

表面等离子激元受激辐射方向性调控研究进展

陈佳琦, 袁国秋, 王孟, 曹敏

南通大学理学院, 江苏 南通 226019

摘要 金属微纳结构中有关光与原子、分子和量子点等物质的相互的作用研究是微纳光学领域的一个核心科学问题。近年来, 得益于迅速发展的纳米材料制备方法和纳米加工技术, 国内外学者在表面等离子激元受激辐射的实现以及等离子激元激光器的研制方面取得了许多重要进展。总结了基于金属微纳结构共振腔的表面等离子激元受激辐射的出射方向性研究进展, 归纳了可以提高方向性的共振腔结构, 分别阐述了其中的物理机制, 对于不同共振腔结构的特点与性质进行了分类比较。

关键词 表面等离子激元受激发射; 方向性; 共振腔结构; 物理机制

中图分类号 O432.1+2

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.030007

Advances in Directional Control of Surface Plasmon Amplification by Stimulated Emission of Radiation

Chen Jiaqi, Yuan Guoqiu, Wang Meng, Cao Min

School of Science, Nantong University, Nantong, Jiangsu 226019, China

Abstract The interaction between light and atoms, molecules, and quantum dots in metallic micro-nano structures is a core scientific issue in the field of micro-nano optics. In recent years, scientists have made great progress in realizing surface plasmon amplification by stimulated emission of radiation and developing plasmon lasers due to the rapid development of nano-material preparation methods and nano-processing technology. We review the advances in directionality of surface plasmon amplification by stimulated emission of radiation based on metal micro-nano resonant cavities, list several kinds of resonant cavity structures which improve the directionality and elaborate on the physical mechanism. Meanwhile, we also compare the characteristics and properties of different cavity structures.

Key words surface plasmon amplification by stimulated emission of radiation; directionality; cavity structures; physical mechanism

OCIS codes 240.6680; 140.4480; 190.5890

1 引言

光与物质相互作用研究是一个经典而永恒的课题。随着人们对光本质的逐渐认识以及对物质结构的深入探索, 光与物质相互作用的新现象不断涌现。在满足频率和波矢匹配的情况下, 光入射时能够激发金属表面电子集体振荡的表面等离子激元共振 (SPR)^[1-6], 形成束缚在金属与介质界面传播的消逝

波, 从而在界面附近产生巨大的近场增益。当金属表面存在微粒或微小沟槽, 或者采用亚波长尺寸金属颗粒时, 光入射时能够激发局域表面等离子激元共振 (LSPR)^[7-8], 并由此引发增强的光散射和吸收。局域的表面等离子激元通过将光学模式压缩到纳米区域, 使光和物质的相互作用达到以往技术无法企及的领域, 在表面增强拉曼散射、纳米传感和波导、非线性光学以及量子光学中都有重要应用^[9-12]。

收稿日期: 2017-09-07; 收到修改稿日期: 2017-10-06

基金项目: 国家自然科学基金(11404174)

作者简介: 陈佳琦(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事微纳光学与光子学方面的研究。E-mail: 1515605501@qq.com

导师简介: 曹敏(1979—), 男, 博士, 副教授, 主要从事微纳光学与光子学方面的研究。

E-mail: mcao@ntu.edu.cn(通信联系人)

纳米尺度的光学模式增强了表面等离子激元和单量子体系(如原子、染料分子和半导体量子点等)的相互作用,源自金属纳米结构表面的激发态电子与紧邻的单量子体系激子之间耦合作用的激发动力学过程呈现出新奇的光学现象^[13-16]。例如,通过调节金属纳米结构附近的二能级体系激发态布居数和弛豫速率,可以控制荧光分子或半导体量子点的辐射谱^[17],实现方向性的发射和高效的单光子产生^[18];通过选择性地增强 CdS 纳米晶体的表面态辐射,实现两量子比特的纠缠^[19];利用表面等离子激元与量子辐射体激子的强耦合作用实现类似原子光学中的真空 Rabi 分裂^[20-21]或量子 Fano 效应^[22-23];特别引人关注的是,通过在毗邻的电介质中引入由染料分子、半导体量子点或二能级原子组成的光学增益介质,可以补偿金属表面等离子激元模式共振时的金属损耗,从而实现表面等离子激元的受激辐射放大(SPASER)。这个新颖的构想自 2003 年由 Bergman 和 Stockman^[24]提出以来备受人们关注。基于金属纳米结构中 SPASER 效应的激光器因最终发射的还是光子而被称作等离子激元激光器,这类超越衍射极限限制的纳米激光器是表面等离子激元光子学领域的一个新兴的热点研究方向^[25]。

近几年来,得益于迅速发展的纳米材料制备方法和纳米加工技术,国内外学者在 SPASER 的实现以及降低阈值、获得室温工作条件方面取得了许多重要进展^[26-32]。张翔研究组^[33]将半导体 CdS 的介质波导模式与银表面的表面等离子激元模式耦合形成杂化等离子激元波导,利用其极强的模式限制以及较小的传播损耗,研制出了具有很低阈值水平的纳米激光器。Nezhad 等^[34]在金属共振腔与半导体增益介质中引入介质屏蔽层,通过优化设计介质层的厚度,研制出了能在室温工作的低阈值纳米激光器。与此同时,他们还利用表面等离子激元的全内反射减少辐射损失,获得了室温下突破衍射极限的半导体激光^[35]。王振林研究组^[36]设计了一种由纳米量级的银层与光学增益介质核组成的球壳纳米激光器。这种金属纳米球壳结构可以支持具有很高品质的局域等离子激元腔共振模式,由此产生远低于其他类型的等离子激元纳米激光器的阈值。丁佩等^[37]利用内外包裹着增益介质的对称性破缺核壳结构,通过研究在增益下的散射效率和近场增强得到比对称核壳结构阈值更低的表面等离子激元的受激辐射放大。Zhang 等^[38]在银纳米天线阵列中嵌入荧光聚苯乙烯球作为共振腔,利用阵列吸收抽运光的能量并将

能量集中到荧光聚苯乙烯球,得到室温工作条件下的低阈值等离子激元纳米激光器。Wei 等^[39]利用银包裹等离子激元共振腔末端作为高反射面组成非对称杂化等离子激元 Fabry-Perot(F-P)腔,制成了具有超高 Purcell 因子的低阈值纳米激光器。

受激辐射的方向性作为激光器的重要特性,是研制 SPASER 的另一个重要参数。上述研究中受激辐射放大的等离子激元,由于其波矢与电磁辐射的波矢在自由空间的巨大差异,最终发射的光子向各个方向散射。或者说,对于尺寸减小到衍射极限以下的单体结构,其产生的模式相当于单个偶极子产生的模式,方向性也类似偶极子的性质向四周发射^[40],方向的发散性使得到的强场不能集中于某一方而降低了效率。现有激光发射的方向性通常是通过精密调控由高品质的光学反射镜组成的 F-P 腔来完成^[41-42],而当一个光学共振腔使用特定的设计按比例缩小到纳米级,系统本身不需要任何外部的腔体就能提供光学反馈,其激光发射是定向的还是全向的,取决于共振腔的几何形状和主要的共振腔模式^[43],因此可以通过合理构建共振腔的结构使腔内激发的表面等离子激元模式发生相互作用,从而调控受激辐射的方向性。

本文介绍了表面等离子激元受激辐射放大的基本工作原理,分类比较了各类等离子激元共振腔的结构特点,从共振腔中等离子激元模式间的相干耦合作用出发,阐述了各种基于金属纳米结构的共振腔调控 SPASER 出射方向的方法。

2 SPASER 基本原理

产生 SPASER 的结构与传统激光器类似,通常包括金属纳米结构共振腔、增益介质以及激励源。以金属纳米颗粒为例,通过光或其他激励源激发颗粒产生 LSPR,将包裹在颗粒外层或填充在颗粒内部且掺入染料分子、半导体量子点或二能级原子等的增益介质用于补偿 LSPR 的吸收及散射损耗(图 1)。

等离子激元受激辐射的基本原理可用如图 2 所示的过程示意图阐述^[45]。增益介质受到外界激发跃迁到高能级状态,产生电子-空穴对,随后电子弛豫到激发态能级,在激发态电子回到基态复合的过程中,由于其紧邻的金属纳米颗粒 LSPR 能级与激发态能级相当,使激子的能量通过 Förster 能量转移传递给金属纳米颗粒,而不是向真空中辐射一个光子。当在金属纳米颗粒中的等离子激元振荡还未消逝,而增益介质中又一个电子被激发时,振荡中的等

离激元模式则迫使该激发电子将能量给予已存在的同一模式^[46]。由表面等离激元共振产生的强局域场将提供反馈,提高增益介质内部的量子效率,以激发更多的电子^[47]。当反馈足够强使得增益介质中

激发电子的能量足以补偿表面等离激元共振的损耗时,建立增益与损耗的动态平衡,引起表面等离激元的雪崩式放大,形成相位相干的受激辐射态,完成激光中的非平衡相变^[44]。

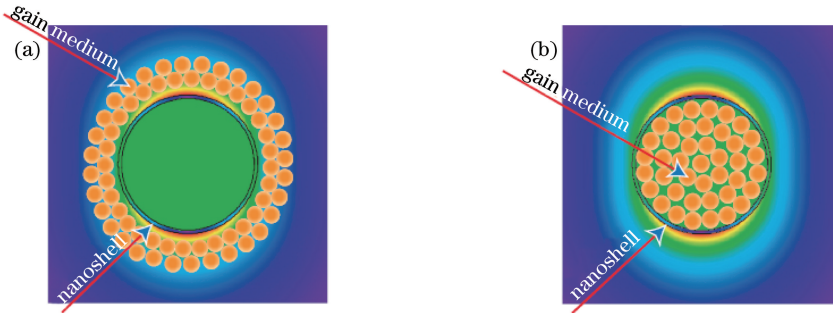


图 1 偶极模式场背景下增益介质在(a)球壳外和(b)球壳内部的 SPASER 示意图^[44]

Fig. 1 Schematic of a nanoshell SPASER where the gain medium is (a) outside of and (b) inside the shell, on the background of the dipole mode field^[44]

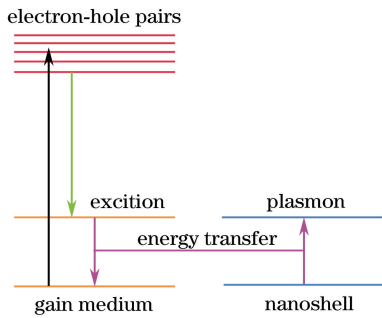


图 2 表面等离激元受激辐射过程示意图^[44]

Fig. 2 Schematic of the spasing process^[44]

3 单颗粒共振腔

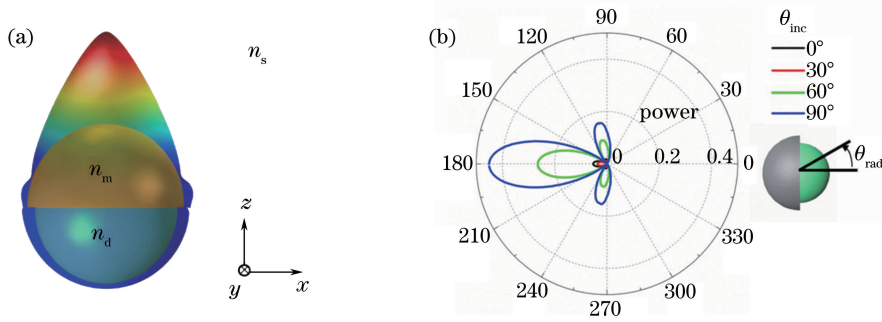
单颗粒共振腔,特别是球形金属纳米颗粒,由于结构简单、制作方便而被最先用于表面等离激元受激辐射的研究^[48-50],但其球对称性使得最终的发射呈现各向同性的特点。此外,一些轴对称形金属纳米颗粒,如核壳球形^[51-53]、纳米棒形^[54-55]、圆盘形^[56-57]和纳米环^[58]等,在对称面内也存在各向同性的发射性质。为了提高方向性出射,可通过利用颗粒上不同位置的等离激元模式的相互耦合或者利用颗粒与毗邻衬底的等离激元模式的相互作用来调控方向性。

3.1 对称性破缺结构

对称性破缺提供了一种调控金属纳米结构中局域表面等离激元相互作用的方法^[59],通过合理地设计单个金属纳米颗粒的几何形状,使基于对称破缺结构的等离激元共振腔产生具有特定出射方向的表面等离激元共振。最近,Meng 等^[60]理论上模拟了由半

球壳金属腔与增益介质球组成的谐振系统的 SPASER 特性。研究表明,该系统沿着半球壳腔轴线方向单向性地辐射光线[图 3(a)],且与抽运光的偏振方向和入射角度都无关[图 3(b)]。系统中的金属半球壳由银组成,这是因为银具有比金材料更高的品质因数且能产生光谱范围很宽的等离激元共振^[61-62]。同时,银的相对介电常数虚部更小,可以减少损耗,降低 SPASER 增益阈值。该银共振腔在入射光作用下会激发两种模式的 LSPR,分别为键合模式(bonding mode)和反键合模式(anti-bonding mode),用等离激元杂化理论可解释为^[63-64]:银半球壳由金属纳米球和电介质空腔两个部分组成,其中键合模式是两者受激产生极化电荷呈同相分布时产生的共振模式,反键合模式为极化电荷呈反相分布时产生的模式^[65]。需要指出的是,只有反键合共振模式呈现单向性出射特性。这是因为反键合模式中金属纳米球与空腔上的 LSPR 在图 3(a)所示的 z 轴正方向相干相长,而在反方向相干相消。

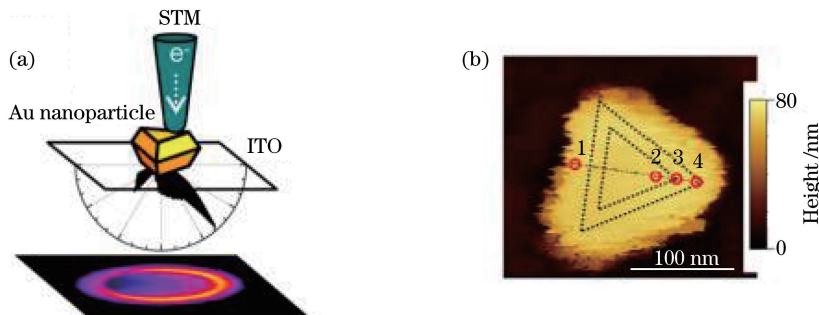
相比半球壳形对称破缺颗粒所产生的处于三维空间的方向性发射^[66-69],圆盘或环形等二维结构共振腔能产生二维面内的方向性出射。这些结构在满足一定的尺寸条件时能产生回音壁模式(WGM)^[70-73],该模式是由对应于表面法线方向角度较大的人射光在腔的边界处循环反射而得到的^[74]。然而在圆盘等具有旋转对称性结构中产生 WGM 所得到的面内发射光也存在各向同性的特点,且波长尺度的回音壁腔只能通过由表面粗糙度引起的消逝波散射或衍射将发射光耦合到腔外,因

图3 (a)银半球壳包裹的SPASER纳米腔的光辐射^[60]Fig. 3 (a) Light radiation from a silver semishell-capped SPASER nanocavity^[60]; (b) polar plot of the intensities of power flow patterns at various θ_{inc}

此同样可以利用对称破缺的回音壁腔来实现 WGM 的方向性出射^[75]。但要实现回音壁模式与表面等离子激元的耦合,需要调节 LSPR 沿着 WGM 场的极化方向形成杂化回音壁模式,以减少共振加宽和频率失配^[58],这在对称结构中很容易实现而在非对称回音壁腔中却存在困难。

值得一提的是,利用低能量电子驱动的形式也能使金属纳米颗粒产生局域表面等离子激元振荡^[76-81],并且当激发的 LSPR 在颗粒各边角处的散射满足一定的相位条件时,模式间的相互作用能够得到某个方向的增强效应,从而调控出射光方向。最近,Le Moal 等^[82]通过扫描隧道显微镜 (STM) 探针针尖发射低能量电子激发单个三角形金纳米颗粒的局域表面等离子激元共振,得到方向随针尖位置改

变的发射光。该结构由一个截断的三角棱锥颗粒、STM 探针以及接收装置组成,针尖与样品表面间隧道结内的电子激发颗粒上的 LSPR,产生的辐射主要有两个发射方向[图 4(a)]^[83]。移动探针针尖沿着上表面三角形的对称轴在不同位置发射电子[图 4(b)],当激发点偏离三角形中心点时,发射图样的极化分布近似于一个方向倾斜的点偶极子。这是由于当针尖位置远离颗粒中心时,破坏了所激发模式的对称性,隧道结内形成的针尖诱导间隙等离子激元 (tip-induced gap plasmon) 会选择性地耦合到三角形颗粒的面内和面外局域等离子激元模式。随着偏离中心位置的距离增大,与面内局域等离子激元模式的耦合会加强,导致发射图样呈现非对称分布(图 5),从而达到调控方向性发射的效果。

图4 (a) STM 针尖位于氧化铜锡(ITO)包裹的衬底上纳米颗粒上方的实验配置图^[82];

(b) 纳米颗粒的 STM 图像(针尖位置:标号 1-4)

Fig. 4 (a) Schematics of the experimental configuration with the STM tip above the nanoparticle (NP) on the ITO-coated substrate^[82]; (b) STM image of the NP (tip positions: numbered 1 to 4)

3.2 镜像模式结构

除了通过引入对称性破缺导致模式杂化来提高等离子激元散射方向性,颗粒与外部电介质的镜像模式耦合也能调控方向性。King 等^[84]将核壳结构颗粒置于平面介质衬底上,通过改变入射光偏振方向和衬底材料介电常数调控散射方向性。颗粒由半个

金纳米球壳和内部 SiO_2 球组成,底部紧靠电介质衬底,分别由不同偏振的光以 45° 角入射到颗粒上(图 6)。当采用 S 偏振的入射光激发时,颗粒上产生的横向等离子激元模式能产生垂直于衬底面发射的散射光[图 6(a)];当入射光为 P 偏振时,入射方向呈倾斜角度,导致所激发的等离子激元模式分为横向模式

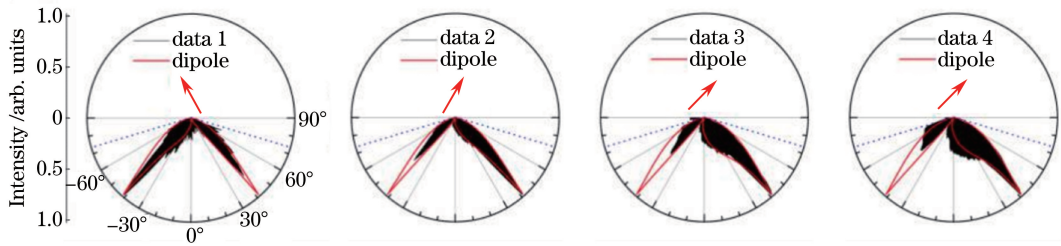


图 5 发射强度随极化角 θ 变化的极坐标图, 分别对应图 4(b) 中 4 个针尖位置, 填充曲线表示实验值, 红线表示理论值^[82]

Fig. 5 Polar plots of the intensity versus polar angle θ , corresponding to positions of the tip in Fig. 4 (b) with experimental (filled curve) and theoretical (red line) data^[82]

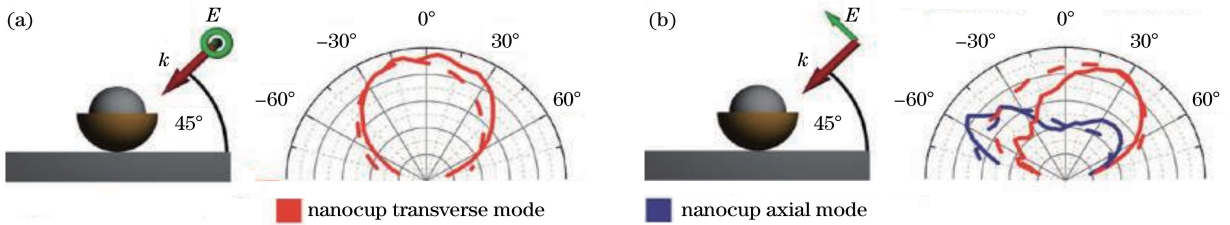


图 6 玻璃衬底上半球壳等离激元模式的角相关远场散射图^[84]。(a) 直立的半球壳在 S 偏振光下的散射; (b) P 偏振光入射到半球壳同时激发横向和轴向等离激元模式

Fig. 6 Angular dependence of far-field scattering pattern from semishell-capped plasmon modes on glass substrates^[84].

(a) Scattering of S-polarized light by an upright semishell-capped; (b) P-polarized light incident on a semishell-capped excites both the transverse and the axial plasmon modes

和轴向模式两种, 产生垂直于衬底面和沿着衬底面发射的散射光[图 6(b)]。值得注意的是, 横向模式出射光的方向在该种激发光的入射下会受到模式间相互作用的干扰而较理论值有所偏离。

当衬底采用高介电常数电介质时, 纳米颗粒上激发的表面等离激元模式能与衬底的镜像模式发生强耦合作用并影响出射光方向。在 P 偏振入射光以 45° 角激发时, 颗粒上的 LSPR 与衬底中的镜像模式在倾斜角度上相互耦合[图 7(a)], 最终导致出射光沿入射光反向发射[图 7(b)]。这里,

电介质衬底本身不会产生等离激元共振, 因而不会直接与金属颗粒的表面等离激元模式相互作用, 只有当金属纳米颗粒受激产生极化电荷时, 衬底中感应出镜像电荷, 与纳米半球壳颗粒的 LSPR 相互耦合, 形成高阶多极等离激元杂化模式, 从而影响发射光的方向性。由于该过程是等离激元模式与高介电常数衬底强耦合的结果, 因此改变衬底的介电常数能影响模式的相互作用, 越高的介电常数往往能产生更强的镜像场和更强的相互作用^[85]。

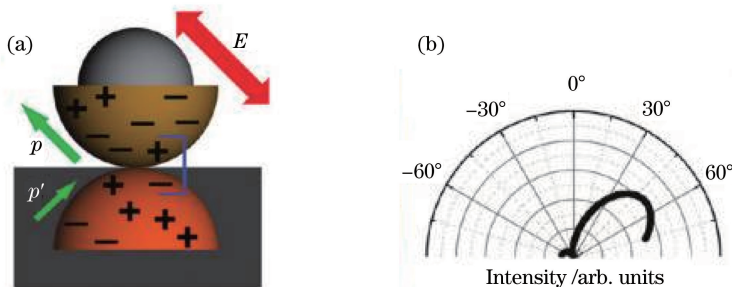


图 7 (a) 实验中偏振光入射下半球壳的表面电荷和衬底中镜像电荷的定性方向^[84]。绿色箭头表示半球壳的有效偶极矩 p 和镜像电荷分布的有效偶极矩 p' ; (b) 极坐标中散射光的角分布

Fig. 7 (a) Qualitative orientation of surface charge on the semishell-capped and the image charge within the substrate for the experimental polarization of incident light^[84]. The green arrows depict the orientation of the effective dipole moment of the semishell-capped p , and the image charge distribution p' ; (b) the angular distribution of scatter light in polar coordinates

4 波导共振腔

4.1 颗粒与衬底波导

当金属纳米颗粒置于金属薄膜衬底上,衬底本身也能被激发表面等离子共振,颗粒与衬底各自产生的模式在满足一定的波矢匹配条件时,形成同相振荡的等离子共振杂化模式,从而调控光发射方向^[86]。Akselrod等^[87]利用银纳米立方块和金膜衬底组成波导共振腔[图8(a)(b)],得到了高发射率增强、高辐射效率、亚波长尺寸的方向性发射。将增益介质材料嵌入颗粒与衬底的间隙内[图8(c)],解决了银颗粒与金膜衬底上表面等离

激元波矢失配的问题,使得两种模式能在作为波导的介质层内耦合,形成局限在间隙内的杂化模式。波导中的主要电场方向沿 z 轴方向,使介质层中激发的所有可能的偶极子发射方向总和垂直于间隙面[图8(a)(c)]。波导内表面等离激元的杂化与金属纳米块的大小、厚度以及介质材料的折射率相关,改变这些因素能够调节共振波长,得到波长可调的定向发射光^[88]。然而,在颗粒靠近衬底一侧的边缘处的电偶极子方向较中间大部分方向有所不同,使得此处的电场方向发生偏离^[89],导致辐射发散角相对较大,在大于 64° 方向角的位置处也能探测到发射光[图8(d)]。

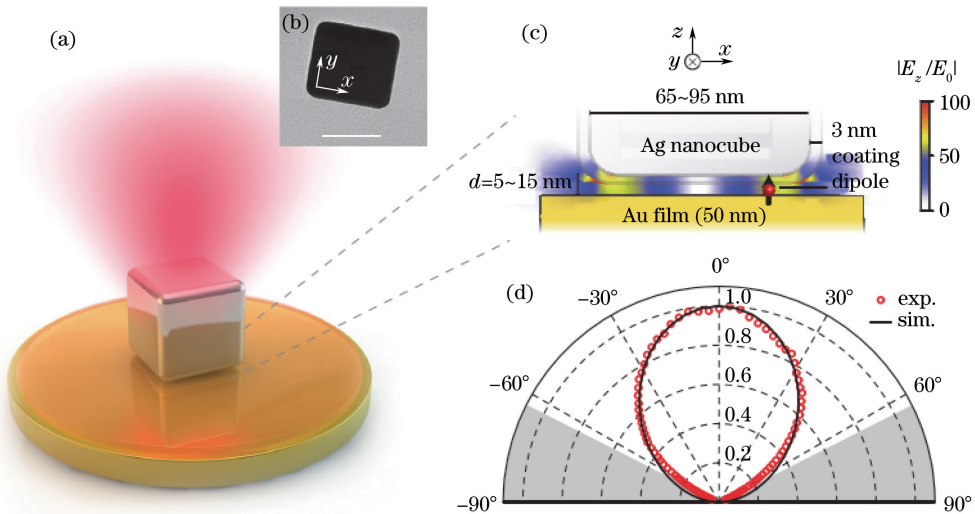


图8 (a)置于金膜上的银纳米块示意图,两者间由填充荧光材料的隔离层隔开^[87]。红色圆锥表示纳米间隙区产生的增强发射的方向。(b)单个银纳米块的透射电镜图像;(c)金膜与银纳米块耦合的剖面图;(d)模拟(黑色)和测量(红色)的从单个纳米尺度贴片天线出射的辐射图案

Fig. 8 (a) Schematic of a silver nanocube situated on a gold film separated by a spacer layer containing fluorescent material^[87]. The red cone indicates the directionality of the enhanced emission originating from the nanogap region; (b) transmission electron microscopy images of a single silver nanocube; (c) schematic cross-section of a film-coupled silver nanocube; (d) simulated (black) and measured (red) radiation pattern from a single nanoscale patch antenna

4.1 天线波导

光学天线为光与纳米尺寸物质的相互作用带来了巨大的可能性。通过合理设计的天线模式能够利用近场耦合调控相位、极化态、辐射方向和光学角动量等光学场的电磁参数。早在1926年,日本东北大学的宇田新太郎首次介绍了利用天线原理实现电磁波的引向,即所谓的八木-宇田天线(Yagi-Uda antenna)^[90]。该天线利用有源振子发出的辐射信号在引向振子处得到加强而在反射振子处抵消,从而获得电磁波的方向性发射。近年来此理论被运用到等离激元纳米天线的设计中,Fang等^[91]利用天线导向作用将纳米线与外界发射振子耦合,实现了

等离激元的方向性出射,并通过天线间的模式相互耦合调控表面等离激元的传播^[92]。

相比于单颗粒共振腔,利用模式相互作用提高方向性的机理,天线波导可以通过将发射源耦合到LSPR模式来引导光的定向出射。Curto等^[93]利用金纳米线作为表面等离激元谐振腔,将量子点的发射耦合到纳米线中。改变纳米线的长度可以产生具有不同奇偶电荷对称性的高阶模式,且阶数随着长度的增大而增加[图9(a)(b)]。该结构中单量子点通过破坏量子点-天线系统(quantum dot-antenna system)的反演对称性实现与各高阶模式的耦合。因纳米线波导与量子点的近场耦合及其发射方向受

到各模式对称性与纳米线上特征电荷空间分布的调控,角辐射图样有所不同^[94]。然而,其角辐射图样

中存在多个发射方向,且波瓣宽度较宽,从而导致总发散角较大改为[图 9(c)(d)]。

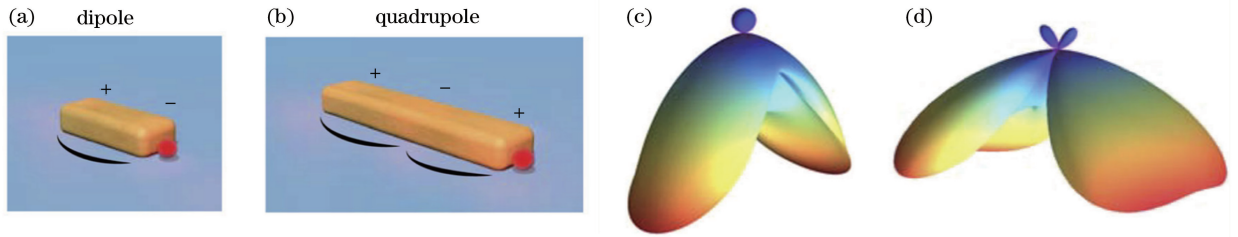


图 9 (a)(b)单个量子点置于金纳米线的末端^[93]; (c)(d)与玻璃衬底上方天线纵向轴线平行的电点偶极子和点四极的角辐射图样
Fig. 9 (a) and (b) A single quantum dot is positioned at the end of a metal nanowire^[93]; (c) and (d) angular radiation patterns of an electric point dipole and a point quadrupole oriented parallel to the longitudinal axis of the antenna above a glass substrate

5 阵列结构共振腔

近年来,人们发现通过在金属材料表面构建亚波长周期性结构的共振腔作为耦合器能进行 LSPR 和光子的转换,其产生的等离激元模式被称为晶格等离激元(lattice plasmon)^[95-96]。相比单个纳米颗粒局域表面等离激元产生的较宽谱线,一维或者二维金属纳米颗粒阵列由于具有基于瑞利反常衍射与阵列颗粒 LSPR 的耦合作用,呈现出非常窄的线宽^[97-98]。这是因为周期性结构的衍射模式在色散关系不同的衬底和环境介质边界处存在瑞利截止波长,当满足此波长的入射光激发阵列时,部分衍射波沿着衬底传播并与阵列中纳米颗粒相互作用。如果该截止波长趋近于阵列中单个纳米颗粒的 LSPR 波长,则能量能够以很强的效率从入射光束传到等离激元模式,因此能获得很窄的线宽以及尖锐的等离激元共振峰^[99]。

5.1 颗粒阵列

鉴于阵列结构的上述优势,采用金属纳米颗粒阵列能产生高强度、窄线宽的 SPASER 发射。颗粒阵列共振腔通常由介质衬底承载的周期性排列的金属纳米颗粒及其毗邻的增益介质组成(图 10)^[100-101]。增益介质可补偿金属的吸收损耗以及颗粒表面的散射损耗,同时,阵列结构中由颗粒的 LSPR 散射形成的晶格表面等离激元能够提高增益介质中的激发率以提供反馈,当损耗与增益达到动态平衡时形成共振放大表面等离激元^[44]。

不同于传统法布里-珀罗(F-P)腔结构中由外置谐振腔调控光发射的方向性,阵列结构中利用颗粒的 LSPR 与晶格等离激元相互耦合来提高方向性光输出。Vecchi 等^[103]利用增益介质薄膜覆盖在周期

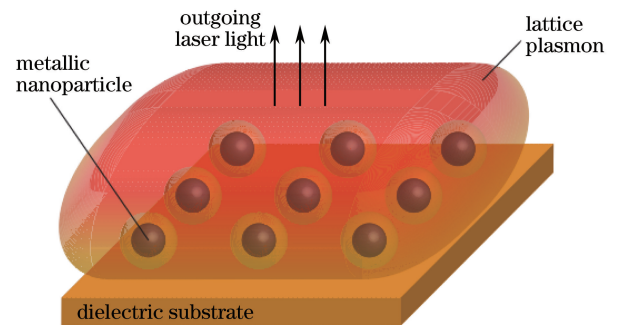


图 10 大面积晶格共振等离激元激光器^[102]

Fig. 10 Large-area lattice plasmon lasers^[102]

性排列的金纳米颗粒上实现了定向增强的光发射。在入射光抽运下,每个颗粒上产生的 LSPR 将光场模式局限在颗粒周围的纳米区域内,阵列中各纳米颗粒的 LSPR 经多次反射造成的总散射形成了晶格等离激元的布拉格衍射,抑制单个颗粒的辐射阻尼,通过衍射耦合形成很强的方向性效应,使最终的出射光垂直于阵列面发射,并使发射光得到增强^[102,104-105]。该定向发射增强的程度取决于增益介质中分子的量子产率。

Zheludev 等^[106-107]用非对称金属开口环组成金属纳米颗粒阵列,观察到垂直于阵列面出射的 SPASER 发射光。该结构由增益介质板及嵌在其表面的金属纳米开口环阵列组成,抽运光束垂直于板面和阵列面入射,在开口环谐振腔内产生强捕获模式(trapped mode)同相振荡(图 11)。由于在垂直方向上电子的同相集体振荡损耗最低,最容易被激发,同时,非对称结构又抑制了捕获模式振荡中的非辐射特性,使得储存在电子振荡中的一部分能量经 LSPR 的相干传播发射到自由空间,产生垂直于阵列面的发射光。这里,环的非对称程度能够控制振荡模式耦合到自由空间的强弱,且非对称模式振荡

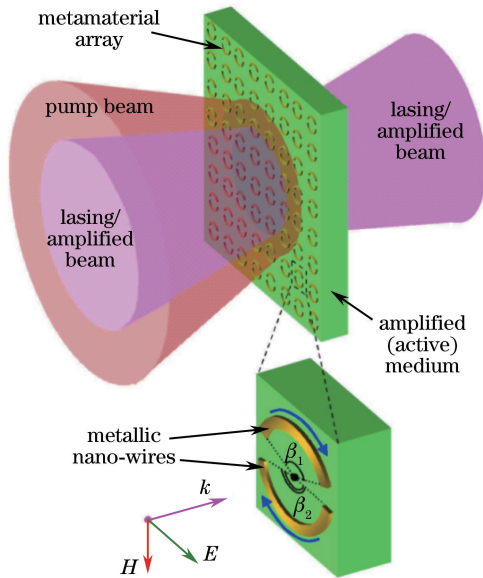


图 11 由增益介质板(绿色)承载的规则排列的金属非对称开口环谐振器阵列组成的 SPASER 激光器^[107]

Fig. 11 The lasing SPASER consists of a gain medium slab (green) supporting a regular array of metallic asymmetrically-split ring resonators^[107]

中与电磁偶极子发射相关的辐射损耗在规则排列的无限大阵列中能相互抵消,使开口环中的强振荡能获得比较长的寿命,由此得到较高的 Q 值。

有趣的是,当阵列结构与波导结合时能够将光侧向注入到光波导中,并储存在其中直到被提取^[108-110]。de Boer 等^[111]提出了利用金属纳米颗粒组成的六角形阵列结合发光层使光侧向发射至玻璃。金属颗粒阵列被包裹在折射率为 n_2 的发光层内,通过衍射效应将光以一定角度发射至阵列下方折射率为 n_3 的全反射波导层内[图 12(a)]。由于瑞利反常衍射引起的衍射波在表面传播,调节阵列周期将改变衍射条件,等同于改变晶格中布里渊区的大小,使入射到玻璃中的光发射角度能从 42° 调节到 46° [图 12(b)(c)]^[112-113]。另一个影响光发射性质的重要因素是发光层的厚度,它能调控 LSPR 与光波导中传导模式的耦合程度^[114],利用有限元方法计算出最优厚度,得到很高的发射强度。不仅如此,金属纳米颗粒的形状和尺寸对晶格等离激元的色散关系、明暗模式的耦合、 Q 值因数以及辐射阻尼等也均有影响,也能调控最终的发射特性^[115]。

5.2 孔阵列

周期性孔阵列中的表面等离激元在亚波长增强透射现象中具有重要作用,能运用到异常透射现象的研究中^[116]。此外,孔阵列由于其周期性结构使

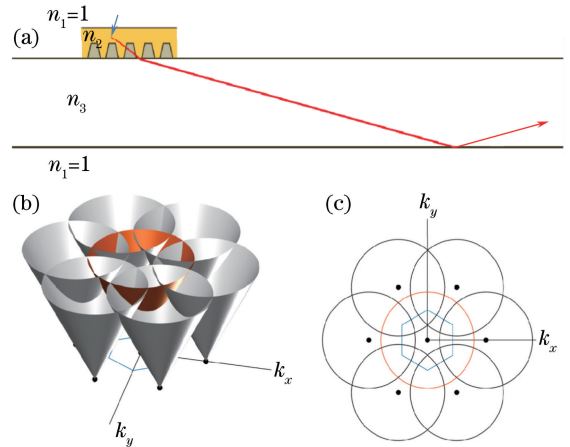


图 12 (a)等离激元发射光注入到折射率为 n_3 的光波导中的原理图^[111]; (b)能量与二维平行波矢量图; (c)为图 12(b)中对应发射光能量的水平截面图

Fig. 12 (a) Schematics of plasmonic emitting light injected in a light guide with index n_3 ^[111]; (b) diagram of energy versus two-dimensional parallel wave vector; (c) horizontal cross section corresponding to the emission light energy in Fig. 12(b)

表面等离激元受到包括色散、散射、衍射、干涉等可控因素的调控,可产生高方向性的光发射^[117]。Meng 等^[118]通过在金属薄膜上周期打孔,实现室温下高方向性的单模红光发射。不同于其他将金属孔阵列作为等离激元共振腔的结构,该周期性孔阵列的构建在制作过程中优先于光学增益介质的沉积[图 13(a)],这使得增益介质的化学成分不受等离激元纳米结构制造过程的影响。研究表明,该共振腔的定向 SPASER 发射光并不是由各个孔中 LSPR 相互作用经增益介质放大而形成的,而是由于表面等离激元与周期性势场中传播的布洛赫波(Bloch waves)产生的强耦合效应,及其与增益介质的共振反馈导致的。因为周期性金属孔阵列在 SPASER 的发射波长附近具有很强的光透射能力,该共振腔上下表面出射的发射光的光谱图样与共振波长基本相同,且拥有很小的发散角,约为 $1^\circ \sim 3^\circ$ [图 13(b)]。

值得一提的是,Stein 等^[119-121]报道了利用周期性金属光栅实现表面等离激元束的自准直。其基本原理也是基于表面等离激元与周期性势场中传播的布洛赫波的强耦合效应,与上文中阵列结构调控等离激元方向的原理相同。另外,类似于电子驱动单颗粒共振腔,阵列结构也能利用低能量电子激发表面等离激元,通过改变激发位置来调控光发射方向。Cannesson 等^[104]利用 STM 探针尖端发射的隧道电子激发等离激元晶体产生方向性发射的表面等离激

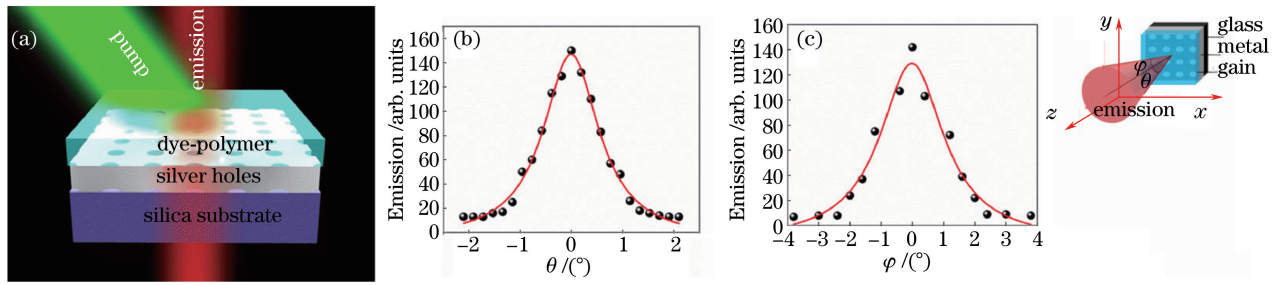


图 13 (a) SPASER 装置结构图^[118]。该系统由周期性孔阵列覆盖一层染料薄膜组成；(b)水平和(c)垂直方向周期性孔中观察到激光发射的空间分布，插图为发散角 θ 和 φ 的示意图

Fig. 13 (a) Configuration of the SPASER device^[118]. The system is composed of a periodic hole array covered by a thin layer of dye film; spatial distribution of the lasing emission observed in periodic holes along (b) horizontal and (c) vertical directions. The insert shows the schematic of the divergence angles θ and φ

元极子束。最终的出射方向主要沿矩形阵列的 4 个角的对角线发射，其工作原理可由上文的布拉格衍射解释。当改变 STM 探针在样品上的位置时，破坏了等离激元模式的对称性，从而通过模式间耦合作用改变了 4 个方向光束的粗细和强弱。需要注意的是，大多数阵列结构都采用规则排列的形式，而不同的场对称性会影响晶格表面等离激元模式耦合到自由空间的状况^[115, 122]，因此，结构排列也是影响光发射的一个重要因素。

6 结束语

通过以上分析，回顾了国内外学者在表面等离激元受激辐射方向性研究中取得的重要进展，归纳了通过金属单颗粒共振腔、波导共振腔和阵列结构共振腔中不同等离激元模式的相互作用调控 SPASER 出射方向的方法，并利用模式间相干耦合原理分析了其内在的物理机制。

可以预见，随着人们对微纳结构中光与物质相互作用的物理本质的深刻理解，对各种纳米制备技术的熟练掌握以及对等离激元场调控手段的更加完善，满足低阈值、室温工作条件且具有单一出射方向的等离激元纳米激光器的研究定会取得突破性进展，并在光催化、量子光学、高灵敏探测、超构材料与超表面、纳米集成光学以及生物医学等领域发挥巨大作用。

参 考 文 献

[1] Dou X J, Min C J, Zhang Y Q, *et al.* Surface plasmon polaritons optical tweezers technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1026004.
豆秀婕, 闵长俊, 张聿全, 等. 表面等离激元光镊技

术[J]. *光学学报*, 2016, 36(10): 1026004.

- [2] Zhong X L, Li Z Y. All-analytical semiclassical theory of spaser performance in a plasmonic nanocavity[J]. *Physical Review B*, 2013, 88(8): 838-853.
- [3] Wang Z L. A review on research progress in surface plasmons[J]. *Progress in Physics*, 2009, 29(3): 287-324.
王振林. 表面等离激元研究新进展[J]. *物理学进展*, 2009, 29(3): 287-324.
- [4] Pan J. The design of novel plasmonic waveguides, lasers and the study of optical properties of double-triangle nanoparticle arrays[D]. Nanjing: Nanjing University, 2012.
潘剑. 新型等离激元波导、激光器的设计以及双三角纳米颗粒阵列的光学性质的研究[D]. 南京: 南京大学, 2012.
- [5] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics[J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 824-830.
- [6] Ma R M, Oulton R F, Sorger V J, *et al.* Plasmon lasers: coherent light source at molecular scales[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2013, 7(1): 1-21.
- [7] Xian J, Chen L, Niu H, *et al.* Significant field enhancements in an individual silver nanoparticle near a substrate covered with a thin gain film[J]. *Nanoscale*, 2014, 6(22): 13994-14001.
- [8] Guo Q B, Liu X F, Qiu J R. Research progress of ultrafast nonlinear optics and applications of nanostructures with localized plasmon resonance[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(7): 0703005.
郭强兵, 刘小峰, 邱建荣. 局域表面等离激元纳米结构的超快非线性光学及其应用研究进展[J]. *中国激光*, 2017, 44(7): 0703005.

- [9] Gu Y, Wang L K, Gong Q H. A theoretical study of plasmonic-based quantum interference effects[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2013, 43(10): 1120-1134.
古英, 王路珈, 龚旗煌. 基于表面等离激元的量子相干效应的理论研究[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2013, 43(10): 1120-1134.
- [10] Li Z Y, Li J F. Recent progress in engineering and application of surface plasmon resonance in metal nanostructures[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(32): 2631-2661.
李志远, 李家方. 金属纳米结构表面等离子体共振的调控和利用[J]. *科学通报*, 2011, 56(32): 2631-2661.
- [11] Shan H Y, Zu S, Fang Z Y. Research progress in ultrafast dynamics of plasmonic hot electrons [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(3): 030002.
单杭永, 祖帅, 方哲宇. 表面等离激元热电子超快动力学研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(3): 030002.
- [12] Wu C Y, Kuo C T, Wang C Y, *et al.* Plasmonic green nanolaser based on a metal-oxide-semiconductor structure [J]. *Nano Letters*, 2011, 11(10): 4256-4260.
- [13] Oulton R F. Surface plasmon lasers: Sources of nanoscopic light[J]. *Mater Today*, 2012, 15(1/2): 26-34.
- [14] Cao M, Wang M, Gu N. Optimized surface plasmon resonance sensitivity of gold nanoboxes for sensing applications [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2009, 113(4): 1217-1221.
- [15] Cao M, Wang M, Gu N. Plasmon singularities from metal nanoparticles in active media: influence of particle shape on the gain threshold[J]. *Plasmonics*, 2011, 7(2): 347-351.
- [16] Zhang Y, Li J, Wu Y, *et al.* Spaser based on dark quadrupolar mode of a single metallic nanodisk [J]. *Plasmonics*, 2017, 12(6): 1983-1990.
- [17] Gu Y, Wang L J, Gong Q H. A theoretical study of plasmonic-based quantum interference effects [J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2013, 43(10): 1120.
古英, 王路珈, 龚旗煌. 基于表面等离激元的量子相干效应的理论研究[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2013, 43(10): 1120.
- [18] Chang D E, Sørensen A S, Hemmer P R, *et al.* Quantum optics with surface plasmons [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97(5): 053002.
- [19] Gonzalez-Tudela A, Martin-Cano D, Moreno E, *et al.* Entanglement of two qubits mediated by one-dimensional plasmonic waveguides [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106(2): 020501.
- [20] Chen H, Shao L, Woo K C, *et al.* Plasmonic-molecular resonance coupling: plasmonic splitting versus energy transfer [J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2012(116): 14088-14095.
- [21] Schlather A E, Large N, Urban A S, *et al.* Near-field mediated plexcitonic coupling and giant rabi splitting in individual metallic dimers [J]. *Nano Letters*, 2013, 13(7): 3281-3286.
- [22] Manjavacas A, Abajo F J G, Nordlander P. Quantum plexcitonics: strongly interacting plasmons and excitons [J]. *Nano Letters*, 2011, 11(6): 2318-2323.
- [23] Chen H Y, Liu K W, Jiang M M, *et al.* Tunable hybridized quadrupole plasmons and their coupling with excitons in znmgO/ag system [J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2014(118): 679-684.
- [24] Bergman D J, Stockman M I. Surface plasmon amplification by stimulated emission of radiation: quantum generation of coherent surface plasmons in nanosystems [J]. *Physical Review Letters*, 2003, 90(2): 027402.
- [25] Hill M T, Gather M C. Advances in small lasers [J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(12): 908-918.
- [26] Cao X W, Zhang L, Yu Y S, *et al.* Application of micro-optical components fabricated with femtosecond laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(1): 0102004.
曹小文, 张雷, 于永森, 等. 飞秒激光制备微光学元件及其应用[J]. *中国激光*, 2017, 44(1): 0102004.
- [27] Noginov M A, Zhu G, Belgrave A M, *et al.* Demonstration of a spaser-based nanolaser [J]. *Nature*, 2009, 460(7259): 1110-1112.
- [28] Veltri A, Chipouline A, Aradian A. Multipolar, time-dynamical model for the loss compensation and lasing of a spherical plasmonic nanoparticle spaser immersed in an active gain medium [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 33018.
- [29] Hore M J, Ye X, Ford J, *et al.* Probing the structure, composition, and spatial distribution of ligands on gold nanorods [J]. *Nano Letters*, 2015, 15(9): 5730-5738.
- [30] Munkhbat B, Ziegler J, Pohl H, *et al.* Hybrid multilayered plasmonic nanostars for coherent

- random lasing [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2016, 120(41): 23707-23715.
- [31] Zheng C, Jia T, Zhao H, *et al.* Low threshold tunable spaser based on multipolar Fano resonances in disk-ring plasmonic nanostructures[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2016, 49(1): 015101.
- [32] Li Z Q, Peng T, Zhang M, *et al.* Nanolaser based on hybrid plasmonic waveguide[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(10): 1001005.
李志全, 彭涛, 张明, 等. 基于混合表面等离子体波导的纳米激光器[J]. *中国激光*, 2016, 43(10): 1001005.
- [33] Oulton R F, Sorger V J, Zentgraf T, *et al.* Plasmon lasers at deep subwavelength scale [J]. *Nature*, 2009, 461(7264): 629-632.
- [34] Nezhad M P, Simic A, Bondarenko O, *et al.* Room-temperature subwavelength metallo-dielectric lasers[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(6): 395-399.
- [35] Ma R M, Oulton R F, Sorger V J, *et al.* Room-temperature sub-diffraction-limited plasmon laser by total internal reflection[J]. *Nature Materials*, 2011, 10(2): 110-113.
- [36] Tang C J, Chen J, Pan J, *et al.* Low-threshold plasmonic lasing based on high-Q dipole void mode in a metallic nanoshell[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(7): 1181-1183.
- [37] Ding P, He J, Wang J, *et al.* Low-threshold surface plasmon amplification from a gain-assisted core-shell nanoparticle with broken symmetry [J]. *Journal of Optics*, 2013, 15(10): 105001.
- [38] Zhang C, Lu Y, Ni Y, *et al.* Plasmonic lasing of nanocavity embedding in metallic nanoantenna array [J]. *Nano Letters*, 2015, 15(2): 1382-1387.
- [39] Wei W, Yan X, Zhang X. Ultrahigh Purcell factor in low-threshold nanolaser based on asymmetric hybrid plasmonic cavity [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 33063.
- [40] Shishkov V Y, Zyablovskii A A, Andrianov E S, *et al.* Wide-aperture planar lasers [J]. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2016, 61(6): 551-573.
- [41] Tronciu V Z, Wünsche H J, Wolfrum M, *et al.* Semiconductor laser under resonant feedback from a Fabry-Perot resonator: stability of continuous-wave operation [J]. *Physical Review E*, 2006, 73(4): 046205.
- [42] Corzine S W, Geels R S, Scott J W, *et al.* Design of Fabry-Perot surface-emitting lasers with a periodic gain structure [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1989, 25(6): 1513-1524.
- [43] Arnold N, Ding B, Hrelescu C, *et al.* Dye-doped spheres with plasmonic semi-shells: lasing modes and scattering at realistic gain levels [J]. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 2013, 4: 974-987.
- [44] Stockman M I. The spaser as a nanoscale quantum generator and ultrafast amplifier [J]. *Journal of Optics*, 2010, 12(2): 024004.
- [45] Berini P, De Leon I. Surface plasmon-polariton amplifiers and lasers[J]. *Nature Photonics*, 2011, 6(1): 16-24.
- [46] Ning C Z. Semiconductor nanolasers [J]. *Progress in Physics*, 2011, 31(3): 145-160.
宁存政. 半导体纳米激光 [J]. *物理学进展*, 2011, 31(3): 145-160.
- [47] Kinkhabwala A, Yu Z, Fan S, *et al.* Large single-molecule fluorescence enhancements produced by a bowtie nanoantenna[J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(11): 654-657.
- [48] Pustovit V N, Shahbazyan T V, Grechko L G. Size-dependent effects in solutions of small metal nanoparticles[J]. *The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems*, 2009, 69(3): 369-374.
- [49] Sheikholeslami S, Jun Y W, Jain P K, *et al.* Coupling of optical resonances in a compositionally asymmetric plasmonic nanoparticle dimer[J]. *Nano Letters*, 2010, 10(7): 2655-2660.
- [50] Pelton M, Bryant G. Introduction to metal-nanoparticle plasmonics [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2013.
- [51] Yu M, Song J, Niu H, *et al.* Quadrupole plasmon lasers with a super low threshold based on an active three-layer nanoshell structure [J]. *Plasmonics*, 2015, 11(1): 231-239.
- [52] Jule L, Mal'nev V, Mesfin B, *et al.* Fano-like resonance and scattering in dielectric (core)-metal (shell) composites embedded in active host matrices [J]. *Physica Status Solidi B*, 2015, 252(12): 2707-2713.
- [53] Tao Y, Guo Z, Sun Y, *et al.* Sliver spherical nanoshells coated gain-assisted ellipsoidal silica core for low-threshold surface plasmon amplification[J]. *Optics Communications*, 2015, 355: 580-585.
- [54] Khajavikhan M, Simic A, Katz M, *et al.* Thresholdless nanoscale coaxial lasers[J]. *Nature*, 2012, 482(7384): 204-207.

- [55] Zhang L, Zhou J, Zhang H, *et al.* Ultra-strong surface plasmon amplification characteristic of a spaser based on gold-silver core-shell nanorods[J]. *Optics Communications*, 2015, 338: 313-321.
- [56] Song Y, Wang J, Yan M, *et al.* Subwavelength hybrid plasmonic nanodisk with high *Q* factor and Purcell factor[J]. *Journal of optics*, 2011, 13(7): 075001.
- [57] Moiseev E I, Kryzhanovskaya N, Polubavkina Y S, *et al.* Light outcoupling from quantum dot-based microdisk laser via plasmonic nanoantenna[J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(2): 275-281.
- [58] Bozzola A, Perotto S, de Angelis F. Hybrid plasmonic-photonic whispering gallery mode resonators for sensing: a critical review [J]. *Analyst*, 2017, 142(6): 883-898.
- [59] Fang Z, Cai J, Yan Z, *et al.* Removing a wedge from a metallic nanodisk reveals a Fano resonance [J]. *Nano Letters*, 2011, 11(10): 4475-4479.
- [60] Meng X, Guler U, Kildishev A V, *et al.* Unidirectional spaser in symmetry-broken plasmonic core-shell nanocavity[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 1241.
- [61] Rycenga M, Cobley C M, Zeng J, *et al.* Controlling the synthesis and assembly of silver nanostructures for plasmonic applications [J]. *Chemical Reviews*, 2011, 111(6): 3669-3712.
- [62] Genç A, Patarroyo J, Sancho-Parramon J, *et al.* Hollow metal nanostructures for enhanced plasmonics: synthesis, local plasmonic properties and applications[J]. *Nanophotonics*, 2016, 6(1): 1-21.
- [63] Prodan E, Radloff C, Halas N J, *et al.* A hybridization model for the plasmon response of complex nanostructures [J]. *Science*, 2003, 302 (5644): 419-422.
- [64] Prodan E, Nordlander P. Plasmon hybridization in spherical nanoparticles[J]. *The Journal of Chemical Physics*, 2004, 120(11): 5444-5454.
- [65] Li Q, Zhang Z. Bonding and anti-bonding modes of plasmon coupling effects in TiO₂-Ag core-shell dimers[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 19433.
- [66] Erwin W R, Bardhan R. Directional scattering and sensing with bimetallic fanocubes: a complex Fano-resonant plasmonic nanostructure[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2016, 120(51): 29423-29431.
- [67] Toterogongora J S, Miroshnichenko A E, Kivshar Y S, *et al.* Energy equipartition and unidirectional emission in a spaser nanolaser [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2016, 10(3): 432-440.
- [68] Makarov S, Kudryashov S, Mukhin I, *et al.* Tuning of magnetic optical response in a dielectric nanoparticle by ultrafast photoexcitation of dense electron-hole plasma [J]. *Nano Letters*, 2015, 15 (9): 6187-6192.
- [69] Liu K, Guo Y, Pu M, *et al.* Wide field-of-view and broadband terahertz beam steering based on gap plasmon geodesic antennas[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 41642.
- [70] Gmachl C. High-power directional emission from microlasers with chaotic resonators [J]. *Science*, 1998, 280(5369): 1556-1564.
- [71] Wiersig J, Hentschel M. Combining directional light output and ultralow loss in deformed microdisks[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100 (3): 033901.
- [72] Kurdoglyan M S, Lee S Y, Rim S, *et al.* Unidirectional lasing from a microcavity with a rounded isosceles triangleshape[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(23): 2758-2760.
- [73] Kneissl M, Teepe M, Miyashita N, *et al.* Current-injection spiral-shaped microcavity disk laser diodes with unidirectional emission [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(14): 2485-2487.
- [74] Chang S, Chang R K, Stone A D, *et al.* Observation of emission from chaotic lasing modes in deformed microspheres: displacement by the stable-orbit modes [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2000, 17(11): 1828-1834.
- [75] McCall S L, Levi A F J, Slusher R E, *et al.* Whispering-gallery mode microdisk lasers [J]. *Applied Physics Letters*, 1992, 60(3): 289-291.
- [76] Wang T, Nijhuis C A. Molecular electronic plasmonics[J]. *Applied Materials Today*, 2016, 3: 73-86.
- [77] Rai P, Hartmann N, Berthelot J, *et al.* Electrical excitation of surface plasmons by an individual carbon nanotube transistor [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111(2): 026804.
- [78] Huang K C Y, Seo M K, Sarmiento T, *et al.* Electrically driven subwavelength optical nanocircuits[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(3): 244-249.
- [79] Parzefall M, Bharadwaj P, Jain A, *et al.* Antenna-coupled photon emission from hexagonal boron

- nitride tunnel junctions [J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(12): 1058-1063.
- [80] Vardi Y, Cohen-Hoshen E, Shalem G, *et al.* Fano resonance in an electrically driven plasmonic device [J]. *Nano Letters*, 2016, 16(1): 748-752.
- [81] Cazier N, Buret M, Uskov A V, *et al.* Electrical excitation of waveguided surface plasmons by a light-emitting tunneling optical gap antenna [J]. *Optics Express*, 2016, 24(4): 3873-3884.
- [82] Le Moal E, Marguet S, Rogez B, *et al.* An electrically excited nanoscale light source with active angular control of the emitted light [J]. *Nano Letters*, 2013, 13(9): 4198-4205.
- [83] Uehara Y, Kimura Y, Ushioda S, *et al.* Theory of visible light emission from scanning tunneling microscope [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1992, 31(8): 2465-2469.
- [84] King N S, Li Y, Ayalaorozco C, *et al.* Angle- and spectral-dependent light scattering from plasmonic nanocups[J]. *Acs Nano*, 2011, 5(9): 7254-7262.
- [85] Knight M W, Wu Y, Lassiter J B, *et al.* Substrates matter: influence of an adjacent dielectric on an individual plasmonic nanoparticle[J]. *Nano Letters*, 2009, 9(5): 2188-2192.
- [86] Chen X, Yang Y, Chen Y H, *et al.* Probing plasmonic gap resonances between gold nanorods and a metallic surface[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2015, 119(32): 18627-18634.
- [87] Akselrod G M, Argyropoulos C, Hoang T B, *et al.* Probing the mechanisms of large Purcell enhancement in plasmonic nanoantennas[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(11): 835-840.
- [88] Lassiter J B, McGuire F, Mock J J, *et al.* Plasmonic waveguide modes of film-coupled metallic nanocubes[J]. *Nano Letters*, 2013, 13(12): 5866-5872.
- [89] Hooshmand N, Bordley J A, El-Sayed M A. Are hot spots between two plasmonic nanocubes of silver or gold formed between adjacent corners or adjacent facets? A DDA examination [J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2014, 5(13): 2229-2234.
- [90] Kosako T, Kadoya Y, Hofmann H F. Directional control of light by a nano-optical Yagi-Uda antenna [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(5): 312-315.
- [91] Fang Z, Fan L, Lin C, *et al.* Plasmonic coupling of bow tie antennas with Ag nanowire [J]. *Nano Letters*, 2011, 11(4): 1676-1680.
- [92] Fang Z, Peng Q, Song W, *et al.* Plasmonic focusing in symmetry broken nanocorrals[J]. *Nano Letters*, 2011, 11(2): 893-897.
- [93] Curto A G, Taminiau T H, Volpe G, *et al.* Multipolar radiation of quantum emitters with nanowire optical antennas [J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 1750.
- [94] Taminiau T H, Stefani F D, van Hulst N F. Optical nanorod antennas modeled as cavities for dipolar emitters: evolution of sub- and super-radiant modes[J]. *Nano Letters*, 2011, 11(3): 1020-1024.
- [95] Saito H, Yamamoto N. Control of light emission by a plasmonic crystal cavity[J]. *Nano Letters*, 2015, 15(9): 5764-5769.
- [96] Watanabe H, Honda M, Yamamoto N. Size dependence of band-gaps in a one-dimensional plasmonic crystal [J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 5155-5165.
- [97] Chu Y, Schonbrun E, Yang T, *et al.* Experimental observation of narrow surface plasmon resonances in gold nanoparticle arrays [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(18): 181108.
- [98] Zou S, Janel N, Schatz G C. Silver nanoparticle array structures that produce remarkably narrow plasmon lineshapes [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 2004, 120(23): 10871-10875.
- [99] Kravets V G, Schedin F, Grigorenko A N. Extremely narrow plasmon resonances based on diffraction coupling of localized plasmons in arrays of metallic nanoparticles [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(8): 087403.
- [100] Ding P, Cai G, Wang J, *et al.* Low-threshold resonance amplification of out-of-plane lattice plasmons in active plasmonic nanoparticle arrays [J]. *Journal of Optics*, 2014, 16(6): 065003.
- [101] Zhou W, Dridi M, Suh J Y, *et al.* Lasing action in strongly coupled plasmonic nanocavity arrays [J]. *Nature Nanotechnology*, 2013, 8(7): 506-511.
- [102] Bravo-Abad J, Garcia-Vidal F J. Plasmonic lasers: a sense of direction [J]. *Nature Nanotechnology*, 2013, 8(7): 479-480.
- [103] Vecchi G, Giannini V, Gómez R J. Shaping the fluorescent emission by lattice resonances in plasmonic crystals of nanoantennas [J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102(14): 146807.
- [104] Canneson D, Le Moal E, Cao S, *et al.* Surface plasmon polariton beams from an electrically excited plasmonic crystal [J]. *Optics Express*, 2016, 24(23): 26186-26200.

- [105] Törmä P, Barnes W L. Strong coupling between surface plasmon polaritons and emitters: a review [J]. *Reports on Progress in Physics*, 2014, 78(1): 013901.
- [106] Fedotov V A, Rose M, Prosvirnin S L, *et al.* Sharp trapped-mode resonances in planar metamaterials with a broken structural symmetry [J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99 (14): 147401.
- [107] Zheludev N I, Prosvirnin S L, Papasimakis N, *et al.* Lasing spaser [J]. *Nature Photonics*, 2008, 2 (6): 351-354.
- [108] Roelandt S, Meuret Y, de Boer D K G, *et al.* Incoupling and outcoupling of light from a luminescent rod using a compound parabolic concentrator [J]. *Optical Engineering*, 2015, 54 (5): 055101.
- [109] Yang X, Wang J, Lim X H, *et al.* Unidirectional generation of surface plasmon polaritons by a single right-angled trapezoid metallic nanoslit [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2017, 50 (4): 045101.
- [110] Na D Y, Kim J H, Park Y B, *et al.* Directional emission from a slit surrounded by rectangular grooves on the exit surface in a conducting plane [J]. *Electromagnetics*, 2013, 33(4): 271-280.
- [111] de Boer D K G, Verschuuren M A, Guo K, *et al.* Directional sideward emission from luminescent plasmonic nanostructures [J]. *Optics Express*, 2016, 24(2): A388-A396.
- [112] Lozano G, Grzela G, Verschuuren M A, *et al.* Tailor-made directional emission in nanoimprinted plasmonic-based light-emitting devices [J]. *Nanoscale*, 2014, 6(15): 9223-9229.
- [113] Jones H, Chako N. The theory of brillouin zones and electronic states in crystals [M]. Amsterdam: North-Holland Pub Co, 1960: 3541-3542.
- [114] Rodriguez S R K, Chen Y T, Steinbusch T P, *et al.* From weak to strong coupling of localized surface plasmons to guided modes in a luminescent slab [J]. *Physical Review B*, 2014, 90 (23): 235406.
- [115] Rodriguez S R K, Abass A, Maes B, *et al.* Coupling bright and dark plasmonic lattice resonances [J]. *Physical Review X*, 2011, 1(2): 021019.
- [116] Fang X, Li Z, Long Y, *et al.* Surface-plasmon-polariton assisted diffraction in periodic subwavelength holes of metal films with reduced interplane coupling [J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(6): 066805.
- [117] van Beijnum F, van Veldhoven P J, Geluk E J, *et al.* Surface plasmon lasing observed in metal hole arrays [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110 (20): 206802.
- [118] Meng X, Liu J, Kildishev A, *et al.* Highly-directional plasmonic lasing in the visible with subwavelength hole arrays [C]. *CLEO: QELS _ Fundamental Science*. Optical Society of America, 2014: FTh3K. 3.
- [119] Stein B, Laluet J Y, Devaux E, *et al.* Surface plasmon mode steering and negative refraction [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105(26): 266804.
- [120] Stein B, Devaux E, Genet C, *et al.* Self-collimation of surface plasmon beams [J]. *Optics letters*, 2012, 37(11): 1916-1918.
- [121] Li T, Chen J, Zhu S N. Manipulating surface plasmon propagation: from beam modulation to near-field holography [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(5): 050002.
- 李涛, 陈绩, 祝世宁. 表面等离子激元的传播操控: 从波束调制到近场全息 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(5): 050002.
- [122] Schokker A H, Koenderink A F. Lasing at the band edges of plasmonic lattices [J]. *Physical Review B*, 2014, 90(15): 155452.