

基于古斯-汉欣位移的双通道窄带滤波器^{*}

陈凡¹⁾²⁾ 郝军²⁾ 李红根²⁾ 曹庄琪^{2)†}

1) (菲尼萨光电通讯有限公司, 上海 201201)

2) (上海交通大学物理系, 区域光纤通信网和新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240)

(2010年7月20日收到; 2010年8月30日收到修改稿)

本文利用光束在对称金属包覆波导表面反射得到的异常大的古斯-汉欣 (Goos-Hänchen) 位移, 通过实验实现了双通道窄带滤波. 当入射激光波长为 859.60 nm 时, 两通道滤波的峰值位置分别为 859.604 nm 和 859.688 nm, 峰值半宽 (FWHM) 为 0.036 nm, 而消光比达到 15.3 dB. 峰值波长可通过改变入射角或小孔位置实现调谐.

关键词: 古斯-汉欣 (Goos-Hänchen) 位移, 光波导, 双通道, 滤波器

PACS: 42.82.-m, 42.79.Gn, 84.30.Vn

1. 引言

光学滤波器是最重要最常用的光学元器件之一, 在激光技术、光调制、光通信、精密测量和光传感技术等多个领域具有广泛的应用价值. 常用的光学滤波器利用的效应有薄膜干涉^[1,2]、F-P 腔共振^[3]、M-Z 干涉^[4]、导模共振^[5]和光子晶体^[6]等. 为实现超窄带滤波, 上世纪 70 年代后还发展了原子共振滤光片 (ARF)^[7,8], 90 年代又发展了法拉第反常色散滤波器 (FADOF)^[9,10]. 近年来, 国内还发展了波导耦合光栅^[11]和生物薄膜滤波技术^[12]. 这些滤波技术各有其优点与缺陷, 例如利用多层薄膜干涉效应滤波器效率高、适用性广, 但缺点是带宽太大, 要实现波分复用技术要求的亚纳米量级的带宽, 必须制备一百多层且厚度精度严格控制的薄膜, 技术上是十分困难的. F-P 腔共振、M-Z 干涉和光子晶体反常色散等技术往往需要引入复杂的光学系统和昂贵的装置. ARF 和 FADOF 滤波技术虽然有窄带宽的优点, 但存在效率低、响应时间长或可调谐范围小等弱点, 难以实现广泛的应用.

本文提出一种利用对称金属包覆波导 (SMCW) 表面的古斯-汉欣 (GH) 位移效应实现窄带滤波的机理, 并通过实验实现了带宽为 0.036 nm、消光比为 15.3 dB 的滤波. 该方法具有结构简单、制备方便和

可调谐等优点. 预计在光谱精密测量、医学诊断、化学分析和光传感领域具有潜在的应用前景.

2. 滤波原理

当一束光入射到界面, 经典光学认为入射和反射在同一点发生, 只不过产生一个相移. 但实际上却不然, 古斯和汉欣在 1947 年做了一个实验, 证明反射点离入射点有一段距离, 这就是所谓的古斯-汉欣 (GH) 位移. 这是由于入射光中不同的单色平面波分量具有不同的反射相移所造成的.

在一般单层界面的情况下, GH 位移通常只是入射光波长的量级, 很难在实验中被观察到. 在过去的 20 年中, 各种装置被用来增强古斯-汉欣效应, 比如非对称双棱镜结构^[13], 半无限大弱吸收介质中的布儒斯特角处的反射^[14]、光子晶体中的缺陷模式角^[15]和激发表面等离子共振的 Kretschmann 结构等^[16]. 据我们所知, 目前最大的由实验得到的 GH 位移为波长的 50 倍左右^[16].

我们提出了一种图 1 所示的 (SMCW) 结构, 这种波导的导波层的厚度可达毫米量级, 加上双面金属包覆, 使得这种波导可容纳成千上万个导模. 重要的是其中的超高阶导模具有有效折射率 $N \rightarrow 0$ 的特性. 当上层金属膜的厚度为几十纳米时, 这种特性使得光可直接从自由空间耦合进波导^[17]. 另外,

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 60677029 和 10874121) 资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: zqcao@sjtu.edu.cn

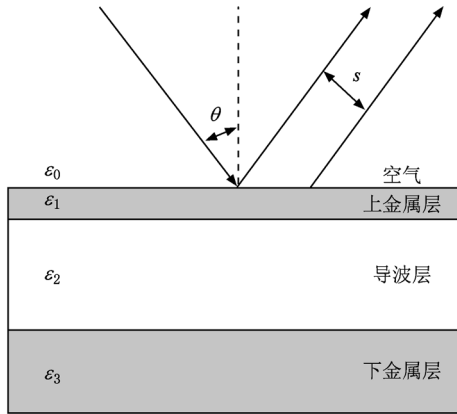
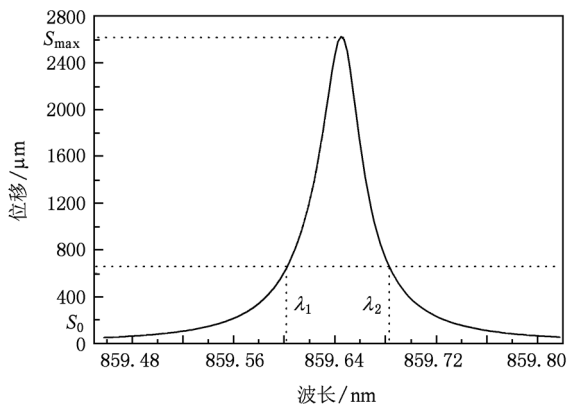


图1 对称金属包覆波导和自由空间耦合技术

我们最近的工作^[18-21]表明:光的穿透深度越大, GH 位移则越大. 因此, 通过这种自由空间耦合技术和毫米量级的 SMCW, 使光耦合进波导并到达下层金属膜, 有效地增强了光的穿透深度, 从而极大地增强了上层金属膜表面的 GH 位移.

在波导参数确定情况下, 根据稳相原理^[17]得到的 GH 位移(S)与波长(λ)的关系如图 2 所示, 由图可见, 由于超高阶导模强色散特性, GH 位移随光波长变化峰值显示极窄的带宽. 如果在反射光的 0 位移(S_0)和最大位移($S_{\max}$)之间放置一小孔, 而光电探测器置于小孔后, 则由图 2 可见, 随着波长的由小变大, 将有两个波长(λ_1 和 λ_2)的光分别通过小孔, 从而实现双通道窄带滤波.


 图2 由稳相原理得到的 GH 位移与波长($S-\lambda$)的关系曲线

3. 实验研究和理论模拟

实验中使用的 SMCW 结构是一块两面由银膜包覆的 K9 玻璃片, 玻璃片的厚度为 3.04 mm. 由蒸

发镀制的上下两层银膜的厚度分别为 33 nm 和 300 nm, 银膜的介电常数为 $\epsilon_2 = -34 + i1.17$ ($\lambda = 860$ nm). 上层银膜的厚度和介电系数由双波长法测量^[22]. 当一束 TE 偏振的从可调半导体激光器 (DL100, Topical Photonic; 输出波长 0.860 μm 附近) 输出的激光入射到置于程控 $\theta/2\theta$ 转台上的样品前, 首先通过两个直径为 2 mm, 相距 0.5 m 的小孔以限制光束的发散, 两小孔中间的分束镜被用来反射部分入射光进入波长计, 反射光束的强度由光电二极管 (PD) 测定. 启动转台电机进行角谱扫描, 就可得到如图 4 所示的衰减全反射谱. 图中每个吸收峰代表一个导模, 当入射角很小时, 激发的都是超高阶导模. 峰值处即是匹配角的位置, 此处入射光的能量有效地转化为导模的能量. 当入射角确定时, 改变入射光的波长, 也可得到与图 4 相似的衰减全反射谱.

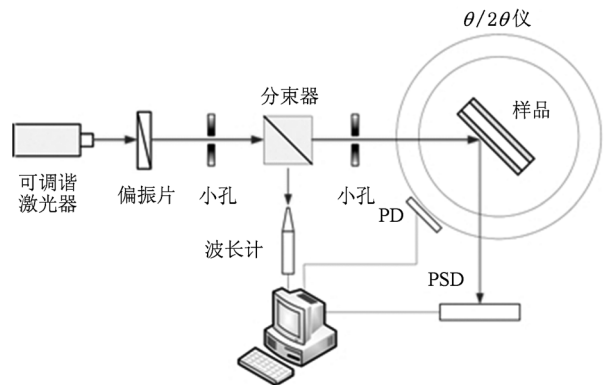


图3 测量 GH 位移的实验装置

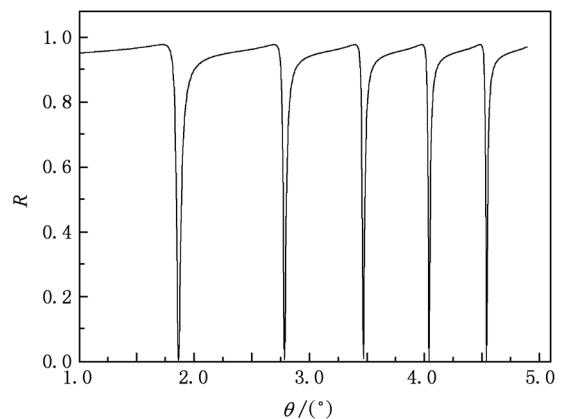


图4 衰减全反射谱

由于 GH 位移的大小极大地依赖于入射光与导模的能量耦合程度^[23], 因此, 当入射角选择在某个

峰的边缘,即反射率最大处,此时 GH 位移极小,可作为 GH 位移的零点. 保留其他条件不变,在 PD 位置换上了位置敏感探测器 (PSD) (PSD118, $L = 8 \text{ mm}$). 然后连续改变激光波长,即连续改变入射光与导模的能量耦合程度,耦合最强时, GH 位移也达到最大. 实验中,在工作波长仅改变 14 pm 的情况下,得到了巨大的 1.5 mm 的 GH 位移,该位移超过了 1700 倍入射激光束的波长.

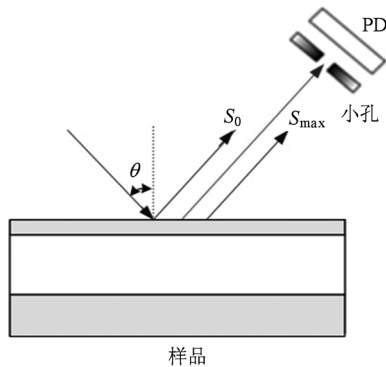


图 5 实现双通道滤波的小孔位置

在此基础上,采用图 5 所示的安排,在 S_0 和 $S_{\max}$ 之间放置一直径为 0.6 mm 的小孔,而光电探测器 PD 置于小孔后. 调节激光波长使 GH 位移处于 S_0 点(即某个峰的边缘,反射率最大处),然后调节激光波长,随着波长的增大,反射光束逐渐向右移动并通过小孔,照射到 PD 上. 继续增大激光波长,反射光束离开小孔逐渐到达 $S_{\max}$ 处. 进一步增大激光波长,这时反射光束向左移动并再一次经历通过小孔、离开小孔的过程. 光电探测器 PD 上测到的电压信号(光强)随波长的变化如图 6 所示. 两个峰的 FWHM 均为 0.036 nm . 根据通过小孔的最大光强和最小光强之比可知消光比达到 15.3 dB .

根据上述实验方法,若移动小孔,但仍保持在图 5 所示的 S_0 和 $S_{\max}$ 之间,则滤波的峰值波长会有微小的变化. 但若改变入射方向,使光线其从一个导模的匹配角改变为另一个导模的匹配角,则滤波峰的波长将可进行大的调谐.

为进行比较,我们利用稳相原理、并考虑了高斯光束发散角的实际情况,作了理论模拟. 模拟所用的关键参数:1)波导上层金属膜厚度为 33 nm ;2)可调谐激光器发射的高斯光束的束腰宽度半径 $w_0 = 800 \text{ }\mu\text{m}$,所得结果如图 7 所示. 模拟所得两个滤波峰的 FWHM 均为 0.023 nm ,而消光比约为 17 dB . 实验结果与理论模拟基本符合,两者差别估计主要

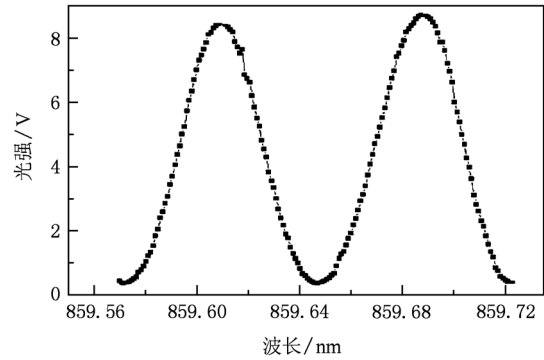


图 6 透过小孔的光强随波长的变化

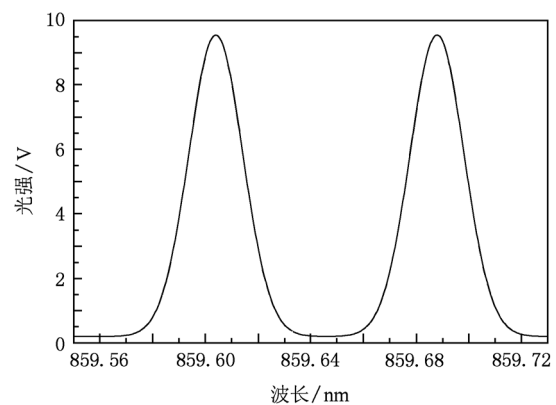


图 7 双通道滤波的数值模拟(上层金属膜厚度为 33 nm , 高斯光束的束腰宽度半径 $w_0 = 800 \text{ }\mu\text{m}$)

由小孔衍射引起的杂散光造成.

这种滤波方法结构简单,不涉及周期性多层薄膜或光子晶体要求的复杂制备工艺,带宽虽然难以达到原子共振滤光片和法拉第反常色散滤波器的水平,但已远远超过亚纳米量级,是常用光学滤波器无法比拟的. 因此,这是一种具有潜在应用价值的滤波方法.

4. 结 论

本文提出一种利用对称金属包覆波导(SMCW)表面上异常大的古斯-汉欣(GH)位移实现窄带滤波的机理. 通过实验实现了滤波带宽仅为 0.036 nm 、而消光比为 15.3 dB 的结果. 通过改变小孔的位置和入射光的角度,可实现峰值波长的调谐. 该方法具有结构简单、制备方便和可调谐等优点. 在光谱精密测量、医学诊断、化学分析和光传感领域具有潜在的应用前景.

- [1] Macleod H A 1969 *Thin-Film Optical Filters* (London: Adam Hilger Ltd.) p154
- [2] Darvish G, Moravvej-Farshi M K, Zarifkar A, Saghati K 2008 *Appl. Opt.* **47** 5140
- [3] Golmohammadi S, Moravvej-Farshi M K, Rostami A, Zarifkar A 2007 *Opt. Express* **15** 10520
- [4] Bilodeau F, Johnson D C, Theriault S, Malo B, Albert J, Hill K O 1995 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **7** 388
- [5] Ma J Y, Liu S J, Wei C Y, Xu C, Jin Y X, Zhao Y A, Shao J D, Fan Z X 2008 *Acta. Phys. Sin.* **57** 4195 (in Chinese) [麻健勇、刘世杰、魏朝阳、许程、晋云霞、赵元安、邵建达、范正修 2008 物理学报 **57** 4195]
- [6] Fan S, Villeneuve P R, Joannopoulos J D 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 3294
- [7] Wang Q, Jia X L, Zhang Y D, Ma Z G 2003 *Acta. Phys. Sin.* **52** 1151 (in Chinese) [王 骐、贾晓玲、掌蕴东、马祖光 2003 物理学报 **52** 1151]
- [8] Jia X, Wan G, Wang Z 2009 *J. Mod. Opt.* **56** 980
- [9] Yin, Shay T M 1991 *Opt. Lett.* **16** 1617
- [10] Liu J T, Zhou Y S, Wang F H, Gu B Y 2004 *Acta. Phys. Sin.* **53** 3336 (in Chinese) [刘江涛、周云松、王福合、顾本源 2004 物理学报 **53** 3336]
- [11] Song J Y, Feng S F, Zhang X P, Liu H M, Song Y R 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6542 (in Chinese) [宋娇阳、冯胜飞、张新平、刘红梅、宋晏蓉 2009 物理学报 **58** 6592]
- [12] Chen G Y, Yuan Y Z, Liang X, Xu Tang, Zhang C P, Song Q W 2007 *Chin. Phys.* **15** 2007
- [13] Li C F, Wang Q 2004 *Phys. Rev. E* **69** 055601
- [14] Lai H M, Chan S W 2002 *Opt. Lett.* **27** 680
- [15] Wang L G, Chen H, Zhu S Y 2006 *Opt. Lett.* **31** 101
- [16] Yin X B, Hesselink L, Liu Z W, Fang N, Zhang X 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 372
- [17] Li H G, Cao Z Q, Lu H F, Shen Q S 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 2757
- [18] Hao J, Li H G, Yin C, Cao Z Q 2010 *J. Opt. Soc. Am. B* **27** 1305
- [19] Chen L, Cao Z Q, Ou F, Li H G, Shen Q S, Qiao H C 2007 *Opt. Lett.* **32** 1432
- [20] Wang Y, Li H G, Cao Z Q, Yu T Y, Shen Q S, He Y 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 061117
- [21] Yu T Y, Li H G, Cao Z Q, Wang Y, Shen Q S, He Y 2008 *Opt. Lett.* **33** 1001
- [22] Chen W P, Chen J M, 1981 *J. Opt. Soc. Am.* **71** 189
- [23] Liu X B, Cao Z Q, Zhu P F, Shen Q S, Liu X M 2006 *Phys. Rev. E* **73** 056617

Double-channel narrowband filter based on Goos-Hänchen shift^{*}

Chen Fan¹⁾²⁾ Hao Jun²⁾ Li Hong-Gen²⁾ Cao Zhuang-Qi^{2)†}

1) (Finisar Shanghai Incorporation, Shanghai 201201, China)

2) (Department of Physics, the State Key Laboratory on Fiber Optic Local Area Communication Networks and Advanced Optical Communication Systems, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

(Received 20 July 2010; revised manuscript received 30 August 2010)

Abstract

We propose a double-channel narrowband filter based on anomalous large Goos-Hänchen shift reflected from a symmetrical metal-cladding optical waveguide. We demonstrate that two filtering peaks are 859.604nm and 859.688nm respectively. The 3 dB bandwidth is found to be 0.036 nm with an extinction ratio of 15.3dB at a light wavelength of 859.60nm. The filtering peaks can be tuned by choosing an appropriate incident angle and a aperture position.

Keywords: Goos-Hänchen shift, optical waveguide, double-channel, filter

PACS: 42.82.-m, 42.79.Gn, 84.30.Vn

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60677029 and 10874121).

[†] Corresponding author. E-mail: zqcao@sjtu.edu.cn