

半导体激光剪切干涉仪

明海 李明 陈农 谢建平

(中国科学技术大学物理系)

Semiconductor laser shearing interferometer

Ming Hai, Li Ming, Chen Nong, Xie Jianping

(Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei)

摘要: 本文主要对半导体激光器在光栅剪切干涉计量中的应用作实验研究。给出半导体激光双频光栅剪切干涉仪测量光场相干性和透镜像差的实验结果。

关键词: 半导体激光, 剪切干涉仪, 像差

一、引言

本文介绍对扩展半导体激光在干涉计量中的应用所进行的实验研究。利用高衍射效率的离子刻蚀双频光栅剪切干涉法来检测 HLP1400 型 (820.0 nm) 半导体激光器和 TOLD100 型可见光半导体激光器的相干性。用半导体激光器和双频光栅构成的剪切干涉仪, 对透镜像差进行了检测, 得到了一些实验结果, 并与用 He-Ne 激光器作光源的情况进行比较。根据双频光栅面愈接近焦点剪切条纹愈少的原理来精确确定耦合透镜的焦平面位置, 以提高半导体激光与光纤耦合的效率。同时进行了半导体激光太效应光栅剪切干涉的实验, 测试了位相物体。

二、半导体激光双频光栅剪切干涉仪

图 1 是半导体激光双频光栅剪切干涉仪的光路。半导体激光器 LD 发出的光束经相对孔径为 3.5, 焦距 $f=52\text{mm}$ 的透镜组 L 准直成平行光照明到离子刻蚀的双频光栅 DH ^[1]。该光栅由两次曝光全息术制作, 拍频周期 d' 可在第一次曝光后由其中一束平行光转 $\Delta\theta$ 角度来控制, 其关系为:

$$d' = d \operatorname{tg} \theta / \Delta\theta \quad (1)$$

这里 d 和 θ 分别为光栅的平均周期和平均衍射角。对 $\lambda=780.0\text{nm}$ 的光, 实验中所用光栅的衍射角 $\theta=24^\circ 19'$, 拍频周期 $d'=0.975\text{mm}$ 。毛玻璃屏 K 放在双频光栅的一级衍射方向上, 它与双频光栅 DH 的轴向距离为 Z 。对于 820.0 nm 和 780.0 nm 的半导体激光束分别用红外观察镜 (RO) 和肉眼直接观

测。由于半导体激光的发散角较大, 所以在光路中就不必放置光束扩展器。半导体激光束的准直采用调焦到无穷远的望远镜在注入电流为 20 mA 时来调节, 当由望远镜经过透镜 L 观察到光源的发光点最小时, 透镜 L 的位置处于准直调整的最佳状态。

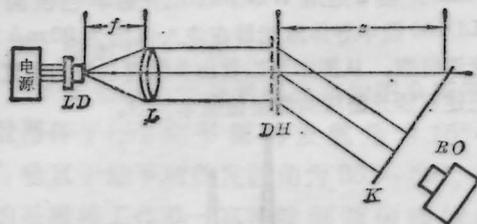


图 1 半导体激光双频光栅剪切干涉仪光路

实验中分别采用多纵模 TOLD100 型 ($\lambda=780.0\text{nm}$) 的可见光半导体激光器和单模 HLP1400 型 ($\lambda=820.0\text{nm}$) 半导体激光器为光源。半导体激光器用于干涉计量时, 首先必须考虑其模式特性、辐射场, 及其相干性。

与 He-Ne 激光器相比, 半导体激光器的纵模结构更容易受输出功率和温度变化的影响, 而半导体激光器的输出功率主要由注入电流决定。在进行半导体激光的剪切干涉实验时, 为了保证光源的输出模式和功率的稳定性, 应该采用自动功率控制 (APC) 回路和自动温度 (ATC) 控制回路。TOLD100 型半导体激光器内部本身具有接受器 (PD), 用于利用反馈进行自动功率控制。同时, 实验中用 $100\times$

100×3mm³的紫铜板作散热片和 KSM-0371 型电子冷却器构成温度控制装置。另外, 半导体激光器的偏振度很高, TOLD100 型可见光半导体激光器的偏振度达到 97.4%。为了保证剪切干涉条纹的对比度, 应使半导体激光的 TE 偏振光振动方向垂直于实验台面。

对于光谱分布为高斯函数和光强分布均匀的狭缝光源通过双频光栅产生的剪切条纹的可见度由下式给出^[2,8]:

$$v(x) = \text{sinc}(ax/d'f) \exp \left\{ -\frac{\sigma^2}{2} (2\pi x/d'd)^2 \right\} \quad (2)$$

这里的 a 是狭缝宽度, $\Delta\lambda$ 是光源的谱线宽度。半导体激光器的波导层一般很薄为 1 μm 数量级, 在图 1 的光路中, 由光源大小影响剪切条纹第一次消失点与双频光栅的轴向距离 $s = d'f/a = 5.2 \times 10^4 \text{mm}$, 所以半导体激光器在剪切干涉实验中不必考虑光源尺寸对剪切条纹可见度的影响。对于 TOLD100 型可见光半导体激光器来说, 影响双频光栅剪切干涉条纹可见度的主要因素是激光器多纵横的线宽和包络。用图 1 的实验装置对 TOLD100 型半导体激光器在注入电流为 90mA 时的时间相干性进行实测, 由光源的谱线宽度决定的剪切条纹消失点到双频光栅的轴向距离 $s = 2160 \text{mm}$ 。当光谱用高斯型 $e^{-(\Delta\lambda)^2/2\sigma^2}$ 来近似时, 可求出该半导体激光器光谱包络半宽度为 0.6mm。图 2 是用 WDG-30 型光栅单色仪测得 TOLD100 型半导体激光器在注入电流为 90mA 时的光谱线型。从图中可以看出多纵模包络的半宽度与上述双频光栅法的测量值基本符合。

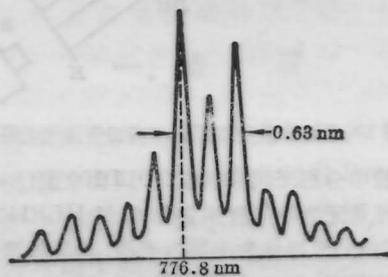


图 2 TOLD100 型半导体激光器的光谱线型

若图 1 中准直透镜 L 和双频光栅 DH 中间置入一块位相物体, 在观察屏 K 上则可获得位相物体的剪切干涉图。因通常只在距双频光栅 20~30cm 处实测条纹, 根据图 1 装置所给的数据, 半导体激光双频光栅剪切干涉条纹的对比度在 0.95 以上, 因此对半导体激光剪切干涉仪进行定量分析时, 不必考虑剪切干涉条纹的清晰度对测量精度的影响。

用半导体激光双频光栅剪切干涉仪测量透镜像

差时采用如图 3 所示的另一种光路。半导体激光器 LD 发射出来的光被待测透镜 L 会聚成像, 由于半导体激光发光面积很小可以近似看成点光源。将双频光栅置于会聚点附近, 则可在毛玻璃屏上观测到透镜像差的剪切干涉图。图 4(a)、(b) 是用 Agfa10E75 全息干板拍摄半导体激光双频光栅干涉仪显示的凸透镜(孔径 $\phi = 60 \text{mm}$, 焦距 $f = 110 \text{mm}$) 近轴和远轴的球差干涉图照片。

为定量检测, 换用短焦距 $f_c = 46.8 \text{mm}$ 像差较大的透镜来测量, 如图 3 所示, 剪切光栅置于近轴焦

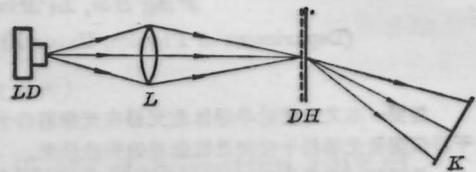


图 3 半导体激光双频光栅剪切干涉仪测量透镜像差

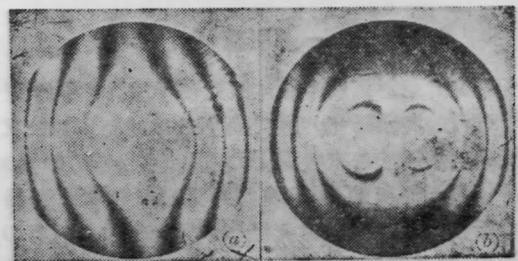


图 4

- (a) 带球差透镜的近轴焦点剪切干涉图;
- (b) 带球差透镜的远轴焦点剪切干涉图。

点处, 观察屏到光栅的距离约等于像距 $s_0 = 1.05 \text{mm}$ 。单纯只考虑球差的两沿 x 方向剪切波面可表为

$$e^{-jK\frac{B}{4}(x^2+y^2)} \text{ 和 } e^{-jK\frac{B}{4}[(x+\Delta x)^2+y^2]^2}, \text{ 剪切量是 } \Delta x = s_0 \times \frac{\lambda}{d \cos \theta}.$$

$$I \sim 2 \left\{ 1 + \cos \frac{BK}{4} \left\{ [(x+\Delta x)^2+y^2]^2 - (x^2+y^2)^2 \right\} \right\} \quad (6)$$

暗条纹处满足

$$\frac{BK}{4} \left\{ [x+\Delta x]^2+y^2 \right\}^2 - (x^2+y^2)^2 = n\pi, \quad n = \pm 1, \pm 3, \pm 5 \dots \quad (4)$$

那么在 $y=0$ 线上可得

$$B = \frac{2n\lambda}{(x+\Delta x)^2 - x^2} \quad (5)$$

由波像差与几何像差的关系^[4]可得初级球差:

$$\delta_L = \frac{1}{n'} \frac{1}{u'} \frac{dw}{du'} \approx -B \cdot z_0^2 (x^2+y^2) \quad (6)$$

图5为实测球差曲线, 实验中与波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光测量的结果作比较, 差值表明透镜的色球差实验值。



图5 球差实验曲线

用半导体激光双频光栅剪切干涉仪测量透镜球差时, 正如前面所讨论的, 由于观察屏离双频光栅较近, 条纹的可见度很高, 因此可以忽略条纹的清晰度对读数的影响。但因为 780.0 nm 的半导体激光处于可见光的边缘部分, 可见度较差, 必须在暗室中观察或采用较大功率的半导体激光器。影响双频光栅剪切干涉仪的精度和测量误差的主要因素来自剪切干涉图中心到干涉条纹位置 x 的读数和测量误差。对式(5)微分可以得到像差测量误差 δ_B 与条纹位置读数误差 δ_x 的关系:

$$\delta_B = \frac{8[(x + \Delta x)^3 - x^3]n\lambda}{[(x + \Delta x)^4 - x^4]^2} \delta_x \quad (6)$$

实验中为了方便起见只是以内眼观察刻线是否在条纹中央来判断暗条纹的极限位置, 由于干涉条纹为正弦强度分布, 人眼对条纹灰度判断约 8~10 等级, 条纹宽度一般为 1~5 mm, 则判读误差小于 0.2 mm。游标尺的读数精度是 0.1 mm, 每一条纹位置判读多次取平均, 总的条纹位置测量误差在 0.3 mm 以内。另外被检透镜到双频光栅距离、双频光栅到观察屏的间距、以及光栅衍射角的测量误差会引起条纹剪切量 Δx 的测量误差。总的透镜球差的实际相对测量误差大约在 5% 左右。

在双频光栅剪切干涉仪中, 双频光栅面愈接近透镜的焦点, 剪切干涉条纹愈少。由此可准确定出透镜焦点的位置, 其精度为:

$$\Delta f = 2f/d'D \quad (7)$$

式中的 D/f 是透镜的相对孔径。一般调整精度是几十微米, 该方法可用到半导体激光与光纤或平面波导耦合的光路中。

作者对合肥国家同步辐射加速器实验室光刻组在制作离子刻蚀双频光栅方面所给予的帮助, 多田邦雄教授提供的器件以及与傅竹西同志进行的有益讨论表示感谢。

参 考 文 献

- 1 Ming Hai *et al.*, SPIE's Proceedings, 814~83 (1987)
- 2 谢建平, 姚焜 *et al.*, 光学学报, 5(2), 1 03(1985)
- 3 M. 玻恩 E. 沃耳夫, 光学原理 (科学出版社, 北京, 1978), 435.
- 4 张以谟, 应用光学 (机械工业出版社, 北京, 1983), 279
(收稿日期: 1987年12月14日)

《国内激光产品目录》证订启事

《国内激光产品目录》是继 1983 年出版的《国内激光产品目录》之后, 又一部较全面介绍我国激光产品及生产单位的公开出版物, 收集了 1983 年以来我国激光产品及生产单位的变化及最新情况, 并把与激光技术有关的学会(中央及省、直辖市)、报刊的简介收集入册, 从而使读者对我国激光技术发展的全貌有一较完整的了解。

本产品目录定于 1989 年 8 月由上海市科技文献出版社公开出版发行, 定价 7 元, 须订购者请把款汇至上海市 8211 邮政信箱《光学学报》编辑部(邮政编码: 201800), 收款后即寄书及收据。来函请标明贵单位的邮政编码。

(木旦)