

基于乙醇密封共振腔金属-介质-金属波导的高性能温度和折射率两用传感器*

祁云平^{1)†} 张婷¹⁾ 郭嘉¹⁾ 张宝和¹⁾ 王向贤²⁾

1) (西北师范大学物理与电子工程学院, 兰州 730070)

2) (兰州理工大学理学院, 兰州 730050)

(2020年3月17日收到; 2020年5月11日收到修改稿)

为了提高现有的亚波长量级温度传感器和折射率传感器的各项工作性能, 本文基于表面等离激元提出了一种拥有尖锐峰的高灵敏度、高集成度的环八边形表面等离激元共振传感器. 理论分析了以乙醇作为热敏填充材料使温度和有效折射率建立线性转换关系的可行性, 并利用多模耦合模式理论 (MICMT) 对该传感器的透射峰进行了拟合和理论分析, 再利用有限元法 (FEM) 进行了仿真分析, 理论结果和仿真结果高度匹配. 然后对环八边形共振腔的各项参数进行了有限元数值模拟, 计算得出该传感器的最佳参数设置. 和以往结构设计对比, 该两用传感器拥有工作波段范围广、半峰全宽窄、易于集成等诸多优点, 作为传感器的温度灵敏度和折射率灵敏度分别高达 $0.9 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 和 $2400 \text{ nm}/\text{RIU}$. 该结构兼具一些传统腔体的优点, 为以后基于表面等离激元设计的微纳光子温度传感和折射率传感两用器件提供了一种高性能的腔体选择.

关键词: 表面等离激元, 温度传感器, 折射率传感器, 多模耦合模式理论

PACS: 73.20.Mf, 42.79.Gn, 73.40.Rw

DOI: 10.7498/aps.69.20200405

1 引言

对于现代光电子器件和集成光学元件, 器件的小型化和信息处理高速化是历史发展的潮流所在, 传统的光子器件受光的衍射极限的影响, 尺寸一直被限制在一个较大的范围, 而电子器件和光子器件尺寸量级的不匹配也进一步影响了系统的信息处理速度. 表面等离激元 (surface plasmon polaritons, SPPs) 是金属表面电荷与光波电磁场相互作用集体振荡从而使得电磁场被局限在小范围内并产生增强的一种现象^[1], 此种现象的产生使得 SPPs 不仅可以突破光的衍射极限, 还拥有对金属种类、介质环境、纳米级外形和尺寸的高度敏感特性. 因此基于 SPPs 设计的光子器件不仅可以实现亚波长

尺寸的集成, 更为研究复杂功能的微纳光子器件提供了可能. 近几年, 各种基于 SPPs 的波导结构被设计出来用于制作各类光子器件, 在众多结构设计中, 金属-绝缘体-金属 (metal-insulator-metal, MIM) 波导以亚波长尺寸量级、结构简单、易于集成、可靠性高等优点而受到国内外学者的广泛关注^[2,3]. 就目前而言, 基于 MIM 波导结构设计的各种功能的光子器件如分光器^[4]、滤波器^[5,6]、传感器^[7-9]、光开关^[10]、布拉格反射器^[11]等, 都从理论和实验中得到了论证并取得了显著的成果.

在众多光子器件中^[12-18], 微纳传感器件是研究的热点所在, 其中又以折射率传感器, 温度传感器和 SPR 生物传感器为重点. 在过去的几年中, 研究者基于表面等离激元共振 (surface plasmon resonance, SPR) 已经设计出许多具有代表性的折

* 国家自然科学基金 (批准号: 61367005, 61865008)、甘肃省自然科学基金 (批准号: 17JR5RA078) 和西北师范大学青年教师科研能力提升计划 (批准号: NWNNU-LKQN2020-11) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: qiyunping@nwnu.edu.cn

射率传感器和温度传感器, 而灵敏度 (sensitivity, S) 是评判这些传感器性能最重要的参数. 目前, 在折射率传感器和温度传感器的研究成果中, 2017年 Li 等^[19]设计了一种双圆形腔体波导贯通型折射率传感器, 提出了包含耦合相位的多模耦合模式理论 (multimode interference coupled mode theory, MICMT) 和简并干涉耦合模式理论详细地解释了三种不同的 Fano 共振现象, 该折射率传感器灵敏度为 840 nm/RIU. 2014年 Wu 等^[20]研究了一种基于表面等离子体波导 (surface plasmonic waveguides, SPWs) 的乙醇密封矩形腔体纳米温度传感器, 该温度传感器的灵敏度为 0.65 nm/°C, 半峰全宽 (full width at half maximum, FWHM) 为 50.6 nm, 在工作波段该传感器只有两个共振峰. 2019年 Liu 等^[21]在 Wu 等^[20]的研究基础上将石墨烯条带引入 MIM 集成的矩形腔体中, 使石墨烯共振模和矩形腔的 TM_{10} 模之间产生相干耦合形成 Fano 共振, 不仅增加了尖锐共振峰的数量, 还为设计高灵敏度传感器提供了理论依据. 折射率传感器的测量是通过纳米纤维将光耦合到传感器中, 由 JY 共聚焦拉曼显微镜进行输出光的检测^[20]. 因此透射峰越尖锐、FWHM 越窄, 振幅越大, 波谷越小会使得测量结果更加准确, 本文将具有上述特性的透射峰定义为质量好. 而随着 SPPs 在传感器领域的深入研究, 简单的 MIM 波导结构和复杂的纳米阵列结构^[22]、多腔体耦合结构^[23]、波导-腔体-石墨烯混合结构^[21]相比存在明显的灵敏度小和共振峰质量低的缺点. 因此, 设计出既能保留 MIM 波导的结构优势, 又能保证高灵敏度和高质量共振峰的传感器是本文主要考虑的问题.

为解决上述出现的问题, 本文设计了一种双波导正八边环形表面等离子体共振系统. 该系统作为温度传感器和折射率传感器灵敏度分别高达 0.9 nm/°C 和 2400 nm/RIU. 理论上利用 SPPs 色散方程分析了乙醇作为温度传感器的热敏填充材料的可行性, 并且结合 MICMT 理论对该传感器的透射峰进行了分析计算, 结果显示理论值和仿真值高度一致. 传统的折射率传感器只分析了折射率和共振波长之间的线性关系而忽略了温度、湿度等外界干扰对空气折射率的影响, 而这种影响往往带来较大的检测误差. 一般情况下, 一个干扰因素可以由两个透射峰来进行差动相减处理使之消除. 因此共振峰越多, 消除干扰因素的能力就越强. 要产生更多的透射峰, 可以通过添加额外的共振腔、改

进现有结构或增大结构尺寸等. 考虑到结构集成的问题, 采用改进现有结构的方法提出环八边形共振腔结构. 在使用材料和腔体大小相近的情况下, 相比 2014年 Wu 等^[20]的设计, 正八边环形腔相比圆环形腔有更多的角落和更大的腔体面积, 为驻波的形成提供了更多的可能. 在保证高灵敏度不变的同时, 增加了透射峰的数量. 使得本文设计的折射率传感器不仅具有 5 个高质量^[20]的共振峰, 更兼具结构简单易于集成^[22,23]的优点, 而极高的检测灵敏度更是同类型折射率传感器中不可多得的. 该结构各方面性能比之前提出的 MIM 型折射率传感器和温度传感器都有所提高^[19-25]. 为以后基于表面等离子体设计的亚波长量级的温度和折射率两用传感器提供了一种高性能的腔体选择.

2 模型建立和理论分析

本文设计的基于 SPPs 的等离子体温度传感器如图 1 (a) 所示. 该传感器由两个 MIM 波导和一个正八边环形共振腔非贯通耦合组成. 在正八边环形腔体中利用毛细管吸引力将乙醇进行填充^[24],

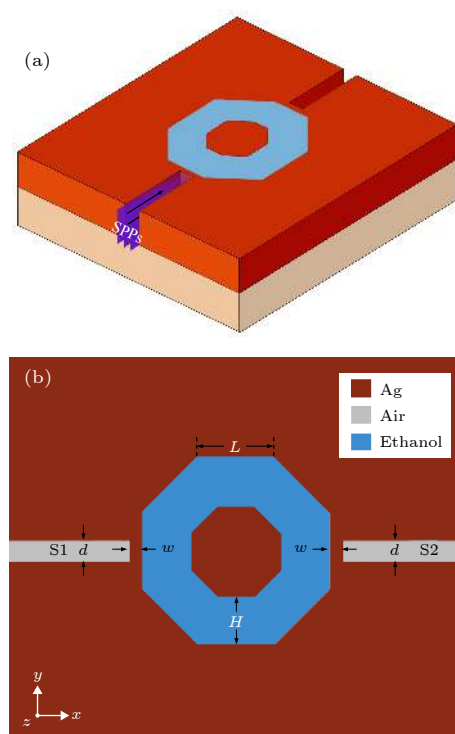


图 1 正八边环形共振腔 MIM 波导结构示意图 (a) 三维模型; (b) 二维模型

Fig. 1. The structure schematic of two slits MIM SPPs waveguides with a regular octagon ring resonator: (a) 3D model; (b) 2D model.

并利用银膜表面上的介电材料将乙醇密封在共振腔中,其中蓝色、红色和淡黄色部分分别表示乙醇、银和石英基底, MIM 波导狭缝部分用空气进行填充. 热光系数是衡量单位温度变化对折射率影响的参数, 石英的热光系数大约等于 8.6×10^{-6} [26], Ag 的热光系数大约为 9.3×10^{-6} [27], 之所以选择乙醇作为填充材料是因为它的热光系数和石英、Ag 相比大约高出两个数量级, 在乙醇敏感的温度条件下石英和银的折射率几乎不受影响. 仿真三维结构对硬件的配置和网格的划分有较高要求, 而三维结构的磁场特性与二维结构不会产生严重的分歧, 为节省内存本文使用 COMSOL Multiphysics 软件进行二维建模, 如图 1 (b) 所示. d 为波导宽度, H 为内外环之间的距离, L 为正八边环形的外边长, w 为波导和腔体之间的耦合距离.

SPWs 和传统的介质波导相比具有传输波不受尺寸限制的特点, 也就是说当入射波长远大于狭缝宽度时 SPPs 仍然能进行传输. SPWs 的有效折射率由狭缝宽度、金属和介质的介电常数共同决定, 它们之间的关系可以由 SPPs 色散关系式进行表征. 电磁场的偏振态可分为 TE 和 TM 模式. 当 MIM 波导以 TE 偏振光入射时, 在 $H_{x1} = H_{x2}$, $E_{y1} = E_{y2}$ 的边界条件下解 Maxwell 方程组, 得 $E_y(k_{z1} + k_{z2}) = 0$ 的结果. 这里 k_{z1} , k_{z2} 均为正值, 得出 $E_{y1} = E_{y2} = 0$, 这说明 MIM 波导内的 SPPs 模式不能由 TE 偏振光激发. 而 TM 偏振光作为 MIM 波导 SPPs 的激发光源, 波导内也只存在横向磁场的奇模式. 在以上的激发条件下, 以 $H_{y1} = H_{y2}$, $E_{x1} = E_{x2}$ 为边界条件解 Maxwell 方程组得到 TM 模式下 SPPs 的色散方程 [28–30]:

$$\varepsilon_{in} k_{z2} + \varepsilon_m k_{z1} \coth(-ik_{z1}d/2) = 0, \quad (1a)$$

$$k_{z1}^2 = \varepsilon_{in} k_0^2 - \beta^2, \quad (1b)$$

$$k_{z2}^2 = \varepsilon_m k_0^2 - \beta^2, \quad (1c)$$

在 (1) 式中, $\varepsilon_{in} = n^2$ 为介质的介电常数, $\varepsilon_m(\omega) = \varepsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega\gamma}$ 为银的介电常数用 Drude 模型表征 [22,31], β 为传播常数, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为自由空间波长矢量, λ 为入射光波长, d 为波导宽度. 文中的介质为乙醇, 乙醇的折射率随着温度变化的关系式如下 [32]:

$$n = 1.36048 - 3.94 \times 10^{-4}(T - T_0), \quad (2)$$

其中 $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ 为室温, T 为环境温度, 有效折射率实部 $n_{\text{eff}} = \text{Real}(\beta/k_0)$. 利用 Newton-Steffensen

迭代法对 SPPs 色散方程 (1) 式进行求解. 如图 2 所示, 计算结果为有效折射率实部、入射波长和波导宽度的三维关系图.

温度传感器是以透射峰共振波长的位移量来表征温度的变化, 需要两者之间存在严格的线性关系. 乙醇作为热敏材料其熔点和沸点分别为 -114 和 $78.4 \text{ }^\circ\text{C}$, 决定了该温度传感器适合作为低温传感. 从图 2 (b) 可以看出, 在该温度传感器适宜的温度工作范围 ($-100 - 60 \text{ }^\circ\text{C}$) 内, 理想的波导宽度取值使温度和有效折射率实部具有非常好的线性关系. 在波导结构对称的情况下除了 TM_0 模式其他模式均存在波长截止现象, 表现为图 2 (a) 中有效折射率的突变. 因此将波导宽度固定为 50 nm , 以保证温度与有效折射率实部之间具有良好的线性关系.

下面对该温度传感器的传输响应系统进行研究. 波导 S1 为入射波导, S2 为出射波导, 当波导宽度 $d = 50 \text{ nm}$ 时, TM 偏振光作为 MIM 波导 SPPs 的激发光源, 波导内只存在横向磁场的基模 (TM_0 mode). 当波导的结构存在缺陷, 如波导有损

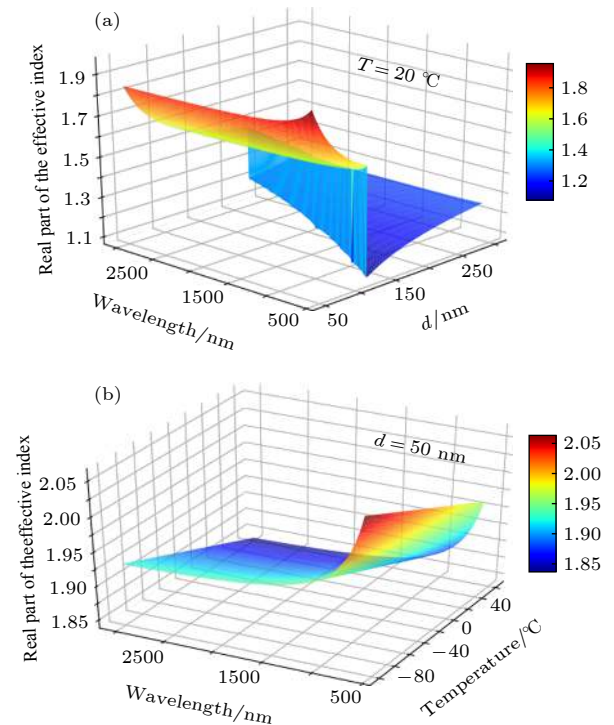


图 2 (a) $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 有效折射率实部与入射波长和波导宽度的关系图; (b) $d = 50 \text{ nm}$ 时, 有效折射率实部与入射波长和温度的关系图

Fig. 2. (a) The real part of n_{eff} as functions of wavelength and d when $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; (b) the real part of n_{eff} as functions of wavelength and T when $d = 50 \text{ nm}$.

耗、波导形状有畸变、波导周围出现共振腔体等,都会引起波导内各模式之间或波导和共振腔体之间的能量交换,这种能量交换就称之为耦合.该温度传感器的多模耦合就是基于正八边环形共振腔和双波导之间的能量转换,通过控制正八边环形共振腔的结构参数来控制这种能量转化以达到调谐的目的,进而最终实现对该温度传感器透射响应系统的控制.给出基于 MICMT 理论^[16]推导的透射率表达式:

$$T = \left| \sum_{n=1}^5 \frac{2\gamma_{n1} e^{i\varphi_n}}{-i(\lambda - \lambda_{n0})\tau_n + 2 + \frac{\tau_n}{\tau_{n0}}} \right|, \varphi_n = \varphi_{n1} + \phi_n, \quad (3)$$

在上述透射率简化公式中,总耦合相位差 φ_n 可近似地视为常数. ϕ_n 是第 n 个共振模式的输出相位和输入相位之差. τ_{n0} 表示第 n 个模式的内损耗衰减时间,该系统波导 S1 和波导 S2 的宽度相等且对称于共振腔体,因此有 $\tau_n = \tau_{n1} = \tau_{n2}$, τ_n 为波导和共振腔中第 n 个共振模之间耦合的衰减时间. φ_{n1} 为波导 S1 和共振腔中第 n 个共振模式的

耦合相位. γ_{n1} 为归一化系数,这里 $\gamma_{n1} \approx 1$. λ 和 λ_{n0} 分别为入射波长和共振波长.这里设置 $L = 300$ nm, $H = 250$ nm, $w = 10$ nm, $d = 50$ nm.该系统的仿真结果和理论计算结果对比如图 3 (a) 所示.值得注意的是,由于波导内不同模式之间也存在能量交换,相邻模式之间的影响最为突出.所以为保证计算结果的准确性,在 Peak I 的左边多取一个模式 ($\lambda_0 = 660$ nm) 进行分析(该模式未在文章中表示出来),透射峰 Peak I ($\lambda_{10} = 714$ nm), Peak II ($\lambda_{20} = 776$ nm), Peak III ($\lambda_{30} = 884$ nm), Peak IV ($\lambda_{40} = 1212$ nm) 和 Peak V ($\lambda_{50} = 2234$ nm) 的磁场 $|H_z|$ 分布如图 3 (b)—(f) 所示.从图 3 (b)—(f) 中可以看出,这五种模式在正八边环形腔和波导中均出现驻波共振,使得入射光可以通过共振腔并出射形成透射峰.将 Peak III 和 Peak V 的磁场图进行比较,可以看出 Peak III 在腔体内的磁场分布更弱,在波导 S2 内的磁场分布更强,而 Peak V 的磁场分布恰恰相反.这说明当腔体内的能量分得越多时,出射波导的能量分得越少,从而导致更小的透射峰幅值.

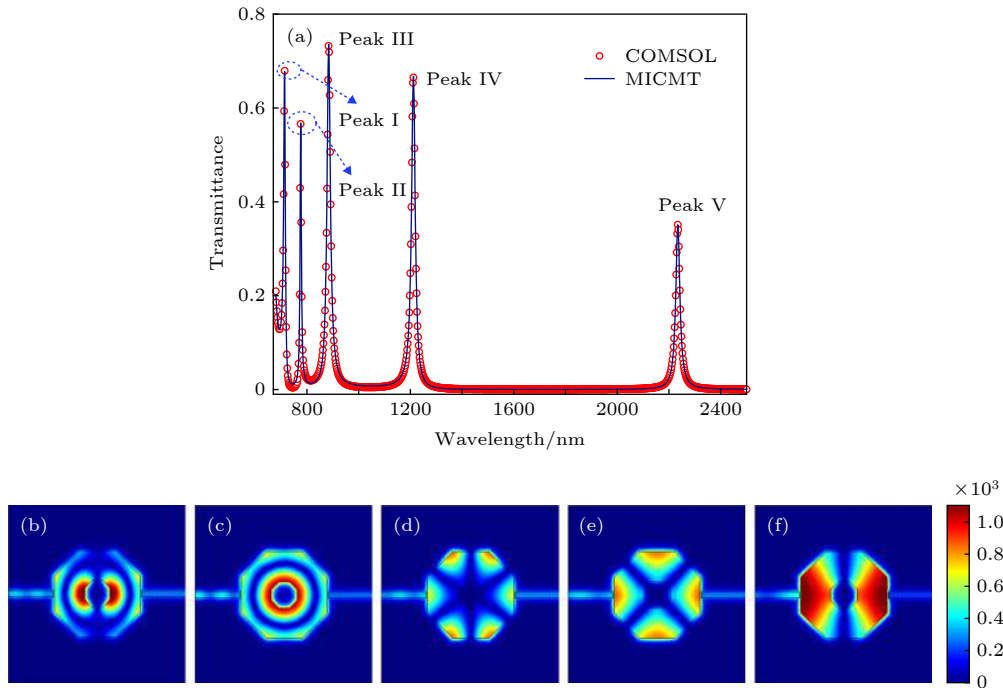


图 3 (a) 该温度传感器的透射率仿真值和理论值对比图; (b) Peak I 的磁场分布图, $\lambda_{10} = 714$ nm; (c) Peak II 的磁场分布图, $\lambda_{20} = 776$ nm; (d) Peak III 的磁场分布图, $\lambda_{30} = 884$ nm; (e) Peak IV 的磁场分布图, $\lambda_{40} = 1212$ nm; (f) Peak V 的磁场分布图, $\lambda_{50} = 2234$ nm

Fig. 3. (a) Comparison of the simulation and the theoretical results of transmittance of the temperature sensor; (b) the magnetic field $|H_z|$ of peak I at $\lambda_{10} = 714$ nm; (c) the magnetic field $|H_z|$ of peak II at $\lambda_{20} = 776$ nm; (d) the magnetic field $|H_z|$ of peak III at $\lambda_{30} = 884$ nm; (e) the magnetic field $|H_z|$ of peak IV at $\lambda_{40} = 1212$ nm; (f) the magnetic field $|H_z|$ of peak V at $\lambda_{50} = 2234$ nm.

3 结果与讨论

下面将通过光谱分析研究该传感器的温度传感特性. 当参数设置为 $H = 250 \text{ nm}$, $L = 300 \text{ nm}$, $w = 10 \text{ nm}$, $d = 50 \text{ nm}$ 时. 图 4 (a) 和图 4 (b) 所示为温度从 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 以步长 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 递减到 $-100 \text{ }^\circ\text{C}$ 的透射光谱图. 在 $690\text{--}2500 \text{ nm}$ 范围内出现 5 个透射峰: Peak I, Peak II, Peak III 在图 4(a) 所示的 $690\text{--}1000 \text{ nm}$ 范围内; Peak IV, Peak V 在图 4(b) 所示的 $1000\text{--}2500 \text{ nm}$ 范围内, 图 4(b) 中的子图表示透射峰 Peak IV 的共振波长所在峰的放大图. 由图 4 可知, 随着温度减小五个透射峰均出现了红移现象. 固定波导宽度, 乙醇的折射率随温度的降低而增加, 从而使得温度传感器的有效折射率增加, 如图 2 (b) 所示. 温度传感器的有效折射率决定腔内产生驻波共振的波长, 驻波共振波长发生变化促使透射光波长也发生变化, 表现出透射峰红移的现象.

为了直观地展示由温度改变引起的传感器性能变化, 给出每个透射峰随温度变化时的共振波长取值图, 如图 5 所示. 可以看出, 五个峰都与温度具有极其良好的线性关系. 在 $-100\text{--}60 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间取 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 为步长, 各个透射峰 (依次为 Peak I, Peak II, Peak III, Peak IV, Peak V) 的位移量分别为 $4, 5, 6, 7, 13 \text{ nm}$, 透射峰的共振波长和温度之间存在严格的线性关系, 这种线性关系极大地确保了温度测量的精准性. 通过温度传感器的灵敏度定义式 $d\lambda/dT$ 可以得出 Peak I, Peak II, Peak III, Peak IV 和 Peak V 的灵敏度分别为 $0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.65 \text{ nm}/^\circ\text{C}$. Peak V 的灵敏度最高是因为电磁波具有波粒二象性, 且传播的能量是光子能量的整数倍数. 在总功率不变的情况下, 由光子能量大小计算式可知, 波长越大, 光子能量越小, 进行能量传输的光子数量越多, 电磁传播过程受介质的影响越大. 所以当温度引起折射率变化时共振波的波长越大透射峰灵敏度越大.

由于 SPPs 对波导尺寸具有敏感性, 接下来将研究参数 H 和 L 对该温度传感器光谱特性的影响. 如图 6 (a) 和图 6(b) 所示, 在固定参数 L 的情况下增大参数 H , 透射峰 Peak II, Peak III, Peak IV 和 Peak V 均发生了位移. 该现象可以通过磁场分析进行解释. 从图 3 (c) 中可以看出, Peak II 的磁场能量主要沿着正八边环形的内环 (简称为内八边

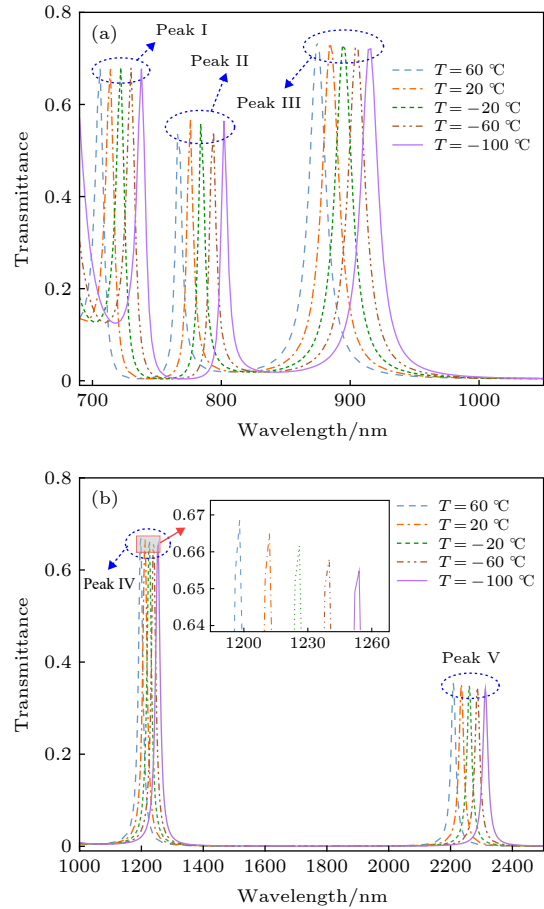


图 4 温度变化时该温度传感器的透射光谱图 (a) 入射波长范围为 $690\text{--}1100 \text{ nm}$, Peak I, Peak II, Peak III 在该光谱范围内; (b) 入射波长范围为 $1000\text{--}2500 \text{ nm}$, Peak IV, Peak V 在该光谱范围内

Fig. 4. The transmission spectra of the temperature sensor under different T : (a) Peak I, Peak II and Peak III in the wavelength range of 690 nm to 1100 nm ; (b) peak IV and Peak V in the wavelength range of 1000 nm to 2500 nm .

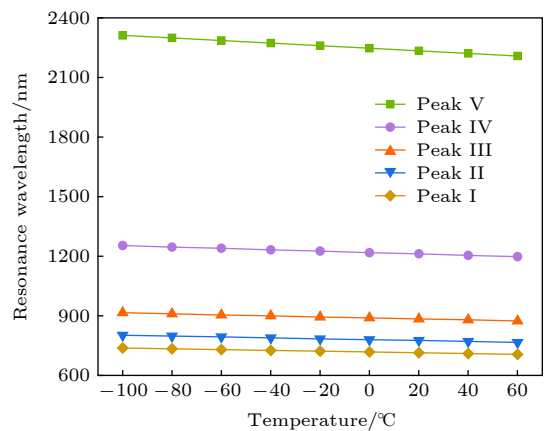


图 5 五个透射峰的共振波长与温度 T 的关系

Fig. 5. The relationship between the resonance wavelength and T of the five transmission peaks.

形) 一圈进行均匀分布. 由此可见内八边形大小对该共振模式有很大的影响. 在固定 L 的情况下, 随着 H 的增大, 内八边形被明显压缩使得分布在内八边形一圈的磁场也跟着明显缩小, 继而表现出明显的波长位移. 以上述的方法对余下的三个透射峰进行分析. 通过观察 Peak III, Peak IV 和 Peak V 的磁场图, 发现图 3 (d) 的磁场主要分布在正八边形外环 (简称为外八边形) 的上下四个角和左右两个边, 在内八边形四周几乎没有磁场分布. 同理对于图 3 (e), 磁场主要分布在上下左右四个边上, 在内八边形四周只有微弱的磁场分布, 所以 H 的变化对于透射峰的位移影响是微弱的. 而对于图 3 (f), 内八边形周围的磁场分布是显而易见的. 随着 H 的增大, 内八边形被明显压缩, 磁场分布受

内八边形尺寸的影响越大, 共振波长的位移越明显. 由此可以预料到 Peak V 的位移最明显, Peak III 的位移最不明显. 该预测结果和图 6 (a) 和图 6 (b) 中的仿真结果一致. 接下来将固定参数 H 来讨论 L 对该系统透射峰的影响. 固定 H 增大 L 相当于将正八边形等比例放大, 因此无论各个透射峰的磁场在共振腔中如何进行分布, 磁场分布几乎都是等比放大, 因此波长会出现等比位移的情况, 如图 6 (c) 所示. 共振腔面积的增大还会导致更多的能量被吸收, 使得透射峰的振幅变小. 除了这些物理机理解释, 我们更关心参数对灵敏度的影响. 从图 6 (d) 和图 6 (e) 中可以看出, 灵敏度随着 L 的增大而明显增大, 随着 H 的增大而略微减小. 因此在合理范围内增大 L 减小 H 会提高该温

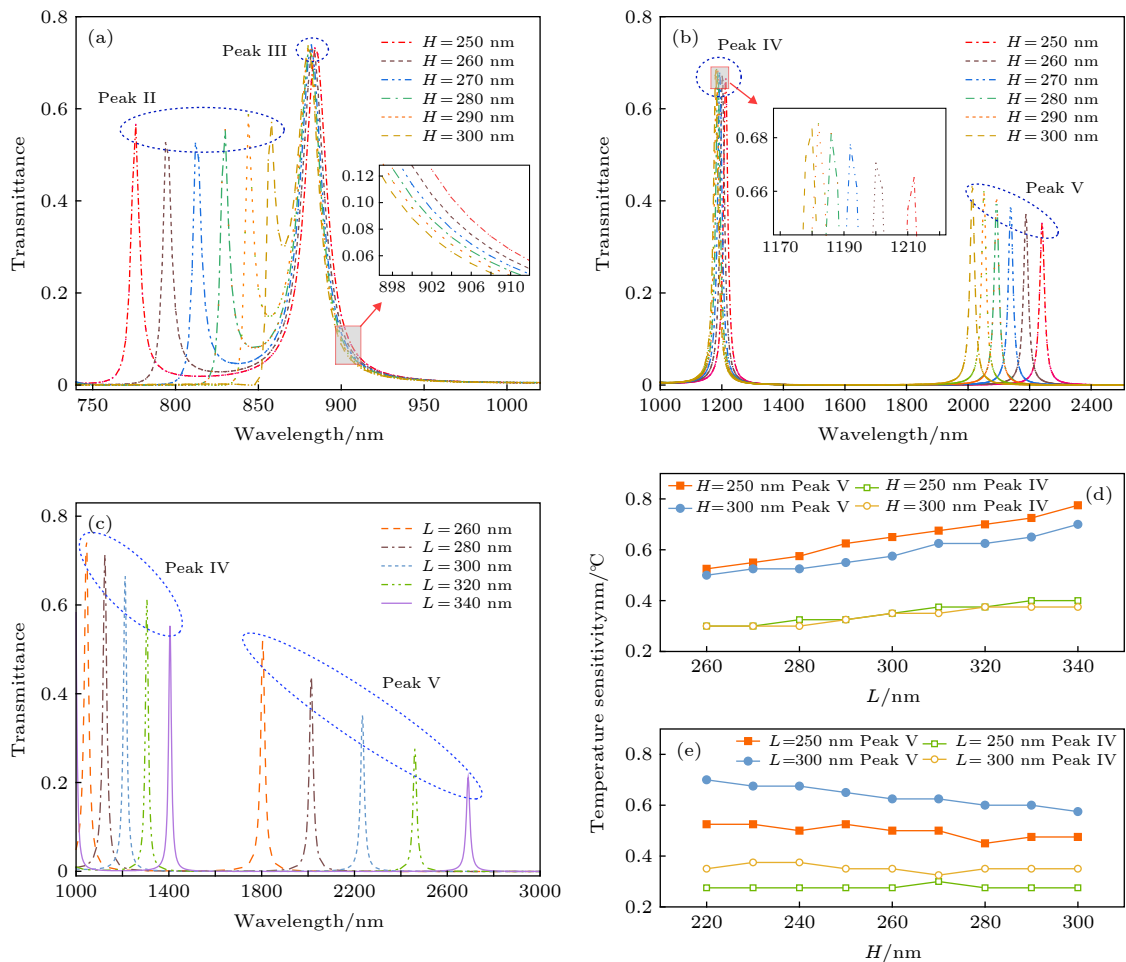


图 6 改变参数 H 的透射谱图 (a) 在 740—1025 nm 的入射波长下; (b) 在 1000—2500 nm 的入射波长下. (c) 在 1000—3000 nm 的入射波长下, 改变参数 L 的透射谱图; (d) Peak V 和 Peak IV 的灵敏度和参数 H 的关系图; (e) Peak V 和 Peak IV 的灵敏度和参数 L 的关系图

Fig. 6. The transmission spectra of the structure under different H : (a) In the wavelength range of 690 nm to 1100 nm; (b) in the wavelength range of 1000 nm to 2500 nm. (c) the transmission spectra of the structure under different L in the wavelength range of 1000 nm to 3000 nm; (d) the relationship between sensitivity of Peak V and Peak IV and parameter H ; (e) the relationship between sensitivity of Peak V and Peak IV and parameter L .

度传感器的灵敏度.

增大 L 减小 H 都能提高温度传感器的灵敏度, 但是不管是增大 L 还是减小 H 都会导致透射峰的振幅减小, 换言之, 灵敏度的增大是以牺牲透射峰的振幅为代价的. 因此怎样既保证灵敏度不变又提高透射峰振幅是接下来要研究的内容. 如图 7 (a) 所示, 随着耦合距离 w 值的减小, 4 个透射峰振幅均出现了明显的增强, 这是因为波导和共振腔之间的耦合距离减小而导致光的耦合强度增大, 从而提高了光在波导和腔体之间能量传输的能力. Peak V 的透射峰振幅在 $w = 5, 10$ nm 时分别取 0.59202, 0.35116, 减小耦合距离, 透射峰振幅提高至 1.686 倍. Peak IV 的透射峰振幅在 $w = 5, 10$ nm 时分别取 0.81618, 0.66506, 透射峰振幅提高至 1.227 倍. 图 7 (c) 为在不同入射波长情况下, 5 个透射峰随 w 变化的透射光谱图, 从图中更能直观地看出随着 w 的减小透射峰的透射强度在逐渐增强. 如图 7 (b) 所示, T 从 20 °C 变化至 -20 °C, 无论 w 取 5 nm 还是 10 nm, Peak IV 的移动距离均为 14 nm. 同样, 如图 7 (d) 所示, 在上述相同条件下,

Peak V 的移动距离为 26 nm. 这足以说明增大 w 不仅能提高透射峰振幅, 还能使灵敏度保持不变. 因为耦合距离 w 对灵敏度几乎没有影响, 所以在进行工艺加工时微小的尺寸偏差不会对该传感器的性能产生影响, 精度要求不高, 加工工艺的容错度更高, 传感器光电器件的鲁棒性更好.

在对各个参数进行分析后可以总结出 $H = 220$ nm, $L = 360$ nm, $w = 5$ nm, $d = 50$ nm 的最佳参数设置. 如图 8 (a) 所示, 最佳参数设置下的温度传感器 Peak V, Peak IV, Peak III, Peak II 和 Peak I 这五个透射峰的灵敏度分别为 0.9, 0.45, 0.35, 0.2 和 0.2 nm/°C. 如果将正八边环形腔内的乙醇换成其他介质材料, 该传感器还能用作折射率传感. 如图 8 (b) 所示, 作为折射率传感器, 以上五个透射峰的灵敏度分别为 2400, 1200, 800, 600 和 400 nm/RIU. 本文与其他已报道文献的设计对比如表 1 所列.

品质因子 (figure of merit, FOM) 是波长灵敏度与 FWHM 的比值 [31,33]. 从表 1 可以看出, 该传感器具有高灵敏度、高 FOM 值、多工作峰、工作

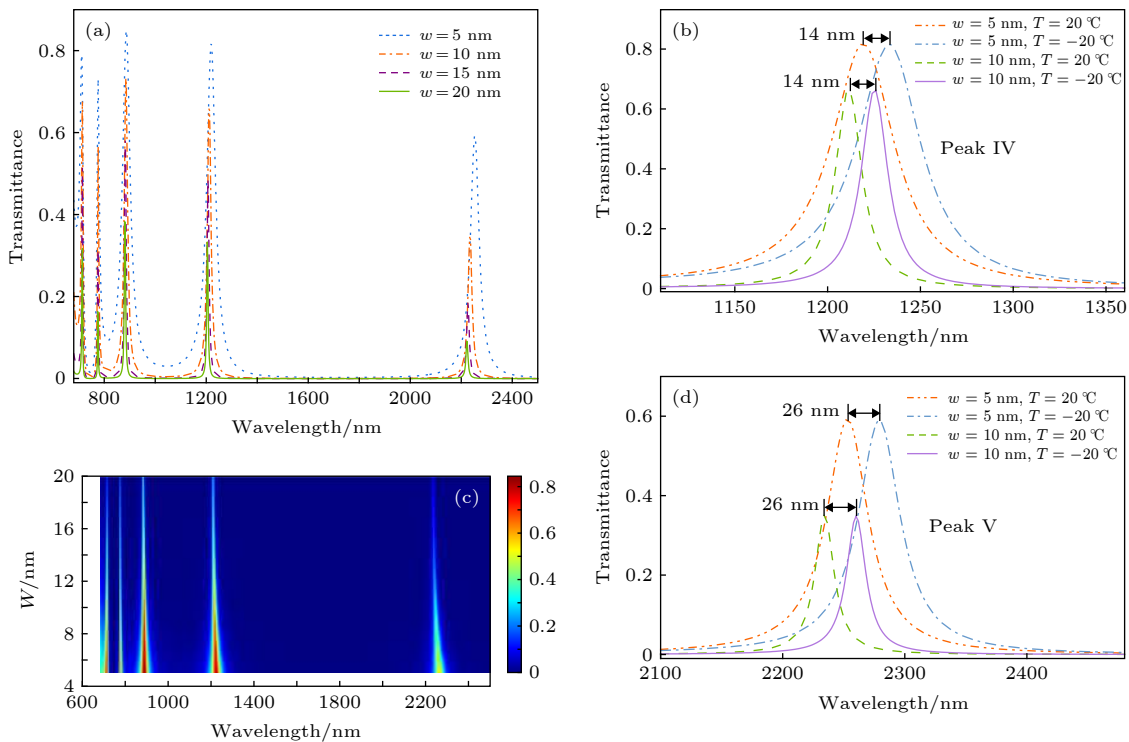


图 7 (a) 在不同的 w 取值下的透射谱图; (b) Peak IV 在 $w = 5$ nm 和 $w = 10$ nm 时温度从 20 °C 变到 -20 °C 时共振峰位移量对比图; (c) 在 w 不同取值情况下随入射波长变化的透射光谱图; (d) Peak V 在 $w = 5$ nm 和 $w = 10$ nm 时温度从 20 °C 变到 -20 °C 时共振峰位移量对比图

Fig. 7. (a) The transmission spectra of the structure under different w ; (b) when the temperature changes from 20 °C to -20 °C, the displacement of Peak IV at $w = 5$ nm and $w = 10$ nm; (c) the transmission spectra of the structure with different wavelength and w ; (d) when the temperature changes from 20 °C to -20 °C, the displacement of Peak V at $w = 5$ nm and $w = 10$ nm.

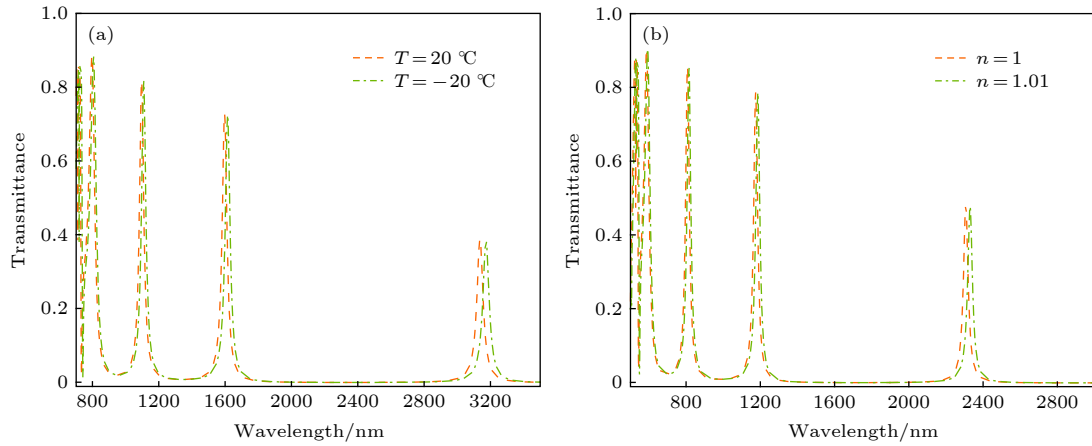


图 8 (a) 该系统作为温度传感器时, 在 $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $T = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的透射谱图; (b) 该系统作为折射率传感器时, 在 $n = 1$ 和 $n = 1.01$ 下的透射谱图

Fig. 8. (a) When the system is used as a temperature sensor, the transmission spectra at $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $T = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) when the system is used as a refractive index sensor, the transmission spectra at $n = 1$ and $n = 1.01$.

表 1 各类温度传感器和折射率传感器性能比较

Table 1. Performance comparison of various temperature sensors and refractive index sensors.

| 参考文献 | 温度传感器 $S/\text{nm}\cdot^{\circ}\text{C}$ | 折射率传感器 $S/\text{nm}\cdot\text{RIU}^{-1}$ | 半峰全宽 FWHM/nm | 共振峰数 | 工作波段/nm | FOM |
|-----------|---|---|-----------------|------|----------|----------------|
| [20] | 1.36 | 3460 | ≈ 200 | 3 | 500—2000 | ≈ 17.3 |
| [24] | 0.65 | | 50.6 | 2 | 600—1700 | |
| [29] | | 1500 | ≈ 80 | 3 | 600—2000 | ≈ 18.7 |
| [31] | 0.51 | 1736 | 177.3 | 1 | 550—900 | 9.79 |
| This work | 0.9 | 2400 | 18 | 5 | 700—3200 | 133 |

波段范围广、FWHM 窄的优点. 而透射峰尖锐、波谷低、振幅高等其他优点不仅为检测提供了便利, 更是提高了差动相减处理计算过程的准确性. 比以往研究报道的同类 MIM 波导温度传感器和折射率传感器工作性能都全面 [14,15,26,28].

4 结 论

本文使用有限元数值仿真法进行了一种基于正八边形乙醇密封共振腔的 MIM 波导的 SPPs 传输特性的研究. 研究表明该传感器的五个透射峰均是由正八边环形共振腔产生的共振引起的. 上述五个透射峰分别对应五个不同的腔体共振模式. 更大的参数 L 和更小的参数 H 设置会以牺牲透射峰振幅来提高传感器的灵敏度, 且参数 L 和 H 可以对共振波长进行调谐. 减小参数 w 会使光的耦合强度增大, 从而增强透射光的振幅, 用以弥补增强灵敏度带来的振幅损耗. 并且 w 对灵敏度的不敏感特性大大降低了加工工艺的难度. 该结构用作

传感器具有灵敏度高、FOM 值高、结构简单、易于集成的优点. 在理论上, 计算了乙醇作为热敏材料合适的波导取值, 以保证共振波长位移和温度之间的线性关系; 以 MICMT 理论对该结构的传输光谱进行了研究, 理论结果和仿真结果高度一致. 在实际运用中, 可以使用铈酸锂等热敏材料代替乙醇来制造固态设备. 今后我们还将考虑在正八边环形腔中引入石墨烯条, 来实现灵敏度的动态可调, 以及透射峰尖锐程度的进一步提高, 这对高灵敏度、低误差的温度传感器和折射率传感器的研究具有较大意义.

参考文献

- [1] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W 2003 *Nature* **424** 824
- [2] Amini A, Aghili S, Golmohammadi S, Gasemi P 2017 *Opt. Commun.* **403** 226
- [3] Hua L, Wang G X, Liu X M 2013 *Chin. Sci. Bull.* **58** 3607
- [4] Hwang Y, Kim J E, Park H Y 2011 *Opt. Commun.* **284** 4778
- [5] Zhang Z D, Zhao Y N, Lu D, Xiong Z H, Zhang Z Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 187301 (in Chinese) [张志东, 赵亚男, 卢东, 熊祖洪, 张中月 2012 物理学报 **61** 187301]

- [6] Chen Y, Xie J Z, Zhou X D, Zhang C, Yang H, Li S H 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 237301 (in Chinese) [陈颖, 谢进朝, 周鑫德, 张灿, 杨惠, 李少华 2019 物理学报 **68** 237301]
- [7] Zhang X W, Qi Y P, Zhou P Y, Hu B B, Yan C M 2018 *Photonic Sens.* **8** 367
- [8] Chen J, Wang X X, Tang F, Ye X, Yang L M, Zhang Y B 2020 *Results Phys.* **16** 102867
- [9] Wang X X, Zhu J K, Wen X L, Wu X X, Wu Y, Su Y W, Tong H, Qi Y P, Yang H 2019 *Opt. Mater. Express* **9** 3079
- [10] Singh M, Datta A 2018 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **30** 997
- [11] Shibayama J, Kawai H, Yamauchi J, Nakano H 2019 *Opt. Commun.* **452** 360
- [12] Wang X X, Zhu J K, Wu Y, Xu Y Q, Su Y W, Zhang L P 2020 *Results Phys.* **17** 103175
- [13] Li J K, Chen X F, Yi Z, Yang H, Tang Y J, Yi Y, Yao W T, Wang J Q, Yi Y G 2020 *Mater. Today Energy* **16** 100390
- [14] Wang Y Y, Chen Z Q, Xu D Y, Yi Z, Chen X F, Chen J, Tang Y J, Wu P H, Li G F, Yi Y G 2020 *Results Phys.* **16** 102951
- [15] Qi Y P, Zhang Y, Liu C Q, Zhang T, Zhang B H, Wang L Y, Deng X Y, Bai Y L, Wang X X 2020 *Results Phys.* **16** 103012
- [16] Chen J, Nie H, Peng C, Qi S B, Tang C J, Zhang Y, Wang L H, Park G S 2018 *J. Lightwave Technol.* **36** 3481
- [17] Pang Z Y, Tong H, Wu X X, Zhu J K, Wang X X, Yang H, Qi Y P 2018 *Opt. Quantum Electron.* **50** 335
- [18] Chen J, Nie H, Zha T Q, Mao P, Tang C J, Shen X Y, Park G S 2018 *J. Lightwave Technol.* **36** 2791
- [19] Li S L, Wang Y L, Jiao R Z, Wang L L, Yu L 2017 *Opt. Express* **25** 3525
- [20] Wu T, Liu Y M, Yu Z Y, Peng Y W, Shu C G, Ye H 2014 *Opt. Express* **22** 7669
- [21] Liu Q, Liu M W, Zhan S P, Wu L X, Xie S X, Chen Z H, Zhang Y C 2019 *Plasmonics* **14** 1005
- [22] Cen C L, Lin H, Huang J, Liang C P, Chen X F, Tang Y J, Yi Z, Ye X, Liu J W, Yi Y G, Xiao S Y 2018 *Sensors* **18** 4489
- [23] Li Z F, Wen K H, Chen L, Lei L, Zhou J Y, Zhou D Y, Fang Y H, Wu B Y 2019 *Appl. Opt.* **58** 4878
- [24] Wu T S, Liu Y M, Yu Z Y, Ye H, Peng Y W, Shu C G, Yang C H, Zhang W, He H F 2015 *Opt. Commun.* **339** 1
- [25] Qi Y P, Zhou P Y, Zhang T, Zhang X W, Wang Y, Liu C Q, Bai Y L, Wang X X 2019 *Results Phys.* **14** 102506
- [26] Wu T S, Wang L, Wang Z, Liu Y M, Yin L D 2012 *Chin. J. Lasers* **39** 1114002 (in Chinese) [伍铁生, 王丽, 王哲, 刘玉敏, 胡署阳, 尹丽丹 2012 中国激光 **39** 1114002]
- [27] Sundari S T, Srinivasu K, Dash S, Tyagi A K 2013 *Solid State Commun.* **167** 36
- [28] Lin X S, Huang X G 2009 *Opt. Lett.* **33** 2874
- [29] Qi Y P, Zhang X W, Zhou P Y, Hu B B, Wang X X 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 197301 (in Chinese) [祁云平, 张雪伟, 周培阳, 胡兵兵, 王向贤 2018 物理学报 **67** 197301]
- [30] Dionne J A, Sweatlock L A, Atwater H A 2006 *Phys. Rev. B* **73** 035407
- [31] Wu T S, Liu Y M, Yu Z Y, Peng Y W, Shu C G, He H F 2014 *Opt. Commun.* **323** 44
- [32] Cheng Q Q, Li T, Li L, Wang S M, Zhu S N 2014 *Opt. Lett.* **39** 3900
- [33] Ren M X, Pan C P, Li Q Q, Cai W 2013 *Opt. Lett.* **38** 3133

High performance temperature and refractive index dual-purpose sensor based on the ethanol-sealed metal-dielectric-metal waveguide*

Qi Yun-Ping^{1)†} Zhang Ting¹⁾ Guo Jia¹⁾Zhang Bao-He¹⁾ Wang Xiang-Xian²⁾1) (*College of Physics and Electronic Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China*)2) (*School of Science, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China*)

(Received 17 March 2020; revised manuscript received 11 May 2020)

Abstract

In order to enhance the working performance of existing temperature sensor and refractive index sensor of sub-wavelength waveguide, the design of ring regular octagon surface plasmon resonance sensor with sharp transmission peak, high sensitivity and high integration was proposed in this paper based on surface plasmon polaritons. The feasibility of using ethanol as a thermosensitive filler to establish a linear conversion relationship between temperature and effective refractive index was analyzed theoretically. The reason why the real part of effective refractive index changes abruptly with the change of waveguide width is also explained. The multimode interference coupled mode theory (MICMT) was used to fit and analyze the transmission peak of the sensor, and then the finite element methods (FEM) is used for simulation analysis. Results obtained by the theory of the MICMT are consistent very well with those from simulation. In order to obtain the optimal parameter setting of the ring regular octagon surface plasmon resonance sensor, various parameters of the sensor are simulated by FEM. It is found that increasing L and decreasing H will improve the sensitivity of the sensor, while decreasing parameter w can not only improve the amplitude of transmission peak, but also keep the sensitivity unchanged. This characteristic of parameter w greatly improves the robustness of the sensor. All kinds of physical phenomena in this paper are analyzed in detail. Firstly, the phenomenon of transmission peak displacement caused by parameter changes is explained through the analysis of magnetic field distribution, and then the phenomenon of inconsistent sensitivity of different transmission peaks is explained through photon energy formula. Compared with the previous structural design, the dual-purpose sensor has many advantages such as wide operating wavelength range, narrow full width at half maximum and easy to integrate. As a temperature sensor and refractive index sensor, its sensitivity was as high as 0.9 nm/°C and 2400 nm/RIU. The study of this structure broke through the limitations of some traditional cavities, in order to provide a high-performance cavity selection for the micro-nano photon temperature and refractive index dual-purpose sensor based on the design of surface plasmon polaritons in the future.

Keywords: surface plasmon polaritons, temperature sensor, refractive index sensor, multimode interference coupled mode theory

PACS: 73.20.Mf, 42.79.Gn, 73.40.Rw

DOI: 10.7498/aps.69.20200405

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61367005, 61865008), the Natural Science Foundation of Gansu Province, China (Grant No. 17JR5RA078) and Northwest Normal University Young Teachers' Scientific Research Capability Upgrading Program (Grant No. NWNLU-LKQN2020-11).

† Corresponding author. E-mail: qiyunping@nwnu.edu.cn