

一种提高长周期光纤光栅生物包膜传感器性能的方法

陈建军¹, 木拉提·哈密提¹, 胡彦婷¹, 孙 静¹, 孔德伟², 艾克热木·阿西木¹

1. 新疆医科大学医学工程技术学院, 乌鲁木齐 830011
2. 新疆医科大学第一附属医院, 乌鲁木齐 830054

摘要 基于耦合模理论和阶跃折射率单模光纤三层模型包层模理论, 可在长周期光纤光栅(LPG)光纤包层外涂制特定的抗体作为生物活性膜层, 并通过生物活性膜层折射率的变化来检验血液中是否存在对应的抗原。研究结果表明, 当在 LPG 内部引入啁啾后, 可提高 LPG 传感器的谐振波长偏移的灵敏度, 但透射光强峰值会有相应的下降; 随着啁啾参数的增加, 透射光强峰值变化不大, 谐振波长偏移随折射率的变化更为敏感。但当啁啾参数达到一定的量值时, 这种偏移量相对较小。实验选用折射率同抗原、抗体接近的硅化膜作为成膜基底材料, 基底膜层厚度可选择在约 120nm, 此时的波长位移线性度好, 有利于实验中的测定。

关键词 长周期光纤光栅; 生物膜层传感器; 啁啾; 谐振波长

中图分类号 Q811, TN253

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)01-0051-04

An Approach to Improve the Performance of Long Period Fiber Grating Bio-layer Sensor

CHEN Jianjun¹, HAMIT Murat¹, HU Yanting¹, SUN Jing¹, KONG Dewei², AXIMU Aikerem¹

1. College of Medical Engineering, Xinjiang Medical University, Urumqi 830011, China
2. The First Affiliated Hospital, Xinjiang Medical University, Urumqi 830054, China

Abstract According to the Coupling Mode Theory (CMT) and the simplified three-layered model of the step-index single mode optical fiber, the variation of the bioactive layer refractive index may be used to detect whether the corresponding antigen is in blood by coating an idiosyncratic bioactive layer on the cladding of Long Period fiber Gratings (LPG). The results show that, with the introduction of chirp in LPG, the sensitivity of the resonant wavelength shift is improved, but the peak of transmission intensity is lowered. With the further increase of chirp, the peak of transmission intensity varies little and the resonant wavelength shift becomes more sensitive. The variation of wavelength shift is decreased gradually when the chirp reaches a certain magnitude. Silicious layer is used as fundus layer since its refractive index is much the same as that of antigen and antibody. The thickness of fundus layer is about 120nm, which amounts to the ideal linear scale of wavelength shift for better measurements.

Keywords long period fiber grating; bio-layer sensor; chirp; resonant wavelengs

0 引言

新颖的光纤器件长周期光纤光栅 (Long Period Fiber Grating, LPG) 不仅在通信领域, 还在传感领域都具有潜在的应用价值^[1-6]。根据模式耦合理论^[7], 长周期光纤光栅可以把芯区传输的导模能量耦合到包层中, 从而造成与波长相关的传

输损耗, 表现出很好的带阻滤波特性; 此外, LPG 的谐振波长对温度、应力、应变、弯曲等外界因数的变化较敏感, 可以制作多种光纤传感器。与普通光纤光栅相比, LPG 除了具有体积小、抗干扰能力强等优点外, 还对光纤包层外材料的折射率变化更敏感, 围绕包层的材料折射率的任何变化都会改变透

收稿日期: 2009-10-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30960097); 新疆少数民族科技骨干人才特殊培养科研专项 (200723104)

作者简介: 陈建军, 讲师, 研究方向为光纤传感器与激光技术, 电子信箱: cjjlight@yahoo.com.cn; 木拉提·哈密提 (通信作者), 教授, 研究方向为生物医学信息分析与处理, 电子信箱: murat.h@163.com

射光谱的性质。用 LPG 制作的化学传感器配以适当的解调技术,其灵敏度是电致传感器所不能比拟的。在检查血浆中是否存在某种特殊的抗体时,可以利用与之互补的特殊抗原。常用的生物传感器方法,要么体积很大需要大量的测试样本,要么需要有毒的(荧光)指示剂,而且一次只能做一种测试,不能做体内检测,测试过程有比较大的局限性,而 LPG 生物膜层传感器可用于血液抗体和抗原的现场分析。为此,本研究在 LPG 生物膜层传感器特性分析的基础上,讨论啁啾的引入对传感器工作性能的影响。

1 模型与方法

LPG 生物膜传感是在光纤包层(折射率为 n_2)外涂上特殊的生物活性膜层(折射率为 n_3),并通过膜层折射率或厚度的改变使光纤光栅谐振波长产生变化达到其传感效用。通过考虑 LPG 的结构,并从 Maxwell 波动方程出发,对于低能量光强可忽略非线性效应,并假设材料响应速度特别快,以及载波波长接近光栅的谐振波长,可得到如下耦合模方程^[8]

$$\frac{\partial A_1}{\partial z} + \frac{1}{v_{g1}} \frac{\partial A_1}{\partial t} + \frac{i\beta_{21}}{2} \frac{\partial^2 A_1}{\partial t^2} = i\delta A_1 + i\kappa A_2 \quad (1a)$$

$$\frac{\partial A_2}{\partial z} + \frac{1}{v_{g2}} \frac{\partial A_2}{\partial t} + \frac{i\beta_{22}}{2} \frac{\partial^2 A_2}{\partial t^2} = i\delta A_2 + i\kappa A_1 \quad (1b)$$

其中, A_1 和 A_2 为光栅耦合的两共同传播模式的慢变振幅, v_{g1} 和 v_{g2} 为模式的传播群速度, β_{21} 和 β_{22} 为模式的传播常数, δ 为频率失谐量, κ 为线性耦合系数, γ_1 和 γ_2 为非线性参数。

对于引入啁啾的光纤光栅,其传播常数 $\beta(z)$ 将随轴向变化,可表示为^[9]

$$\beta(z) = \bar{\beta} + \frac{C}{L^2} (z - \frac{L}{2}) \quad (2)$$

式中, $\bar{\beta}$ 为平均传播波数, C 为光纤光栅中引入的啁啾量, C 的大小表示 $\beta(z)L$ 总的变化。对于小数量的啁啾,耦合模方程的形式不变,只是失谐量 δ 将沿轴向发生变化。

根据耦合模理论,单模 LPG 模式耦合发生于纤芯导模与同向传输的一阶各次包层模式之间。通常情况下包层模式有一二百个,故分别求解纤芯导模与各个包层模式的耦合式非常困难,也是不必要的。实际上,并不是所有的包层模式都能与纤芯导模发生有效的耦合,所以可以保留那些能有效耦合的模式,摒弃那些不能发生有效耦合的模式,以简化对长周期光纤光栅模式耦合的计算。基于此,可将(1a)(1b)式化简为以下的模式耦合方程

$$\frac{dR}{dz} = i\hat{\sigma}R(z) + i\kappa S(z) \quad (3a)$$

$$\frac{dS}{dz} = -i\hat{\sigma}S(z) + i\kappa R(z) \quad (3b)$$

式中,

$$R(z) = A_1 \exp \left[-i(\sigma_{11} + \sigma_{22}) \frac{z}{2} \right] \exp \left(i\delta z - \frac{\phi}{2} \right) \quad (4a)$$

$$S(z) = A_2 \exp \left[-i(\sigma_{11} + \sigma_{22}) \frac{z}{2} \right] \exp \left(-i\delta z + \frac{\phi}{2} \right) \quad (4b)$$

这里, σ_{11} 、 σ_{22} 分别表示纤芯导模与纤芯导模、包层模与包层模间的耦合系数, $\hat{\sigma} = \delta + \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{2} - \frac{d\phi}{2dz}$ 表示自耦合系数,其中

$$\delta = \frac{1}{2} (\beta_{21} - \beta_{22}) - \frac{\pi}{\Lambda}, \frac{d\phi}{dz} \text{ 为耦合系数随啁啾量的变化项。}$$

慢变振幅满足下列边界条件:当光栅长度 $z=0$ 时,反射强度因子 $R=1$,透射强度因子 $S=0$ 。同时定义透射率 $t = |R(z)|^2 / |R(0)|^2$ 和损耗率 $t_b = |S(z)|^2 / |R(z)|^2$, 利用分步 Fourier 方法,即可由其解出任一波长下长周期光纤光栅的透射率。

2 结果与讨论

Nicholas 等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(Langmuir-Blodgett thin-film)技术将物质逐层镀到 LPG 表面,以此改变膜层厚度,其 LPG 基底膜厚度宜选择 120nm 左右,此时的波长位移灵敏度较高,线性度好。在血液中测试抗原过程中,抗体膜层可选用硅化膜^[10-11]。硅化膜的折射率和抗原、抗体物质的折射率非常接近,整个膜层(包括硅化层、抗体和抗原)从光学的角度可以被认为是一层物质。在硅化膜之上再黏附一层特异性抗体,用这层特异性的抗体和抗原之间的特异性结合来检测特定抗原是否存在。

2.1 啁啾的引入对 LPG 生物包膜透射光的影响

在 LPG 中,若生物膜层(折射率为 $n_3 \geq n_2$)的厚度很大,折射率 n_3 的变化会引起包层模传播常数和模场分布的改变,从而影响 LPG 的相位匹配波长和耦合强度。对于引入啁啾的长周期光纤光栅,其波数 β_{21} 和 β_{22} 将随轴向变化,这样将导致包层模式与模场强度也发生变化。如图 1 所示,光栅生物活性膜层 $n_3=1.30$,通过在光栅内部引入啁啾,可以改变光栅不同位置的结构,使光栅内的模式发生改变。因为啁啾的引入扩

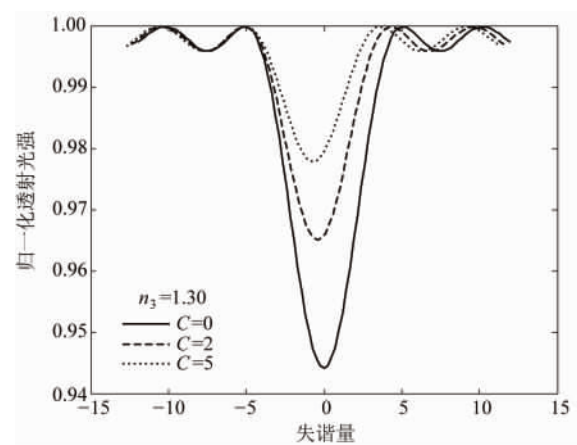


图 1 LPG 生物膜传感器在不同的啁啾参数下的归一化透射光强随失谐量 δL 的变化曲线

Fig. 1 Normalized transmitted power characteristics of the LPG bio-layer sensor vs various detuning for different chirps

大了 LPG 的光波长谐振范围,透射光波长的半波宽度随啁啾参数的增大而减小,此时相应透射光的光强也在减少。在谐振范围增大的情况下,不同位置的谐振波长均出现小的偏移,且啁啾参数越大,偏移越明显。

2.2 不同啁啾参数时,包层膜折射率 n_3 对 LPG 生物包膜透射光的影响

当 LPG 生物活性膜层与血液中抗原反应时,膜层折射率的变化等同于光纤包层折射率的改变,因此将引起包层模传播常数 β 和模场分布的改变,从而改变 LPG 谐振波长的位置。图 2 给出的是均匀结构的 LPG 生物膜传感器归一化透射光强随膜层折射率的变化曲线,可以看到膜层折射率 n_3 在 1.0~1.45 的变化过程中,谐振波长的峰值向短波长方向偏移,并且随着膜层折射率的增加,偏移敏感性也在增加,整个偏移谐振波长失谐量的变化接近 5。

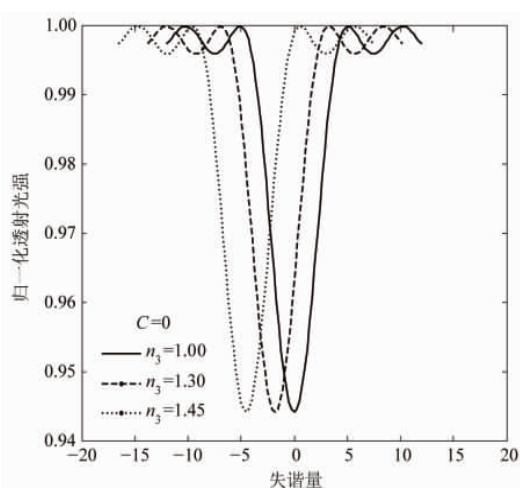


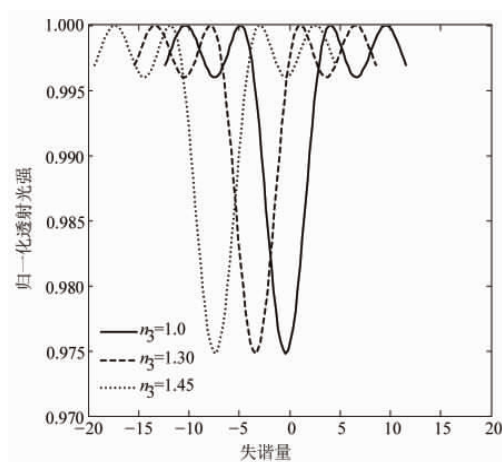
图 2 均匀结构 LPG 生物膜传感器归一化透射光强随膜层折射率的变化曲线

Fig. 2 Normalized transmitted power characteristics of the LPG bio-layer sensor with homogeneous structure vs. various detuning for different layer indexes

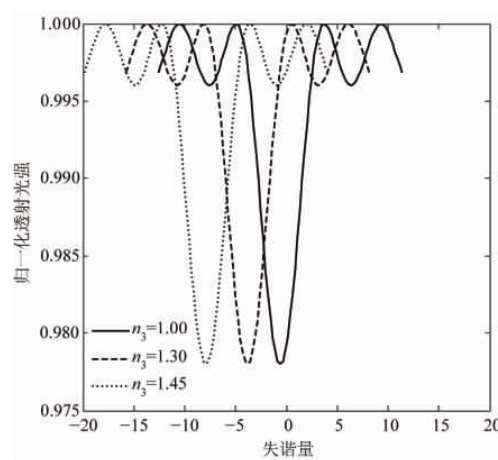
图 3(a)、(b)分别给出了啁啾参数 $C=2, C=5$ 时, LPG 生物膜传感器的谐振波长随膜层折射率的变化情况。当保持其他参数不变时,啁啾量的引入可以在相同的条件下使谐振波长的偏移更大,但相应透射光的强度会有一定的减弱。

图 4 给出了均匀结构 LPG 与引入啁啾参数 $C=2, C=5$ 时, 谐振波长失谐量随生物膜层折射率的变化曲线的比较。结果表明,在相同条件下,当在 LPG 生物膜层内引入啁啾参数时,膜层折射率越大,谐振波长偏移越明显;但随着 C 值达到一定的量值,谐振波长的偏移不再有很大的变化。

综上所述,在 LPG 生物膜层传感器中引入合适的啁啾参数,有利于提高传感器对谐振波长失谐量偏移的灵敏度,从而进一步优化其传感性能。



(a) $C=2$



(b) $C=5$

图 3 LPG 生物膜传感器在不同包层折射率情况下归一化透射光强随失谐量 δL 的变化曲线

Fig. 3 Normalized transmitted power characteristics of the LPG bio-layer sensor vs. various detuning

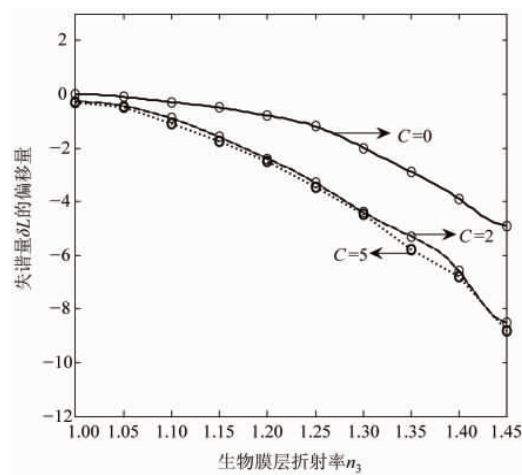


图 4 LPG 生物膜传感器在不同啁啾参数下谐振波长失谐量随生物膜层折射率的变化曲线

Fig. 4 Detuning of the LPG bio-layer sensor vs the layer index for the different chirps

3 结论

从耦合模理论出发,分析了长周期光纤光栅(LPG)传感器的工作原理,说明当生物膜层折射率 n_3 同光纤包层折射率 n_2 相接近时,生物膜层折射率的变化将引起 LPG 谐振波长的改变,因此可以通过测量 LPG 谐振波长的移动来测量血液中相应抗原的存在。同时,通过在 LPG 中引入啁啾参量来分析其对生物膜层折射率的响应灵敏度。分析表明,啁啾量的引入可以提高谐振波长失谐的偏移量,可对 LPG 生物膜层传感器的传感性能进行优化。考虑到实际应用的情况,可选用硅化膜作为基底膜材料,因为其折射率和抗原、抗体物质的折射率非常接近,基底膜厚度宜选择 120nm 左右,此时的波长位移线性度好,有利于实验测定。

参考文献 (References)

- [1] Bhatia V. Optical fiber long period grating sensors [J]. *Optics Letters*, 1996, 21(9): 692-694.
- [2] Pilevar S, Delisa M P, Zhang Z, *et al.* Evanescent wave antibody-antigen biosensor based on long period fiber Bragg grating[J]. *SPIE*, 2000, 4185: 314-317.
- [3] Liu S Y, Tam H Y, Demokan M S. Highly sensitive long period fiber grating temperature sensor[J]. *SPIE*, 2001, 4595: 282-286.
- [4] Zhang Z, Sirkis J S. Temperature-compensated long-period grating

chemical sensor [C]. *Proc Optical Fiber Sensors Conf (OFS-12)*, 1997: 294-297.

- [5] Gonzalez D A, Jauregui C, Quintela A, *et al.* Torsion-induced effects on UV-long period fiber grating[J]. *SPIE*, 2004, 5502: 192-195.
- [6] Rao Y J. In-fiber Bragg grating flow-directed thermomodulation catheter for cardiac monitoring[C]. *Proc Optical Fiber Sensors Conf (OFS-12)*, 1997: 354-357.
- [7] Erdogan T. Fiber gating spectra [J]. *IEEE Journal of Light-wave Technology*, 1997, 15(8): 1277-1294.
- [8] Erdogan T. Cladding-mode resonance in short and long period fiber grating filter [C]. *Journal of Optical Society of America*, 1997, 14(8): 1760-1773.
- [9] Ye Q, Liu F, Cai H W, *et al.* Composite second-order performance improvement in optical fiber CATV transmission system using chirped fiber grating[J]. *Chin Phys*, 2005, 14(5): 969-973.
- [10] 孙艳, 孙锋, 杨玉孝, 等. 用于纳米生物膜层厚度测试的光纤生物传感器[J]. *光子学报*, 2002, 31(6): 657-661.
- Sun Yan, Sun Feng, Yang Yuxiao, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(6): 657-661.
- [11] 孔梅, 石邦任. 长周期光纤光栅对外界折射率的敏感性[J]. *半导体光电*, 2003, 24(6): 386-388.
- Kong Mei, Shi Bangren. *Semiconductor Optoelectronics*, 2003, 24(6): 386-388.

(责任编辑 李慧政)

本期“好玩的数学”答案

我们设共有 n 个人参加。为了说明方便,我们把得分最少的三名棋手称为“差的”棋手。而把其他得分高些的棋手称为“好的”棋手。

我们先把全部对局的情况分为三类:在“差的”3 名棋手之间进行的比赛;在“好的” $n-3$ 名棋手之间进行的比赛;在“好的” $n-3$ 名棋手与“差的”3 名棋手之间进行的比赛。容易知道这三类情况的对局数分别为:“差的”3 名棋手之间共赛 3 局;“好的”棋手之间共赛 $C_{n-3}^2 = \frac{(n-3)(n-4)}{2}$ 局;在“好的” $n-3$ 名棋手与“差的”3 名棋手之间共赛 $3(n-3)$ 局。按照赛制积分规定,任何两个人在一场比赛中无论谁胜谁负,最后两人的得分和是不变的,都是 1 分。于是,在“差的”3 名棋手之间进行的比赛中,他们得分总和为 3 分;在“好的” $n-3$ 名棋手之间进行的比赛中,这 $n-3$ 名棋手共得 $\frac{(n-3)(n-4)}{2}$ 分;在“好的” $n-3$ 名棋手与“差的”3 名棋手之间进行的比赛中,他们共得 $3(n-3)$ 分。

由已知条件,“差的”3 名棋手中的每一名棋手的一半得分是在与另外两人的对局中所得。因此,这三名棋手总得分的一半是在这三人之间的对局中所得。根据上面的分析,这三名“差的”棋手总得分的一半是 3 分。于是这 3 人的另一半得分(3 分)是在与“好的”棋手的对局中所得。根据上面的分析,在“好的” $n-3$ 名棋手与“差的”3 名棋手之间进行的比赛中,这些棋手共得 $3(n-3)$ 分。既然“差的”3 名棋手在与“好的”棋手对局中得到了 3 分,那么很显然,“好的”棋手在与“差的”棋手的对局中共得到 $3(n-3)-3$ 分。

再根据“任何一名棋手的一半得分,都是在与得分最少的三名棋手对局中所得”的条件,可知所有“好的”棋手的一半得分是在与“差的”棋手对局中所得。这表明,“好的”棋手在整个比赛中所得总分的一半为 $3(n-3)-3$ 分。

而“好的”棋手在整个比赛中得分的另一半则来自于“好的”棋手之间的比赛。根据上面的分析我们已经知道,在“好的” $n-3$ 名棋手之间进行的比赛中他们共得 $\frac{(n-3)(n-4)}{2}$ 分,因此“好的” $n-3$ 名棋手在整个比赛中的另一半得分是 $\frac{(n-3)(n-4)}{2}$ 分。

这样,我们就得到了一个方程: $3(n-3)-3 = \frac{(n-3)(n-4)}{2}$, 可解得 $n=4$ 或 $n=9$ 。而 $n=4$ 显然不适合,因此最后的结论是:这次象棋比赛共有 9 名棋手参加。