

基于三矩形谐振腔非通 MIM 波导的四重法诺传感

王叶壮, 沈宏君, 陈俊坤, 王雅雯

(宁夏大学 物理学院, 银川 750000)

摘要: 为了得到高灵敏度的生物传感器,设计了一种可以激发出四重法诺共振的非通金属-绝缘体-金属(Metal-Insulator-Metal, MIM)波导传感器. 采用了上下对称结构,由一个竖放矩形谐振腔和两个横放矩形谐振腔与总线波导共同作用而得到了四重法诺共振. 采用了有限时域差分方法计算了此结构的传输特性与Z方向的归一化磁场,并详细分析了其法诺共振的产生机理. 通过计算结构几何参数调节后的透射光谱,从而得出了四重法诺共振峰透射率和共振位置可以通过改变结构几何参数而获得独立调节. 此外还发现在结构中添加不同浓度的葡萄糖溶液可以实现高折射率传感灵敏度(S),获得最高灵敏度2736.98nm/RIU,可以看出此结构对于折射率变化有很高的灵敏度,这为设计和优化纳米级别的折射率传感器提供了新的思路,还可以应用于电路构建前进行性能测试.

关键词: 金属-绝缘体-金属; 传感器; 谐振腔; 法诺共振; 灵敏度

中图分类号: O439

文献标志码: A

DOI: 10.19855/j.1000-0364.2025.035002

Quadruple Fano sensing based on three rectangular resonant cavity non pass MIM wave guide

WANG Ye-Zhuang, SHEN Hong-Jun, CHEN Jun-Kun, WANG Ya-Wen

(School of Physics, Ningxia University, Yinchuan 750000, China)

Abstract: In order to obtain a highly sensitive biosensor, in this paper, a non pass metal insulator metal (MIM) wave guide sensor that can excite quadruple Fano resonance is designed. The top and bottom symmetric structure is adopted, and a vertical rectangular cavity and two horizontal rectangular cavities interact with the bus wave guide to obtain the quadruple Fano resonance. The finite difference time domain (FDTD) method is used to calculate the transmission characteristics of the structure and the normalized magnetic field in the Z direction, and the mechanism of its Fano resonance is analyzed in detail. By calculating the transmission spectrum adjusted by the structural geometric parameters, it is obtained that the transmission and resonance position of the four Fano resonance peaks can be independently adjusted by changing the structural geometric parameters. In addition, it was found that adding different concentrations of glucose solutions to the structure can achieve high refractive index sensing sensitivity (S), the highest sensitivity can reach 2736.98nm/RIU, indicating that this structure has high sensitivity to changes in refractive index, This provides a new approach for designing and optimizing nanometer scale refractive index sensors, which can be applied for performance testing before circuit construction.

Key words: Metal-insulator-metal; Sensor; Resonant Cavity; Fano resonance; Sensitivity

收稿日期: 2023-09-20

基金项目: 国家自然科学基金(12164035)

作者简介: 王叶壮(1999—), 男, 硕士, 主要从事电磁计算与光学设计等方面的研究. E-mail: 1324146636@qq.com

通信作者: 沈宏君. E-mail: shenghongj2004@126.com

1 引言

表面等离子激元 (Surface plasmon polaritons, SPPs)^[1]是由于入射光产生的光子与金属上可移动的自由电子相互作用而产生的一种电磁波模式^[2], 是自由光子与电子在金属表面相互作用产生的混合激发态. SPPs 通常在金属与绝缘体界面传播, 其电磁场强度在垂直界面方向呈现指数衰减, SPPs 可以沿传播距离将光限制在亚波长范围内, 还可以克服光的衍射极限, 为纳米光子器件的发展提供了应用价值. 等离子体结构就是基于 SPPs 而广泛应用于光子学领域, 如光开关^[3]、滤波器^[4]、布拉格反射器^[5]、传感器^[6]、等离子体波导^[7]分束器^[8]等. 由金属和绝缘体组成的金属-绝缘体-金属 (Metal-Insulator-Metal, MIM) 波导^[9], 可以在亚波长范围内传播 SPPs, 并对其有很好的约束性, 而且结构简单方便制造还具有低损耗特性. 基于 SPPs 的 MIM 波导可以激发法诺共振^[10]. 法诺共振是一种弱相互作用, 由辐射模式和非辐射模式之间的相干耦合和干扰引起法诺共振与洛伦兹共振的区别在于其独特的不对称线形^[11], 法诺共振是在具有宽带连续谱和具有窄带离散谱之间的干涉中产生的. 法诺共振通常具有尖锐的谱线轮廓, 对其结构参数和周围环境都非常敏感^[12]. 这些尖锐的、不对称的轮廓可以绑定到一个单一的消光光谱, 为传感器提供更高的分辨率^[13]. 这有助于提高器件的性能. 法诺共振具有较窄的从最低到最高传输的波长范围, 可以提高器件的品质因子. 此外, 由于对结构的结构参数与环境非常敏感, 故经常应用于传感器中.

Rakhshani 等人在 2018 年设计了一种由两个槽腔耦合的方形谐振腔内的纳米棒阵列组成的等离子体纳米传感器. 通过填充葡萄糖溶液并改变其浓度获得了其传感器特性, 灵敏度达到了 892 nm/RIU^[14]. 陈应等人在 2019 年设计了一种 MIM 波导耦合金属挡板 SCRR 的紧凑光波导结构, 其结构也获得了理想的传感特性, 其中灵敏度高达 1120 nm/RIU^[15]. 朱军等人在 2020 年设计了由 MIM 波导与半圆谐振腔耦合的键形谐振腔组成的等离子体波导结构, 由于键形腔的不对称性出现了双重法诺共振, 并获得了高达 1261.67nm/RIU 的灵敏度^[16]. 2022 年在生物传感器期刊上报道了一篇文献, 作者设计了一种基于方形分裂环谐振腔非通 MIM 波导的多模法诺谐振传感器, 此结

构可以激发五重法诺共振, 并获得了高达 1290.2nm/RIU 的灵敏度^[17]. 由于这些结构的组成较为复杂, 灵敏度并未达到较高标准. 而本文设计了一种可以激发四重法诺共振的非通 MIM 波导, 是由三个矩形谐振腔和总线波导组成, 结构简单易于参数调节. 采用有限时域差分方法分析了结构的传输特性和磁场, 分析了四重法诺共振的产生是由于谐振腔的窄带离散谱和总线波导的宽带连续谱耦合产生. 改变了结构的几何参数对法诺共振峰的透射率和位置均产生了影响, 研究了结构的可调性. 通过添加葡萄糖溶液即改变折射率后发现此结构对与折射率的变化较为敏感, 获得了较好的灵敏度. 此结构有着很好的传感性能, 可以应用于溶液的浓度检测以及纳米级别的传感器中.

2 波导结构及计算

采用了 FDTDsolutions 对结构进行几何建模. 为了节省计算资源采用了 2D 结构计算. 如图 1 所示, 结构主要由竖放矩形和横放矩形谐振腔与母线波导组成. 其中其中灰色部分采用贵金属 Ag 作为背景, 浅蓝色部分即谐振腔与波导部分选用 Air. 其中, 考虑到结构的加工难度, W 为波导宽度固定为 50 nm, w 为矩形的宽度固定为 25 nm, 竖放矩形的高度 L 固定为 150 nm, 横放矩形的长度 l 为 90 nm. H、h、D、d 分别代表了横放矩形距波导高度、竖放矩形距横放矩形高度、波导间距、横放矩形间距. 为便于对照整理参数如表 1 所示. 使用笛卡尔坐标系, 采用有限时域差分法选用 TM 波入射, 波长范围为 300nm-2000nm, 由于 PML 不仅吸收辐射波, 而且吸收倏逝波. 因此, 可以作为具有完美吸收特性的材料层故 x 与 y 方向均选择 PML 边界条件, 入射光在波导左侧激发 SPPs, 波导端口右侧放置监视器收集, 透射率为 T. 由于 Ag 在电磁感应中有较低的介电常数, 故选择金属 Ag 作为背景填充层, 其中银的相对介电常数选用 Drude 模型^[18]:

$$\varepsilon_m(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega}$$

(1)

其中 ω_p 为等离子体频率且 $\omega_p = 9.1\text{eV}$, γ 为碰撞频率与能量损失有关且 $\gamma = 0.018\text{eV}$. 在本文的结构中, 三矩形谐振腔可以看作是一个具有传感特性的法布里-珀罗 (FP) 谐振腔, 等离子体的共振波长与羊角钉型谐振腔之间的公式为:

$$\lambda_p = \frac{2 n_s L_0}{m - \frac{\varphi}{2\pi}}, m = 1, 2, 3 \cdots \quad (2)$$

其中: n_s 为有效折射率, m 为共振阶数, L_0 为谐振腔的周长, φ 为腔内反射引起的相位变化^[19]. 法诺共振曲线的函数关系如下^[20]:

$$T(\delta) = |t_d|^2 \frac{(q + \sigma)^2}{(1 + \delta)^2} \quad (3)$$

其中 $\delta = (w - w_0)/l$ 为无量纲频率, w_0 为谐振频率, l 为法诺共振线宽, t_d 为非共振传递幅值, q 为法诺参数表示线形的不对称度.

由于本结构属于微纳器件, 尺寸较小加工难度较高, 以往光学光刻是微纳米制造的主流光刻技术, 但由于曝光波长衍射极限的限制, 并不能满足高分辨率的要求. 而新一代光刻技术应运而生, 其中纳米压印光刻 (Nanoimprint lithography, NIL) 更是由于成本低分辨率高成为了光刻技术中的佼佼者. 为了保证本结构的高精度, 通常采用软压印技术, 通过电子束或者光学光刻在聚二甲基氧烷 (PDMS) 制作出结构图形, 然后以图形化后的 PDMS 作为压印用的模板再通过分子自组装原理进行压印工艺^[21].

表 1 结构计算参数

Table 1 Structural calculation parameters

Parameter	show	Value	Unit
Waveguide width	W	50	nm
Rectangle width	w	25	nm
Vertical rectangle height	L	150	nm
Horizontal rectangular length	l	90	nm
Height of horizontal rectangle from waveguide	H	20	nm
Vertical rectangle to horizontal rectangle height	h	5	nm
Waveguide spacing	D	15	nm
Horizontal rectangular spacing	d	10	nm

3 模拟结果分析

为了分析此结构的共振机理, 首先对三矩形谐振腔、单母线波导和完整结构的耦合机理进行分析, 从而说明此结构所带来的传感特性, 如图 2 所示. 为了直观的解释法诺共振的形成机制, 把三矩形谐振腔、单总线波导和完整结构分别使用同样的光源计算, 并把三者独立的光谱呈现在图 2 中, 其中 $D = 15\text{ nm}$ 、 $H = 20\text{ nm}$ 、 $d = 10\text{ nm}$ 、 $h = 5\text{ nm}$. 图 2 中黑色正方形点线表示的是单母线波导结构下的透射光谱, 可以看出相对平滑的曲线, 透射率在 0.05 ~ 0.25 之间, 其线性表现为极宽的宽谱, 故单总线波导可以激发出宽带连续谱. 红色圆形电点线表示的为三矩形谐振腔

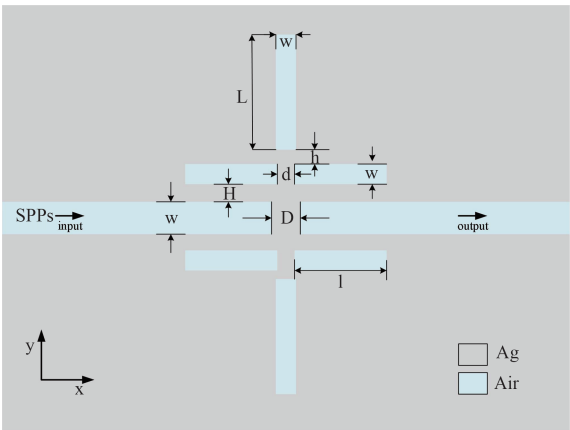


图 1 对称性的三矩形腔非通 MIM 波导二维平面图
Fig. 1 2D planar view of symmetric three rectangular cavity non pass MIM waveguide

下的透射光谱, 可以明显看出在高透射的谱线中存在四个下降峰, 透射率降低并展现出极窄谱宽的离散谱. 蓝色三角形点线是完整结构下的透射光谱, 可以明显看出这几个不对称且快速下降的峰处与洛伦兹线的峰完全不同, 这四处峰值对应了完整结构中窄带离散谱与宽带连续谱的相互耦合干涉而激发的四处法诺共振. 值得注意的是在但结构前两处峰值由于结构的特殊性, 导致的剖面并不尖锐, 故看作为一处法诺共振, 故把共振峰处定义为 FR1、FR2、FR3、FR4, 对应图 2.

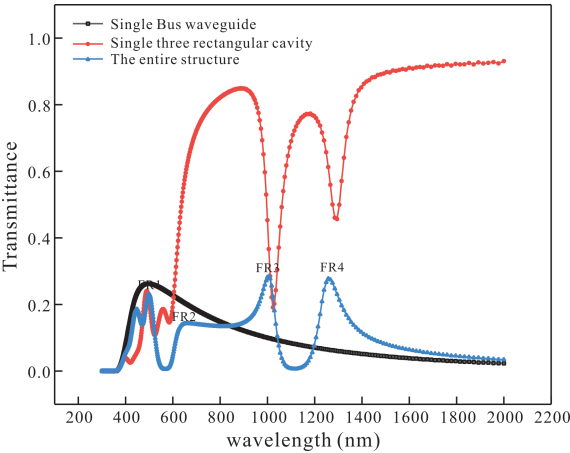


图 2 三种结构下法诺共振形成透射光谱对比图
Fig. 2 Comparison of transmission spectra of Fano resonance formation under three structures

我们计算了四重法诺共振的 Z 方向磁场强度, 如图 3 所示. 通过磁场图进一步分析此结构的共振机理. 可以看出母线波导的磁场能量分布与整体结构的磁场能量分布基本对称. 从图 3a - d 中可以明显看出激发的 SPPs 产生的磁场能量只存在于母线波导和三矩形谐振腔中传播, 因为 SPPs 只能在金属和介质的界面上进行传播, 无法

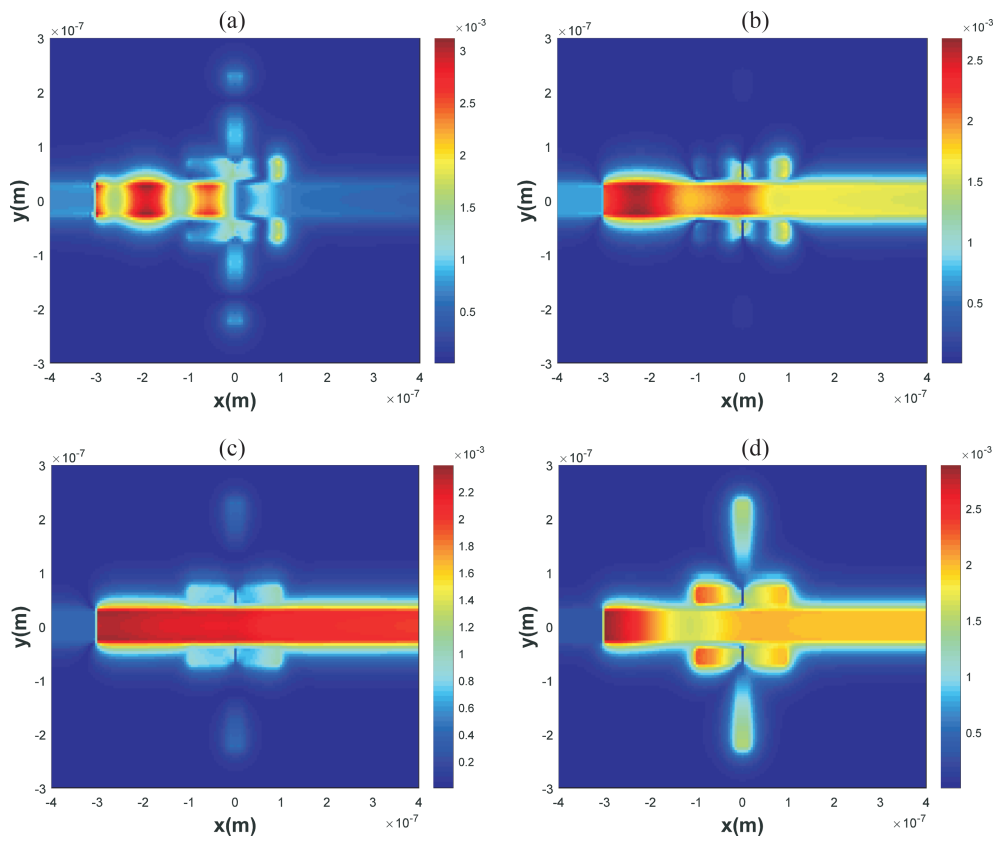


图3 四处法诺共振峰的z方向的磁场图，其中(a-d)对应FR1- FR4.

Fig. 3 The magnetic field maps in z direction of four Fano resonance peaks, where (a - d) corresponds to FR1 - FR4.

在两个介质上传播. 由磁场图可以把传输方式分成两类, 一类是由输入端激发产生的 SPPs 直接作为宽带连续谱传播至输出端, 存在于母线波导中, 而另一类是从输入端激发产生的 SPPs 先进去了三矩形谐振腔, 形成了窄带离散谱, 再到达输出端. 大多数 SPPs 的能量都被耦合进三矩形谐振腔内, 当达到共振波长时才可以到达输出端. 磁场图显示出来的驻波状态是由于两类传输方式在输出端干涉导致的. 所以在图中对应的四个法诺峰的位置磁场能量显著增加, 获得了新的透射峰. 总的来说, 在谐振波长处整体结构共同激发了法诺共振, 由于结构的特殊性, 这也是四重法诺共振产生的原因.

4 结构参数的影响

为了探究四重法诺共振与结构的几何参数之间的关系, 我们进行了结构参数的调节, 如图4所示, 其中固定其他参数 $H = 20\text{ nm}$ 、 $D = 15\text{ nm}$ 、 $d = 10\text{ nm}$, 图4(a)为改变竖放矩形的高度 $h = 2、3、4、5\text{ nm}$ 时计算得出透射光谱, 可以看出随着 h 的增加, 各处的法诺峰透射率增加, FR3 和

FR4 的红移较为明显, 而 FR1 与 FR2 的红移不明显. 图4(b)为改变 h 后四处法诺共振的共振波长. 可以看出四处的法诺峰随着结构参数的变化出现了一定的线性关系, 其中 FR3 与 FR4 的变化明显, 通过改变竖放矩形的高度即改变窄带离散谱从而出现了新的共振波长. 图5(a)为改变横放矩形的间距 d 计算得到的透射谱图, 其余参数不变, 分别计算了 $d = 7.5、10、12.5、15\text{ nm}$ 的透射光谱. 可以看出四处法诺峰的透射率随着 d 的增加而增加, 但峰值位置在 $d = 7.5\text{ nm}$ 到 $d = 10\text{ nm}$ 处四处法诺峰均出现了略微红移, 在 $d = 10\text{ nm}$ 到 $d = 12.5\text{ nm}$ 处 FR1 与 FR4 反而出现了很明显的蓝移, FR2 与 FR3 位置变化不大, 在 $d = 12.5\text{ nm}$ 到 $d = 15\text{ nm}$ 处四处均又出现了略微红移.

图5(b)为改变 d 后四处法诺共振的共振波长. 可以看出 FR1 与 FR4 的变化受参数 d 的影响较大, 通过改变参数 d 也可以使得共振峰发生红移或蓝移, 有很好的协调性. 图6(a)为改变横放矩形的高度 H 计算得到的透射谱图, 其余参数不变, 分别计算了 $H = 15\text{ nm}$ 、 $H = 20\text{ nm}$ 、 $H = 25\text{ nm}$ 、 $H = 30\text{ nm}$ 的透射光谱, 可以看出除 FR2 的透射

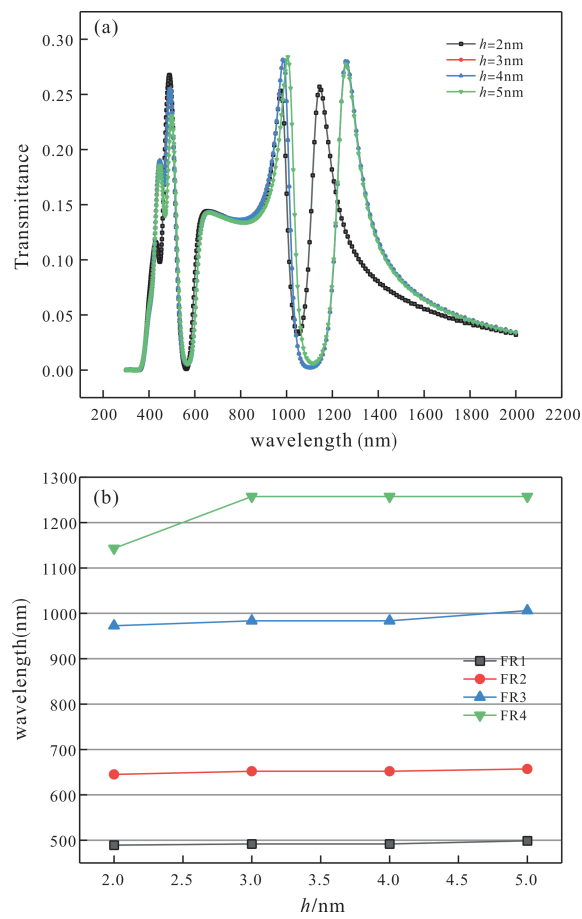


图4 (a)结构随竖放矩形高度 h 变化的透射光谱, (b)四处法诺共振峰随 h 变化而变化.

Fig. 4 (a) The transmission spectra of the structure changing with the height of the vertical rectangle h , (b) the changes of four Fano resonance peaks with the height h .

率出现了先增强后减弱外, 其余三个法诺共振的透射率均由与 H 的增大而减小, 这是由于谐振腔的离散谱远离了母线波导的连续谱导致的耦合减弱, 而法诺峰的位置均出现了蓝移. 图6(b)为改变 H 后四处法诺共振的共振波长, 由图可知随着 H 的增加四处法诺峰均出现了蓝移, 调节结构参数 H 也可以对四处法诺共振峰位置产生影响, 有很好的协调性. 图7所示为改变母线波导间距 D 计算得到的透射谱图, 其余参数不变, 与 H 增加的机理相似, 随着母线波导间距从 $D = 10\text{nm}$ 增加到 $D = 25\text{nm}$ 处时四处法诺峰的透射率降低, 共振波长未发生较大变化. 当母线间距增大时激发的宽带连续谱与谐振腔窄带离散谱耦合增强, 会导致透射率变低.

5 折射率灵敏度应用

由于法诺共振独特的不对称线性导致其共振

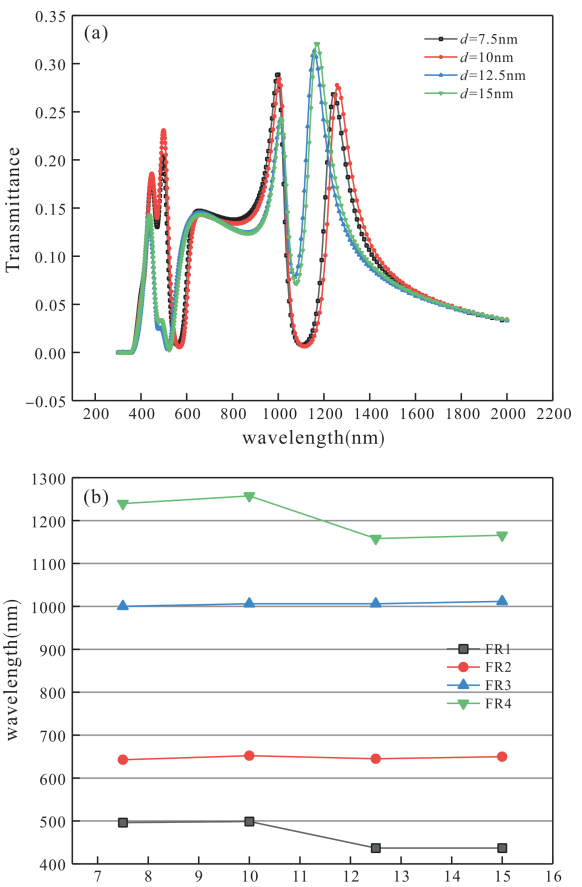


图5 (a)结构随横放矩形的间距 d 变化的透射谱图, (b)四处法诺共振峰随 d 变化而变化.

Fig. 5 (a) The calculated transmission spectra of the structure changing with the spacing of the horizontal rectangle d , (b) the changes of four Fano resonance peaks with spacing d .

波长对于折射率变化比较敏感. 本文设计的结构可以激发处四重法诺共振, 且产生的窄透射峰可以有效提高传感的分辨率. 对于生物传感器来说, 有可以应用的实际条件非常重要, 葡萄糖溶液在生物医疗中有着非常重要地位, 通常用于帮助患者补充能量, 纠正脱水来治疗, 还可以作为多种药物的溶解剂.

故给出了葡萄糖浓度跟折射率之间的线性关系公式^[22]:

$$n = 0.00011889C + 1.33230545 \quad (4)$$

其中 C 为葡萄糖浓度 (g/L), n 为葡萄糖浓度的折射率, 通过有限时域差分法计算得到的透射光谱将法诺共振的波长与折射率相关, 葡萄糖浓度与折射率之间也存在线性关系, 可以使得法诺共振波长与葡萄糖浓度建立关系. 考虑了不同葡萄糖溶液浓度下的法诺共振透射光谱. 如图8所示:

如图8(a)所示, 三矩形腔填充葡萄糖浓度为

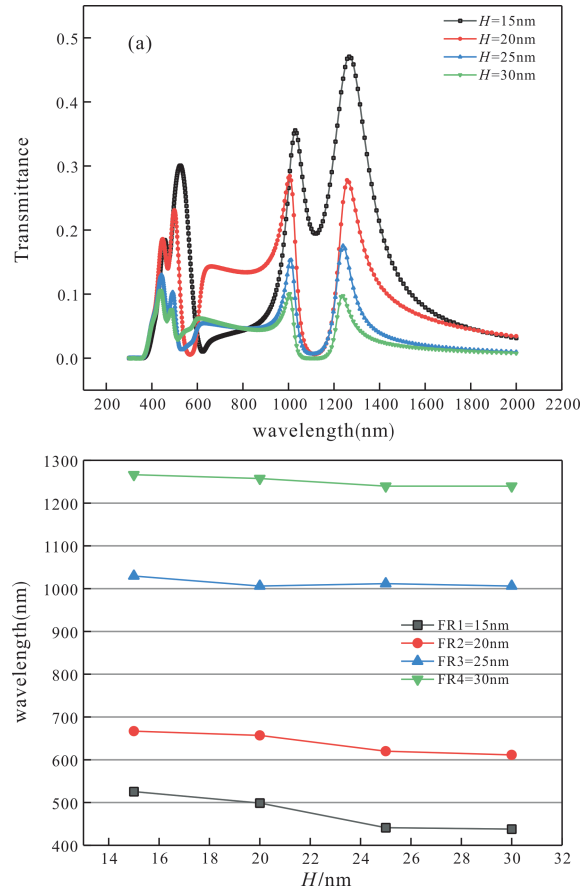


图6 (a)结构随横放矩形的高度 H 变化计算得到的透射谱图, (b)四处法诺共振峰随 H 变化而变化.

Fig. 6 (a) The transmission spectra of the structure changing with the height of the horizontal rectangle H , (b) the changes of four Fano resonance peaks with the height H .

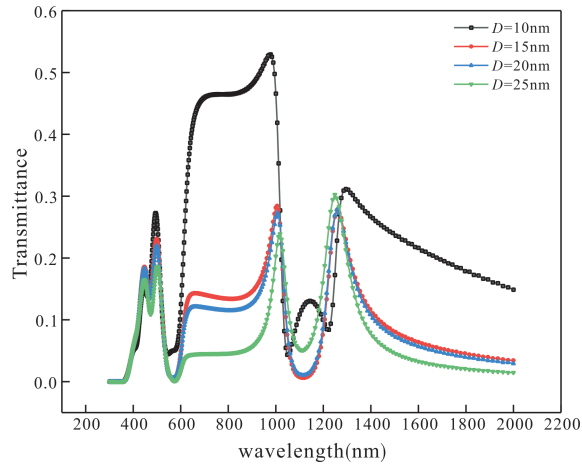


图7 结构随母线波导间距 D 变化计算得到的透射谱图

Fig. 7 The transmission spectrum obtained from the calculation of the structure as a function of the spacing D between the bus bar wave guides.

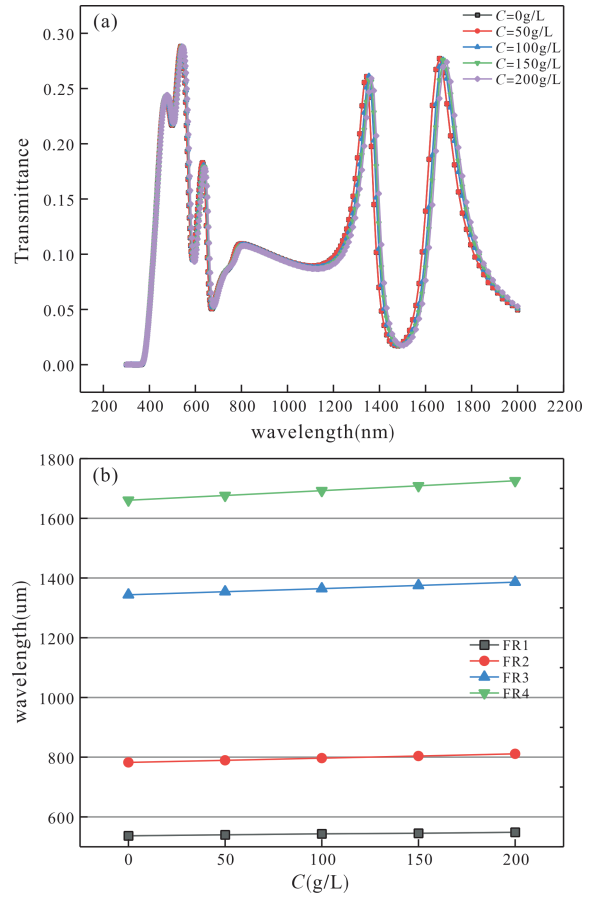


图8 (a)随着葡萄糖浓度 C 从0 g/L增加到200 g/L,结构的透射光谱也随之变化(b)四处法诺峰的共振波长随 C 的增加而改变.

Fig. 8 (a) As the glucose concentration C increases from 0 g/L to 200 g/L, the transmission spectrum of the structure also changes. (b) The resonance wavelengths of the four Fano peaks change with the increase of C .

葡萄糖溶液的折射率大于1,故产生的法诺峰发生了变化,整体发生了红移且FR1峰产生了分裂,故重新定义峰群最高峰为FR1.从图8(a)中可以看出在添加葡萄糖浓液后整体的透射率变高并产生新的线性,透射光谱也明显发生了红移,填充的葡萄糖浓度在0~200 g/L对应的折射率也在1.33230545~1.35608345之间变化,并改变了法诺共振波长.根据计算得到的结果我们拟合出了法诺共振波长与葡萄糖浓度之间的线性关系图如图8(b)所示,可以看出本文的结构对于葡萄糖浓液浓度的变化非常敏感,可以作为生物传感器用于物质溶液浓度检测中.

灵敏度和FOM是常用来评价传感器性能的参数,本文结构对于折射率变化较为敏感,为了验证此结构的传感器性能,我们对激发的四个法诺

0~200 g/L时产生的法诺共振透射光谱,由于葡

共振进行定量表征. 折射率灵敏度定义为^[23]:

$$S = \frac{\Delta\lambda}{\Delta n}(nm/RIU)$$

(5)

其中 S 为灵敏度, Δn 为折射率变化量, $\Delta\lambda$ 为共振波长的变化量. 计算填充葡萄糖溶液后四处法诺共振的灵敏度. 当葡萄糖溶液浓度 $C = 0$ g/L 时且对应的折射率为 1.33230545, 四处法诺共振对应的波长为 536.85 nm、782.54 nm、1343.81 nm、1660.57 nm, 当葡萄糖溶液 $C = 200$ g/L 时且对应的折射率为 1.35608345, 四处法诺共振对应的波长为 548.55 nm、811.38 nm、1386.11 nm、1725.65 nm. 根据公式和得出的数据计算可以得到结构在不同共振波长下的灵敏度分别为 492.05 nm/RIU、1212.89 nm/RIU、1778.96 nm/RIU、2736.98 nm/RIU. 由此可见该结构对于折射率而言有着非常高的灵敏度, 故具有很好的折射率传感特性. 由于本文设计的波导结构简单, 我们对比了以往研究中波导的灵敏度如表 2, 可以看出本文设计的波导灵敏度远远大于这些波导系统, 这就是此结构的优势所在.

表 2 与参考文献对比结果

Table 2 Comparison of our result with those in references

References	Sensitivity(nm/RIU)
[14]	892
[15]	1120
[16]	1261.67
[17]	1290.2
This study	2736.98

6 结 论

本文设计了由三矩形谐振腔与总线波导组成的非通 MIM 波导, 利用有限时域差分方法计算了结构的透射特性和磁场分布, 得出了由三矩形腔激发产生的窄带离散谱与总线波导激发产生的宽带连续谱耦合形成的四重法诺共振. 通过改变横放矩形距波导高度 H 、竖放矩形距横放矩形高度 h 、波导间距 D 、横放矩形间距 d 等参数可以调节四处法诺共振峰的透射率和共振位置, 此外通过在空腔中填充不同浓度的葡萄糖溶液, 增加谐振腔内折射率也可以使得法诺共振位置出现红移, 从而计算出该结构对折射率有着很高的灵敏度, 检测灵敏度高达 2736.98 nm/RIU, 并对比了以往的研究, 本文设计的波导除了有较为简单易加工

的结构之外相较于其他传感器结构有着更高的灵敏度, 这些结果表明本文提出的纳米结构在纳米传感领域有一定的参考价值.

参考文献:

[1] Holmgaard T, Bozhevolnyi S I. Theoretical analysis of dielectric - loaded surface plasmon - polariton waveguides [J]. *Phys. Rev. B*, 2007, 75: 245405.

[2] Gramotnev D K, Bozhevolnyi S I. Plasmonics beyond the diffraction limit [J]. *Nat. Photon.*, 2010, 4: 83.

[3] Sun F, Yu J, Chen S. A 2 × 2 optical switch based on plasma dispersion effect in silicon - on - insulator [J]. *Opt. Commun.*, 2006, 262: 164.

[4] Khani S, Danaie M, Rezaei P. Realization of single - mode plasmonic bandpass filters using improved nanodisk resonators [J]. *Opt. Commun.*, 2018, 420: 147.

[5] Wang B, Wang G P. Plasmon bragg reflectors and nanocavities on flat metallic surfaces [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, 87: 013107.

[6] Moradiani F, Farmani A, Mozaffari M H, et al. Systematic engineering of a nanostructure plasmonic sensing platform for ultrasensitive biomaterial detection [J]. *Opt. Commun.*, 2020, 474: 126178.

[7] Yun B, Hu G, Cui Y. Resonant mode analysis of the nanoscale surface plasmon polariton eaveguide filter with rectangle cavity [J]. *Plasmonics*, 2013, 8: 267.

[8] Liu H J, Shen K J, Wang J C, et al. Multi slit metal dielectric metal structure plasma visible light splitter [J]. *Progress in Laser and Optoelectronics*, 2015, 52: 269 (in Chinese)[刘红娇, 沈垚均, 王继成, 等. 多狭缝金属 - 介质 - 金属结构等离子体可见光分束器 [J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52: 269]

[9] Khani S, Danaie M, Rezaei P. Size reduction of mim surface plasmon based optical bandpass filters by the introduction of arrays of silver nano - rods [J]. *Physica E*, 2019, 113: 25.

[10] Lukýanchuk B, Zheludev N I, Maier S A, et al. The Fano resonance in plasmonic nanostructures and metamaterials [J]. *Nat. Mater.*, 2010, 9: 707.

[11] Li C, Li S, Wang Y, et al. Multiple fano resonances based on plasmonic resonator system with end - coupled cavities for high - performance nanosensor [J]. *IEEE Photon. J.*, 2017, 9: 1.

[12] Li L, Liang Y, Lu M, et al. Fano resonances in thin metallic grating for refractive index sensing with high figure of merit [J]. *Plasmonics*, 2016, 11: 139.

[13] Wang G, Shen A, Zhao C, et al. Fano - resonance - based ultra - high - resolution ratio - metric wavelength

- monitor on silicon [J]. *Opt. Lett.*, 2016, 41: 544.
- [14] Rakhshani M R, Tavousi, Mansouri-Birjandi M A. Design of a plasmonic sensor based on a square array of nanorods and two slot cavities with a high figure of merit for glucose concentration monitoring [J]. *Appl. Opt.*, 2018, 57: 7798.
- [15] Chen Y, Xu Y, Cao J. Fano resonance sensing characteristics of mim waveguide coupled square convex ring resonator with metallic baffle [J]. *Results in Physics*, 2019, 14: 102420.
- [16] Zhu J, Li N. Mim waveguide structure consisting of a semicircular resonant cavity coupled with a key-shaped resonant cavity [J]. *Opt. Express*, 2020, 28: 19978.
- [17] Chen J, Lian X, Zhao M, *et al.* Multimode fano resonances sensing based on a non-through mim waveguide with a square split-ring resonance cavity [J]. *Biosensors (Basel)*, 2022, 12: 306.
- [18] Wang S, Yu S, Zhao T, *et al.* A nanosensor with ultra-high fom based on tunable malleable multiple fano resonances in a waveguide coupled isosceles triangular resonator [J]. *Opt. Commun.*, 2020, 465: 125614.
- [19] Shi X, Ma L, Zhang Z, *et al.* Dual fano resonance control and refractive index sensors based on a plasmonic waveguide-coupled resonator system [J]. *Opt. Commun.*, 2018, 427: 326.
- [20] Zhu J, Lou J. High-sensitivity fano resonance temperature sensor in mim waveguides coupled with a polydimethylsiloxane-sealed semi-square ring resonator [J]. *Results in Physics*, 2020, 18: 103183.
- [21] Zhang D, Zhang Y, Kong L Y, *et al.* Research on the development and recent applications of nanoimprinting technology [J]. *Sensors and Microsystems*, 2022, 41: 1 (in Chinese)[张笛, 张琰, 孔路瑶, 等. 纳米压印技术的发展及其近期的应用研究 [J]. 传感器与微系统, 2022, 41: 1]
- [22] Yeh Y L. Real-time measurement of glucose concentration and average refractive index using a laser interferometer [J]. *Opt. Lasers Eng.*, 2008, 46: 666.
- [23] Mayer K M, Hafner J H. Localized surface plasmon resonance sensors [J]. *Chem. Rev.*, 2011, 111: 3828.