

高分辨率波长监测新方法

金柯 刘永强 杨崇民 王颖辉 韩俊 王慧娜

西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065

摘要 利用双缝衍射干涉原理, 波长微小变化引起折射率变化从而导致两衍射缝之间产生明显的位相差, 进而使衍射零级条纹偏离光轴。通过其偏移量的变化可以实时监测波长的微小波动。实验表明, 激光波长变化 2 μm 可引起衍射零级条纹位移约 2.6 μm 。由于探测的是衍射零级条纹的位移, 这样就避免光强变化带来的影响, 极大地提高了波长监测分辨率。

关键词 物理光学; 衍射; 波长监测

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.022601

New Scheme for Wavelength Monitoring with High Resolution

Jin Ke Liu Yongqiang Yang Chongmin Wang Yinghui Han Jun Wang Huina

Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an, Shaanxi 710065, china

Abstract Using the double slit diffraction and interference principle, small fluctuation of wavelength leads to refractive index change and generates a obvious phase difference between two diffraction slits. Thus zero level of the diffraction stripe deviates from the optical axis. Small fluctuation of wavelength is monitored in realtime through the change of offset. Experimental results show that 2 μm change of the laser wavelength can cause displacement of diffraction stripe for about 2.6 μm . Because the displacement of zero level diffraction stripe is detected, effects of light intensity change are avoided which greatly improves the wavelength monitoring resolution.

Key words physical optics; diffraction; wavelength monitor

OCIS codes 260.1960; 220.4610; 120.4820

1 引言

随着信息化的发展, 通信容量需求不断增大, 在密集波分复用(DWDM)系统中, 信道数目日益增多, 信道间隔减小就需要有精密的激光器^[1-2]及精密的波长锁定技术, 防止信道间的串扰^[3-4]。要实现精密锁定, 就必须精确监测激光波长的漂移。目前, 国内外已经研究出了多种激光波长监测方法, 如光纤光栅^[5,6], 法布里-珀罗(F-P)标准具^[7], 导模共振激发增强古斯-汉欣位移效应^[8]等。Nasu等^[9]利用F-P标准具实现了4 μm 的波长锁定, 但F-P标准具自由光谱区小, 反射腔工艺难度大。冯耀军等^[10]在金属包覆波导中, 采用自由空间耦合技术激发波导超高阶导模, 通过测量反射光强监测波长漂移, 实现了1 μm 波长监测, 但激光功率波动对监测精确度影响较大。为了克服以上不足, 利用双缝衍射干涉原理, 波长微小变化引起折射率变化导致两衍射缝之间产生明显的位相差, 进而使衍射零级条纹偏离光轴, 测量衍射零级条纹上下位移量来监测波长漂移。由于波长漂移只与衍射条纹移动有关, 因此避免了激光光强波动带来的干扰。

2 原理

图1为波长监测结构示意图。激光经过准直扩束后照射在双缝衍射屏上, 在衍射屏的一条狭缝后面放置一块在所监测波长处色散较大的光学玻璃条, 衍射屏另一条狭缝后的4个反射镜作用是补偿双缝间的光程差, 反射镜M1和M4固定不动, 上下同时调节M2和M3使双缝之间的光程差在激光中心波长 λ_0 处的光程差为零, 即衍射零级条纹在光轴上。两束光最后经过透镜聚焦, 探测器放置在透镜的焦平面上。当中心波

收稿日期: 2015-06-05; 收到修改稿日期: 2015-07-20; 网络出版日期: 2016-01-16

作者简介: 金柯(1984—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事光学薄膜、光学测试及其应用领域方面的研究。

E-mail: jinkegoodman@163.com

长变化 $\Delta\lambda$, 由于空气色散远小于光学玻璃的色散, 所以忽略空气折射率色散影响, 认为空气折射率是定值 n_0 。激光波长波动范围非常小, 可以近似认为玻璃色散在此范围是线性变化, 即

$$\Delta n = \Delta\lambda \cdot n_a, \quad (1)$$

式中 n_a 为单位波长变化引起的折射率改变量, Δn 为波长变化引起玻璃的折射率变化, $\Delta\lambda$ 为波长变化量。

玻璃色散使两狭缝之间产生位相差, 所以随着波长增加, 衍射零级条纹将向光轴下方移动; 随着波长减小, 衍射零级条纹将向光轴上方移动。双缝之间产生的位相差为

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda_0 \pm \Delta\lambda} |(n_g \mp \Delta\lambda \cdot n_a)d_1 - n_0 d_0|, \quad (2)$$

式中 d_1 为玻璃条长度, n_0 为空气折射率, n_g 为玻璃折射率, λ_0 为激光中心波长, d_0 为与玻璃条光学厚度相等的空气长度。

$$d_0 = \frac{n_g d_1}{n_0}. \quad (3)$$

由于双缝之间的位相差与衍射零级条纹移动距离为线性关系, 激光波长变化计算为

$$\frac{2\pi D}{e} = \frac{2\pi}{\lambda_0 \pm \Delta\lambda} |(n_g \mp \Delta\lambda \cdot n_a)d_1 - n_0 d_0|, \quad (4)$$

式中 e 为条纹间距, D 为衍射零级条纹移动距离。

$$e = \frac{f\lambda}{b}, \quad (5)$$

式中 f 为透镜 L1 焦距, b 为双缝间距, λ 激光波长。

当 $\lambda > \lambda_0$ 时

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_0 D}{n_a d_1 e - D}, \quad (6)$$

当 $\lambda < \lambda_0$ 时

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_0 D}{n_a d_1 e + D}. \quad (7)$$

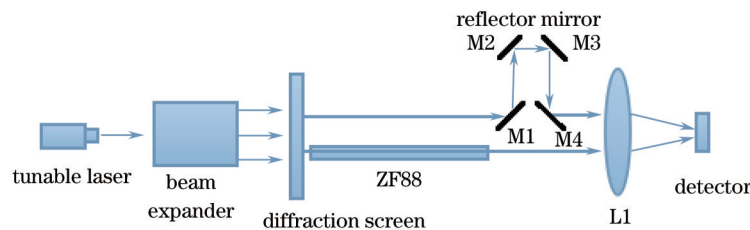


图1 实验装置

Fig.1 Experimental setup

3 实 验

实验所用可调谐激光器中心波长为 860 nm, 衍射屏缝宽为 0.05 mm, 双缝间距为 3 mm。下缝后面为 H-ZF88 光学玻璃, 长度为 100 mm, 厚度为 3 mm, 且色散较大, 吸收小。在 865 nm 波长的折射率为 1.90719, 在 855 nm 波长的折射率为 1.90796, 在色散线性近似下, 则每纳米波长变化引起的折射率改变量 n_a 为 0.000077。反射镜 M1 和 M2 均 45° 倾斜放置, M3 和 M4 均 135° 倾斜放置, M1 与 M4 固定, M2 与 M3 可整体上下移动调节光程。透镜 L1 的焦距为 50 cm。

实验在精密的温控系统条件下进行, 温度控制在 25 °C。首先波长固定在激光器的中心波长处, 激光经过准直和扩束垂直照射在衍射屏上, 上光路透过狭缝经过反射镜到达透镜 L1, 下光路通过 H-ZF88 光学玻璃条到达 L1, 经透镜聚焦到 CCD 上。上下同时调节反射镜 M2 和 M3 位置, 使上下光路的光程相同, 这样衍射零级条纹就在光轴上, 然后以 2 pm 为间隔从 860 nm 调到 860.01 nm, 再以同样间隔从 860 nm 调到 859.99 nm。利用 CCD 探测器完成干涉场光强分布采样, 通过计算机处理, 得到衍射零级条纹位移量。

实验结果如图 2, 横坐标为激光调谐波长, 纵坐标为衍射零级条纹位移量。从测试数据可以看出波长每

改变 2 pm 引起的衍射零级条纹位移量约是 2.6 μm 。红色曲线为拟合曲线,可以看出拟合度非常高,所以可以通过拟合值计算激光波长改变量来分析系统误差。表 1 为通过衍射零级条纹位移量计算得到的激光波长改变量与调谐量。从表 1 看出调谐量越小,实验的误差越大,这是由于在色散线性近似下,折射率改变量 n_e 在中心波长附近的误差最大;从表 1 看 $\lambda < 860 \text{ nm}$ 的情况相较于 $\lambda > 860 \text{ nm}$ 的情况存在着更大的实验误差。因为在折射率线性近似下,在 $\lambda > 860 \text{ nm}$ 时每纳米折射率改变量变大,导致 $\Delta\lambda$ 减小,这样就抵消了部分正误差。所以 $\lambda < 860 \text{ nm}$ 的情况相较于 $\lambda > 860 \text{ nm}$ 的情况存在着更大的实验误差。图 3 为通过拟合得出的衍射零级条纹位移量计算得到的激光波长改变量。从图 3 看出 $\lambda < 860 \text{ nm}$ 的情况相较于 $\lambda > 860 \text{ nm}$ 的情况存在着更大的实验误差,这与表 1 结果一致。从图 3 看出,与理论调谐值(虚线)相比所有波长误差均小于 1 pm。结合表 1 数据,这种监测方法的系统误差小于 1 pm,所以这种激光波长监测方法测量波长的分辨率可以达到 2 pm 以下。

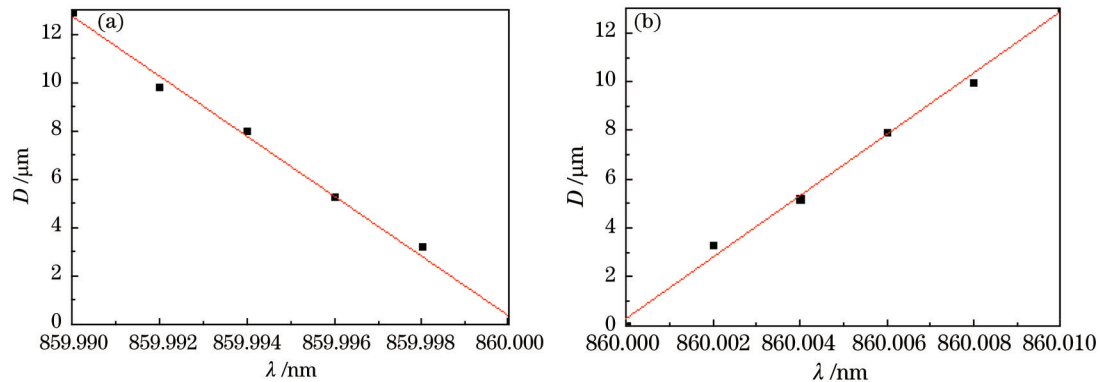


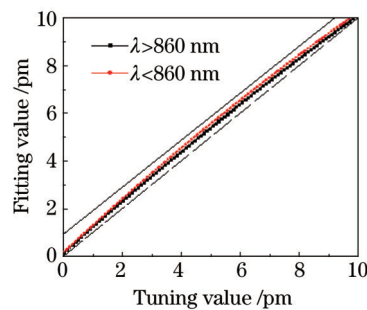
图2 波长与衍射零级条纹位移量的关系

Fig.2 Experimental curves of displacement quantity versus wavelength

表 1 实验结果

Table 1 Experimental result

Tuning value /pm	Experimental result /pm ($\lambda > 860 \text{ nm}$)	Experimental result /pm ($\lambda < 860 \text{ nm}$)
10	10.3	10.4
8	8.1	8.2
6	6.3	6.5
4	4.6	4.7
2	2.7	2.8

图3 拟合值计算的 $\Delta\lambda$ 与调谐值的关系Fig.3 Calculated value of $\Delta\lambda$ versus tuning value

影响监测精度的主要因素有:

1) 工作环境:包括温度变化、振动影响。温度变化会导致光学器件折射率变化,使光程差变化影响监测精度。振动会使光路偏移,导致衍射条纹位移误差增加降低监测精度。为了避免上述因素影响,实验装置安装在减振性能优良的 optical 平台上,环境温度控制在 $25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

2) H-ZF88 光学玻璃条的折射率精度直接影响监测精度。本实验采用 SpectroMaster 高精度折射率测量仪测量 865 nm 波长的折射率和 855 nm 波长的折射率,测量精度可达 10^{-6} 。

3) 激光器波长稳定性对实验至关重要。实验采用 TOPICA PHOTONICS 公司 DL pro 可调谐激光器, 输出中心波长为 860 nm。

4 结 论

提出了一种结构简单, 分辨率高的波长监测技术。该技术利用双缝衍射干涉原理, 波长微小变化引起折射率变化, 使双缝间产生位相差来实时监测波长的微小波动。由于 H-ZF88 光学玻璃在监测波长处有较大色散, 波长的微小波动可引起两衍射缝之间明显的位相差, 进而使衍射光零级条纹偏离光轴。通过 CCD 传感器得到衍射光零级条纹偏离量, 最后计算出波长的变化量。实验表明, 在玻璃条长 100 mm 及双缝间距 3 mm 时, 激光波长变化 2 pm 可引起衍射光零级条纹位移约 2.6 μm , 对波长的分辨率达到 2 pm 以下。由于探测的是衍射光零级条纹位移, 与光强度无关, 这样就避免了光强变化带来的影响, 极大地提高了波长监测分辨率。

参 考 文 献

- 1 Ni Yi, Zhang Jie, Kong Xuan. Designing and testing of tunable DFB laser array using REC technology[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(5): 0502003.
倪屹, 张杰, 孔轩. 基于 REC 技术的可调谐 DFB 激光器阵列设计与测试[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0502003.
- 2 Su Weiyue, Wu Ruihuan. Research progress of multi-wavelength erbium-doped fiber lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(9): 090004.
苏伟跃, 吴锐欢. 多波长掺铒光纤激光器的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(9): 090004.
- 3 Fan Bo, Liu Yu, Gao Xiaohui, *et al.*. Analysis of regularity on Raman crosstalk cancellation via the wavelength conversion [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(6): 061901.
范博, 刘毓, 高晓辉, 等. 波长变换技术对拉曼串扰的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(6): 061901.
- 4 Ji Zhengji, Wu Xiangnong, Yin Ye, *et al.*. Sagnac loop cascaded filter based on highly birefringent photonic crystal fiber[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(4): 040603.
吉正继, 武向农, 殷业, 等. 基于高双折射光子晶体光纤的 Sagnac 环级联滤波[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(4): 040603.
- 5 Park Y, Lee S, Chae C. A novel wavelength stabilization scheme using a fiber grating for WDM transmission[J]. IEEE Photonics Technol Lett, 1998, 10(10): 1446-1448.
- 6 Zhan Yage, Cai Haiwen, Xiang Shiqing, *et al.*. Study on high resolution fiber Bragg grating temperature sensor[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(1): 83-86.
詹亚歌, 蔡海文, 向世清, 等. 高分辨率光纤光栅温度传感器的研究[J]. 中国激光, 2005, 32(1): 83-86.
- 7 Nasu H, Takagi T, Shinagawa T, *et al.*. A highly stable and reliable wavelength monitor integrated laser module design[J]. Journal of Lightwave Technology, 2004, 22(5): 1344-1351.
- 8 Xiao Pingping, Qi Min, Hu Hongwu. Wavelength sensing based on the Goos-Hanchen effect[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(10): 1595-1598.
肖平平, 戚珉, 胡红武. 基于古斯汉欣位移效应的波长传感研究[J]. 光子学报, 2011, 40(10): 1595-1598.
- 9 Yang C, Lee S, Wu J. Wavelength control of tunable dense wavelength-division multiplexing sources by use of a Fabry-Perot etalon and a semiconductor optoelectronic diode[J]. Appl Opt, 2004, 43(9): 1914-1921.
- 10 Feng Yaojun, Cao Zhuangqi, Chen Lin, *et al.*. New scheme for wavelength monitoring with 1 pm resolution[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(9): 4709-4712.
冯耀军, 曹庄琪, 陈麟, 等. 分辨率为 1 pm 的波长监测新方法[J]. 物理学报, 2006, 55(9): 4709-4712.

栏目编辑: 刘丰瑞