

大孔径移相式 CO₂ 激光干涉仪*

陈进榜 陈 磊 王 青 高志山 朱日宏

(南京理工大学光电学院 南京 210094)

提要 叙述了已研制成功的红外移相式数字干涉仪的原理和性能,光源为 CO₂ 激光器 ($\lambda = 10.6 \mu\text{m}$),该仪器光路是斐索型干涉系统,孔径为 $\phi 250 \text{ mm}$,不确定度 PV 值优于 $\lambda/130(2\sigma)$;也可构成泰曼球波面干涉系统。采用压电晶体驱动参考反射镜作相位调制,完成了对热释电摄像机的热电靶的温度调制。给出红外望远系统波前和光盘基片平面度实测光程差的二维等值图和三维立体图。

关键词 红外干涉术,移相式,干涉仪

1 引 言

用 CO₂ 激光器 ($\lambda = 10.6 \mu\text{m}$) 作为光源的红外干涉仪与各类干涉系统相比,具有独特的不可替代的特点。它可用于红外材料(如 Ge, ZnSe 等)的折射率均匀性的测量、红外光学系统(如热像仪的前视红外系统)的波像差测量及像质评价;由于它是长波长的干涉系统,也可用于光学零件抛光前的粗糙表面面形检测、非球面检测以及光盘、磁盘等面形检测。

红外干涉术在国外已得到很大发展并逐步完善^[1], C. R. Hayslett 和 J. C. Wyant 等人于 1980 年报道了用于粗糙表面检测的 $10.6 \mu\text{m}$ 干涉技术研究^[2], 采用 CO₂ 激光器作为光源的红外干涉仪,主机是孔径为 $\phi 20 \text{ mm}$ 的泰曼干涉系统,借助在测试臂上引入一个扩束系统实施对大型未抛光光学镜面的测试、理论分析和实验测量,并研讨了干涉条纹对比度和被测表面粗糙度均方根差关系。Brunning 等人^[3]提出的条纹扫描和移相干涉技术,也被公认为是实现高精度测量的有效方法,它不但广泛应用在可见光波段各类干涉仪,也被红外干涉系统所采用。Stahl^[4]采用热释电摄像机(PEV)作为探测器研制了红外移相干涉仪,孔径为 $\phi 25.4 \text{ mm}$ 的泰曼型干涉系统,在测试光路中通过 $F/3$ 的发散透镜扩束用来检验抛光前、后的非球面镜面。

随着红外热像仪的发展和在军事及国民经济各领域中的广泛使用,依据红外材料折射率均匀性测量、红外光学系统像质评价及在光电子工业某些检测等的特殊需求,我们研制了红外移相干涉仪。仪器包括孔径为 $\phi 250 \text{ mm}$ 的斐索型干涉仪和泰曼型球波面干涉仪。

2 仪器的组成及原理

* 国防科工委经费资助项目。

图 1 为仪器的原理框图, 仪器采用功率为 5 W 的 CO₂ 单模激光器作为干涉光源, 为使光源正常稳定工作, 配有水冷装置 2。为弥补不可见 10.6 μm 波长光线在光路调整中的困难, 仪器配有 He-Ne 激光器 1 用于光路调试, 形成干涉图像。IR 红外辐射干涉图像由 PEV6 接收, 转化为视频电信号。一路输入到监视器 8 实时显示, 供观察调校; 另一路输入到图像捕获器 7, 形成 8 bit 的数字图像后, 进入微型计算机 11。仪器配置有一系列软件包: 即图像采集与预处理软件包 16、移相干涉技术复原波面软件包 15、Zernike 多项式波面拟合软件包 14、红外材料均匀性测试软件包 13 及像质评价软件包 12。可以给出被测波面或表面的光程差、峰谷值、均方偏差和红外光学系统的像质评价指标(斯特列尔值、几何点列图、点扩散函数和轴上点的调制传递函数); 所有数据均按阵列表格详细输出, 并形象直观地给出二维等值图和三维立体图。

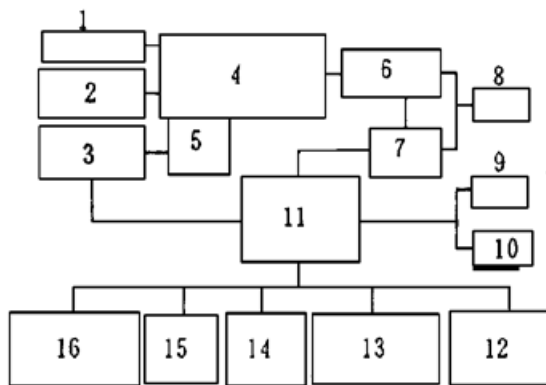


图 1 红外移相式数字干涉仪原理框图

Fig. 1 Block diagram of the phase-shift digital IR interferometer

1: He-Ne laser; 2: CO₂ laser & water cooler; 3: PZT controller & driver; 4: Fizeau and Twyman IR interferometric optical system; 5: PZT phase shifter; 6: pyroelectric vidicon; 7: image grabber; 8: monitor; 9: printer; 10: plotter; 11: microcomputer; 12: evaluation of image quality specification; 13: index homogeneity IR transmitting material; 14: Zernike fitting software; 15: PMI algorithm; 16: interferogram sampling & pre-processing

3 红外干涉光学系统

图 2 为红外干涉光学系统原理图。主光路是斐索型平面干涉仪, 图中用实线表示。由 CO₂ 激光器 1 出射连续 10.6 μm 激光束, 经减光板 4 和反射镜 6, 由 ZnSe 材料聚光镜 7 会聚在焦点 F₁ 处的空间滤波器 8 上。出射的发射光束经过 ZnSe 制成分束板 9, 被反射镜 10 折转到孔径 φ260 mm, F/7 的离轴抛物面 11, 由 11 出射的平行光束射向 φ250 mm 孔径 Ge 单晶材料的标准平板 12, 标准平板的后侧面 13 作为参考平面, 面形精度为 λ/150 (λ = 10.6 μm), 24 为压电晶体移相器。由参考平面 13 和测试反射镜 14 反射两束相干光就可形成干涉图像。被测件如红外望远系统置于参考平面 13 和测试反射镜 14 构成的干涉腔中。测试反射镜孔径为 φ250 mm, 面形精度为 λ'/20 (λ' = 0.6328 μm), 相当于 CO₂ 激光的 λ/340, 测试反射镜也用来标定仪器系统误差, 并用软件修正。仪器配置透镜测量装置及 5 块孔径由 φ20 到 φ150 mm, 相对孔径为 1·1 的标准凸、凹球面反射镜, 形成自准直的测试光路。两束相干光经成像透镜 17 成像在 PEV 18 的热电管靶面上。

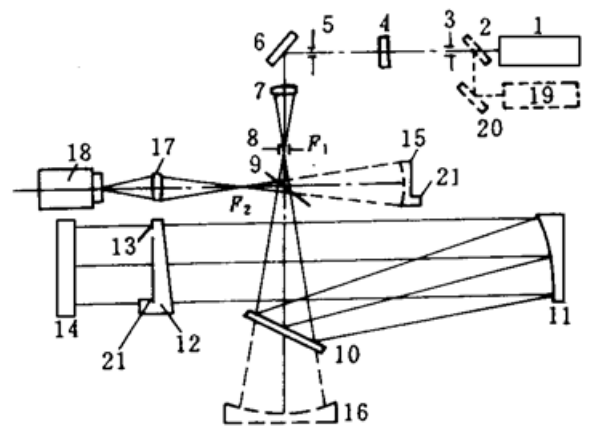


图 2 红外干涉仪光学系统图

Fig. 2 The schematic diagram of the IR interferometric optical system

红外干涉的另一路相干光(如虚线所示)为球波面干涉系统。15 为参考球面反射镜, 面形的局部误差为 λ/150 (λ = 10.6 μm); 16 为被测球面反射镜或非球面镜。15, 16 的曲率中心于 F₁ 处, 反射的参考和测试光束会聚于 F₂ 经 17 成像在 PEV 18 的热电管靶面上。为适应不同直

径的被测件都能较好充满 PEV 18 的热电靶, 仪器配置了由 Ge 材料制成的多种不同横向放大率的成像透镜 17。

红外辐射干涉图像的光强 $I(x, y)$ 表达式为

$$I(x, y) = I_1(x, y) + I_2(x, y) + \sqrt{I_1(x, y) + I_2(x, y)} \cdot \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} w(x, y) + \psi(x, y) \right] \quad (1)$$

式中, $I_1(x, y), I_2(x, y)$ 分别为按干涉图空间坐标 (x, y) 探测到的参考和测试光束的光强值; $w(x, y)$ 为被测试部件或系统波面或表面的光程差, $2\pi/\lambda \cdot w(x, y) = \phi(x, y)$, $\phi(x, y)$ 为位相差; $\psi(x, y)$ 为由移相器调制参考光路的光程差变化量。

由于 $10.6 \mu\text{m}$ CO₂ 激光光路不可见, 为方便仪器相干光路调校, 配置了 He-Ne 激光辅助光路。插入反射镜 2, He-Ne 激光器 19 出射的激光经反射镜 20, 2 引入到仪器主光路, 使光束通过光阑 3 和 5 的中央, 这样就使 He-Ne 和 CO₂ 两激光束共轴, 减光板 4、会聚透镜 7 及分束镜均由既透射 $10.6 \mu\text{m}$ 又可透射 $0.6328 \mu\text{m}$ 的 ZnSe 材料制成, 所以 He-Ne 激光束就可进入仪器的主光路, 按照可见光调校方法, 就可使各光学件处于正确位置。

4 PEV 的温度调制和 PZT 移相调制

红外干涉光学系统形成的干涉图像是一幅热辐射图像, 而探测器 PEV 只对温度变化目标产生热释电效应。一幅静态的热辐射干涉图像的热分布是稳定的, 必须使它成像在 PEV 热电靶上, 且图像温度产生变化, 才会有稳定的图像, 这就是 PEV 的温度调制。

PEV 的温度调制通常有两种办法, 一种是平移调制, 使 PEV 相对热辐射目标作相对移动, 从而使 PEV 上目标所成像有温度变化, 产生热释电效应, 才有相应的视频电信号输出。这种调制方法适用于对热辐射目标的粗略观察, 但不适用于精密的红外干涉测试系统, 因为它可能引起干涉条纹失真、变形, 而丢失信息。另一种是斩光调制, 利用斩光器(调制盘)周期地遮蔽入射的红外辐射, 使得 PEV 热电靶上目标像的温度随时间作周期性变化, 从而形成稳定的图像。但此种方法会降低温度分辨率, 同时会探测到背景中的静止热场分布, 使得干涉图中引入背景噪声, 而导致探测误差。

移相干涉技术不是对一幅静态干涉图像, 而是对多幅干涉图像提取光强信号, 并按照移相干涉术算法复原波面, 这就要求干涉图像相对于探测器作整体的有规则移动, 即作参考相位调制, 通过压电晶体 PZT(图 2 中 21) 驱动参考镜轴向移动, 调制两相干光束相位而实现移相调制。值得指出, 在我们对 PEV 的原理和性能分析研究的基础上, 优选干涉图像的条纹空间频率 f ($1/\text{mm}$) 和 PZT 移相调制的时间周期等参数, 就能在 PZT 实现移相调制过程的同时也实现 PEV 的温度调制, 从而形成稳定的干涉图像。图 3 是在 PEV 驱动参考反射镜时, 实测的 11 幅

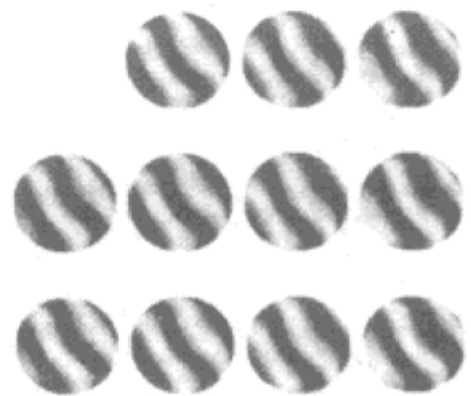


图 3 移相 11 幅干涉图

Fig. 3 11 phase-shifting interferograms

动态干涉图像, 相邻干涉图的位相差为 $\pi/2$, 相应参考镜位移量为 $\lambda/8$ ($\lambda = 10.6 \mu\text{m}$)。由图 3 可见, 1, 2, 3, 4 为一个周期, 与 5, 6, 7, 8 分别相差 2π 相位, 因此干涉条纹空间位置是一样的。

由于移相干涉图像复原波面的算法已有很大发展^[5], 在研究各种算法的基础上, 我们提出一种新算法——重叠平均四步法^[6,7], 能更有效地消除随机噪声误差、移相器的非线性误差及

标定误差,表达式为

$$\bar{\Phi}(x, y) = \frac{1}{2M} \sum_{k=1}^{2M} \Phi_k = \frac{1}{2M} \sum_{k=1}^{2M} \operatorname{tg}^{-1} \left[\frac{I_{k+2} - I_k}{I_{k+3} - I_{k+1}} \right] \quad (2)$$

式中 $\bar{\Phi}(x, y)$ 为由干涉图光强值复原的被测相位值,光程差 $w(x, y) = \lambda/2\pi \cdot \bar{\Phi}(x, y)$ 。式(2)表示在相位间隔为 $\pi/2$,总数为 $2M + 3$ 帧干涉图像中,对干涉图像空间坐标 (x, y) 处的光强值 $I(x, y)$ 采样,然后按“四步法”求得 $2M$ 个 Φ_k 值,求取平均值 $\bar{\Phi}$ 就是所求被测相位值。“重叠”含义是指四帧干涉图像作为“四步法”的一个计算周期,后一个计算周期的第一帧干涉图像是前一个周期的第二帧图像,依次递进,干涉图像的序数 k 值由1到 $2M + 3$,“四步法”运算次数为偶数次 $2M$ 。对于图3, $M = 4$,干涉图像帧数 $2M + 3 = 11$,“四步法”运算次数为 $2M = 8$ 。

5 测试举例

斐索型红外干涉仪孔径($\lambda = 10.6 \mu\text{m}$)为 $\phi 250 \text{ mm}$,干涉系统光学质量 PV 值优于 $\lambda/35$, RMS 值优于 $\lambda/125$;标定后准确度 PV 值优于 $\lambda/100$, RMS 值优于 $\lambda/600$;重复性 PV 值优于 $\lambda/200$, RMS 值优于 $\lambda/3000$;不确定度 PV 值优于 $\lambda/130(2\sigma)$ 。

5.1 红外望远物镜波像差的测试

被测件为国产红外望远系统:Ge材料,孔径 $\phi 100 \text{ mm}$,放大率6倍;将它置于图2中仪器标准平板12和测试反射镜14之间,得到图3所示一系列干涉热图像,按式(2)可得波面光程差 $w(x, y)$ 二维等值图和三维立体图见图4。

$$\text{峰谷值}(PV) \quad E_{PV} = w_{\max}(x, y) - w_{\min}(x, y) = 0.118\lambda \quad (3)$$

$$\text{均方根差}(RMS) \quad E_{RMS} = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [w_i(x, y) - \bar{w}(x, y)]^2 \right\}^{1/2} = 0.026\lambda \quad (4)$$

式中 N 为采样点 (x, y) 的集合。二维等值图中曲线表示同一光程差值的轨迹,图中数字表示以波长为单位的光程差相对值。

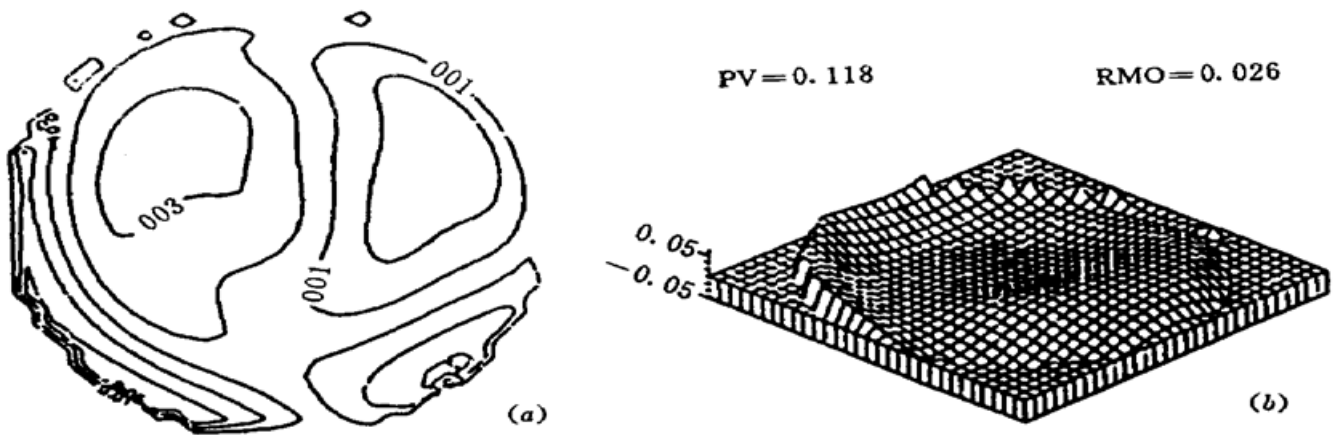


图4 红外望远系统的二维和三维波面图

Fig. 4 2-D and 3-D wavefronts of the IR telescope system

5.2 光盘基片平整度测试

光盘基片平整度对光盘制作及光盘驱动器的性能有重要影响,因为光学头在盘面上以 $0.1 \mu\text{m}$ 精度跟踪高速($1800 \sim 3600 \text{ r/min}$)运动的盘片,表面起伏过大会造成噪声过大,甚至跟踪失灵。所以光盘基片的平整度是表征质量的一个重要参数。平整度偏差为 $10 \mu\text{m}$ 左右,用He-Ne激光干涉仪($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$)测量,条纹密集,难以定量判读,而用 CO_2 激光($\lambda = 10.6$

μm) 干涉仪测量, 就能形象直观、准确定量地测出光盘基片的平整度。

被测件是从英国 Pilkington 公司进口的 $\Phi 240 \times 6$ (mm) CD 母盘玻璃件, 测试时, 将该基片替代测试反射镜 14, 图 5 中 (a) 为干涉图片, (b) 为算得的表面平面度三维立体图和二维等值图, 纵坐标为光程差值, 表示各点高度, 单位为波长 ($\lambda = 10.6 \mu\text{m}$); 横坐标表示空间坐标, 将 $\Phi 240 \text{ mm}$ 规化为 0~31 单位值。此外, 也可详尽列表输出相应于表面空间坐标上的各点面形高度值。

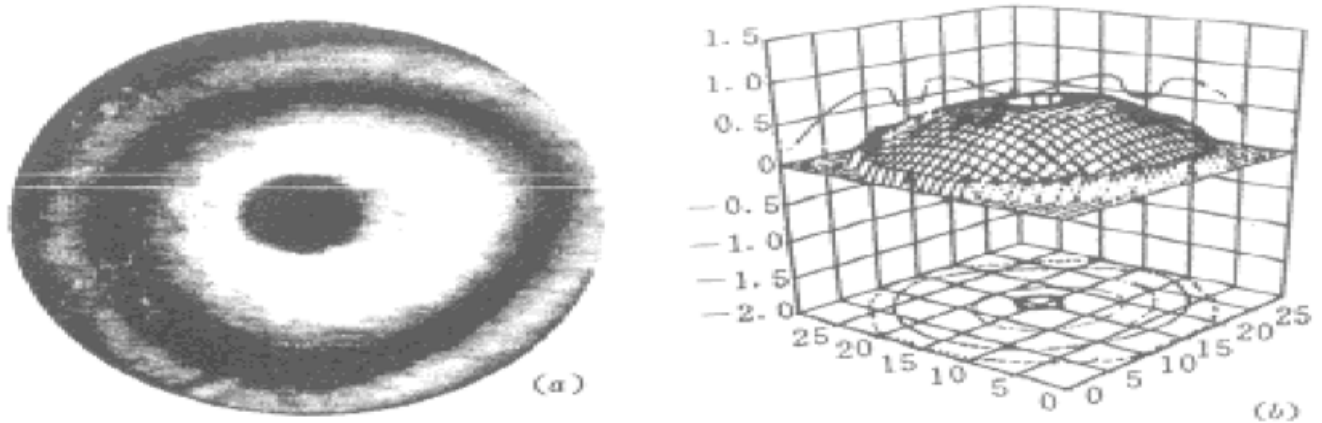


图 5 光盘面形的干涉图和二维、三维图

Fig. 5 Interferogram, 2-D contour and 3-D surface of an optical compact disk

6 结束语

大孔径移相式 CO₂ 激光干涉仪已于 1996 年 12 月 5 日通过部级鉴定, 并成功地进行了红外材料折射率均匀性的测量、光学零件抛光前磨削面的面形测量, 以及红外摄像物镜的波像差、几何点列图、点扩散函数、轴上点调制传递函数的测量。

参 考 文 献

- 1 Stefano Paul R. De, Western A. B., Stahl H. P. *et al.*. Design review of an infrared phase-shifting interferometer. *Proc. SPIE*, 1992, **1779**: 35~46
- 2 Kwon Osuk, Wyant J. C., Hayslett C. R.. Rough surface interferometry at $10.6 \mu\text{m}$. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(11): 1862~1869
- 3 Brunning J. H., Herriott D. R., Gallagher J. E. *et al.*. Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses. *Appl. Opt.*, 1974, **13**(11): 2693~2703
- 4 Stahl H. P., Koliopoulos Chris L. Design of an infrared interferometer. *Proc. SPIE*, 1987, **433**: 142~146
- 5 Kinstaetter K., Lohmann A. W., Schwider J. *et al.*. Accuracy of phaseshifting interferometry. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(24): 5082~5089
- 6 Chen Jinbang, Song Dezheng, Zhu Rihong *et al.*. High accuracy and large aperture optical standard—Phase shifting digital flat interferometer. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1995, **15**(4): 480~485 (in Chinese)
- 7 Zhu Rihong, Chen Jinbang, Wang Qing *et al.*. A new algorithm on phase shifting interferometry—The overlapping averaging 4-frame algorithm. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1994, **14**(12): 1288~1293 (in Chinese)

A Large Aperture Phase-shifting CO₂ Laser Interferometer

Chen Jinbang Chen Lei Wang Qing Gao Zhishan Zhu Rihong
(Institute of Electronic Engineering & Photoelectric Technology, Nanjing University of
Science & Technology, No. 200 Xiao Ling Wei, Nanjing 210094)

Abstract A large aperture phase-shifting infrared interferometer is developed, which uses a CO₂ laser source ($\lambda = 10.6 \mu\text{m}$) comprising of a Fizeau interferometer with the aperture reaching $\phi 250 \text{ mm}$ and an accuracy better than $\lambda/100$. And a Twyman spherical interferometer, using a piezoelectric transducer (PZT) to shift a reference mirror and pyroelectric vidicon (PEV) as the detector, can also be formed. While phase measurement interferometry (PMI) is carried out, the temperature modulation of the PEV target is also being done. A series of software packages used to fit the wavefront and evaluate image quality are incorporated into the instrument. The testing results of IR telescope wavefront and the flatness of glass mastering discs are presented.

Key words IR interferometry, phase-shifting, interferometer

采用 Cr⁴⁺ :YAG 为可饱和吸收体实现脉冲 Nd :YAG 激光器锁模运转

Cr⁴⁺ :YAG 晶体既可作为激光增益介质,在 1.34~ 1.58 μm 波长范围内实现宽调谐激光运转;又可作为 0.9~ 1.2 μm 波段的可饱和吸收体,用作 CW 或脉冲运转 Nd :YAG 激光器被动 Q 开关。最近,我们采用中国科学院上海光机所研制的 Cr⁴⁺ :YAG 晶体为可饱和吸收体,在脉冲式 Nd :YAG 激光器上实现锁模运转。

将 Cr⁴⁺ :YAG 晶体置于带抗共振环结构的脉冲碰撞锁模 Nd :YAG 激光器的环路中间,并置于铜制水冷套内用循环水冷却。Nd :YAG 棒用脉冲氙灯泵浦。Cr⁴⁺ :YAG 晶体对 1.06 μm 的小信号透过率为 34%。实验中首先观察到脉宽为几十 ns 的带有深度调制的调 Q 激光脉冲,经过不断优化激光器的运转条件,观察到锁模脉冲序列,其锁模几率大于 20%。

参与激光作用的 Cr⁴⁺ :YAG 晶体的能级有三个:基态 3A₂、第一激发态 3T₂ 及第二激发态 3T₁。第一激发态对基态的吸收截面为 $\sim 5.7 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$,比第二激发态吸收截面($\sim 8 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$)大一个量级,第一激发态的寿命为 3.4 μs ,第二激发态的寿命为 50 ps。在腔内激光场的作用下,基态粒子首先被抽空跃迁到第一激发态,Q 开关被打开,在调 Q 激光脉冲形成过程中,处于第一激发态的粒子受激吸收跃迁到第二激发态,经过 50 ps 的弛豫时间又返回第一激发态,对调 Q 激光脉冲进行调制,起到快可饱和吸收体的作用进而实现锁模。同时我们也注意到,由于腔内抗共振环及小孔光阑的存在,脉冲碰撞锁模和 Kerr 透镜锁模机制在该激光器锁模运转中也起到重要的作用。

王加贤^{1,2} 张文珍² 邢岐荣¹ 王清月¹ 徐 军³ 乔景文³ 邓佩珍³

¹ 天津大学精仪学院国家教委光电子信息工程开放实验室;

² 华侨大学电气技术系;³ 中国科学院上海光机所 1997 年 12 月 1 日收稿