

文章编号: 1004-4353(2020)01-0032-05

量子点-表面等离子波导耦合系统中的 双带单向无反射现象

邹鑫宇, 张英俏*

(延边大学 理学院, 吉林 延吉 133002)

摘要: 研究了由两个 V 型三能级量子点与表面等离子波导耦合构成的非厄米量子系统中的单向无反射现象. 研究表明, 通过适当地调节两个量子点的共振波长和量子点与等离子波导之间的耦合强度, 在系统的异常点处可获得双带单向无反射, 且其双带单向低反射可在较宽的波长范围内实现.

关键词: 表面等离子激元; 单向无反射; 量子点

中图分类号: O431

文献标志码: A

Dual-band unidirectional reflectionlessness phenomenon in quantum dots-surface plasmonic waveguide coupling system

ZOU Xinyu, ZHANG Yingqiao*

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

Abstract: We investigate the unidirectional reflectionlessness phenomenon in a non-Hermitian quantum system, which consists of two V-type three-level quantum dots coupled to a surface plasmonic waveguide. The research shows that dual-band unidirectional reflectionlessness can be obtained at exceptional points by appropriately adjusting the resonance wavelengths of two quantum dots and coupling strengths between the quantum dots and plasmonic waveguide. And the dual-band low unidirectional reflection can be realized in the wide range of wavelength.

Keywords: surface plasmonic; unidirectional reflectionlessness; quantum dot

0 引言

表面等离子激元是光与金属表面自由振动的电子相互作用而产生的沿着金属表面传播的一种电磁波模式, 由于其能够突破衍射极限, 在纳米尺度内可操纵光且易集成, 因此常代替光子作为信息的载体^[1]. 近年来, 许多学者对发射器与波导耦合系统中单方向入射的表面等离子激元的特性进行了研究. 例如: 2007 年, Chang 等^[2]研究了纳米线中的单个表面等离子激元与 1 个二能级发射器构成的耦合系统中表面等离子激元的传输特性. 2011 年, Chen 等^[3]研究了金属纳米线中表面等离子激元与 2 个量子点耦合系统中表面等离子激元的散射性质, 并通过求解本征值方程得到了该表面等离子激元的透射率和反射率. 2012 年, Cheng 等^[4]在一维波导与 2 个半导体量子点耦合的非厄米系统中实现了 Fano 型透射, 该成果可应用于研究生物传感器. 2013 年, Jin 等^[5]研究了折射率接近于零的表面等离子波导中两个量子点之间的量子纠缠和散射特性. 2015 年, Kim 等^[6]分别研究了 3 个不等间距的二能级量子点与

收稿日期: 2019-12-04

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20180101342JC)

* 通信作者: 张英俏(1978—), 女, 副教授, 研究方向为量子信息学.

一维波导耦合的系统,以及 1 个二能级量子点和 1 个 V 型三能级量子点与一维波导耦合系统的散射性质,发现只要二能级量子点和 V 型三能级量子点的间距与 3 个二能级量子点的间距相等,就能得到完全相同的表面等离子激元的透射光谱. 同年, Kim 等^[7]还研究了一维波导与 2 个 Λ 型三能级量子点相互作用的系统表面等离子激元的散射特性,通过控制经典驱动场并调节量子点与腔之间的耦合强度实现了单光子开关. 目前,对于双方向入射的表面等离子波的传输研究相对较少. 例如: 2018 年, Wu 等^[8]在多个量子点与表面等离子激元耦合的波导系统中研究了单带和双带单向无反射; 2019 年, Qiu 等分别研究了 2 个损耗等离子激元腔^[9]、1 个增益和 1 个损耗等离子激元腔^[10]耦合于等离子波导系统的单带和双带单向无反射现象. 基于以上研究,本文提出一个在 2 个 V 型三能级量子点与表面等离子波导耦合的非厄米系统中获得表面等离子激元的双带单向无反射方案.

1 模型与计算

2 个 V 型三能级量子点与表面等离子波导耦合的非厄米系统如图 1 所示.

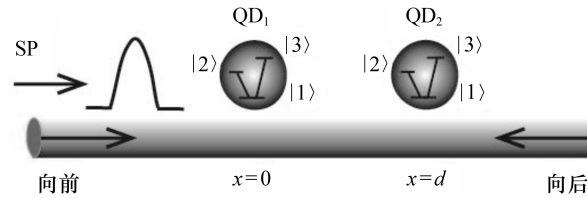


图 1 2 个 V 型三能级量子点与表面等离子波导耦合系统的示意图

该系统的哈密顿($\hbar=1$)可以表示为

$$\begin{aligned}
 H = & \int dx \{ -iv_g c_R^+(x) \frac{\partial}{\partial x} c_R(x) + iv_g c_L^+(x) \frac{\partial}{\partial x} c_L(x) \} + \\
 & g_1 \delta(x) [c_R^+(x) + c_L^+(x)] \sigma_{12}^1 + g_1 \delta(x) [c_R(x) + c_L(x)] \sigma_{21}^1 + \\
 & g_2 \delta(x) [c_R^+(x) + c_L^+(x)] \sigma_{13}^1 + g_2 \delta(x) [c_R(x) + c_L(x)] \sigma_{31}^1 + \\
 & g_3 \delta(x-d) [c_R^+(x) + c_L^+(x)] \sigma_{12}^2 + g_3 \delta(x-d) [c_R(x) + c_L(x)] \sigma_{21}^2 + \\
 & g_4 \delta(x-d) [c_R^+(x) + c_L^+(x)] \sigma_{13}^2 + g_4 \delta(x-d) [c_R(x) + c_L(x)] \sigma_{31}^2 + \\
 & (\omega_2^1 - \frac{i\Gamma_1}{2}) \sigma_{22}^1 + (\omega_3^1 - \frac{i\Gamma_2}{2}) \sigma_{33}^1 + (\omega_2^2 - \frac{i\Gamma_3}{2}) \sigma_{22}^2 + (\omega_3^2 - \frac{i\Gamma_4}{2}) \sigma_{33}^2.
 \end{aligned} \quad (1)$$

其中: $c_R^+(x)$ ($c_R(x)$) 和 $c_L^+(x)$ ($c_L(x)$) 分别表示向前和向后传播的表面等离子激元在 x 处的产生(湮灭)算符; v_g 表示表面等离子激元在等离子波导中的群速度; g_1 和 g_2 是量子点 1 与等离子波导之间的耦合强度; g_3 和 g_4 是量子点 2 与等离子波导之间的耦合强度; $\sigma_{21}^1, \sigma_{31}^1 (\sigma_{12}^1, \sigma_{13}^1)$ 是量子点 1 的上升(下降)算符; ω_2^1 和 ω_3^1 分别是量子点 1 在能级 $|1\rangle \rightarrow |2\rangle$ 和 $|1\rangle \rightarrow |3\rangle$ 间的跃迁频率; $\sigma_{21}^2, \sigma_{31}^2 (\sigma_{12}^2, \sigma_{13}^2)$ 是量子点 2 的上升(下降)算符; ω_2^2 和 ω_3^2 分别是量子点 2 在能级 $|1\rangle \rightarrow |2\rangle$ 和 $|1\rangle \rightarrow |3\rangle$ 间的跃迁频率; $\Gamma_j (j=1, 2, 3, 4)$ 是 2 个量子点的衰减率. 假定能量为 $E_k = v_g k$ (k 是波矢)的表面等离子激元沿向前或向后方向入射, 此时非厄米系统的本征态可写成如下形式:

$$\begin{aligned}
 |E_k\rangle = & \int dx [\phi_{k,R}(x) c_R^+(x) + \phi_{k,L}(x) c_L^+(x)] |0, 1, 1\rangle + \\
 & e_1 |0, 2, 1\rangle + e_2 |0, 3, 1\rangle + e_3 |0, 1, 2\rangle + e_4 |0, 1, 3\rangle.
 \end{aligned} \quad (2)$$

其中: $|0, 1, 1\rangle$ 表示波导中没有表面等离子激元且 2 个量子点处于基态; e_1, e_2 和 e_3, e_4 分别表示量子点 1 和量子点 2 吸收 1 个表面等离子激元后跃迁到激发态的概率振幅. 当单个表面等离子激元沿向前或向后方向入射时, 散射振幅 $\phi_{k,R}(x)$ 和 $\phi_{k,L}(x)$ ^[11-12] 可以分别表示为:

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

其中: t 和 r 分别表示表面等离子激元的透射和反射系数; $\theta(x)$ 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. 求解本征值方程 $H|E_k\rangle = E_k|E_k\rangle$ 可分别得到透射系数和向前方向、向后方向的反射系数:

$$\begin{aligned}t_f = t_b &= \frac{MP}{M[4\eta_4(\Gamma_3 - 2i\delta_3) + MP + 4\eta_3(\Gamma_4 - 2i\delta_4)] + 4Q\eta_2(\Gamma_1 - 2i\delta_1) + 4Q\eta_1(\Gamma_2 - 2i\delta_2)}, \\ r_f &= \frac{-4M[e^{2i\theta}\eta_4(\Gamma_3 - 2i\delta_3) - e^{2i\theta}\eta_3(\Gamma_4 - 2i\delta_4)] - 4Q[e^{2i\theta}\eta_2(\Gamma_1 - 2i\delta_1) - \eta_1(\Gamma_2 - 2i\delta_2)]}{M[4\eta_4(\Gamma_3 - 2i\delta_3) + MP + 4\eta_3(\Gamma_4 - 2i\delta_4)] + 4Q\eta_2(\Gamma_1 - 2i\delta_1) + 4Q\eta_1(\Gamma_2 - 2i\delta_2)}, \\ r_b &= \frac{-4M[\eta_4(\Gamma_3 - 2i\delta_3) + \eta_3(\Gamma_4 - 2i\delta_4)] - 4Q[-\eta_2(\Gamma_1 - 2i\delta_1) + \eta_1(\Gamma_2 - 2i\delta_2)]}{M[4\eta_4(\Gamma_3 - 2i\delta_3) + MP + 4\eta_3(\Gamma_4 - 2i\delta_4)] + 4Q\eta_2(\Gamma_1 - 2i\delta_1) + 4Q\eta_1(\Gamma_2 - 2i\delta_2)}.\end{aligned}\quad (4)$$

其中: $M = (\Gamma_1 - 2i\delta_1)(\Gamma_2 - 2i\delta_2)$, $P = (\Gamma_3 - 2i\delta_3)(\Gamma_4 - 2i\delta_4)$, $Q = (\Gamma_3 - 2i\delta_3)[-4\eta_4(-1 + e^{2i\theta}) \times (\Gamma_4 - 2i\delta_4)] - 4\eta_3(-1 + e^{2i\theta})(\Gamma_4 - 2i\delta_4)$, $\eta_j = g_j^2/v_g$ ($j=1,2,3,4$), $\theta = kd$, δ_1, δ_2 和 δ_3, δ_4 分别是量子点 1 和量子点 2 能级跃迁与表面等离子激元之间的失谐量. 基于方程(4) 可以分别获得系统的透射率 ($T = |t|^2$)、向前方向的反射率 ($R_f = |r_f|^2$) 和向后方向的反射率 ($R_b = |r_b|^2$).

2 分析与讨论

图 2 为相位 $\theta = 0.954\pi$ 时, 透射率和反射率随波长变化的关系. 图 2 中的实线、虚线和点线分别对应于透射率、向前方向和向后方向的反射率.

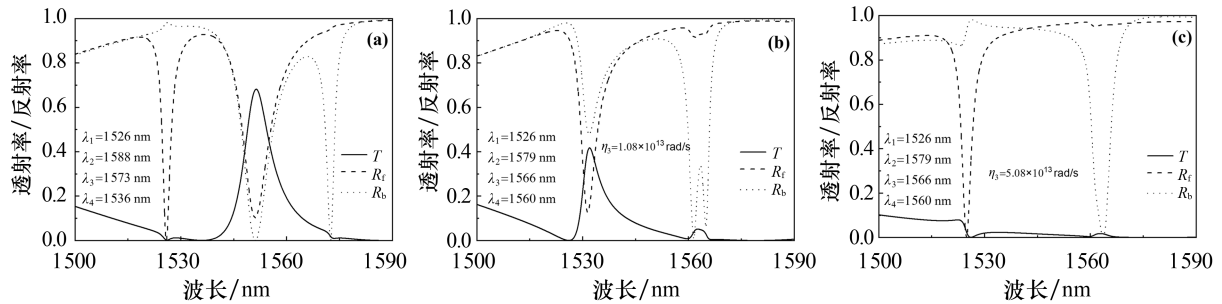


图 2 $\theta = 0.954\pi$ 时, 透射率和反射率随波长的变化

图 2(a) 为 2 个量子点的共振波长分别为 1526 nm(λ_1)、1588 nm(λ_2)、1573 nm(λ_3)、1536 nm(λ_4) 的光谱图, 其中量子点与表面等离子波导之间的耦合强度分别为 $\eta_1 = 1.15 \times 10^{13}$ rad/s, $\eta_2 = 2.5 \times 10^{13}$ rad/s 和 $\eta_3 = 1.08 \times 10^{13}$ rad/s, $\eta_4 = 1.2 \times 10^{13}$ rad/s. 由图 2(a) 可以看出, 在波长 1526、1551、1573 nm 处, 其向前方向的反射率达到 0、0.11、0.94, 向后方向的反射率达到 0.97、0、0, 即在波长 1526、1551 nm 和 1573 nm 处出现了三带单向无反射现象.

图 2(b) 为共振波长分别为 1526 nm(λ_1)、1579 nm(λ_2)、1566 nm(λ_3)、1560 nm(λ_4) 时的光谱图(其他参数不变), 其中量子点与表面等离子波导之间的耦合强度分别为 $\eta_1 = 1.15 \times 10^{13}$ rad/s, $\eta_2 = 2.5 \times 10^{13}$ rad/s 和 $\eta_3 = 1.08 \times 10^{13}$ rad/s, $\eta_4 = 1.2 \times 10^{13}$ rad/s. 由图 2(b) 可以看出, 低频处向后方向反射的 2 个光谱谷间距变小.

图 2(c) 为 $\eta_3 = 5.8 \times 10^{13}$ rad/s 时的光谱图(η_1, η_2, η_4 不变). 由图 2(c) 可以看出, 低频处向后方向的 2 个低反射谷合并在一起且波带变宽, 表明此时出现了单向无反射现象. 在波长 1526 nm (1563 nm) 处, 光谱向前(向后)方向的反射率达到 0(0); 在波长 1526 nm (1563 nm) 处, 光谱向后(向前)方向的反射率达到 0.88(0.95). 这表明当相位 $\theta = 0.954\pi$ 时, 在 1526 nm 处系统出现了窄波段单向无反射现象, 在

1563 nm 处系统出现了宽波段单向无反射现象.

下面利用非厄米系统的散射矩阵进一步分析系统的物理特性. 由方程(4) 可得非厄米系统的散射矩阵为 $\mathbf{S} = \begin{pmatrix} t & r_f \\ r_b & t \end{pmatrix}$, 该散射矩阵的本征值可以表示为 $\lambda_{\pm} = t \pm \sqrt{r_f \cdot r_b}$. 当 $\sqrt{r_f \cdot r_b} = 0$ 时, 两个本征值合并并出现异常点, 这表明当 $r_f = 0$ 或 $r_b = 0$ 时系统出现单向无反射现象.

图 3 为相位 $\theta = 0.954\pi$ 时散射矩阵 \mathbf{S} 的本征值 λ_{\pm} 的实部和虚部随波长的变化曲线. 图中的实线和虚线分别对应于本征值 λ_+ 和 λ_- . 由图 3 可以看出, 2 个实部与 2 个虚部合并并分别交叉于波长 1526 nm 和 1563 nm 处. 由此可知, 当相位 $\theta = 0.954\pi$ 时, 系统在 2 个异常点处出现了双带单向无反射现象.

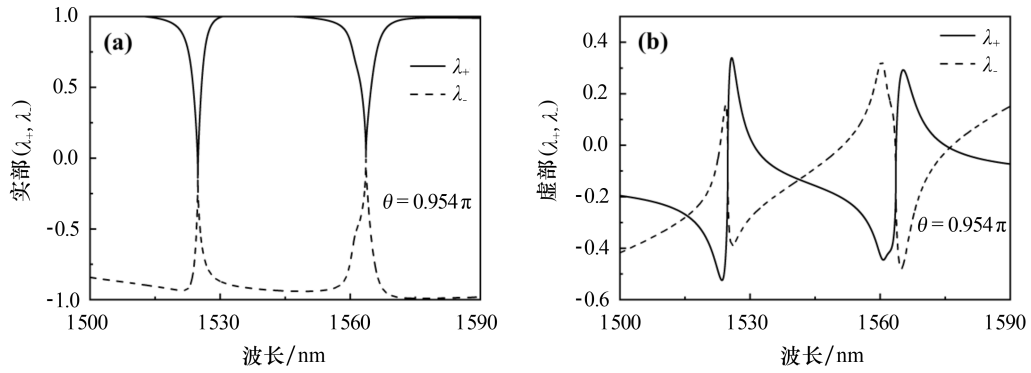


图 3 $\theta = 0.954\pi$ 时, 本征值(实部和虚部) 随波长的变化

图 4 为向前和向后方向的反射随相位和波长的变化情况. 图 4 中 2 个量子点的共振波长分别为 $\lambda_1 = 1526$ nm, $\lambda_2 = 1579$ nm 和 $\lambda_3 = 1566$ nm, $\lambda_4 = 1560$ nm, 量子点与表面等离子波导之间的耦合强度分别为 $\eta_1 = 1.15 \times 10^{13}$ rad/s, $\eta_2 = 2.5 \times 10^{13}$ rad/s 和 $\eta_3 = 5.08 \times 10^{13}$ rad/s, $\eta_4 = 1.2 \times 10^{13}$ rad/s, 量子点的衰减率分别为 $\Gamma_1 = 0.043\eta_1$, $\Gamma_2 = 0.011\eta_2$ 和 $\Gamma_3 = 0.125\eta_3$, $\Gamma_4 = 0.15\eta_4$. 由图 4(a) 可以看出, 向前方向反射的低反射区域出现在 1521 ~ 1529 nm 波长范围内, 此范围对应于图 4(b) 中的高反射区域. 由图 4(b) 可以看出, 向后方向反射的低反射区域出现在 1530 ~ 1537 nm 和 1560 ~ 1571 nm 波长范围内, 该范围对应于图 4(a) 中的高反射区域. 由此可知, 该双带单向无反射现象能够在较宽的波长范围内出现.

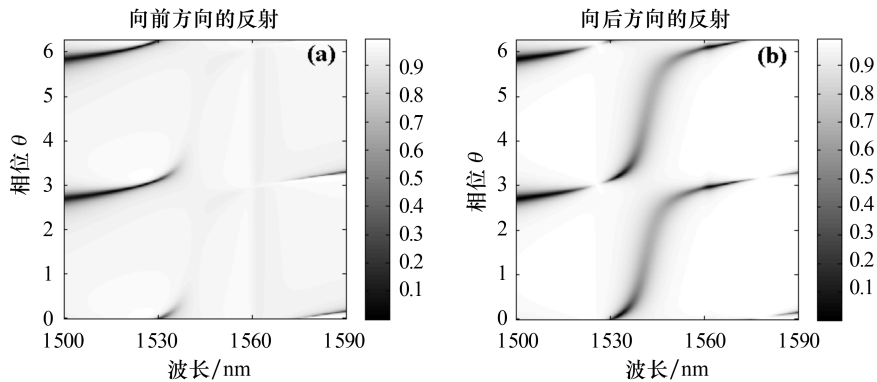


图 4 向前和向后方向的反射随相位和入射波长的变化

3 结论

在 2 个 V 型三能级量子点与表面等离子波导耦合的系统中, 本文通过适当地调节 2 个量子点的共振波长、量子点和表面等离子波导之间的耦合强度, 在系统的异常点(1526 nm 和 1563 nm)处实现了双

带单向无反射. 研究表明:在波长 1 526 nm 处,向前(向后)方向的反射达到 0(0.88);在波长 1 563 nm 处,向前(向后)方向的反射达到 0.95(0);当量子点共振波长取适当的值时,增大量子点的部分能级与等离子波导之间的耦合强度,可使表面等离子激元向后方向的低频反射光谱变宽. 以上结果可为研究外加经典场条件下的量子点-表面等离子波导耦合系统的等离子激元的传输性质拓宽思路,同时还可为双带滤波器、传感器、等离子开关等量子器件的研究提供理论参考.

参考文献:

- [1] BARNES W L, DEREUX A, EBBESEN T W. Surface plasmon subwavelength optics[J]. *Nature*, 2003, 424(6950):824-830.
- [2] CHANG D E, SÖRENSEN A S, DEMLER E A, et al. A single-photon transistor using nanoscale surface plasmons[J]. *Nature Physics*, 2007, 3:807-812.
- [3] CHEN W, CHEN G Y, CHEN Y N. Controlling Fano resonance of nanowire surface plasmons[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(18):3602-3604.
- [4] CHENG M T, SONG Y Y. Fano resonance analysis in a pair of semiconductor quantum dots coupling to a metal nanowire[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(5):978-980.
- [5] JIN X R, SUN L, YANG X D, et al. Quantum entanglement in plasmonic waveguides with near-zero mode indices[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(20):4078-4081.
- [6] KIM N C, KO M C, CHOE C I. 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.
- [7] KIM N C, KO M C. 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.
- [8] WU N, ZHANG C, JIN X R, 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.
- [9] QIU D X, BAI R P, ZHANG C, et al. Unidirectional reflectionlessness in a non-Hermitian quantum system of surface plasmon coupled to two plasmonic cavities[J]. *Quantum Information Process*, 2019, 18(1):28.
- [10] QIU D X, ZOU X Y, LIU Y M, et al. Dual-band unidirectional reflectionlessness in non-Hermitian quantum system consisting of a gain and a loss plasmonic cavities[J]. *Quantum Information Process*, 2019, 18(9):269.
- [11] SHEN J T, FAN S H. Coherent photon transport from spontaneous emission in one-dimensional waveguides[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(15):2001-2003.
- [12] SHEN J T, FAN S H. 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.