这范围之外, 脉冲宽度明显变宽, 峰值功率明显下降, 最后锁模消失。相应地, 从频域的角度也观察到失谐时纵模谱的明显变化, 见图 4 (a)、(b)。

图 4(a) 是锁模状态下的纵模谱。随着失谐的发生, 首先诸纵模振幅开始不按增益线型分布 (如图 4(b)、(c))。然后是个别相邻的模之间开始出现无规则的弱耦合 (图 4(d))。最后过渡到大部分模之间随时间变化的强耦合, 这时各纵模之间的振幅和位相关系不再保持恒定, 锁模现象最终消失 (图 4(e))。

沈寿春教授对此文进行了审查和指导,

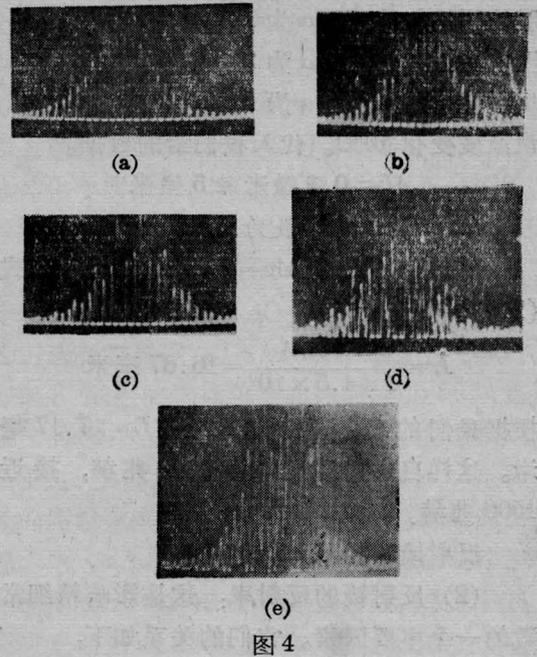


图 4

在此表示衷心的感谢。

### 参 考 文 献

- [1] W. Demtröder; 《激光光谱学的基础和技术》, 科学出版社, 1980, p252.