

文章编号: 1002-2082(2004)05-0043-04

关于镀有LB膜长周期光纤光栅的 谐振波长的研究

叶梅, 冯仙群, 叶虎年

(华中科技大学 机械学院仪器系, 湖北 武汉 430074)

摘要: 理论上详细分析了长周期光纤光栅谐振波长随外界环境折射率变化而变化的光谱特性, 分析结果可较好地解释镀有LB膜(Langmuir-Blodgett thin-film)的长周期光纤光栅的谐振波长与膜厚之间的关系。分析研究表明, 通过减小纤芯直径和改变芯与包层折射率差等方法可调整光纤光栅的谐振波长, 使其从一般光纤光栅谐振波长所处的近红外区转到可见光区, 以利于光纤光栅配套仪器系统的调试并使系统成本降低, 从而为长周期光纤光栅传感技术的发展和應用奠定基础。

关键词: 长周期光纤光栅; LB膜; 谐振波长

中图分类号: TN253-34

文献标识码: A

The Study of the Resonant Wavelengths of Long-period Fiber Grating with Langmuir-Blodgett Thin-film Overlay

YE Mei, FENG Xian-qun, YE Hu-nian,

(School of Mechanical Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: This paper theoretically analyzes spectral characteristics of the resonant wavelength of long-period fiber gratings varying with the change of the ambient refractive index in detail. The analytical results agree with the relationship between the thickness of the film and the resonant wavelength of long-period fiber grating with Langmuir-Blodgett thin-film overlay well.

Keywords: long-period fiber grating; LB thin-film; resonant wavelength

引言

长周期光纤光栅(简称LPG)是一种光纤芯区折射率受永久性和周期性调制的透射型光纤器件。作为一种新的无源光纤器件, 它的制作工艺简单, 基本没有后向反射以及插入损耗小的优点使得它越来越受到人们的关注, 发展不过短短几年, 就显现出极为广阔的应用前景。由于它的谐振波长随温度、弯曲应力和环境折射率等多种因素的影响而发生改变, 所以人们用它作为传感器来探测各种量, 如温度、应力、化学浓度、位移和加速度等等。本文在镀有LB膜(Langmuir-Blodgett thin-film)的长周期光纤光栅的实验基础之上, 从理论上分析了环

境折射率对LPG谐振波长的影响, 这将对今后发展LPG生物化学传感器具有重要的指导意义。

1 实验依据

Nicholas D. Rees 等人^[1]选用折射率高于包层折射率的二十三烯酸($\text{CH}_2=\text{CH}(\text{CH}_2)_{20}\text{COOH}$)作为成膜材料, 用LB膜技术将该物质逐层镀到LPG表面。然后对其进行光谱分析, 最终获得谐振波长随膜厚度变化的关系曲线(如图1所示)。由图可以看出, 随着膜厚的增加, 谐振波长发生蓝移, 在245 nm处达到极大值4.6 nm, 此时再增大膜厚, 谐振波长蓝移消失。若继续增加膜厚, 谐振波长在

收稿日期: 2003-07-02; 修回日期: 2003-09-18

基金项目: 华中科技大学交叉基金(A100J01)及国家自然科学基金(10176010, 30170276)资助。

作者简介: 叶梅(1965-), 女, 浙江人, 在读硕士研究生, 主要从事测试技术及仪器的研究工作。

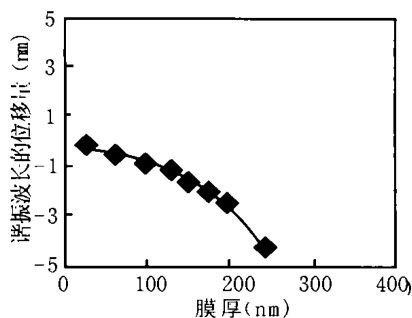


图1 LPG 谐振波长与膜厚的关系

Fig. 1 The relationship between the LPG resonant wavelength and the film thickness

大于初始值(未镀膜之前)的位置重新出现。该实验结果大大拓宽了在LPG表面镀膜的材料研究范围,它的本质在于通过改变镀于LPG表面的LB膜的厚度来改变环境折射率。因此,分析LPG对环境折射率的敏感机理是很有必要的。

2 理论分析

很多文献已对LPG的谐振波长与外部环境折射率关系作了描述^[2](见图2)。LPG谐振波长随外部环境折射率变化而变化的机理推导如下:

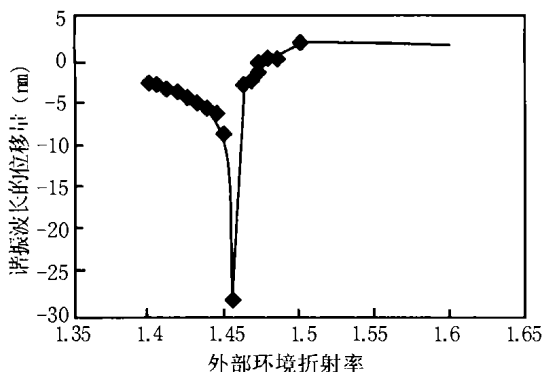


图2 LPG 谐振波长与外部环境折射率的关系

Fig. 2 The relationship between the resonant wavelength and the ambient refractive index

由相位匹配条件知,LPG的谐振波长 λ_p 与纤芯基模有效折射率 n_{co}^{co} 、 p 阶包层模式有效折射率 n_p^{cl} 和光栅周期 Λ 的关系为

$$\lambda_p = (n_{co}^{co} - n_p^{cl}) \cdot \Lambda \quad (1)$$

式中, $p=1,2,3,4,\dots$ 。波长满足相位匹配条件的光进入光纤包层中传播时,发生损耗,在透射谱上的谐振波长处出现了大小不一的损耗峰。

对于单模阶跃型光纤,纤芯中基模的模式方程^[2]为

$$\begin{aligned} & (4\pi\alpha/\lambda_p)[n_{co}^{co} - (n_{eff}^{co})^2]^{1/2} - \pi/2 \\ & = 2\arccos\left[\frac{n_{co}^{co} - (n_{eff}^{co})^2}{n_{co}^{co} - n_{cl}^{cl}}\right]^{1/2} \end{aligned} \quad (2)$$

对光纤进行弱波导近似,得到的 LP_{0p} 包层模式方程:

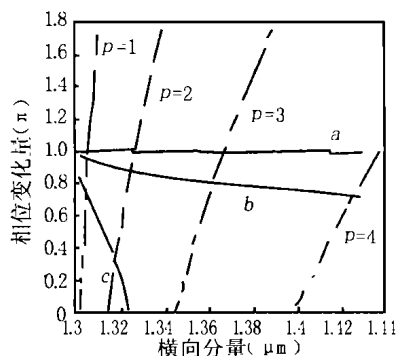
$$\begin{aligned} & (4\pi/\lambda_p)\rho[n_{cl}^{cl} - (n_p^{cl})^2]^{1/2} - (p-3/4)\times 2\pi \\ & = 2\arccos\left[\frac{n_{cl}^{cl} - (n_p^{cl})^2}{n_{cl}^{cl} - n_{am}^2}\right]^{1/2} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, α 和 ρ 分别为纤芯和包层的半径; n_{co} 和 n_{cl} 分别为纤芯和包层材料折射率; n_{am} 为外部环境折射率。当 $n_{am} > n_p^{cl}$ 时,(3)式右边为常数 π 。若LPG的各个参数已知,由(1)式和(2)式可求得用波长表示的 n_p^{cl} ;再将其代入(3)式,即可得到由 n_{am} 表示的谐振波长 λ_p 。(3)式左边的物理意义表示模数为 2π 的光束通过光纤包层时相位改变的横向分量,右边表示由于包层与外部环境边界处发生全反射引起的相位变化。当波长 λ 取适当值使得方程两边相等时,该处即为发生波长衰减的位置。由(1)式和(3)式可知,满足(4)式时(3)式的右边值为零。

$$\lambda_c = (n_{co}^{co} - n_{am})\Lambda \quad (4)$$

(4)式为传输角变为全反射角的临界波长。由此式可知,当 n_{am} 增大时,临界波长减小,则小于临界波长的谐振波长也减小,即谐振波长向短波方向移动,发生蓝移。

由以上方程组难以求得以 n_{am} 为参数的 λ_p 解析表达式,因此采用图解法(见图3)来求解 λ_p 与 n_{am} 的关系。下面是用此法对LPG谐振波长进行的数值计算,计算参数为 $\alpha=4.5\text{ }\mu\text{m}$, $\rho=62.5\text{ }\mu\text{m}$, $n_{co}=1.4681$, $\Delta=0.36\%$, $\Lambda=400$,则 $n_{cl}=1.4628$ 。



(* a,b,c 分别为外部环境折射率 1.01,1.46,1.462 的相位变化情况)

图3 横向分量与相位变化关系曲线

Fig. 3 The transverse component and versus variation
将(3)式两边分别看作是 λ 的一元函数,

所得曲线分别用虚线和实线表示,虚线与实线交点对应的值即为LPG的谐振波长,求得值列于表1中。

表1 谐振波长与阶次及外部环境折射率的对应值

Table 1 The corresponding value of the resonant wavelength depending on the order and the ambient refractive index

$n_{am} \backslash p$	1	2	3	4
1.000	1.305 0	1.326 1	1.366 8	
1.460 0	1.304 5	1.324 5	1.361 8	1.425 7
1.462 7	1.304 1	1.317 0		

从表1可以看出,临界波长由大到小逐渐向某一阶次模的最小谐振波长接近时,谐振波长的位移量达到极大值; $p=2$ 时,谐振波长最大位移量为9 nm;当 n_{am} 增大至包层折射率时,包层模式处于无穷边界状态,原来的包层模式变为辐射模,与纤芯不发生耦合作用,损耗峰消失。当 n_{am} 大于包层折射率时,谐振波长的值由虚线和 $y=\pi$ 的交点决定,即谐振重新出现在波长略大于空气时的位置。此时谐振波长不再依赖于外部环境折射率,但是损耗峰值会随着 n_{am} 的增大而加大。因为随着外部环境折射率的增大,漏模更多地被限制在包层内,使得耦合作用增强,从而衰减幅值增大。

膜厚与外部环境折射率的数学模型还尚未建立,但是我们可以通过简单的分析来理解它们之间的关系。对于膜厚小于250 nm的情况,在LB膜和空气共同作用下,外部环境平均折射率随膜厚的增加而增加,从而使谐振波长发生蓝移,膜厚增大相当于平均外部环境折射率等于包层折射率的情况。当膜厚继续增大时它的波导结构比较复杂,此时开始出现漏模,光纤处于反波导结构状态^[3]。

如果能够把长周期光纤光栅应用于可见光区域,则对于长周期光纤光栅传感技术走向实用化将会有很大的促进作用。使用更普通的可见光源和光电探测器,不仅调试方便而且简化了系统结构并降低了成本。下面介绍两种调整谐振波长的方法。

2.1 减小光纤纤芯直径

通过减小光纤纤芯的直径可使谐振波长进入可见光区。以表2的参数计算得到的光纤光栅的透射谱如图4所示。谐振波长分别为519.6 nm, 587.2 nm, 699 nm和857.6 nm,衰减量分别为1.75 dB, 5 dB, 6.4 dB和6.16 dB。

表2 长周期光纤光栅的参数值

Table 2 Parameter values of Long-period fiber gratings

纤芯直径	包层直径	纤芯折射率	包层折射率
3.6 μm	125 μm	1.46	1.45
光栅周期	折射率调制	长度	
400 μm	0.0002	20 mm	

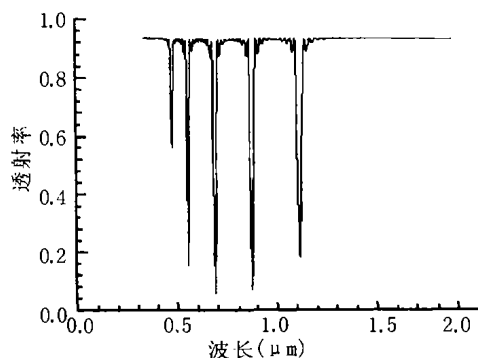


图4 纤芯直径为3.6 μm 的长周期光纤光栅透射谱

Fig. 4 Transmission spectrum of long-period fiber gratings with core diameter at 3.6 μm

2.2 改变纤芯和包层材料的折射率

减小纤芯和包层折射率差,同样可以使谐振波长向短波方向移动(结果见表3)。

表3 长周期光纤光栅的参数值

Table 3 Parameter values of long-period fiber gratings

纤芯直径	包层直径	纤芯折射率	包层折射率
8.3 μm	125 μm	1.454	1.45
光栅周期	折射率调制	长度	
400 μm	0.0002	20 mm	

由表3所列的参数值计算得到的透射谱如图5所示。这种方法比减小纤芯直径更有效,但是如果纤芯与包层的折射率差太小,谐振波长处的边峰效应比较剧烈,不利于信号的检测。上面两种方法实质上是改变纤芯和包层的有效折射率差来改

变谐振波长的。

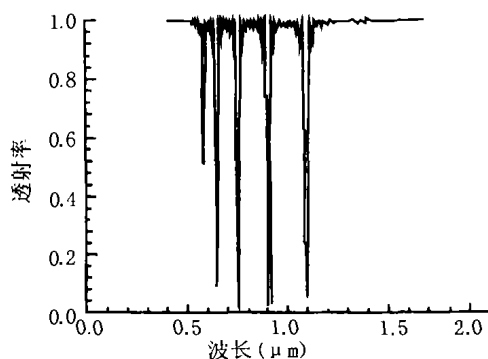


图5 纤芯折射率为1.454的长周期光纤光栅透射谱

Fig. 5 Transmission spectrum of long-period gratings with core refractive index at 1.45 μm

3 结论

理论上分析了镀有LB膜的长周期光纤光栅的谐振波长特性,这对制作长周期光纤光栅生化传感器有很重要的意义。目前LPG化学传感器所能检测的仅限于折射率低于包层折射率的物质,用LB膜的方法大大拓宽了检测范围。随着LB膜技术的

不断成熟,人们已经发现生物蛋白和酶等化合物也可以形成单分子膜,这给LPG作为免疫传感器提供了极大的方便。利用膜厚达到一定时谐振波长发生突变的特性,可以制作出高灵敏度的长周期光纤光栅传感器。

参考文献:

- [1] Nicholas D Ress, Stephen W James, Ralph PT. Optical fiber long-period gratings with langmuir-Blodgett thin-film overlays[J]. Opt Lett, 2002, 27(9):686—688.
- [2] B H Lee, Y Liu, S B Lee, S S Choi, J N Jang. Displacements of the resonant peaks of a long-period fiber grating induced by a change of ambient refractive index [J]. Opt Lett, 1997, 22(23):1769—1771.
- [3] H J Patrick, A D Kersey, F Bucholtz. Analysis of the response of long period fiber gratings to external Index of refraction[J]. J Lightwave Technol, 1998, (16):1606—1612.

(上接第32页)

(1) 由于三代微光像增强器使用的是负电子亲合势阴极,原子级洁净表面是制备阴极的重要先决条件,制管设备工作的真空度必须优于 2×10^{-8} Pa,抽气系统必须由全无油机组组成。

(2) 为了分清台外台内工艺对阴极发射性能的影响,首先运用 P^+ 衬底对激活工艺进行大量试验。在确定激活工艺稳定的基础上,改用阴极组件,分清激活工艺和阴极质量间的影响。阴极组件发射层表面出现氧化、白雾和大量针孔是造成阴极灵敏度低的主要原因。阴极组件制作过程中出现污染,会造成阴极激活灵敏度不高和阴极发射不稳定。因此,确保制备无污染的优质GaAs阴极组件是制作高性能三代管的关键,激活技术是实现阴极具有强电子发射和高阴极灵敏度的核心工艺。激活真空度不高,真空残气会对GaAs表面和铯-氧原子晶格表面造成污染,从而很难获得高阴极灵敏度。

阴极组件热清洗不彻底以及GaAs表面清洁度达不到原子级,铯层生长困难,易使铯原子丢失,从而无法制成高灵敏度阴极。另外,必须对铯-氧源材料进行长时间除气,直到 O_2 , H_2O , CO 和 CO_2 分压低于 10^{-10} Pa,才能保证铯-氧除气干净。总之,通过对台内和内外工艺质量分析,分清了制管工艺对阴极发射性能的影响,加强了质量检测,有利于加快三代微光像增强器的研制。

参考文献:

- [1] A H sommer. Photomissive Materials[M]. New York: Wiley, 1968.
- [2] 徐江涛. 质谱分析与检漏技术在成像器件研究中的应用[J]. 真空科学与技术, 2002, 22(增刊): 64—66.
- [3] 李晓峰,等. 透射式GaAs光电阴极AlGaAs/GaAs外延层内应力的种类及其表征与测量[J]. 光子学报, 2002, 31(1): 87—91.