

耦合谐振系统中基于 Fano 共振的光学压力传感器*

陈召^{1)2)†} 马昕新¹⁾ 李童¹⁾ 王艺霖¹⁾

1) (北京化工大学数理学院, 北京 100029)

2) (山西大学光电研究所, 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 太原 030006)

(2023 年 12 月 27 日收到; 2024 年 1 月 18 日收到修改稿)

光学压力传感器在微小形变检测、环境监测以及医学领域等方面具有非常重要的作用. 然而, 外加压力与谐振腔形变前后的光学响应之间的定量关系很难获得. 本文提出了一种基于金属-介质-金属波导的耦合谐振腔系统用于实现光学压力传感器. 利用有限元方法对该系统的力学特性以及受力前后的光学传输特性进行详细分析. 仿真结果显示谐振腔的最大形变量与所施压力呈简单的线性关系. 给出了光学压力传感器灵敏度的直接定义, 并基于条形腔与槽形腔耦合产生的 Fano 共振现象, 获得了灵敏度为 6.75 nm/MPa 的光学压力传感器件. 除此之外, 添加了 stub 谐振腔, 获得了双 Fano 共振现象, 且随着外部压力的变化, 两个 Fano 线型表现出不同的变化规律; 特别地, 合适的压力数值可使得双 Fano 共振变成单 Fano 共振. 该结构的特点适用于不同压力下的光学性质变化检测、化学高压实验测量和化学反应动力学过程的研究.

关键词: 表面等离激元, 金属-介质-金属波导, 光学压力传感器, Fano 共振

PACS: 42.82.Et, 42.82.Gw, 42.79.-e, 52.25.Fi

DOI: 10.7498/aps.73.20232025

1 引言

基于表面等离激元 (surface plasmon polaritons, SPPs) 效应的纳米光子学器件, 可以在亚波长范围内控制光, 增强光与物质之间的相互作用, 为高性能传感开辟了广阔的应用前景^[1-3]. 研究人员设计了各种各样的微纳结构用于实现等离激元传感器, 比如杂化波导体系^[4,5]、光子晶体体系^[6,7]、金属纳米颗粒系统^[8,9]、超材料体系^[10-12]、金属-介质-金属 (metal-insulator-metal, MIM) 波导系统^[13-15]等. 其中, 基于 MIM 波导的纳米传感器系统由于其独特的光场局域特性和传输能力而得到了广泛的应用, 且 MIM 波导具有亚波长尺度特性, 这为

光学器件的小型化和集成化提供了前提条件^[16-20]. 与折射率传感器不同的是, 光学压力传感器是一种可以将受到的压力信号转换成光学信号的光学器件, 擅长检测微小的结构变化, 并提供高精度、实时的压力数据, 有助于提高仪器的稳定性和可靠性^[21-24]. 目前, 对光学压力传感器件的研究主要是基于两种系统, 一种是光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF) 体系^[21,22], 另一种是金属-介质-金属 (metal-insulator-metal, MIM) 体系^[23,24]. 然而, 由于 PCF 系统光场强度的限制, 致使基于 PCF 系统的光学压力传感器的灵敏度都相对较小. 比如, Chaudhary 等^[21]提出了一种混合双芯 PCF 系统, 获得了灵敏度为 0.0116 nm/MPa 的光学压力传感器. Fu 等^[22]基于偏振保持的 PCF 体

* 中央高校基本科研业务费 (批准号: buctrc202143)、山西大学量子光学与光量子器件国家重点实验室开放基金 (批准号: KF202202) 和国家自然科学基金 (批准号: 62175010, 12174037) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: chenzhao2021@buct.edu.cn

系, 获得了灵敏度为 3.42 nm/MPa 的光学压力传感器. 与基于 PCF 系统的压力传感器相比, 基于 MIM 波导体系的压力传感器的灵敏度相对较高. 比如, Chen 等^[23] 基于 3 个谐振腔的等离子体系统获得了灵敏度为 10.5 nm/MPa 的传感器. Tathfif 等^[24] 通过在谐振腔中添加 34 颗银纳米颗粒, 获得了灵敏度为 25.4 nm/MPa 的传感器. 然而, 在之前报道的基于 MIM 波导的压力传感器工作中^[23,24], 作者并没有充分考虑外部压力对结构产生的实际形变, 并没有给出系统所受压力与谐振波长之间的定量关系. 除此之外, 文献^[25] 中报道的压力传感器灵敏度的获得是基于一种理想悬臂梁模型获得的公式来计算的, 该公式忽略了系统的整体特性. 因此, 这些基于 MIM 波导体系的工作中所报道的压力传感器的灵敏度的数值是有待商榷的.

本文提出了一种基于 MIM 波导结构的光学压力传感器系统, 并给出了压力传感器灵敏度的直接定义. 该系统由一个条形 (slot) 腔和一个槽型 (groove) 腔组成, 利用有限元方算法对该系统的力学特性和光学传输特性进行综合分析. 仿真结果显示, 条形腔的最大形变量与所施压力呈简单的线性关系. 除此之外, 条形腔与槽型腔之间的光场模式相互耦合产生了 Fano 共振, 基于此 Fano 共振获得了灵敏度为 6.75 nm/MPa 的光学压力传感器件. 更进一步, 添加了 stub 谐振腔, 获得了双 Fano 共振现象, 且随着外部压力的变化, 两个 Fano 线型表现出不同的变化规律. 特别地, 合适的压力数值可使得双 Fano 共振变成单 Fano 共振. 该结构的特点适用于不同压力下的光学性质变化检测、化学高压实验测量和化学反应动力学过程的研究.

2 结构设计与数值仿真

图 1 为所设计的基于 MIM 波导的光学压力传感器系统, 其中条形腔长度为 L , 宽度为 w ; 槽型腔宽度为 D , 高度为 H , 两个光学腔之间的耦合距离为 g (本文中 g 的大小固定为 $g = 10 \text{ nm}$); 输入和输出通道的宽度均为 $w = 50 \text{ nm}$. 图中浅黄色和白色区域分别表示银 (Ag) 和空气 (折射率 $n = 1.00$). Ag 的介电常数取自文献^[26] 中的实验数据, 并利用插值法对其进行扩展. 箭头表示入射光激发的 SPPs 从波导的左侧入射, 且由于波导宽度 w 远小于入射光波长, 故该结构中只存在单一的 TM_0 传播

模式. 这里, h 表示顶层 Ag 的厚度, 为了保证光波场不能从条形腔溢出 (SPPs 在 Ag 中的趋肤深度一般小于 50 nm), 同时又可以获得良好的压力传感灵敏度, 选择 $h = 100 \text{ nm}$. P 为条形腔所受的外部压力, l 表示施力的范围, d 为条形腔受压力之后的形变趋势示意图. 压力的存在会改变条形腔的等效长度, 进而使其光学特性发生改变. 详细地分析这些变化, 建立压力变化量 (ΔP) 与谐振波长变化量 ($\Delta\lambda$) 之间的定量关系, 就可以获得该系统作为光学压力传感器件时的灵敏度. 这里给出了光学压力传感器的灵敏度 S_P 的直接定义, $S_P = \Delta\lambda/\Delta P$, 即谐振波长的偏移量 $\Delta\lambda$ 与施加压力变化量 ΔP 之间的比值.

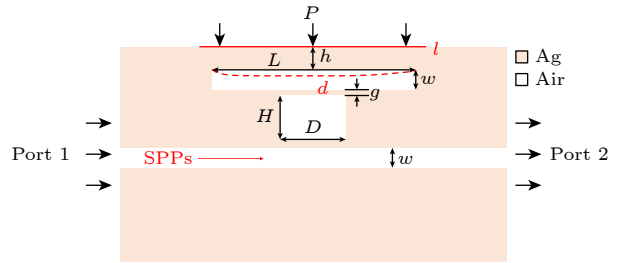


图 1 基于 MIM 波导的光学压力传感器系统及相关参数符号

Fig. 1. Schematic of the optical pressure sensor system and the geometrical parameter symbols.

为定量分析该系统作为光学压力传感器的特征, 使用基于有限元方法 (finite element method, FEM) 的 COMSOL 多物理场软件对其进行数值仿真. 仿真中首先利用 COMSOL 中的固体力学模型对条形腔受力形变特性进行分析; 然后将形变之后的模型整体导入到波动光学模块, 对其光学特性进行分析. 通过分析系统受力前后光谱特征的变化, 进而建立起 ΔP 与 $\Delta\lambda$ 之间的定量关系. 通过多物理场模型的相互耦合体系以及直接定义的灵敏度, 获得了相对准确和可靠的基于 MIM 波导体系的光学压力传感器的灵敏度数值.

3 力学特性分析

首先对图 1 所示体系进行了力学特性分析, 结构参数设置如下: $L = 1000 \text{ nm}$, $H = 225 \text{ nm}$, $D = 200 \text{ nm}$, $l = 1200 \text{ nm}$. Ag 的力学参数密度、杨氏模量和泊松比分别为 10500 kg/m^3 , 75 GPa 和 0.37 . 图 2(a), (b) 分别给出了施加压力为 $P = 50 \text{ MPa}$

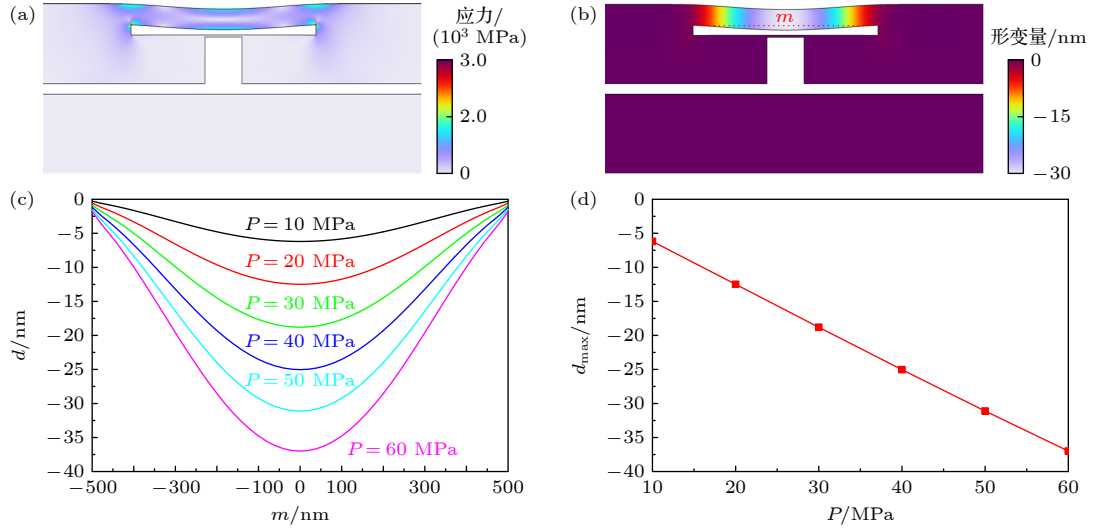


图 2 输入压力 $P = 50$ MPa (a) 冯·米塞斯应力分布; (b) y -方向形变量分布示意图; (c) 不同输入压力 P 下形变量 d 沿图 (b) 中黑色虚线 m 的分布示意图; (d) 最大形变量 d_{max} 与输入压力 P 的关系图

Fig. 2. (a) Von Mises stress (a) and deformation displacement field y -component (b) distributions at $P = 50$ MPa; (c) distribution of deformation d along the black dashed line m in (b) at different input pressure P ; (d) distribution of the maximum deformation d_{max} vs. input pressure P .

时的冯·米塞斯应力和 y -方向形变量的分布示意图。负值表示沿 y 轴负向。从中可以看出, 外部压力的输入, 会使得条形腔发生形变。图 2(c) 给出了不同输入压力下, 条形腔形变量 d 沿图 2(b) 中的黑色虚线 m 的分布示意图。易知, 随着压力的增大, 条形腔的形变量增大, 且最大形变量 d_{max} 与输入压力 P 呈简单的线性关系 ($\Delta d_{\text{max}}/\Delta P = 6 \text{ nm}/10 \text{ MPa}$), 如图 2(d) 所示。条形腔发生形变, 就会使得光波在腔内传输的等效长度发生改变, 进而导致谐振波长的改变, 通过分析这两者变化之间定量关系, 就可以获得基于光学谐振腔的压力传感器件。这里需要注意一点, 由于条形腔的宽度 $w = 50 \text{ nm}$, 因此, 要保证条形腔的最大形变量不能超过 w , 也即要求外部输入压力不能过大 ($P_{\text{max}} < 80 \text{ MPa}$)。

4 光学特性和压力传感特性分析

光学压力传感器在检测微小结构形变方面具有非常重要的意义。在之前的基于 MIM 波导的压力传感器设计中 [23–25], 并没有考虑结构的实际形变。这里将固体力学模型中的结果作为输入, 直接导入到光学模型, 实现了力学特性和光学特性的有效结合, 进而就可以得到相对准确的结果。图 3(a) 给出了谐振腔形变后的细化的三角网格示意图。图 3(b) 给出了不同 P 时, 系统的透射谱特性。黑色曲线表示没有压力 $P = 0 \text{ MPa}$, 也即结构没有

发生形变时的透射谱, 这是一个典型的 Fano 线型, 是由槽型腔提供的连续态与条形腔提供的离散态之间的相互耦合产生的 [27] (更加详细的关于 Fano 共振的产生机制, 见附录 A)。图 3(c) 画出了输入压力 $P = 40 \text{ MPa}$ 时, Fano 峰位置 ($\lambda = 1675 \text{ nm}$, 粉色箭头所示位置) 处的归一化的 $|H_z|$ 分布图。从图中可以看出, 光场能量几乎都局域在提供离散态的条形腔里, 这与文献 [27] 报道的结果一致。除此之外, 随着压力 P 的增大, Fano 线型发生非线性红移, 这些特征使得该系统可以作为一个良好的光学压力传感器件。在压力分别为 $P = 20, 40, 60 \text{ MPa}$ 时, 可以获得对应的传感器灵敏度分别为 $S_p = 3.50, 4.75, 6.75 \text{ nm}/\text{MPa}$ 。附录 B 给出了共振峰随外界压力 P 变化时的关系图以及相应的二阶多项式拟合曲线关系图。需要注意的是, 随着 P 的增大, Fano 线型的线宽也在增大, 这主要是由于 SPPs 在条形腔内传播的等效长度增大, 损耗增大导致的。另外, 如果受力不对称, 相应的光学压力传感器灵敏度会有所下降, 详见附录 C。

更进一步, 为了验证所提结构在应用中的可开发性, 对图 1 所示结构进行拓展, 如图 4(a) 中插图所示。新增加的 stub 腔长度为 t , 宽度为 w 。图 4(a) 给出了该体系下不同压力时的透射谱。其中, 黑色曲线表示 $P = 0 \text{ MPa}$ 时的透射谱, 红色曲线表示 $P = 50 \text{ MPa}$ 时的透射谱, 此时 $t = 220 \text{ nm}$,

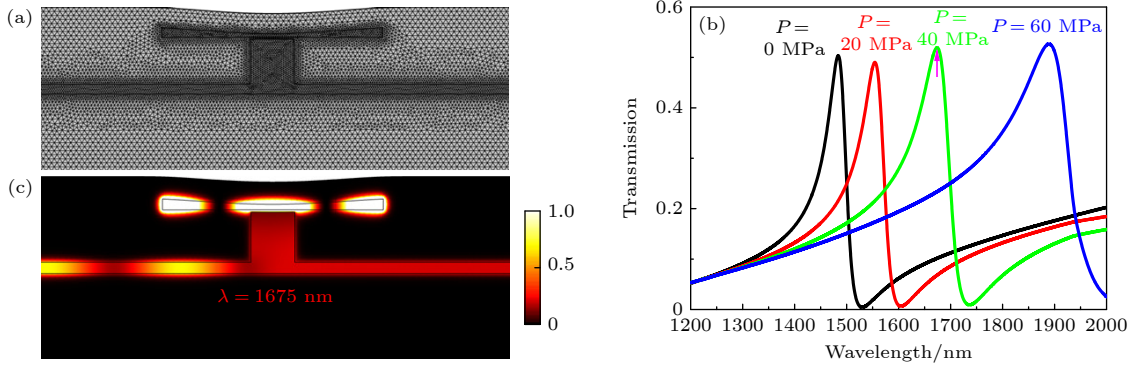


图 3 (a) 形变后的超细化三角形网格示意图; (b) 不同压力时, 系统的透射谱分布图; (c) $P = 40$ MPa 时, 输入波长为 $\lambda = 1675$ nm 时的归一化 $|H_z|$ 分布图 (图 (b) 中粉色箭头所示位置)

Fig. 3. (a) Extra-fine triangular meshing of the proposed structure model after deformation; (b) transmission spectra for different P ; (c) normalized field distributions of $|H_z|$ at $\lambda = 1675$ nm (showed by the pink arrow in Fig. (b)).

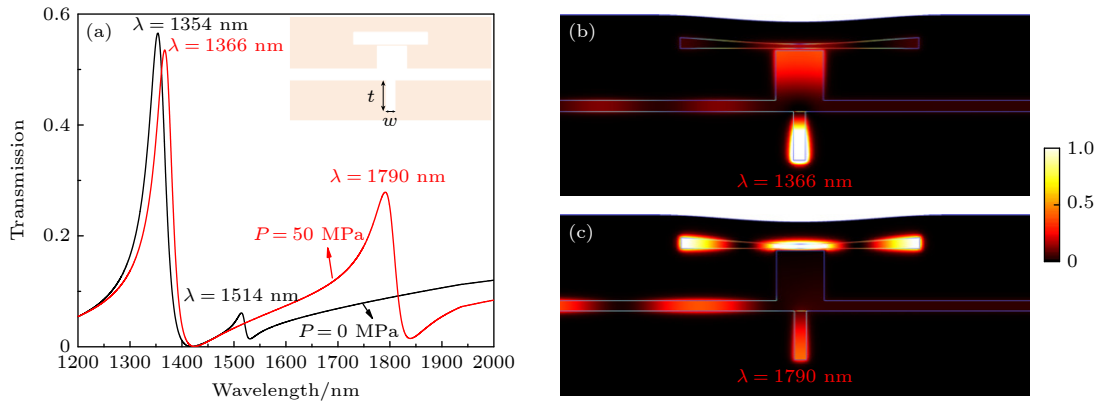


图 4 (a) 插图中所示结构, 有无压力时的透射谱示意图, 黑色和红色曲线分别对应 $P = 0$ MPa 和 $P = 50$ MPa 时的情形; $P = 50$ MPa 时, (b) $\lambda = 1366$ nm 和 (c) $\lambda = 1790$ nm, 两个 Fano 峰位置处的归一化 $|H_z|$ 分布图, 图 (a) 中的插图是为增加 stub 腔之后的结构示意图

Fig. 4. (a) Transmission spectra of the inset structure with $P = 0$ MPa (black line) and $P = 50$ MPa (red line); normalized field distributions of $|H_z|$ at (b) $\lambda = 1366$ nm and (c) $\lambda = 1790$ nm at $P = 50$ MPa. Inset shows the schematic diagram of the structure after adding a stub cavity.

$w = 50$ nm, 其他参数与前述一致. 从黑色曲线可以看出, 新增加 stub 腔, 会使得系统透射谱中产生两个 Fano 峰 ($\lambda = 1354$ nm 和 $\lambda = 1514$ nm). 这是因为 stub 腔也可以提供一个离散态^[28], 并与槽型腔提供的连续态相互耦合, 进而产生一个新的 Fano 共振 (详见附录 A). 但由于 SPPs 在这 3 个腔中产生相互作用, 致使条形腔与 stub 腔内的模式也发生了耦合, 故第 2 个 Fano 峰的受到抑制, 透射率很低. 在 $P = 50$ MPa 时, 条形腔发生形变, SPPs 其中传播的等效长度变大, 故由其耦合产生的 Fano 峰会发生很大的红移现象 ($\lambda = 1790$ nm); 而 SPPs 在 stub 腔中传播的等效长度几乎不受影响, 故由其耦合产生的 Fano 峰变化不大 ($\lambda = 1366$ nm). 图 4(b), (c) 中的归一化 $|H_z|$ 分布图也证

明了前述所言. 此时的外部压力 P 起到了一种模式分离的作用. 基于此双 Fano 共振现象可以获得灵敏度分别为 $S_p = 0.24$ nm/MPa ($\lambda = 1354$ nm) 和 $S_p = 3.52$ nm/MPa ($\lambda = 1514$ nm) 的光学压力传感器件.

微纳光学体系中, 结构参数对系统传输特性的影响很大^[29-31]. 图 5(a) 中的黑色曲线表示图 4(a) 中插图所示结构在 $t = 300$ nm 和 $P = 0$ MPa 时的透射谱. 从中可以看出, 系统的两个 Fano 共振峰 ($\lambda = 1464$ nm 和 $\lambda = 1734$ nm) 相互分离, 这是因为 $\lambda = 1464$ nm 的 Fano 峰主要是由条形腔产生, 而 $\lambda = 1734$ nm 的 Fano 峰主要是由 stub 腔产生, 这可由图 5(b), (d) 中对应的 $|H_z|$ 场分布确认. 随着外部压力 P 的增大, 我们发现两个 Fano 峰发生了

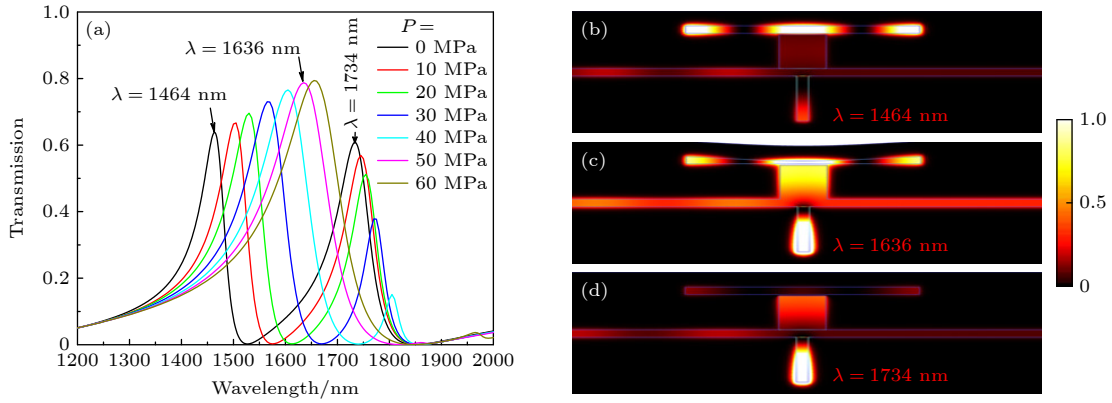


图 5 (a) 不同压力时的透射谱示意图, 此时 $t = 300$ nm; (b)–(d) 分别为图 (a) 中标注的共振峰位置的归一化 $|H_z|$ 分布图
Fig. 5. (a) Transmission spectra for different P at $t = 300$ nm; (b)–(d) normalized field distributions of $|H_z|$ at the resonant wavelength showed in Fig. (a).

不同的红移现象, 左边的 Fano 峰 ($\lambda = 1464$ nm) 红移量较大, 且透射率在增大; 右边的 Fano 峰 ($\lambda = 1734$ nm) 红移量较小, 且透射率在减小. 也即右边 Fano 峰的能量随着 P 的增大转移到了左边 Fano 峰上. 特别当 $P = 50$ MPa 或 $P = 60$ MPa 时, SPPs 在条形腔和 stub 腔之间, 通过槽型腔来回反射, 形成新的谐振腔, 也即对应唯一的 Fano 谐振峰 $\lambda = 1636$ nm. 从图 5(c) 的场分布图可以看出, 此时唯一的 Fano 峰, 即 $\lambda = 1636$ nm, 是由条形腔和 stub 腔相互耦合产生的, 也即外部压力起到了模式聚合的作用. 从图 4 和图 5 的结果可知, 外部压力既可以实现模式分离也可以实现模式聚合, 也即实现了对光场模式的动态调控. 这种独特的特征, 使得我们所提出的结构体系除了可以用作光学压力传感器之外, 还可以用作动态光开关.

与之前报道的基于 MIM 波导体系的光学压力传感器相比 [23–25], 本工作有以下改进. 首先, 提出了一个更加简单的光学压力系统. 其次, 充分考虑了谐振腔的力学和光学特性, 构建了输入压力与共振波长之间的定量关系, 并将变形后的系统应用于光场计算, 这些未见文献报道. 最重要的是, 给出了压力传感器灵敏度的直接定义形式, 即谐振波长的偏移量与施加压力变化量之间的比值. 这种定义的方式, 显然要比文献 [25] 中基于理想悬臂梁模型而不考虑特定系统特殊性的理论公式获得的压力传感器灵敏度更为明确和可靠 (特别地, 如果依据文献 [25] 中的公式去计算本文中的灵敏度的话, 可以得到的压力传感器的灵敏度数值为 ~ 35 nm/MPa). 因此, 本工作是对之前的基于 MIM 波导的光学压力传感器的一种修正和改进. 另外,

这种类型的结构设计是可以利用聚焦离子束 (FIB) 等方法进行加工刻蚀的 [32,33]. 本文虽是一个数值仿真的理论工作, 但对未来实验上实现相关光学压力传感器件具有一定的指导意义. 这种高灵敏度的光学压力传感器件在医疗器械, 航天领域以及环境监测领域将会具有非常重要的意义.

5 结 论

综上所述, 本文证明了一种基于 MIM 波导系统的光学压力传感器, 该系统由一个条形腔和一个槽型腔组成, 并利用 FEM 算法对其力学和光学传输特性进行了详细计算和分析. 结果表明, 谐振腔的最大形变量与所施压力成简单的线性关系, 且条形腔与槽型腔之间的相互耦合产生了 Fano 共振, 并基于此现象获得了灵敏度为 6.75 nm/MPa 的光学压力传感器件. 除此之外, 通过添加 stub 谐振腔, 获得了双 Fano 共振现象, 且随着外部压力的变化, 实现了对 Fano 峰的动态调控. 本工作充分考虑了结构形变与施加压力之间的关系, 给出了光学压力传感器灵敏度的直接定义, 这也使得本文结果比之前报道的结果要相对准确和可靠. 以上这些特征, 可以使得文中所提出的结构体系用于实现高性能多功能的微纳光学器件.

附录 A Fano 共振的产生机制分析

图 3(b) 中 Fano 共振的产生是由槽型腔提供的连续态与条形腔提供的离散态相互耦合作用产生的. Fano 峰位置处的光场能量主要集中在提供离散态模式的条形腔内, 而槽型腔内相对很弱, 从图 3(c) 的场分布图可以确认这一点.

图 4(a) 中 $\lambda = 1366$ nm 所对应的新的 Fano 峰是由 stub 腔提供的离散态与槽型腔提供的连续态相互耦合产生的, 这可以从图 4(b) 的场分布来确认. 图 A1 给出了不同腔组合时的系统透射谱. 只有槽型腔时, 透射谱类似一条直线, 没有明显共振, 表现为一种连续态 (黑色曲线); 而只有 stub 腔或条形腔时, 系统会发生共振, 表现为一种离散态 (红色或蓝色曲线). 而由连续态和离散态模式相互耦合作用产生的具有明显不对称的特征曲线就是 Fano 共振线型, 这些结果也和文献 [27, 28] 报道一致.

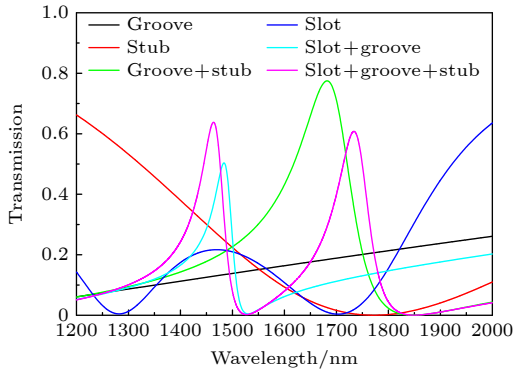


图 A1 不同腔组合时系统的透射谱

Fig. A1. The transmission spectra of the system with different cavity combinations.

附录 B

图 B1 给出了对应于图 3(b) 中的输入压力 P 与 Fano 峰位置之间的关系图 (没有考虑无压力的情形). 黑色符号曲线表示 FEM 计算的数据结果, 红色符号曲线表示

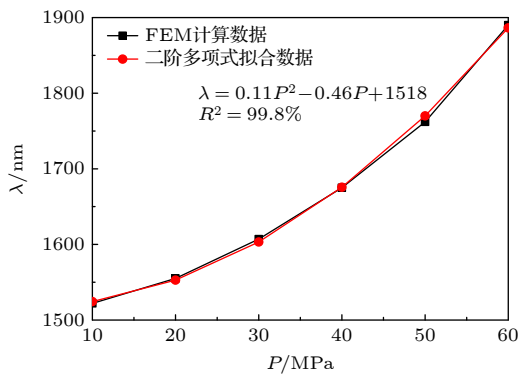


图 B1 共振峰随外界压力 P 变化时的关系图, 黑色符号曲线表示 FEM 计算的数据结果, 红色符号曲线表示二阶多项式拟合后的数据

Fig. B1. The relationship between Fano peak position and P : the black symbolic curve represents the data result calculated by FEM, and the red symbolic curve represents the data fitted by second-order polynomial.

经二阶多项式拟合后的数据. 二阶拟合公式为 $\lambda = 0.11P^2 - 0.46P + 1518$, 对称轴约 $P = 2.1$ MPa, 故随着 P 的增大, Fano 共振峰发生非线性的红移现象, 拟合优度 R^2 大约为 99.8%. 也即随着 P 的增大, 系统作为光学压力传感器的灵敏度也在增加.

附录 C

图 C1 给出了压力为 $P = 40$ MPa 时, 受力范围不对称时的系统透射谱, 这里 Δl 表示施加受力的范围向左或向右偏移中心位置的量. 从中可以看出受力范围向一个方向偏移量越大, 相应的传感器灵敏度就越小. 因此, 为了保证传感器工作在最佳状态, 需调节外部压力使其对称的施加在传感器上.

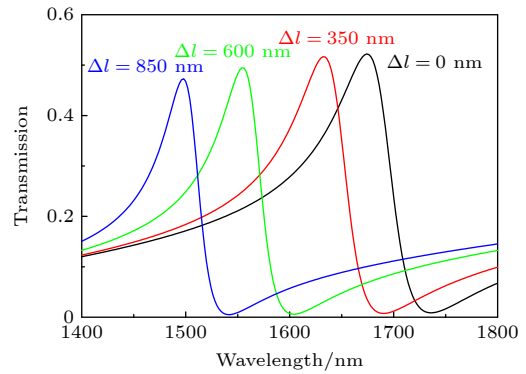


图 C1 $P = 40$ MPa 时不同压力偏移量 Δl 时的透射谱

Fig. C1. Transmission spectra with different pressure offset Δl at $P = 40$ MPa.

参考文献

- [1] Wang J W, Sabcegez M M, Yin Y, Herzer R, Ma L B, Schmidt O G 2020 *Adv. Materials Techno.* **5** 1901138
- [2] Luan E, Shoman H, Ratner D M, Cheung K, Chrostowski L 2018 *Sensors* **18** 3519
- [3] Mejia J R, Oliveira O N 2018 *Chem. Rev.* **118** 10617
- [4] You B W, Lu J Y, Liu T A, Peng J L 2013 *Opt. Express* **21** 21087
- [5] Steglich P, Villringer C, Pulver S 2017 *IEEE Sensors J.* **17** 4781
- [6] Xiao G L, Zhang K F, Yang H Y, Yang Y T, Yang X H, Dou W Y, Zeng L Z 2020 *Acta Opt. Sin.* **40** 1206001 (in Chinese) [肖功利, 张开富, 杨宏艳, 杨寓婷, 杨秀华, 窦婉滢, 曾丽珍 2020 *光学学报* **40** 1206001]
- [7] Gandhi S, Awasthi S, Aly A 2021 *RSC Adv.* **11** 26655
- [8] Raschke G, Brogl S, Susha S, Rogach A, Klar T, Feldmann J, Fieries B, Petkov N, Bein T, Nichtl A, Kurzinger K 2004 *Nano Lett.* **4** 1853
- [9] Perfezou M, Turner A, Merkoci A 2012 *Chem. Soc. Rev.* **41** 2606
- [10] Kuang Y Q, Li G, Yan Z Q, Zhang Y J, Zhang Z D, Hao X W 2020 *Acta Opt. Sin.* **40** 1424001 (in Chinese) [旷依琴, 李刚, 闫竹青, 张彦军, 张志东, 郝现伟 2020 *光学学报* **40** 1424001]

- 1424001]
- [11] Nourinovin S, Nacarro M, Rahman M M 2022 *IEEE Antenn. Propag. M.* **64** 60
- [12] Bochenkov V E, Shabatina T I 2018 *Biosensors* **8** 120
- [13] Chen Z, Ma X X, Duan Y H, Li L H, Zhang S J, Wang Y L, Yu Y L, Hou Z L 2023 *Opt. Express* **31** 35697
- [14] Zhang Y J, Wang H J, Zhang L T, Li G L, Fu X H 2022 *Acta Opt. Sin.* **42** 0524002 (in Chinese) [张燕君, 王护吉, 张龙图, 李广亮, 付兴虎 2022 *光学学报* **42** 0524002]
- [15] Chen J, Li Z, Zou Y 2013 *Plasmonics* **8** 1627
- [16] Wen K, Chen L, Zhou J 2018 *Sensors* **18** 3181
- [17] Han S T, Chen Y, Xu Y M, Cao J G, Gao X B, Xie J C, Zhu Q G 2019 *Acta Optica Sinica* **39** 0212005 (in Chinese) [韩帅涛, 陈颖, 许扬眉, 曹景刚, 高新贝, 谢进朝, 朱奇光 2019 *光学学报* **39** 0212005]
- [18] Chau Y, Chao C, Huang H 2019 *Nanomaterials* **9** 1433
- [19] Tathfif I, Hassan M, Sharmeen K 2022 *Opt. Commun.* **519** 128429
- [20] Chen Z, Wang Y L, Hou Z L 2022 *IEEE Sensors J.* **22** 14044
- [21] Chaudhary V S, Kumar D, Mishra R 2020 *Optik* **210** 164497
- [22] Fu H, Tam H Y, Shao L Y 2008 *Appl. Opt.* **47** 2835
- [23] Chen F, Yang W X 2022 *J. Opt. Soc. Am. B* **39** 1716
- [24] Tathfif I, Yaseer A A, Rashid K S 2021 *Opt. Express* **29** 32365
- [25] Wu J, Lang P, Chen X 2016 *J. Mod. Opt.* **63** 219
- [26] Johnson P B, Christy R W 1972 *Phys. Rev. B* **6** 4370
- [27] Chen Z, Yu L, Wang L 2015 *J. Light. Technol.* **33** 3250
- [28] Chen Z, Yu L, Wang L 2015 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **27** 1695
- [29] Chen J J, Li Z, Li J, Gong Q H 2011 *Opt. Express* **19** 9976
- [30] Wu Y D 2014 *J. Light. Technol.* **32** 4242
- [31] Rohimah S, Tian H, Wang J 2022 *Appl. Opt.* **61** 1275
- [32] Chai Z, Hu X Y, Zhu Y, Sun S B, Yang H, Gong Q H 2014 *Adv. Opt. Mater.* **2** 320
- [33] Chai Z, Hu X Y, Yang H, Gong Q H 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 151104

Optical pressure sensor based on Fano resonance in a coupled resonator system*

Chen Zhao^{1)2)†} Ma Xin-Xin¹⁾ Li Tong¹⁾ Wang Yi-Lin¹⁾

1) (College of Mathematics and Physics, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

2) (State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

(Received 27 December 2023; revised manuscript received 18 January 2024)

Abstract

Optical pressure sensor plays a very important role in micro deformation detection, environmental monitoring, and medical fields. However, the quantitative relationship between the applied pressure and the optical response of the resonator before and after deformation is difficult to obtain. In this paper, a coupled resonator system based on metal-insulator-metal waveguide for optical pressure sensor is proposed. The mechanical properties of the system and the optical transmission properties before and after applied pressure are analyzed in detail by using the finite element method. Simulation results show that the maximum deformation of the resonator has a simple linear relationship with the applied pressure. We give a direct definition of the sensitivity of the optical pressure sensor. And based on the Fano resonance phenomenon caused by the coupling the slot cavity with the groove cavity, the optical pressure sensor with a sensitivity of 6.75 nm/MPa is achieved. In addition, we add stub resonator to obtain double Fano resonance phenomenon, and with the change of external pressure, the two Fano line types show different change laws. Specifically, a suitable pressure value can make a double Fano resonance become a single Fano resonance. The special features of our suggested structure are applicable to detecting optical property changes under different pressures, chemical high pressure experimental measurement and study of chemical reaction kinetics process.

Keywords: surface plasmon, metal-insulator-metal waveguide, optical pressure sensor, Fano resonance

PACS: 42.82.Et, 42.82.Gw, 42.79.-e, 52.25.Fi

DOI: 10.7498/aps.73.20232025

* Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China (Grant No. buctrc202143), the Program of State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices of Shanxi University, China (Grant No. KF202202), and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62175010, 12174037).

† Corresponding author. E-mail: chenzhao2021@buct.edu.cn

耦合谐振系统中基于Fano共振的光学压力传感器

陈召 马昕新 李童 王艺霖

Optical pressure sensor based on Fano resonance in a coupled resonator system

Chen Zhao Ma Xin-Xin Li Tong Wang Yi-Lin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 084205 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20232025

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20232025>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于十字连通形环形谐振腔金属-介质-金属波导的折射率传感器和滤波器

Refractive index sensor and filter of metal-insulator-metal waveguide based on ring resonator embedded by cross structure

物理学报. 2018, 67(19): 197301 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180758>

基于Fano共振的金属-绝缘体-金属-石墨烯纳米管混合结构动态可调折射率传感器

Dynamically tunable refractive index sensor based on Fano resonance with metal-insulator-metal-graphene nanotube hybrid structure

物理学报. 2022, 71(17): 178101 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220652>

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

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

物理学报. 2020, 69(16): 167301 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200405>

三椭圆谐振腔耦合波导中可调谐双重等离子体诱导透明效应的理论分析

Theoretical analysis of tunable double plasmon induced transparency in three-ellipse-shaped resonator coupled waveguide

物理学报. 2022, 71(24): 247301 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221365>

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

Resonance characteristics of independently tuned dual Fano of metal-dielectric-metal waveguide coupling square cavity with double baffles

物理学报. 2019, 68(10): 107302 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181985>

基于超表面的Tamm等离子激元与激子的强耦合作用

Strong coupling between metasurface based Tamm plasmon microcavity and exciton

物理学报. 2020, 69(1): 010201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191225>