

微腔或纳腔中的光—物质相互作用*

张顺平^{1,†} 徐红星^{1,2}

(1 武汉大学物理科学与技术学院 人工微结构教育部重点实验室 武汉 430072)

(2 武汉大学高等研究院 武汉 430072)

2019-08-05 收到

† email: spzhang@whu.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20200305

Light-matter interaction in microcavity or nanocavity

ZHANG Shun-Ping^{1,†} XU Hong-Xing^{1,2}

(1 School of Physics and Technology, Key Laboratory of Artificial Micro- and Nano-structures of Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

(2 The Institute for Advanced Studies, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

摘要 光学微腔通常由透明介质做成,是用于将光子囚禁在其自身内部的结构。而光学纳腔是类比于微腔,泛指一类能将光场局域在极亚波长的纳米尺度上的结构,一般是由金属性材料与透明介质共同构成的。在与原子分子等量子体系相互作用方面,微腔和纳腔分别从提高腔的品质因子或减小腔的模式体积两个方面来增强光与物质的相互作用。两者殊途同归,区别又相互联系。微腔量子体系一般具有更长的寿命(或量子态相干时间),而纳腔体系的优点是体积小、超快响应且无需低温运行,在发展集成光学芯片方面更有优势。在实际应用中,两者各具特色,相得益彰。

关键词 微腔, 纳腔, 等离激元, 光与物质相互作用, 自发辐射

Abstract Optical microcavities, usually made of transparent dielectrics, are architectures used for storing light. Similar to microcavities, optical nanocavities are nanostructures that can confine light within a deep-subwavelength volume. They are usually made of metals combined with transparent dielectrics. In the interaction with quantum systems such as atoms or molecules, microcavities enhance the strength of light-matter interaction via increasing the quality factor of the cavity, while nanocavities enhance the interaction by reducing the mode volume. The two kinds of cavities are distinctly different, but are related and can achieve similar functionality. Typically, microcavity systems have a longer lifetime (or coherence time) while nanocavities have the advantage of smaller dimensions, ultrafast response and room-temperature operation, which is more advantageous for potential applications in integrated optical circuits. Practically, both cavities have their own advantages, and complement each other.

Keywords microcavity, nanocavity, plasmon, light-matter interaction, spontaneous emission

* 国家重点研发计划(批准号:2017YFA0303504)、中国科学院学部学科发展战略研究(批准号:XK2018SLA)资助项目

1 引言

光与物质相互作用是光学领域的核心议题。从简单宏观物体的反射与折射现象，到光的吸收与散射，从原子的受激辐射到所有物体的热辐射，都可以归结为光(电磁波)与物质相互作用的范畴，或者说是光与物质相互作用的直观体现。从微观角度上看，光与原子，比如氢原子(只带一个质子和一个电子)的相互作用过程是光与物质相互作用中最典型的例子。一般而言，由于原子体系的特征尺寸(波尔半径 a_B)远小于光的波长(图1)，因此不同电子态之间的跃迁矩阵元(比如电偶极跃迁 $\mu = ed$)通常较小。因此，一般原子的光吸收或光发射截面很小。当光经过一个原子时，光引起的原子中的电子在两个不同的量子态之间的跃迁的概率比较小。换句话说，在自由空间中，光子经过一个原子时最有可能发生的事情就是什么事情都没有发生。

那么，如何增强光与原子(物质)的相互作用强度呢？简单地猜想，如果能让光来回 N 次经过同一个原子，那么该原子对光的吸收或散射几率就可以提高 N 倍。如果这个 N 非常大，那么光与原子相互作用强度就将变得很大。这就是光学微腔增强光与原子/类原子体系相互作用强度的基本思路——把光囚禁在光腔中，延长腔光子的寿命，增加光与物质相互作用的时间^[1]。比如，把两面镜子面对面摆放，那么沿着垂直于镜面(腔轴)方向传播的光就可在两面镜子之间来回被反射，进而达到囚禁光子的作用，这就是 Fabry—Pérot(简称 FP)腔。假设两面镜子的反射率都为 R ，那么透射光在强度衰减到其初始值的一半这段时间内，在腔中完成往返一圈的次数为 $\sqrt{R}/(1-R)$ 。可见，随着腔面镜反射率 R 增加，光折返经过腔中原子的次数 N 将快速增加，腔的品质因子 Q (腔中的能量与单位时间减小的能量之比)也将迅速增加。相比在真空中，腔中原子的自发辐射速率可以被增大(或减小) F_p 倍，这个倍数称为 Purcell 因子^[2]。当原子的跃迁频率与腔共振

频率相等且原子跃迁取向与光场的电场匹配(位置、取向)时， F_p 可表示为

$$F_p = \frac{3}{4\pi^2} \left(\frac{\lambda_0}{n} \right)^3 \frac{Q}{V}.$$

其中， λ_0 为真空中光的波长， n 为腔中的介质的折射率， V 为光腔的体积。可见，为了使 F_p 更大，一方面要增大腔的品质因子 Q ，另一方面要减小腔的体积 V 。这两方面分别对应光学微腔和纳腔在提高光与物质相互作用上的两种途径。

在 FP 腔中，由于干涉效应光场在腔内形成驻波分布，原子在不同位置感受到的光场强度将有很大不同。如果把原子放置在这些驻波的波峰位置上，那么原子与腔光子之间的耦合速率 g (能量交换速率)将极大提升。当体系的耦合速率 g 大于原子激发态衰减速率 γ 和光腔耗散速率 κ (腔光子寿命的倒数)的平均值时，即 $g > (\gamma + \kappa)/2$ ，耦合体系进入了强相互作用区域^[3]。假设初始时刻有一份 $\hbar\omega$ 的能量处于原子的激发态而腔处于真空态，那么在这份能量通过光腔的耗散离开腔体或是通过原子自发辐射等机制衰减掉之前，它已经在原子和光腔之间来回多次往返地交换，这就是 Rabi 振荡。在频域上，原子的跃迁峰将劈裂两个峰，劈裂大小为 $\Omega = 2g$ ，称为真空 Rabi 劈裂或单光子 Rabi 劈裂。如果以原子跃迁峰与腔共振峰的能量差(称为失谐量)为横轴，以两个峰各自的能量为纵轴，则画出来的两条曲线在失谐量为零附近呈现出相互排斥的特点，称作“反交叉”曲线。这种腔—原子相

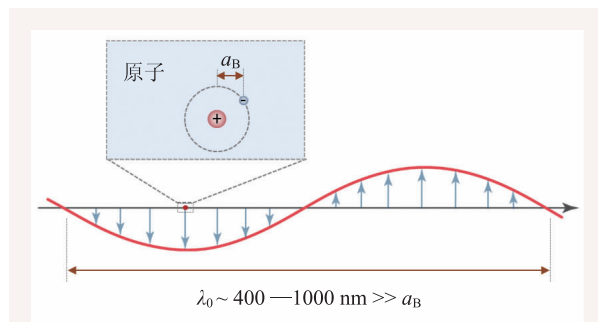


图1 原子的波尔半径通常在Å量级，远远小于约几百纳米的光波长。因此通常单个原子与自由空间中的光的相互作用强度很小，即它们的光吸收/发射截面很小

相互作用体系是腔量子电动力学所描述的最基本的场景。一般而言, $g \ll (\gamma, \kappa)$ 时, 体系处于弱耦合区域; g 与 (γ, κ) 可比拟时, 体系处于中等耦合强度区域; 只有满足 $g > (\gamma, \kappa)$ 时, 体系才算进入了强耦合区域。最后这个条件其实是比上面提到的判断体系是否处于强耦合区域的判据 $g > (\gamma + \kappa)/2$ 更为严格的标准。不过, 很多时候人们并不特别在意这个具体的边界, 只要复合体系的响应谱线上出现反交叉的行为, 都需要用强耦合的语言来描述。

2 光学微腔与纳腔

从20世纪90年代初期起, 人们致力于高品质光学微腔与固态量子体系相互耦合的研究并取得了长足的进展^[4]。利用高折射率薄层—低折射率薄层交替组成的全介质反射镜(布拉格)的反射率很高, 由两面这种布拉格镜子组成的FP腔可以将腔的 Q 因子做得很高。如图2(a)所示, 1996年Gérard等人用分子束外延法生长由砷化镓—砷化铝交替生长形成的FP腔, 同时将砷化镓量子点埋

在腔的正中间^[5]。该腔的 Q 因子达到1600, 腔的标称半径为650 nm, 体积约为波长的立方的5倍。随后的1999年, Gayral等继续沿用分子束外延生长高质量砷化镓衬底, 并外延生长砷化镓量子点^[6]。他们用电子束曝光、反应离子束刻蚀与湿法刻蚀工艺制备了半导体圆盘微腔, 其 Q 因子可达到 1.2×10^4 , 体积约为波长立方的6倍。与FP腔中的模式不同, 圆盘微腔的光学模式称为回音壁模式(wispering-gallery mode), 可以理解为光在微腔侧壁上全内反射一周满足相干干涉条件而形成的共振模式。由于全内反射的反射率很高, 因此只要微腔直径相比波长较大, 腔的侧壁足够光滑, 以及材料内部吸收小, 则回音壁模式可以实现超高的 Q 因子。典型的例子是用熔融石英制成的微球微腔, 光在微球的“赤道”环绕形成共振, 在可见光波段 Q 因子达到 8×10^9 , 仅仅受限于微球表面水汽的吸收^[7]。

与微腔延长光与量子体系相互作用时间不同, 纳腔通过减小光场的模式在空间上分布的体积, 来提高 F_p 。然而, 当全介质光腔的直径(或长度)减小到光波长量级时, 由于衍射的缘故, 光场

将不再束缚在腔中。这时, 腔的品质因子急剧下降, 也就是说对于全介质光腔来说, 通过减小腔的体积来提高 F_p 的途径是不现实的。金属纳米颗粒由于表面等离激元(固体中的电荷集体振荡的元激发)共振效应, 可以将光束束缚到远小于光的波长的体积内, 扮演一个纳米光腔的作用。这是因为金属中有大量的自由电子, 这些电子一方面可以被光场驱动做集体运动, 另一方面它们相对正电荷离子背景所作的集体运动也可以产生交变电磁场。因此, 光场的能量一半时间存储在电子集体振荡的动能里, 另一半时间存储在颗粒周围的电磁场中, 两者形成循环, 维持系统的振荡。有了电子集体振荡的协助, 金属纳米结构可以突破光学衍射极限的限制,

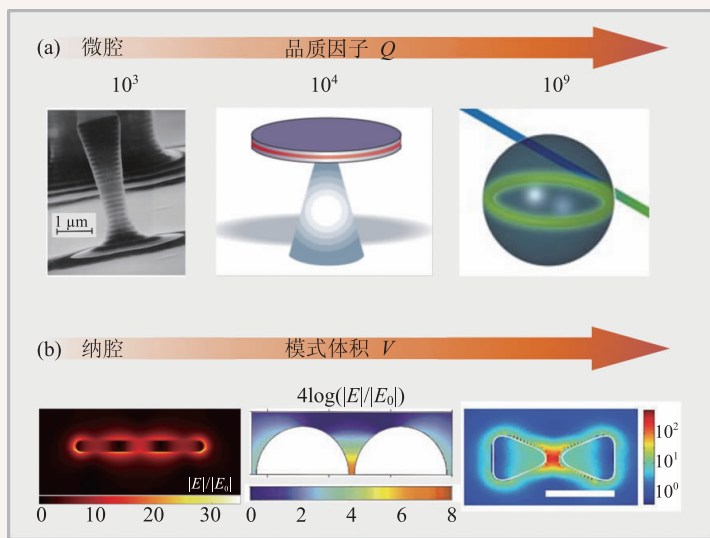


图2 典型的微腔与纳腔 (a)从左至右 Q 因子增大: 分布式布拉格镜子构成的FP腔, Q 因子为 1.6×10^3 ; 回音壁微腔, Q 因子为 1.2×10^4 ; 微球微腔, Q 因子为 8×10^9 ; (b)从左至右模式体积减小: 单个金属银纳米棒(直径25 nm, 长度285 nm)作为表面等离激元FP腔(图中画出 $m=3$ 模式的近场分布)^[8]; 两个直径90 nm的银纳米球形成的二聚体纳腔^[10]; 三个三角形颗粒形成的蝴蝶结, 标尺为100 nm^[11]

把光场局域到纳米尺度，甚至是原子尺度。

如图2(b)所示，一个高长径比的银纳米棒可以视为一个表面等离子激元FP腔，表面等离子激元在纳米棒的两端被来回反射，在棒上形成驻波^[8]。沿着棒的方向，驻波共有3个节点，因此这个模式可以用 $m=3$ 来刻画。它的 Q 因子只有32，属于劣质腔，但它的体积只有 $25\text{ nm}\times 25\text{ nm}\times 285\text{ nm}$ ，约

为一个波长立方的 6×10^{-4} 倍，比一般的微腔小许多。另一种典型的等离子激元纳腔是两个金属纳米球形成的二聚体^[9, 10]。由于两个颗粒之间的表面等离子激元近场耦合，电磁场(电荷)将集聚在两个颗粒之间的缝隙上，把电磁场局域到很小的体积上。如果将两个纳米球换成两个纳米三角形，并且让它们的尖端相对摆放，形成蝴蝶结构，可以具有更强的电场增强/局域效果。同时，还可以通过三角形的形状对共振波长、间隙中的电场增强进行调控。2009年，诺贝尔化学奖获得者W. E. Moerner和他的合作者利用蝴蝶结纳腔实现单分子荧光1340倍的增强^[11]。类似的变形结构还有两个头对头摆放的纳米棒二聚体，也可以实现高局域的光场。不过，通常所用的二聚体结构中的腔模式是偶极—偶极“成键”模式，它具有很大的散射/吸收截面，也就是说它很容易耦合成光子辐射离开纳腔。因此这个纳腔模式的峰宽很宽， Q 因子很低。最近，研究人员发现如果组成二聚体的金属纳米颗粒具有平面形貌，二聚体的缝隙中间形成的表面等离子激元模式完全可以用腔模式来刻画^[12]。这些模式具有更高的 Q 因子，可以达到表面等离子激元的极限值(即没有辐射损耗)^[13]，并且不牺牲电磁场的局域程度。另外值得一提的是，如果忽略量子效应(如隧穿、非局域效应以及量子尺寸效应)表面等离子激元对光场的强束缚能力原则

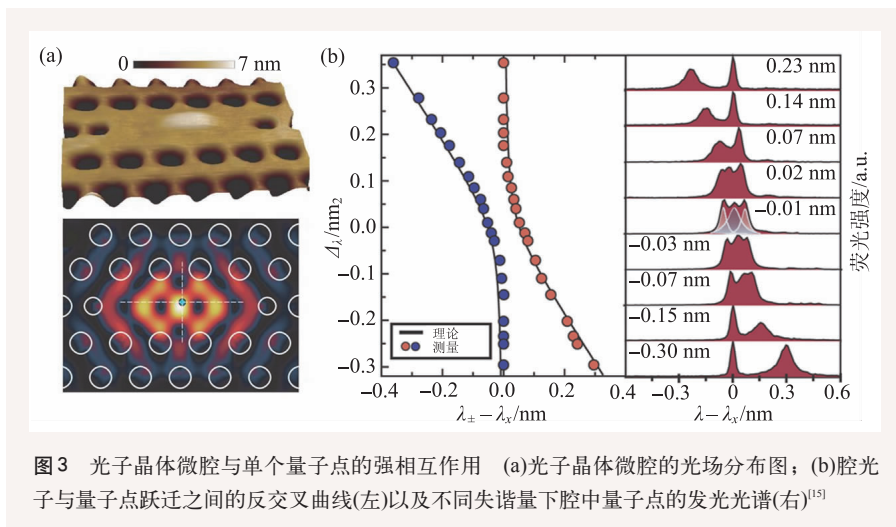


图3 光子晶体微腔与单个量子点的强相互作用 (a)光子晶体微腔的光场分布图；(b)腔光子与量子点跃迁之间的反交叉曲线(左)以及不同失谐量下腔中量子点的发光光谱(右)^[15]

是没有上限的，也就是等离子激元可以在任意小的金属结构上存在。比如，剑桥大学的研究人员甚至提出皮米腔的概念，也即电场局域在一个立方纳米量级的空间体积上^[14]。虽然也有部分学者对这个概念提出质疑，认为并不存在对应皮米腔的本征模式，但不可否认的是，等离子激元可以对光场空间分布的强大“聚焦”能力是调控光与物质相互作用的重要途径。相比于微腔增强光与物质相互作用，等离子激元纳腔由于宽线宽(低 Q 因子)而具有超快时间响应、可室温工作的优点。同时，纳腔的小体积特点也允许纳腔进行高密度集成，为高密度集成器件应用奠定基础。

3 光学微腔与纳腔中的光与物质相互作用

2007年，Hennessy等将InAs量子点放置在光子晶体微腔中，实现两者的强耦合，如图3所示^[15]。他们利用原子力显微镜找到量子点的具体位置，实现了把单个量子点放置在光子晶体微腔中的场强最大的位置(精度30 nm)附近，如图3(a)所示。形貌图上白色的突起正是量子点，黑色圆形斑点是在整块半导体基底上挖出来的空气柱阵列。中间区域的空气柱缺失形成光子晶体微腔，光场囚禁在4.2 K温度下，他们测量了耦合体系的荧光，

发现荧光出现了劈裂。当他们用薄膜缩聚的办法更改腔的共振波长，也就是更改光子晶体腔的共振能量与量子点跃迁能量之间差值(失谐量)，两个峰清晰地表现出了反交叉行为。在失谐量为零时，耦合体系的 Rabi 劈裂为 $152 \mu\text{eV}$ 。作为对比，光子晶体微腔的 κ 为 $100 \mu\text{eV}$ ，(对应 Q 因子为 13300)，量子点的线宽为 $35 \mu\text{eV}$ 。可见，该耦合体系处于强耦合区域。

近年来，等离子激元纳腔与分子、量子点等量子体系的耦合也取得重要进展^[16]。例如，2014年，杜克大学的 Mikkelsen 等将染料插入到金薄膜与银纳米立方中间的间隔层中，观察到钉荧光发射超过 1000 倍的增强。如同图 4(a) 所示，钉染料在间隙中的荧光寿命降低到 0.7 ns。作为对比，在玻璃上，它的寿命是 600 ns。同时，与纳腔耦合的钉染料保持了大于 50% 的量子产

率以及继承了纳腔定向发射的优点，使荧光收集效率达到 84%。2017 年，中国科学技术大学的董振超等在扫描隧道显微镜中观测到单个铕酞菁分子与等离激元纳腔之间的相干能量交换过程^[17]。在荧光发光谱中，他们观察到清晰的 Fano 干涉导致的谷，如图 4(b) 所示。通过原位调节纳腔等离激元与分子之间的失谐量，他们得到零失谐时的 Rabi 劈裂为 32.6 meV。由于实验中铕酞菁分子是平躺在银衬底上的，其跃迁偶极矩基本也是平行于衬底平面，与银针尖—银衬底构成的纳腔的主要电场分量相互垂直，这也就是实验中没有观察到更大的 Rabi 劈裂的主要原因。2016 年，剑桥大学的 Baumberg 等利用分子笼组装技术将分子可控地填充到金膜—金纳米颗粒之间的间隙里，如图 4(c) 所示^[18]。他们的自组装技术保证了分子的跃迁偶极矩的取向与主要电场分量相一致。他们在室温下测量了单颗粒暗场散射光谱，观察到由分子与纳腔中表面等离激元之间的强相互耦合形成的 Rabi 劈裂。而对不同样品进行统计时，他们发现这个耦合强度呈现了某种离散分布，对应纳腔中不同的分子数目。对于单个分子，表面等离激元与分子的 Rabi 大约在 80—95 meV 之间。可见，相比于微腔体系，纳腔体系普遍实现的耦合强度更大，且在室温、大气环境下就可以实现，这正是纳腔体系独特的地方。

最近，等离激元纳腔与单层过渡金属硫族化合物材料的复合体系引起研究的极大兴趣。在这种二维半导体材料中，导带中的电子与价带中的空穴之间由于库仑相互作用形成的准粒子，称为激子。这种激子可以用二维类氢原子模型来描述。与三维半导体不同的是，在二维体系由于电磁屏蔽效应小，电子与空穴之间的库仑作用很强，使两者的束缚能达到几百毫电子伏特^[19]。这就意味着室温下的热涨落(小于 30 meV)不足以

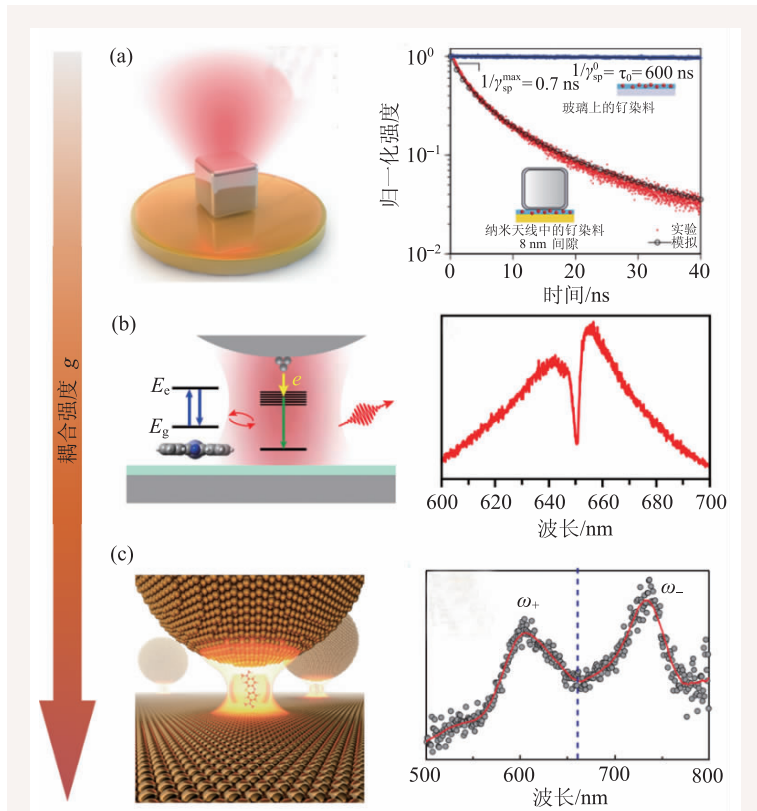


图 4 等离激元纳腔与分子的耦合 (a)弱耦合区域:银纳米立方—金膜构成的纳腔加速了钉染料的自发辐射衰减,使其发光寿命从 600 ns 缩短至 0.7 ns; (b)中等强度耦合区域:银针尖—银膜组成的纳腔中等离激元与分子的能量转移过程; (c)强耦合作用区域等离激元与分子 Rabi 劈裂形成混合态^[18]

拆散电子—空穴对，即室温下激子可以稳定地存在。相比于分子体系，层状半导体中原子长程有序排列，具有平坦的宏观形貌。这种固态的特点有利于器件的加工应用，同时也便于用电、磁、应力、温度等外场对材料光电性质进行调控，这些优点促使二维材料被广泛开发成各类光电器件^[20]。同时，二维材料具有柔性、可兼容多种衬底的优点也为许多应用开发扫除一些障碍。

用层状半导体替代分子体系与金属纳腔结合，模仿传统半导体微腔中光子与激子的相互耦合，可以为研究激子极化激元、全光开关，以及玻色—爱因斯坦凝聚等物理现象提供一个室温工作的平台，也为构筑新型集成的量子光学器件创造机遇。在这方面，武汉大学的张顺平与徐红星组系统地研究了纳腔等离子激元与二维过渡金属硫族化合物的相互作用，从弱耦合、中等强度耦合到强耦合^[8, 21, 22]。比如，

在弱耦合区域，二维原子层可作为近场探针，用于回答原子级厚度的光学纳腔中，电磁场到底有多强，量子效应对经典电磁场的影响在多大的间隙中比较显著等基本问题。由于拉曼信号对电磁场变化的敏感性，人们习惯把分子塞进纳腔中，通过测量分子的拉曼信号增强进而推导出纳腔中电磁场强度。但是纳腔中的分子朝向及拉曼振动方向是不能控制且难以确定的，加之分子的性质也不稳定，最终导致实验的可控性、重复性较差。该课题组针对这一难题，设计并利用单层二硫化钼作为隔层夹在金属间隙中间，它的拉曼散射(视作量子产量极低的跃迁过程)通过纳腔的放大作用直接反映间隙中的电磁场场强，如图5(a)。相比于传统表面增强拉曼散射中用分子作近场探针，二维材料扮演的原子探针具有厚度确定(决定纳腔的间隙距离)、没有分子漂移与光漂白作用(信号稳定)以及具有清晰的拉曼振动模式，可反映不同方

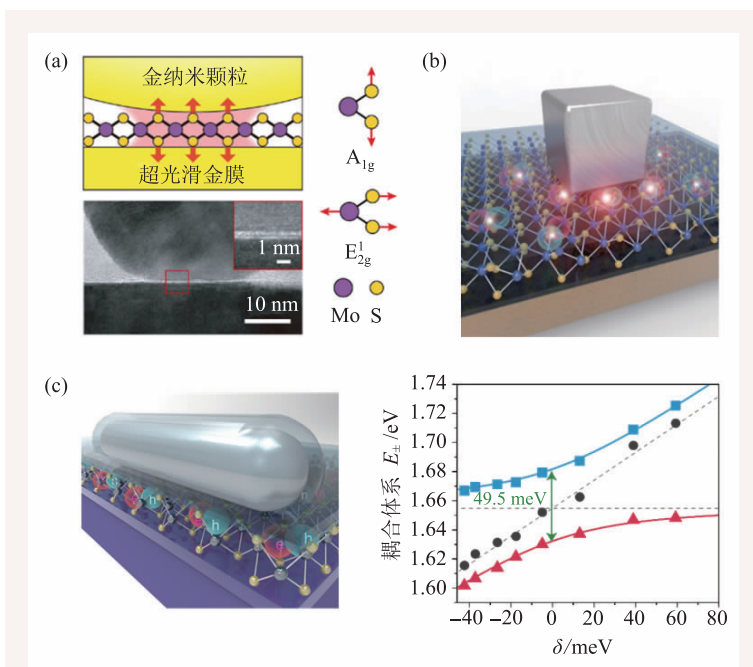


图5 等离子激元纳腔与单层过渡金属硫族化合物耦合体系 (a)弱耦合区域：单层二硫化钼可当作原子探针，实现对原子级纳米光腔中的光场增强倍数进行定量测量；(b)中等强度耦合区域：耦合体系的发光强度达到最大化，失谐量为零时纳米立方体下方的热点区域内二硒化钨的平均荧光增强倍数超过1700倍；(c)强耦合区域：室温下可观测到表面等离子激元—激子混合态，银纳米棒 $m=3$ 模式与单层二硒化钨激子之间呈现反交叉行为

向的近场分量。实验中，他们用远离激子共振(失谐量较大)的近红外激光来激发拉曼散射，保证二硫化钼的荧光背景足够弱，拉曼信号的信噪比足够大。实验和理论均表明，当纳腔尺寸在1.24 nm以上时，经典物理电磁场理论可以完全适用，拉曼散射增强因子可以高达 10^8 。但是当纳腔尺寸降低至0.62 nm时，量子局域效应出现且显著降低纳腔中电磁场增强。

纳腔中的高局域态密度也常用来调控材料的荧光性质。在同样的原子层厚度的纳腔中，该课题组研究了二维材料中激子与纳腔中的光场在中等耦合区域时的光学性质。如图5(b)所示，他们把激子效应非常强的单层二硫化钼放进纳腔中，通过在该体系上逐层生长透明介质层，可以精确控制纳腔的等离子激元共振峰位不断红移。当调控纳腔的共振能量跟二维材料的激子能量接近时，即失谐量接近零，测量该体系的暗场散射谱出现能量

劈裂。该混合体系的共振散射峰与失谐量的依赖关系图中(即该体系的色散关系)出现反交叉现象,且劈裂大小跟激子衰减速率和纳腔耗散速率可比拟,表明该体系处于中等强度耦合区域(有时也称作能量转移区域)。该体系下激子辐射行为受到失谐量的调控,最大增强可达1700倍。计算表明,这个增强是来源于等离子激元—激子增强荧光,即纳腔等离子激元将光抓到复合系统中,等离子激元—激子相互作用进一步把能量转移到二硒化钨上,使复合系统的发光强度最大化,这也区别于常见的等离子激元增强荧光现象。最近,课题进一步联合了上述两个效应,即在同一个纳腔体系中同时实现增强拉曼散射和荧光,并由此推算出纳腔中的激子的超快衰减速率^[23]。拉曼散射强度反映纳腔电场增强,即荧光过程中的激发增强部分。从荧光增强因子中扣除激发增强的贡献并结合激子初始的量子产量便可得到激子在纳腔中的衰减速率。当纳腔等离子激元与激子共振的失谐量为零时,这个纳腔中的激子的寿命最短,达到22 fs。这一测量结果也印证了纳腔具有“超快”的特点。

纳腔与物质的相互作用取决于电磁场与物质的模式重叠程度以及相对朝向。金属颗粒—金属膜组成的纳腔中,电磁场增强大都沿腔轴方向,即竖直方向。这跟二维材料的激子跃迁朝向(水平)正交,所以等离子激元与激子的相互作用强度并不大。利用平面纳腔,可以有效提高等离子激元与激子的相互作用强度。该课题组将高长径比的银纳米棒放置在单层二硒化钨上,室温下观察到激子与 $m=3$ 模式等离子激元的强耦合(图5(c))。得益于该FP腔的较高质量因子,耦合体系的Rabi劈裂达到了49.5 meV,接近强耦合的判据。通过不断地在纳米棒上沉积透明介质层使得表面等离子激元的能量不断红移,相当于在同一体系上不断地改变失谐量,从而实现等离子激元—激子极化激元的色散关系的精确测量。这种原位调节纳腔共振

波长的方式与图3所用方法有异曲同工之妙,为研究纳腔中类原子体系与纳腔等离子激元的相互作用提供一种行之有效的方法,也为用光场调控二维限域量子体系提供一种新的方式。

4 总结与展望

除了对光与量子系统相互作用的调控之外,光学微腔与纳腔也都在传感方面有非常广阔的应用空间。概括而言,微腔利用模式移动、劈裂或展宽等对被测物引起的微腔模式变化进行监控,一般地,微腔的 Q 值越高,对被测物的微弱变化越敏感。对这方面感兴趣的读者,可以参阅《物理》第48卷第3期由北京大学肖云峰课题组撰写的综述文章^[24]。等离子激元纳腔普遍利用频谱移动、模式强度或干涉对比度对被测物进行检测,模式局域性越高,对光场局域区域的微弱变化也越敏感。比如,武汉大学张顺平与徐红星课题组最新的研究进展表明,利用局域在纳腔间隙中的纳腔等离子激元模式可以实现对纳米薄层厚度变化的传感达到亚皮米的精度,这是等离子激元传感灵敏度新的世界纪录,大大超越传统的纳米尺度光学传感器^[25]。对纳腔超灵敏传感感兴趣的读者,可以参阅由武汉大学课题组撰写的综述文章^[26]。可见,微腔与纳腔在传感方面也存在类似光与量子体系相互作用调控方面的区别。实际上,这种区别在其他方面的应用也普遍存在,因为这些现象都可以归属于更广义的光与物质相互作用的范畴。

在未来,光学微腔与纳腔仍将在光学领域扮演重要作用。人们也期待着量子光学所描述的光与物质相互作用能有朝一日兑现它最炫彩的预言——光晶体管与光计算机。相信在那个庞大复杂的系统中,微腔或纳腔将作为最基本的单元起着不可替代的作用。

致谢 感谢郑迪博士在图1制作过程中的帮助,感谢郭全兵同学对文章的通读和修改。

参考文献

- [1] Vahala K J. *Nature*, 2003, 424: 839
- [2] Purcell E M, Torrey H C, Pound R V. *Phys. Rev.*, 1946, 69: 37
- [3] Khitrova G, Gibbs H M, Kira, M *et al.* *Nat. Phys.*, 2006, 2: 81
- [4] Lodahl P, Mahmoodian S, Stobbe S. *Rev. Mod. Phys.*, 2015, 87: 347
- [5] Mabuchi H, Turchette Q A, Chapman M S *et al.* *Opt. Lett.*, 1996, 21: 1393
- [6] Gayral B, Gérard J M, Lemaître A *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 1999, 75: 1908
- [7] Gorodetsky M L, Savchenkov A A, Ilchenko V S. *Opt. Lett.*, 1996, 21: 453
- [8] Zheng D, Zhang S, Deng Q *et al.* *Nano Lett.*, 2017, 17: 3809
- [9] Xu H, Bjerneld E J, Käll M *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1999, 83: 4357
- [10] Xu H, Aizpurua J, Käll M *et al.* *Phys. Rev. E*, 2000, 62: 4318
- [11] Kinkhabwala A, Yu Z F, Fan S H *et al.* *Nat. Photon.*, 2009, 3: 654
- [12] Kuttge M, García de Abajo F J, Polman A. *Nano Lett.*, 2010, 10: 1537
- [13] Zhang S, Xu H. *Nanoscale*, 2016, 8: 13722
- [14] Benz F, Schmidt M K, Dreismann A *et al.* *Science*, 2016, 354: 726
- [15] Hennessy K, Badolato A, Winger M *et al.* *Nature*, 2007, 445: 896
- [16] Pelton M. *Nat. Photon.*, 2015, 9: 427
- [17] Zhang Y, Meng Q, Zhang L *et al.* *Nat. Commun.*, 2017, 8: 15225
- [18] Chikkaraddy R, de Nijs B, Benz F *et al.* *Nature*, 2016, 535: 127
- [19] He K, Kumar N, Zhao L *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2014, 113: 026803
- [20] Wang Q H, Kalantar-Zadeh K, Kis A *et al.* *Nature Nanotech.*, 2012, 7: 699
- [21] Sun J, Hu H, Zheng D *et al.* *ACS Nano*, 2018, 12: 10393
- [22] Chen W, Zhang S, Kang M *et al.* *Light: Science & Applications*, 2018, 7: 56
- [23] Zhang Y, Chen W, Fu T *et al.* *Nano Lett.*, 2019, 10.1021/acs.nanolett.9b02425
- [24] 唐水晶, 李贝贝, 肖云峰. *物理*, 2019, 48: 137
- [25] Chen W, Zhang S, Deng Q *et al.* *Nat. Commun.*, 2018, 9: 801
- [26] Chen W, Hu H, Jiang W *et al.* *Chin. Phys. B*, 2018, 27: 107403



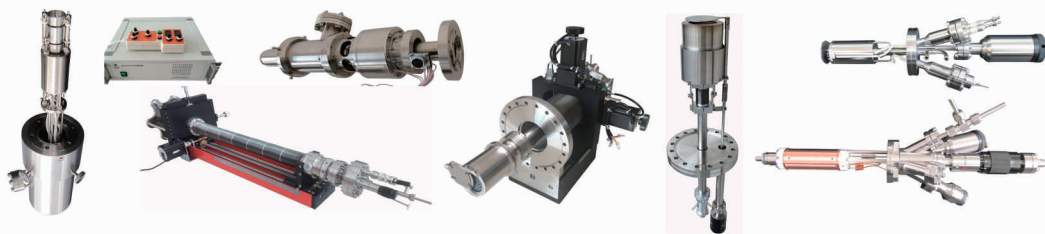
大连齐维科技发展有限公司

地址: 大连高新园区龙头工业园龙天路27号

电话: 0411-8628-6788 传真: 0411-8628-5677

E-mail: info@chi-vac.com HP: <http://www.chi-vac.com>

表面处理和薄膜生长产品: 氩离子枪、RHEED、磁控溅射靶、束源炉、电子轰击蒸发源、样品台。



超高真空腔室和薄膜生长设备: PLD系统、磁控溅射系统、分子束外延系统、热蒸发镀膜装置。

