

微纳光子结构中光子和激子相互作用

段雪珂 任娟娟 郝赫 张淇 龚旗煌 古英

Interactions between photons and excitons in micro-nano photonic structures

Duan Xue-Ke Ren Juan-Juan Hao He Zhang Qi Gong Qi-Huang Gu Ying

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 144201 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20190269

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190269>

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

利用石墨烯等离激元与表面声子耦合增强量子摩擦

Enhancement of quantum friction via coupling of surface phonon polariton and graphene plasmons

物理学报. 2016, 65(23): 236801 <https://doi.org/10.7498/aps.65.236801>

非对称光束干涉制备二维微纳光子结构研究

Fabrication of two-dimensional micro-nano photonic structures by symmetry-lost beams interference

物理学报. 2017, 66(21): 217801 <https://doi.org/10.7498/aps.66.217801>

介电常数近零模式与表面等离激元模式耦合实现宽带光吸收

Broadband absorption caused by coupling of epsilon-near-zero mode with plasmon mode

物理学报. 2018, 67(20): 207301 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181106>

阿基米德螺旋微纳结构中的表面等离激元聚焦

Focusing surface plasmon polaritons in archimedes' spiral nanostructure

物理学报. 2015, 64(19): 194201 <https://doi.org/10.7498/aps.64.194201>

金纳米柱阵列表面等离激元与J-聚集分子强耦合作用

Strong coupling between J-aggregates and surface plasmon polaritons in gold nanodisks arrays

物理学报. 2016, 65(23): 231101 <https://doi.org/10.7498/aps.65.231101>

表面等离激元量子信息应用研究进展

Recent progress of the application of surface plasmon polariton in quantum information processing

物理学报. 2017, 66(14): 144202 <https://doi.org/10.7498/aps.66.144202>

专题： 等离激元增强光与物质相互作用

微纳光子结构中光子和激子相互作用*

段雪珂¹⁾ 任娟娟¹⁾ 郝赫¹⁾ 张淇¹⁾ 龚旗煌¹⁾²⁾³⁾⁴⁾ 古英^{1)2)3)4)†}

1) (北京大学物理学院, 人工微结构和介观物理国家重点实验室, 北京 100871)

2) (北京大学, 教育部纳光电子前沿中心&量子物质科学协同创新中心, 北京 100871)

3) (山西大学, 极端光学协同创新中心, 太原 030006)

4) (北京量子信息科学研究院, 北京 100193)

(2019年2月27日收到; 2019年4月11日收到修改稿)

微纳光子结构中超强的光场局域给光和物质相互作用带来了新的研究机遇. 通过设计光学模式, 微纳结构中的光子和激子可以实现可逆或者不可逆的能量交换作用. 本文综述了我们近年来在微纳结构, 尤其是表面等离激元及其复合结构中光子和激子在强弱耦合区域的系列研究工作, 如高效可调谐及方向性的单光子发射, 利用电磁真空构造增强光子和激子的耦合等. 这些工作为微纳尺度上光和物质作用提供了新的物理内容, 在芯片上量子信息过程及可扩展的量子网络构建中有潜在应用.

关键词: 表面等离激元, 腔量子电动力学, 强耦合, 弱耦合

PACS: 42.50.Pq, 73.20.Mf, 32.70.Cs

DOI: 10.7498/aps.68.20190269

1 引言

随着微纳加工技术的发展, 人们制备出多种微纳光子结构 (如光子晶体、微纳金属结构、微纳光纤、超材料超表面等) 和低维光子材料 (石墨烯、二硫化钼和黑磷等), 并进行了深入研究. 由于具有光限制能力强的特点, 微纳光子结构中新的物理效应层出不穷, 并且广泛用于表面增强拉曼散射^[1-4]、非线性光学^[5] 和光电集成^[6] 等多个领域. 由于超小的模式体积, 微纳结构的光学模式在腔量子电动力学、量子信息以及光和物质相互作用方面, 也有着很大优势^[7,8]. 2011年, Benson^[9] 的综述文献中明确指出微纳光子结构和量子体系的结合能够带来比单种结构更多的优势, 如自发辐射抑制或增强、光子和激子强耦合、量子非线性效应等, 对于

微纳光芯片的量子光源和量子逻辑操控有重要的研究意义.

本文首先总结微纳结构中光子和激子相互作用的原理及其发展现状, 然后综述我们近年来在微纳结构, 尤其是表面等离激元及其复合结构中光子和激子在强弱耦合区域的系列研究工作, 如高效可调谐及方向性的单光子发射, 利用电磁真空构造增强光子和激子的耦合等. 这些工作为微纳尺度上光和物质作用提供了新的物理内容, 可用于指导芯片上量子信息过程及可扩展的量子网络构建.

2 微纳结构中光子和激子相互作用原理及现状

2.1 腔量子电动力学基本原理

腔量子电动力学 (cavity quantum electro-

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2018YFB1107200)、国家自然科学基金 (批准号: 11525414, 11734001) 和广东省重点领域研发计划 (批准号: 2018B030329001) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: ygu@pku.edu.cn

dynamics, CQED), 研究的是在受限空间中量子化光场和量子体系之间的相互作用^[10–18]. 这种相互作用可以由 Jaynes-Cummings 模型描述^[19]. 在单模光学腔中放置二能级量子体系, 采用偶极近似和旋波近似后, 哈密顿量可以表示为

$$H = \hbar\omega_a\sigma^\dagger\sigma + \hbar\omega_c a^\dagger a + \hbar g (a^\dagger\sigma + a\sigma^\dagger), \quad (1)$$

第一项是二能级量子体系的哈密顿量, 其中 ω_a 表示量子体系的跃迁频率, $\sigma = |g\rangle\langle e|$, $\sigma^\dagger = |e\rangle\langle g|$ 分别是量子体系的升降算符, $|g\rangle$ 和 $|e\rangle$ 表示量子体系的基态和激发态; 第二项是腔模的哈密顿量, 其中 ω_c 表示腔模的频率, a^\dagger 和 a 分别为腔中光子产生与湮灭算符, 且满足对易关系 $[a, a^\dagger] = 1$; 第三项是它们的相互作用哈密顿量, g 代表了两者之间的耦合强度. 考虑腔模和量子体系的损耗后, 实际体系的动力学演化过程可以用下面的主方程表示:

$$\begin{aligned} \dot{\rho} = & -\frac{i}{\hbar} [H, \rho] - \frac{\gamma}{2} (\sigma^\dagger\sigma\rho - \sigma\rho\sigma^\dagger + \text{H.c.}) \\ & - \frac{\kappa}{2} (a^\dagger a\rho - a\rho a^\dagger + \text{H.c.}), \end{aligned} \quad (2)$$

其中 κ 为腔模的衰减速率, γ 为量子体系的自发辐射衰减速率. g , κ , γ (如图 1(a) 所示) 这三个参数是腔量子电动力学中最重要的物理量, 根据三者之间的相对大小, 可以将腔与量子体系之间的耦合划分为两个区域: 弱耦合区域和强耦合区域.

当 $g \ll (\kappa, \gamma)$ 时, 量子体系与腔之间的耦合为弱耦合. 此时量子体系的自发辐射是不可逆转的 (如图 1(b) 中的红线所示), 由于腔模改变了量子体系周围的电磁环境, 自发辐射将会受到抑制或者增强, 如图 1(c) 所示. 正如 Purcell^[20] 在 1946 年指出, 如果将量子体系放入谐振腔中, 量子体系的自发辐射速率将会被改变, 也就是 Purcell 效应. 由 Weisskopf-Wigner 近似可得, 真空中的自发辐射速率为

$$\gamma_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{4\omega_a^3 \mu^2}{3\hbar c^3}. \quad (3)$$

而经过与腔模的相互作用以后, 量子体系的自发辐射速率变为 γ_1 , 两者的比值为

$$F = \frac{\gamma_1}{\gamma_0} = \frac{3}{4\pi^2} \left(\frac{\lambda}{n}\right)^3 \frac{Q}{V}, \quad (4)$$

这个比值被称为 Purcell 系数^[20], 它正比于腔的品质因子 Q , 反比于腔模的模式体积 V . 通过使用模式体积小、品质因子高的谐振腔, 可以得到大的

Purcell 系数. 这一点被广泛用于单光子源的制备^[21] 和分子荧光增强中^[22–24].

反之当 $g \gg (\kappa, \gamma)$, 即腔模与量子体系之间的耦合远大于各自的损耗时, 二者之间的相互作用达到强耦合区域. 此时量子体系和腔模之间周期性地交换能量^[7,25] (如图 1(d) 所示), 表现为腔模的透射和原子的自发辐射谱线均出现了宽度为 $2g$ 的拉比劈裂^[16] (如图 1(b) 中的蓝线所示), 还可以进一步地观察到能级反交叉现象^[26]. 通常情况下, 光学微腔中量子体系的自发辐射速率很小, γ 可以忽略不计. 由于 $\kappa \propto 1/Q$, 所以可以通过增加腔的品质因子 Q 来减小腔模的损耗. 而对于耦合系数 g , 在谐振腔中的解析表达式^[27] 为

$$g = \mu \sqrt{\frac{\omega_c}{2\hbar\epsilon V}}, \quad (5)$$

其中 μ 是量子体系的偶极矩, ϵ 代表环境的介电常数, V 是腔模的模式体积. 根据 (5) 式, 一般可采用两种方法来增强 g : 一种是增大量子体系的偶极矩, 如选用量子点、里德伯原子或者大分子等, 或者增加参与相互作用的量子体系个数 n , 这时等效偶极矩 $\mu_{\text{eff}} = \sqrt{n}\mu$; 另一种是减小腔模的模式体积 V .

2.2 微纳结构中光子和激子相互作用发展现状

传统的 Fabry-Perot 腔尺寸通常比较大, 无法满足集成和可扩展光路的需求. 近年来, 光学模式体积小光子晶体微腔、回音壁微腔、表面等离子体微腔等, 在增强光和物质的相互作用方面有着更广泛的应用. 在弱耦合区域, 量子体系周围的电磁模式密度受到微纳结构光学模式的调制, 从而改变了量子体系的自发辐射速率. 为获得大的自发辐射速率的改变, 研究者们提出了各种各样的微纳结构. 光子晶体^[28] 可以有效地增强量子体系的辐射速率^[29], 适当设计的纳米腔可以提高量子体系与某些特定模式的耦合效率^[30]. 在纳米尺度具有优异传导特性的介质纳米光纤也被用作控制辐射速率, 并得到高的光子提取效率^[31–34]. 然而, 在亚波长介质结构中能够得到的最大的辐射效率增强也才几十倍. 由于具有极强的光场局域和突破衍射极限的能力, 表面等离子体微腔在弱耦合领域的应用更加广泛^[35–39]. Pelton^[40] 详细地阐述了金属颗粒产生的局域表面等离子体对放置在周围的量子体系自发辐射速率的影响. 在复合的表面等离子体结

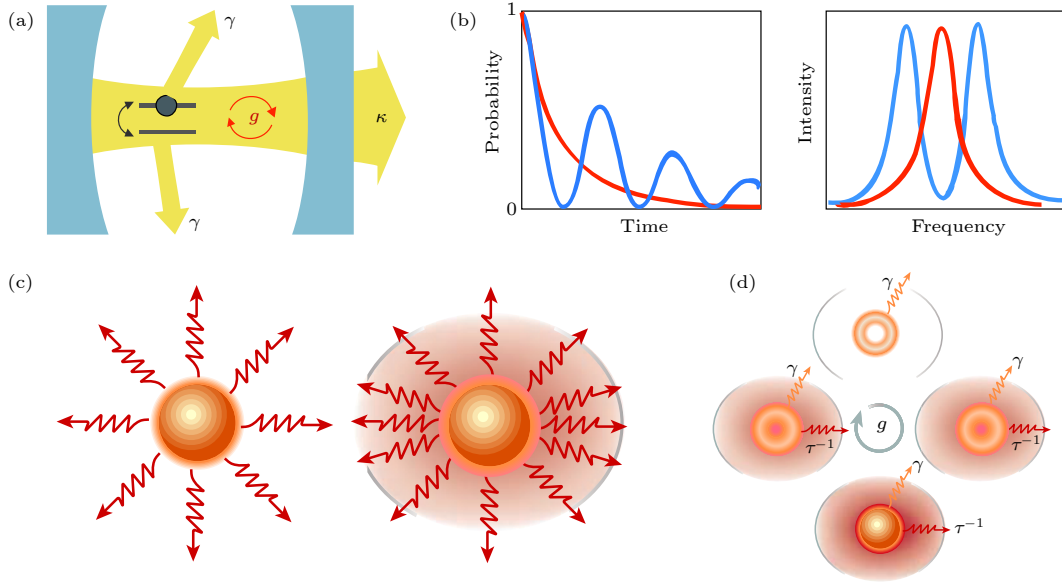


图 1 (a) 腔量子电动力学体系, κ 为腔模的损耗, γ 为量子体系的自发辐射速率^[9], g 代表它们的耦合强度; (b) 弱耦合 (红线) 和强耦合 (蓝线) 情况下的能量交换及透射谱^[9]; (c) 弱耦合下的自发辐射增强示意图^[7]; (d) 强耦合下的周期性能量交换示意图^[7]

Fig. 1. (a) The cavity quantum electrodynamics system, κ is the damping rate of the cavity, γ is the spontaneous emission rate of the quantum system, and g is the coupling constant between the quantum system and the cavity mode^[9]; (b) the progress of the energy exchange and the transmission spectrum of the cavity for the weak coupling (red) and strong coupling (blue) regimes^[9]; (c) the enhancement of spontaneous emission for the weak coupling regime^[7]; (d) the periodic energy exchange for the strong coupling regime^[7].

构中, 比如金纳米颗粒二聚体结构^[41]、纳米颗粒与金属薄膜^[42,43], 间隙表面等离激元^[44,45]拥有更局域的场分布, 在近几年被广泛应用于自发辐射的调控中. 进一步地, 金属中自由电子沿某一个方向的集体振荡场产生空间中各向异性的电磁场模式分布^[35,38,39,46], 通过精心设计表面等离激元微纳结构, 能够在量子体系周围形成各向异性的 Purcell 系数环境^[19,20], 从而用来控制电磁诱导透明谱^[47]以及自发辐射谱线的线宽^[48]等. 另外, 表面等离激元结构带来的近场局域还被用于量子发射体发光性质的调控, 如荧光增强^[22–24]和拉曼散射增强^[1,3,4,49]等. 在调控自发辐射速率的同时, 金属纳米颗粒还可以调控发射体的辐射方向^[50,51], 因此金属纳米颗粒往往也被称为纳米天线.

在强耦合区域, 2004年, Yoshie等^[52]和 Reithmaier等^[53]分别实现了单个量子点在光子晶体微腔中的强耦合. 2005年, Peter等^[54]实现了量子点在半导体微盘腔中的强耦合. 2006年, 研究者们又在微球腔中实现了和 NV 色心的强耦合^[55,56], 以及实现了铯原子在微环芯腔中的强耦合^[57], 用于光子转换门的构造^[58]. 而对于表面等离激元结构和量子发射体之间的强耦合作用的研究一般是

从多个量子体参与耦合开始的, 这是因为多个量子体系的有效偶极矩更大, 更容易实现强耦合. 理论上, Delga等^[59]研究了在一个金属小球附近放置多个放射体的结构中的强耦合作用, González-Tudela等^[60]也探讨了金属薄膜结构和多个量子发射体进行强耦合的可能性. 实验上, Schlather等^[61]在金属二聚体形成的间隙结构中放置了多个分子, 实现了光与分子之间的强耦合并观察到了拉比劈裂现象. Zengin等^[62]将分子层放置在银三棱柱结构附近, 也是观察到了拉比劈裂的现象, 从而说明了光与物质之间的强耦合相互作用. 在芯片上量子信息的发展中, 单个量子体系和单个微纳结构的强耦合具有更重要的意义. 2013年, Tame等^[63]在以“量子表面等离激元”为题的文章中, 综述了表面等离激元的量子化、单粒子性、增强和传导单光子源的机制和强耦合的可能性等, 随后, 多个研究小组在理论和实验上演示了单个量子体系和单个微纳结构强耦合的核心特征: 荧光或散射谱上的拉比劈裂. 2016和2017年, 英国剑桥大学的 Chikkaraddy等^[64]和中山大学的 Liu等^[65], 利用具有超小模式体积的间隙表面等离激元, 实现了室温下的单分子层次上的光子和激子强耦合现象.

3 自发辐射的调控与收集

基于 Purcell 效应, 量子发射体自发辐射速率的改变可以通过改变周围电磁场的局域态密度来实现 [20]. 为了满足光学器件集成和可扩展的量子网络的需要, 可调的自发辐射和单光子的有效收集成为单光子源研究中的热点 [28–34,51,66–68]. 其中, 间隙表面等离激元结构 [41–43] 由于具有极大的光学模式密度, 在自发辐射的增强中有着广泛的应用. 为此, 我们采用间隙表面等离激元微纳结构, 结合一定的调控和收集机制, 在理论上阐述了具有高发射率、高收集率且可调的单光子发射结构 [43,69–71].

在介质结构中, 如光子晶体 [28,29] 和纳米光纤 [31–34], 量子发射体的辐射速率仅能被增强几十倍. 而在表面等离激元纳米结构 [35–39,72–74] 中, 局域表面等离激元很难收集单光子, 传播的表面等离激元结构中总的辐射速率又很低, 这些限制了它们的应用. 为了克服它们的局限, 能同时获得高效的单光子发射和收集, 研究者在理论和实验上提出了很多种复合表面等离激元微纳结构 [75–78]. 然而, 由于金属的损耗大, 利用这些结构在纳米尺度内对发射光子的收集和引导依旧是个问题. 通过将单量子点放入纳米金属棒与金属薄膜的纳米量级的间隙中并与纳米光纤结合, 我们演示了有效的单光子发射和纳米尺度上一维低损的光传导, 在实现芯片单光子源方面有着潜在的应用 [43].

具体的结构如图 2 所示, 一个半径为 20 nm, 长度为 a 的银纳米棒和一个 52 nm 厚的金纳米薄膜耦合在一起, 中间有 10 nm 的间隙, 在纳米间隙中放置了一个沿 z 轴偏振的量子发射体, 工作波长为 680 nm. 另外一个低损耗的纳米介质光纤放置在金属薄膜的上方, 通过波矢匹配将单个的表面等离激元模式转换成低损耗的光纤传播模式, 从而使传导的单光子可以直接用于片上光路. 在这种结构中, 我们发现量子发射体总的自发辐射速率可达 $5000\gamma_0$ (γ_0 是量子发射体在自由真空中的自发辐射速率), 而沿表面等离激元通道的光子衰减速率也可达 $1500\gamma_0$, 两者均是只有金属薄膜时的几十倍. 特别地, 利用波矢匹配的介质光纤将单光子导出, 在低损耗的介质波导中, 单光子发射率可以达到真空中的 290—770 倍. 这种新的原理会对芯片上的亮单光子源和纳米激光器等研究领域有重要影响.

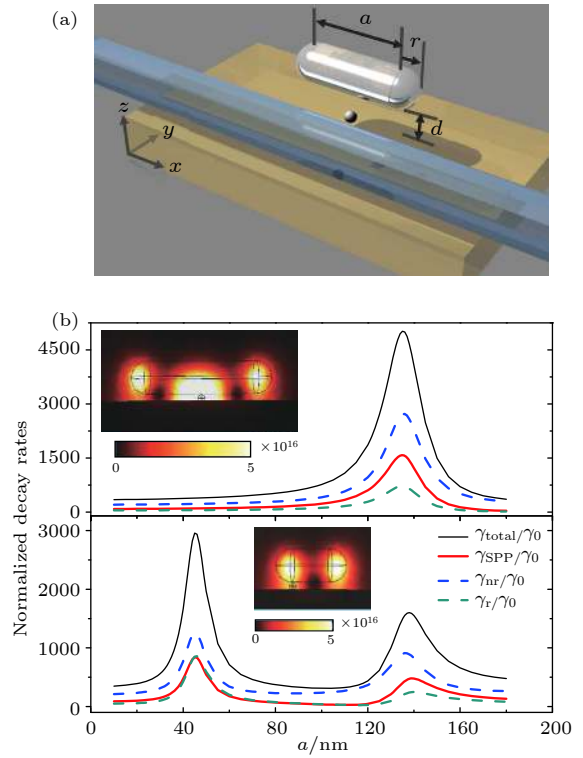


图 2 (a) 复合银纳米棒-金纳米薄膜间隙表面等离激元结构, 模式匹配的低损耗介质纳米光纤放置在薄膜上方; (b) 量子发射体在间隙结构中沿不同衰减通道的自发辐射归一化衰减速率 [43]

Fig. 2. (a) The coupled Ag nanorod-Au nanofilm gap plasmon system, with a phase-matched low loss dielectric nanofiber above the nanofilm; (b) the normalized decay rates of the quantum emitter in the gap structure into different decay channels [43].

上述结构虽然取得了很高的自发辐射增强, 但一旦制备出来, 自发辐射的速率将不可以再改变. 因此, 如何实现主动连续的调控, 是目前这一领域面临的问题之一 [79,80]. 另外, 如何克服损耗, 高效地收集量子体系发出的光子也一直是困扰人们的问题. 基于这两个问题, 我们引入了液晶这样一种折射率可以主动调控的材料, 提出了基于液晶的可调谐表面等离激元模式, 并且在液晶-金属-超材料的三明治平板结构中, 自发辐射调控倍数可达 2.5 倍, 从而实现了自发辐射的主动调控 [69]. 为了获得更大的调控幅度, 引入金属纳米棒, 提出了一种可调谐的间隙表面等离激元模式, 实现了开关比为 85 的自发辐射开关. 为了解决光子导引和收集问题, 还设计了对称的方形介质波导光纤, 使光子的收集效率超过了 40% [70].

如图 3 所示, 在液晶-金属-超材料的三明治平板结构中加入了银纳米金属棒, 形成可调谐的间隙

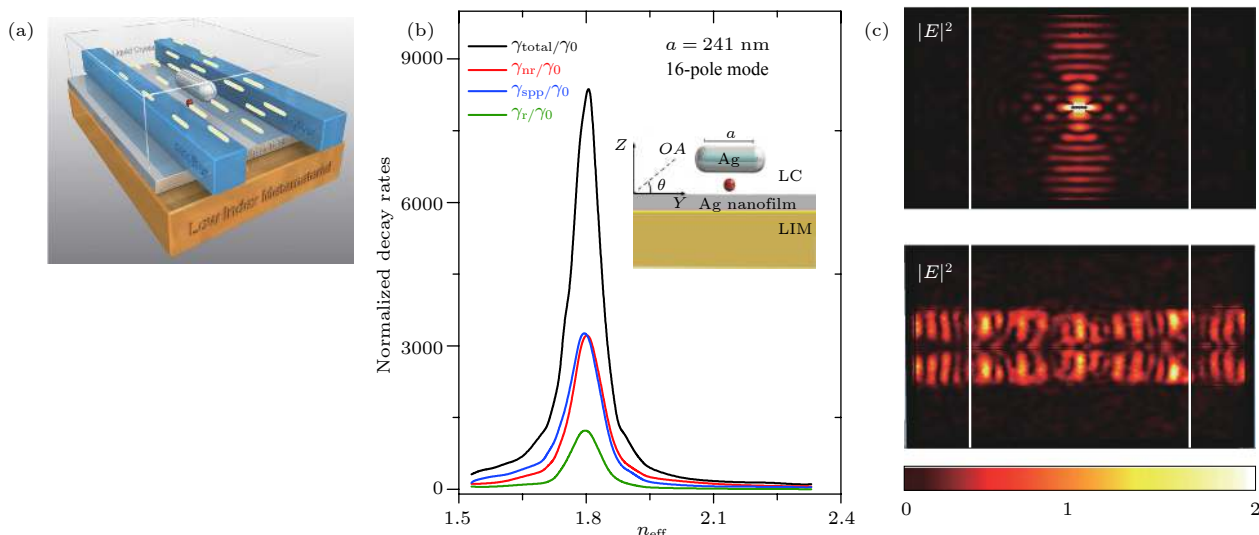


图 3 (a) 可调谐间隙表面等离激元结构; (b) 高对比度自发辐射开关, 随着折射率的变化, 自发辐射速率可以实行从 $103\gamma_0$ 到 $8750\gamma_0$ 的变化; (c) 高收集效率模拟图, 光子能量有 42% 被有效收集到光纤中^[70]

Fig. 3. (a) The hybrid tunable gap surface plasmon nanostructure; (b) the high-contrast switching of spontaneous emission, with the change of index, the spontaneous emission rate can be tuned from $103\gamma_0$ to $8750\gamma_0$; (c) the diagram of high-efficiency extracting, with 42% of the photons can be collected into the nanofibers^[70].

表面等离激元结构. 将量子点放置在间隙表面等离激元的“热点”处, 使其可以感受到很强的自发辐射增强, 此时改变液晶的折射率, 会使“热点”的电场强度发生变化, 进而影响其自发辐射的速率, 实现了自发辐射速率从 $103\gamma_0$ 到 $8750\gamma_0$ 的调控, 开关比达到了 85, 并且可以在纳秒之内, 完成 10 倍对比度的开关效应, 如图 3(b) 所示. 为了解决光子导引问题, 我们还设计了相位匹配的对称式介质光纤, 使光子收集效率达到了 42%, 模拟的收集效果如图 3(c), 可见光子在介质光纤中可以实现低损的传播. 这一设计实现了高对比度的自发辐射开关和光子导引, 为纳米激光和单光子源提供了一个可集成的平台.

在片上器件的应用中, 研究者们提出了很多种在一维尺度收集辐射光子的方法^[74,81]. 然而, 大的自发辐射增强和辐射光子的高效一维收集仍不能在同一结构中实现. 这里, 同时结合间隙表面等离激元的场局域优势和倏逝波的传播优势, 我们又提出了复合的纳米线和纳米棒结构, 在理论上演示了同时达到大的自发辐射增强和亚波长尺度的有效光子一维收集^[71]. 具体的结构如图 4(a) 所示, 长度为 a , 半径为 15 nm 的银纳米棒放置在半径为 R 的银纳米线 (或者介电常数为 8 的介质纳米线) 上, 两者之间的间隙距离为 10 nm. 沿 z 轴偏振的偶极发射体放置在纳米间隙的中间, 偶极子工作在可见

光波段 $\lambda = 780$ nm. 通过优化尺寸和材料参数, 间隙表面等离激元被激发的同时伴随着强局域的电场, 放置在其中的发射体的自发辐射可以被增强成千上万倍. 另外辐射出的光子可以被亚波长局域的倏逝模式直接收集并能通过纳米线进行传输. 如图 4(b) 所示, 在银纳米线和银纳米棒的复合系统中可以得到 14208 倍的自发辐射增强, 光子收集效率可达 39.3%, 辐射光子在纳米光纤中的传播距离大于 $25 \mu\text{m}$; 另外在介质纳米线和银纳米棒的复合系统中, 如图 3(c) 所示, 自发辐射增强可以达到 3142 倍, 且 53% 的辐射光子可以通过介质纳米线进行低损耗的传输. 当在纳米线下加上介质衬底, 或者当纳米线的横截面不是光滑的圆形时, 总的自发辐射增强和纳米线的收集效率也不会受到明显的影响. 这种结构结合了大的自发辐射增强、有效的纳米尺度收集和光子的一维传输, 对单光子源、表面等离激元激光器和片上纳米器件的发展有着重要的意义.

4 倏逝电磁真空下的强耦合与荧光收集

强耦合腔量子电动力学系统可以产生一些量子资源, 如品质很好的单光子源或者量子纠缠等, 而它们是量子信息处理的重要资源. 但是为了集成

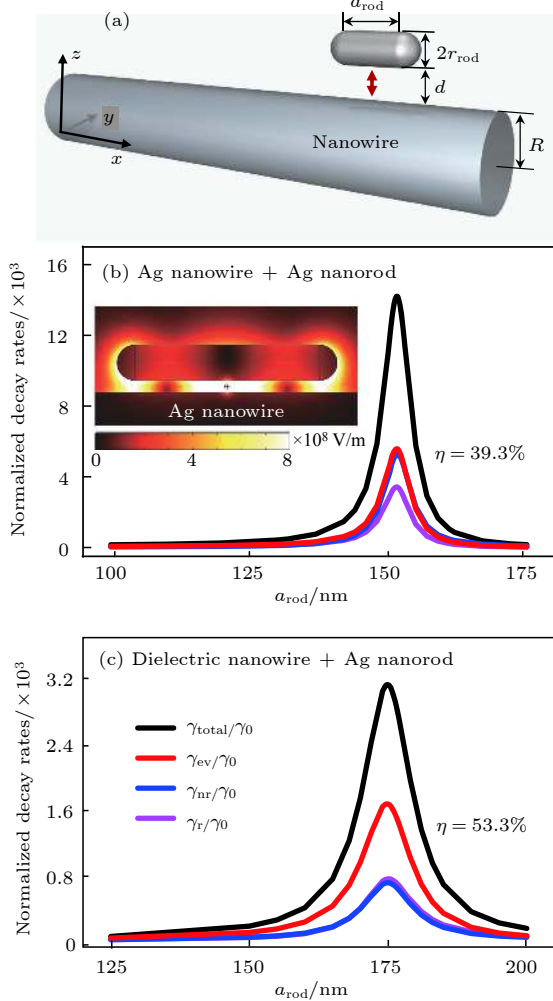


图 4 (a) 纳米棒和纳米线的复合结构; (b) 银纳米线和银纳米棒复合系统以及 (c) 介质纳米线和银纳米棒复合系统中的各个衰减通道的归一化衰减系数^[71]

Fig. 4. (a) The coupled nanorod-nanowire system. The normalized decay rates into different channels in the coupled (b) Ag nanowire-Ag nanorod system and (c) dielectric nanowire-Ag nanorod system^[71].

以及可扩展的需要, 必须发展模式体积更小的腔, 表面等离子激元微腔就是一个很好的选择. 很多小组研究了表面等离子激元结构和量子体系之间的强耦合相互作用^[82,83], 但是由于表面等离子激元的内禀损耗以及低的收集和传导效率, 真正单个表面等离子激元结构和单个原子的强耦合很少实现^[64]. 倏逝波广泛存在于各种纳米光子学结构中^[84–86], 如金属纳米线、介质纳米光纤、金属板、金属薄膜等, 其中金属纳米线和介质纳米光纤提供的是一维倏逝波, 而金属板和金属薄膜提供的是二维倏逝波. 通常这些倏逝波模式是被当做腔模来研究的^[87], 然而把它们当做强耦合的电磁背景还没有被研究过. 我们

首先提出了倏逝真空的概念, 即将倏逝波归为真空背景中电磁模式的一部分, 然后利用这种倏逝真空去增强腔模和发射体的相互作用, 并在一维或者二维倏逝波的环境中, 应用多种间隙表面等离子激元结构达到了强耦合, 同时发出的荧光可以由倏逝波模式进行高效的收集^[88–90].

首先, 我们理论上研究了一种纳米尺度上的腔量子电动力学系统, 如图 5 所示, 它包含一个量子发射体和共振的银纳米腔, 把这个系统放在由单模金属纳米线或介质纳米线提供的一维倏逝波环境中^[88]. 在这个具有多个光学模式的复合体系中, 通过精心的模式设计, 一维倏逝波作为电磁背景, 即在倏逝电磁真空中, 表面等离子激元-量子发射体之间的可逆相互作用得到增强. 量子体系和腔模之间的耦合因子可以表示为 $g_0 = \frac{\boldsymbol{\mu} \cdot \boldsymbol{E}}{\hbar}$, 其中 $\boldsymbol{\mu}$ 为量子体系的跃迁偶极矩, \boldsymbol{E} 是表面等离子激元腔体单光子激发对应的电场值. 在倏逝电磁真空的作用下纳米间隙中的电场值 \boldsymbol{E} 将大大增加. 在银纳米线提供倏逝真空时, 可得到量子发射体和银纳米腔的耦合因子是没有倏逝波环境的 4.2 倍. 与此同时, 当量子发射体的偶极矩是原子偶极矩量级时, 自发辐射谱出现了拉比劈裂. 另外自发辐射出的光子可以通过金属或者介质纳米线上的倏逝波模式进行传导和收集, 收集效率为 12%—47%; 对于非相同直径的银纳米线和介质纳米线, 虽然利用银纳米线得到的收集效率更大, 但介质纳米线中光子可以进行低损耗的传输.

进一步地, 为讨论电磁真空倏逝深度对于光子-激子相互作用的影响, 我们又将纳米尺度上腔量子电动力学系统放在由金属薄膜提供的二维倏逝真空环境中, 在理论上演示了通过改变倏逝深度来增强耦合作用^[89]. 增大介质的介电常数, 倏逝波的倏逝深度减小, 由于金属纳米微腔感受到了更大的电场倏逝, 得到的耦合系数增强越大. 同时, 通过改变金属纳米微腔的大小, 以及微腔和银薄膜之间的距离, 耦合系数增大程度进一步提高. 如果把圆柱形的金属微腔换成了锥型以及双锥型, 可以得到更大的耦合因子数值. 若将一个微纳尺度的腔量子电动力学系统看作一个量子节点, 那么在二维倏逝真空中可以放置多个这样的系统, 从而形成可扩展的量子网络.

金属微腔虽然能提供很强的场局域, 但其内在

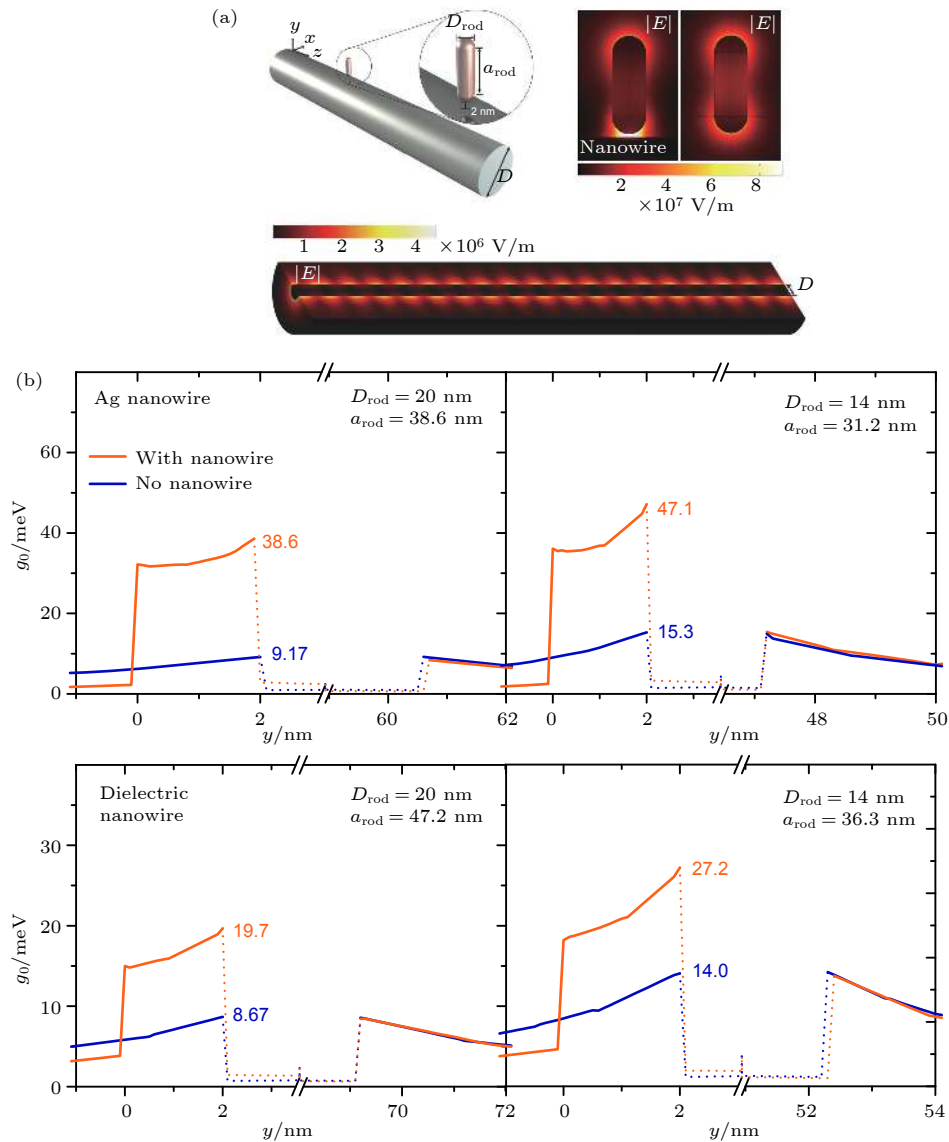

 图 5 (a) 倏逝真空中的表面等离激元纳米腔量子电动力学体系; (b) 在倏逝真空下的耦合系数 g 的增强^[88]

 Fig. 5. (a) The plasmonic nano-CQED system in evanescent-vacuum; (b) the enhancement of the coupling coefficient in evanescent-vacuum^[88].

的固有损耗却是无法解决的, 因此要实现强耦合必须要使得耦合系数 g 很大, 才能满足 $g \gg \kappa$. 而回音壁模式具有品质因子高、模式体积小等优点, 也引起了广泛的研究^[91–94]. 为此我们还设计了一种介质纳米圆环-纳米线的复合结构, 在理论上提出了在低损耗的情况下来增强光子-激子的相互作用机制^[90]. 如图 6(a) 所示, 在介质纳米圆环和介质纳米线之间有一个 5 nm 的间隙, 相较于没有纳米线的情况, 光场和原子的耦合因子 g 增强了 5 倍 (如图 6(b) 所示), 在此过程中, 腔损耗 κ 和原子自发辐射 γ 一直远远小于 g , 可以达到强耦合. 另外我们发现, 增大介质圆环的介电常数、增大介质纳米

线的介电常数以及减小间隙宽度能够提高耦合系数. 这种在低损耗纳米尺度下实现强耦合的方法能够用于后续相关研究, 如量子态操纵、量子纠缠和量子门等.

通过在亚波长尺度上进行电磁真空的构造, 我们拓展了一种新的量子平台去研究腔量子电动力学. 在这种平台下, 传统腔量子电动力学体系中的现象也可以在量子体系中得以实现, 如态操控、纠缠、可逆相互作用等. 同时在芯片集成的量子信息技术和可扩展量子网络中有着潜在的应用. 这种电磁真空的构造还可以从纳米线或薄膜延伸到光子晶体、超材料等更多的微纳光子材料中, 将它们更

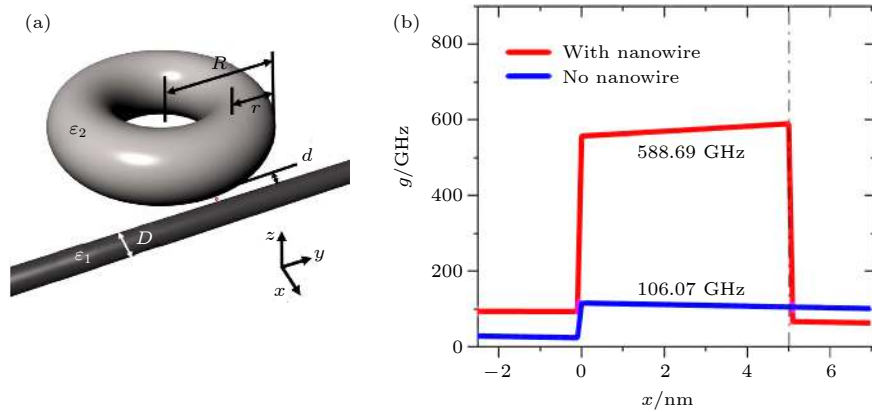


图 6 (a) 介质纳米圆环-纳米线复合结构; (b) 纳米线存在时的耦合系数增强^[90]

Fig. 6. (a) The hybrid nanotoroid-nanowire system; (b) the enhancement of the coupling coefficient in the nanogap with the nanowire^[90].

为复杂的光学模式作为电磁背景, 进一步研究在微纳尺度上的光和量子体系相互作用. 也可以引入如液晶或非线性光子晶体这种可以主动调控的因素, 从而实现可调谐的光子和激子在强耦合区域的相互作用.

5 结 论

本文介绍了腔量子电动力学中光子和激子相互作用的基本原理, 总结了微纳光子结构尤其是金属微纳结构中光和量子体系相互作用的发展现状, 并综述了本研究组近年来在表面等离激元结构中的光子和激子的强弱耦合区域的相关工作, 为微纳尺度上光和物质作用提供了新的物理内容, 可用于指导芯片上量子信息过程及可扩展的量子网络构建. 但是, 由于金属微纳结构具有损耗大的特点, 在很大程度上限制了它的应用. 将表面等离激元结构和其他光子结构复合, 形成杂化的损耗低的光学模式, 再和量子体系相互作用, 将是今后的发展方向之一. 近年来超表面^[95]、手性光子结构^[96]的兴起, 也为微纳尺度上光子和激子相互作用的调控及其应用带来了新的研究机遇, 可以利用微纳结构中特有的近场耦合和波矢匹配等原理, 在复合微纳光子结构和手性光子结构中, 设计单向性的多量子比特量子逻辑门, 演示出基本逻辑和简单计算功能等.

参考文献

[1] Nie S M, Emory S R, Chu S 1997 *Science* **275** 1102
 [2] Patra P P, Chikkaraddy R, Tripathi R P, Dasgupta A, Kumar G P 2014 *Nat. Commun.* **5** 4357

[3] Xu H X, Bjerneld J E, Käll M, Börjesson L 1999 *Phys. Rev. Lett.* **83** 4357
 [4] Xu H X, Aizpurua J, Käll M, Apell P 2000 *Phys. Rev. E* **62** 4318
 [5] Kauranen M, Zayats A V 2012 *Nat. Photon.* **6** 737
 [6] Assefa S, Xia F N, Vlasov Y A 2010 *Nature* **464** 80
 [7] Vahala K J 2003 *Nature* **424** 839
 [8] Jacob Z, Shalaev V M 2011 *Science* **334** 463
 [9] Benson O 2011 *Nature* **480** 193
 [10] Haroche S, Kleppner D 1989 *Phys. Today* **42** 24
 [11] Walther H 1992 *Phys. Rep.* **219** 263
 [12] Berman P R 1994 *Cavity Quantum Electrodynamics* (New York: Academic Press)
 [13] Mabuchi H, Doherty A C 2002 *Science* **298** 1372
 [14] Haroch S, Raimond J M 2005 *Exploring the Quantum* (Oxford: Oxford University Press)
 [15] Miller R, Northup T E, Birnbaum K M, Boca A, Boozer A D, Kimble H J 2005 *J. Phys. B-At. Mol. Opt. Phys.* **38** S551
 [16] Khitrova G, Gibbs H M, Kira M, Koch S W, Scherer A 2006 *Nat. Phys.* **2** 81
 [17] Walther H, Varcoe B T, Englert B G, Becker T 2006 *Rep. Prog. Phys.* **69** 1325
 [18] Reiserer A, Remppe G 2015 *Rev. Mod. Phys.* **87** 1379
 [19] Jaynes E T, Cummings F 1963 *Proc. IEEE* **51** 89
 [20] Purcell E M 1946 *Phys. Rev.* **69** 681
 [21] Michler P, Kiraz A, Becher C, Schoenfeld W V, Petroff P M, Zhang L D, Hu E, Imamoglu A 2000 *Science* **290** 2282
 [22] Anger P, Bharadwaj P, Novotny L 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 113002
 [23] Kühn S, Håkanson U, Rogobete L, Sandoghdar V 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 017402
 [24] Gerber S, Reil F, Hohenester U, Schlagenhaupt T, Krenn J R, Leitner A 2007 *Phys. Rev. B* **75** 073404
 [25] Herrera F, Spano F C 2018 *ACS Photonics* **5** 65
 [26] Zhang T C, Li G 2014 *Advances in quantum optics* (Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press) pp211–308 (in Chinese) [张天才, 李刚 2014 量子光学研究前沿 (上海: 上海交通大学出版社) 第211–308页]
 [27] Ren J J 2018 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Peking University) (in Chinese) [任娟娟 2018 博士学位论文 (北京: 北京大学)]
 [28] Leistikow M D, Mosk A P, Yeganegi E, Huisman S R, Lagendijk A, Vos W L 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 193903
 [29] Lodahl P, van Driel A F, Nikolaev I S, Imman A, Overgaag K, Vanmaekelbergh D, Vos W L 2004 *Nature* **430** 654
 [30] Chang W H, Chen W Y, Chang H S, Hsieh T P, Chyi J I,

- Hsu T M 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 117401
- [31] Klimov V V, Ducloy M 2004 *Phys. Rev. A* **69** 013812
- [32] Bleuse J, Claudon J, Creasey M, Malik N S, Gérard J M, Maksymov I, Hugonin J P, Lalanne P 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 103601
- [33] Yalla R, Le Kien F, Morinaga M, Hakuta K 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 063602
- [34] Claudon J, Bleuse J, Malik N S, Bazin M, Jaffrennou P, Gregersen M, Sauvan C, Lalanne P, Gérard J M 2010 *Nat. Photon.* **4** 174
- [35] Chance R R, Prock A, Silbey R 1975 *J. Chem. Phys.* **62** 2245
- [36] Chen Y T, Nielsen T R, Gregersen N, Lodahl P, Mørk J 2010 *Phys. Rev. B* **81** 125431
- [37] Jun Y C, Kekatpure R D, White J S, Brongersma M L 2008 *Phys. Rev. B* **78** 153111
- [38] Akimov A V, Mukherjee A, Yu C L, Chang D E, Zibrov A S, Hemmer P R, Park H, Lukin M D 2007 *Nature* **450** 402
- [39] Chang D E, Sørensen A S, Hemmer P R, Lukin M D 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 053002
- [40] Pelton M 2015 *Nat. Photon.* **9** 427
- [41] Ringler M, Schwemer A, Wunderlich M, Nichtl A, Kürzinger K, Klar T A, Feldmann J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 203002
- [42] Mock J J, Hill R T, Degiron A, Zauscher S, Chilkoti A, Smith D R 2008 *Nano Lett.* **8** 2245
- [43] Lian H, Gu Y, Ren J J, Zhang F, Wang L J, Gong Q H 2015 *Phys. Rev. Lett.* **114** 193002
- [44] Russell K J, Liu T L, Cui S, Hu E L 2012 *Nat. Photon.* **6** 459
- [45] Lévêque G, Martin O J F 2006 *Opt. Express* **14** 9971
- [46] Chang D E, Sørensen A S, Demler E A, Lukin M D 2007 *Nat. Phys.* **3** 807
- [47] Wang L J, Gu Y, Chen H Y, Zhang J Y, Cui Y P, Gerardot B D, Gong Q H 2013 *Sci. Rep.* **3** 2879
- [48] Gu Y, Wang L J, Ren P, Zhang J Y, Zhang T C, Martin O J F, Gong Q H 2012 *Nano Lett.* **12** 2488
- [49] Moskovits M 1985 *Rev. Mod. Phys.* **57** 783
- [50] Novotny L, van Hulst N 2011 *Nat. Photon.* **5** 83
- [51] Li Q, Wei H, Xu H X 2015 *Nano Lett.* **15** 8181
- [52] Yoshie T, Scherer A, Hendrickson J, Khitrova G, Gibbs H M, Rupper G, Ell C, Shchekin O B, Deppe D G 2004 *Nature* **432** 200
- [53] Reithmaier J P, Sek G, Löffler A, Hofmann C, Kuhn S, Reitzenstein S, Keldysh L V, Kulakovskii V D, Reinecke T L, Forchel A 2004 *Nature* **432** 197
- [54] Peter E, Senellart P, Martrou D, Lemaitre A, Hours J, Gérard J M, Bloch J 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 067401
- [55] Le Thomas N, Woggon U, Schops O, Artemyev M V, Kazes M, Banin U 2006 *Nano Lett.* **6** 557
- [56] Park Y S, Cook A K, Wang H L 2006 *Nano Lett.* **6** 2075
- [57] Aoki T, Dayan B, Wilcut E, Bowen W P, Parkins A S, Kippenberg T J, Vahala K J, Kimble H J 2006 *Nature* **443** 671
- [58] Dayan B, Parkins A S, Aoki T, Ostby E P, Vahala K J, Kimble H J 2008 *Science* **319** 1062
- [59] Delga A, Feist J, Bravo-Abad J, García-Vidal F J 2014 *Phys. Rev. Lett.* **112** 253601
- [60] Gonzalez-Tudela A, Huidobro P A, Martín-Moreno L, Tejedor C, García-Vidal F J 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 126801
- [61] Schlather A E, Large N, Urban A S, Nordlander P, Halas N J 2013 *Nano Lett.* **13** 3281
- [62] Zengin G, Wersall M, Nilsson S, Antosiewicz T J, Käll M, Shegai T 2015 *Phys. Rev. Lett.* **114** 157401
- [63] Tame M S, McEnery K R, Özdemir S K, Lee J, Maier S A, Kim M S 2013 *Nat. Phys.* **9** 329
- [64] Chikkaraddy R, de Nijs B, Benz F, Barrow S J, Scherman O A, Rosta E, Demetriadou A, Fox P, Hess O, Baumberg J J 2016 *Nature* **535** 127
- [65] Liu R M, Zhou Z K, Yu Y C, Zhang T W, Wang H, Liu G H, Wei Y M, Chen H J, Wang X H 2017 *Phys. Rev. Lett.* **118** 237401
- [66] Li Q, Wei H, Xu H X 2014 *Nano Lett.* **14** 3358
- [67] Wei H, Pan D, Zhang S P, Li Z P, Li Q, Liu N, Wang W H, Xu H X 2018 *Chem. Rev.* **118** 2882
- [68] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059
- [69] Hao H, Ren J J, Chen H Y, Khoo I C, Gu Y, Gong Q H 2017 *Opt. Express* **25** 3433
- [70] Hao H, Ren J J, Duan X K, Lu G W, Khoo I C, Gong Q H, Gu Y 2018 *Sci. Rep.* **8** 11244
- [71] Duan X K, Ren J J, Zhang F, Hao H, Lu G W, Gong Q H, Gu Y 2018 *Nanotechnology* **29** 045203
- [72] Ruppin R 1982 *J. Chem. Phys.* **76** 1681
- [73] Sauvan C, Hugonin J P, Maksymov I S, Lalanne P 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 237401
- [74] Liaw J W 2008 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **14** 1441
- [75] Maksymov I S, Besbes M, Hugonin J P, Yang J, Beveratos A, Sagnes I, Robert-Philip I, Lalanne P 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 180502
- [76] Esteban R, Teperik T V, Greffet J J 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 026802
- [77] Chen X W, Agio M, Sandoghdar V 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 233001
- [78] Akselrod G M, Argyropoulos C, Hoang T B, Ciraci C, Fang C, Huang J, Smith D R, Mikkelsen M H 2014 *Nat. Photon.* **8** 835
- [79] Lee J, Bao W, Ju L, Schuck P J, Wang F, Weber-Bargioni A 2014 *Nano Lett.* **14** 7115
- [80] Ding Y H, Zhu X L, Xiao S S, Hu H, Frandsen L H, Mortensen N A, Yvind K 2015 *Nano Lett.* **15** 4393
- [81] Curto A G, Volpe G, Taminiou T H, Kreuzer M P, Quidant R, van Hulst N F 2010 *Science* **329** 930
- [82] Savasta S, Saija R, Ridolfo A, Stefano O D, Denti P, Borghese F 2010 *ACS Nano* **4** 6369
- [83] Waks E, Sridharan D 2010 *Phys. Rev. A* **82** 043845
- [84] Zayats A V, Smolyaninov I I, Maradudin A A 2005 *Phys. Rep.* **408** 131
- [85] Tong L M, Gattass R R, Ashcom J B, He S L, Lou J Y, Shen M Y, Maxwell I, Mazur E 2003 *Nature* **426** 816
- [86] Sun B Q, Gu Y, Hu X Y, Gong Q H 2011 *Chin. Phys. Lett.* **28** 057303
- [87] Kato S, Aoki T 2015 *Phys. Rev. Lett.* **115** 093603
- [88] Ren J J, Gu Y, Zhao D X, Zhang F, Zhang T C, Gong Q H 2107 *Phys. Rev. Lett.* **118** 073604
- [89] Ren J J, Hao H, Qian Z Y, Duan X K, Zhang F, Zhang T C, Gong Q H, Gu Y 2018 *J. Opt. Soc. Am. B: Opt. Phys.* **35** 1475
- [90] Zhang Q, Ren J J, Duan X K, Hao H, Gong Q H, Gu Y 2018 *Chin. Opt. Lett.* **12** 000000
- [91] Armani D K, Kippenberg T J, Spillane S M, Vahala K J 2003 *Nature* **421** 925
- [92] Spillane S M, Kippenberg T J, Vahala K J 2005 *Phys. Rev. A* **71** 013817
- [93] Gorodetsky M L, Savchenkov A A, Ilchenko V S 1996 *Opt. Lett.* **21** 453
- [94] Vernooy D W, Furusawa A, Georgiades N P, Ilchenko V S, Kimble H J 1998 *Phys. Rev. A* **5** 7
- [95] Yu N F, Capasso F 2014 *Nat. Mater.* **13** 139
- [96] Lodahl P, Mahmoodian S, Stobbe S, Rauschenbeutel A, Schneeweiss P, Volz J, Pichler H, Zoller P 2017 *Nature* **541** 473

SPECIAL TOPIC—Plasmon-enhanced light-matter interactions

Interactions between photons and excitons in micro-nano photonic structures*

Duan Xue-Ke¹⁾ Ren Juan-Juan¹⁾ Hao He¹⁾ Zhang Qi¹⁾

Gong Qi-Huang¹⁾²⁾³⁾⁴⁾ Gu Ying^{1)2)3)4)†}

1) (*State Key Laboratory for Mesoscopic Physics, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China*)

2) (*Nano-optoelectronics Frontier Center of Ministry of Education (NFC-MOE) and Collaborative Innovation Center of Quantum Matter, Peking University, Beijing 100871, China*)

3) (*Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*)

4) (*Beijing Academy of Quantum Information Sciences, Beijing 100193, China*)

(Received 27 February 2019; revised manuscript received 11 April 2019)

Abstract

The strong localized field in micro-nano photonic structures brings new opportunities for the study of the light-matter interaction. By designing optical modes in these structures, photons and excitons in micro-nanostructures can exchange energy reversibly or irreversibly. In this paper, a series of our recent studies on the strong and weak photon-emitter coupling in micro-nano structures especially in plasmonic and their coupled structures are reviewed, such as the principle of efficient, tunable and directional single photon emission, and engineering the electromagnetic vacuum for enhancing the coupling between photon and exciton. These results provide new physical contents for the light-matter interactions on micro and nanoscale, and have potential applications in the on-chip quantum information process and the construction of scalable quantum networks.

Keywords: plasmonics, cavity quantum electrodynamics, strong coupling, weak coupling

PACS: 42.50.Pq, 73.20.Mf, 32.70.Cs

DOI: 10.7498/aps.68.20190269

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2018YFB1107200), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11525414, 11734001), and the Key Research and Development Program of Guangdong Province, China (Grant No. 2018B030329001).

† Corresponding author. E-mail: ygu@pku.edu.cn