

纳米银线波导中表面等离子极化波激发和辐射的偏振特性研究*

陈园园 邹仁华 宋钢 张恺 于丽† 赵玉芳 肖井华

(北京邮电大学理学院, 信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876)

(2012年6月4日收到; 2012年7月5日收到修改稿)

在可见光波段 ($\lambda = 750 \text{ nm}$), 实验研究了在端面辅助情况下, 细纳米银线波导中表面等离子极化波激发和辐射的偏振特性. 实验发现在细纳米银线中, 不同偏振态的入射光对应的表面等离子极化激元的激发和传输效率有明显不同, 但对应的出射光始终为方向恒定的线偏振光. 对于化学合成的纳米银线, 端面的轴对称性普遍比较好, 对此类纳米银线进行激发时, 如果入射光偏振态与纳米线近似平行, 则激发和传输表面等离子极化激元的效率最高; 如果正交, 激发和传输效率则最低. 对于某些端面轴对称性较差的纳米银线, 如端面为尖端或类斜面, 当入射光偏振态与纳米线有一定夹角时, 激发和传输表面等离子极化激元的效率最高. 在入射光偏振改变的过程中出射光的偏振方向始终与纳米银线平行. 最后结合有限元差分方法理论解释了纳米银线中这种偏振特性的物理机理. 利用纳米银线中表面等离子极化激元激发和辐射的偏振特性, 可以在亚波长尺寸上实现对光强和偏振态的调控.

关键词: 表面等离子极化激元, 纳米银线, 波导, 偏振态

PACS: 73.20.Mf, 73.63.-b, 42.79.Gn, 42.25.Ja

1 引言

表面等离子激元 (SPP) 能够突破光学衍射极限, 通过对 SPP 的操控有望实现亚波长光子学器件的集成^[1-3]. 作为传输和调控 SPP 的手段, SPP 波导在光子集成领域中扮演着重要的角色. 以往, 人们将注意力集中在平面波导^[4]、环形波导^[5]、腔形波导^[6]上, 在这些波导结构的基础上, 通过合理的设计, 实现了亚波长尺寸上高速、便捷、可调控的信息传输. 近些年, 随着化学合成技术的不断提高, 表面光滑、直径在纳米尺度的金属纳米线被成功合成. 相对于传统波导结构, 金属纳米线具有比较显著的优势, 例如易于制备和激发、损耗低和方向性好等, 最有希望成为 SPP 的“光纤”^[7,8]. 目前, 对这类波导的研究, 主要集中在激发和传输效率的提高、拉曼散射增强和光强调控等^[9-13]. 但对于此类波导偏振特性, 特别是在偏

振调控方面的研究却非常有限. 本文利用纳米银线波导, 实验研究了在可见光波段 ($\lambda = 750 \text{ nm}$) 表面等离子极化激元激发和辐射的偏振特性, 以及两者之间的关系. 发现在纳米银线中, 不同偏振态的入射光对应的表面等离子极化激元的激发和传输效率有明显的不同, 但对应的出射光始终为方向恒定的线偏振光. 并利用时域有限差分法, 研究纳米银线表面电磁场的分布情况, 解释了实验现象.

2 实验系统

本文实验中所用的纳米银线利用化学还原的方法制备而成^[14], 具有规则的晶面结构、表面光滑^[15]. 用胶头滴管取少量含有纳米银线的悬浊液旋涂在载玻片上 ($n = 1.52$), 自然风干. 如扫描电镜图 1(c) 所示, 合成纳米线长 $5 \mu\text{m}$ 左右, 直

* 国家重点基础研究发展计划 (973 计划)(批准号: 2010CB923202) 资助的课题.

† E-mail: yuli@gmail.com

径约为 120 nm. 实验装置如图 1(a) 所示, 中心波长 $\lambda = 750 \text{ nm}$ 的激光 (TEM 模) 通过物镜被聚焦在纳米线的一端, 物镜放大倍数为 100, 数值孔径 NA 为 0.8. 纳米线端面的形貌满足表面等离子激元激发的波矢匹配条件, 从而光波成功转化成表面等离子激元在纳米线中传输. 在纳米银线的另一端同样因为满足波矢匹配, 传输的表面等离子激元再次转换

为光波, 并被同一个物镜收集, 最终通过 CCD 探测器成像. 如图 1(b) 实验光学图像所示, 在纳米银线上 SPP 可以被成功激发, 当传输到纳米线另一端头时被散射而转换成自由光子^[16]. 实验中利用偏振分束器和二分之一波片调节入射激光的偏振方向, 利用 CCD 前面的检偏器来检验出射光的偏振方向.

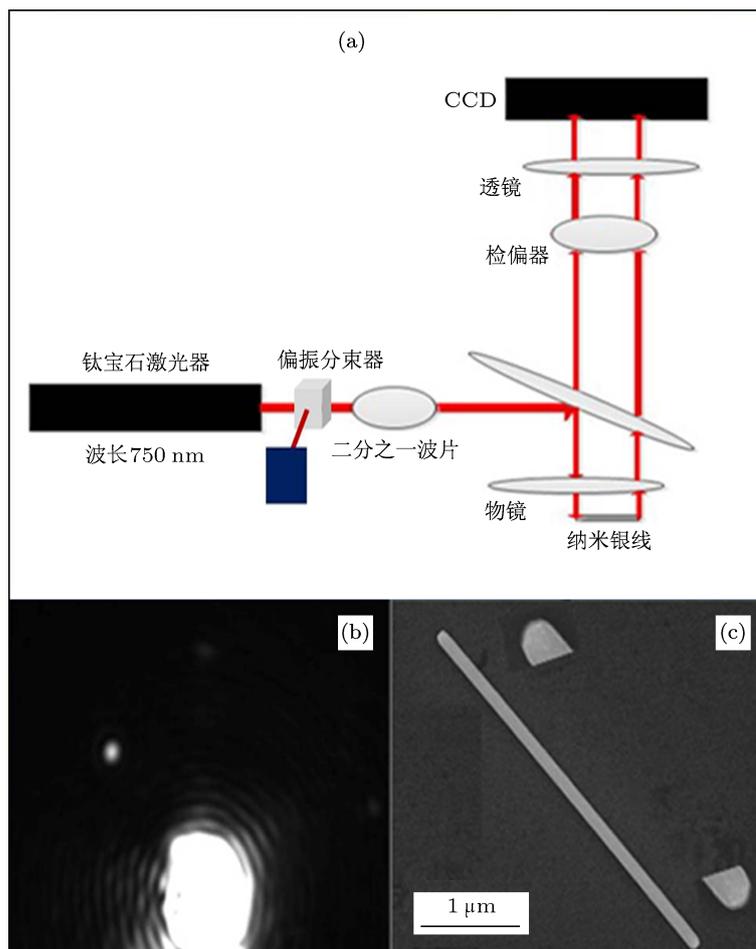


图 1 实验装置与激发示意图 (a) 实验仪器和光路图; (b) 纳米银线的暗场激发图像; (c) 纳米银线的扫描电镜图像, 其中插图
为端头形貌

3 实验结果与理论分析

实验中对于激发光源, 我们用检偏器对其进行了检测, 根据出射的光强变化和消光现象确定该光源为线偏振光. 线偏振的光源首先通过偏振分束器, 得到偏振方向为水平方向的透射光, 然后通过旋转 1/2 波片 (工作波长包含 750 nm) 来实现对线偏振光偏振方向调节. 对于整个实验系统的偏振性我们做了以下验证: 在同样的实验系统下, 我们不

放置纳米银线样品, 然后同样通过二分之一波片改变入射光的偏振, 用 CCD 检测反射光的强度, 实验结果显示光强虽在一定范围内浮动, 但是基本保持不变. 这说明整个实验系统与实验结果中的偏振特性没有明显的关联. 在放置纳米银线样品的实验系统中, 通过改变入射光偏振方向和检测纳米线出射端光强的方法, 实验研究了 SPP 激发和传输效率与激发光偏振方向的关系. 本文中统一规定如下: 在样品的像平面内, 角度坐标系竖直方向为 0° , 绕顺

时针方向增大; 入射光偏振方向角 $\theta(0^\circ\text{---}360^\circ)$; 纳米银线的方向角为 $\beta(0^\circ\text{---}180^\circ)$; 出射光偏振方向角为 $\alpha(0^\circ\text{---}180^\circ)$. 图 2(a) 为纳米银线 ($\beta = 162^\circ$) 的 SPP 激发示意图, 在纳米线的出射端, 我们用圆圈标注出了出射光的位置. 如图所示, 当入射光偏振角度 θ 为 150° , 100° 和 70° 时, 纳米银线中激发和传输 SPP 的效率明显不同. 为了深入研究激发光偏振方向与出射光强的定量关系, 我们通过记录 CCD 中采集到的出射光光强大小, 并将所得的数据归一化, 得到出射光强随激发光偏振方向的变化图 2(b), (c), (d), 其中三幅图中纳米银线分别对应 $\beta_1 = 144^\circ$, $\beta_2 = 2^\circ$ 和 $\beta_3 = 41^\circ$, 如实验结

果所示, 随着激发光偏振方向的改变, 出射光强呈现类似于周期性的正弦振荡形式. 如图 2(b) 所示, 当 $\theta_1 = 138^\circ$ 即激发光偏振方向与纳米线近似平行时 (相差 6°), 出射光强达到最大值. 同样在图 2(c) 中, 对于 $\beta_2 = 2^\circ$ 的纳米银线, 当 $\theta_3 = 357^\circ$ 时, 即激发光偏振方向与纳米线近似平行时 (相差 5°), 出射光强最强, 当偏振方向转过 90° 左右之后都是光强达到最小值. 实验中其他大部分数据也表现出了类似的特点, 因此我们可以得出结论, 当入射光偏振态与纳米线轴线平行时, 激发和传输 SPP 的效率最高, 垂直时则非常低. 但实验中也有少部分数据显示的规律却与上述结论偏差较大, 如图 2(d) 所示,

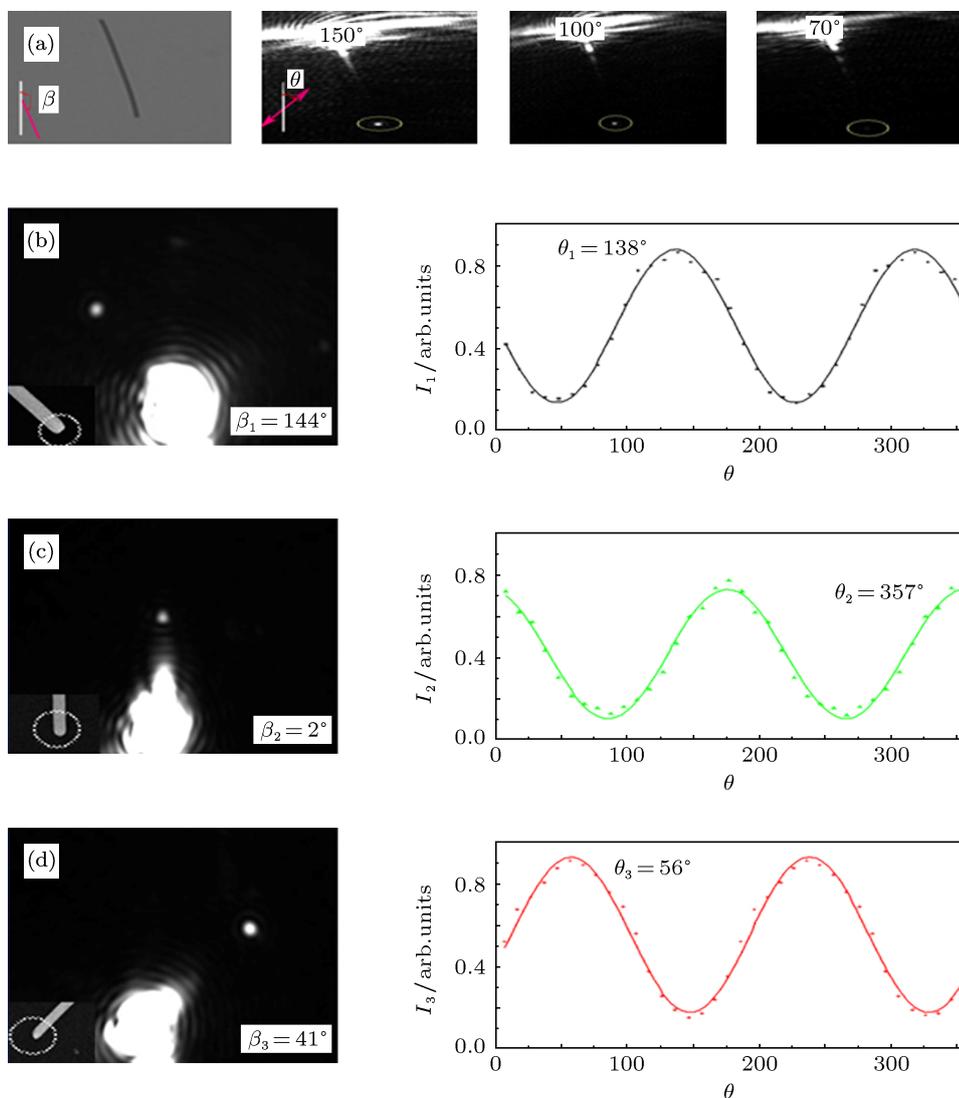


图 2 出射光强与入射光偏振方向的关系 (a) 白线表示 0° 方向, 红线表示纳米银线轴线, 红色箭头表示入射光偏振态, β 代表纳米线的方向角, θ 代表激发光的偏振方向; (b)—(d) 横坐标 θ 表示入射光偏振方向, 纵坐标是归一化的出射光强

对于 $\beta_3 = 41^\circ$ 的纳米线, 出射光的最大值出现在激光偏振方向 56° 附近, 与纳米线平行方向相差 15° . 这是由于纳米线中 SPP 激发是通过端面来实现波矢匹配, 端面的形貌对 SPP 的激发具有着非常显著的影响, 不同的端面对偏振的依赖性有所差别 [17]. 如图 2(b), (c) 中插图所示, 银线的端头是具有较好轴对称性质的平面或凸面, 对入射光的偏振态产生的作用相互抵消. 而图 2(d) 插图中的纳米线端头不具有轴对称性, 端面是呈现一定角度的斜面, 入射光的偏振角度会被调制一定的角度, 结果造成了最大强度的出射光对应的激发偏振态方向与纳米线轴向有较大偏移. 另外端面的形貌在 SPP 的去耦合过程中, 对出射光的偏振、发射角等也有着一定的影响, 这将在我们下一步的工作中进一步深入研究.

通过控制入射光的偏振方向和出射端的检偏片, 我们实验研究了出射光的偏振特性. 图 3 为出射光强随检偏片角度的变化, 方块、圆点与三角号分别代表三种不同偏振方向的入

射光的情况. 如图 3(a) 所示, 分别用偏振方向为 $\theta_1 = 130^\circ$, $\theta_2 = 100^\circ$ 与 $\theta_3 = 60^\circ$ 的入射光激发方向角 $\beta_1 = 138^\circ$ 的纳米银线, 这三种情况下出射光强随检偏片旋转角度的变化趋势基本一致, 均在 52° 与 232° 时出现消光的现象, 在 142° 与 322° 时达到最大值. 因此对于任何偏振方向的入射光, 出射光始终是偏振角 $\alpha_1 = 142^\circ$ 的线偏振光. 同样我们可以得到图 3(b) 和 (c) 中出射光始终是偏振角 $\alpha_2 = 177^\circ$ 和 $\alpha_3 = 49^\circ$ 的线偏振光. 通过比较出射光的偏振方向和纳米银线的方向 ($\beta_1 = 138^\circ$, $\alpha_1 = 142^\circ$; $\beta_2 = 178^\circ$, $\alpha_2 = 177^\circ$; $\beta_3 = 47^\circ$, $\alpha_3 = 49^\circ$), 我们可以发现两者在一定的误差范围内保持一致. 由此可以得出结论: 不论入射光偏振方向如何改变, 出射光总为线偏振光, 并且偏振方向始终与纳米线轴向保持一致. 因此对于波长为 750nm 的可见光, 直径在 120nm 左右的纳米银线起到了偏振片的作用, 在光路纳米集成中, 这将对实现光的偏振方向调控有重要的意义.

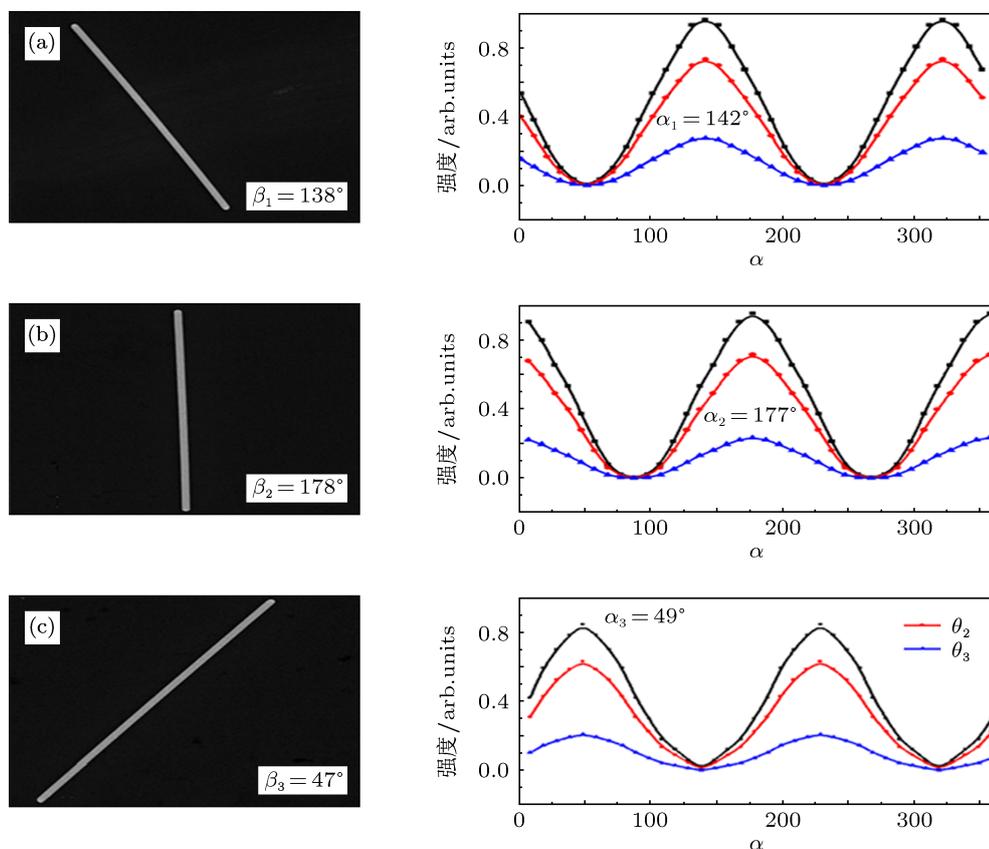


图 3 出射光强与检偏片旋转角度之间的关系, 其中方块、圆点与三角号分别代表 θ_1 , θ_2 和 θ_3 三种不同入射光偏振方向, 横坐标表示检偏片的旋转角度, 纵坐标表示归一化的出射光强

为了理解和验证实验中纳米银线的激发和辐射偏振特性态, 我们利用时域有限差分方法 (FDTD) 进行了理论分析. 如图 4(a) 所示, 参照扫描电子显微镜下纳米银线的尺寸, 仿真中我们设置纳米银线的长度为 $5 \mu\text{m}$, 直径为 120 nm , 银的介电常数利用复合洛伦兹模型. 入射光源为与实验光源相同的 TEM 模的单色光, 波长为 750 nm . 激发光垂直入射到纳米线的端头. 如图 4(a) 中插图所示, 设纳米线轴向为 z 轴, 垂直于纸面向外为 y 轴.

对于水平偏振和垂直偏振的两种激发光, 纳米银线表面电场分布如图 4(b) 所示. 当偏振方向平行于纳米线的激发光垂直入射到纳米银线的一端时, 在纳米线中激发了 $m = 0$ 模式, 在垂直于纳米线轴线的截面上电场均匀分布; 当用偏振方向垂直于纳米线的光波激发时, $m = 1$ 模式被激发, 在垂直于纳米线轴线的截面上电场有两个节点. 不同的模式分布, 导致纳米线中 SPP 的激发和传输效率有明显的差异^[17-19]. 如图 4(c) 所示, 对于强度同样为 1 的激发光, $m = 0$ 模式和 $m = 1$ 模式的激发效率和传输效率差异显著. 在纳米线的激发端 ($z = -2.5 \mu\text{m}$) 处, $m = 0$ 模式的初始强度约为 $m = 1$ 模式初始强度的 100 左右, 因此水平偏振的激发光激发表面等离基元效率更高. 对于 $m = 0$ 模式, 纳米线可以作为表面等离子体激元的法布里-珀罗共振腔, 这将克服由于金属而引起的损耗使出射光显著增强, 这通过图 4(c) 可以看出; 而对于 $m = 1$ 模式, 纳米线中电场为逐渐衰减的分布, 因此水平偏振激发的 $m = 0$ 模式的表面等离激元有更低的传输损耗. 综上所述, 偏振方向平行于纳米银线的激发光激发 SPP 的效率和对应 SPP 的传输效率最高, 而偏振方向垂直于纳米银线的激发光对应的激发和传输效率最低^[16]. 因此我们可以定义入射光的强度为

$$I_e = I_o \times \cos \delta \times C_{\parallel} \times e^{-L/\gamma_{\parallel}} + I_o \times \cos(90^\circ - \delta) \times C_{\perp} \times e^{-L/\gamma_{\perp}}, \quad (1)$$

其中, I_o 为激发光强, δ 为激发光偏振和纳米线轴线的夹角, C_{\parallel} 为激发光平行偏振分量的耦合为 SPP 的效率, γ_{\parallel} 为激发光平行偏振激发的 SPP 的衰减长度, C_{\perp} 为激发光垂直偏振分量的耦合为 SPP 的效率, γ_{\perp} 为激发光垂直偏振激发的 SPP 的衰减长度. 由以上计算结果可知 $C_{\parallel}/C_{\perp} \sim 100$, 因此我们可以近似认为出射光完全是水平偏振的激发光激

发的 SPP 散射而成, 即

$$I_e = I_o \times \cos \delta \times C_{\parallel} \times e^{-L/\gamma_{\parallel}}. \quad (2)$$

通过 (2) 式可得, 出射光的强度随着入射光偏振的变化呈现余弦函数的振荡变化, 并且当入射光偏振与纳米线平行时出射光强最大, 垂直时出射光强最小, 这与图 2 中的实验结果非常符合.

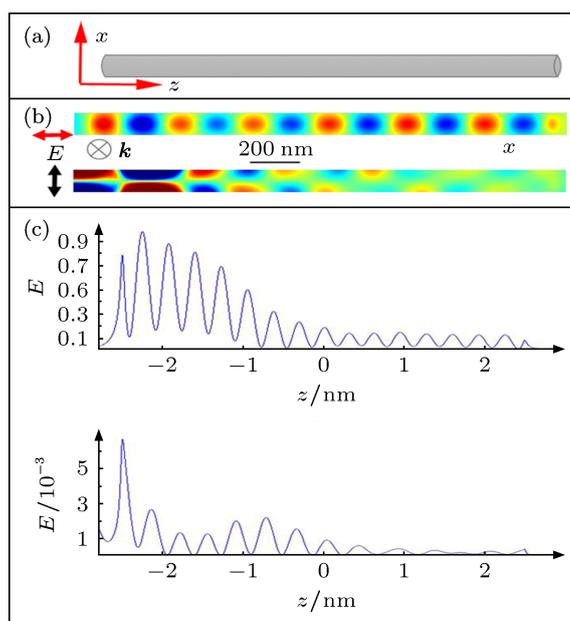


图 4 (a) 仿真结构及坐标系; (b) 垂直和水平偏振的激发光对应的电场分布图, 红色和黑色箭头表示入射光的偏振方向; (c) 水平和垂直两种激发偏振态下, 纳米银线中电场强度随传输方向的变化

以上实验结果证实对于 750 nm 的激发光, 直径 120 nm 的纳米银线, 出射光的偏振态不随入射光的偏振而改变, 并且总是沿着银线轴线方向, 起到了偏振片的作用. 本论文中纳米线的出射光偏振特性与相关论文中纳米银线出射光的偏振是随着入射光的偏振而改变的有明显差异^[17]. 为了研究引起这两种出射偏振特性的原因, 我们做了以下分析. 如图 5 所示, 我们分别研究了 632 nm 和 750 nm 两种激发光的情况下, $m = 0$ 和 $m = 1$ 模式的强度随着纳米线长度的分布图. 由文献已知水平偏振激发的 SPP 的出射光偏振同样为水平方向, 垂直偏振激发的 SPP 的出射光偏振同样为垂直方向, 因此出射光的偏振态是这两种偏振的叠加^[17]. 如图 5(a) 所示, 当实验测量的纳米线达到 $5 \mu\text{m}$ 左右时, $m = 0$ 和 $m = 1$ 模式强度差异逐渐缩小, 出射光由两种模式的散射光叠加而成, 因此出射光的偏

振会随着入射光的偏振改变而改变. 如图 5(b) 所示, 当实验测量的纳米线达到 $5 \mu\text{m}$ 左右时, $m = 0$ 和 $m = 1$ 模式强度差异仍然在 10^2 量级, 这种条件下可以认为出射光几乎完全由水平偏振的入射光

激发得到, 因此出射光的偏振为平行于纳米线方向. 这与图 3 中实验数据非常符合. 纳米线在特定波长下的偏振片特性在纳米光路集成中实验对表面等离激元偏振态的控制将有重要的意义.

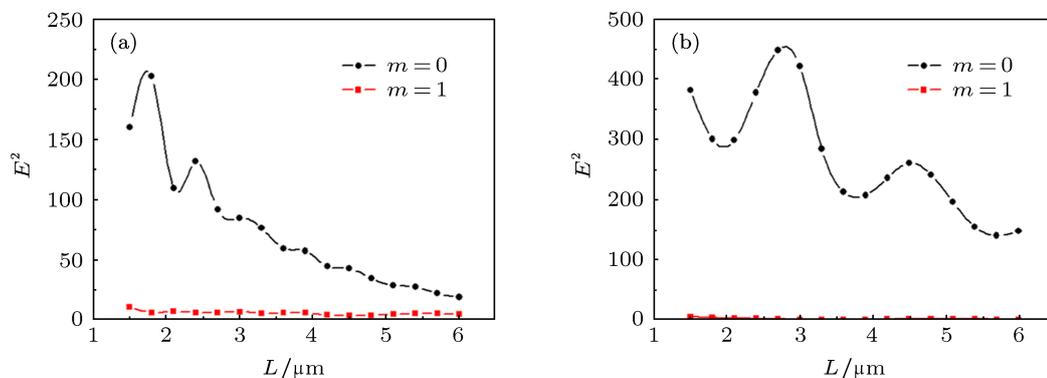


图 5 (a) 在激发光波 632 nm , 银线直径 120 nm 条件下, $m = 0$ 模式和 $m = 1$ 模式的强度随着纳米线轴线的变化图; (b) 在激发光波 750 nm , 银线直径 120 nm 条件下, $m = 0$ 模式和 $m = 1$ 模式的强度随着纳米线轴线的变化图

4 结论

综合上述分析可知, 对于直径为 120 nm 左右的纳米银线, 将波长为 750 nm 的可见光波直接聚焦在纳米银线的一端可以激发 SPP, 并且 SPP 的激发效率及在纳米银线中的传输效率与入射光偏振方向紧密相关. 对于具有轴对称端面的纳米银线, 当入射光偏振方向与纳米线近似平行时, 激发和传输效率最高; 当入射光偏振方向与纳米线垂直时激发和传输效率最低. 而如果纳米银线端面为不具

有轴对称性的不规则端面, 则入射光偏振方向与纳米线有一定夹角时才能达到最高的激发和传输效率. 我们发现, 由于水平和垂直偏振的激发光激发的 $m = 0$ 模式和 $m = 1$ 模式的激发和传输效率与激发波长密切相关. 对于 750 nm 的激发光波, 出射光主要是水平入射偏振引起, 因此出射光的偏振态为始终平行于纳米线方向, 即纳米银线充当了一个 SPP 偏振片的作用. 这对未来 SPP 光子集成技术中的 SPP 的光强可控和偏振可控具有深远的意义与广阔的应用前景.

- [1] William L B, Alain D, Thomas W E 2003 *Nature* **424** 824
- [2] Stefan A M 2005 *Current. Nanoscience*. **1** 17
- [3] Dai H, Wu X P, Xu H F, Wei M D 2009 *Electrochemistry. Communications*. **11** 1599
- [4] Maier S A, Kik P G, Atwater H A 2003 *Nature. Materials*. **2** 229
- [5] Guo X, Qiu M, Bao J M, Wiley B J, Yang Q, Zhang X N, Ma Y G, Yu H K, Tong L M 2009 *Nano. Lett.* **9** 4515
- [6] Zhu X L, Ma Y, Zhang J S, Xu J, Wu X F, Zhang Y 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 127402
- [7] Aric W S, David A R, Benjamin J W, Xia Y N, Eric R D, Mark A R 2006 *Nano. Lett.* **6** 1822
- [8] Li Z P, Hao F, Huang Y Z, Fang Y R, Nordlander P, Xu H X 2009 *Nano. Lett.* **9** 4383
- [9] Zhong M L, Li S, Xiong Z H, Zhang Z Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 027803 (in Chinese) [钟明亮, 李山, 熊祖洪, 张中月 2012 物理学报 **61** 027803]
- [10] Knight M W, Grady N K, Bardhan R, Hao F, Nordlander P, Halas N J 2007 *Nano Lett.* **7** 2346
- [11] Manjavacas A, Garcí a de Abajo F J 2009 *Nano. Lett.* **9** 1285
- [12] Wang L L, Ren X F, Liu A P, Liu L, Yong J C 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 061103
- [13] Zhang L W, Zhao Y H, Wang Q, Fang K, Li W S, Qiao W T 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 068401 (in Chinese) [张利伟, 赵玉环, 王勤, 方凯, 李卫彬, 乔文涛 2012 物理学报 **61** 068401]
- [14] Murphy C J, Jana N R 2002 *Adv. Mater.* **14** 80
- [15] Graff A, Wagner D, Ditlbacher H, Kreibig U 2005 *Eur. Phys. J. D* **34** 263
- [16] Harald D, Andreas H, Dieter W, Uwe K, Michael R, Ferdinand H, Franz R A, Joachim R K 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 257403
- [17] Li Z P, Bao K, Fang Y R, Huang Y Z, Nordlander P, Xu H X 2010 *Nano. Lett.* **10** 1831
- [18] Chen Y T, Nielsen T R, Gregersen N, Lodahl P, Mørk J 2010 *Phys. Rev. B* **81** 125431
- [19] Ruda H E, Shik A 2005 *Phys. Rev. B* **72** 115308

The polarization characteristics of the excitation and emission of surface plasmon polarization in the Ag nanowires*

Chen Yuan-Yuan Zou Ren-Hua Song Gang Zhang Kai Yu Li[†]
Zhao Yu-Fang Xiao Jing-Hua

(Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications of Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

(Received 4 June 2012; revised manuscript received 5 July 2012)

Abstract

We experimentally investigate the dependences of the surface plasmon polarization (SPP) in the Ag nanowires on the polarizations of the excitation light and the emission light with a wavelength of excitation light 750nm. We find that the excitation and transmission efficiency change obviously with the polarization of incident light. However, the emission light is always linearly polarized light with an unchanged polarization direction. For the nanowires synthesized using a self-seeding process, their ends are axisymmetric. When the direction of the incident light is parallel to these Ag nanowires, the excitation and transmission efficiency of SPP are high. Conversely, when the polarization direction of the incident light is perpendicular to the wire axis, it is very low. For the nanowires with asymmetric ends, when the direction of the incident light has an angle with respect to the Ag nanowires, the excitation and transmission efficiency of SPP are high. While the polarization direction of emission light is always parallel to the wire axis which means that the polarization of the emission light does not depend on the polarization direction of the incident light. The polarization characteristics of the SPP in the thin Ag nanowires can realize the nanoscale manipulation of the intensity and polarization.

Keywords: surface plasmon polarizations, Ag nanowires, waveguide, polarization

PACS: 73.20.Mf, 73.63.-b, 42.79.Gn, 42.25.Ja

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2010CB923202).

† E-mail: yuli@gmail.com