

亚波长介质光栅/MDM波导/周期性光子晶体中双重Fano共振的形成及演变规律分析

陈颖 周健 丁志欣 张敏 朱奇光

**Analysis of formation and evolution of double Fano resonances in sub-wavelength dielectric grating/MDM waveguide/periodic photonic crystal**

Chen Ying Zhou Jian Ding Zhi-Xin Zhang Min Zhu Qi-Guang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 034202 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20211491

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211491>

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

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>

拓扑表面等离子激元

Topological surface plasmon polaritons

物理学报. 2019, 68(22): 224101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191085>

银纳米线表面等离子激元波导的能量损耗

Energy loss of surface plasmon polaritons on Ag nanowire waveguide

物理学报. 2018, 67(24): 247302 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20182085>

开口狭缝调制的耦合微腔中表面等离子激元诱导透明特性

Surface plasmon induced transparency in coupled microcavities assisted by slits

物理学报. 2020, 69(13): 134205 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200369>

同心椭圆柱-纳米管结构的双重Fano共振研究

Double Fano resonance in gold nanotube embedded with a concentric elliptical cylinder

物理学报. 2019, 68(6): 067301 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182249>

基于塔姆激元-表面等离子极化激元混合模式的单缝加凹槽纳米结构的增强透射

Enhanced optical transmission by exciting hybrid states of Tamm and surface plasmon polaritons in single slit with multi-pair groove nanostructure

物理学报. 2018, 67(10): 107104 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180117>

# 亚波长介质光栅/MDM 波导/周期性光子晶体中 双重 Fano 共振的形成及演变规律分析\*

陈颖<sup>1)†</sup> 周健<sup>1)</sup> 丁志欣<sup>1)</sup> 张敏<sup>1)</sup> 朱奇光<sup>2)</sup>

1) (燕山大学电气工程学院, 测试计量技术与仪器河北省重点实验室, 秦皇岛 066004)

2) (燕山大学信息科学与工程学院, 河北省特种光纤与光纤传感器重点实验室, 秦皇岛 066004)

(2021 年 8 月 12 日收到; 2021 年 9 月 16 日收到修改稿)

基于衍射原理和模耦合理论, 提出了一种由亚波长介质光栅/金属-电介质-金属 (metal-dielectric-metal, MDM) 波导/周期性光子晶体组成的复合微纳结构. 结合反射角谱深入分析了表面等离子激元的传输特性以及在固定波长下不同入射角时刻形成的双重 Fano 共振的产生机理. 研究表明, 双重 Fano 共振是由在亚波长介质光栅/MDM 波导结合的上层结构中产生的独立可调的双离散态分别与在周期性光子晶体中形成的连续态相互耦合形成的. 接着定量讨论了结构参数对双重 Fano 特性的影响, 探究了双重 Fano 共振的演变规律. 结果表明, 改变结构参数可实现双 Fano 共振曲线和谐振角度之间的调谐, 且在最优条件下, 共振 A 区 FR a 和 FR b 的品质因数 (figure of merit, FOM) 可高达 460.0 和  $4.00 \times 10^4$ , 共振 B 区 FR a 和 FR b 的 FOM 值可高达 269.2 和  $2.22 \times 10^4$ . 该结构可为基于 Fano 共振的折射率传感器设计提供有效的理论参考.

**关键词:** 衍射原理, 模耦合, 表面等离子激元, 双重 Fano 共振

**PACS:** 42.25.Fx, 42.82.Et, 73.20.Mf, 74.25.Gz

**DOI:** 10.7498/aps.71.20211491

## 1 引言

随着微纳光学的快速发展, 光与微纳结构的相互作用增强在机理分析、实际应用等方面的研究越来越深入. 而关于亚波长光栅<sup>[1,2]</sup>、光子晶体<sup>[3,4]</sup>以及波导<sup>[5,6]</sup>等光学微纳结构在材料选取以及结构组成等方面的设计也越来越新颖, 利用光与不同的微纳结构作用后会产生表面等离子激元 (surface plasmon polaritons, SPPs)<sup>[7]</sup>、导模共振<sup>[8,9]</sup>、衍射效应<sup>[10,11]</sup>以及光子禁带<sup>[12]</sup>等具有实质性差异的光学效应这一特点, 在光谱图中动态观察对称或非对称的反射、透射等谱线变化来改进微纳结构的光学

性能, 以更好地实现对光学器件的调控越来越受到国内外研究人员的关注.

而近年来, 大量的研究表明, 相较于光谱中对称的洛伦兹线型, Fano 共振线型具有尖锐不对称、高敏感性、高品质因子以及相位突变等优势, 在提高微纳器件性能的同时, 可实用性更强, 故如今更偏重于设计可实现 Fano 共振的微纳结构. Klimov 等<sup>[13]</sup>提出了一种由多孔金薄膜与多层膜光子晶体相结合的微纳传感结构, 利用光学 Tamm 态与波导模式相互作用在光谱中形成的非对称 Fano 线型探究了结构的性能. Chen 等<sup>[14]</sup>提出了一种在亚波长光栅和缺陷态一维光子晶体中间夹有石墨烯单层的结构, 通过 Fano 共振和法布里-珀

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61201112)、河北省重点研发计划 (批准号: 19273901D, 20373301D)、河北省自然科学基金 (批准号: F2020203066)、中国博士后科学基金 (批准号: 2018M630279)、河北省博士后择优资助项目 (批准号: D2018003028)、河北省高等学校科学技术研究项目 (批准号: ZD2018243) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: chenying@ysu.edu.cn

罗腔 (F-P) 共振控制石墨烯嵌入结构中光的吸收和透射. Jiang 等<sup>[15]</sup>提出了一种基于 Kretschmann 构型且夹有单层 MoS<sub>2</sub> 薄膜的多层膜结构. 利用平面波导模式之间的耦合产生 Fano 共振以应用于生物传感器中, 其品质因子 (figure of merit, FOM) 可达到 9630. Zhao 和 Yu<sup>[16]</sup>提出了一种带有凹槽和短节谐振器的金属-绝缘体-金属波导结构, 探究了光在传输过程中产生 Fano 共振响应光谱的特性, 并且实现了波长调谐, 其 FOM 值可达到  $3.04 \times 10^3$ . 以往基于 Fano 共振的微纳结构多注重结构设计的新颖以及光学性能的提高, 这使得深入研究 Fano 共振形成的基础理论以及 Fano 共振的演变规律变得尤为重要.

本文提出了一种由亚波长介质光栅/金属-电介质-金属 (metal-dielectric-metal, MDM) 波导/周期性光子晶体组成的复合微纳结构. 结合反射角谱对光的传输特性、双窄带峰以及宽频带的产生机理进行了分析, 解释了双重 Fano 共振形成的物理机制. 在满足波矢匹配的条件下, 入射光通过介质光栅-上层金属 Ag 薄膜时会产生 SPPs 模式, 传播到 MDM 波导中会产生波导模式共振, SPPs 模式和波导模式共振所提供的不同入射角时刻下的离散态会分别与光子晶体中产生的光子禁带效应所提供的连续态发生近场耦合, 从而产生双重 Fano 共振. 接着定量分析了结构参数对双重 Fano 共振的影响, 进一步探究了双重 Fano 共振的演变规律以及最优值.

## 2 结构模型建立及理论分析

### 2.1 结构模型建立

本文提出的由亚波长介质光栅/MDM 波导/周期性光子晶体组成的复合结构模型如图 1 所示. 运用有限元分析软件 COMSOL Multiphysics 建立了几何模型, 其中亚波长介质光栅层的材料采用折射率为  $n_A = 2.58$  的 TiO<sub>2</sub>, 光栅凹槽宽度为  $W = 55$  nm, 高度为  $d_g = 46$  nm. MDM 波导由上下厚度均为  $d_{Ag1} = d_{Ag2} = 2$  nm 的金属 Ag 层和折射率为  $n_b = 3.88$ , 高度  $d_z = 262$  nm 的介质 Si 层组成. 周期性光子晶体 (A/B)<sup>N</sup> 则由周期性排列的折射率为  $n_A = 2.58$  的 TiO<sub>2</sub> 和折射率为  $n_B = 1.45$  的 SiO<sub>2</sub> 组成, 周期层数  $N = 3$ . 外界环境介质均为空气,  $n_a = 1.00$ . 模拟时以一个光栅周期为一个单元, 将左右

边界设置为周期性边界条件, 结构顶端设置入射端口和反射端口, 底端设置透射端口, 详细探究其角度调制下的光学传输特性.

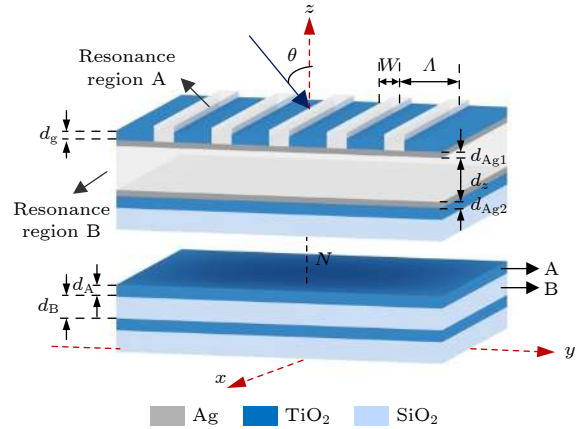


图 1 复合结构模型图

Fig. 1. Composite structure model diagram.

Ag 的相对介电常数满足 Drude-Lorentz 模型<sup>[17]</sup>:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega\gamma} - \frac{\Delta\Omega^2}{(\omega^2 - \Omega^2) + i\Gamma}, \quad (1)$$

式中,  $\omega$  为光的角频率,  $\varepsilon_\infty = 2.4064$  为当  $\omega$  趋于无穷时的介电常数,  $\omega_p = 2\pi \times 2214.6 \times 10^{12}$  Hz 为等离子体振荡频率,  $\gamma = 2\pi \times 4.8 \times 10^{12}$  Hz 为碰撞频率,  $\Delta = 1.6604$  为洛伦兹项的权重系数,  $\Omega = 2\pi \times 1330.1 \times 10^{12}$  Hz 为洛伦兹谐振子的强度,  $\Gamma = 2\pi \times 620.7 \times 10^{12}$  Hz 为振动谱宽. 银的复折射率  $\bar{n}_M = \sqrt{\varepsilon_T} = n_M + ik$ , 其中实部  $n_M$  描述银对光的折射特性, 虚部  $k$  称为消光系数, 描述银对光的吸收特性.

### 2.2 理论分析

SPPs 是一种由入射光和金属表面自由电子相互耦合形成的高度局域的倏逝波<sup>[18]</sup>, 沿着金属表面水平传播且在竖直方向上呈指数衰减. 根据电磁场边界条件以及周期性光子晶体的光学特性, 选用图 2(a) 所示的光子禁带的中心波长  $\lambda_0 = 632.8$  nm 的 TM 偏振光入射. 首先入射光经过光栅衍射效应产生的衍射波会与上层金属 Ag 薄膜表面的自由电子耦合, 产生等离子体振荡现象. 其衍射效应可表示为<sup>[19]</sup>

$$\Lambda(n_a \sin \theta_a \pm n_A \sin \phi_a) = m\lambda_0 \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots), \quad (2)$$

式中  $\theta_a$  为入射角,  $\phi_a$  为衍射角,  $n_a$  为光栅凹槽处介质折射率,  $m$  为介质光栅衍射级数,  $\lambda_0$  为入射光波长.

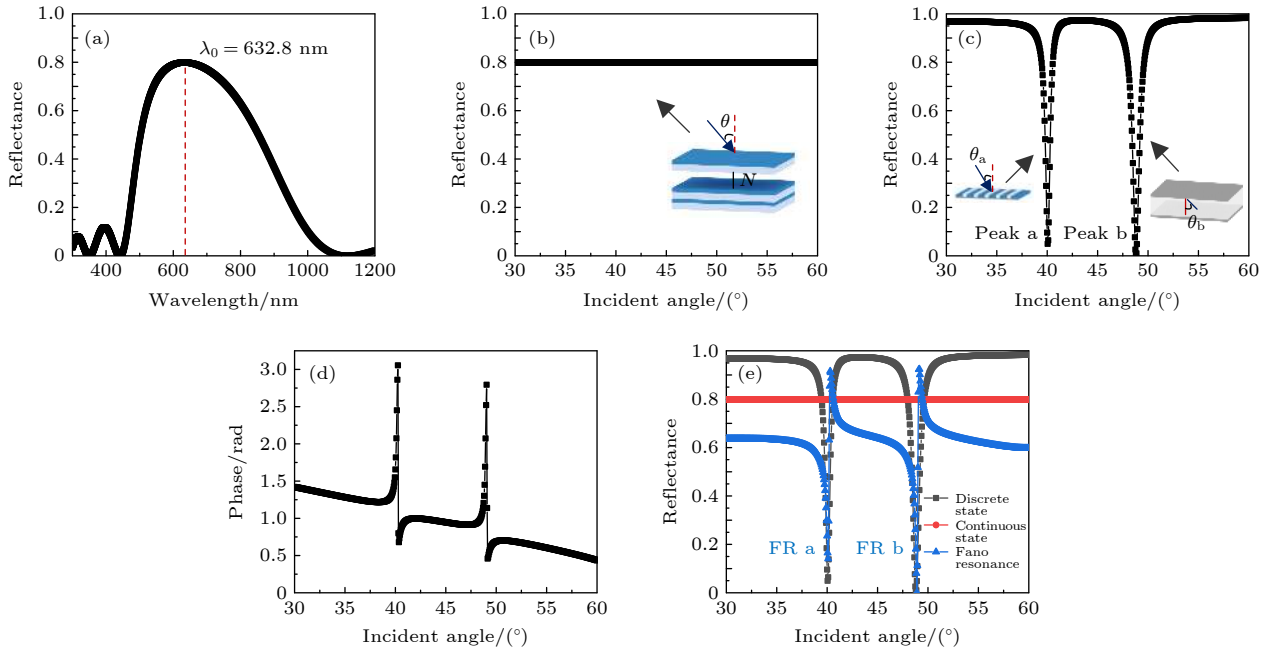


图 2 结构曲线图 (a) 连续态光谱图; (b) 连续态角谱图; (c) 双离散态角谱图; (d) 相位角谱图; (e) 双 Fano 共振形成角谱图  
Fig. 2. Structural diagram: (a) Continuous spectrum; (b) continuous state angular spectrum diagram; (c) double discrete states angular spectrum diagram; (d) phase angular spectrum diagram; (e) double Fano resonances form angular spectrum diagram.

经过光栅耦合后, 入射光波的动量得以增强, 补偿了与 SPPs 波矢之间的差值, 使其在满足波矢匹配条件下可激发 SPPs. 条件为<sup>[20]</sup>

$$k_0 n_a \sin \theta_a + m \frac{2\pi}{\Lambda} = k_0 \sqrt{\frac{\varepsilon_{Ag} \varepsilon_f}{\varepsilon_{Ag} + \varepsilon_f}}, \quad (3)$$

式中,  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$  为入射光在真空中的波矢,  $\varepsilon_f$  为介质光栅的有效介电常数,  $\varepsilon_{Ag}$  为金属 Ag 薄膜的介电常数.

此时会有大量的磁场能量被束缚在介质光栅-上层金属 Ag 薄膜界面附近, 使得金属表面的光吸收率增大, 反射光能量急剧减少, 从而形成窄带峰. 与图 2(c) 反射角谱中入射角  $\theta_a = 40.1^\circ$  处的 peak a 相符.

由于 MDM 波导中金属 Ag 薄膜厚度均满足 SPPs 在金属 Ag 层中的穿透深度, 故首先会有能量传播到 MDM 波导中. 当介质层厚度可比拟 SPPs 的趋肤深度时, M-D 与 D-M 交界面上分别激发的 SPPs 会相互作用发生耦合共振现象. 根据波导理论, 可知 TM 模式在 MDM 波导中的本征方程为<sup>[21]</sup>

$$\sqrt{k_0^2 \varepsilon_b - \beta^2} d_z = m_0 \pi + 2\varphi, \quad (4)$$

式中,  $k_0$  为入射光波矢,  $\beta$  为 TM 模式的传播常数,

$\varepsilon_b$  为电介质层介电常数,  $d_z$  为电介质层厚度,  $m_0$  为 TM 模的模阶数,  $\varphi$  为 SPPs 在电介质与金属交界面发生反射时的相位差.

当入射角  $\theta_b = 48.9^\circ$  时,  $\varphi$  将满足 (4) 式中的相位匹配条件, MDM 波导中将产生波导模式共振, 形成图 2(c) 所示反射角谱中的共振峰 peak b, 磁场主要局域在电介质和下层金属 Ag 薄膜界面处. 此时仍会有部分能量渗透到周期性光子晶体中, 进而产生如图 2(b) 所示的光学效应稳定的较宽频带, 为 Fano 共振提供一个连续态. 由图 2(d) 所示的相位角谱图可知, 入射光在  $\theta_a = 40.1^\circ$  和  $\theta_b = 48.9^\circ$  时刻传播的相位差均趋近于  $\pi$ , 相位相反, 满足相位匹配条件, 结构间发生了干涉相消. 此时独立可调的双离散态会分别与宽连续态发生近场耦合, 实现双重 Fano 共振, 进而导致反射角谱线型发生强烈变化, 形成与入射角度  $\theta_a$  和  $\theta_b$  相对应的具有明显非对称性的双 Fano 共振曲线. 具体形成过程如图 2(e) 所示.

### 3 演变规律分析

探究双重 Fano 共振的演变规律时, 选取 FOM 值作为评价的重要指标, 其表达式如下<sup>[22]</sup>:



$$\alpha_{\text{FOM}} = \left| \frac{\Delta R}{R \Delta n} \right| = \left| \frac{R(\omega, n) - R(\omega, n_0)}{R(\omega, n_0) \Delta n} \right|, \quad (5)$$

式中,  $\alpha_{\text{FOM}}$  为 FOM 值;  $\omega$  为离散态和连续态耦合时的频率;  $R(\omega, n_0)$  和  $R(\omega, n)$  分别表示为初始状态和折射率变化后的反射率;  $\Delta n = n - n_0$  为改变共振区域 A, B 处介质折射率值时所对应的折射率差.

### 3.1 光子晶体周期层数 $N$ 对双 Fano 特性的影响

基于光子禁带特性, 光子晶体可在反射角谱中产生一个较宽的连续态, 而光子晶体的周期层数  $N$  会直接影响连续态的选频范围和反射率大小, 进而影响连续态与在介质光栅/MDM 波导结构中所形成的双窄带的耦合程度. 随着层数  $N$  的增加, 光子禁带反射率会逐渐变高, 带隙变窄. 光子晶体与介质光栅/MDM 波导结构间的耦合成分变少, 耦合能力变弱, 双 Fano 曲线旁带反射率会逐渐变高, 与图 3(a) 和图 3(b) 中的角谱曲线变化情况相符. 且在图 3(b) 中, 当  $N = 6$  时, 出现了几乎对称的洛伦兹线型, 旁带反射率极高, 已不再具有 Fano 特性. 根据 (5) 式计算出在不同周期层数的条件下, 共振 A 区和共振 B 区所对应的介质折射率  $n_a, n_b$  改变时, FR a 和 FR b 曲线的 FOM 值. 由图 3(c) 可知, 共振 A 区和共振 B 区处 FR a 和 FR b 的 FOM 值均随  $N$  的增加逐渐减少. 故为了获得最佳的双 Fano 线型及高 FOM 值, 光子晶体层数被设定为  $N = 3$ , 此时 FOM 值最高可以达到  $4.00 \times 10^4$ .

### 3.2 金属 Ag 层高度 $d_{\text{Ag}}$ 对双 Fano 特性的影响

在固定入射波长下, 金属层的厚度会直接影响双窄带峰与宽频带之间的耦合程度. 此时需要考虑 SPPs 在金属 Ag 层中的趋肤深度, 可表示为 [23]

$$\delta_1 = \frac{1}{k_0} \left| \frac{\varepsilon_m + \varepsilon_b}{\varepsilon_m^2} \right|, \quad (6)$$

式中,  $k_0$  为入射光波矢,  $\varepsilon_m$  为金属相对介电常数,  $\varepsilon_b$  为电介质相对介电常数.

根据 SPPs 传播特性可知, 当金属层厚度越厚时, 共振深度会越小, 光波渗透能力越弱, 与图 4(a) 所示的双 Fano 曲线变化相符. 且图 4(a) 中的双

Fano 曲线均发生蓝移, 当  $d_{\text{Ag}1} = d_{\text{Ag}2} = 12 \text{ nm}$  时, FR a 与 FR b 曲线共振深度减小明显. 说明渗透的能量极少, 与连续态耦合只产生微小的 Fano 线型, 与理论分析相一致. 由 (5) 式及图 4(b) 可知, 随着  $d_{\text{Ag}}$  的增加, 共振 A 区和共振 B 区的 FR a 曲线的 FOM 值均逐渐减小, FR b 曲线的 FOM 值均先增大后减小. 当  $d_{\text{Ag}1} = d_{\text{Ag}2} = 2 \text{ nm}$ , FOM 值最高可达  $4.00 \times 10^4$ . 此时金属 Ag 层厚度正满足 (6) 式中的趋肤深度  $\delta_1$ .

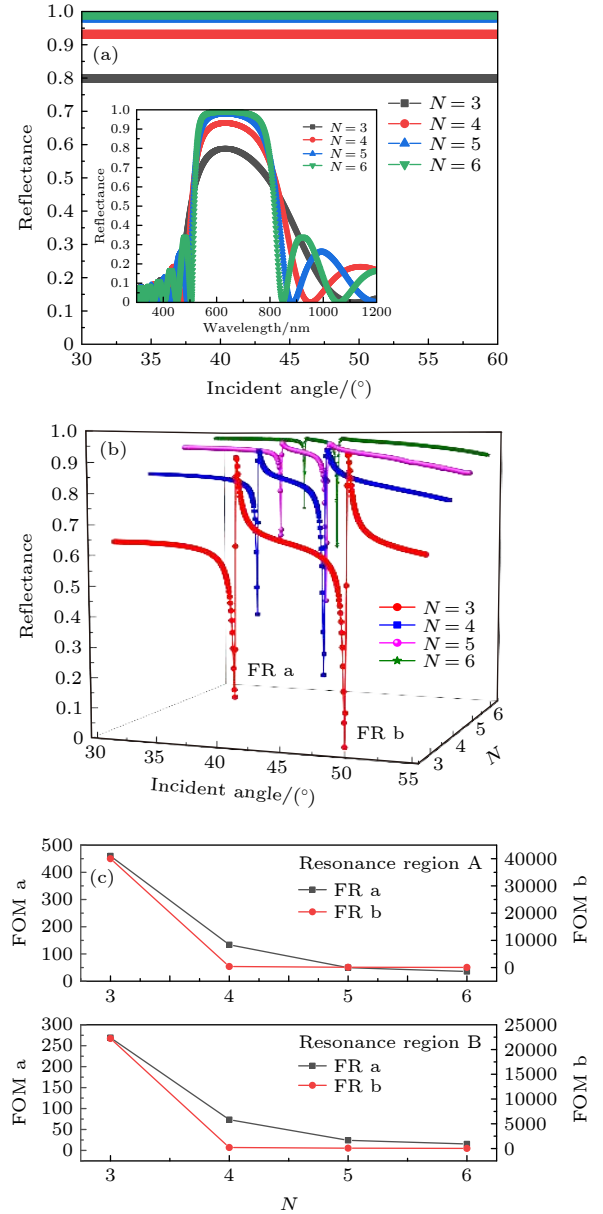


图 3  $N$  对双 Fano 特性的影响 (a)  $N$  对连续态曲线的影响; (b)  $N$  对双 Fano 曲线的影响; (c)  $N$  对 FOM 值的影响

Fig. 3. Effect of  $N$  on characteristics of double Fano resonances: (a) Effect of  $N$  on the continuous state curves; (b) effect of  $N$  on the double Fano curves; (c) effect of  $N$  on FOM values.

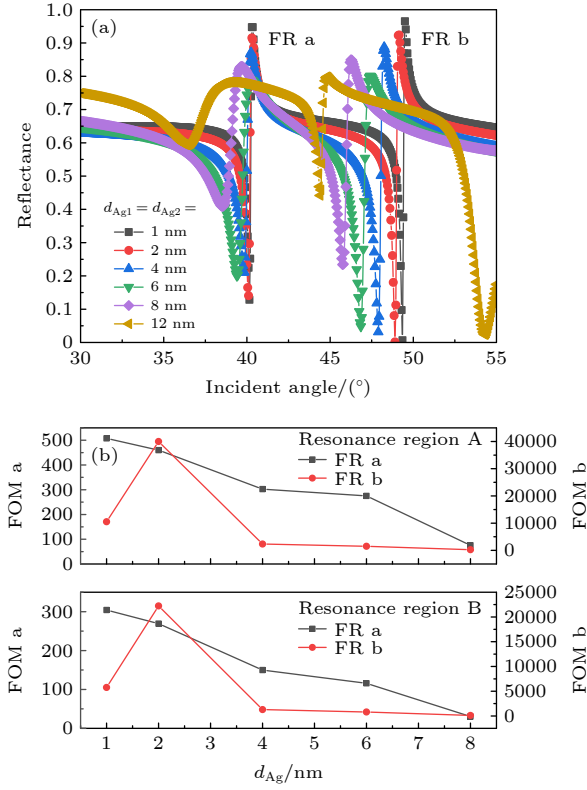


图 4  $d_{Ag}$  对双 Fano 特性的影响 (a)  $d_{Ag}$  对双 Fano 曲线的影响; (b)  $d_{Ag}$  对 FOM 值的影响

Fig. 4. Effect of  $d_{Ag}$  on characteristics of double Fano resonances: (a) Effect of  $d_{Ag}$  on the double Fano curves; (b) effect of  $d_{Ag}$  on FOM values.

### 3.3 光栅凹槽宽度 $W$ 对共振 A 区 Fano 特性的影响

根据等效介质理论, 在 TM 偏振光的入射下, 介质光栅的等效折射率为<sup>[24]</sup>

$$n_{\text{eff}} = \left\{ \frac{n_A^2 n_a^2}{[f n_A^2 + (1-f) n_a^2]} \right\}^{1/2}, \quad (7)$$

式中,  $n_A$  和  $n_a$  分别为介质光栅高低折射率,  $f = A - W/A$  为介质光栅的占空比,  $W$  为介质光栅的凹槽宽度.

由 (2) 式、(3) 式和 (7) 式可知, 凹槽宽度  $W$  主要影响  $\theta_a = 40.1^\circ$  时共振 A 区的 Fano 线型, 故扫描角度范围设定为  $30.0^\circ - 42.5^\circ$ . 当 TM 偏振光入射到  $W$  不同的介质光栅层时, 会具有不同的衍射波、波矢匹配条件以及等效折射率, 进而导致窄带共振深度以及位置发生改变. 如图 5(a) 所示, 当  $W$  增加时, 光栅等效折射率会变大, 为满足波矢匹配条件, FR a 线型会发生蓝移, 且 FR a 共振峰波谷反射率有变大趋势, 与理论分析相一致. 根

据 (5) 式计算出当共振 A 区介质折射率  $n_a$  改变时, FR a 曲线的 FOM 值, 如图 5(b) 所示. 可以看出, 随着  $W$  的增加, FOM 值逐渐减小, 在  $W = 55 \text{ nm}$  处 FOM 值最高可达 460.0.

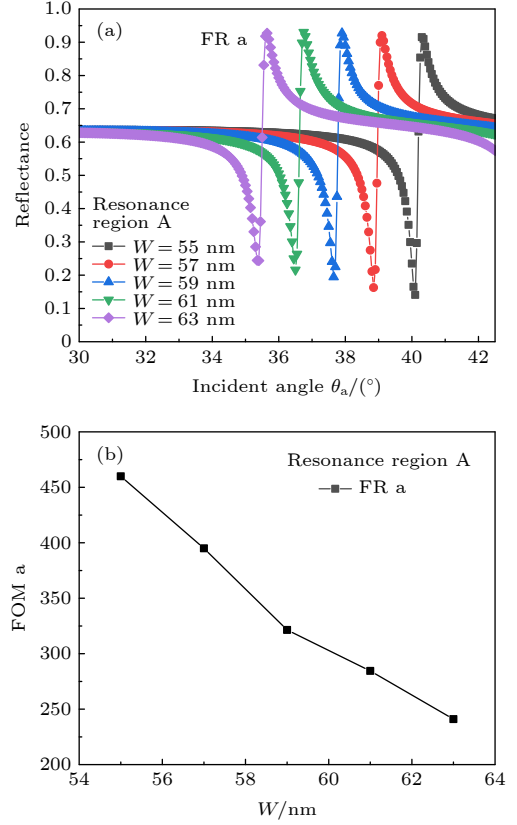


图 5  $W$  对共振 A 区 Fano 特性的影响 (a)  $W$  对 FR a 曲线的影响; (b)  $W$  对 FOM 值的影响

Fig. 5. Effect of  $W$  on Fano characteristics of resonance region A: (a) Effect of  $W$  on FR a curve; (b) effect of  $W$  on FOM values.

### 3.4 MDM 波导中介质层高度 $d_z$ 对共振 B 区 Fano 特性的影响

在 MDM 波导中, SPPs 在电介质中传播的趋肤深度决定了介质层的最小厚度. 可表示为<sup>[23]</sup>

$$\delta_2 = \frac{1}{k_0} \left| \frac{\varepsilon_m + \varepsilon_b}{\varepsilon_b^2} \right|, \quad (8)$$

式中,  $k_0$  为入射光波矢,  $\varepsilon_m$  为金属相对介电常数,  $\varepsilon_b$  为电介质相对介电常数.

由 (4) 式可知, 介质层高度  $d_z$  主要影响在角度扫描区间  $42.5^\circ - 55.0^\circ$  中存在的共振 B 区的 Fano 曲线. 当  $d_z$  过小时, 波导内只存在 TM0 模式, 共振强度明显减弱, 与图 6(a) 中  $d_z = 252 \text{ nm}$  时的 FR b 曲线相符. 当  $d_z$  过大时, 上下金属 Ag 层与电介质

界面产生的 SPPs 的相关系数为 0, 共振减弱, 与图 6(a) 中  $d_z = 280$  nm 时的曲线相符. 而当  $d_z$  可与  $\delta_2$  相比拟时, M-D 与 D-M 界面所激发的 SPPs 将会在向前传播的过程中相互叠加耦合, 共振增强, 如图 6(a) 中  $d_z = 262$  nm 时的红线所示, 此时  $d_z$  已满足 (8) 式中介质层的最小厚度. 当  $d_z$  由 262 nm 增加到 271 nm 时, FR b 曲线会发生蓝移, 波谷反射率逐渐增大, 且旁带反射率明显变小, 与理论分析相一致. 根据 (5) 式计算出当共振 B 区介质折射率  $n_b$  改变时, FR b 曲线的 FOM 值, 如图 6(b) 所示. 可以看出, 随着  $d_z$  的增加, FOM 值会逐渐减小, 当  $d_z = 262$  nm 时 FOM 值最高可达  $2.22 \times 10^4$ .

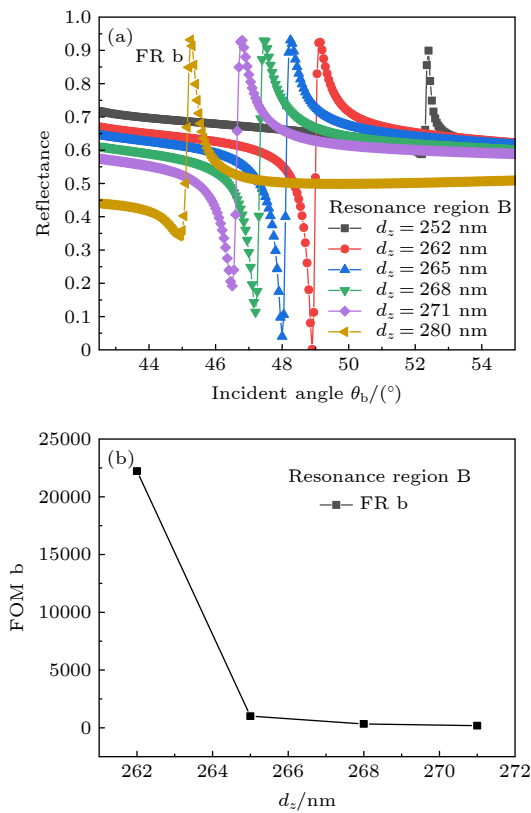


图 6  $d_z$  对共振 B 区 Fano 特性的影响 (a)  $d_z$  对 FR b 曲线的影响; (b)  $d_z$  对 FOM 值的影响

Fig. 6. Effect of  $d_z$  on Fano characteristics of resonance region B: (a) Effect of  $d_z$  on FR b curve; (b) effect of  $d_z$  on FOM values.

综合以上分析, 最终选取光子晶体周期层数  $N = 3$ , 凹槽宽度  $W = 55$  nm, MDM 波导中金属 Ag 层高度  $d_{\text{Ag}1} = d_{\text{Ag}2} = 2$  nm, 电介质层高度  $d_z = 262$  nm. 此时共振 A 区 FR a 和 FR b 曲线的 FOM 值可高达 460.0 和  $4.00 \times 10^4$ , 共振 B 区的 FR a 和 FR b 曲线的 FOM 值可达到 269.2 和  $2.22 \times 10^4$ .

基于双重 Fano 共振对结构参数及介质折射率的高度敏感性, 通过观察共振谱线的偏移以及 FOM 值的变化趋势, 可实现对共振 A 区和共振 B 区不同折射率范围内待测介质的动态检测.

## 4 结 论

基于角度调制提出了一种由亚波长介质光栅/MDM 波导/周期性光子晶体组成的可实现双重 Fano 共振的复合微纳结构. 在满足波矢匹配的条件下, 入射光经过亚波长介质光栅-上层 Ag 薄膜会产生 SPPs, 传播到 MDM 波导中会产生波导模式共振, SPPs 模式和波导模式共振会分别与在光子晶体中产生的光子禁带效应发生近场耦合, 从而形成双重 Fano 共振. 定量分析与双离散态、连续态有关的结构参数对双 Fano 共振谱线的影响, 阐述了双重 Fano 共振的演变规律. 研究表明, 当周期性光子晶体层数  $N = 3$ , 介质光栅凹槽宽度  $W = 55$  nm, MDM 波导中金属 Ag 层高度  $d_{\text{Ag}1} = d_{\text{Ag}2} = 2$  nm, 电介质层高度  $d_z = 262$  nm 时, 共振 A 区 FR a 和 FR b 的 FOM 值可高达 460.0 和  $4.00 \times 10^4$ , 共振 B 区 FR a 和 FR b 的 FOM 值可高达 269.2 和  $2.22 \times 10^4$ . 本文的研究结果对设计基于 Fano 共振的微纳传感结构有一定的指导意义.

## 参考文献

- [1] Takashima Y, Haraguchi M, Naoi Y 2019 *Opt. Rev.* **26** 466
- [2] Li L X, Liang Y Z, Lu M D, Peng W 2016 *Plasmonics* **11** 139
- [3] Panda A, Pukhrambam P D 2021 *Opt. Quantum Electron.* **53** 357
- [4] Ji C G, Yang C Y, Shen W D, Lee K T, Zhang Y G, Liu X, Guo L J 2019 *Nano Res.* **12** 543
- [5] Liang C P, Yi Z, Chen X F, Tang Y J, Yi Y, Zhou Z G, Wu X G, Huang Z, Yi Y G, Zhang G F 2020 *Plasmonics* **15** 93
- [6] Qi Y P, Zhang T, Guo J, Zhang B H, Wang X X 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 167301 (in Chinese) [祁云平, 张婷, 郭嘉, 张宝和, 王向贤 2020 物理学报 **69** 167301]
- [7] Yu J, Men H J, Zhang J W, Zhang X W, Tian N 2020 *J. Electron. Mater.* **49** 4469
- [8] Bellucci S, Fitio V, Yaremchuk I, Vernyhor O, Bendziak A, Bobitski Y 2020 *Symmetry* **12** 1315
- [9] Wang J Y, Wang Q, Li Y, Chen P, Huang T, Dai B, Huang Y S, Zhang D W 2016 *J. Opt.* **45** 302
- [10] Zhao Y, Huo Y Y, Man B Y, Ning T Y 2019 *Plasmonics* **14** 1911
- [11] Suresh R, Rao K D, Udupa D V, Kumar S, Prathap C, Sahoo N K 2017 *Optik* **136** 112
- [12] Trabelsi Y, Ali N B, Belhadj W, Kanzari M 2019 *J. Supercond. Novel Magn.* **32** 3541
- [13] Klimov V V, Pavlov A A, Treshin L V, Zabkov L V 2017 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **50** 285101

- [14] Chen Y W, Bian L A, Liu P G, Li G S, Xie Y C 2018 *Superlattice Microstruct.* **124** 185
- [15] Jiang H D, Zheng G G, Rao W F 2019 *Results Phys.* **13** 102173
- [16] Zhao T G, Yu S L 2018 *Plasmonics* **13** 1115
- [17] Gao H, Li P L, Yang S D 2020 *Opt. Commun.* **457** 124688
- [18] Chen Y, Xie J C, 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]
- [19] Zhang J, Zhang X P 2015 *Opt. Express* **23** 30429
- [20] Bahrami F, Aitchison J S, Mojahedi M 2015 *IEEE Photon. J.* **7** 1
- [21] Yi X C, Tian J P, Yang R C 2018 *Eur. Phys. J. D* **72** 60
- [22] Wen K H, Hu Y H, Chen L, Zhou J Y, Lei L, Meng Z M 2016 *Plasmonics* **11** 315
- [23] Keleshtery M H, Mir A, Kaatuzian H 2018 *Plasmonics* **13** 1523
- [24] Zhang J J, Yang J B, Liang L M, Wu W J 2018 *Opt. Commun.* **407** 46

# Analysis of formation and evolution of double Fano resonances in sub-wavelength dielectric grating/MDM waveguide/periodic photonic crystal\*

Chen Ying<sup>1)†</sup> Zhou Jian<sup>1)</sup> Ding Zhi-Xin<sup>1)</sup> Zhang Min<sup>1)</sup> Zhu Qi-Guang<sup>2)</sup>

1) (Hebei Province Key Laboratory of Test/Measurement Technology and Instrument, School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

2) (Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei province, School of Information Science and Engineering, YanShan University, Qinhuangdao 066004, China)

( Received 12 August 2021; revised manuscript received 16 September 2021 )

## Abstract

Based on the diffraction principle and the mode coupling theory, a composite micro-nano structure of sub-wavelength dielectric grating/metal-dielectric-metal (MDM) waveguide/periodic photonic crystal is proposed. Combined with the angle spectrum of reflection, the transmission characteristics of the surface plasmon polaritons and the generation mechanism of double Fano resonances at different incident angles and fixed wavelength are analyzed. The studies show that the physical mechanism of double Fano resonances is that the surface plasmon resonance generated at the interface of sub-wavelength dielectric grating and upper metal Ag film, and the waveguide mode resonance occurring in the MDM waveguide, provide the independently tunable double discrete states, under the condition of satisfying wave vector matching, which can be respectively coupled in the near field with the continuous state formed by the photonic band gap effect in the photonic crystal, thereby achieving the double Fano resonances. Then the influence of the structural parameters on the double Fano characteristics is analyzed quantitatively, and the evolution law of the double Fano resonances is explored by the change of the reflection spectra of resonance curves. The results show that the tuning between double Fano resonance curves and the resonance angles can be realized by changing the structural parameters. And under optimal conditions, the figure of merit (FOM) values of FR a and FR b in resonance A region can be as high as 460.0 and  $4.00 \times 10^4$ , and the FOM values of FR a and FR b in resonance B region can be as high as 269.2 and  $2.22 \times 10^4$ . The structure can provide an effective theoretical reference for designing the refractive index sensors based on Fano resonances.

**Keywords:** diffraction principle, mode coupling, surface plasmon polaritons, double Fano resonances

**PACS:** 42.25.Fx, 42.82.Et, 73.20.Mf, 74.25.Gz

**DOI:** 10.7498/aps.71.20211491

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61201112), the Key R&D Program of Hebei Province, China (Grant Nos. 19273901D 20373301D), the Natural Science Foundation of Hebei Province, China (Grant No. F2020203066), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2018M630279), the Post-Doctoral Research Projects in Hebei Province, China (Grant No. D2018003028), the Scientific Research Foundation of the Higher Education Institutions of Hebei Province, China (Grant No. ZD2018243).

† Corresponding author. E-mail: [chenying@ysu.edu.cn](mailto:chenying@ysu.edu.cn)