

分辨率为 1pm 的波长监测新方法^{*}

冯耀军 曹庄琪 陈 麟 沈启舜

(上海交通大学物理系,上海 200240)

(2006 年 1 月 5 日收到,2006 年 2 月 7 日收到修改稿)

在亚毫米尺度金属包覆波导研究基础上,提出了一种波长监测的新方法.实验采用自由空间耦合技术,激发了波导中对波长变化十分灵敏的超高阶导模,并以此为探针,实现了 1pm 波长漂移的监测.

关键词:波长监测,金属包覆波导,超高阶导模

PACC:4280L,0670D,4285F

1. 引 言

近年来,通信容量的需求不断增大,在密集波分复用(DWDM)系统中,随着信道数目的增多,信道间隔变小了.这样的通信系统,一方面需要波长可以选择的光源^[1],以配合 ITU-T 标准,满足多信道通信的需求;另一方面需要精密的波长锁定技术^[2-5],以防止各信道间的串扰.波长锁定的前提是波长漂移的监测.近年已报道了多种波长漂移监测方法^[2-5]. Kim 等人用温控法布里-珀罗标准具^[2]实现了 4pm 的波长锁定,法布里-珀罗标准具虽然具有易于集成、精度高等特点,但是这种方法常常需要较复杂的温控装置.光通过二极管激光器(LD)以后,功率比较集中,探测它的节电压^[3]可以使监控精度达到 10pm. Teshima 等人利用阵列波导光栅^[4](AWG)同时监测多个波长的光,精度高于 9pm. Park 等人用光纤光栅^[5]把波长漂移限制在 10pm 以下.

本文在亚毫米尺度的金属包覆波导中,采用自由空间耦合技术激发波导的超高阶导模^[6,7].超高阶导模具有对波长十分敏感的性质,因而可通过反射率的测量来监测波长的漂移.初步的实验表明,本文提出的方法可实现 1pm 的波长监测.

2. 原 理

亚毫米尺度的金属包覆波导如图 1 所示,它由

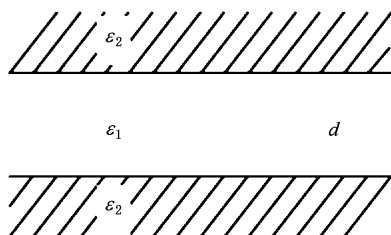


图 1 双面金属包覆波导

导波层、金属覆盖层和金属衬底组成.金属包覆波导满足的色散方程为^[7]

$$\kappa_1 d = m\pi + 2 \tan^{-1} \left(\rho \frac{\alpha_2}{\kappa_1} \right), \quad (1)$$

其中

$$\rho = \begin{cases} 1, & \text{TE 模,} \\ \epsilon_2/\epsilon_1, & \text{TM 模,} \end{cases} \quad (2a)$$

而

$$\kappa_1 = k_0(\epsilon_1 - N^2)^{1/2}, \quad (2b)$$

$$\alpha_2 = k_0(N^2 - \epsilon_2)^{1/2} \quad (2c)$$

分别是导波层中的横向传播常数和金属层中的衰减常数, N 是波导的有效折射率, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 是波长为 λ 的光在自由空间的波数.已知这种双面金属覆盖波导中导模的有效折射率满足^[6]

$$0 < N < \sqrt{\epsilon_1}. \quad (3)$$

当导波层的厚度为亚毫米尺度,折射率 $n_1 = \sqrt{\epsilon_1} \sim 1.5$ 且波长为微米量级时,对超高阶导模(N

^{*} 国家自然科学基金重点项目(批准号 60237010)资助的课题.

→0). 根据方程(2b),

$$\begin{aligned} \kappa_1 d &= \frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{\epsilon_1 - N^2} \\ &\cong \frac{2\pi n_1 d}{\lambda} \sim 1000, \end{aligned}$$

而方程(1)右边第二项的极大值为 π 模序数 m 一般大于 1000, 因此忽略方程(1)右边与偏振相关的第二项, 将不会引起很大的误差, 即方程(1)约化为

$$\kappa_1 d = m\pi. \quad (4)$$

由此可见, 超高阶模是偏振无关的. 利用(4)式可得

$$\frac{dN}{d\lambda} = \frac{N^2 - n_1^2}{N\lambda}, \quad (5)$$

上式表明, 超高阶模($N \rightarrow 0$)对波长的变化是极为灵敏的, 模序数越高, 则灵敏度越高.

3. 实 验

采用真空溅射法, 在 $570\mu\text{m}$ 的玻璃(k_9)上下表面分别镀一层金膜, 上层金膜的介电系数($\epsilon_2 = -20 + 1.5i$, $\lambda = 860\text{nm}$)和厚度($d = 35\text{nm}$)由双波长法测量. 下层金属的厚度大于 100nm , 因已经超过光的穿透深度, 可看作无限厚. 玻璃片的介电系数($\epsilon_1 = 2.25$, $\lambda = 860\text{nm}$)由传统的 m 线法确定.

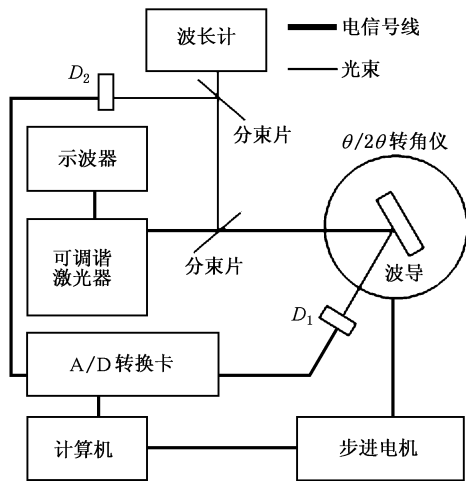


图2 实验装置示意图

如图2所示, 制备好的样品固定于一计算机控制的 $\theta/2\theta$ 仪的转台上. 可调谐激光器(DL100, 德国TOPICA PHOTONICS公司)输出的红外光经分束片分为两束, 其中一束经过双面金属包覆波导反射后, 被探测器 D_1 接收. 另外一束光再分成两束, 分别被波长计和探测器 D_2 接收. 若波长只有微小的变化,

两块分束片的分光比近似恒定, 参考光(D_2 探测的光)和入射光的光强保持恒定的比率, 反射光和参考光的光强比与此比率相乘, 即为波导表面的反射率. 探测器 D_1 和 D_2 接收到的信号经A/D转换输入计算机处理. 实验时, 入射角随着 $\theta/2\theta$ 仪的转动而改变. 当入射角满足共振条件时, 入射光能量耦合进波导, 这时反射率随入射角变化的曲线将出现一系列表征导模存在的反射吸收峰, 这种曲线也被称为衰减全反射(ATR)谱. ATR谱是入射光波长的灵敏函数, 即入射光波长变化时, 各反射吸收峰的位置将产生移动, 即导模的有效折射率 N 变化. 由图3可见, 反射吸收峰的上升沿和下降沿具有线性好的特性. 因而在实验中可取工作点于下降沿线性部分的中点附近, 当入射光波长变化引起吸收峰的微小移动时, 将产生反射率的明显变化.

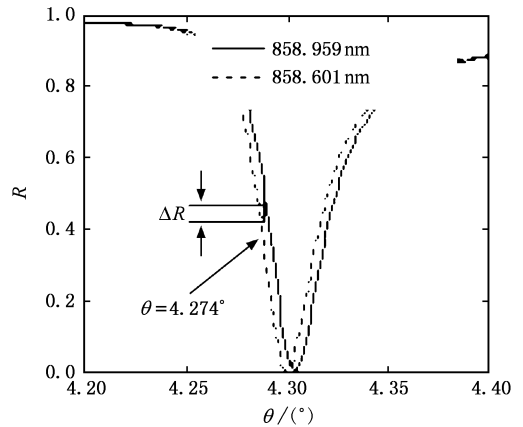


图3 波长探测方法示意图

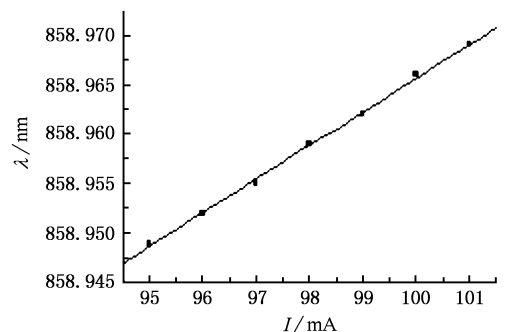


图4 波长与工作电流的关系

实验时, 调节激光器的波长至 858.960nm , 使 $\theta/2\theta$ 仪从零入射角开始扫描, 在 4.274° 停止, 该处对应一超高阶模反射吸收峰下降沿的中点, 继续探测

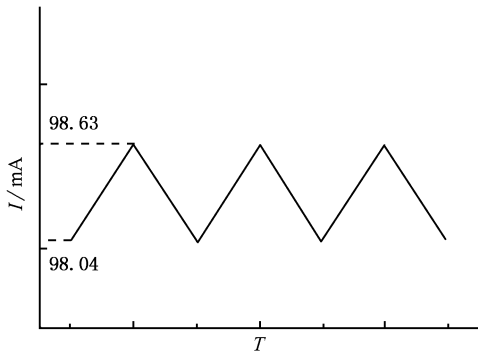


图 5 工作电流的调制

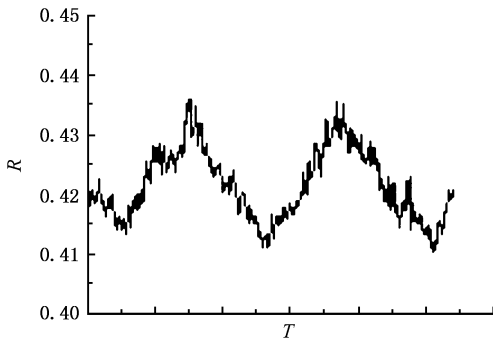


图 6 反射率的测量结果

反射光和参考光.在此波长附近,激光器的输出波长与工作电流呈良好的线性关系(图 4).给激光器的工作电流加上一个微弱的三角波信号(图 5),使输出的波长产生振幅为 1pm 的调制.探测到的数据显示,反射率随时间以 0.012 的幅度呈三角波振荡(图 6).这表明该实验装置可以实现 1pm 波长变化的监测.

上述分析表明,这种波长监测方法的灵敏度主要受制于以下几个因素:首先应选择有效折射率尽可能小的超高阶导模;其次是尽量减小入射光的发散度,使被选择作为探针的反射吸收峰的半宽度(FWHM)尽可能小;另外,波导片加工的平行度、平整度以及镀膜的质量等都有重要影响.

4. 结 论

基于衰减全反射技术,我们提出了一种新的波长漂移监测方法,并从实验上证实了它的可行性.本方案检测波长漂移的探针是双面金属包覆波导中的超高阶导模.初步的实验结果表明,探测精度不低于 1pm.

- [1] Zhang X L , Zhang Y , Sun J Q , Liu D M , Huang D X 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2159 (in Chinese) [张新亮、张颖、孙军强、刘德明、黄德修 2003 物理学报 **52** 2159]
- [2] Kim J , Choi B S , Yun H , Oh S H , Lee J , Ko H , Choi K , Park S , Moon J T , Park M 2004 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **16** 2430
- [3] Lee S , Hsu Y , Pien C 2001 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **13** 872
- [4] Teshima M , Koga M , Sato K 1996 *J. Lightwave Technol.* **14** 2277

- [5] Park Y , Lee S , Chae C 1998 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **10** 1446
- [6] Li H G , Cao Z Q , Lu H F , Shen Q S 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 2757
- [7] Lu H F , Cao Z Q , Li H G , Shen Q S 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 4579



New scheme for wavelength monitoring with 1pm resolution^{*}

Feng Yao-Jun Cao Zhuang-Qi Chen Lin Shen Qi-Shun

(*Department of Physics , Shanghai Jiaotong University , Shanghai 200240 , China*)

(Received 5 January 2006 ; revised manuscript received 7 February 2006)

Abstract

Based on the study of the metal-cladding waveguide on submillimeter scale , a new scheme for wavelength monitoring is proposed in this paper . The free space coupling technique is utilized to excite the ultrahigh-order mode to act as a probe , which is considered to be very sensitive to the wavelength change . It is experimentally demonstrated that a wavelength drift of 1pm is monitored .

Keywords : wavelength monitoring , metal-cladding waveguide , ultrahigh-order mode

PACC : 4280L , 0670D , 4285F

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No.60237010).