

干形腔耦合MIM波导的传感特性研究

姜发丽, 杨凤英*, 李艳生

贵州大学科技学院, 贵州 贵阳

收稿日期: 2022年4月26日; 录用日期: 2022年5月22日; 发布日期: 2022年5月31日

摘要

光学微腔的共振耦合在微纳米器件领域非常重要。本文设计的是干形谐振腔和总线波导组成的微纳米结构, 其运用时域有限差分法(FDTD)进行模拟计算, 分析改变谐振腔与总线波导的耦合间距、谐振腔各支节的长度、腔内介质的折射率时的共振特性以及传感特性, 同时还利用耦合模理论和驻波理论验证干形谐振腔和总线波导耦合现象的正确性。优化结构参数, 得到结构的最大灵敏度为1444.5 nm/RIU, 品质因素最大为68.78, 在谐振腔内添加温敏材料, 该结构可用于温度传感。最后, 在总线波导同侧再添加一个干形结构形成干形腔的级联, 出现类电磁感应透明现象, 在慢光方面具有重要的应用。本文设计的干形谐振腔可为以后传感器提高灵敏度提供一定的参考价值。

关键词

光学微腔, MIM波导, 传感特性

Research on Sensing Characteristics of Chinese Word Gan Shaped Cavity Coupled MIM Waveguides

Fali Jiang, Fengying Yang*, Yansheng Li

College of Science and Technology, Guizhou University, Guiyang Guizhou

Received: Apr. 26th, 2022; accepted: May 22nd, 2022; published: May 31st, 2022

Abstract

Resonant coupling of optical microcavities is very important in the field of micro-nano devices. In this paper, a micro-nano structure composed of a Chinese word gan shaped cavity and a bus waveguide is

*通讯作者。

designed, and the finite difference time domain (FDTD) method is used to simulation calculations to analyze the coupling spacing between the resonator and the bus waveguide, the length of each branch of the resonator, the resonance characteristics and sensing characteristics of the refractive index of the medium in the cavity, at the same time, the coupling mode theory and standing wave theory are used to verify the correctness of the coupling phenomenon of dry resonators and bus waveguides. By optimizing the structural parameters, the maximum sensitivity of the obtained structure is 1444.5 nm/RIU, and the maximum quality factor is 68.78, by adding temperature-sensitive material in the resonant cavity, the structure can be temperature-sensing. Finally, a Chinese word gan shaped cavity is added on the same side of the bus waveguide to form a cascade of Chinese word gan shaped cavity, and the phenomenon of electromagnetic induction-like transparency appears, which has important applications in slow light. The Chinese word gan shaped cavity designed in this paper provides a certain value reference for improving the sensitivity of the sensor in the future.

Keywords

Optical Microcavity, MIM Waveguide, Sensing Characteristics

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

光电器件的微型化和信息处理能力的高效化是大规模集成电路发展的需求。由于传统的电子集成器件在实现超高速且大规模处理信息的能力上出现了瓶颈，于是人们把目光转向纳米光子器件。微纳光子器件主要利用表面等离子体激元的场增强特性和突破衍射极限特点作为设计原理[1] [2]。因此，表面等离子体激元在太阳能电池[3]、波分解复用器[4]、光缓冲存储器[5]、传感等领域[6] [7]得到广泛研究。

光学微腔是一种微米量级的光学谐振腔，其通过光波的衍射、反射等方式，将光限制在一个很小的空间内，具有一定的选频特性[8] [9]。光学微腔具有功耗低、尺寸小、易集成的优点，同时也具有高品质因数，使其不仅适用于传统光学领域，在集成光学的应用上有着更加开阔的发展前景。金属-介质-金属(Metal-Insulator-Metal, MIM)波导是基于表面等离子体激元传输的亚波长波导，有着不受衍射极限约束的性能，能够实现光学元器件的微型化和高度集成化，并且在光传输的效率上也会进一步地得到提高。当光学微腔与波导等光器件的互相连通，其灵活性强、集成度高、结构相对简单等优点，在光通信领域有着重要作用。

本文基于 FDTD，对干形谐振腔耦合波导的光谱曲线进行分析。通过改变谐振腔与总线波导的耦合间距、谐振腔各支节长度、腔内介质的折射率，观察结构透射谱的变化情况。其次，在腔内设计温敏材料，设计温度传感器。最后，研究干形谐振的级联，观察结构透射谱的变化，并分析研究其应用。

2. 仿真模型与理论分析

2.1. 仿真模型

仿真结构由 MIM 波导与干形腔耦合组成，其中干形腔位于总线波导的侧面，如图 1 所示，白色区域为空气，其折射率为 1，灰色区域为银。由于 3 维仿真计算与 2 维仿真计算的电磁场特性基本一致，为节约仿真时间，本文采用 2 维结构进行仿真。在图 1(a)的 2 维平面图中，干形谐振腔的顶部横向长度 L_1 ，中间横向长度 L_2 和竖向的长度 $H_1 = H_2$ 。为保证在波导中只存在基 TM_0 模式的激发以及传播，总线波导和干形谐振腔的宽度均设置为 $w = 50 \text{ nm}$ ，在结构的四周，采取完美匹配层(PML)用于包裹结构边界。电

场 Y 方向偏振, 沿 X 方向传播的平面波, 在总线波导左侧入射, 结构中的透射率定义为 $T = P_{out} / P_{in}$, 其中 P_{out} 为出射功率, P_{in} 为入射功率。

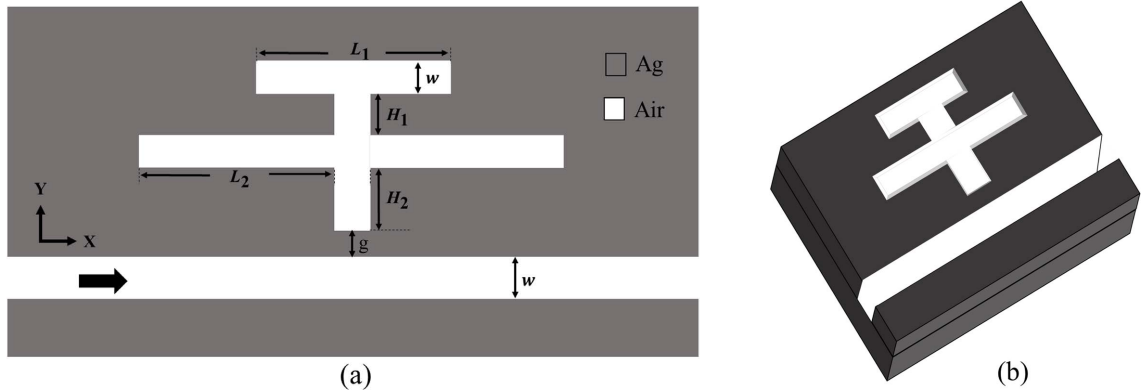


Figure 1. Chinese word gan shaped cavity structure. (a) 2D structure diagram; (b) 3D structure diagram
图 1. 干形腔结构图。(a) 2 维结构图; (b) 3 维结构图

金属银的相对介电常数与入射光频率关系, 根据 Drude 模型[10]有:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} - \omega_p^2 / (\omega^2 + i\omega\gamma), \quad (1)$$

式中, $\varepsilon_{\infty} = 3.7$ 表示为无穷大介电常数, ω 表示为入射光波的角频率, $\gamma = 2.73 \times 10^{13}$ Hz 表示为电子的碰撞频率, 与银的损耗有关, $\omega_p = 1.38 \times 10^{16}$ Hz 则表示为等离子体本身存在的震荡频率。

在 MIM 光波导结构中能够得到色散方程[11]:

$$\tanh\left(\sqrt{\beta^2 - k_0^2 \varepsilon_d} \cdot \frac{w}{2}\right) = -\frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_m} \sqrt{\frac{\beta^2 - k_0^2 \varepsilon_m}{\beta^2 - k_0^2 \varepsilon_d}}, \quad (2)$$

式中: w 为波导宽度, ε_d 和 ε_m 分别为介质 - 空气和金属 - 银的相对介电常数, $\beta = n_{eff} k_0$, n_{eff} 为结构中的有效折射率, $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$, k_0 为真空中的波长矢量, λ 为入射光在真空中的波长。

根据驻波理论[12], 当入射波在 MIM 总线波导中传播进入到干形谐振腔, 并在腔内产生共振时当满足以下的条件:

$$\lambda = 2 \operatorname{Re}(n_{eff}) L_{eff} / (m - \varphi/\pi), \quad m = 1, 2, 3, \dots, \quad (3)$$

式中, L_{eff} 为有效长度, $\operatorname{Re} n_{eff}$ 表示有效折射率实部, m 为谐振的阶数, φ 表示相位。

2.2. 理论分析

通常在研究 MIM 型表面等离子体激元波导结构的耦合机制时, 会使用耦合模理论和耦合谐振子理论。本文采用耦合模理论[13]可知传输特性, 当 TM 波入射到波导结构中时, 将会在 MIM 的界面上产生 SPPs, 总线波导能量间接与干形腔中的能量耦合。 τ_1 表示波导与谐振腔间的耦合衰减率, τ_2 表示腔体损耗掉的衰减率, τ_{3n} 表示模式的衰减率。 κ 为干形腔与波导间的耦合系数。 $S_{1,2+}$ 表示 SPPs 在总线波导进口端的输入振幅, $S_{1,2-}$ 表示 SPPs 在总线波导出口端的输出振幅, A 表示为干形腔归一化后的振幅。振幅随时间的改变可得:

$$\frac{dA}{dt} = (j\omega_n - \tau_1 - \tau_2 - \tau_{3n})A + \kappa(S_{1+} + S_{2-}) = j\omega A, \quad (4)$$

式中, ω_n 表示干形腔的谐振频率, 由于输出处没有反射, 所以 $S_- = 0$ 。根据能量守恒定律, 波导的输入

与输出相关关系有:

$$S_{2+} = S_{1+} - \kappa A - \eta S_{1+}, \quad (5)$$

式中, η 表示光波在总线波导传输的衰减系数。腔体和总线波导的本身损耗远远小于腔体和波导间的耦合系数, 可忽略不计, 联立上式得波导透射率 T :

$$T = \left| \frac{S_{2+}}{S_{1+}} \right|^2 = \sum \left| 1 - \eta - \frac{\kappa^2}{j(\omega - \omega_n) + \tau_1 + \tau_2 + \tau_{3n}} \right|^2. \quad (6)$$

根据耦合模理论, 当 $\omega = \omega_n$ 时, 谐振腔产生共振, 波导的透射谱出现透射极小值。谐振腔结构参数设置为 $L_1 = L_2 = 340 \text{ nm}$, $H_1 = H_2 = 145 \text{ nm}$, $g = 15 \text{ nm}$, 利用 FDTD 方法计算结构的透射光谱, 如图 2(a) 黑色圆圈标识曲线所示。利用耦合模拟和透射谱, 当 $\tau_1 = 0.08$, $\tau_2 = 0.25$, $\kappa = 0.5$, $\tau_{31} = 0.12$, $\omega = \omega_1 = 3.24 \times 10^{14} \text{ Hz}$ 时在波长 $\lambda_1 = 925 \text{ nm}$ 出现共振模式 mode 1; 当 $\tau_1 = 0.08$, $\tau_2 = 0.25$, $\kappa = 0.5$, $\tau_{32} = 0.22$, $\omega = \omega_2 = 2.02 \times 10^{14} \text{ Hz}$ 时在波长 $\lambda_2 = 1487 \text{ nm}$ 出现共振模式 mode 2, 如图 2(a) 中红色实线所示。

为了分析谐振腔的共振机制, 利用 FDTD 方法计算透射极小值对应波长的电场图, 如图 2(b), 图 2(c) 所示。波长为 $\lambda_1 = 925 \text{ nm}$ 处的极小值由总线波导与干形谐振腔耦合, 在 L_2 水平条产生三阶共振所导致, 而 $\lambda_2 = 1487 \text{ nm}$ 处的极小值, 则是由腔中 L_2 水平条产生一阶共振导致。

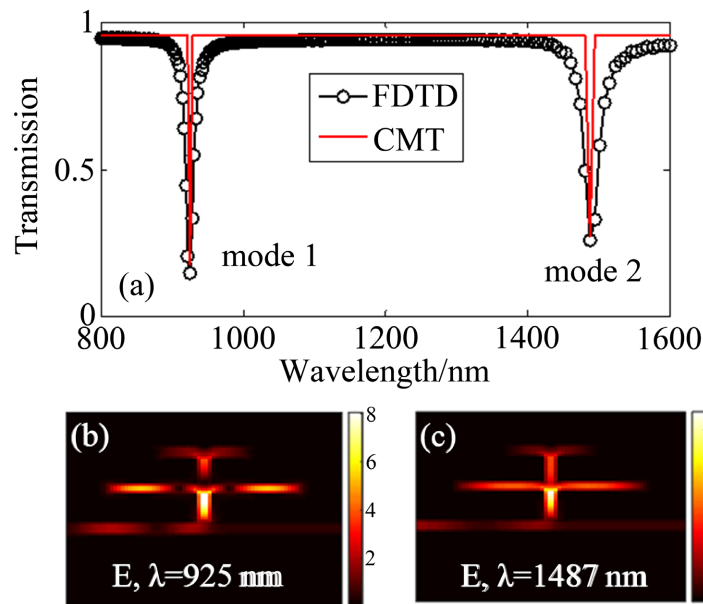


Figure 2. Chinese word gan shaped transmission spectrogram and electric field distribution. (a) Transmission spectra of Chinese word gan shaped; (b) Electric field distribution of mode 1; (c) Electric field distribution of mode 2

图 2. 干形透射谱图与电场分布。(a) 干形结构透射谱图; (b) Mode 1 电场分布图; (c) Mode 2 电场分布图

3. 结构参数对透射谱的影响

3.1. 耦合间距 g 对透射谱的影响

总线波导中的 SPPs 能量沿 x 方向传输, 在 y 方向产生倏逝波。在腔与波导靠近区域, 倏逝波耦合进谐振腔内, 所以腔与波导的耦合距离对两个共振模式之间的耦合强度有较大影响。设置谐振腔参数为 $L_1 = L_2 = 340 \text{ nm}$, $H_1 = H_2 = 145 \text{ nm}$, $w = 50 \text{ nm}$ 不变, 对耦合间距 g 从 15 nm 增加到 25 nm , 步长为 5 nm 。

不同耦合间距对应的透射谱如图 3 所示, 从大观上可知共振峰有下降的趋势, 并且发生蓝移。这是因为随着耦合间距的增加, 两者之间的耦合作用逐渐减小。

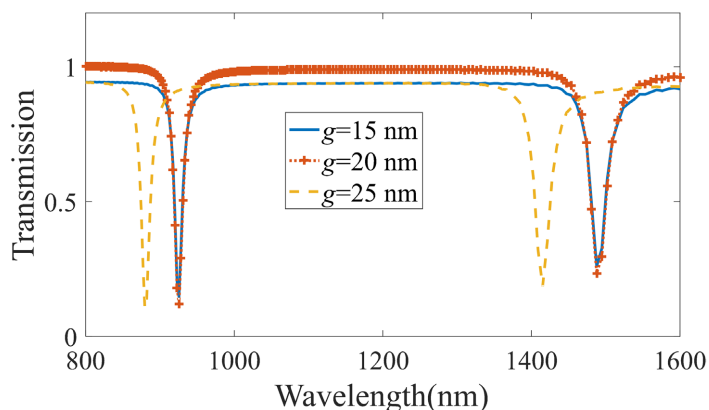


Figure 3. Effect of coupling spacing g change on transmission spectrum
图 3. 耦合间距 g 变化对透射谱的影响

3.2. 结构参数 L 对透射谱的影响

将总线波导与干形腔的耦合距离固定 $g = 15 \text{ nm}$, 总线波导和干形支节的宽均设置为 $w = 50 \text{ nm}$ 时, 探讨各个干形支节在不同长度变化下对传感特性的影响, 令 $L_3 = H_1 + H_2 + w$ 。其透射谱图如图 4 所示, 当顶部水平条 L_1 从 300 nm 增加到 380 nm , 步长为 40 nm 时, 得透射谱图 4(a), 图中的两个波长相应的由

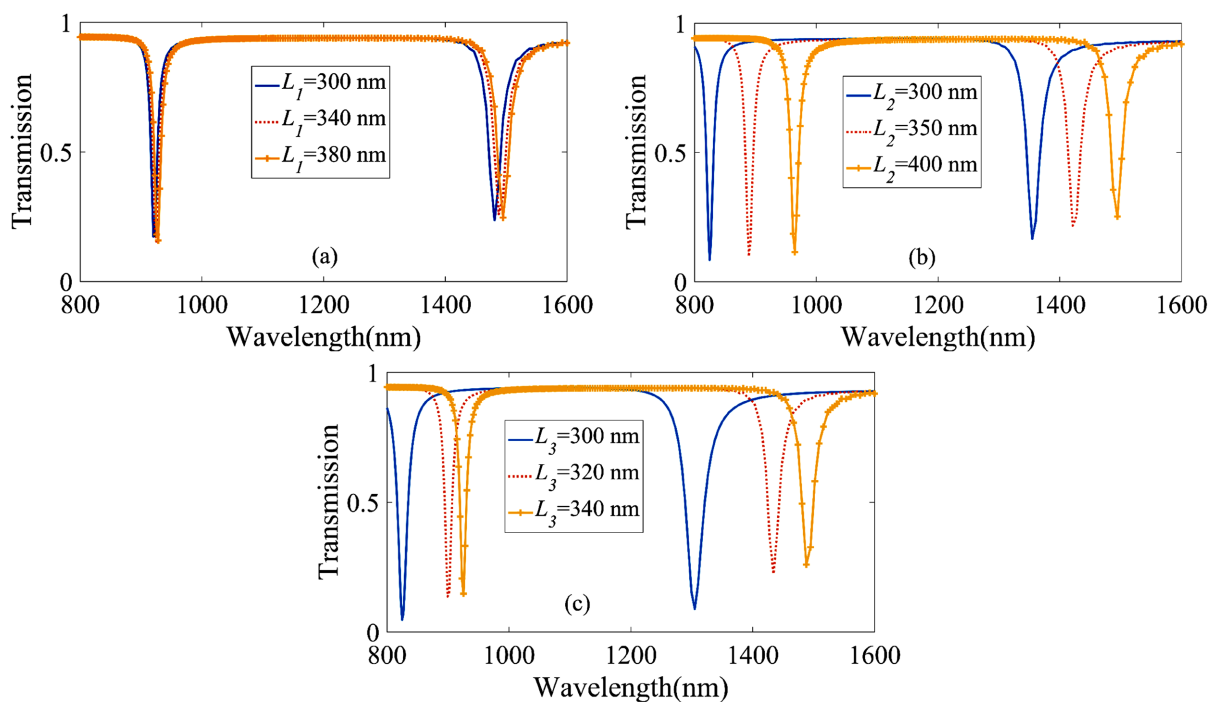


Figure 4. Transmission spectra of different lengths of each Chinese word gan shaped segment. (a) The effect of the change of L_1 on the transmission spectrum; (b) The effect of the change of L_2 on the transmission spectrum; (c) The effect of the change of L_3 on the transmission spectrum

图 4. 各个干形支节不同长度的透射谱图。(a) L_1 变化对透射谱的影响; (b) L_2 变化对透射谱的影响; (c) L_3 变化对透射谱的影响

$\lambda_1 = 877 \text{ nm}$ 和 $\lambda_2 = 1402 \text{ nm}$ 增加到 $\lambda_1 = 928 \text{ nm}$ 和 $\lambda_2 = 1494 \text{ nm}$ 。当中间水平条 L_2 从 300 nm 增加到 400 nm ，步长为 50 nm 时，由图 4(b) 得，透射谱中的两个波长相应的由 $\lambda_1 = 824 \text{ nm}$ 和 $\lambda_2 = 1354 \text{ nm}$ 增加到 $\lambda_1 = 964 \text{ nm}$ 和 $\lambda_2 = 1494 \text{ nm}$ 。当竖直条 L_3 从 300 nm 增加到 340 nm ，步长为 20 nm 时，从图 4(c) 可知，透射谱中的两个波长相应的由 $\lambda_1 = 824 \text{ nm}$ 和 $\lambda_2 = 1304 \text{ nm}$ 增加到 $\lambda_1 = 925 \text{ nm}$ 和 $\lambda_2 = 1487 \text{ nm}$ 。因此从这些图可以得出一个结论，随着干形支节长度的增加，Fano 共振产生红移现象且透射率逐渐变大。

3.3. 折射率 n 对透射谱的影响

随着介质折射率的变化，Fano 共振会受到很大的影响，其中灵敏度(S)和品质因素(FOM)均是常用于评估传感性能的重要参数，其定义分别为：

$$S = \Delta\lambda / \Delta n, \quad (7)$$

$$\text{FOM} = S / \text{FWHM}, \quad (8)$$

式中， $\Delta\lambda$ 为 Fano 共振波长的变化情况， Δn 为介质的折射率变化量，FWHM 为谐振谷或者峰的半峰全宽。

当将参数 $w = 50 \text{ nm}$ ， $L = 340 \text{ nm}$ ， $g = 15 \text{ nm}$ 固定时，改变介质折射率 n ，MIM 波导结构的透射谱如图 5(a) 所示，此时的折射率从 1.00 增加到 1.04 ，步长为 0.01 ，从中可以看出 Fano 共振波长 λ_1 和 λ_2 均出现了红移。

共振波长与折射率的线性拟合关系如图 5(b) 所示，其线性相关系数分别为 0.9947 和 0.9999 ， λ_1 的折射率灵敏度为 908.825 nm/RIU ， λ_2 的折射率灵敏度为 1444.5 nm/RIU ，品质因素 FOM 分别为 64.91 和 68.78 。

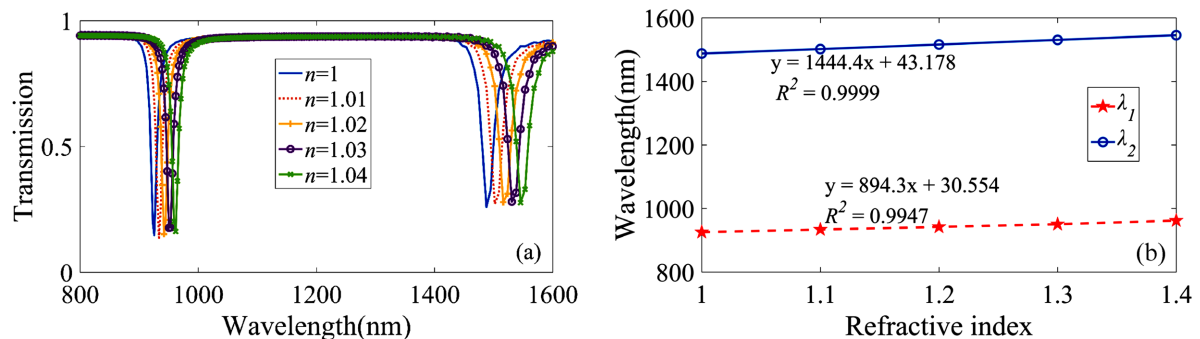


Figure 5. Influence of refractive index on transmission spectrum. (a) Transmission spectra corresponding to different medium refractive n ; (b) Relationship between resonance wavelength and refractive index

图 5. 折射率 n 对透射谱的影响。(a) 不同介质折射率 n 对应的透射谱图；(b) 共振波长与折射率的关系

4. 腔结构在通信器件上应用的研究

4.1. 干形腔温度传感应用

乙醇作为温敏材料利用毛细管的吸引力填充进入干形腔内。随着温度的变化，乙醇的折射率发生改变，见公式(9)所示。

$$n = 1.36048 - \Delta T \times 3.94 \times 10^{-4} \quad (9)$$

其中 $\Delta T = T - T_0$ ， ΔT 为温度改变量 $T_0 = 20^\circ\text{C}$ 为平常室温， T 为环境的温度。如图 6 所示，当所取温度范围在 $-60^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$ 时，波谷的值随着温度的减小而不断增大，与此同时其波长发生了向左方向移动的现象，即波长变小。

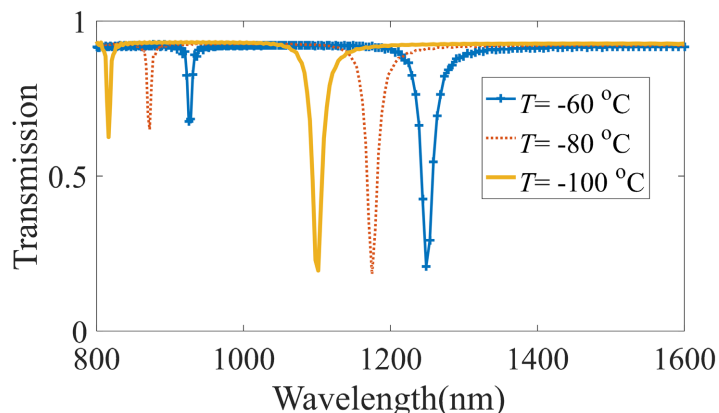
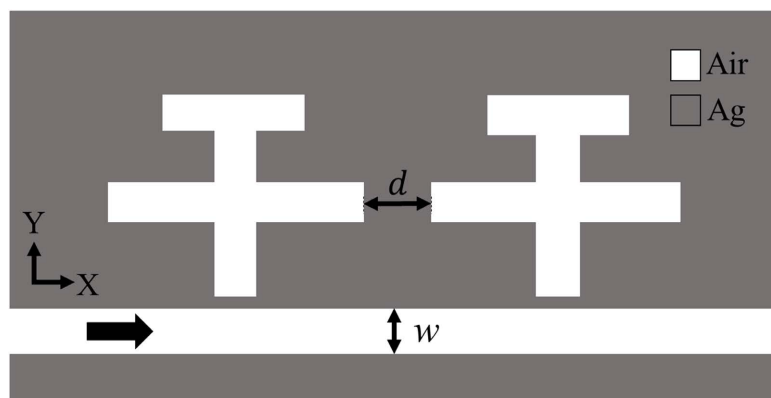


Figure 6. Effect of temperature change on transmission spectrum

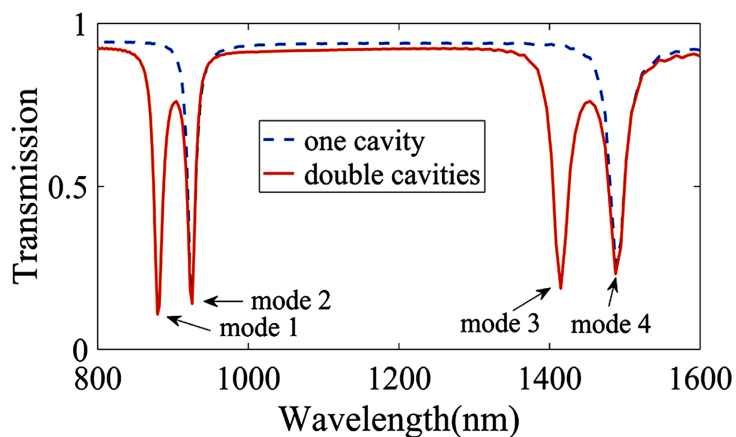
图 6. 温度变化对透射谱的影响

4.2. 干形腔级联结构研究

在一个干形腔结构的同侧，且相距 $d = 100 \text{ nm}$ 处添加一个相同参数的谐振腔，如图 7(a)所示。通过仿真模拟，当只有一个谐振腔存在时，透射谱如图 7(b)中蓝色虚线所示，在波长 925 nm 和 1487 nm 发生共振。当谐振腔数量增加为 2 个时，透射谱除了原有的共振波长外，还增加了两个透射极小值，其波长分别为 879 nm 和 1415 nm，如图 7(b)中红色实线所示。可以看出在加一个相同的谐振腔后出现了红色曲



(a)



(b)

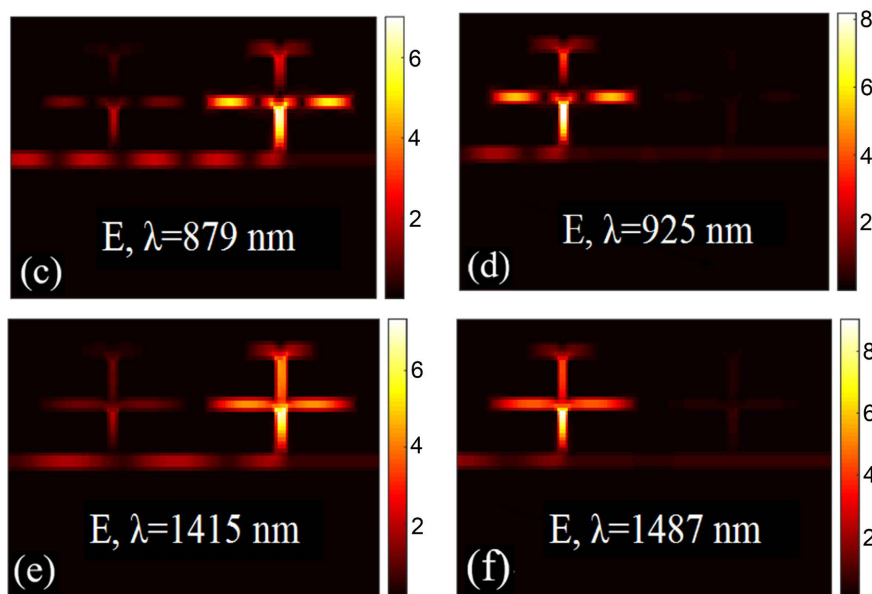


Figure 7. Double cavities cascade structure. (a) Double cavities structure diagram; (b) Double cavities transmission spectrum; (c) Electric field distribution of mode 1; (d) Electric field distribution of mode 2; (e) Electric field distribution of mode 3; (f) Electric field distribution of mode 4

图 7. 双腔级联结构。(a) 双腔结构图；(b) 双腔透射谱图；(c) Mode 1 电场分布图；(d) Mode 2 电场分布图；(e) Mode 3 电场分布图；(f) Mode 4 电场分布图

线透射谱，看图可知这是类电磁感应透明现象(Electromagnetically induced transparency, EIT)，可应用慢光方面。根据图 7(c)可知，mode 1 为右侧谐振腔共振导致的透射极小值；从图 7(d)得出，mode 2 为左侧谐振腔显著共振导致的透射极小值；mode 3 可从图 7(e)可知是由右侧谐振腔共振导致的透射极小值；由图 7(f)可知，mode 4 出现透射极小值是因为左侧谐振腔显著共振导致的。又 Fano 共振对结构参数十分敏感，通过调节结构参数可以改变透射谱中的变化，其谐振模式的也将发生改变，其中有品质因子 Q 可表示为：

$$Q = \lambda / \Delta\lambda \quad (10)$$

在式中， λ 为中心波长， $\Delta\lambda$ 为半峰全宽(FWHM)。通过计算，两个干型腔对应结构的最大品质因子为 $Q_1 = 29$ 。

5. 总结

本文运用 FDTD 法模拟干形腔与 MIM 波导的耦合结构，研究腔结构参数对透射率的影响。优化结构参数，得到结构的灵敏度最高为 1444.5 nm/RIU，品质因素 FOM 最高为 68.78。其次，将腔结构添加温敏材料，可用于温度传感。最后，增加谐振腔数量形成腔级联结构，系统出现类电磁感应透明现象，结构的品质因子最大为 29。根据类电磁感应透明现象，该系统结构可用于慢光领域。这些研究为今后光子器件在全光通信领域的应用提供了一定的价值参考。

基金项目

贵州省高等学校教学内容和课程体系改革项目(2021369)，贵州大学科技学院校级本科教学工程项目(202001)。

参考文献

- [1] 陈颖, 许扬眉, 高新贝, 曹景刚, 谢进朝, 朱奇光. 含矩形腔的 MIM 波导耦合 T 型腔结构 Fano 共振传感特性研

- 究[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 332-338.
- [2] 杨凤英, 陈跃刚. X 形谐振腔的共振及其差动传感特性研究[J]. 量子光学学报, 2021, 27(2): 137-147.
- [3] 赵颂, 周华, 王淑英, 韩非, 蒋斯涵, 沈向前. 基于金属纳米球等离子增强的高效钙钛矿/硅电池设计[J]. 物理学报, 2022, 71(3): 330-336.
- [4] 王娅欣, 张克非, 邵龙, 蒋涛. 六信道光子晶体环形腔波分解复用器的设计[J]. 激光杂志, 2019, 40(6): 45-49.
- [5] 丁冬艳, 梁忠诚, 顾敏芬, 陈家璧, 庄松林. 波导多层光存储器的数据记录方式[J]. 金陵科技学院学报, 2008(2): 14-17.
- [6] 陈颖, 曹景刚, 谢进朝, 高新贝, 许扬眉, 李少华. 含双挡板金属-电介质-金属波导耦合方形腔的独立调谐双重 Fano 共振特性[J]. 物理学报, 2019, 68(10): 248-256.
- [7] 张莹, 陈梅雄, 李莹颖, 袁杰. 光学微腔的应用和发展前景[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(4): 17-27.
- [8] 祁云平, 张婷, 郭嘉, 张宝和, 王向贤. 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[J]. 物理学报, 2020, 69(16): 233-242.
- [9] 谷红明, 黄永清, 王欢欢, 武刚, 段晓峰, 刘凯, 任晓敏. 一种新型光学微腔的理论分析[J]. 物理学报, 2018, 67(14): 145-151.
- [10] 陈颖, 罗佩, 田亚宁, 刘晓飞, 赵志勇, 朱奇光. 含金属双缝的金属-电介质-金属波导耦合环形腔 Fano 共振慢光特性研究[J]. 光学学报, 2017, 37(9): 288-293.
- [11] 卓青霞, 卓鸿俊. 圆盘阵列结构表面等离子激元传感器的研究[J]. 现代信息科技, 2021, 5(7): 33-37.
- [12] 魏国强, 田晋平, 杨荣草, 裴为华. 带有同心双圆环谐振腔的 MIM 波导的 Fano 谐振特性研究[J]. 量子光学学报, 2019, 25(3): 325-335.
- [13] 张利伟, 黄星, 孟威威, 乔文涛. MIM 波导结构中的等离子激元诱导透明和慢光效应[J]. 半导体光电, 2020, 41(6): 808-814+821.