

文章编号 2095-1531(2015)03-0360-08

金属半圆环/长板阵列的法诺共振特性

罗李娜, 王勇凯, 聂俊英, 尹宝银*, 张中月*
(陕西师范大学 物理学与信息技术学院 陕西 西安 710062)

摘要: 本文设计了金属半圆环/长板阵列, 并应用有限元方法研究了该阵列的透射特性。研究表明: 由于半圆环与长板之间的电场耦合, 在该阵列中产生了法诺共振现象。法诺共振峰强烈地依赖于半圆环/长板的结构参数和相对位置, 并且法诺共振峰对周围介质折射率有着较高的灵敏度, 最高可以达到 862.5 nm/RIU。这些结果有助于设计基于法诺共振的微纳光子学器件。

关键词: 局域表面等离激元; 法诺共振; 有限元方法

中图分类号: O436; O242.21 文献标识码: A doi: 10.3788/CO.20150803.0360

Fano resonance properties of the arrays of metallic half-ring/rectangle structure

LUO Li-na, WANG Yong-kai, NIE Jun-ying, YIN Bao-yin*, ZHANG Zhong-yue*
(School of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)
* Corresponding author, E-mail: zyzhang@snnu.edu.cn; yinby989@snnu.edu.cn

Abstract: In this paper, arrays of metallic half-ring/rectangle were designed, and their transmission properties were investigated by the finite element method. Fano resonances appear in the transmission spectra due to the electric field couplings between the half-ring and rectangle. Fano resonant peaks are dependent strongly on the structural parameters and the relative position of the half-ring and rectangle. They are also sensitive to refractive index around the arrays of metallic half-ring/rectangle and the highest sensitivity can be achieved to 862.5 nm/RIU. These results would be helpful for designing the micro-nano photonic devices based on the Fano resonance.

Key words: localized surface plasmon polariton; Fano resonance; finite element method

收稿日期: 2014-12-16; 修订日期: 2015-02-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 11004160); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目 (No. GK201303007)

1 引言

在原子系统中,一个离散激发态能级与一个连续激发态能级相叠加时,在特定的光频段会出现零吸收现象,并在原子系统的光谱中表现为非对称的线型,此现象被称为法诺共振(Fano Resonance)^[1-2]。在金属微纳结构中,通过人工设计可以产生一个辐射明模式和一个非辐射暗模式来类比原子系统中的连续与离散能级。辐射明模式是一种线宽较宽的对称洛伦兹线型,而非辐射暗模式是一种线宽较窄的非对称线型。明模式和暗模式在光谱范围内叠加产生干涉,从而在金属纳米结构中产生法诺共振现象。由于法诺共振现象在生物和化学传感、二次谐波产生、波导调制器和光学开关等方面的重要应用,近年来引起了人们的广泛关注和研究^[3-7]。人们设计了多种基于局域表面等离子激元的法诺共振系统,例如异质低聚物结构(hetero-oligomer)、朵儿门结构、纳米颗粒群、偏心圆环/圆盘结构、双圆盘/环结构(dual-disk ring)等^[8-16]。此外,研究者发现通过引入一些非对称条件,例如破坏结构对称性、引入非对称介质环境或斜入射光也可实现法诺共振^[17-20]。

法诺共振系统的反射谱被描述为^[21]:

$$R(\omega) = R_b(\omega) \sigma(\omega), \quad (1)$$

式中,

$$R_b(\omega) = \frac{a^2}{\left[\frac{\omega^2 - \omega_s^2}{(W_s + \omega)^2 - \omega_s^2} \right]^2 + 1}, \quad (2)$$

$$\sigma(\omega) = \frac{\left[\frac{\omega^2 - \omega_a^2}{(W_a + \omega)^2 - \omega_a^2} + q \right]^2 + b}{\left[\frac{\omega^2 - \omega_a^2}{(W_a + \omega)^2 - \omega_a^2} \right]^2 + 1}, \quad (3)$$

式中 $R_b(\omega)$ 描述的是对称的洛伦兹线型; $\sigma(\omega)$ 描述的是法诺的非对称共振线型; q 是法诺共振的非对称参数,它描述的是谱线的非对称程度,是一个明模式与暗模式的激发概率之比。当 $q=0$ 时,谱线是一个对称分布线性;当 $-\infty < q < 0$ 或 $0 < q < +\infty$ 时,谱线是一个非对称分布线性^[22-23]。可以通过改变结构参数和结构材料改变 q 值。

当激发条件改变时,法诺系统中的辐射明模式和非辐射暗模式可能发生转换:原来的非辐射暗模式成为了辐射明模式,原来的辐射明模式成为了非辐射暗模式。但是,这方面的研究相对较少。本文设计了半圆环/长板阵列,通过半圆环与长板之间的耦合,以实现法诺共振,并应用有限元方法计算了该结构的透射特性。结果表明,电场分别沿 x 轴和 y 轴偏振时,半圆环/长板阵列均能产生法诺共振,并实现辐射明模式和非辐射暗模式的相互转换。此外,法诺共振峰强烈地依赖于半圆环/长板的结构参数和相对位置,并且法诺共振峰对周围介质折射率有着较高的灵敏度。这些结果有助于更好地理解法诺共振现象。

2 结构和计算方法

图1是本文设计的半圆环/长板阵列。半圆环/长板在 x 和 y 方向呈周期性排列,周期分别为 $P_x = 320 \text{ nm}$ 和 $P_y = 290 \text{ nm}$ 。结构放置于空气中,材料均为金,金的介电常数取自实验结果^[24]。半圆环与长板的厚度和宽度 w 均为 20 nm 。半圆环的内半径为 R_1 ,外半径为 R_2 ,长板的长度为 l 。半圆环与长板在 y 轴上的间距为 G ,各自中心在 x 轴上的偏移为 d 。光垂直于半圆环/长板方向入射($-z$ 方向)。本文应用 COMSOL Multiphysics 有限元仿真软件数值研究了该阵列的透射特性。COMSOL Multiphysics 是基于有限元法通过求解偏微分方程(单场)或偏微分方程组(多场)来实

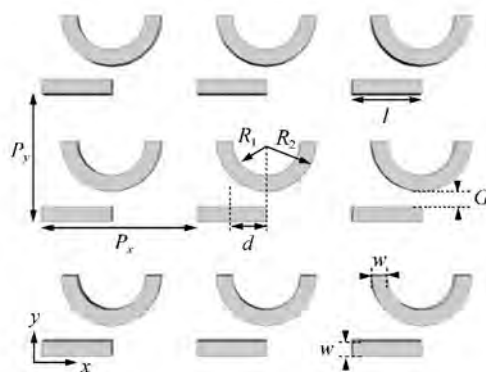


图1 金半圆环/长板阵列的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the gold half-ring/rectangle arrays

现真实物理现象的仿真,是用数学方法来求解真实世界物理现象的数值仿真软件。

3 结果与讨论

3.1 电场沿 y 方向偏振时的法诺共振现象

图2为半圆环阵列和半圆环/长板阵列在电场沿 y 方向偏振及长板阵列在电场沿 x 方向偏振时的透射光谱及透射峰处的电荷分布图。半圆环的内外半径分别为 $R_1 = 40 \text{ nm}$ 和 $R_2 = 60 \text{ nm}$,长板的长度为 $l = 80 \text{ nm}$ 。半圆环和长板的间距为 $G = 10 \text{ nm}$,各自的中心在 x 方向上的偏移量 $d = 40 \text{ nm}$ 。从图2(a)可以看出,当入射光沿 y 轴偏振时,半圆环阵列在 $\lambda = 0.645 \text{ }\mu\text{m}$ 处出现共振峰。在共振峰处,正负电荷聚集在半圆环的底部和两个臂的末端,形成沿 y 方向共振的电偶极子模式。对半圆环/长板阵列,当入射光沿 y 轴偏振时,如图2(b)所示,在 $\lambda = 0.640 \text{ }\mu\text{m}$ 和 $\lambda = 0.735 \text{ }\mu\text{m}$ 处出现共振峰。用 M_{HR} 代表短波长处的共振模式,用 M_{R} 代表长波长处的共振模式。 M_{HR} 模式的电荷分布与图2(a)中半圆环阵列的

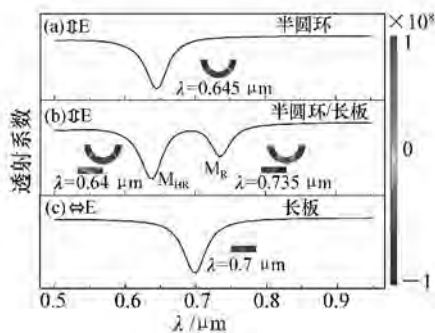


图2 (a、b) 入射光沿 y 方向偏振时,半圆环和半圆环/长板阵列的透射光谱图及其透射峰处的电荷分布;(c) 入射光沿 x 方向偏振时,长板阵列的透射光谱图及其透射峰处的电荷分布

Fig. 2 (a b) Transmission spectra and the distribution of charges in the resonant peaks of the arrays of half-ring and half-ring/rectangle with the electric field polarized along y ; (c) Transmission spectrum and the distribution of charges in the resonant peaks of the rectangle arrays with the electric field polarized along x

电荷分布相似,在半圆环上形成沿 y 轴共振的电

偶极子模式;对于 M_{R} 模式,正负电荷主要分布在长板的两端,在长板上形成沿 x 轴共振的电偶极子模式。同时计算了电场沿 x 轴偏振时,长板阵列的透射光谱和电荷分布,如图2(c)所示,在 $\lambda = 0.7 \text{ }\mu\text{m}$ 处出现共振峰。在共振峰处,正负电荷聚集在长板的两端,与 M_{R} 模式相似。所以,对半圆环/长板阵列,当电场沿 y 轴偏振时,电场极化作用直接激发出半圆环上沿 y 方向共振的电偶极子模式(M_{HR}),电场耦合作用间接激发出在长板上沿 x 方向共振的电偶极子模式(M_{R}),产生了法诺共振现象。

图3为半圆环/长板阵列中半圆环与长板的中心在 x 方向的不同偏移量 d 所对应的透射光谱。此时, $R_1 = 40 \text{ nm}$ 、 $R_2 = 60 \text{ nm}$ 、 $l = 80 \text{ nm}$ 、 $G = 10 \text{ nm}$ 。当 $d = 0 \text{ nm}$ 时,透射谱中只有由电场极化引起的半圆环上的电偶极子共振模式 M_{HR} ;随着 d 增大,在模式 M_{HR} 的长波长一侧出现模式 M_{R} ;当 $d = 40 \text{ nm}$ 时,模式 M_{R} 的强度达到最大;当 d 继续增大时,半圆环顶点与长板端点在 x 方向的间距增加,电场耦合作用减弱,模式 M_{R} 的强度减弱;当 $d \approx 100 \text{ nm}$ 时,模式 M_{R} 消失。因此,在半圆环/长板阵列中激发出法诺共振现象不仅要求结构要有一定的非对称性,而且要求结构间要有一定的耦合强度。

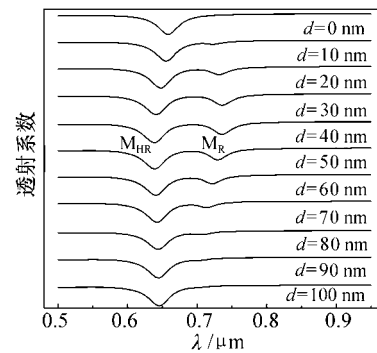
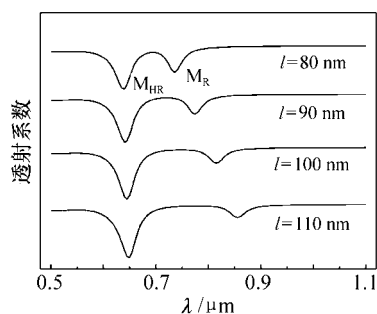


图3 入射光沿 y 方向偏振时,半圆环/长板阵列的不同的中心偏移量 d 对应的透射光谱

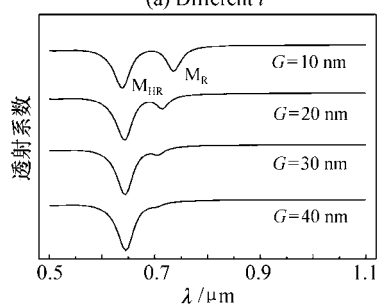
Fig. 3 Transmission spectra of the different center offset d of half-ring/rectangle arrays with the electric field polarized along y

图4研究了半圆环/长板阵列中长板的长度 l 、半圆环与长板在 y 方向的间距 G 和半圆环的内外半径 R_1 、 R_2 对透射特性的影响。结构参数为

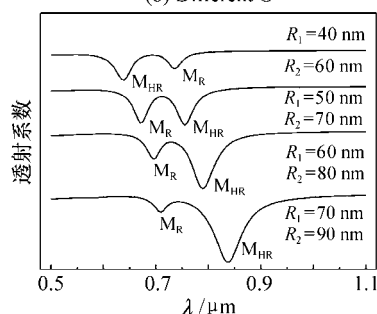
$R_1 = 40 \text{ nm}$ 、 $R_2 = 60 \text{ nm}$ 、 $d = 40 \text{ nm}$ 、 $G = 10 \text{ nm}$ 、 $l = 80 \text{ nm}$ 。其中,一个参数变化时其它参数保持不变。图4(a)为长板长度 l 从 $l = 80 \text{ nm}$ 增加到 $l = 110 \text{ nm}$ 时的透射光谱。 l 增大引起电子在长板上



(a) 不同 l
(a) Different l



(b) 不同 G
(b) Different G



(c) 不同 R_1 和 R_2
(c) Different R_1 and R_2

图4 入射光沿 y 方向偏振时,半圆环/长板阵列的不同结构参数所对应的透射光谱

Fig. 4 Transmission spectra of the different structural parameters of half-ring/rectangle arrays with the electric field polarized along y

的共振长度增加,从而导致模式 M_R 红移。图4(b)为半圆环与长板在 y 方向上的间距 G 从 $G = 10 \text{ nm}$ 增加到 $G = 40 \text{ nm}$ 时的透射光谱。 G 增大引起半圆环与长板之间的耦合减弱,电子在长板上的有效振动距离减小,从而导致模式 M_R 蓝移。 G 增大到一定程度时,半圆环与长板之间几

乎无耦合,模式 M_R 消失。图4(c)为半圆环的内外半径由 $R_1 = 40 \text{ nm}$ 、 $R_2 = 60 \text{ nm}$ 增加到 $R_1 = 70 \text{ nm}$ 、 $R_2 = 90 \text{ nm}$ 时的透射光谱。内外半径变化引起法诺非对称参数 q 变化,使模式 M_R 从模式 M_{HR} 的长波长一侧转移到短波长一侧,法诺信号发生反转。由于透射谱线的共振谷与反射谱线的共振峰位置相对应,本文计算了半圆环/长板阵列的内外半径由 $R_1 = 40 \text{ nm}$ 、 $R_2 = 60 \text{ nm}$ 增加到 $R_1 = 70 \text{ nm}$ 、 $R_2 = 90 \text{ nm}$ 时的反射谱线,并应用式(1)、(2)和(3)对反射谱线进行拟合,得出法诺共振的非对称参数由 $q = 1.966$ 变为 $q = -0.51$,法诺信号发生反转。

此外,本文研究了半圆环/长板阵列的法诺共振对周围介质折射率的灵敏度。图5为结构周围填充不同介质折射率 n 时的透射光谱。结构参数为 $R_1 = 40 \text{ nm}$ 、 $R_2 = 60 \text{ nm}$ 、 $d = 40 \text{ nm}$ 、 $G = 10 \text{ nm}$ 、 $l = 80 \text{ nm}$ 。当介质折射率从 $n = 1.0$ 增大到 $n = 1.4$ 时,模式 M_{HR} 的共振波长由 $\lambda = 0.64 \mu\text{m}$ 红移到 $\lambda = 0.8 \mu\text{m}$,模式 M_R 的共振波长由 $\lambda = 0.735 \mu\text{m}$ 红移到 $\lambda = 0.96 \mu\text{m}$,两个共振模式均发生明显的红移。因此,在电场 y 方向偏振时半圆环/长板阵列对周围介质折射率具有较高的灵敏度,最高可以达到 $562.5 \text{ nm}/\text{RIU}$ 。

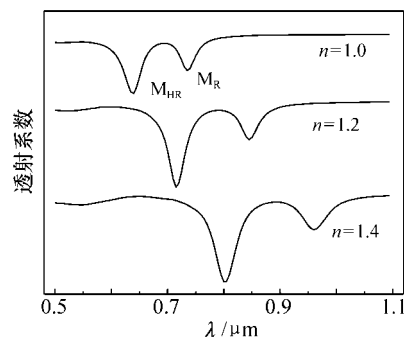


图5 入射光沿 y 方向偏振时,半圆环/长板阵列的周围填充不同折射率 n 所对应的透射光谱

Fig. 5 Transmission spectra of the different refractive index n of half-ring/rectangle arrays with the electric field polarized along y

3.2 电场沿 x 方向偏振时的法诺共振现象

图6为半圆环/长板和半圆环阵列在电场沿 x 方向偏振时的透射光谱及透射峰处的电荷分布图。结构参数分别为 $R_1 = 40 \text{ nm}$ 、 $R_2 = 60 \text{ nm}$ 、 $l =$

80 nm、 $d = 40$ nm、 $G = 10$ nm。从图 6(a) 可以看出,半圆环阵列在 $\lambda = 1.01 \mu\text{m}$ 处出现共振峰。在共振峰处,正负电荷聚集在半圆环左右两端,形成沿 x 方向共振的电偶极子模式。从图 6(b) 可以看出,半圆环/长板阵列在 $\lambda = 0.64 \mu\text{m}$ 、 $\lambda = 0.735 \mu\text{m}$ 和 $\lambda = 1.015 \mu\text{m}$ 处出现共振峰。在 $\lambda = 0.64 \mu\text{m}$ 处,共振峰主要源于半圆环中电子沿 y 方向的共振,与图 2(a) 中半圆环阵列的共振模式相同,用 M_{HR} 表示;在 $\lambda = 0.735 \mu\text{m}$ 处,共振峰主要源于长板中电子沿 x 方向的振动,仍用 M_{R} 表示;在 $\lambda = 1.015 \mu\text{m}$ 处,共振峰主要源于半圆环中电子沿 x 方向的振动,与图 7(a) 中半圆环阵列的电荷分布相似,用 M_{HRX} 表示。所以,当入射光沿 x 方向偏振时,电场极化作用直接激发了长板中沿 x 方向共振的电偶极子模式(M_{R}),半圆环与长板之间的电场耦合作用间接激发了半圆环中的沿 y 方向共振电偶极子模式(M_{HR}),实现了法诺共振。

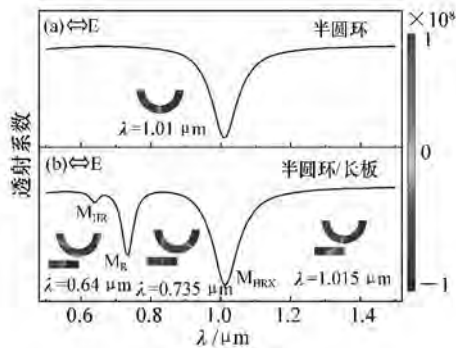


图 6 入射光沿 x 方向偏振时,半圆环/长板和半圆环阵列的透射光谱图及其透射峰处的电荷分布

Fig. 6 Transmission spectra and the distribution of charges in the resonant peaks of the arrays of half-ring and half-ring/rectangle with the electric field polarized along x

图 7 是入射光沿 x 方向偏振时,半圆环与长板的中心在 x 轴的不同偏移量 d 所对应的透射光谱。结构参数为 $R_1 = 40$ nm、 $R_2 = 60$ nm、 $l = 80$ nm、 $G = 10$ nm。当 $d = 0$ nm 时,透射光谱上没有模式 M_{HR} ;随着 d 增大,在模式 M_{R} 的短波长一侧出现了模式 M_{HR} ;当 $d = 40$ nm 时,模式 M_{HR} 最明显; d 继续增大时,由于半圆环与长板之间的电

场耦合作用减弱,模式 M_{HR} 的共振强度开始减弱;当 $d \approx 90$ nm 时,半圆环与长板之间无耦合作用,模式 M_{HR} 消失。因此,入射光 x 偏振时,只有当 d 取适当的值时,半圆环/长板阵列中才产生法诺共振现象。

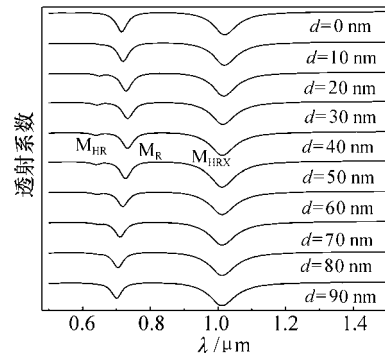


图 7 入射光沿 x 方向偏振时,半圆环/长板阵列的不同的中心偏移量 d 所对应的透射光谱

Fig. 7 Transmission spectra of the different center offset d of half-ring/rectangle arrays with the electric field polarized along x

图 8 是入射光沿 x 方向偏振时,长板的长度 l 、间距 G 和半圆环的内外半径 R_1 、 R_2 对透射特性的影响。结构参数为 $R_1 = 40$ nm、 $R_2 = 60$ nm、 $d = 40$ nm、 $G = 10$ nm、 $l = 80$ nm,任一个参数变化时其它参数保持不变。图 8(a) 是长板长度 l 从 $l = 80$ nm 增加到 $l = 110$ nm 时结构的透射光谱。 l 增大使长板上的共振长度增加,导致模式 M_{R} 红移。图 8(b) 是间距 G 从 $G = 10$ nm 增加到 $G = 40$ nm 时结构的透射光谱。 G 增大使得半圆环与长板之间的耦合减弱,导致模式 M_{HR} 强度减弱。当 G 增大到一定程度时半圆环与长板之间几乎无耦合,模式 M_{HR} 消失。图 8(c) 是半圆环的内外半径由 $R_1 = 40$ nm、 $R_2 = 60$ nm 增加到 $R_1 = 70$ nm、 $R_2 = 90$ nm 时结构的透射光谱。内外半径增大引起法诺非对称参数 q 值的变化,使模式 M_{HR} 从模式 M_{R} 的短波长一侧转移到长波长一侧,法诺信号发生反转。同样本文计算了半圆环/长板阵列的内外半径由 $R_1 = 40$ nm、 $R_2 = 60$ nm 增加到 $R_1 = 70$ nm、 $R_2 = 90$ nm 时的反射谱线,并应用式(1)、(2)和(3)对反射谱线进行拟合,得出法诺共振的非对称参数由 $q = -0.498$ 变为 $q = 1.439$,法诺信号发生反转。

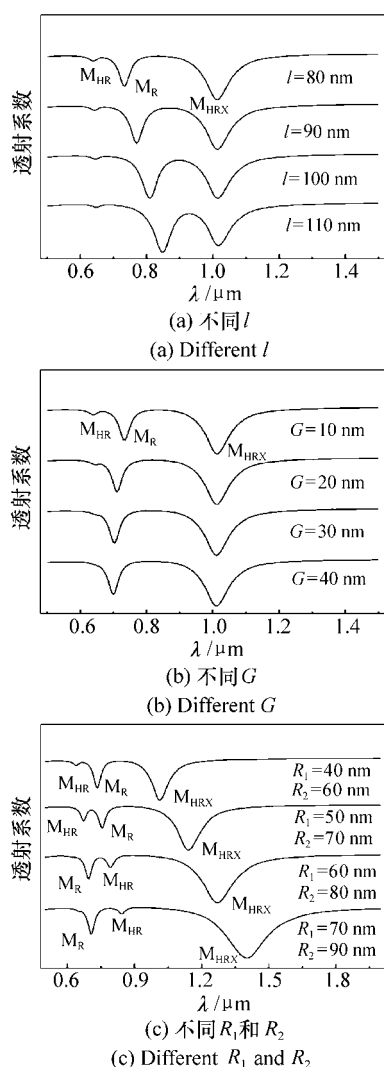


图8 入射光沿 x 方向偏振时,半圆环/长板阵列的不同结构参数所对应透射光谱

Fig. 8 Transmission spectra of the different structural parameters of half-ring/rectangle arrays with the electric field polarized along x

同样,本文也研究了入射光 x 偏振时,半圆环/长板阵列的法诺共振对周围介质折射率的灵敏度。图9为结构周围填充不同介质折射率 n 时的透射光谱。结构参数为 $R_1 = 40$ nm、 $R_2 = 60$ nm、 $d = 40$ nm、 $G = 10$ nm、 $l = 80$ nm。当 n 从 $n = 1.0$ 增大到 $n = 1.4$,模式 M_{HR} 的共振波长由

$\lambda = 0.64 \mu\text{m}$ 红移到 $\lambda = 0.8 \mu\text{m}$,模式 M_R 的共振波长由 $\lambda = 0.735 \mu\text{m}$ 红移到 $\lambda = 0.96 \mu\text{m}$,模式 M_{HRX} 的共振波长由 $\lambda = 1.015 \mu\text{m}$ 红移到 $\lambda = 1.36 \mu\text{m}$ 3个共振模式均发生明显的红移。因此,入射光沿 x 偏振时,半圆环/长板阵列中的法诺共振对周围介质折射率也具有较高的灵敏度,最高可以达到 862.5 nm/RIU 。

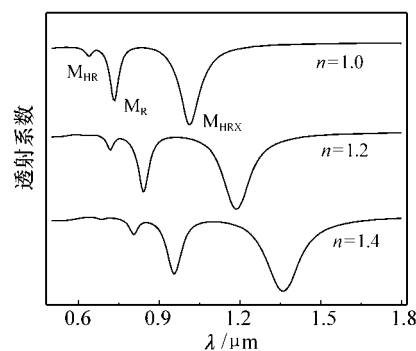


图9 入射光沿 x 方向偏振时,半圆环/长板阵列的周围填充不同折射率 n 所对应的透射光谱

Fig. 9 Transmission spectra of the different refractive index n of half-ring/rectangle arrays with the electric field polarized along x

5 结论

本文应用有限元方法研究了半圆环/长板阵列的透射特性。当入射光沿 z 轴传播,电场分别沿 y 方向和 x 方向偏振时,由于半圆环与长板之间发生电场耦合,结构均能产生法诺共振现象,并实现辐射明模式与非辐射暗模式的相互转换。研究表明,结构中的法诺共振峰强烈的依赖于半圆环和长板的结构参数和相对位置。此外,该结构中的法诺共振峰对周围介质折射率有较高的灵敏度,最高可以达到 862.5 nm/RIU 。这些结果对设计基于法诺共振的微纳光子学器件有一定的指导意义。

参考文献:

[1] LUKYANCHUK B,ZHELUDEV N I,MAIER S A *et al.*. The Fano resonance in plasmonic nanostructures and metamaterials[J]. *Nat. Mater.* 2010 9(9):707-715.

- [2] FANO U. Effects of configuration interaction on intensities and phase shifts[J]. *Phys. Rev.* 1961, 124(6):1866-1878.
- [3] LIU SH D, YANG ZH, LIU R P *et al.*. High sensitivity localized surface plasmon resonance sensing using a double split nanoring cavity[J]. *J. Phys. Chem. C* 2011, 115(50):24469-24477.
- [4] CUBUKCU E, ZHANG SH, PARK Y S *et al.*. Split ring resonator sensors for infrared detection of single molecular monolayers[J]. *Appl. Phys. Lett.* 2009, 95(4):043113.
- [5] DE CEGLIA D, D'AGUANNO G, MATTIUCCI N *et al.*. Enhanced second-harmonic generation from resonant GaAs gratings[J]. *Opt. Lett.* 2011, 36(5):704-706.
- [6] PIAO X J, YU S, PARK N. Control of Fano asymmetry in plasmon induced transparency and its application to plasmonic waveguide modulator[J]. *Opt. Express* 2012, 20(17):18994-18999.
- [7] CHANG W, LASSITER J B, SWANGLAP P *et al.* A plasmonic Fano switch[J]. *Nano. Lett.* 2012, 12(9):4977-4982.
- [8] MA J X, TAN R H, FANG Y *et al.* LSPR spectral properties of Au nano-ring arrays and single Au nanoparticles[J]. *Chinese J. Optics and Applied Optics* 2010, 3(1):75-78.
- [9] 颜承恩, 周骏, 李星 等. 金纳米粒子掺杂 DNA-CTMA-DPPF 薄膜的表面增强拉曼散射特性[J]. *发光学报* 2013, 34(3):382-387.
- YAN CH EN, ZHOU J, LI X *et al.*. Surface enhanced Raman Scattering characteristics of gold-nanoparticles-doped DNA-CTMA-DPPF film[J]. *Chinese J. Luminescence* 2013, 34(3):382-387. (in Chinese)
- [10] 陈肖慧, 赵家龙. 倒置器件结构及局域等离子体效应对 CdSe 量子点 LED 发光性能的改进[J]. *发光学报* 2012, 33(12):1324-1328.
- CHEN X H, ZHAO J L. Improvement of performance for CdSe quantum dot LEDs by using an inverted device structure and localized surface plasmon resonance[J]. *Chinese J. Luminescence* 2012, 33(12):1324-1328. (in Chinese)
- [11] SUN Q, UENO K, YU H *et al.*. Direct imaging of the near field and dynamics of surface plasmon resonance on gold nanostructures using photoemission electron microscopy[J]. *Light Sci. Appl.* 2013, 2(12):e118.
- [12] ARTAR A, YANIK A A, ALTUG H. Directional double Fano resonances in plasmonic hetero-oligomers[J]. *Nano. Lett.* 2011, 11(9):3694-3700.
- [13] ZHANG SH, GENOV D A, WANG Y *et al.*. Plasmon-induced transparency in metamaterials[J]. *Phys. Rev. Lett.* , 2008, 101(4):047401.
- [14] FAN J A, WU C, BAO K *et al.*. Self-assembled plasmonic nanoparticle clusters[J]. *Science* 2010, 328(5982):1135-1138.
- [15] HAO F, SONNEFRAUD Y, VAN DORPE P *et al.*. Symmetry breaking in plasmonic nanocavities: subradiant LSPR sensing and a tunable Fano resonance[J]. *Nano. Lett.* 2008, 8(11):3983-3988.
- [16] NIU L F, ZHANG J B, FU Y H *et al.*. Fano resonance in dual-disk ring plasmonic nanostructures[J]. *Opt. Express* , 2011, 19(23):22974-22981.
- [17] HE J N, FAN C Z, WANG J Q *et al.*. A giant localized field enhancement and high sensitivity in an asymmetric ring by exhibiting Fano resonance[J]. *J. Opt.* 2013, 15(2):025007.
- [18] ZHANG SH P, BAO K, HALAS N J *et al.*. Substrate-induced Fano resonances of a plasmonic nanocube: a route to increased-sensitivity localized surface Plasmon resonance sensors revealed[J]. *Nano Lett.* 2011, 11(4):1657-1663.
- [19] CHEN H J, SHAO L, MING T *et al.*. Observation of the Fano resonance in gold nanorods supported on high-dielectric-constant substrates[J]. *Acc. Nano.* 2011, 5(8):6754-6763.
- [20] LU Y H, RHEE R Y, JANG W H *et al.*. Active manipulation of plasmonic electromagnetically-induced transparency based on magnetic plasmon resonance[J]. *Opt. Express* 2010, 18(20):20912-20917.
- [21] GALLINET B, MARTIN O J F. Relation between near field and far field properties of plasmonic Fano resonances[J]. *Opt. Express* 2011, 19(22):22167-22175.
- [22] GIANNINI V, FRANCESCATO Y, AMRANIA H *et al.*. Fano resonances in nanoscale plasmonic systems: a parameter-free modeling approach[J]. *Nano. Lett.* 2011, 11(7):2835-2840.

- [23] RYBIN M V ,KHANIKAEV A B ,INOUE M *et al.*. Bragg scattering induces Fano resonance in photonic crystals [J]. *Photonic. Nanostruct.* 2010 8(2):86-93.
- [24] JOHNSON P B ,CHRISTY R W. Optical constants of the noble metals [J]. *Phys. Rev. B* ,1972 6(12):4370-4379.

作者简介:



罗李娜(1989—),女,陕西宝鸡人,硕士研究生,主要从事微纳光子学方面的研究。E-mail: linaluo@snnu.edu.cn



尹宝银(1964—),男,陕西宝鸡人,讲师,主要从事量子光学和量子信息方面的研究。E-mail: yinby989@snnu.edu.cn



王勇凯(1989—),男,陕西西安人,硕士研究生,主要从事微纳光子学方面的研究。E-mail: wang_yong_kai@126.com



张中月(1975—),男,山东莘县人,教授,博士生导师,主要从事微纳光子学方面的研究。E-mail: zy Zhang@snnu.edu.cn



聂俊英(1989—),女,陕西西安人,硕士研究生,主要从事微纳光子学方面的研究。E-mail: niejunying@snnu.edu.cn