

doi:10.3788/gzxb20184706.0606002

关于镀膜长周期光纤光栅“模式转换”的新认识

顾铮尧,冯文斌

(上海理工大学 理学院光电功能薄膜实验室,上海 200093)

摘 要:依据包层模有效折射率的概念及包层模场的光功率密度分布,重新审视了镀膜长周期光纤光栅“模式转换”现象,对“模式转换”给出了新的物理图像.通过修正镀膜长周期光纤光栅包层模有效折射率的范围,指出有效折射率呈现的台阶式增长是各次包层模自身属性的反映,不存在高次模式替代低次模式的过程,并将“模式转换区”重命名为“模式垒区”.通过分析包层模场的光功率密度分布,指出“模式转换区”较低次包层模式进入薄膜层传输说法的不合理性.研究表明,当薄膜厚度达到一定厚度时,包层模场光功率分布将愈加集中在薄膜层内部,但并非沿着薄膜层传输.讨论了镀膜长周期光纤光栅传感器薄膜参数优化的问题,在修正的包层模有效折射率范围和未修正的包层模有效折射率范围的情况下分别进行优化,并对优化结果进行比较,结果表明两种情况下的优化结果存在较大的偏差.从机理上解释了修正薄层模有效折射率范围后的优化结果的正确性,为设计高灵敏镀膜长周期光纤光栅传感器提供了新的理论指导.

关键词:光纤光学;镀膜长周期光纤光栅;模式转换;有效折射率;功率密度分布;灵敏度

中图分类号:TN253

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)06-0606002-9

New Understanding of "Mode Transition" of Coated Long Period Fiber Grating

GU Zheng-tian, FENG Wen-bin

(Laboratory of Opto-Electric Functional Film, College of Science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Based on the concept of effective refractive index and the power density distribution of cladding mode, this paper re-survey the phenomenon of "mode conversion" of long-period fiber grating (LPFG), and gives new physical image for "mode conversion". By modifying the range of the effective refractive index of cladding mode of LPFG, it is pointed out that the step-like growth of the effective refractive index is the self-property of each cladding mode and there is no replacement between high and low order modes, and we rename the "mode conversion region" to "mode barrier region". It is pointed out that the incorrectness of the argument that the lower order cladding modes will be guided in the overlay in the "mode transition" region by analyzing the power density distribution of cladding mode. The research in this paper shows that when the thickness of overlay reaches a certain value, the power distribution of the cladding will be more concentrated in the overlay, but the cladding mode will not be guided in overlay. This paper discusses the optimization of overlay parameters of long-period fiber grating sensors, and compares the optimization results before and after the modification of effective refractive index of cladding mode, the result shows that there is a large deviation between the optimization results of these two cases. The correctness of the optimization results after modifying the effective refractive index range is explained mechanistically, which provides the new theoretical guidance for designing high-sensitivity long-period

基金项目:国家自然科学基金(No.60777035),教育部科学研究重点项目(No.208040),上海市教育委员会科研创新重点项目(No.11ZZ131)和上海市重点学科建设项目(No.S30502)资助

第一作者:顾铮尧(1965—),男,教授,博士,主要研究方向为光电工程与测量、光电功能薄膜、光纤传感器等.Email:zhengtiangu@163.com

收稿日期:2017-12-20; **录用日期:**2018-03-12

<http://www.photon.ac.cn>

fiber grating sensors.

Key words: Fiber optics; Coated long-period fiber grating; Mode transition; Effective refractive index; Power density distribution; Sensitivity

OCIS Codes: 060.2310; 060.2340; 060.2370; 310.3915

0 引言

长周期光纤光栅(Long-period Fiber Grating, LPFG)是一种能够将纤芯导模特定波长的光耦合到同向传输包层模式中的光纤器件^[1-2],由于未镀膜的 LPFG 对高折射率的外界环境无响应,所以人们开始研究镀膜 LPFG^[3-4].2002 年,REES N D^[5]等通过在 LPFG 上镀一层高折射率薄膜,解决了 LPFG 无法探测高折射率外界环境的问题,其实验结果还表明包层模式的谐振波长随着薄膜厚度的变化存在跳变现象,但此结果难以让人信服.VILLAR I Del^[6]等提出模式转换的概念,即当薄膜厚度达到一定厚度时,高次模式依次取代低一次的模式,最低阶包层模式进入薄膜层传输.按照模式转换的观点,包层模的谐振波长随薄膜厚度的变化是连续变化的,该观点与 REES N D 等的实验结果不相符.2005 年,CUSANO A^[7]等设计了类似 N D Rees 等人的实验,通过改变镀膜 LPFG 外界环境折射率,观测谐振波长随外界折射率的变化关系.实验结果显示损耗峰的谐振波长随外界折射率的变化而连续变化,而且存在谐振波长随外折射率变化而变化很快的区域,该区域也就是模式转换区.根据 CUSANO A 等的实验结果不难分析出 REES N D 等的实验结果出现跳变的原因:当镀膜 LPFG 工作在模式转换区内时,随外界环境折射率或者薄膜厚度的变化谐振波长会迅速变化,以至于高一次模式的谐振峰会迅速变化到低一次模式的谐振峰附近,所以这个高一次模式的谐振波长容易被误认为是低次模式的谐振波长,这就导致了谐振波长跳变的现象.模式转换区的存在被实验验证之后,许多研究人员围绕模式转换区域进行高灵敏度传感器研究,YU X J^[8]和 PILLA P^[9]等研究了工作在模式转换区的 LPFG 对外界折射率的响应特性,GU Z T^[10-12]等研究了工作在模式转换区的镀吸收薄膜 LPFG 的环境折射率传感特性,CHEN H Y^[13]和 LAN J L^[14]结合工作在模式转换的 LPFG 的高灵敏度特性以及薄包层 LPFG 的传感特性来获得更高的外界环境响应.

模式转换区的存在可以大大提高镀膜 LPFG 对外界环境的灵敏度,可见模式转换区对于镀膜长周期光纤光栅传感器的设计具有重要意义.虽然模式转换区已经在实验上被“证实”,也已经被用于传感器的设计,但是关于模式转换的理论研究却很少,所以模式转换区在实际应用中缺乏足够的理论指导,从而不能发挥出模式转换区优良的传感特性.从理论上进一步研究模式转换是很有必要的,本文从包层模式有效折射率的概念出发,修正了镀膜 LPFG 中包层模式的有效折射率的范围,从而得到包层模有效折射率随薄膜厚度连续变化的关系曲线.通过比较在修正包层模式有效折射率范围情况下与考虑模式转换情况下得到的曲线,指出了有效折射率随薄膜厚度台阶式增长的关系与模式转换无关.通过计算包层模式的光功率分布以及薄膜层中功率占总功率的比值,呈现了更清晰的包层模场分布图像.讨论了镀膜 LPFG 薄膜参数的优化问题,在修正的包层模有效折射率范围与未修正的有效折射率范围情况下,分别对薄膜层参数进行优化,并对修正薄膜有效折射率范围后的优化结果进行机理上的解释.

1 包层模有效折射率寻根区间问题

计算中 LPFG 的结构参数为:纤芯半径 $a_1 = 2.625 \mu\text{m}$,包层半径 $a_2 = 62.4 \mu\text{m}$,纤芯折射率 $n_1 = 1.458$,包层折射率 $n_2 = 1.45$,薄膜折射率 $n_3 = 1.57$,外界环境折射率 $n_4 = 1.33$,平均折变量 $\sigma = 4 \times 10^{-4}$.

对未镀膜的 LPFG 而言,包层模的有效折射率的范围为

$$n_4 < n_{\text{eff}}^{\text{cl}} < n_2 \quad (1)$$

包层模式的本征方程较为复杂,没有解析解,所以一般求解各包层模有效折射率采用迭代法,即从 n_2 开始以一定步长逐渐减小有效折射率,并将其代入到本征方程,满足本征方程的有效折射率即为某次包层模的有效折射率.第一个满足本征方程的有效折射率为一次包层模的有效折射率,第二个满足本征方程的为二次包层模的有效折射率,以此类推.

对于包层表面镀高折射率薄膜的 LPFG 而言,假设仍认为包层模有效折射率的范围与未镀膜 LPFG 一样,取不同的薄膜厚度,使用迭代法求解镀膜 LPFG 包层模本征方程,可以得到包层模有效折射率与薄膜厚

度的关系曲线如图 1(a)所示.

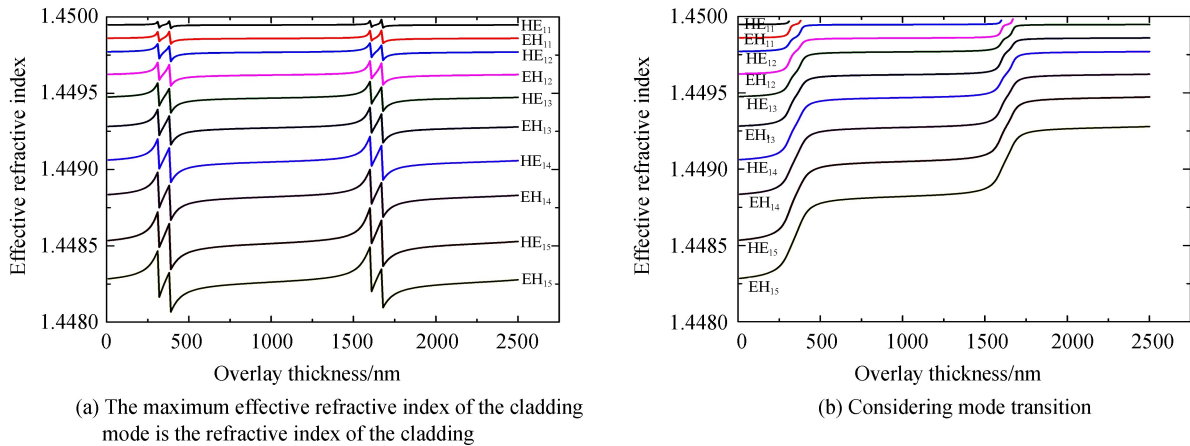


图 1 包层模有效折射率与薄膜厚度的关系

Fig.1 The dependence of effective refractive index on overlay thickness

从图 1(a)中可以看出,随着薄膜厚度的变化,包层模的有效折射率存在跳变现象,显然,有效折射率突变是不合理的.因此,人们提出了模式转换的概念,即薄膜达到一定厚度时,高一次的包层模式依次取代低一次的模式,而最低次的包层模式进入薄膜层传输,按照这种观点对图 1(a)进行处理,得到包层模有效折射率阶梯状变化关系如图 1(b)所示.可以看到,每个模式的有效折射率都是连续变化的,该结果比图 1(a)更为合理,但是图 1(b)仍然存在两个问题,第一,模式转换指出当薄膜较厚时,最低次的包层模式将进入薄膜层传输,然而进入薄膜层以后的有效折射率无法得到,例如图 1(b)中的 HE_{11} 、 EH_{11} 、 HE_{12} 和 EH_{12} 模式;第二,从图 1(a)到图 1(b)的过程是根据高低次模式取代的关系,通过对数据重组得到的,缺乏物理依据.可见,模式转换其实是为了消除有效折射率跳变的现象而提出来的模式重组方法,该方法缺乏一定的理论支撑.

为了更深层次地研究图 1(a)中有效折射率跳变的现象,首先从有效折射率的概念出发,研究有效折射率与光所处环境的折射率以及光线在介质界面上的入射角之间的关系.如图 2 所示,在波导中有效折射率可表示为

$$n_{\text{eff}} = n_a \sin \theta \quad (2)$$

式中 n_a 、 n_b 、 n_c 分别为不同介质的折射率, θ 为光线

在界面处的入射角.从式(2)可以看出,光线在任意介质中,有效折射率最大不超过介质本身的折射率.对于镀膜长周期光纤光栅而言,任意一个包层模式的场分布在纤芯,包层和薄膜层中都以振荡形式存在,而薄膜层的折射率 n_3 最大,所以包层模有效折射率的范围应该为

$$n_4 < n_{\text{eff}}^{\text{cl}} < n_3 \quad (3)$$

因此,在求解镀膜 LPFG 各次包层模有效折射率时,寻根的上限应该设置为 n_3 ,而不是 n_2 .将包层有效折射率的寻根上限设为 n_3 ,同样采用迭代求解本征方程的方法,可以得到各模式有效折射率与薄膜厚度的关系如图 3.

从图 3(a)可以看出,随着薄膜厚度的增加,一些较低次包层模的有效折射率会依次变得大于 n_2 ,并且当某个模式的有效折射率大于 n_2 之后,该模式的有效折射率随着薄膜的厚度增加而快速变化.图 3(b)为图 3(a)的局部放大图,比较图 3(b)和图 1(b)可以发现两者是完全一致的,而图 3(b)并没有进行数据重组,也就是说,只要将寻根的上限设置为薄膜层折射率,那么各次包层模有效折射率与薄膜层厚度的关系自然就是图 3 所示的那样,图 1(a)出现的情况是因为寻根范围设置不合理所造成的.以 1 次包层模(HE_{11})为例进行说明,在图 1(a)中,当薄膜厚度达到一定厚度时,1 次的包层模的有效折射率本应该大于 n_2 ,但是包层模的有效折射率的上限被认为是 n_2 ,所以就无法求得 1 次模式的有效折射率,而把在小于 n_2 范围内寻求到的第一个有效折射率作为 1 次包层模式的有效折射率,而这个有效折射率并不是 1 次包层模的有效折射率而是

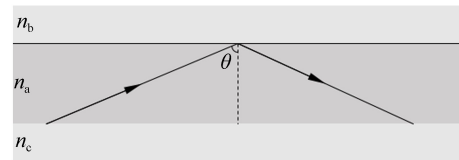


图 2 波导中光线路径

Fig.2 Diagram of the light in the waveguide

2次包层模的有效折射率,最终导致图1(a)中有效折射率跳变的现象.

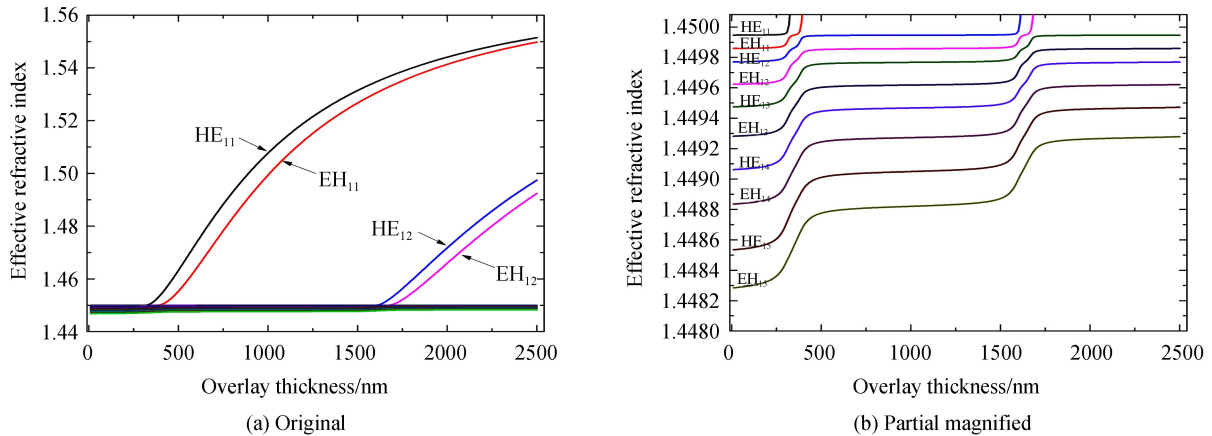


图3 前10次包层模有效折射率与薄膜厚度的关系

Fig.3 The dependences of effective refractive index of the first ten cladding modes on overlay thickness

分析可知,模式转换所提到的当薄膜厚度达到一定值时,高次模式替代低次模式的说法是不正确的,因为图3中的结果并不需要进行高低次模式的替代,而是根据正确的有效折射率寻根范围自然得到的.此外,不可否认的是有效折射率变化较快的区域确实存在,而且这些区域适合运用在高灵敏度传感器的设计上,但是这些区域是包层模式自身的属性,与模式转换无关.由于这些区域类似于P-N结中势垒区的能带图,为了不产生概念的混淆,所以将该区域原来的名称“模式转换区”重命名为“模式垒区”.

2 包层模是否进入薄膜层传输的问题

“模式转换”的观点指出,当薄膜达到一定厚度时,某些较低次包层模式进入薄膜层传输,由分析可知,在任何薄膜厚度的情况下,包层模式的场分布在纤芯,包层和薄膜层中都以振荡形式存在,也就是说任何情况下包层模都经过薄膜层传输,那么也就不存在较低次包层模式进入薄膜层传输的说法.

为了更清晰地了解包层模式的传输状态,进一步研究不同薄膜厚度条件下,包层模式的模场分布情况(即功率密度分布).如图4所示,以1次包层模式(HE_{11})为例,取A、B、C、D和E五个工作点,各点处对应的薄膜厚度分别为310 nm、320 nm、330 nm、340 nm和350 nm,其中A点处有效折射率小于包层折射率 n_2 ;另外四点处的有效折射率都大于包层折射率 n_2 .

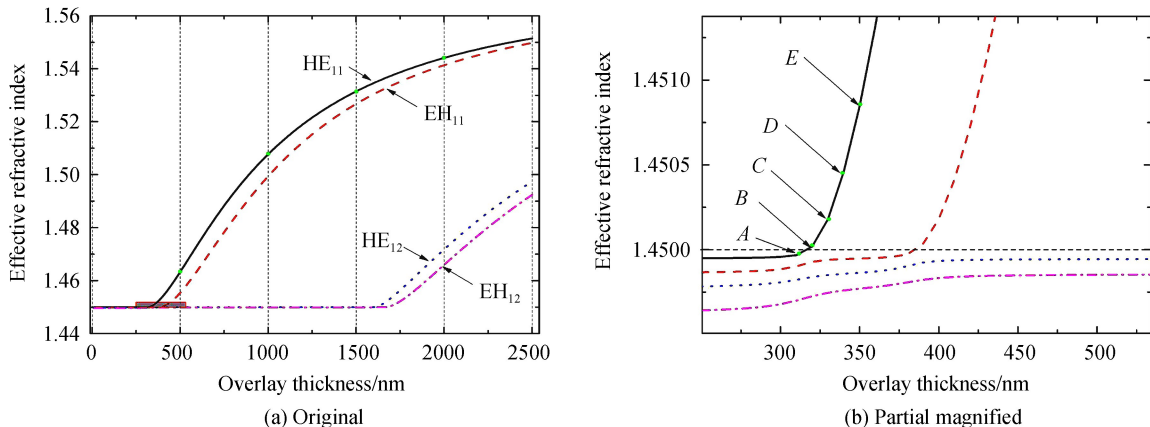


图4 前4次包层模有效折射率与薄膜厚度的关系

Fig.4 The dependences of effective refractive index of the first four cladding modes on overlay thickness

如图5所示,根据五个工作点处的薄膜厚度不同,分别计算各个工作点处的光功率密度分布,从图中可以看出,A点处的光功率主要分布在包层内,而B、C、D和E工作点处对应的功率主要分布在包层模边缘靠近薄膜层的区域.同时,比较B、C、D和E工作点对应的功率分布可知,当有效折射率大于 n_2 时,随着薄膜

厚度的增加,功率密度的分布会越来越向薄膜层中.根据这种关系不难预测,当薄膜厚度很大时,功率密度将会基本分布在薄膜层内部.为了验证这一点,分别取薄膜厚度为 500 nm,1 000 nm,1 500 nm 和 2 000 nm 的情况进行研究.

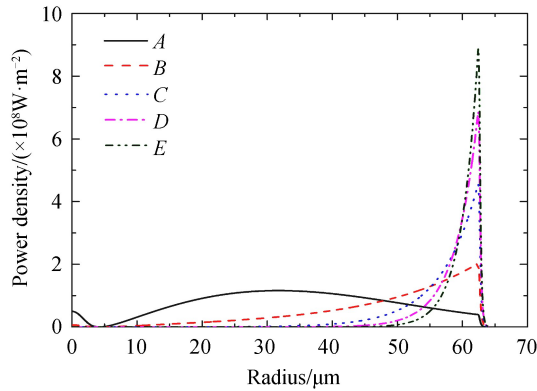


图 5 各个工作点处的光功率密度分布

Fig.5 The distribution of power density at each operating points

如图 6 所示,分别计算得到了薄膜厚度为 500 nm,1 000 nm,1 500 nm 和 2 000 nm 时的功率分布图.

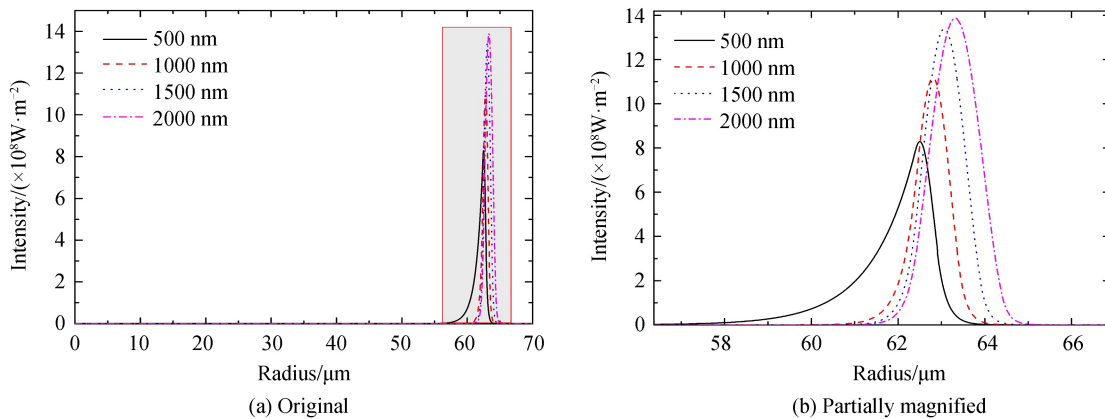


图 6 不同薄膜厚度下的功率密度分布

Fig.6 The distribution of power density under different overlay thicknesses

从图 6 中可以看出,薄膜越厚,功率越趋近于薄膜层分布,这也说明上面做出的预测是合理的.为了更好地展现功率在薄膜内部的分布情况,计算出薄膜厚度为 500 nm、1 000 nm、1 500 nm 和 2 000 nm 时,HE₁₁ 模式在薄膜层分布的功率占总功率的比值分别是 28.36%、83.46%、90.26% 和 95.05%,可见,当薄膜厚度为 1 500 nm、2 000 nm 时,功率密度基本全部分布在薄膜层中.也就是说,对于某次包层模式存在一个临界薄膜厚度,小于临界膜厚时,包层模功率密度基本分布在包层中;大于临界膜厚时,包层模的功率密度分布向薄膜层集中,并且随着薄膜厚度的不断增加,包层模的功率会越来越集中到薄膜层内,所以说薄膜厚度达到一定值时,一些较低次包层模式进入薄膜层传输的说法是不合理的,因为包层模在任何情况下都是在纤芯、包层和薄膜层中传输,只是功率密度分布不同.

图 3(a)已经说明,在包层模有效折射率大于包层折射率 n_2 时(薄膜厚度超过临界厚度),该模式的有效折射率随着薄膜厚度增加而快速变化.根据相位匹配条件可知,有效折射率直接决定谐振波长,有效折射率变化快代表谐振波长变化也很快,这一特性有利于 LPFG 传感器的灵敏度提升,所以有效折射率大于包层折射率的包层模式可用于设计高灵敏度的镀膜 LPFG 传感器.

3 薄膜参数优化问题

在研究 LPFG 传感器时,存在薄膜参数的优化问题,即寻找最佳的薄膜折射率和薄膜厚度的组合以获得最高的灵敏度,但是在优化的过程中包层折射率往往被视为包层模有效折射率的上限,从而导致不合理的

的结果,这将对高灵敏度镀膜 LPFG 传感器的设计带来很大影响.

3.1 以包层折射率作为包层模有效折射率的上限

以第 5 次包层模式(HE_{13})为例,首先研究其有效折射率以及谐振波长随薄膜参数(厚度和折射率)的关系,保持光纤光栅其它参数不变,只改变薄膜的厚度及折射率,得到的结果如图 7 所示.可以看出,这种情况下,包层模式的有效折射率和谐振波长随着薄膜层厚度以及折射率的变化存在跳变现象.因为存在这些跳变的区域,那么对于波长调制型长周期光纤光栅传感器而言,在优化薄膜参数的过程中,这些跳变区域中的灵敏度必然也出现跳变从而达到很高的数值.以 LPFG 环境折射率传感器为例,研究其灵敏度与薄膜参数之间的关系,得到的结果如图 8 所示.

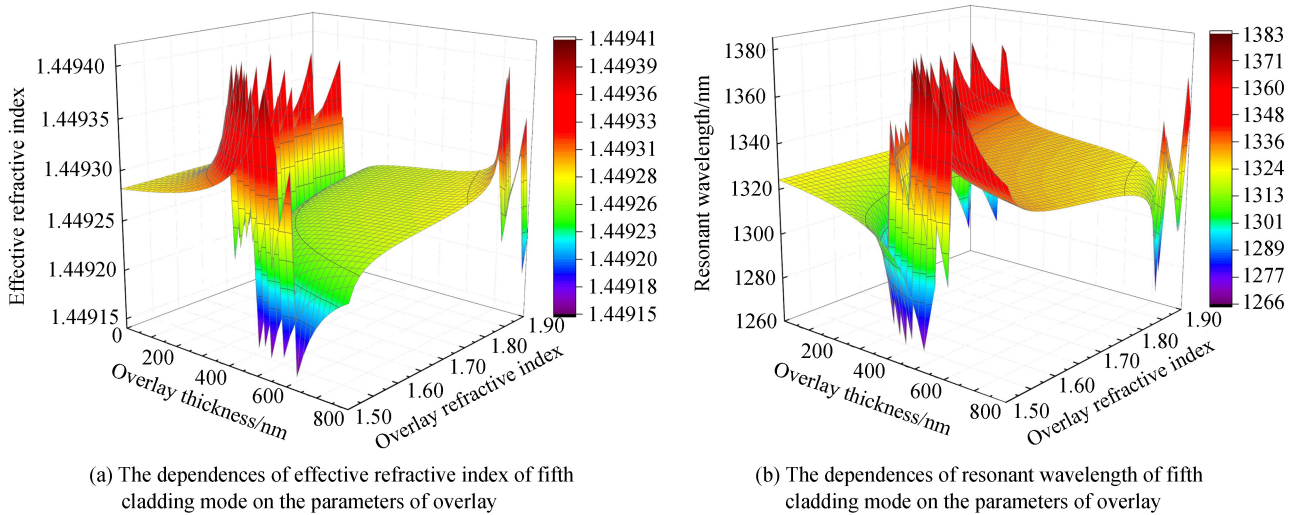


图 7 第 5 次包层模有效折射率及谐振波长与薄膜参数的关系

Fig.7 The dependences of effective refractive index and resonant wavelength of fifth cladding mode on the parameters of overlay

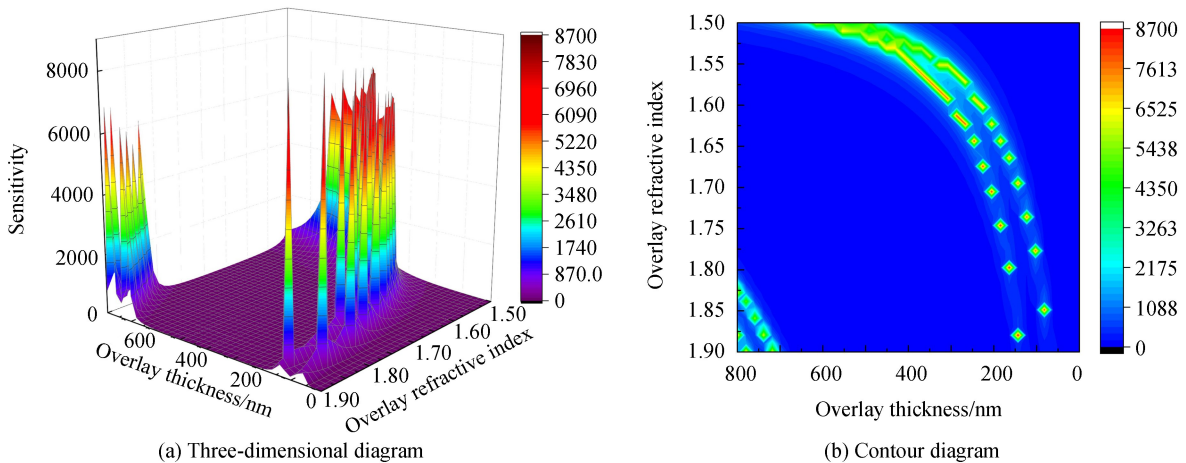


图 8 包层模有效折射率范围修正前灵敏度与薄膜折射率和厚度的关系

Fig.8 The dependence of sensitivity on the refractive index and thickness of overlay without considering the mode transition

从图 8(a)中可以看出,存在一系列灵敏度峰值,这些峰值分布在两条带状区域上,这两条带状区域都处于模式全区.图 8(b)给出了灵敏度的等高线图,图中可以看出,灵敏度在带状区域上的分布是不连续的,高灵敏度以离散点形式呈现在局域小空间中,该结果与文献[15]中给出的结果是一致的.这种优化结果对传感器设计的指导意义不大,实际中严格按照离散点对应的薄膜参数去镀制薄膜是很难实现的.事实上,这样的优化结果是不合理的,它是在未修正包层模有效折射率范围的情况下得到的.

3.2 以薄膜层折射率作为包层模有效折射率的上限

仍以第 5 次包层模式(HE_{13})为例,研究有效折射率与谐振波长和薄膜参数的关系,得到的结果如图 9

所示.

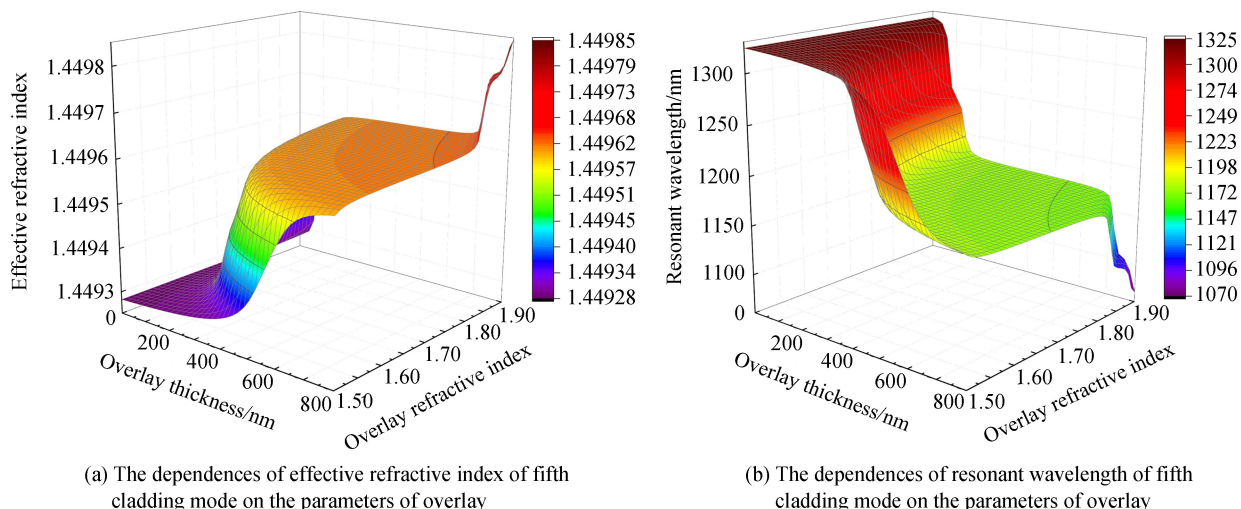


图9 第5次包层模有效折射率及谐振波长与薄膜参数的关系

Fig.9 The dependences of effective refractive index and resonant wavelength of fifth cladding mode on the parameters of overlay

从图9中可以看出,随着薄膜厚度和折射率的变化,包层模的有效折射率与谐振波长实际上都是连续变化的,不存在跳变的情况,但是有效折射率及谐振波长变化较快的区域依然存在,即模式垒区.在这种情况下,环境折射率灵敏度与薄膜参数之间的关系如图10所示.

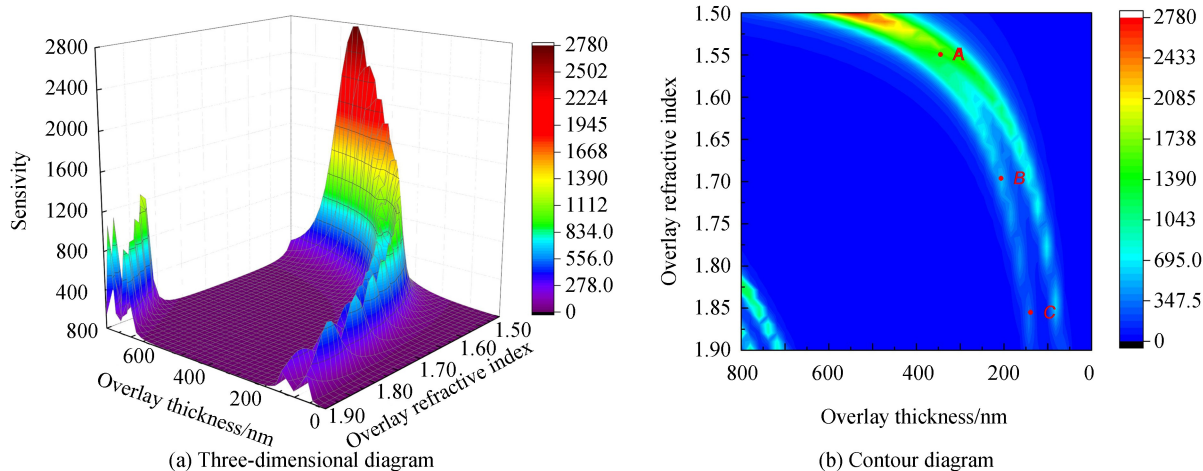


图10 包层模有效折射率范围修正后灵敏度与薄膜折射率和厚度的关系

Fig.10 The dependence of sensitivity on the refractive index and thickness of overlay considering the mode transition

从图10(b)可以看出,一系列灵敏度峰值仍然分布在两条处于模式垒区的带状区域上,两条带状区域对应于模式垒区中两个台阶所反映的有效折射率的快速变化区域.图11描绘了模式垒区中有效折射率及其斜率与薄膜厚度的关系曲线.斜率越大灵敏度越高,斜率出现两个极值,极值附近正是灵敏度分布图中的两条带状区域.另外,在高灵敏度对应的带状区域里,灵敏度随薄膜折射率的增大(相应的模式垒区膜厚减小)逐渐减少,这可以根据薄膜与环境边界处的包层模功率密度(或倏逝波的强度)的强弱变化得到解释.存在于外界环境中倏逝波的强度愈强,外界环境折射率对其影响愈大,从而直接影响 LPFG 透射谱,此时镀膜 LPFG 对外界折射率的灵敏度越高.图12给出了不同薄膜参数下的模场分布.选取灵敏度图10(b)中三个点A,B,C,薄膜折射率分别为1.55,1.70,1.85,对应的薄膜厚度分别为348 nm、205 nm、143 nm,图12中标注的三点a,b,c正是以上三种薄膜与外界环境交界面处的光功率密度.图中可以看出a点对应的光功率密度大,b点次之,c点最小,相应地,A处灵敏度最大,B点次之,C点最小.

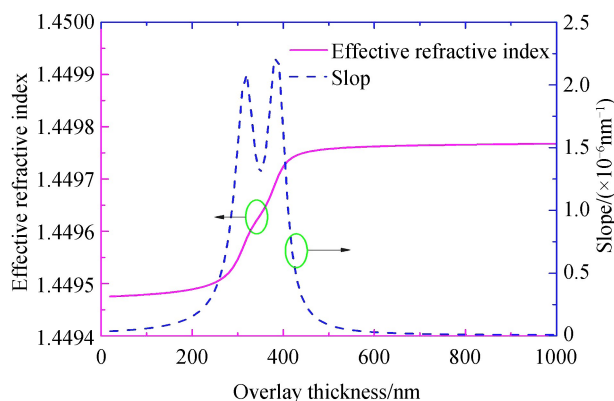


图 11 有效折射率与薄膜厚度的关系曲线及该曲线的斜率
Fig.11 The relationship between effective refractive index and overlay thickness and the slope of the curve

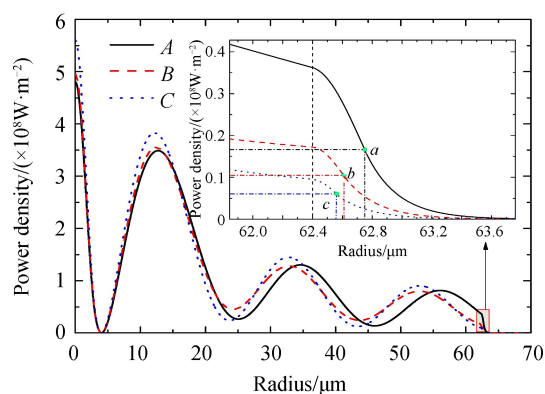


图 12 不同薄膜参数下的模场分布
Fig.12 The mode distribution under different overlay parameters

此外,比较图 10(b)和图 8(b)不难发现,图 8(b)中带状区域上的灵敏度峰值比图 10(b)中带状区域上的灵敏度大 4 倍以上,这主要是图 8(b) 是以包层折射率作为包层模有效折射率的上限,计算中由于有效折射率的跳变导致灵敏度值过大引起的.图 10(b)显示模式全区的带状区域中灵敏度是单调变化的,不再是一系列离散点,这对于高灵敏传感器设计具有重要的指导作用.为了让传感器的灵敏度尽可能高,可选择不同的薄膜材料,镀制不同厚度的薄膜.薄膜材料折射率大,所需镀膜厚度小;薄膜材料折射率小,所需镀膜厚度大,但灵敏度较前者要高,当然薄膜愈厚,镀膜成本及工艺要求也愈高.

4 结论

本文通过修正镀膜 LPFG 中包层模式的有效折射率范围,计算得到了包层模式有效折射率随薄膜厚度的关系曲线,从而说明了“模式转换”观点中高低次模式取代说法是不合理的,并将“模式转换区”重命名为“模式全区”.通过计算包层模式的功率分布以及薄膜层中功率占总功率密度的比值,说明了“模式转换”中提到的当薄膜厚度到达一定值时,较低次包层模式进入薄膜层传输的观点是不合理的,并指出薄膜厚度达到一定值时,只是光功率分布会越来越集中在薄膜层内部,并非沿着薄膜层传输.对于镀膜 LPFG 传感器的薄膜优化问题,文中通过比较修正包层模有效折射率前后的优化结果,说明了包层模有效折射率修正前的优化结果是不合理的,并指出错误的原因;而包层模有效折射率修正后得到合理的优化结果,该结果具有可寻的规律性,对于镀膜 LPFG 传感器设计具有重要的指导意义.

参考文献

- [1] WANG Yan-tao, JIANG Feng-xian, QIAO Yin-zhuang. Study on concentration measurement of ammonia nitrogen based on a cascaded fiber grating[J]. *Optical Instruments*, 2015, **37**(3):195-198.
王燕涛,姜凤贤,乔引庄. 基于级联光栅的氨氮质量浓度检测[J]. *光学仪器*, 2015, **37**(3):195-198.
- [2] RUAN Juan, ZENG Qing-ke, QIN Zi-xiong, et al. Design on high sensitivity temperature sensors based on long-period fiber gratings[J]. *Optical Instruments*, 2008, **30**(3):26-29.
阮隽,曾庆科,秦子雄,等. 高灵敏度长周期光纤光栅温度传感器的设计[J]. *光学仪器*, 2008, **30**(3):26-29.
- [3] NANDINI B, PALAS B, RICHARD M C, et al. Design of Palladium-Coated long-period fiber grating for hydrogen sensing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, **34**(21):4912-4919.
- [4] ZOU Fang, LIU Yun-qi, DENG Chuan-lu, et al. Refractive index sensitivity of nano-film coated long-period fiber gratings[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(2):1114-1124.
- [5] REES N D, JAMES S W, TATAM R P. Optical fiber long-period gratings with Langmuir-Blodgett thin-film overlays [J]. *Optics Letters*, 2002, **27**(9):686-688.
- [6] VILLAR I D, MATIAS I R, ARREGUI F J. Optimization of sensitivity in Long Period Fiber Gratings with overlay deposition[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(1):56-69.
- [7] CUSANO A, IADICICCO A, PILLA P, et al. Cladding mode reorganization in high-refractive-index-coated long-period gratings: effects on the refractive-index sensitivity[J]. *Optics Letters*, 2005, **30**(19):2536-2538.
- [8] YU Xiu-juan, ZHANG Min, WANG Li-wei, et al. Characteristics of long-period optical fiber grating with high refractive index nm-thick film overlay[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10):2665-2672.
于秀娟,张敏,王利威,等. 镀高折射率纳米膜的长周期光纤光栅特性研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10):2665-2672.

- [9] PILLA P, TRONO C, BALDINI F, *et al.* Giant sensitivity of long period gratings in transition mode near the dispersion turning point: an integrated design approach[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(19):4152-4154.
- [10] GU Zheng-tian, LAN Jing-long. Mode transition in absorption film coated long-period fiber grating and response characteristics of refractive index[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(7):0706003.
顾铮无, 蓝锦龙. 镀吸收型膜长周期光纤光栅模式转换与折射率响应特性[J]. 光学学报, 2013, **33**(7): 0706003.
- [11] GU Zheng-tian, LAN Jing-long. Design optimization of coated long-period fiber grating based on mode transition[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **41**(1): 0105007.
顾铮无, 蓝锦龙. 基于模式转换的镀膜长周期光纤光栅传感器的结构优化设计[J]. 中国激光, 2014, **41**(1): 0105007.
- [12] GU Zheng-tian, LAN Jing-long. Mode transition and refractive index response in long-period fiber grating coated with double-layer overlays including metal film[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(4): 0406005.
顾铮无, 蓝锦龙. 镀金属两层膜系长周期光纤光栅模式转换与折射率响应[J]. 光学学报, 2014, **34**(4): 0406005.
- [13] CHEN Hai-yun, PENG Bao-jin, SI Jian-xiao, *et al.* Film sensor based on long-period fiber grating with reduced cladding [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(1): 0106003.
陈海云, 彭保进, 斯剑霄, 等. 薄包层长周期光纤光栅薄膜传感器特性研究[J]. 光子学报, 2016, **45**(1): 0106003.
- [14] LAN Jing-long, GU Zheng-tian. The study of characteristics of cladding-reduced coated long- period fiber grating based on mode transition and dual peak resonance[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, **35**(11): 3230-3235.
蓝锦龙, 顾铮无. 基于模式转换及双峰谐振效应的薄包层镀膜长周期光纤光栅特性研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, **35**(11): 3230-3235.
- [15] GU Zheng-tian, XU Yan-ping. Design optimization of a long-period fiber grating with sol - gel coating for a gas sensor [J]. *Measurement Science and Technology*, 2007, **18**(11): 3530-3536.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China(No.60777035), the Scientific Research key Project Fund(No.208040), the Innovation Project of Shanghai Municipal Education Committee(No.1122131), and the Shanghai Leading Academic Discipline Project (No.S30502)

引用格式:GU Zheng-tian, FENG Wen-bin. New Understanding of “Mode Transition” of Coated Long Period Fiber Grating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(6): 0606002

顾铮无,冯文斌.关于镀膜长周期光纤光栅“模式转换”的新认识[J].光子学报, 2018, **47**(6): 0606002