

光纤端面微型传感单元的共振模式及影响因素

贾向杰, 郝鹏飞, 黎敏, 文晓艳, 吕海飞*

武汉理工大学理学院, 湖北 武汉 430070

摘要 首先在光纤端面设计一种由金光栅-介质-金薄膜构成的复合结构, 并研究多种共振模式随介质层厚度的变化及其场分布特点。然后研究限制在金光栅和金薄膜纳米级间距的波导共振模, 通过反射谱的变化和谐振模式的电场分布特点研究不同阶次的纳米谐振效应。此外, 还仿真计算金光栅的宽度、厚度及周期、中间介质层折射率和金反射薄膜厚度的变化对纳米谐振腔光谱特性的影响, 根据波导模干涉的相位差公式定性分析其谐振频率的变化, 并计算获得纳米谐振腔对腔内介质折射率和腔长的灵敏度。最后, 搭建微位移平台, 验证光纤端面与金薄膜所构成的 Fabry-Perot 干涉光谱随间距的变化, 并提出光纤端面纳米谐振结构的实现方案。

关键词 光纤光学; 纳米谐振腔; 金属光栅; TM_0 表面等离子体波; 光纤传感

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0206005

Resonance Modes and Influencing Factors of Micro Sensing Unit on Fiber End Face

Jia Xiangjie, Hao Pengfei, Li Min, Wen Xiaoyan, Lu Haifei*

School of Science, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China

Abstract First, a composite structure composed of gold grating, medium, and gold film is designed on the end face of optical fiber, and the variation of various resonance modes with the thickness of medium layer and their field distribution characteristics are studied. Then, the waveguide resonant modes limited to the nanometer spacing between the gold grating and the gold film are studied. The different order of nanometer resonance effects are studied by the variation of the reflection spectrum and the electric field distribution characteristics of the resonant mode. In addition, the simulation calculation of gold grating width, thickness, and cycle, intermediate medium layer refractive index and thickness of gold film changes on the spectral characteristics and the effect of nano-resonator based on waveguide mode interference phase difference formula of the qualitative analysis of the change of resonance frequency, and calculate the obtained nano-cavity on the sensitivity of the refractive index and the length of cavity medium. Finally, a micro-displacement platform is built to verify the Fabry-Perot interference formed spectrum with the distance between the optical fiber end face and the gold film, and the realization scheme of the optical fiber end face nano-resonance structure is proposed.

Key words fiber optics; nano-resonator; metal grating; TM_0 surface plasmon wave; optic fiber sensing

1 引言

光纤具有端面尺寸小、能够长距离传输以及良好的生物相容性等优点, 易于集成微型功能单元或材料, 能够作为微纳光学器件的集成平台^[1-2]。在一

根光纤上集成光学器件和微缩光路能够形成新型集成光学器件和光学微系统, 这一核心思想能够促进光纤集成技术的发展。近年来, LOF (Lab on Fiber) 技术已成为光纤集成技术的研究热点之一^[3-5]。LOF 技术结合纳米光子学成像技术和日渐

收稿日期: 2021-05-24; 修回日期: 2021-08-01; 录用日期: 2021-08-16

基金项目: 国家自然科学基金(11974266, 62075174, 11704293)

通信作者: *haifeilv@whut.edu.cn

成熟的微纳加工技术可以开发出新型光纤探针,该器件能够在小型化、功能化和整体性等方面发挥较好的优势。LOF 技术的关键在于选择合适的可功能化材料和根据实现原理设计功能性的微纳结构,将它们与光纤进行高度集成可以实现器件的小型化和一体化,从而进一步推动全光纤技术的发展^[6-7]。

光纤端面是一个独特的且非常规的微纳器件集成平台,目前已经有许多研究人员在光纤端面上设计、加工了图案结构并成功实现了传感。2011 年,Chen 等^[8]在光纤端面上刻蚀具有同心圆的金属光栅得到了圆柱矢量光束。2018 年,Quero 等^[9]在光纤端面上利用电子束刻蚀技术得到了圆柱纳米结构,利用该结构成功实现了 4.0, 4.5, 5.0 kHz 频率的声波探测。2019 年,Kim 等^[10]在光纤端面上刻蚀了金属方形阵列并制造出一种用于多参数传感的纳米探针,该器件成功实现了折射率和温度的双参数传感。科研人员虽然在光纤端面上成功加工了图案并实现了传感,但其设计多是基于单层图案结构。由于光纤的模场半径较小和单层微纳结构的消光效率较低,所以该类结构对光纤出射光的利用率较低。

若在光纤端面上集成光学谐振腔结构可以使出射光在微纳谐振腔内形成强烈共振,能够解决单层图案结构光利用率低的问题,从而使光纤器件达到一个新的维度。金属纳米结构-介质-金属反射镜结构具有超强的光场约束、超小的光学单元尺寸和可集成化等优点,已成为微纳谐振结构的强有力选择^[11]。2010 年,Hao 等^[12]仿真计算了金方盘-介质-金属结构中方盘的边长对共振模的影响。2015 年,Lu 等^[13]设计了金属圆环-介质-金属结构并数值仿真计算了外界环境折射率对共振模的影响。2016 年,Giaquinto 等^[14]在光纤端面上设计了金属光栅-介质-金属结构,并仿真计算了金属光栅宽度及介质层厚度对共振模的影响。2018 年,Luo 等^[15]设计了

掺有 MoS₂ 的金光栅-介质-金属结构,并仿真计算了金光栅厚度对共振模的影响。虽然科研人员研究了影响金属纳米结构-介质-金属薄膜结构中共振模的部分因素,但并未对共振模式的演变、模式的形成原因、特点及其影响因素进行系统性的研究,因此对单元结构中所支持模式的形成、特点及其影响因素进行透彻的研究是非常有必要的。

本文以典型的金光栅-介质-金纳米薄膜所构成的谐振腔结构作为研究对象,建立了二维结构模型并分析结构在不同介质层厚度下所产生的多种共振模式以及模式的形成机理和特点,该设计为结构在不同模式下的实际应用提供理论依据。特别的是,本文重点研究金光栅和金薄膜之间的距离小于半波长的纳米谐振腔效应,研究腔内光学波导模式(即 TM₀ 表面等离子体波)在干涉的情况下不同共振模式的电场分布情况;仿真分析金光栅的宽度、厚度和周期,以及中间介质层折射率和金反射薄膜厚度的变化对模式干涉和光谱特性的影响;计算纳米谐振腔对腔内介质折射率和腔长变化的灵敏度。本文的研究工作加深了对纳米谐振腔结构光学特性的理解,为在光纤端面的实现和应用提供基础。

2 谐振腔共振模式的分析

为了分析金光栅-介质-金纳米薄膜复合结构在不同介质层厚度下的共振模式,利用 FDTD Solutions 软件对谐振腔结构(图 1)的反射光谱进行计算,其中 t_m 为覆有金属薄膜的反射镜的厚度, t 和 n 分别为中间介质层的厚度和折射率, t_g 、 W 和 P 分别为金属光栅的厚度、宽度和周期。仿真过程中选用 PMMA (Polymethyl Methacrylate) 作为中间介质层,其折射率为 1.49^[16],金的介电常数采用 Johnson 等^[17]提供的测量数据,光纤的介电常数使用 Malitson^[18]提供的测量数据。

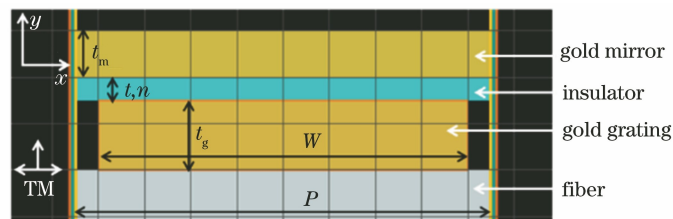


图 1 金光栅-介质-金纳米薄膜复合结构的二维仿真模型

Fig. 1 Two-dimensional simulation model of gold grating-insulator-gold film

设定金光栅的周期 $P = 900$ nm,高度 $t_g = 120$ nm,宽度 $W = 800$ nm,覆有金属薄膜的反射镜的厚度 $t_m = 100$ nm。当介质层厚度 t 不同时,微纳

谐振结构在 TE (Transverse Electric) 和 TM (Transverse Magneticmode) 光照射下的反射光谱如图 2 所示。从图 2(a)可以看到,当入射光为 TE

光时,该结构主要支持两类共振模式,一类是实线所标注的 F-P(Fabry-Perot)共振,这是由于 TE 光透过狭缝后传播到底部反射镜产生反射,这部分反射光会与金光栅顶部的反射光形成干涉,复合结构在 TM 光照射下也可找到相同的 F-P 共振模式,如图 2(b)所示。图 2 中不同斜率的直线则代表不同级数的 F-P 干涉。在 TE 光照射下,另一类模式则存在于较厚介质层所构成的复合结构,其谐振波长主要位于短波长范围,且波长随着介质层厚度 t 的增加而发生红移并趋于稳定,相同结构在 TM 光照射下也存在类似的模式。该类模式的形成可以归结

于波导结构的形成,即金光栅、金薄膜和中间介质层构成了金属狭缝波导,TE 和 TM 入射光均会透过金光栅后耦合到波导中。

当入射光为 TM 光时,复合结构除了能够支持 F-P 干涉模式和波导模式外,从图 2(b)还可看到周期性光栅结构所支持的布洛赫模式(SPP-BW,虚线),其共振波长在不同的介质层厚度下均保持不变,以及金光栅-介质-金膜所支持的 TM_0 波导共振模式(点划线),其共振波长随着介质层的厚度减小而缓慢红移,当介质层厚度减少到 100 nm 以下时,共振波长随介质层的厚度减小而快速红移。

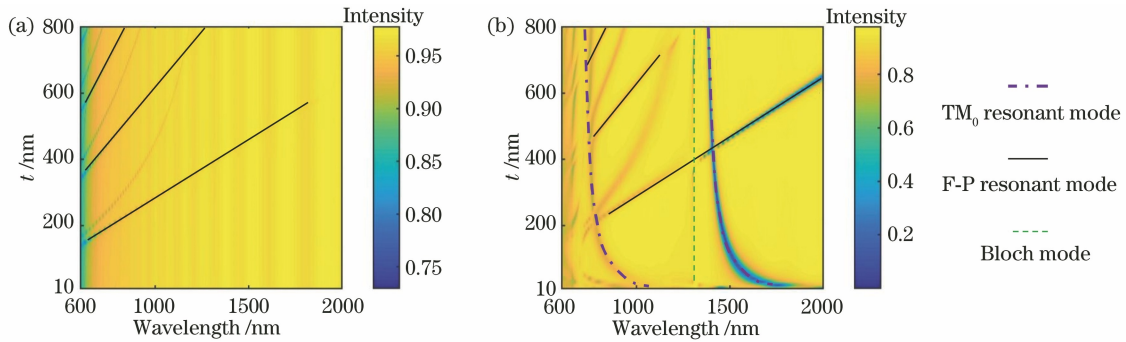


图 2 不同入射光下谐振腔的反射光谱。(a) TE 光入射;(b) TM 光入射

Fig. 2 Reflection spectra of resonator under different incident light. (a) TE light incident; (b) TM light incidence

为了进一步研究不同模式下的光学特性,在图 2(b)中选取介质层厚度 $t = 30$ nm 和 $t = 600$ nm 的复合结构来研究其在 TM 光照射下的反射光谱,如图 3 所示,其中 R 为反射率。从图 3(a)可以看到,当 $t = 30$ nm 时,1671.69,985.84,795.22 nm 的谐振波长对应三个不同阶数的 TM_0 共振模式,

1300.38 nm 的谐振波长对应金光栅-光纤界面处的布洛赫模式。从图 3(b)可以看到,当介质层厚度 t 增加到 600 nm 时,不同阶数下 TM_0 共振模式的波长均发生蓝移,而布洛赫模式的共振频率保持不变,此外 957.16 nm 和 1868.91 nm 波长处的 F-P 共振模式出现在图谱中。

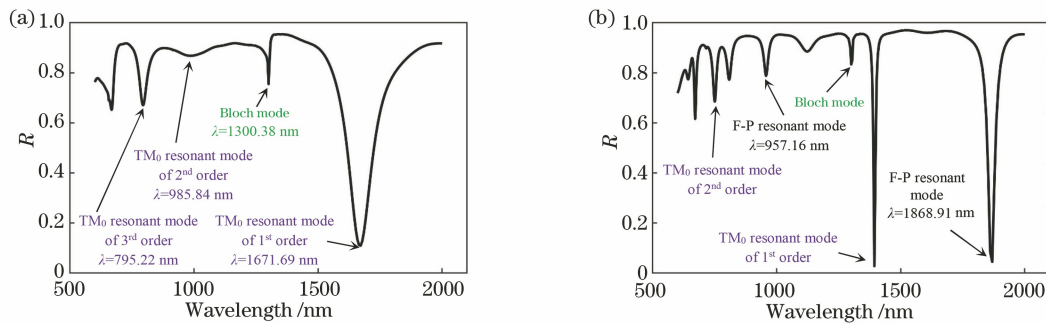


图 3 不同介质层厚度下 TM 光入射的反射光谱。(a) 30 nm;(b) 600 nm

Fig. 3 Reflection spectra of TM light incident at different dielectric layer thicknesses. (a) 30 nm; (b) 600 nm

对图 3(a)中 TM_0 共振模式下的电场分布图进行绘制,当以 TM 光入射以及 $t = 30$ nm 时,不同共振模式下电场 Y 分量的分布情况如图 4(a)~4(c)所示,其中图 4(a)~4(c)分别对应一阶、二阶和三阶模式下局域电场 Y 分量的分布情况。从图 4(a)~4(c)可以看到,电场主要束缚在金光栅和金薄膜所构成的介质狭

缝中且光场横向传输,明暗光斑的个数则直接反映了狭缝中 TM_0 波导模之间的干涉级数。对于布洛赫模式,其共振波长^[19]可表示为

$$\lambda = \frac{\Lambda}{m} \times \sqrt{\frac{\epsilon_m \epsilon_g \mu_m \mu_g}{\epsilon_m \mu_m + \epsilon_g \mu_g}}, \quad (1)$$

式中: Λ 为衍射光栅周期; m 为衍射级数; ϵ_m 和 μ_m

分别为金属反射镜的介电常数和磁导率; ϵ_g 和 μ_g 分别为金光栅的介电常数和磁导率。布洛赫模式下电场 Y 分量的分布情况如图 4(d)所示,可以看出该模式下的能量主要分布在光纤中并在光纤中横向传输。布洛赫表面波的共振波长与光栅周期和入射介

质相关,当两者固定时,该模式下的共振波长不变。不同于横向传输的 TM_0 共振模式和布洛赫模式,F-P 共振模式主要沿着光纤的纵向传输,这可以通过图 5(a)和图 5(b)的一阶和二阶 F-P 共振波长处腔内的电场分布情况来证明。

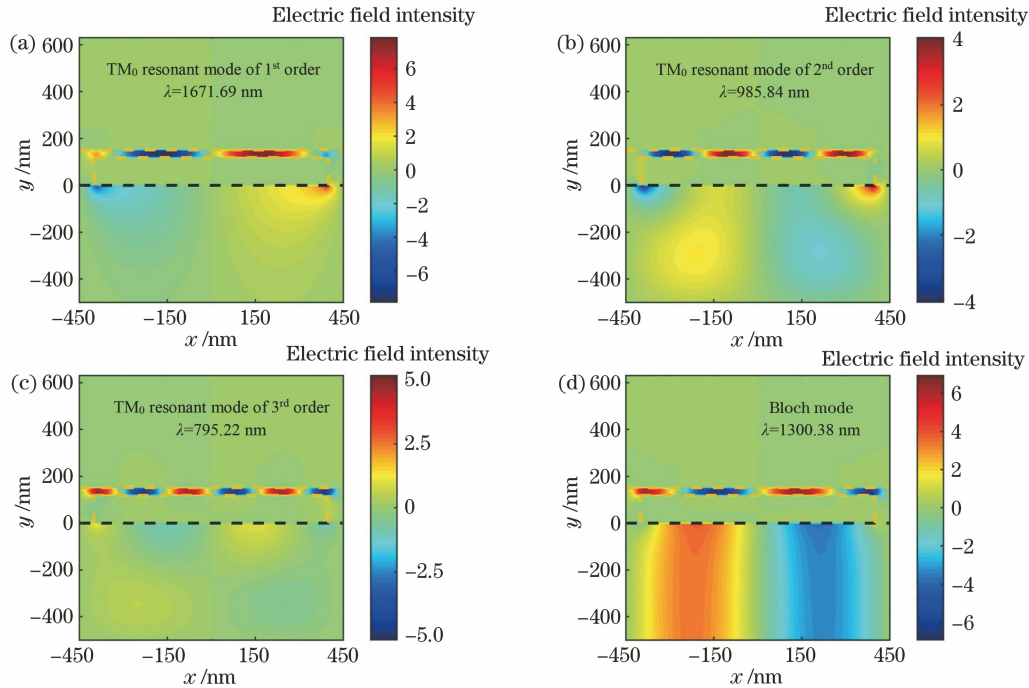


图 4 不同共振模式下 Y 向电场分量的分布情况。(a)一阶 TM_0 共振模式, $\lambda=1671.69$ nm;(b)二阶 TM_0 共振模式, $\lambda=985.84$ nm;(c)三阶 TM_0 共振模式, $\lambda=795.22$ nm;(d)布洛赫表面模式, $\lambda=1300.38$ nm

Fig. 4 Distribution of Y-direction electric field components under different resonance modes. (a) 1st order TM_0 resonance mode, $\lambda=1671.69$ nm; (b) 2nd order TM_0 resonance mode, $\lambda=985.84$ nm; (c) 3rd order TM_0 resonance mode, $\lambda=795.22$ nm; (d) Bloch surface mode, $\lambda=1300.38$ nm

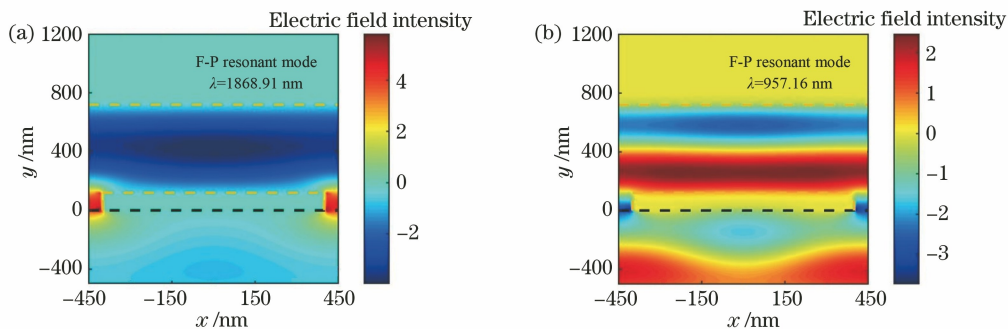


图 5 F-P 共振模式在以 TM 光入射和 $t=600$ nm 的情况下 X 向电场分量的分布情况。(a)一阶 F-P 共振模式, $\lambda=1868.91$ nm;(b)二阶 F-P 共振模式, $\lambda=957.16$ nm

Fig. 5 Distribution of X-direction electric field component in case of F-P resonance mode with TM light incident and $t=600$ nm. (a) 1st order F-P resonance mode, $\lambda=1868.91$ nm; (b) 2nd order F-P resonance mode, $\lambda=957.16$ nm

3 TM_0 共振模式的影响因素及灵敏度分析

3.1 结构参数对 TM_0 共振模波长的影响

根据第 2 节可知,布洛赫模式受入射介质和光

栅周期的影响,F-P 谐振模式的实现需要较长的腔长,而 TM_0 共振模式在金属光栅和金属薄膜之间的距离为几纳米到几百纳米的情况下均可以实现,这是实现纳米谐振的最佳选择。需特别指出的是,单

根金属纳米条和金属薄膜即可形成纳米谐振效应,其基本光学单元的面积远远小于 F-P 共振模式和布洛赫模式所需的结构面积,有望获得具有超小体积的纳米谐振腔。为了进一步研究纳米谐振腔结构的光学性质,除了第 2 节讨论了介质层厚度对其光学性质的影响,还需对谐振腔其他结构参数进行分析。

图 6 为 TM_0 共振模式的形成示意图。由金属纳米条和金属薄膜构成的纳米狭缝可以形成波导模式,即 TM_0 模。当 TM 光垂直入射到金属光栅-介质-金属结构时,金属纳米条两侧的底部均会被激发出相向传播的 TM_0 波,当其中一侧激发的 TM_0 波在狭缝中传播到另一侧时,由于狭缝处(区域 I)的有效折射率不同于区域 II 的有效折射率, TM_0 波会在界面处发生反射。与此同时,金属条的另一侧也会激发出另一束 TM_0 波,这束波会与反射的 TM_0 波同向传输,它们的相位差^[20]可以表示为

$$\begin{cases} \Delta\varphi = \pi + \Delta\varphi_p + \Delta\varphi_g \\ \Delta\varphi_p = 2\pi n_{\text{eff}}W/\lambda \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $\Delta\varphi_p$ 为 TM_0 模在金属狭缝波导中的传播相位; n_{eff} 为有效折射率; λ 为入射光波长; $\Delta\varphi_g$ 为相邻光栅之间由 TM_0 模反射带来的附加相位差。当相位差满足相干相消的条件时,纳米谐振腔发生共振效应,并表现出对入射光的消光吸收。因此,本文从共振条件入手,分析谐振腔的其他结构参数,如光栅宽度 W 、光栅厚度 t_g 、光栅周期 P 、中间介质折射率 n 以及金膜反射镜厚度 t_m 对 TM_0 共振模波长的影响。

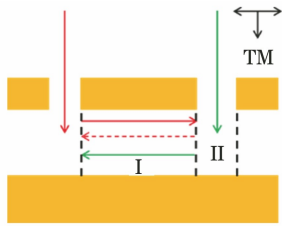


图 6 TM_0 模式的共振示意图

Fig. 6 Resonance diagram of TM_0 mode

为了求解有效折射率,使用图 7 的对称金属包覆介质波导模型。当一块介电常数为 ϵ_1 的介质板被两块介电常数均为 ϵ_2 的半无限大金属板夹在中间,并且相距很近时,就会形成金属-介质-金属波导结构,如图 7 所示。

根据导波光学对波导结构所支持的模式进行分析,就能够得到波导所支持的传导模式的有效折射率。金属包覆平板介质波导结构的模式本征方程^[21]为

$$\kappa_1 d = m\pi + 2\varphi, \quad (3)$$

式中: $m=0,1,2,\dots$; κ_1 和不同模式下的 φ 可分别表

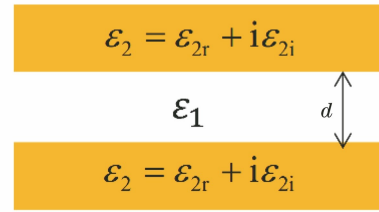


图 7 对称金属包覆介质波导模型

Fig. 7 Symmetric metal-coated dielectric waveguide model 示为

$$\begin{cases} \varphi^{\text{TE}} = \arctan\left(\frac{\alpha_2}{\kappa_1}\right) \\ \varphi^{\text{TM}} = \arctan\left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \cdot \frac{\alpha_2}{\kappa_1}\right), \\ \kappa_1 = (k_0^2 \epsilon_1 - \beta^2)^{1/2} \\ \alpha_2 = (\beta^2 - k_0^2 \epsilon_2) \end{cases}, \quad (4)$$

式中: β 为导模的传播常数; k_0 为光在自由空间的波数。

3.1.1 光栅宽度和中间介质层折射率对 TM_0 共振模波长的影响

当周期 $P=900$ nm、光栅厚度 $t_g=120$ nm、中间介质层厚度 $t=70$ nm 和金膜反射镜厚度 $t_m=100$ nm 时,不同光栅宽度 W 下的反射谱如图 8(a) 所示。从图 8(a) 可以看出,只有当光栅宽度 W 达到一定值后,才能实现金属狭缝中 TM_0 模式的强烈共振; TM_0 共振模的波长随着光栅宽度的增加而红移,且消光强度先增强后减弱。

由(2)式可知, TM_0 共振模的波长可以表示为

$$\lambda = \frac{2\pi n_{\text{eff}}W}{\Delta\varphi - (\pi + \Delta\varphi_g)}. \quad (5)$$

当狭缝中形成的 TM_0 模式产生强烈共振吸收时,利用介质波导的色散方程可以计算得到 MIM 结构在不同波长下的有效折射率,结果如图 8(b) 所示。结合图 8(b) 及(5)式可以得出,只有当 W 满足一定宽度时,才能实现 TM_0 模式在狭缝中发生干涉相消;当金属狭缝中的 TM_0 模式产生共振时,随着 W 的增加,共振波长发生红移。 TM_0 模干涉消光深度先增强后减弱的现象可以解释为随着 W 的增加,耦合进狭缝波导介质层的能量逐渐增多,导致 TM_0 模式共振增强;但是当 W 增加超过一定值时,大部分入射光会被金属光栅反射回去,导致耦合进介质层的能量降低,消光深度减弱。

当 $P=900$ nm、 $W=800$ nm、 $t_g=120$ nm、 $t=70$ nm 和 $t_m=100$ nm 时,不同中间介质层折射率 n 下的反射谱如图 9(a) 所示。从图 9(a) 可以看出,当

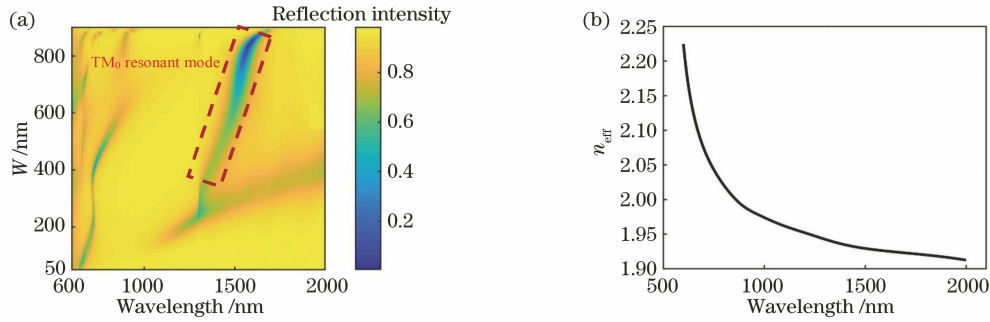


图 8 MIM 结构在腔长 $t=70$ nm 下的性能。(a) 不同光栅宽度 W 下的反射谱色图; (b) TM_0 共振模有效折射率随波长的变化曲线
Fig. 8 Performance of MIM structure with cavity length $t=70$ nm. (a) Reflection spectrum chromatrics at different grating widths W ; (b) variation curve of effective refractive index of TM_0 resonant mode with wavelength

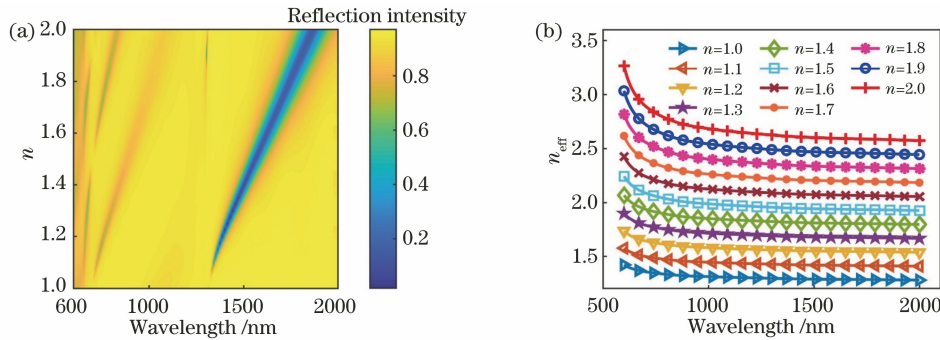


图 9 不同中介质层折射率下 MIM 结构的性能。(a) 反射谱色图; (b) TM_0 共振模有效折射率随波长的变化曲线
Fig. 9 Performance of MIM structure under different refractive index of intermediate dielectric layer. (a) Reflection spectrum chromatrics; (b) variation curve of effective refractive index of TM_0 resonant mode with wavelength

中介质层折射率增加时, TM_0 共振波长发生红移。利用介质波导的色散方程计算不同中介质层折射率下 MIM 结构的有效折射率, 结果如图 9(b) 所示, 可以看到随着中介质层折射率 n 的增加, MIM 结构的有效折射率 n_{eff} 也逐步增加。综合图 9(b) 及(5)式可以得出, 当中介质层折射率增加时, TM_0 共振波长发生红移。

3.1.2 光栅厚度、光栅周期和金反射镜厚度对 TM_0 共振模波长的影响

当 $P=900$ nm、 $W=800$ nm、 $t=70$ nm、 $n=1.49$ 和 $t_m=100$ nm 时, 不同光栅厚度 t_g 下的反射谱如图 10(a) 所示, 可以看出随着光栅厚度 t_g 的增加, TM_0 共振波长发生红移。通过图 10(b) 和图 10(c) 的电场图可以看出, 当光栅厚度 t_g 较大时,

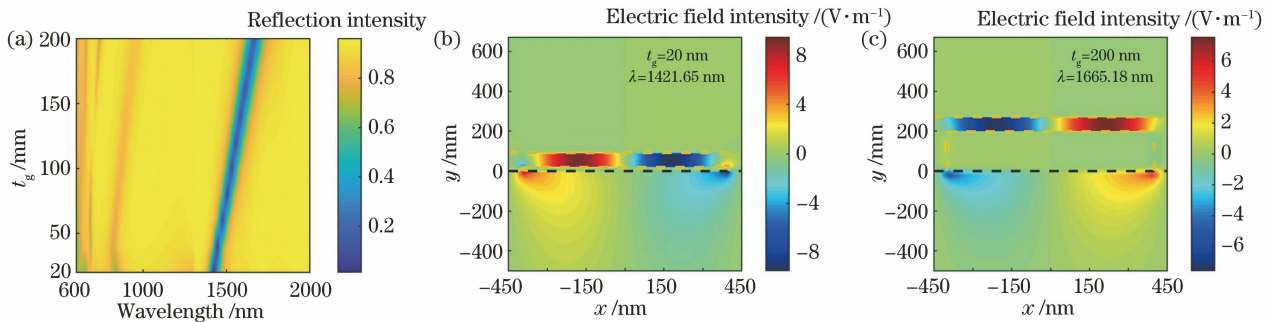


图 10 不同光栅厚度 t_g 下的反射谱色图和共振波长处的 Y 向电场分量。(a) 不同光栅厚度 t_g 下的反射谱色图; (b) $t_g=20$ nm, 共振波长处的 Y 向电场分量; (c) $t_g=200$ nm, 共振波长处的 Y 向电场分量

Fig. 10 Reflection spectrum chromatrics and Y-direction electric field component at resonant wavelength under different grating thicknesses t_g . (a) Reflection spectrum chromatrics under different grating thicknesses t_g ; (b) $t_g=20$ nm, Y-direction electric field component at resonance wavelength; (c) $t_g=200$ nm, Y-direction electric field component at resonance wavelength

光栅与金属层对 TM_0 共振模的限制作用更强。金光栅层厚度的变化直接改变了 TM_0 模的有效折射率 n_{eff} , 其值随着金光栅厚度的增加而增大, 基于 (5) 式可知纳米复合结构的谐振波长会发生红移。

当 $W=800\text{ nm}$ 、 $t_g=120\text{ nm}$ 、 $t=70\text{ nm}$ 、 $n=1.49$ 和 $t_m=100\text{ nm}$ 时, 不同光栅周期 P 下的反射谱如图 11(a) 所示。从图 11(a) 可以看出, 随着光栅

周期 P 的增加, TM_0 共振波长发生红移且消光强度减弱。光栅周期 P 的增加对应于图 6 中 II 区宽度的增加, 这会影响 TM_0 模在 I 区和 II 区界面处的反射相位 $\Delta\varphi_g$, 共振波长随着光栅周期的增加而发生红移。由图 11(b) 和图 11(c) 的电场图可以看出, 当光栅周期 P 增加时, 电场能量被分散, 耦合到波导模式的能量减少, 所以共振模式的强度越来越弱。

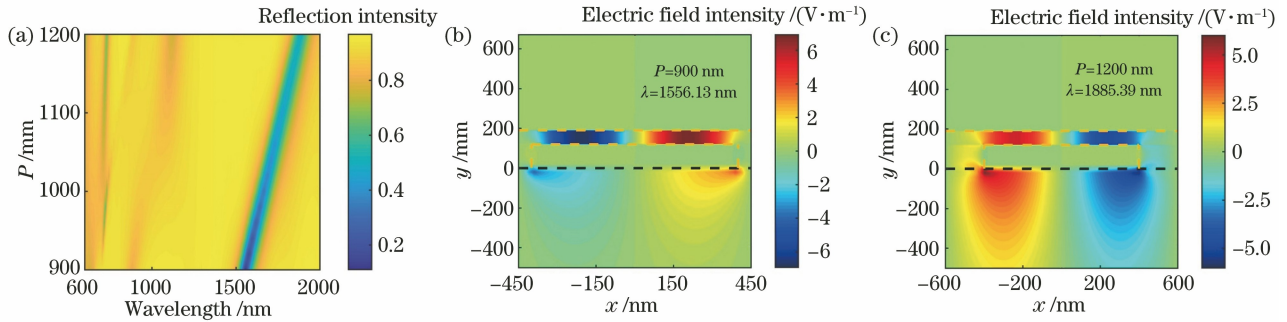


图 11 不同光栅周期 P 下的反射谱色图和共振波长处的 Y 向电场分量。(a) 不同光栅周期 P 下的反射谱色图; (b) $P=900\text{ nm}$, 共振波长处的 Y 向电场分量; (c) $P=1200\text{ nm}$, 共振波长处的 Y 向电场分量

Fig. 11 Reflection spectrum and Y-direction electric field component at resonant wavelength under different grating periods P . (a) Reflection spectrum chromatrics under different grating periods P ; (b) $P=900\text{ nm}$, Y-direction electric field component at resonance wavelength; (c) $P=1200\text{ nm}$, Y-direction electric field component at resonance wavelength

当 $P=900\text{ nm}$ 、 $W=800\text{ nm}$ 、 $t_g=120\text{ nm}$ 、 $t=70\text{ nm}$ 和 $n=1.49$, 不同金膜反射镜厚度 t_m 下的反射谱如图 12(a) 所示。从图 12(a) 可以看出, 随着金膜反射镜厚度 t_m 的增加, TM_0 共振波长发生红移并最终稳定不变。通过图 12(b) 和图 12(c) 的电场图可以看出, 当金膜反射镜厚度 t_m 较薄时, 两金属

层对 TM_0 模的限制作用较弱, 部分光会泄漏至金属反射镜的背面。计算 n_{eff} 的过程中, 模型金属层的厚度都是半无限大, 因此金膜厚度越大, 越接近 MIM 结构的 n_{eff} 。当金膜反射镜厚度 t_m 达到一定厚度时, TM_0 模的有效折射率不再变化, 共振波长保持不变。

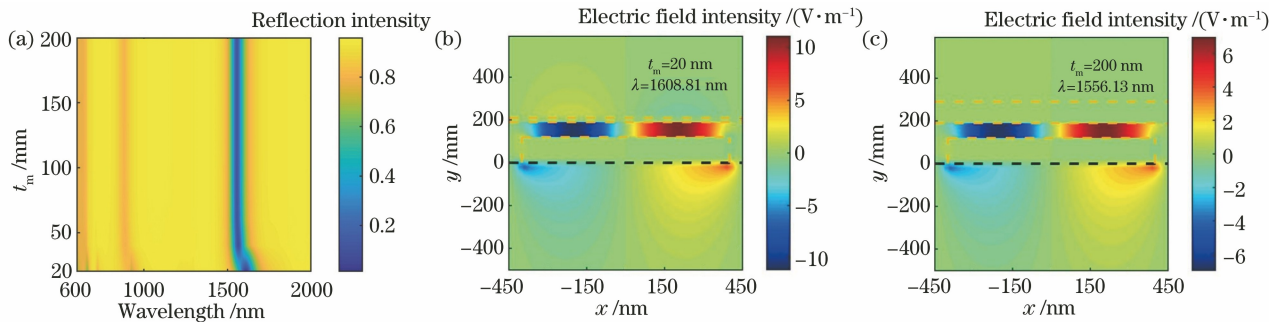


图 12 不同金膜反射镜厚度 t_m 下的反射谱色图和共振波长处的 Y 向电场分量。(a) 不同金膜反射镜厚度 t_m 下的反射谱色图; (b) $t_m=20\text{ nm}$, 共振波长处的 Y 向电场分量; (c) $t_m=200\text{ nm}$, 共振波长处的 Y 向电场分量

Fig. 12 Reflection spectrum chromatrics and Y-direction electric field component at resonant wavelength under different gold film reflector thicknesses t_m . (a) Reflection spectrum chromatrics under different gold film reflector thicknesses t_m ; (b) $t_m=20\text{ nm}$, Y-direction electric field component at resonance wavelength; (c) $t_m=200\text{ nm}$, Y-direction electric field component at resonance wavelength

3.2 TM_0 共振模灵敏度分析

为了分析纳米谐振腔结构中 TM_0 共振模的潜在应用价值, 分别仿真计算了不同介质层折射率 n

(1.0~1.4, 间隔为 0.1) 和不同腔长 t' (10~50 nm, 间隔为 10 nm) 下的反射光谱, 并计算纳米谐振腔的折射率灵敏度 $S_n = d\lambda/dn$ 和腔长灵敏度 $S_{t'} =$

$d\lambda/dt'$ 。为了分析纳米谐振腔的灵敏度变化,可将(5)式化简为

$$\lambda = \frac{2\pi n_{\text{eff}} W}{\Delta\varphi - (\pi + \Delta\varphi_g)} = \frac{2\pi W}{C n_{\text{eff}}(\lambda)} \quad (6)$$

式中: C 为常数。

图 13(a)为固定腔内介质折射率 n 后,纳米谐振腔的共振波长随腔长 t' 的变化情况。由图 13(a)可知,对于固定腔内介质折射率后的纳米谐振腔来说,其腔长灵敏度随着腔长的变小而逐渐变大。以 $n = 1.4$ 为例,不同腔长 t' 下的有效折射率如图 13(b)所示,其中标注“X”的位置为共振波长处的 n_{eff} 。从图 13(b)可以看出,随着谐振腔腔长 t' 的不断减小,有效折射率 n_{eff} 逐渐变大,谐振波长的差值不断增加,所以纳米谐振腔的腔长灵敏度随着腔长 t' 的变小而逐渐增加。表 1 给出了纳米谐振腔对腔长变化的响应灵敏度数据。图 13(c)为固定纳米谐

振腔的腔长 t' 后,纳米谐振腔的共振波长随折射率 n 的变化情况。由图 13(c)可知,对于固定腔长后的纳米谐振腔来说,折射率灵敏度接近线性。以 $t' = 50 \text{ nm}$ 为例,不同腔内介质折射率下的有效折射率如图 13(d)所示,可以看出随着谐振腔内折射率的不断增加,有效折射率 n_{eff} 呈线性变化,因此折射率灵敏度可以通过线性拟合来获得。表 2 为不同腔长的谐振腔对腔内介质折射率变化的响应灵敏度数据。

综合图 13(a)和表 1 可知,对于同一腔长和不同腔内介质折射率的谐振腔结构,若腔内介质的折射率越大,则谐振腔结构越能灵敏地反映腔长的变化。综合图 13(c)和表 2 可知,对于不同腔长的纳米谐振腔结构,若腔长越小,则谐振腔结构对腔内介质的折射率灵敏度越高。因此,若要获得较大腔长变化灵敏度的纳米谐振腔,则腔长需要尽量小,折射率尽量大;若要实现高腔内介质折射率变化灵敏度的纳米谐振腔,则腔长需要尽量小。

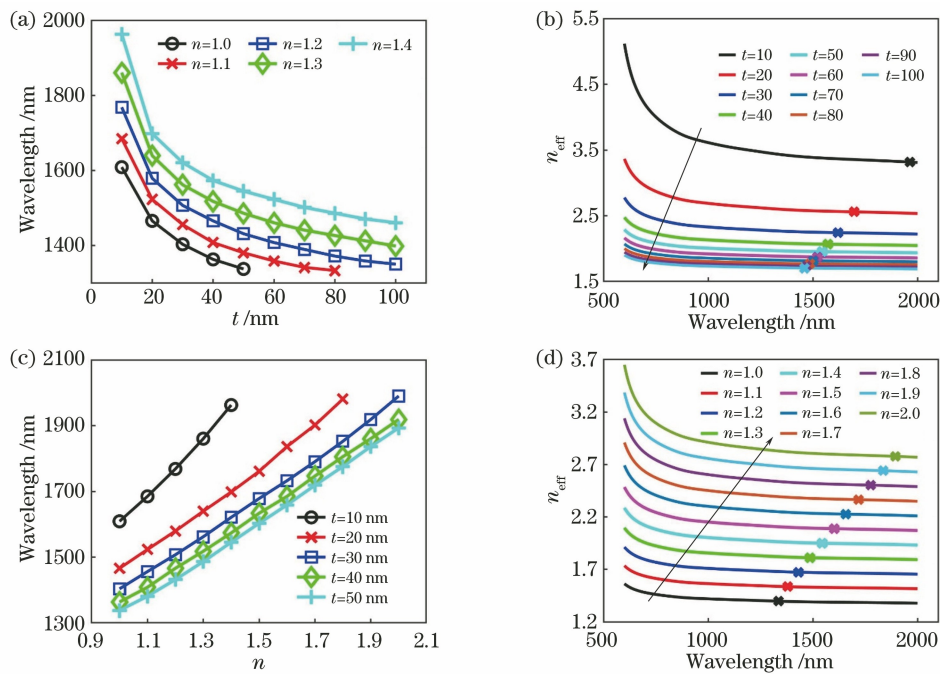


图 13 纳米谐振腔的谐振波长和有效折射率在不同情况下的性能曲线。(a)固定腔内介质折射率后,纳米谐振腔的谐振波长随腔长的变化;(b)腔内介质折射率 $n = 1.4$,不同腔长下纳米谐振腔的有效折射率;(c)固定腔长后,纳米谐振腔的谐振波长随折射率的变化;(d)腔长 $t = 50 \text{ nm}$,不同折射率下纳米谐振腔的有效折射率

Fig. 13 Performance curves of resonant wavelength and effective refractive index of nano-resonator under different conditions. (a) After refractive index of medium in cavity is fixed, resonant wavelength of nano-resonator varies with length of the cavity; (b) refractive index n of medium in cavity is 1.4, and effective refractive index of nano-resonator with different cavity lengths; (c) after cavity length is fixed, resonant wavelength of nano-resonator varies with refractive index; (d) cavity length $t = 50 \text{ nm}$, effective refractive index of nano-resonator under different refractive index

表 1 固定腔内介质折射率后纳米谐振腔对腔长变化的响应灵敏度

Table 1 Response sensitivity of nano-resonator to cavity length variation with fixed refractive index of medium in cavity

Length sensitivity $(\lambda_i - \lambda_j) / 10$	Refractive index				
	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4
$(\lambda_{10 \text{ nm}} - \lambda_{20 \text{ nm}}) / 10$	14.33	16.20	18.93	22.11	26.50
$(\lambda_{20 \text{ nm}} - \lambda_{30 \text{ nm}}) / 10$	6.25	6.74	7.23	7.78	7.72
$(\lambda_{30 \text{ nm}} - \lambda_{40 \text{ nm}}) / 10$	4.02	4.79	4.13	4.43	4.77
$(\lambda_{40 \text{ nm}} - \lambda_{50 \text{ nm}}) / 10$	2.56	2.73	3.43	3.16	2.84

表 2 不同腔长的谐振腔对腔内介质折射率变化的响应灵敏度

Table 2 Response sensitivity of resonator with different cavity length to refractive index change of medium in cavity

Parameter	Cavity length / nm				
	10	20	30	40	50
Refractive index sensitivity $/(nm \cdot RIU^{-1})$	884.86	639.77	581.86	562.37	565.63

4 微纳谐振结构的设计

针对光纤端面的微纳谐振效应,本文开展了初步的实验研究。图 14 为光纤端面上金光栅结构的扫描电子显微镜(SEM)照片,该结构通过离子束刻蚀来获得。之后,利用图 15(a)的微位移平

台,通过控制光纤端面与镀制在硅片上的金薄膜(厚度为 100 nm)之间的距离,验证了二者所构成的 F-P 干涉谱随间距的变化关系,如图 15(d)所示。由于微位移平台的精度,光纤端面与金薄膜表面之间存在一定的夹角,未能实现二者间的纳米级间距。

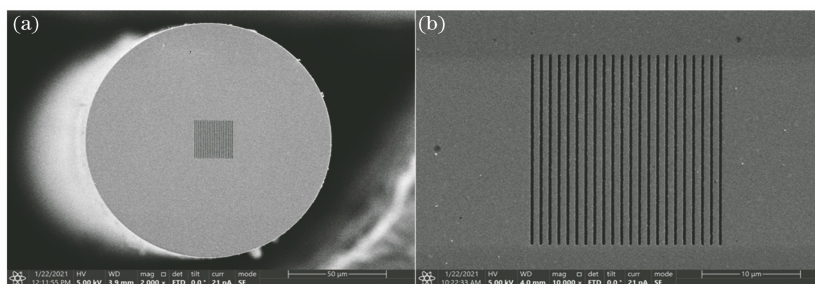
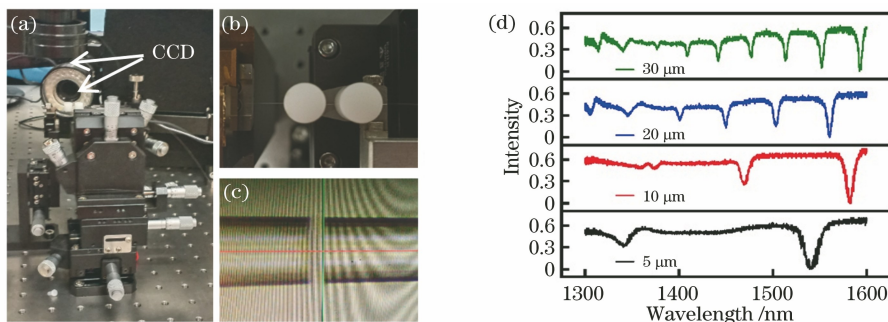
图 14 光纤端面光栅放大不同倍数下的 SEM 图。(a) 2000 \times ;(b) 10000 \times Fig. 14 SEM images under different magnification of fiber end grating . (a) 2000 \times ; (b) 10000 \times 

图 15 装配系统实物图及 F-P 谐振干涉谱。(a) 五维位移控制平台、观察水平面和垂直面的 CCD;

(b) 光纤夹具与金反射镜平台;(c) CCD 观测光纤靠近金反射镜的位置示意图;(d) 不同距离下的 F-P 谐振干涉谱

Fig. 15 Assembly system diagram and F-P resonant interference spectrum. (a) Five-dimensional displacement control platform, CCDs in horizontal and vertical planes; (b) optical fiber clamp and gold mirror platform; (c) position relative position of optical fiber and gold mirror observed by CCD; (d) F-P resonant interference spectra at different distances

为了在光纤端面上制备具有微纳谐振效应的复合结构,设计图 16 的制备工艺流程,采用湿法转移的方法将 PMMA 和金的复合薄膜转移至光纤端面,通

过调节中间 PMMA 聚合物层的厚度来调节纳米谐振腔的腔长,并研究其光学谐振模式随聚合物层厚度的变化关系,相关的研究工作也正在进行中。

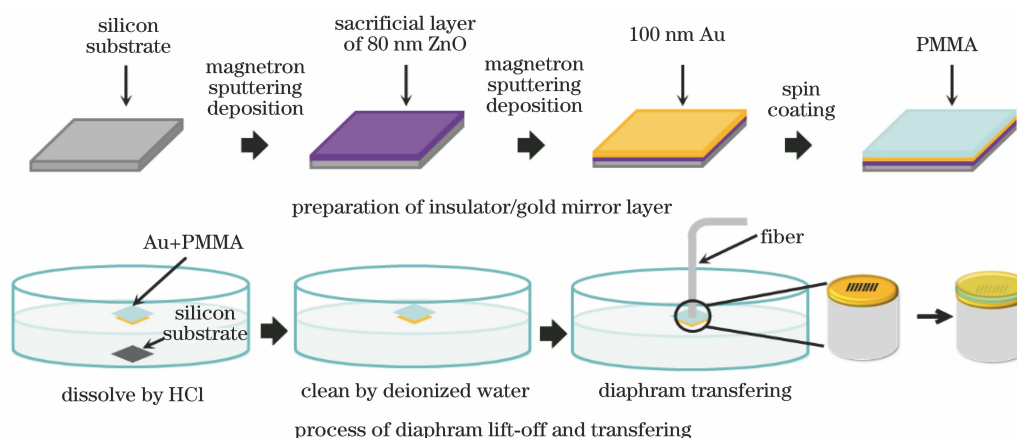


图 16 光纤端面纳米谐振结构的装配流程图

Fig. 16 Assembly flowchart of optical fiber end nano-resonant structure

5 结 论

本文在光纤端面上设计了谐振结构,构建了金光栅-介质-金薄膜的微纳谐振结构,通过数值仿真软件计算了不同介质层厚度的谐振结构在不同偏振光入射下的反射谱,并根据反射谱的变化分离出不同的谐振模式,即 SPP-BW 共振模式、 TM_0 共振模式和 F-P 共振模式。基于谐振模式的电场分布情况,说明不同谐振模式的特点。之后,研究了金光栅宽度、厚度及周期、中间介质层折射率和金薄膜反射镜厚度对纳米谐振腔中 TM_0 共振模式的影响;分别分析并计算了纳米谐振效应下结构对腔内介质层腔长和折射率的灵敏度。最后,搭建了微位移平台,验证了光纤端面与金薄膜所构成的 F-P 干涉光谱随间距的变化,并对光纤端面纳米谐振结构提出了实现方案。本论文的研究工作可以为光纤端面纳米谐振腔结构的实现及传感应用奠定理论依据。

参 考 文 献

- [1] Vaiano P, Carotenuto B, Pisco M, et al. Lab on fiber technology for biological sensing applications [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2016, 10(6): 922-961.
- [2] Teixeira J G V, Leite I T, Silva S, et al. Advanced fiber-optic acoustic sensors [J]. *Photonic Sensors*, 2014, 4(3): 198-208.
- [3] Ricciardi A, Crescitelli A, Vaiano P, et al. Lab-on-fiber technology: a new vision for chemical and biological sensing [J]. *The Analyst*, 2015, 140(24): 8068-8079.
- [4] Consales M, Ricciardi A, Crescitelli A, et al. Lab-on-fiber technology: toward multifunctional optical nanoprobe [J]. *ACS Nano*, 2012, 6(4): 3163-3170.
- [5] Pisco M, Cusano A. Lab-on-fiber technology: a roadmap toward multifunctional plug and play platforms [J]. *Sensors*, 2020, 20(17): E4705.
- [6] Kostovski G, Stoddart P R, Mitchell A. The optical fiber tip: an inherently light-coupled microscopic platform for micro- and nanotechnologies [J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(23): 3798-3820.
- [7] Liberale C, Minzioni P, Bragheri F, et al. Miniaturized all-fiber probe for three-dimensional optical trapping and manipulation [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(12): 723-727.
- [8] Chen W B, Han W, Abeysinghe D C, et al. Generating cylindrical vector beams with subwavelength concentric metallic gratings fabricated on optical fibers [J]. *Journal of Optics*, 2011, 13(1): 015003.
- [9] Quero G, Vaiano P, Fienga F, et al. A novel lab-on-fiber radiation dosimeter for ultra-high dose monitoring [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 17841.
- [10] Kim H T, Yu M. Lab-on-fiber nanoprobe with dual high-Q Rayleigh anomaly-surface plasmon polariton resonances for multiparameter sensing [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 1922.
- [11] Luo X G. Principles of electromagnetic waves in metasurfaces [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2015, 58(9): 594201.
- [12] Hao J M, Wang J, Liu X L, et al. High performance optical absorber based on a plasmonic metamaterial [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(25): 251104.
- [13] Lu X Y, Wan R G, Zhang T Y. Metal-dielectric-metal based narrow band absorber for sensing applications [J]. *Optics Express*, 2015, 23(23): 29842-29847.
- [14] Giaquinto M, Ricciardi A, Cutolo A, et al. Lab-on-fiber plasmonic probes for ultrasound detection: a comparative study [J]. *Journal of Lightwave*

- Technology, 2016, 34(22): 5189-5198.
- [15] Luo X, Zhai X, Wang L L, et al. Enhanced dual-band absorption of molybdenum disulfide using a plasmonic perfect absorber [J]. *Optics Express*, 2018, 26(9): 11658-11666.
- [16] Sultanova N, Kasarova S, Nikolov I. Dispersion properties of optical polymers [J]. *Acta Physica Polonica A*, 2009, 116(4): 585-587.
- [17] Johnson P B, Christy R W. Optical constants of the noble metals[J]. *Physical Review B*, 1972, 6(12): 4370-4379.
- [18] Malitson I H. Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1965, 55(10): 1205-1209.
- [19] Barnes W L, Murray W A, Dintinger J, et al. Surface plasmon polaritons and their role in the enhanced transmission of light through periodic arrays of subwavelength holes in a metal film [J]. *Physical Review Letters*, 2004, 92(10): 107401.
- [20] Bai C Y, Chen J, Zhang Y X, et al. Shift of the surface plasmon polariton interference pattern in symmetrical arc slit structures and its application to Rayleigh metallic particle trapping [J]. *Optics Express*, 2020, 28(14): 21210-21219.
- [21] Cao Z Q. Guided wave optics[M]. Beijing: Science Press, 2007: 127-165.
曹庄琪. 导波光学[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 127-165.