

文章编号: 1004-4353(2019)02-0117-05

表面等离子波导端耦合腔系统中表面等离子 激元传输性质的研究

赵菲, 张英俏*

(延边大学 理学院, 吉林 延吉 133002)

摘要: 用表面等离子波导端耦合两个表面等离子腔组成非厄米量子系统, 研究该系统中表面等离子激元的传输性质, 并通过求解系统的本征值方程得到表面等离子激元的透射和反射振幅. 通过分析表面等离子波导系统的反射率和透射率随参量变化的关系图表明: 随着表面等离子激元波导与腔耦合强度的增加, 反射峰和透射峰逐渐变宽; 随着腔损耗的增大, 反射峰的峰值明显减小, 而透射峰的峰值明显增加; 随着腔间耦合系数 g 的增加, 两个反射峰/透射峰之间的距离变宽.

关键词: 表面等离子激元; 传输特性; 波导

中图分类号: O431

文献标识码: A

Study on the transport properties of surface plasmon polaritons in the system of a plasmonic waveguide end-coupled to two cavities

ZHAO Fei, ZHANG Yingqiao*

(College of Science, Yanbian University, Yanji 133002, China)

Abstract: The transport properties of surface plasmon polaritons (SPPs) are theoretically studied in a surface plasmon waveguide system, which consists of a surface plasmon waveguide end-coupled to two surface plasmon cavities. The transmission and reflection amplitudes of SPPs are obtained by solving the eigen-equation of the system. In addition, analysis of reflectance and transmittance as the function of parameters in the surface plasmon waveguide system shows that as as increaseing the coupling strength of the waveguide and the cavity, the resonant peaks gradually widen; as the cavity loss increases, the peak value of the reflection peak decreases while the transmission peak increases significantly, and as the coupling coefficient g between the two cavities increases, the distance between two reflection (transmission) peaks becomes wider.

Keywords: surface plasmon polaritons; transport properties; waveguide

0 引言

单光子是量子信息的理想载体, 操纵单个光子的传输在量子信息处理中至关重要^[1-3]. 目前, 利用光学腔和一维波导操纵单光子传输在理论^[4-6]和实验^[7-9]上已得到广泛研究, 但由于光学衍射极限的制约^[10], 使光子在量子信息处理中的应用受到限制. 表面等离子激元(surface plasmon polaritons, SPPs)是金属表面自由振动的电子与光子相互作用而产生的沿金属表面传播的电磁波^[11]. 由于表面等离子激元具有能够突破衍射极限、易集成以及拥有纳米尺度操纵光等优点, 因此可用来制作各种表面等离子器

件^[12-14]. 2007 年, Chang 等^[15]从理论上研究了纳米线中传播的表面等离子激元与一个二能级发射器耦合系统的传输特性. 2011 年, Chen 等^[16]从理论上研究了外加磁场对纳米线中传播的表面等离子激元与两个量子点耦合系统散射特性的影响. 2012 年, Cheng 等^[17]研究了一维耦合共振器-波导系统中表面等离子激元的传输性质. 2013 年, Jin 等^[18]研究了折射率接近于零的等离子波导系统中两个量子点间的量子纠缠. 2015 年, Kim 等^[19]研究了一维波导与嵌入三能级量子点的腔耦合系统中表面等离子激元的开关效应. 2016 年, Cheng 等^[20]研究了两个波导手性耦合一个量子发射器的系统中表面等离子激元的传输特性. 2018 年, Wu 等^[21]研究了多个量子点与表面等离子激元波导耦合的系统中表面等离子激元的单向无反射特性. 目前, 对表面等离子波导散射特性的相关研究讨论的大多是将腔边耦合到波导的情况, 而对于端耦合的情况讨论得较少. 基于此, 本文研究表面等离子波导端耦合腔系统中可见光频段表面等离子激元的散射特性, 并通过调节腔损耗、腔之间的耦合强度、波导与腔的耦合强度, 分析影响表面等离子激元传输的因素.

1 模型与计算

表面等离子波导端与两个表面等离子腔耦合系统的结构如图 1 所示. 系统的哈密顿量($\hbar=1$)可以表示为:

$$H = \int dx \{ -i v_g c_R^\dagger(x) \frac{\partial}{\partial x} c_R(x) + i v_g c_L^\dagger(x) \frac{\partial}{\partial x} c_L(x) + V_1 \delta(x) [c_R^\dagger(x) a_1 + c_R(x) a_1^\dagger] + V_2 \delta(x-d) [c_L^\dagger(x) a_2 + c_L(x) a_2^\dagger] \} + \left(\omega_1 - i \frac{\Gamma_1}{2} \right) a_1^\dagger a_1 + \left(\omega_2 - i \frac{\Gamma_2}{2} \right) a_2^\dagger a_2 + g (a_1^\dagger a_2 + a_1 a_2^\dagger), \quad (1)$$

其中 $c_R^\dagger(x)$ 和 $c_L^\dagger(x)$ 分别表示向前传播和向后传播的表面等离子激元在位置 x 处的产生算符和湮灭算符, v_g 和 g 分别表示表面等离子激元在金属纳米线中的群速度和两个腔之间的耦合系数, $V_{1(2)}$ 是波导和第 1(2) 个腔之间的耦合率, a_j^\dagger 和 a_j ($j=1, 2$) 分别表示第 j 个腔中产生和湮灭一个表面等离子激元, ω_j 和 $\frac{\Gamma_j}{2}$ 分别表示第 j 个腔的共振频率和衰减率. 假定能量 $E_k = v_g k$ (k 是波矢) 的单个表面等离子激元从前或后方向入射, 则系统的本征态可写成如下形式:

$$|E_k\rangle = \int dx [\phi_{k,R}^\dagger(x) c_R^\dagger(x) + \phi_{k,L}^\dagger(x) c_L^\dagger(x)] |0, 0\rangle |0\rangle_{sp} + (\xi_1 a_1^\dagger + \xi_2 a_2^\dagger) |0, 0\rangle |0\rangle_{sp}, \quad (2)$$

其中 $|0, 0\rangle |0\rangle_{sp}$ 表示两个腔处于基态且在金属纳米线中没有表面等离子激元, ξ_1 和 ξ_2 分别表示腔 1 和腔 2 激发态的几率幅. 对于向前或向后入射的单个表面等离子激元, 散射振幅 $\phi_{k,R}^\dagger(x)$ 和 $\phi_{k,L}^\dagger(x)$ ^[22-23] 可以分别表示为:

$$\begin{aligned} \phi_{k,R}^\dagger(x) &= \exp(ikx) [\theta(-x) + r\theta(x)], \\ \phi_{k,L}^\dagger(x) &= \exp[-ik(x-d)] t\theta(d-x). \end{aligned} \quad (3)$$

其中: t 和 r 分别为透射和反射系数; $\theta(x)$ 是单位阶梯函数, 当 $x \geq 0$ 或 $x < 0$ 时, 单位阶梯函数分别等于 1 或 0. 解本征值方程 $H|E_k\rangle = E_k|E_k\rangle$, 并假设表面等离子从左向右入射, 得如下关系:

$$V_2 t + g \xi_1 = \left(\Delta + i \frac{\Gamma_2}{2} \right) \xi_2, \quad V_1 + V_2 r + g \xi_2 = \left(\delta + i \frac{\Gamma_1}{2} \right) \xi_1, \quad t = \frac{V_2}{i v_g} \xi_2, \quad r = 1 + \frac{V_1}{i v_g} \xi_1. \quad (4)$$

由此可得透射和反射的系数分别为:

$$t = t_f = t_b = \frac{8ig\sqrt{\eta_1\eta_2}}{2\eta_1[2\eta_2 + (-2i\Delta + \Gamma_2)] + [2\eta_2(-2i\delta + \Gamma_1) + 4g^2 - 4\delta\Delta - 2i\delta\Gamma_2 + \Gamma_1(-2i\Delta + \Gamma_2)]},$$

$$r_f = 1 - \frac{4\eta_1 [2\eta_2 + (-2i\Delta + \Gamma_2)]}{2\eta_1 [2\eta_2 + (-2i\Delta + \Gamma_2)] + [2\eta_2(-2i\delta + \Gamma_1) + 4g^2 - 4\delta\Delta - 2i\delta\Gamma_2 + \Gamma_1(-2i\Delta + \Gamma_2)]},$$

$$r_b = 1 - \frac{4\eta_2 [2\eta_1 + (-2i\Delta + \Gamma_1)]}{2\eta_1 [2\eta_2 + (-2i\Delta + \Gamma_2)] + [2\eta_2(-2i\delta + \Gamma_1) + 4g^2 - 4\delta\Delta - 2i\delta\Gamma_2 + \Gamma_1(-2i\Delta + \Gamma_2)]}.$$

其中 $\eta_j = \frac{V_j^2}{v_g}$, δ 和 Δ 是腔 1 和腔 2 与表面等离子激元之间的失谐量, $T = |t|^2$, $R_f = |r_f|^2$ 和 $R_b = |r_b|^2$ 分别表示透射率、向前方向的反射率和向后方向的反射率.

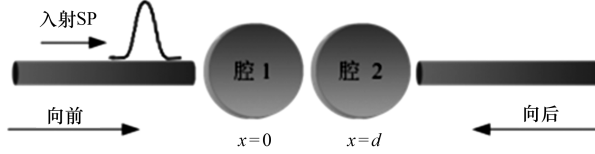


图 1 表面等离子波导端耦合两个腔的结构示意图

2 分析与讨论

首先分析表面等离子激元的反射和透射性质. 图 2 为反射率(实线)和透射率(虚线)随波长变化的光谱图(假设两个腔是相同的). 其中, $\Gamma_1 = \Gamma_2 = 0.1\eta_1$, $\eta_1 = \eta_2 = 0.2 \times 10^{13}$ rad/s, $g = 3.0 \times 10^{13}$ rad/s. 从图 2 可知, 在波长 1513 nm 和 1589 nm 处, 有明显的 2 个反射峰和 2 个透射峰. 利用公式 $Q = f/\Delta f$ (f 和 Δf 分别表示共振频率和半高宽) 计算得到 2 个透射光谱的品质因子, 约为 302 和 264.

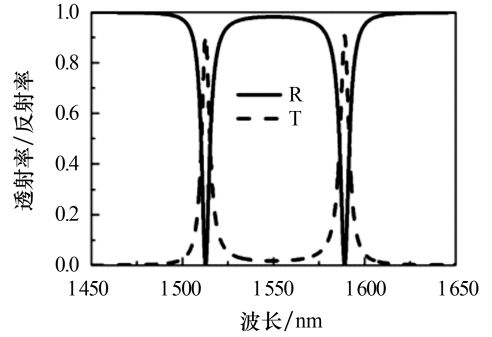


图 2 透射率和反射率随波长的变化关系

图 3 为表面等离子波导-腔耦合强度 η 取不同值时反射率(a)和透射率(b)随波长变化的光谱图. 其中, $\Gamma_1 = \Gamma_2 = 0.1\eta_1 = 0.1\eta_2$, $g = 3.0 \times 10^{13}$ rad/s, $\eta_1 = \eta_2$ 是变量. 从图 3 可知, 随着表面等离子波导-腔耦合强度 η 的增加, 反射峰和透射峰逐渐变宽, 但其峰值不发生变化.

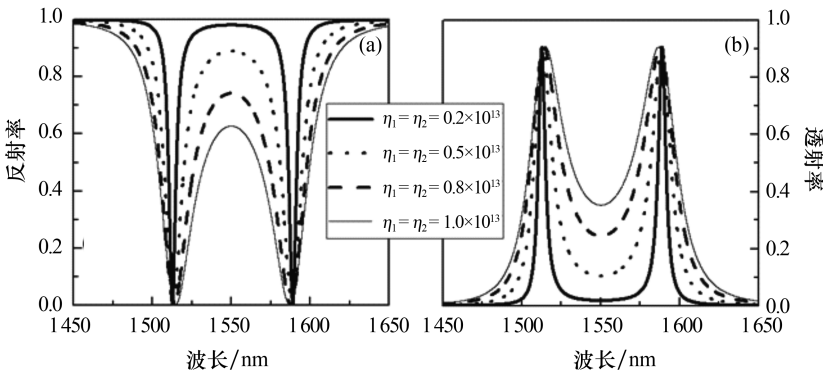


图 3 不同表面等离子波导-腔耦合强度下反射率(a)和透射率(b)随波长的变化关系

图 4 为不同腔损耗 Γ_j 下反射率(a)和透射率(b)随波长变化的光谱图. 其中, $\eta_1 = \eta_2 = 0.2 \times 10^{13}$ rad/s, $g = 3.0 \times 10^{13}$ rad/s, Γ_j 是变量. 由图 4 可知, 当 Γ_j/η_j 值增大时, 反射峰和透射峰的位置保持不变, 反射峰的峰值减小, 透射峰的峰值明显增加.

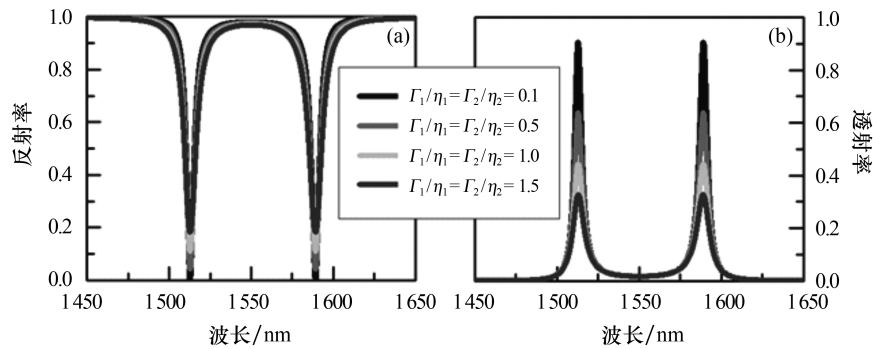


图 4 不同腔损耗 Γ_j 下反射率(a)和透射率(b)随波长的变化关系

为了进一步研究系统的散射特性,绘制腔与腔之间的耦合系数对表面等离子激元传输特性的影响图,如图 5 所示. 其中, $\Gamma_1 = \Gamma_2 = 0.1$, $\eta_1 = 0.1\eta_2$, $\eta_1 = \eta_2 = 0.2 \times 10^{13}$ rad/s, g 是变量. 由图 5 可知,随着两个腔之间的耦合系数 g 的增加, 2 个反射峰之间的距离和 2 个透射峰之间的距离变宽,但反射峰和透射峰的带宽与峰值无明显变化.

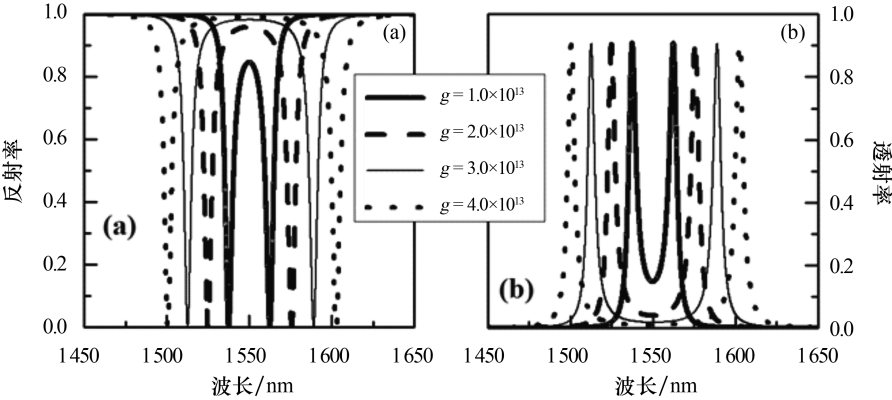


图 5 不同腔间耦合强度 g 下反射率(a)和透射率(b)随波长的变化关系

3 结论

本文基于腔损耗、波导-腔耦合强度和两个腔间耦合强度,研究了表面等离子波导端耦合腔系统中表面等离子激元的传输性质. 结果表明:随着表面等离子激元波导与腔耦合强度的增加,反射峰和透射峰逐渐变宽;随着腔损耗的增大,反射峰的峰值明显减小,透射峰的峰值明显增加;随着两个腔间耦合系数 g 的增加, 2 个反射峰之间的距离和 2 个透射峰之间的距离变宽. 本文结果可为研究两个不同腔端耦合波导系统中等离子激元的传输特性提供基础,同时可为量子开关、量子传感器和量子滤波器等器件的研究提供理论参考.

参考文献:

[1] RAIMOND Jean Michel, BRUNE Michel, HAROCHE Serge. Manipulating quantum entanglement with atoms and photons in a cavity[J]. Reviews of Modern Physics, 2001,73(3):565-582.

[2] LIAO Jieqiao, GONG Zhirui, ZHOU Lan, et al. Controlling the transport of single photons by tuning the frequency of either one or two cavities in an array of coupled cavities[J]. Physical Review A, 2010,81(4):042304.

[3] YAN Weibin, FAN Heng. Control of single-photon transport in a one-dimensional waveguide by a single photon [J]. Physical Review A, 2014,90(5):053807.

[4] KOCABAŞ Şükrü Ekin, REPHAELI Eden, FAN Shanhui. Resonance fluorescence in a waveguide geometry[J].

- Physical Review A, 2012,85(2):023817.
- [5] ZHENG Huaixiu, BARANGER Harold U. Persistent quantum beats and long-distance entanglement from waveguide-mediated interactions[J]. Physical Review Letters, 2013,110(11):113601.
 - [6] YAN Conghua, JIA Wenzhi, WEI Lianfu. Controlling single-photon transport with three-level quantum dots in photonic crystals[J]. Physical Review A, 2014,89(3):033819.
 - [7] VETSCH E, REITZ D, SAGUÉ G, et al. Optical interface created by laser-cooled atoms trapped in the evanescent field surrounding an optical nanofiber[J]. Physical Review Letters, 2010,104(20):203603.
 - [8] CLAUDON Julien, BLEUSE Joël, MALIK Nitin Singh, et al. A highly efficient single-photon source based on a quantum dot in a photonic nanowire[J]. Nature Photonics, 2010,4(3):174.
 - [9] LAUCHT A, PÜTZ S, GÜNTHER T, et al. A waveguide-coupled on-chip single-photon source[J]. Physical Review X, 2012,2(1):011014.
 - [10] 李明. 表面等离子激元波导中的量子信息传输[D]. 合肥:中国科学技术大学,2017.
 - [11] BARNES William L, DEREUX Alain, EBBESEN Thomas W. Surface plasmon subwavelength optics[J]. Nature, 2003,424(6950):824-830.
 - [12] KIM Nam Chol, KO Myong Chol, CHOE Chong-Il. Scattering of a single plasmon by two-level and V-type three-level quantum dot systems coupled to 1D waveguide[J]. Plasmonics, 2015,10:1447-1452.
 - [13] KIM Nam Chol, LI Jianbo, YANG Zhongjian, et al. Switching of a single propagating plasmon by two quantum dots system[J]. Applied Physics Letters, 2010,97(6):061110.
 - [14] KIM Nam Chol, KO Myong Chol, Wang Ququan. Single plasmon switching with n quantum dots system coupled to one-dimensional waveguide[J]. Plasmonics, 2015,10(3):611-615.
 - [15] CHANG Darrick E, SÖRENSEN Anders Söndberg, DEMLER Eugene A, et al. A single-photon transistor using nanoscale surface plasmons[J]. Nature Physics, 2007,3:807-812.
 - [16] CHEN Wei, CHEN Guangyin, CHEN Yueh Nan. Controlling Fano resonance of nanowire surface plasmons[J]. Optics Letters, 2011,36(18):3602.
 - [17] CHENG Mutian, MA Xiaosan, DING Mengting, et al. Single-photon transport in one-dimensional coupled-resonator waveguide with local and nonlocal coupling to a nanocavity containing a two-level system[J]. Physical Review A, 2012,85(5):053840.
 - [18] JIN Xingri, SUN Lei, YANG Xiaodong, et al. Quantum entanglement in plasmonic waveguides with near-zero mode indices[J]. Optics Letters, 2013,38(20):4078-4081.
 - [19] KIM Nam Chol, KO Myong Chol. Switching of a single photon by two Λ -type three-level quantum dots embedded in cavities coupling to one-dimensional waveguide[J]. Plasmonics, 2015,10(3):605-610.
 - [20] CHENG Mutian, MA Xiaosan, ZHANG Jiayan, et al. Single photon transport in two waveguides chirally coupled by a quantum emitter[J]. Optics Express, 2016,24(17):19988-19993.
 - [21] WU Nan, ZHANG Cong, JIN Xingri, et al. Unidirectional reflectionless phenomena in a non-Hermitian quantum system of quantum dots coupled to a plasmonic waveguide[J]. Optics Express, 2018,26(4):3839-3849.
 - [22] SHEN Jung Tsung, FAN Shanhui. Coherent photon transport from spontaneous emission in one-dimensional waveguides[J]. Optics Letters, 2005,30(15):2001-2003.
 - [23] SHEN Jung Tsung, FAN Shanhui. Theory of single-photon transport in a single-mode waveguide. I. Coupling to a cavity containing a two-level atom[J]. Physical Review A, 2009,79(2):023837.