

文章编号: 1001-3806(2003)04-0293-03

基于激光频率分裂的波片位相差测量方法*

宗晓斌 朱 钧 李 岩 张 毅 张书练

(清华大学精密仪器系精密测试技术与仪器国家重点实验室,北京,100084)

摘要: 应用激光频率分裂技术可以测量波片的位相延迟。将波片插入到激光谐振腔内,使激光纵模产生分裂,分别探测由同级和不同级分裂纵模产生的相邻两个频差,就可以求得波片的位相延迟。这种方法只需测量频差而不依赖于任何机械量的测量,并将位相延迟的测量溯源到激光的波长上。实验表明,该系统的测量分辨率可达 0.003° , 多次重复测量的偏差在 0.05° 以下,系统不确定度对于厚度 1.5mm 的石英晶体 $1/4$ 波片约为 1° 。

关键词: 激光; 波片; 位相差; 频率分裂

中图分类号: TN247 文献标识码: A

Phase retardation measurement of wave plate based on laser frequency splitting technology

Zong Xiaobin, Zhu Jun, Li Yan, Zhang Yi, Zhang Shulian

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instrument,
Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing, 100084)

Abstract: Laser frequency splitting technology can be used to measure phase retardation of a wave plate. With the wave plate inserted into a laser cavity to split longitudinal laser, its phase retardation can be calculated by detecting the frequency differences between the same order or the adjacent order split longitudinal modes. No mechanical parameters but only the frequencies of optical beats need to be measured, and the measurement can be traced to the wavelength of the laser. Experiments prove that a resolution of 0.003° and a repeatability of 0.05° can be ensured. For a quartz quarter wave plate of 1.5mm thick, the uncertainty of the system is about 1° .

Key words: laser; wave plate; phase retardation; frequency splitting

引 言

波片在光学领域内有着广泛的应用,它不仅是光学系统的重要组成元件,而且其自身位相延迟量的精度会直接影响到整个系统的效果或测量精度,因此,精确测量波片的位相延迟非常重要。目前,常用的高精度波片测量方法(以测量 $1/4$ 波片为主)有旋转消光法,电光调制法^[1],旋转检偏器法,椭偏仪,偏振干涉术^[2],光学外差干涉术^[3],磁光调制法等。这些测量方法的原理及技术已较成熟,但是其设备调整较复杂,如绝大部分方法需要精确测量角度,而高精度的测角仪体积很大,成本较高。这些方法的测量环节引入了较多的仪器误差和方位调整误

差,使测量精度难以进一步提高。此外,这些方法多以角度等机械量作为被测量,难以作为测量位相延迟的基准方法。

文中阐述了一种应用激光频率分裂技术^[4]的波片测量方法,可以测量检定标准的 $1/4$ 波片和其它类型的波片。更重要的是,该方法将位相延迟的测量溯源到激光的波长上,因此,有可能作为位相延迟测量的基准方法。

1 原 理

通过腔内双折射效应可以使激光纵模发生分裂。在激光谐振腔内插入一个双折射元件,例如石英晶体,由于其双折射效应,原本单一频率的激光将分裂成为振动方向互相垂直、频率不同的两种光,即 o 光(寻常光)与 e 光(非常光)。由文献[4]知,二者频率差的绝对值为:

$$\Delta\nu = \nu\delta/L \quad (1)$$

相对频率分裂量:

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{\delta}{\lambda/2} \quad (2)$$

式中, L 为谐振腔长, ν 为平均频率, δ 为双折射元

* 国家自然科学基金资助项目。

作者简介: 宗晓斌,男,1978年6月出生。博士研究生。现从事 He-Ne 激光及其测量方面的应用研究。

收稿日期: 2002-07-12; 收到修改稿日期: 2002-09-19

件造成的 *o* 光与 *e* 光之间的光程差, Δ 为激光器纵模间隔。

$$\text{对于波片, 其位相差: } \varphi = 2\pi\delta/\lambda \quad (3)$$

$$\text{故由(2)式, (3)式可得: } \varphi = \Delta\pi/\Delta \quad (4)$$

如果使用 1/4 波片, 其位相差为 $\varphi = \pi/2$, 代入(4)式得 $\Delta\nu = \Delta/2$, 即 1/4 波片引起频率分裂造成的频差是激光纵模间隔的一半。

由(2)式、(4)式可见, 如果能测出两频率的频差 $\Delta\nu$ 和纵模间隔 Δ 即可得到其光程差 δ 与位相差 φ 。因此, 可以将待测波片作为双折射元件放入激光腔内, 通过测量频差来得到其光程差和位相差。

要求得 φ , 必须先测出 $\Delta\nu$ 和 Δ 。在激光腔内放入波片后, 每一个纵模都分裂为两个, 用扫描干涉仪及示波器观察, 可看到如图 1 实线所示一系列 *o* 光和 *e* 光相间的频率。如果取其中任意 3 个连续的频率作为观察对象, 相邻的两个频率必为 1 个 *o* 光, 1 个 *e* 光, 相间的两个频率必同为 *o* 光或同为 *e* 光。由同一纵模如 ν_q 分裂的两频率 ν_q' 和 ν_q'' 的间隔就是 $\Delta\nu$, 而相间两频率 ν_q' 和 ν_{q+1} 的间隔为 Δ 。通过调节损耗和改变腔长等手段, 可以让激光器只输出纵模 ν_q' 和 ν_q'' , 取它们的拍频并用频率计测量, 可以得到 $\Delta\nu$ 。

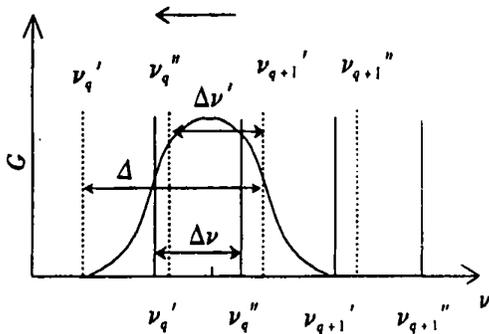


Fig. 1 Shift of longitudinal modes on frequency axis

由于无法准确测定腔长, Δ 很难直接测量。注意到相邻两个纵模形成的频差可以是 $|\nu_q' - \nu_q''|$, 也可以是由纵模 ν_{q+1}' 和 ν_q'' 形成的拍频 $|\nu_{q+1}' - \nu_q''|$ 。而且有 $|\nu_q' - \nu_q''| + |\nu_{q+1}' - \nu_q''| = |\nu_{q+1}' - \nu_q'| = \Delta$ 。如果分别测量了 $\Delta\nu = |\nu_q' - \nu_q''|$ 和 $\Delta\nu' = |\nu_{q+1}' - \nu_q''|$, 则可以得到 $\Delta = \Delta\nu + \Delta\nu'$, 于是:

$$\varphi = \frac{\Delta\nu}{\Delta\nu + \Delta\nu'} \pi \quad (5)$$

如果用角度来表示位相差, 则:

$$\varphi = \frac{\Delta\nu}{\Delta\nu + \Delta\nu'} \times 180^\circ \quad (6)$$

由上式可以看出, 波片位相差只与两次测量的频差值有关, 而与腔长、纵模间隔和激光器的其它参数无

关。只要得到这两个频差值, 就可以计算出波片位相差。

调整激光器的增损比使得只有相邻的两个纵模能够振荡出光。当腔长变化时, 激光频率会改变, 即激光纵模会在频率轴上移动, 移动的方向取决于腔长是增大还是缩小, 如图 1 所示(虚线表示移动后的纵模)。先测得纵模 ν_q' 和 ν_q'' 产生的频差 $\Delta\nu$, 然后调节腔长, 使纵模在频率轴上发生移动直到纵模 ν_{q+1}' 和 ν_q'' 出光, 测得频差 $\Delta\nu'$, 由(5)式或(6)式即可得到波片的位相差 φ 。

对于多级波片, 位相差 $\varphi_n = n(2\pi) + \varphi_0$, 则引起的相应频差为 $\Delta\nu = 2n\Delta + (\varphi_0/\pi)\Delta$ 。在实际测量中, 纵模间隔 Δ 的整数倍没有任何作用, 测量得到的相邻两个纵模间的频差是 $(\varphi_0/\pi)\Delta$, 计算出的结果是位相差的小数部分 φ_0 。因为在实际应用中, 位相差的整数部分通常没有任何实际意义, 所以, 对于多级波片这种方法同样适用。

理论上这种方法适用于任意位相延迟的波片, 但是当测量半波片和全波片时需要采取特殊的措施。由(4)式可知, 当 $\varphi_0 = \pi$ (半波片) 或 $\varphi_0 = 2\pi$ (全波片) 时, 计算出分裂纵模的频差为 Δ (或 2Δ), 此时 q 级纵模分裂出的 *o* 纵模与 $q+1$ 级纵模的 *e* 纵模重合, 由于模竞争的作用, 其中一个模将消失。为了能测量半波片和全波片, 可以应用在激光增益介质两侧加横向磁场的方法, 消除频差闭锁, 实现全区间的测量。

上述频差与波片位相差的关系没有考虑有源腔对激光频率的影响。通过数值计算得到的两分裂模的光强准稳态近似解和调谐曲线, 表明频差调谐的相对大小约为 10^{-3} 量级, 而充双同位素 Ne 能有效地减小模竞争的影响, 使光强变化平稳并且在中心频率处 *o*, *e* 光有稳定的等光强点, 在等光强点附近调谐量及调谐量的变化幅度都比较小(10^{-5} 量级)。实验结果与理论计算结论相符。

这种波片位相延迟测量方法只需要测量频差, 而不依赖于任何机械量, 特别是角度的测量; 频差对于波片位相差变化的灵敏度很高(纵模间隔为 600MHz 时, 波片位相差变化 1° , 频差会变化 3.3MHz); 频差的测量不易受到后续处理环节中的干扰。故这种方法能达到很高的精度和分辨率。如果频差能分辨到 1kHz, 相应的位相差分辨率约为 $1''$ 。这种方法对任意位相差的波片都可以进行测量, 而不仅适用于 1/4 波片。从理论上说, 对于其它类型的位相延迟器, 如菲涅耳棱镜、巴比涅补偿器、

电光调制器等都可以进行测量。

该方法的另一优点在于其可溯源性。在国际单位制中,对于波片位相延迟的测量没有规定一个基准的方法,但长度单位米的定义可以通过光在真空中的波长来复现。对于波片的位相延迟,如果能将测量方法溯源到光波长或者频率的标准,也可称其具有可溯源性。在该方法中,由(2)式可知,波片位相延迟的等同量——光程差 δ 仅与相对频率分裂量 $\Delta\nu/\nu$ 和波长 λ 有关,故光程差(位相差)的测量可以溯源到激光波长,即这种测量方法具有可溯源性。

2 系统及实验

基于频率分裂原理的波片位相差测量系统如图 2 所示。

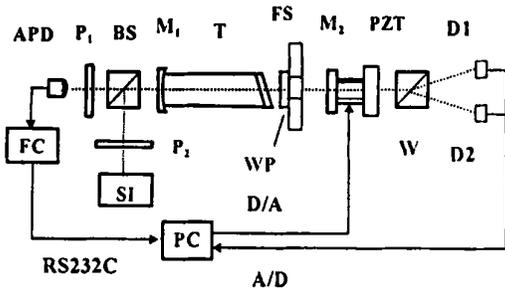


Fig. 2 Experimental setup

系统中使用的激光器为 632.8nm 波长半内腔 He-Ne 激光器,反射镜 M_1 和 M_2 构成激光谐振腔。 M_1 为球面输出镜,固定在激光增益管 T 上,平面高反镜 M_2 固定在压电陶瓷 PZT 上。波片通过装夹装置 FS 插入激光腔中,并使波片光轴垂直对准光束。测量用波片均为石英晶体制成,并镀有增透膜。

经 M_1 的出射光由分束镜 BS 分为两束,其中一束经检偏器 P_2 进入 F-P 扫描干涉仪 SI 以观察模式,另外一束光经过方向与波片快轴成 45° 的检偏器 P_1 ,两偏振分量间形成光拍,拍频等于二者的频差。光拍由雪崩二极管 APD 接收转换成电信号,由频率计 FC 测出其频率并输入计算机。渥拉斯顿棱镜 W 将从 M_2 透射的尾光中两种不同偏振态的光分开,分别由光电探测器 D1 和 D2 接收。D1 和 D2 接收到的光强信号也同时输入计算机,在两光束的等光强点计算机接收频率计送来的频差数值。计算机通过 D/A 转换及高压放大器控制压电陶瓷 PZT,带动其上的反射镜移动从而连续改变激光器腔长,使纵模在频率轴上移动以选择由哪两个纵模出光并形成拍频。测得连续两次的拍频信号后,即可根据(6)式求得波片位相差。

对两个 $1/4$ 波片和一个约 30° 位相片的测量结

果见表 1。这 3 个波片均为石英晶体制成,厚 1.5mm。原标称值是采用电光调制法测量得到的,分别为:(a) 93° ; (b) 89° ; (c) 30° ,精度约为 $0.5^\circ \sim 1^\circ$ 。

3 个波片测量的标准差分别为 $0.016^\circ (0.96')$, $0.023^\circ (1.4')$ 和 $0.02^\circ (1.2')$,经过温度补偿后的测量结果分别为 $93.132^\circ (20^\circ\text{C})$, $89.968^\circ (20^\circ\text{C})$ 和 $30.330^\circ (20^\circ\text{C})$ 。

Table 1 Measurement result of 3 samples
a—measured at 21.13°C

	$\Delta\nu/\text{MHz}$	$\Delta\nu'/\text{MHz}$	$\varphi/^\circ$
1	418.536	399.452	92.100
2	418.468	399.322	92.107
3	418.625	399.368	92.118
4	418.807	399.319	92.144
5	418.652	399.496	92.107
6	418.430	399.315	92.104
average	418.586	399.379	92.113

b—measured at 20.86°C

	$\Delta\nu/\text{MHz}$	$\Delta\nu'/\text{MHz}$	$\varphi/^\circ$
1	405.175	412.657	89.177
2	405.342	412.683	89.192
3	405.568	412.492	89.238
4	405.439	412.837	89.186
5	405.265	412.768	89.175
6	405.381	412.783	89.186
average	405.362	412.703	89.192

c—measured at 20.89°C

	$\Delta\nu/\text{MHz}$	$\Delta\nu'/\text{MHz}$	$\varphi/^\circ$
1	139.751	711.322	29.557
2	139.664	711.480	29.536
3	139.626	711.515	29.528
4	139.639	711.536	29.530
5	139.492	711.554	29.503
6	139.553	711.763	29.507
average	139.6208	711.5283	29.527

3 结束语

激光频率分裂技术可以应用于波片位相延迟的测量。应用这种测量方法的系统结构简单,调整方便,只需测量频差,而无需高精度测角仪和复杂的机

(下转第 306 页)

同时,还测到了这些介质在不同聚焦深度($L = 9\text{cm}$, 4cm 和 0cm)下所产生的 SBS 波形。图 2 给出了一些介质在 $L = 4\text{cm}$ 时所产生的 SBS 波形。从波形中可看出:在相同条件下,吸收系数大的介质所产生的 SBS 波形比吸收系数小的介质所产生的 SBS 波形前沿陡。

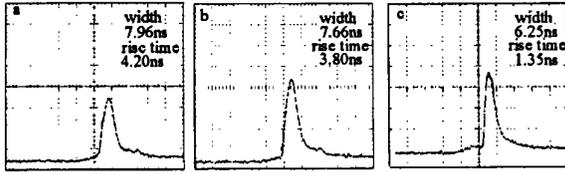


Fig. 2 The SBS pulse shapes produced in different liquids for $L = 4\text{cm}$
a— CCl_4 b—benzene c—methyl alcohol

3 分析和讨论

介质的吸收系数、增益系数、声子寿命和折射率等都影响介质所产生的 SBS 性能,但是聚焦深度较浅时,不同介质吸收系数的差异是它们所产生的 SBS 性能有差异的主要因素。从表 1 中可看出:从上而下介质的吸收系数逐步增大,这种变化导致了介质所产生的 SBS 性能的变化。这是因为对于吸收系数小的介质来说,介质对泵浦光和 Stokes 光的吸收较小、焦点附近的泵浦能量较高, SBS 产生时间提前, Stokes 脉冲前沿放大较小,因此,它们所产生的 SBS 脉宽较宽、能量较高和波形前沿不是很陡^[6]。而对于吸收系数较大的介质来说,介质对泵浦光和 Stokes 光的吸收较大、焦点附近的泵浦能量

较低, SBS 产生时间较晚, Stokes 脉冲前沿放大较大,故它们所产生的 SBS 脉宽较窄、能量较低和波形前沿很陡。另外,对每种介质来说所产生的 SBS 脉宽和能量均随着聚焦深度的增大而变小,这是因为聚焦深度越大,泵浦光与 Stokes 光的相互作用长度增加, Stokes 光的前沿放大增强, SBS 脉宽变窄。但是由于随着聚焦深度的增加,介质对泵浦光和 Stokes 光的吸收也增加,导致了 Stokes 光的能量的降低。甚至导致一些吸收系数较大的介质(如乙醇、甲醇和水等)的焦点附近的泵浦光达不到 SBS 阈值。

从实验结果还可以看出,选择 SBS 液体介质时不仅考虑 SBS 参数(如 g 和 τ 等)还必须考虑它们的吸收系数。有些 SBS 液体介质虽然有理想的 SBS 参数,但是它们的吸收系数较大,对泵浦光和 Stokes 光的吸收很强,因此,在实际应用当中受到限制。

参 考 文 献

- [1] Dane C B, Neuman W A, Hackel L A. IEEE J Q E, 1994, 30(8): 1907~ 1915.
- [2] 杨爱铃, 杨经国. 激光杂志, 1998, 19(4): 13~ 17.
- [3] 葛传文, 张为俊, 王 沛 *et al.* 激光与光电子学进展, 2000, 412(4): 18~ 22.
- [4] 陈伯涛, 林平娣, 张启昆 *et al.* 无机化学. 3 版, 北京: 高等教育出版社, 1992: 294~ 296.
- [5] 朱 丹, 张鹏翔, 周仲壁 *et al.* 物理学报, 1989, 38(4): 683~ 688.
- [6] 刘 莉. 受激布里渊散射相位共轭镜的脉冲波形与控制问题. 哈尔滨工业大学工学博士学位论文, 2000: 109~ 110.

(上接第 295 页)

械结构,并具有可溯源性。实验表明,该系统的测量分辨率可达 0.003° , 多次重复测量的偏差在 0.05° 以下,系统不确定度对于厚度 1.5mm 的石英晶体波片约为 1% 。

曲阜师范大学提供了测试所需的波片,在此谨表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Shyu L, Chen C, Su D. Appl Opt, 1993, 32(22): 4228~ 4230.
- [2] Sankarasubramanian K, Venkatakrishnan P. Opt & Laser Technol, 1998, 30(1): 15~ 21.
- [3] Lin Y, Zhou Z, Wang R. Opt Lett, 1988, 13(7): 553~ 555.
- [4] Zhang S, Guo H, Li K *et al.* Opt & Laser in Engng, 1995, 23(1): 1~ 28.