

物理所金属纳米结构中光和物质相互作用研究获系列进展

文章来源：物理研究所

发布时间：2013-09-05

【字号：小 中 大】

金属纳米颗粒和纳米结构中的表面等离激元 (surface plasmon polaritons, SPPs) 具有众多独特的物理性质，在集成光子学、生物传感、精密测量、信息处理和清洁能源等领域有广泛的应用前景。金属微纳结构中光和原子、分子、量子点等物质的量子相互作用的研究一直是微纳光学领域的一个核心科学问题。利用金属纳米结构的表面等离子体共振 (SPR)，可以显著地提高入射光和物质的荧光辐射、拉曼散射和非线性光学等相互作用的效率，并有效地调控原子和分子辐射的空间和时间分布形态，产生高效的光源。最近中科院物理研究所/北京凝聚态物理国家实验室 (筹) 光物理重点实验室李志远研究员领导的课题组，在金属纳米结构中光和物质相互作用物理的理论和实验研究上获得系列进展。

(1) 表面等离激元纳米激光器半经典解析理论的创建。在金属微纳结构里面引入增益介质能够补偿表面等离激元的本征传播损耗，并产生表面等离激元的受激辐射放大 (spaser)，国际上不少研究组利用这一效应已经研制成功了尺寸为几十纳米的超小型激光器。李志远小组从2010年开始对金属纳米颗粒和增益介质的相互作用做了深入的理论研究，获得了若干进展【*Nano. Lett.* 10, 243(2010); *Opt. Lett.* 36, 1296 (2011)】。最近，李志远和博士生钟晓岚针对金属纳米腔中表面等离激元和增益介质的量子相互作用，能量交换以及spaser性能等重要的物理问题，创建了一套半经典的纳米激光器解析理论。该理论使用经典的谐振子来模拟增益介质原子，使用麦克斯韦方程组描述光场的演化，使用四能级速率方程描述光场和增益原子的相互作用。该理论可以评估纳米激光器的各种性能 (输出功率、饱和、阈值等) 与纳米激光系统各组成部分—纳米腔参数 (品质因子、模式体积、损耗、自发辐射效率等)，原子参数 (数密度、线宽、共振频率等)，以及外界参数 (泵浦速率) 等的依赖关系。因此，该理论具有很好的普适性，可用于半导体微腔激光器，光子晶体微腔激光器以及等离激元纳米激光器等。在此之前，由于纳米激光器几何构型的复杂性，所有的理论研究都采用纯粹数值模拟计算的办法，很难对纳米激光器的机理和性能有一个清晰系统的理解。相关解析理论结果发表在2013年8月份的 *Phys. Rev. B* (88, 085101) 上。

(2) 金纳米棒对染料分子荧光增强的微观和宏观调控。在利用金属纳米结构的SPR效应增强分子的荧光辐射效率上，激发波长的位置决定了SPR和荧光分子的激发效率，而SPR波长与荧光辐射波长的匹配程度又决定着荧光分子的辐射效率。传统的实验研究只采用单个SPR模式，无法同时匹配荧光分子的吸收和发射峰，能产生最高“激发-辐射”效率的SPR波长既不与激光的激发波长重合，也不与荧光分子的辐射波长重合，而是介于两者之间，因而，增强效果有限。李志远和李家方副研究员、博士生刘思耘等首次提出并实验验证了双SPR波长匹配的荧光增强物理机制。将金纳米棒的横向和纵向SPR波长分别与荧光分子的激发和辐射波长匹配，使荧光分子的激发和辐射效率同时达到最大，即获得最强的“激发-辐射”效率，最大增强因子达到20倍之多。此外，他们发展了一种薄膜拉伸方法来定向排列群体金纳米棒复合纳米颗粒，使大量金纳米棒的长轴沿同一方向排列。群体金纳米棒的特性与单个金纳米棒非常近似，但操控能力大大增强，可实现对金纳米棒周围荧光分子的辐射调控 (包括发光强度和辐射偏振等等)，具有高效率、低成本和高产率等优势。利用这种定向排列的金纳米棒复合纳米结构可以将窄线宽的圆偏振激发光，方便快捷地转换为高效率、宽波带的线偏振光。相关工作发表在2013年的 *J. Phys. Chem. C* 117, 10636-10642 (2013) 和 *Adv. Opt. Mater.* 1, 227-231 (2013) 上。他们还应邀为美国光学学会新创刊的杂志 *Photonic Research* 1, 28-41 (2013) 第一期撰写综述论文，研究成果被选为封面插图。

(3) 利用光机械系统中的光子阻塞效应产生单光子源。单光子源是量子光学、量子密码、量子通讯和量子计算技术中的关键部件。李志远和硕士生邱柳等提出，利用光机械系统中的光子阻塞效应可以产生优质的单光子源。该系统由包含可变反射镜的高Q光学谐振腔构成，当入射相干光源耦合进入谐振腔时，产生的辐射压力在单光子水平上可以改变谐振腔的共振频率。这种光和纳米机械系统强耦合产生的光子阻塞效应是一种非线性光学效应，可以改变入射光的量子态，产生所需要的出射光子量子态。理论研究发现，通过调控入射相干光源的性能参数，包括脉冲

的宽度、持续时间、波形、面积和振幅等，可以压缩零光子态和多光子态的几率，提高单光子态的几率。理论研究为提升单光子源的性能提供了新的思路，结果发表在2013年6月份的*J. Opt. Soc. Am. B* 30, 1683-1687上，并被2013年8月份的光学期刊*Nature Photonics* 7, 585作为Research Highlights加以报道。

以上研究工作得到了国家自然科学基金委、科技部和中科院项目的资助。

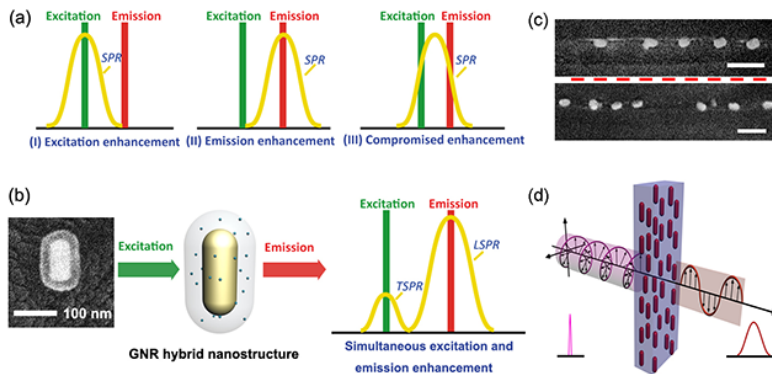


图1 (a-b)利用金纳米颗粒SPR实现荧光增强的物理机制示意图。(a)单个SPR波长分别与荧光激发和辐射波长匹配时实现荧光的激发增强(I)和辐射增强(II)，以及利用纳米颗粒SPR带宽同时覆盖荧光激发和辐射波段实现折衷的荧光增强(III)；(b)利用金纳米棒的横向SPR模式(TSPR)增强荧光激发，纵向SPR模式(LSPR)增强荧光辐射，以实现荧光激发和辐射同时增强。(c)沿虚线方向定向排列的金纳米棒SEM图片。标尺长度：500 nm。(d)定向排列的金纳米棒复合纳米颗粒在圆偏振光激发下辐射光的偏振特性示意图。

打印本页

关闭本页