表面等离激元的调控研究与应用

明海, 王小蕾, 王沛, 鲁拥华

中国科学技术大学光学与光学工程系, 安徽省光电子科学与技术重点实验室, 合肥 230026

E-mail: minghai@ustc.edu.cn

2010-02-21 收稿, 2010-05-04 接受

国家重点基础研究发展计划(2006CB302905)、国家自然科学基金重点项目(60736037)、国家自然科学基金(60977019)和安徽省优秀青年科技基金(08040106805)资助项目

摘要 随着对表面等离激元(SPPs)研究的日益深入和高精度纳米加工技术的不断进步, 表面等离激元亚波长光学得到迅速的发展. 由于 SPPs 具有表面局域和近场增强等特性, 在纳米光子学、能源、传感探测、生命科学等领域均有重要应用. 基于 SPPs 的特点, 介绍了材料、结构、材料和结构的复合以及柱面矢量光场对 SPPs 的调控特性及其应用.

关键词

表面等离激元
局域表面等离激元
金属微纳结构
纳米金属复合材料
非线性材料
柱面矢量光场

表面等离激元(surface plasmon polaritons, SPPs)是金属表面自由电子同入射光子相互耦合形成的非辐射电磁模式, 它是局域在金属和介质表面传播的一种混合激发态^[1]. 金属表面自由电子在入射光场的激励下集体相干振荡, 这种共振相互作用产生了 SPPs 并赋予它独特的光学性质, 在学术界引起了研究者广泛的关注. 自1998年Ebbesen等人^[2]研究了二维周期性金属圆孔结构的透过增强现象以来, SPPs的物理机理及应用研究不断取得突破, 相关学术研究成果陆续在国际顶尖刊物(如 *Nature*, *Science*)上发表^[3-5]. 随着对其新现象、新机理的研究日益深入和高精度纳米加工技术的不断进步, 逐渐形成了表面等离激元亚波长光学这一新兴学科^[3]. 由于 SPPs 表面局域和近场增强的特性, 金属微纳结构、金属与材料的复合结构以及柱面矢量光场对 SPPs 的调控会产生光学非线性增强效应^[6-8]、透过增强^[2,9]、定向效应^[10,11]、对折射率的高敏感性^[3]、负折射^[12,13]、低阈值的动态调控^[14,15]、旋转对称结构中的高激发效率^[16]等一系列新颖的现象, 这使得 SPPs 在纳米光子学、超分辨成像、能源、传感探测、生命科学^[5,17]等领域展现出重要的应用前景.

1 局域表面等离激元共振对材料非线性的调控

表面等离激元存在有两种形式, 一种是传播型的, 通常直接称为表面等离激元, 一种是局域型的, 被称为局域表面等离激元(localized surface plasmon, LSP). 金属颗粒的自由电子与入射光场相互作用, 产生的是局域表面等离激元. 金属颗粒表面产生的 LSP 会引起金属表面局域场增强, 该性质可用于提高三阶非线性光学系数、增强表面拉曼散射(surface enhanced Raman scattering, SERS)以及发光等.

在局域表面等离激元共振下, 纳米金属颗粒复合材料表现出增强的三阶非线性光学性质, 例如我们小组研究得到掺银颗粒的若丹明 6G(R6G)/聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)薄膜的三阶非线性系数可以达到 -2.423×10^{-8} esu^[18]. 利用 Maxwell-Garnett 模型的有效介电函数方程对纳米复合材料进行理论分析, 得到了复合材料有效三阶非线性极化率与金属颗粒的体积分数 p 、局域场增强因子 f_1 和金属颗粒的三阶非线性极化率 $\chi_m^{(3)}$ 成正比^[19]:

英文引用格式: Ming H, Wang X L, Wang P, et al. The control research and application of surface plasmon polaritons (in Chinese). *Chinese Sci Bull (Chinese Ver)*, 2010, 55: 2068—2077, doi: 10.1360/972010-125

$$\begin{aligned}\chi^{(3)} &= p \left(\frac{3\varepsilon_d}{\varepsilon_m(\omega) + 2\varepsilon_d} \right)^2 \left| \frac{3\varepsilon_d}{\varepsilon_m(\omega) + 2\varepsilon_d} \right|^2 \chi_m^{(3)} \\ &= p f_1^2 |f_1^2| \chi_m^{(3)},\end{aligned}\quad (1)$$

式中的 p 与金属颗粒的浓度、尺寸大小有密切关系, f_1 与金属颗粒的浓度、尺寸大小、形状以及颗粒的排列周期性相关, 可以通过调控这些结构参数来提高纳米金属颗粒复合材料的非线性系数, 这些关系在实验上得到了验证. 我们小组还对不同浓度银溶胶进行了研究, 研究发现随着浓度的增加, 银溶胶的三阶非线性系数也逐渐增大, 当银溶胶的浓度为 2.13 mg/mL 时, 三阶非线性系数为 1.405×10^{-11} esu^[20]. 这是因为随着银颗粒浓度的增加, 颗粒表面的局域场之间相互耦合从而增强了非线性效应. 研究还发现, 金属颗粒的尺寸大小也会影响材料的三阶非线性系数, 例如通过测量颗粒直径分别为 20 nm 和 50 nm 以及 80 nm 纳米银复合聚双炔酸囊泡溶液及其 Langmuir-Blodgett(LB)组装薄膜的三阶非线性光学性质, 发现直径为 50 nm 的纳米银颗粒复合聚双炔囊泡溶液和 LB 组装薄膜的三阶非线性系数被显著提高, 分别为 4×10^{-14} m²/W 和 5.82×10^{-12} m²/W^[21]. 纳米金属颗粒复合材料中颗粒形状以及排列的周期性对三阶非线性系数也有很大的影响. 图 1(a)为 Ning 等人利用纳米球刻印技术制备的三角形 Au 纳米周期性阵列与 ZnO 的复合薄膜, $\chi^{(3)}$ 和 $\chi^{(3)}/\alpha$ 分别达到 1.3×10^{-5} esu 和 1.1×10^{-9} esu/cm^[22] (图 1(b)). 这是由于颗粒的三角形尖端外形以及周期排布, 使得局域场增强更为显著, 因此体系的三阶非线性系数较大.

金属纳米颗粒局域表面等离子共振的另一个

重要应用领域是表面增强拉曼散射. 拉曼散射系数与局域电场幅度的四次方成正比, 利用金属纳米颗粒的表面等离激元共振局域场增强可以使拉曼散射信号增强几个数量级, 从而可以缩短拉曼信号收集的时间、提高分析的灵敏度. SERS 技术在生化表征、传感等方面具有广泛应用. 我们小组利用金纳米棒和聚合物光纤制备了一种聚合物光纤表面增强拉曼散射锥形探针, 图 2(a)给出了此结构的增强拉曼谱^[23]. 金纳米棒由于局域表面等离激元激发产生了局域场增强, 使得拉曼信号有了大的增强. 在 R6G 拉曼特征峰 1365 cm^{-1} 处, 金纳米棒提供了约 10^9 量级的拉曼增强. 另外, 聚合物光纤与生物体具有良好的兼容性, 使用时比石英光纤更安全. 图 2(b)为基于实芯光子晶体光纤的宽谱 SERS 传感器测得的拉曼光谱信号^[24]. 将银纳米颗粒附着在光子晶体光纤空气孔的内壁, 由于银纳米颗粒团簇溶胶体的宽的局域表面等离激元共振谱特性以及实芯光子晶体光纤对 SERS 信号激励和收集效率的影响, 采用 785 nm 或者 514.5 nm 激光激励都可以获得 4MBA 分子(浓度为 10^{-6} mol/L)的 SERS 信号. 分析表明, 实芯光子晶体光纤 SERS 探针的宽谱增强特性, 由银纳米颗粒团簇体的局域表面等离激元共振的强度、分子的拉曼散射截面、实芯光子晶体光纤信号激励和收集效率共同决定. 另外采用一些特殊结构, 可以有针对性地提高特定区域的拉曼散射的效率. 金纳米线吸附金纳米颗粒结构的拉曼增强效应从实验和理论两方面得到了详细的研究^[25]. 通过测量异硫氰基孔雀石绿分子在不同位置处的拉曼光谱, 发现分子的拉曼信号在金颗粒的局域表面等离激元和金纳米线的 SPPs 耦合处

图 1 三角形 Au 纳米周期阵列填充 ZnO 的原子力显微镜图(a)及不同强度下闭孔 Z-scan 曲线(b)^[22]

图2

(a) 曲线 A 为用金属覆盖的尖端收集的 R6G 的 SERS 信号, 曲线 B 为吸附在玻璃衬底同样浓度没有金纳米棒的 R6G 溶液的 SERS 信号, 两种情况激发光功率都是 0.3 MW, 扫描 3 s^[23]; (b) 除去背景噪声后的 514.5 nm 和 785 nm 处的 SERS 谱^[24]

增强最大, 因为耦合处的光强度最大。

金属纳米颗粒产生的 LSPs 共振现象还可以增强量子点发光效应。在玻璃体系中添加纳米 Ag 颗粒, 通过表征 Ag 颗粒在不同温度退火后与 CdSe 耦合的 PL 谱研究 Ag 颗粒与 CdSe 量子点相耦合产生的发光增强效应^[26], 发现 260℃退火后荧光谱的增强最大, 达到 15 倍。对比银纳米颗粒的电子显微镜图(图 3)发现, 在热退火下银纳米颗粒发生了畸变, 所形成的尖端、形貌剧烈变化处有着强的场局域增强特性, 因此量子点发光得到了增强。

2 金属微纳结构对 SPPs 的调控

SPPs 是一种在金属和介质界面传播的波, 界面的结构特点对 SPPs 的性质有很大的影响, 所以可以

图3 不同温度下 Ag 颗粒与 CdSe 相耦合的 PL 谱^[26]
插图为 260℃退火下 Ag 颗粒的扫描电子显微镜图

通过构造金属表面结构去调控 SPPs, 满足各种需求。目前研究的主要金属结构可分为周期性、非周期性和准周期性三大类。

金属膜上的周期性小孔和狭缝阵列结构具有远场透过增强的性质, 这种奇异的现象引发了对透过增强现象(EOT)研究的热潮。在这种透过增强现象研究过程中有两种观点, 一种认为主要原因是 SPPs 的激发^[27], 另外一种是认为激发的复合衍射消逝波(composite diffracted evanescent wave, CDEW)^[28]起主要作用。为了弄清楚这个问题, 采用单一金属狭缝-凹槽结构进行研究^[29]。结果表明, 狭缝和凹槽距离较近时远场透过是 CDEW 和 SPPs 共同起作用, 距离远时, CDEW 衰减了, 远场透过是由 SPPs 决定的。同时, 由于 SPPs 谐振模式中存在的类 Fabry-Parot 效应^[30], 因此针对不同的结构体系, 需要谨慎地区分各自的贡献, 因为这些波之间可能通过干涉相长而使得透射增强, 亦有可能因相位相反而彼此抵消, 使得 EOT 被抑制。这种周期性金属结构的出现, 对新型光子和光电子器件的设计、传感器、光刻技术等应用具有重要的意义。

对于最简单的一维周期结构金属光栅, 因为 SPPs 既可以增强透过也可以抑制透过(这取决于结构的设计和参数的选取), 所以通过设计表面结构可以调节所激发 SPPs 的相位, 可以实现单向透过和对出射光束方向的控制等。我们小组研究了在上下表面构造凹槽的一维周期性金属狭缝阵列, 通过理论推导和模拟计算选择好结构参数, 在入射波长 852 nm 的照射下, 峰值消光比可达 47.83 dB^[31]。这是因为上表面的凹槽所激发的 SPPs 和狭缝所激发的 SPPs 相位满

足相干相长,而下表面的凹槽所激发的 SPPs 和狭缝所激发的 SPPs 相位是相反的,相干相消,因此光从上表面入射时,透射会增强,而光从下表面入射时,透射会削弱,由此可以实现光束单向透射的效果.该效应在光通讯器件中有着重要的应用.

金属光栅由于光栅表面 SPPs 的局域场的高敏感性,可用作高灵敏的传感器.我们小组研究了如图 4(a)插图所示的反射式光栅表面等离激元共振传感器^[32],其发生表面等离激元共振的波矢匹配条件为

$$\pm k_0 \sqrt{\frac{\epsilon_m n_a^2}{\epsilon_m + n_a^2}} = k_0 n_a \sin \theta_{\text{res}} + m \frac{2\pi}{\Lambda}, \quad (2)$$

其中 θ_{res} 为共振角, m 为光栅衍射阶次, Λ 是光栅周期, n_a 是待测物折射率. '+' 和 '-' 分别对应 $m > 0$ 和 $m < 0$. 对 (2) 式求导可以得到传感器灵敏度. 灵敏度变化曲线如图 4(a) 所示, 当对应衍射的负阶次共振(即 $m < 0$) 时, 传感灵敏度随着共振角度的增大而显著升高, 且与阶次 m 的绝对值无关. 研究还发现, 负阶共振光栅型传感器灵敏度要远高于正阶共振光栅型和常规的 Kretschmann 型表面等离激元共振传感器的灵敏度, 并设计了钯(Pd)敏感层, 将此光栅结构用于氢气传感, 理论上可以实现 0.01% 氢气浓度的传感灵敏度, 远优于文献报道的光强探测型氢气传感器(0.1%). 我们小组研究还发现, 这种光栅结构的 SPPs 正阶峰与负阶峰的激发角度随着待测物折射率的变化移动方向相反^[33], 图 4(b) 给出了待测物折射率 n_a 从 1.32~1.37 变化时对应的一系列角度反射谱. 图中 +1 阶和 -4 阶共

振峰对应激发负阶 SPPs 共振峰和正阶 SPPs 共振峰, 随着 n_a 的增大, 负阶共振峰的共振角向小角度方向移动, 而正阶共振峰的共振角向大角度方向移动. 因此可以通过测量正负峰的共振位置的相对变化来提高传感的灵敏度.

金属光栅表面传播的 SPPs 相互干涉可以产生更精细的干涉场空间分布, 通过调整金属光栅周期、入射角度、周围介质折射率等参数, 得到合适的 SPPs 波长, 使其与光刻胶的光敏波长一致, 即可实现高精度刻写. 我们小组研究设计了一种金属光栅波导结构, 此结构(图 5(a))利用金属光栅的 SPPs 和金属膜的 SPPs 之间的相互耦合, 可以实现高分辨、高对比度的光刻^[34]. 这种结构耦合模式产生机制可采用多层平面波导理论分析, 并可以给出优化参数. 利用多层耦合可以有效地增加光刻的分辨率, 图 5(b) 给出了优化参数后金属光栅波导结构在 436 nm 光入射下的近场分布图, 刻写分辨率可达 34 nm.

金属膜上不同宽度的多个狭缝、不同间距的多个狭缝是典型的非周期性金属微结构. 利用不等间距狭缝阵列表面 SPPs 的传输位相差, 对出射光束的初始位相进行有效调制, 在近场范围内实现光束的偏转、聚焦等控制. 例如, 在 200 nm 厚的金属膜上分布着宽度为 3 个 80 nm 的狭缝, 狭缝中心之间的距离分别为 200 nm 和 300 nm, 在波长 650 nm 的 TM 偏振光入射下可以实现光束偏转^[35].

对于准周期性金属微结构, 如带有周期性凹槽的单个小孔或者狭缝, 通过表面结构调制能够有效

图 4

(a) 金属光栅表面等离激元共振传感器灵敏度随共振角度的变化. 入射波长 850 nm, $n_a=1.02$. 插图为反射式金属光栅表面等离激元共振传感器结构示意图^[32]. (b) 不同折射率对应的光栅表面等离激元共振传感曲线. $\lambda=850$ nm, $\Lambda=1300$ nm, $p=800$ nm, $d=35$ nm, 待测物折射率从 1.32 逐渐增加到 1.37^[33]

图5 金属光栅波导结构示意图(a)和金属光栅波导结构的近场电场分布图(b)^[34]

激发波长为 436 nm, $t_1=t_2=40$ nm, $p=154$ nm, $w=30$ nm, $s=60$ nm

地提高出射光效率,产生具有良好方向性的、聚焦的出射光束^[10].理论分析^[36]表明,对出射端面微孔(或狭缝)周围进行一些结构参数的优化调整,可以调节出射光的位相分布,提高出射光束质量.该结构对出射光能量以及方向性的有效控制,使其可被设计成用于光信息存储、光耦合等的新型光源.

研究表明,无论是入射端面、出射端面结构参数,还是狭缝结构参数的变化,对亚波长金属结构光学特性的影响,位相(或准动量匹配条件)扮演着重要角色,结构变化调制位相是有效调控 SPPs 的物理出发点,也给理解亚波长金属结构之新现象提供了简明的图像,该观点对构造新结构、实现特定应用具有重要的指导意义,也为通过非线性光学材料复合特定亚波长金属结构,实现 SPPs 的全光动态调控提供了理论基础.

3 金属微纳结构复合材料对 SPPs 的调控

SPPs 因其近场能量高度局域增强和突破衍射极限的特性,对纳米集成光路的发展有着重要的意义.纳米集成光路的真正实现,要求在固定的结构实现偏振、聚焦、调制等动态调制.如何在固定的金属微纳结构中实现动态调控呢,这就需要材料和结构的复合,如非线性光学材料和结构的复合等.

非线性材料和非周期金属狭缝结合可以通过改变入射光的强度动态调控光束出射角度,这是因为当光强改变时,不同宽度狭缝的有效折射率改变量不一样,对出射光束的初始位相进行了有效调制.图 6(a)为调节偏折角的结构,入射波长 $\lambda=850$ nm,采用 560 nm 厚的银膜,狭缝宽度分别为 90, 70 和 60 nm,狭缝中心间距为 400 nm;偏折角调节范围 $8^\circ\sim 24^\circ$.

图 6(b)为调节焦距的结构,采用 570 nm 厚的银膜,狭缝宽度分别为 100, 70, 60, 70 和 100 nm,狭缝中心间距为 400 nm,焦距调节范围 $0.6\sim 2.7\ \mu\text{m}$ ^[37].该研究在近场范围内的光信号处理、纳米光子回路、近场探测与成像、纳米集成光学、数据存储等领域有重要的应用前景.

基于 SPPs 的全光开关由于其低阈值和小型化等优点,受到广泛的关注.我们小组基于非线性材料复合亚波长金属结构,研究了其中的光学双稳态效应,并设计了全光开关结构.首先研究了一种表面覆盖非线性材料的亚波长金属光栅结构的非线性双稳态特性和非线性层厚度以及金属狭缝大小之间的关系^[38].研究发现,非线性层厚度存在最优值.根据波导理论,当非线性层厚度增大时,将支持更多的波导模式,发生共振的模式也会更多.但厚度增加后产生的高阶波导模式未必能有效地耦合 SPPs,对双稳态效应做出贡献,而且厚度的增加也会增加吸收损耗,所以在实际的结构制备和实验中还要综合考虑这两个因素.在双稳态研究的基础上,我们小组设计了一种基于亚波长金属光栅和掺 Ag 的 SiO_2 材料的非线性全光开关结构^[39],衬底采用 k9 玻璃,信号光波长 633 nm,泵浦光波长 532 nm,非线性材料在该泵浦光照射下最大 $\chi^{(3)}=7.35\times 10^{-6}$ esu.如图 7 所示,当输入一个方波脉冲的泵浦光($12\ \text{MW}/\text{cm}^2$),可以观察到信号光透射上升和下降时间均为 ps 量级,光开关响应时间也在 ps 量级.

为了进一步降低开关入射强度阈值,我们小组研究了亚波长金属-非线性电介质多层结构中的高局域体模增强的光学双稳态效应^[40].在波长 1064 nm 处,通过 TM 偏振光激发的高局域的 BPP₀体模可获取 6.9

图6 (a) 3个金属狭缝在不同光强度下电场强度的瞬时场分布; (b) 5个金属狭缝在不同光强度下电场强度分布^[37]

图7 信号光透射率(方块)随泵浦光变化的时间响应曲线, 加入的泵浦光(圆圈)是一个持续时间约为0.9 ps的矩形脉冲. 信号光随泵浦光脉冲的加入和消失显示开关效果^[38]

MW/cm^2 的低双稳态泵浦阈值, 该工作对亚波长非线性多层纳米结构回路和器件的研究和设计具有应用价值.

金属微纳结构和其他材料复合也可以实现新型器件. 例如, 金属亚波长光栅和光电材料复合的结构^[41], 因在超薄金属亚波长光栅表面激发并传播的长程表面等离激元很大部分能量分布在介质中, 传播损耗相比于超薄金属膜进一步降低, 从而实现低

插入损耗和低工作电压的光电调制器. 该复合结构还可用于制作新型的窄带滤波器以及传感器等.

在金属膜上加入异构化的偶氮聚合物薄膜可以调控 SPPs 波长^[42], 实验中采用 532 nm 的超聚焦激光来改变 SPPs 的波数, 探测光为 780 nm 柱面矢量光场, 结果表明利用厚度为 54 nm 的偶氮聚合物薄膜可以实现 $0.0382k_0$ 的波数调控. 此外, 还可以通过在金属表面构造 PMMA 的结构来调控 SPPs 的传输行为^[43]. 实验中通过对 SPPs 泄露场的成像, 研究了不同厚度、形状的聚合物微结构对 SPPs 的调制效果, 该结构可实现对 SPPs 不同焦距的聚焦和发散.

4 柱面矢量光场对 SPPs 的调控

为了有效地激发 SPPs, 必须对入射光的偏振特性进行控制, 只有 p 偏振的光才能满足 SPPs 的激发条件. 对于棱镜全内反射激发 SPPs 的结构(Krestchman 结构), p 偏振的线性偏振光就可以很好地满足 SPPs 激发的偏振要求. 但是对于一些轴对称的结构, 采用通常的标量光场激发(如线偏光), 就无法获得很高的激发效率, 而柱面矢量光场的出现解决了此类问题. 柱面矢量光场是 Maxwell 方程在柱坐标系下的特解, 电场表达式为 $E(r)=r\exp[-(r/w)^2]$, 其中 r 为径

图 8

(a) 高数值孔径油浸物镜激发 SPPs 的结构图, 激发光是柱面矢量光场^[44]; (b) 反射光在傅里叶面所成的像^[45]

向坐标, w 为光腰大小. 柱面矢量光场是一种矢量光束, 其偏振态在空间呈发散状的旋转对称性(如图 8(a)所示), 当与具有轴对称性的等离子体结构相匹配时, 就能够高效率地激发 SPPs. 图 8(a)给出了一种利用高数值孔径透镜激发 SPPs 的轴对称结构, 入射的柱面矢量光场被强聚焦在银膜表面, 由于整个聚焦光束对于膜表面都是 p 偏振, 因此可以大大提高 SPPs 的激发效率^[44]. 图 8(b)给出了反射光傅里叶谱的图像, 图中的暗环对应于 SPPs 共振激发所造成的吸收^[45].

在柱面矢量光场激发的情况下, 通过设计特定的结构可以实现表面等离子激元光场的聚焦. 例如, 同心圆环结构(又被称为表面等离子激元透镜)就可以将柱面矢量光场激发的表面等离子激元波汇聚到中心形成超衍射分辨的光点. 环宽度为 250 nm 的多同心圆环在 632.8 nm 的照射下, 可以得到半高宽为 222 nm 的亮点^[46], 还可以通过增加更多环来增强光强, 但是亮点仍然保持不变. 柱面矢量光场照明的锥形探针也可以实现表面等离子激元的聚焦, 如锥形尖内部为玻璃、尖端半径 5 nm、外部覆盖 50 nm 银膜的锥形探针结构. 数值模拟表明, 在 632.8 nm 的柱面矢量光场照射下, 在圆锥的尖端可以得到强度增强超过 10^5 倍、半高宽小于 10 nm 的光斑^[47]. 这种探针在近场光学显微镜及近场拉曼成像等方面有很好的应用前景. 上述锥形孔探针对于锥角有很大的依赖性, 改进设计可以进一步提高场增强系数和减小对锥角的依赖性.

为此, 我们小组设计了一种由同心多圆环的表面等离子激元透镜和一个金属锥形尖端组合的结构^[48], 如图 9 所示. 该结构表面等离子激元的激发效率较高, 并且聚焦在中心的锥形尖端上, 因而可获得较大的表面等离子激元场局域和增强, 此探针尖端的电场能量密度增强可达到 7.29×10^4 倍, 而且该探针的增强因子对锥角和激发波长的依赖性不强, 从而对制造工艺的要求不再十分苛刻, 方便了这种表面等离子激元探针的实现.

由于光纤的旋转对称性, 柱面矢量光场可以更有效地激发光纤表面的 SPPs. 我们小组利用在光纤

图 9 同心多圆环的表面等离子激元透镜和一个金属锥形尖端组合的结构^[48]

表面镀银膜结构研究了光纤表面等离激元共振传感器的灵敏度. 实验结果如图 10 所示. 相比线偏光光源, 采用柱面矢量光作为光源时, 传感灵敏度可提高 3 倍^[49].

图 10 归一化的透过光强度和待测物折射率之间的关系^[49]
“△”为用线偏振光入射多模光纤的结果, “○”为用线偏振光入射多模光纤表面覆盖银膜的结果, “□”为用柱面矢量光场入射多模光纤表面覆盖银膜的结果

5 总结与展望

随着纳米加工技术、纳米仿真技术、纳米光学表征技术的迅速发展, 对材料、结构、材料和结构的复合以及柱面矢量光场对 SPPs 的调控机理和应用研究也逐渐深入. SPPs 可以实现纳米尺度超衍射极限的光传输的有效调控, 同时可实现电磁场能量局域增强, 在信息与通讯、生命科学与健康、安全与环境、照明与显示、太阳能电池等这些纳米光子学的主要应用领域具有广阔的应用前景. 但是, 由于金属结构近场区域多重散射场的复杂性, 以及相关金属结构对制备技术的高要求, SPPs 在理论和应用方面都还存在许多问题, 包括研制传播损耗可以与传统波导相比拟的光频段亚波长尺寸的金属回路, 开发能与传统单模光纤相互耦合的二维有源、无源 SPPs 光子学器件, 实现电子学和光子学元件在同一纳米尺度芯片上的集成等. 因此, 表面等离激元亚波长光学这一崭新的学科还需要在微纳光学结构与材料、加工平台和微纳光学应用方向上继续开展更广泛和深入的研究.

参考文献

- 1 Raether H. Surface Plasmons. Berlin: Springer, 1988
- 2 Ebbesen T W, Lezec H J, Ghaemi H F, et al. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays. *Nature*, 1998, 391: 667—669
- 3 Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics. *Nature*, 2003, 424: 824—830
- 4 Ozbay E. Plasmonics: Merging photonics and electronics at nanoscale dimensions. *Science* 2006, 311: 189—193
- 5 Bozhevolnyi S I, Volkov V S, Devaux E, et al. Channel plasmon subwavelength waveguide components including interferometers and ring resonators. *Nature*, 2006, 440: 508—511
- 6 Ricard D, Roussignol P, Flytzanis C. Surface-mediated enhancement of optical phase conjugation in metal colloids. *Opt Lett*, 1985, 10: 511—513
- 7 Liao H B, Xiao R F, Wang H, et al. Large third-order optical nonlinearity in Au:TiO₂ composite films measured on a femtosecond time scale. *Appl Phys Lett*, 1998, 72: 1817—1819
- 8 Nie S, Emory S R. Probing single molecules and single nanoparticles by surface-enhanced Raman scattering. *Science*, 1997, 275: 1102—1106
- 9 Martin-Moreno L, Garcia-Vidal F J, Lezec H J, et al. Theory of extraordinary optical transmission through subwavelength hole arrays. *Phys Rev Lett*, 2001, 86: 1114—1117
- 10 Genet C, Ebbesen T W. Light in tiny holes. *Nature*, 2007, 445: 39—46
- 11 Lin D Z, Cheng T D, Chang C K, et al. Directional light beaming control by a subwavelength asymmetric surface structure. *Opt Express*, 2007, 15: 2585—2591
- 12 Smith D R, Padilla W J, Vier D C, et al. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. *Phys Rev Lett*, 2000, 84: 4184
- 13 Shelby R A, Smith D R, Nemat-Nasser S C, et al. Microwave transmission through a two-dimensional, isotropic, left-handed metamaterial. *Appl Phys Lett*, 2001, 78: 489—491
- 14 Porto J A, Martín-Moreno L, García-Vidal F J. Optical bistability in subwavelength slit apertures containing nonlinear media. *Phys Rev B*, 2004, 70: 081402

- 15 Hu X Y, Jiang P, Xin C, et al. Nano-Ag: polymeric composite material for ultrafast photonic crystal all-optical switching. *Appl Phys Lett*, 2009, 94: 031103
- 16 Zhan Q W. Cylindrical vector beams: From mathematical concepts to applications. *Adv Opt Photon*, 2009, 1: 1—57
- 17 王振林. 表面等离子激元研究新进展. *物理学进展*, 2009, 29: 287—324
- 18 Deng Y, Sun Y Y, Wang P, et al. Effect of Ag nanoparticles on optical properties of R6G doped PMMA films. *Chin Phys Lett*, 2007, 24: 954—956
- 19 Hamanaka Y, Fukuta K, Nakamura A. Enhancement of third-order nonlinear optical susceptibilities in silica-copper Au nanoparticle films with very high concentrations. *Appl Phys Lett*, 2004, 84: 4938
- 20 Deng Y, Sun Y Y, Wang P, et al. Nonlinear optical properties of silver colloidal solution by in-situ synthesis technique. *Curr Appl Phys*, 2008, 8: 13
- 21 Chen X, Zou G, Tao J, et al. Applications of silver nanoparticles' surface plasmon resonance effect in the field of nonlinear optical materials. In: *Silver Nanoparticles: Properties, Characterization and Applications*. New York: Nova Science Publishers, Inc., 2010
- 22 Ning T Y, Zhou Y L, Shen H, et al. Large third-order optical nonlinearity of periodic gold nanoparticle arrays coated with ZnO. *J Phys D: Appl Phys*, 2007, 40: 6705—6708
- 23 Xie Z G, Tao J, Lu Y H, et al. Polymer optical fiber SERS sensor with gold nanorods. *Opt Commun*, 2009, 282: 439—442
- 24 Xie Z G, Lu Y H, Wei H, et al. Broad spectral photonic crystal fiber surface enhanced Raman scattering probe. *Appl Phys B*, 2009, 95: 751—755
- 25 Wei H, Hao F, Huang Y Z, et al. Polarization dependence of surface-enhanced Raman scattering in gold nanoparticle-nanowire systems. *Nano Lett*, 2008, 8: 2497—2502
- 26 Lu L, Xu X L, Shi C S, et al. Localized surface plasmon resonance enhanced photoluminescence of CdSe QDs in PMMA matrix on silver colloids with different shapes. *Thin Solid Films*, 2010, 518: 3250—3254
- 27 Schroter U, Heitmann D. Surface-plasmon-enhanced transmission through metallic gratings. *Phys Rev B*, 1998, 58: 15419—15421
- 28 Lezec H J, Thio T. Diffracted evanescent wave model for enhanced and suppressed optical transmission through subwavelength hole arrays. *Opt Express*, 2004, 12: 3629—3651
- 29 Gay G, Alloschery O, de Lesegno B V, et al. The optical response of nanostructured surfaces and the composite diffracted evanescent wave model. *Nat Phys*, 2006, 2: 262—267
- 30 Jiao X J, Wang P, Tang L et al. Fabry-Perot-like phenomenon in the surface plasmons resonant transmission of metallic gratings with very narrow slits. *Appl Phys B*, 2005, 80: 301—305
- 31 Min C J, Wang P, Jiao X J, et al. Numerical investigation of surface plasmon associated subwavelength optical single-pass effect. *Chin Phys Lett*, 2007, 24: 2922—2925
- 32 Lin K Q, Lu Y H, Chen J X, et al. Surface plasmon resonance hydrogen sensor based on metallic grating with high sensitivity. *Opt Express*, 2008, 16: 18599—18604
- 33 Cai D B, Lu Y H, Lin K Q, et al. Improving the sensitivity of SPR sensors based on gratings by double-dips method (DDM). *Opt Express*, 2008, 16: 14597—14602
- 34 Jiao X J, Wang P, Zhang D G, et al. Numerical simulation of nanolithography with the subwavelength metallic grating waveguide structure. *Opt Express*, 2006, 14: 4850—4860
- 35 Jiao X J, Wang P, Zhang D. Beam focusing by a non-uniformly-spaced nanoslit array in a metallic film. *Chin Phys Lett*, 2006, 23: 1884—1887
- 36 Martin-Moreno L, Garcia-Vidal F J, Lezec H J, et al. Theory of highly directional emission from a single subwavelength aperture surrounded by surface corrugations. *Phys Rev Lett*, 2003, 90: 167401
- 37 Min C J, Wang P, Jiao X J, et al. Beam manipulating by metallic nano-optic lens containing nonlinear media. *Opt Express*, 2007, 15: 9541—9546
- 38 Min C J, Wang P, Jiao X J, et al. Optical bistability in subwavelength metallic grating coated by nonlinear material. *Opt Express*, 2007, 15: 12368—12373
- 39 Min C J, Wang P, Chen C C, et al. All-optical switching in subwavelength metallic grating structure containing nonlinear optical materials. *Opt Lett*, 2008, 33: 869—871
- 40 Chen J X, Wang P, Wang X L, et al. Optical bistability enhanced by highly localized bulk plasmon polariton modes in subwavelength metal-nonlinear dielectric multilayer structure. *Appl Phys Lett*, 2009, 94: 081117
- 41 Wu Z, Nelson R L, Haus J W, et al. Plasmonic electro-optic modulator design using a resonant metal grating. *Opt Lett*, 2008, 33: 551—553
- 42 Zhang D G, Yuan X C, Bouhelier A, et al. Active control of surface plasmon polaritons by optical isomerization of an azobenzene poly-

- mer film. Appl Phys Lett, 2009, 95: 101102
- 43 Zhang D G, Yuan X C, Bu J, et al. Surface plasmon converging and diverging properties modulated by polymer refractive structures on metal films. Opt Express, 2009, 17: 11315—11320
 - 44 Zhan Q. Evanescent Bessel beam generation via surface plasmon resonance by radially polarized beam. Opt Lett, 2006, 31: 1726—1728
 - 45 Chen W B, Zhan Q W. Realization of an evanescent Bessel beam via surface plasmon interference excited by a radially polarized beam. Opt Lett, 2009, 34: 722—724
 - 46 Chen W, Zhan Q. Optimal plasmonic focusing with radial polarization. Proc SPIE, 2007, 6450: 64500D1-9
 - 47 Chen W, Zhan Q. Numerical study of an apertureless near field scanning optical microscope probe under radial polarization illumination. Opt Express, 2007, 15: 4106—4111
 - 48 Rui G, Chen W, Lu Y, et al. Plasmonic near-field probe using the combination of concentric rings and conical tip under radial polarization illumination. J Optics, 2010, 12: 035004
 - 49 Yan J, Lu Y H, Wang P, et al. Improve the sensitivity of fiber-optic SPR sensor via radially polarized beams excitation. Chin Opt Lett, 2009, 7: 909—911

The control research and application of surface plasmon polaritons

MING Hai, WANG XiaoLei, WANG Pei & LU YongHua

Department of Optics and Optical Engineering, Anhui Key Laboratory of Optoelectronic Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

Rapid development in surface plasmon polaritons (SPPs) optics comes from further reaserch on SPPs and the progress of high precision nanofabrication technology. Since SPPs has surface localization and nearfield enhancement characteristics, SPPs has significant applications in many fields, such as nano optics, energy source, sensing, biological science and so on. In this paper, based on the properties, we introduce the control characteristics of material, structure, the combination of material and structure, and the cylindrical vector light on SPPs, and its applications.

surface plasmon polaritons, localized surface plasmon, micro and nano metal structure, nanometer metal composite materials, nonlinear material, cylindrical vector light

doi: 10.1360/972010-125