

doi: 10.3788/gzxb20144304.0424001

# 近场研究表面等离子体在银纳米线上的传输

刘爱萍, 任希锋

(中国科学技术大学 a. 中国科学院量子信息重点实验室; b. 量子信息与量子科技前沿协同创新中心, 合肥 230026)

**摘 要:**通过双探针近场光学扫描显微镜在银纳米线上实现近场激发和近场收集表面等离子体, 用一个探针在银纳米线的一端近场激发表面等离子体, 另一个探针近场探测银纳米线上的表面等离子体强度分布, 得到强度分布图. 强度分布图显示表面等离子体在银纳米线的一端被有效激发并且有一部分表面等离子体沿着银纳米线和基底的界面传播到了另一端. 用有限元法对银纳米线内的传播模式进行数值模拟, 结果显示银纳米线内存在两种表面等离子体传播模式, 分别为基模和高阶模. 沿着银纳米线和基底介质之间传输的基模表面等离子体由于传输环境稳定, 散射损耗小, 实际传输长度接近模式传输长度, 达  $10\ \mu\text{m}$  以上; 而高阶模表面等离子体由于部分裸露在空气中受表面缺陷散射的影响, 散射损耗大, 实际传输长度远小于模式传输长度. 研究表明: 以能量高度束缚的基模表面等离子体作为载体, 不仅可以实现低损耗传输, 还可以减小集成器件之间的信号串扰, 有效提高信息传输的安全性, 在集成光学中具有重要应用.

**关键词:**表面等离子体; 集成光学; 近场光学扫描显微镜; 纳米线; 光学性质鉴定; 数值分析; 光学损耗

**中图分类号:** TN25; TN814+.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2014)04-0424001-4

## The Analysis of Surface Plasmon Polariton Propagating on Silver Nanowire in Near Field

LIU Ai-ping, REN Xi-feng

(a. Key Laboratory of Quantum Information; b. Synergetic Innovation Center of Quantum Information & Quantum Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** Surface plasmon polaritons propagating along the silver nanowire was studied by near field scanning optical microscopy with twoprobes. In the experiment, one of the probe connected to laser is positioned on one end of the silver nanowire to excite surface plasmon polariton in near field, and the other probe scans along the silver nanowire to collect surface plasmon polariton in near field. The experimental result shows that surface plasmon polaritons are excited by the probe efficiently, and some of them reach the distal end facet of silver nanowire by propagating along the gap of silver nanowire and silica substrate. Finite element method is used to calculate the field distribution of surface plasmon polariton modes on silver nanowire, which shows there are two surface plasmon polariton modes with one as fundamental mode and the one as high mode. The fundamental mode of surface plasmon polariton, with its energy bounded to the gap of silver nanowire and silica substrate, suffers less scattering loss and can reach the other end of the silver nanowire. And the high mode of surface plasmon polariton attenuates quickly due to the scattering on the surface defects. With the fundamental mode of surface plasmon polariton as information carrier, the efficiency of integrated optical device can be increased for its low propagation loss. What is more, the security of information transmission is improved since the energy of

**基金项目:**国家自然科学基金(Nos. 10934006, 11374289)和国家重点基础研究发展规划项目计划(Nos. 2011CBA00200, 2011CB921200)资助

**第一作者:**刘爱萍(1986-),女,博士研究生,主要研究方向为表面等离子体. Email: apliu9@mail.ustc.edu.cn

**导师:**任希锋(1980-),男,副教授,博士,主要研究方向为表面等离子体. Email: renxf@ustc.edu.cn

**收稿日期:**2014-03-04; **录用日期:**2014-03-28

<http://www.photon.ac.cn>

the fundamental mode is bounded to the gap without scattering during propagation, which is important in optical communication.

**Key words:** Surface plasmon resonance; Integrated optics; Near field scanning optical microscopy; Nanowires; Optical character recognition; Numerical analysis; Optical losses

**OCIS Codes:** 240.6680; 180.4243; 160.4236; 120.4800; 130.3130

## 0 引言

表面等离子体 (Surface Plasmon Polariton, SPP) 是金属内自由电子的集体振荡, 并且沿着金属和介质的界面传输. 1988 年, Ebbesen 等人<sup>[1]</sup> 在金属孔阵结构中发现了由表面等离子体引起的光学反常透射现象. 近 20 年来, 人们对表面等离子体进行了大量研究并将其用于各个领域, 如生物探测、超分辨率成像、低阈值激光器等<sup>[2]</sup>, 其中, 将表面等离子体用于集成光学中作为信息载体具有非常好的前景<sup>[3]</sup>. 随着信息的高度集成化, 器件的尺度变得越来越小, 光作为信息载体受衍射极限制, 不能在小于光波长的器件中传输, 限制了光学器件的集成度. 表面等离子体的能量高度束缚, 在金属和电介质的界面进行传播, 能够突破光学衍射极限制, 从而实现在微纳结构中的传输. 研究表明, 表面等离子体不仅具有良好的量子性质而且能够编码信息<sup>[4-6]</sup>, 为表面等离子体应用于集成光学奠定了基础.

作为信息载体, 传输损耗决定器件的品质. 银纳米线作为表面等离子体的传输介质具有吸收损耗小, 制备成本低, 控制容易等特性, 在研究中被广泛作为表面等离子体的传输波导. 现有对银纳米线上表面等离子体传输的许多研究都是基于远场或者半远场方式, 不能够真实体现表面等离子体在银纳米线上的场分布<sup>[7-8]</sup>. 本文通过双探针近场光学扫描显微镜 (Near Field Scanning Optical Microscopy, NSOM) 实现近场激发和近场收集银纳米线上的表面等离子体, 得到 NSOM 图, 给出了表面等离子体的近场强度分布图. 进一步用有限元法对银纳米线上的表面等离子体模场分布进行数值模拟, 分析实验测量结果.

## 1 实验装置和原理

实验所用的样品是通过化学方法制备的银纳米线<sup>[9]</sup>, 直径为 300 nm, 长度为 10  $\mu\text{m}$  左右. 图 1 为实验装置示意, 其中左下方插图是银纳米线的电镜扫描图 (Scanning Electronic Microscopy, SEM). 在银纳米线的表面再生长一层 25 nm 的二氧化硅层<sup>[10]</sup>, 既可以避免银纳米线裸露在空气中被氧化而改变性质, 又可以让银纳米线和介质基底之间保留一定的间隙, 提高表面等离子体的传输长度<sup>[11]</sup>. 用胶机将含有银纳米线的酒精溶液均匀涂在玻璃基底上, 然后放在超净间干燥, 待酒精挥发后再甩一层 50 nm 厚的聚甲基丙烯酸甲酯 (Polymethylmethacrylate, PMMA), 将银纳米线

固定在玻璃基底上, 防止探针扫描样品时改变银纳米线的位置.

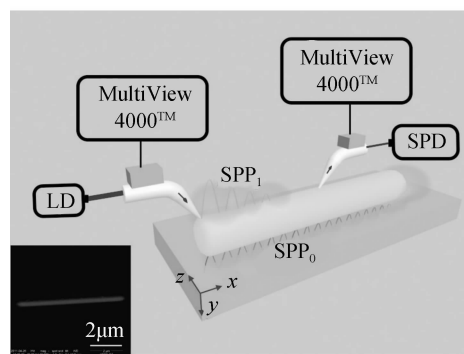


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental setup

实验所用近场光学扫描显微镜具有两个探针, 分别由两个 Multiview 4000<sup>TM</sup> 系统控制, 可以同时独立工作. 探针工作模式包括激发模式和扫描模式. 探针针尖直径均为 100 nm, 其中一个探针工作于激发模式, 用于近场激发银纳米线上的表面等离子体, 另一个探针工作于收集模式, 用于近场收集在银纳米线上的表面等离子体<sup>[12]</sup>. 波长为 671 nm 的半导体激光器 (Laser Diode, LD) 发出的光经过单模保偏光纤导入激发探针的尾端再从针尖导出, 该探针的针尖静止停靠在银纳米线的一端激发表面等离子体. 所激发的表面等离子体沿着银纳米线传输, 由工作于收集模式的探针近场收集. 收集探针在银纳米线上表面扫描并探测各点的表面等离子体强度. 收集到的场强信号由单模保偏光纤传到单光子探测器 (Single Photon Detector, SPD) 上, 由单光子探测器测量扫描探针所探测的各个点的表面等离子体强度. 得到的强度值再传给 Multiview 4000<sup>TM</sup> 系统进行处理得到 NSOM 图<sup>[13]</sup>, 即收集探针扫描区域的表面等离子体近场强度分布.

## 2 实验结果和数值分析

图 2(a) 是在一根长度约为 11  $\mu\text{m}$  的银纳米线上测得的 NSOM 图, 虚线表示所测银纳米线的轮廓. 为了保护探针, 扫描过程中两个探针最小距离为 0.5  $\mu\text{m}$ , 即靠近激发端还有 0.5  $\mu\text{m}$  的银纳米线上的表面等离子体分布没有测量到. 从 NSOM 图可以看出, 在激发端附近 (左端), 银纳米线上有场强分布, 但是强度衰减很快, 在距离激发端约 3  $\mu\text{m}$  的 A 点之后, 场强就接近零, 但是在银纳米线的另一端附近强度又增大, 并且在端面处出现极大值. 图 2(a) 中实线的表面等离子体强

度分布如图 2(b),只有在银纳米线的两端附件能够测到表面等离子体场强度的分布,中间约  $8 \mu\text{m}$  的区域都没有强度分布.

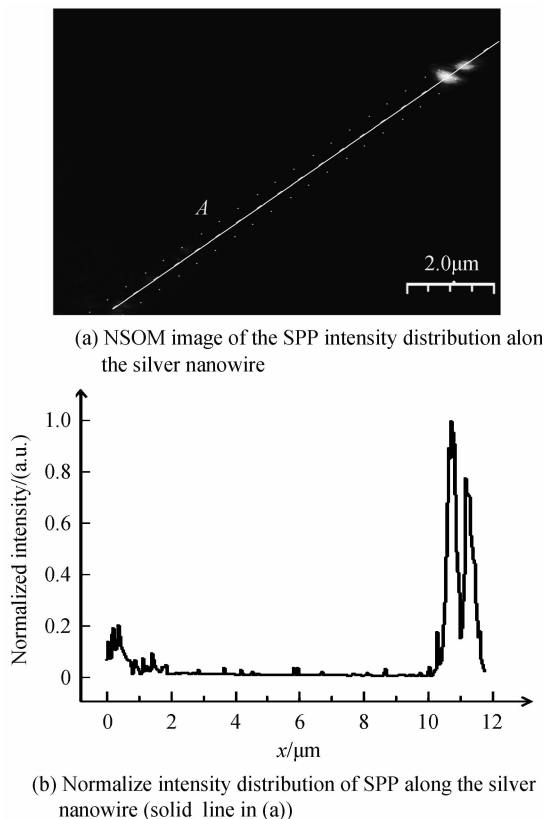


图 2 实验测量结果

Fig. 2 Experimental results

表面等离子体的传播矢量  $\mathbf{k}_{\text{SPP}} = \mathbf{k}_0 \sqrt{\epsilon_m \epsilon_1 (\epsilon_m + \epsilon_1)}$ , 其中  $|\mathbf{k}_0| = 2\pi/\lambda_0$  是激发光的自由传播矢量,  $\epsilon_m$  和  $\epsilon_1$  分别是金属和电介质的介电常量.  $\mathbf{k}_{\text{SPP}} \neq \mathbf{k}_0$  说明表面等离子体和激发光之间存在波矢失配, 即动量失谐, 他们之间不能直接相互转化. 实验中采用近场激发, 激发探针的针尖直径约为  $100 \text{ nm}$ , 远小于激发光的波长 ( $671 \text{ nm}$ ), 针尖处产生增强的局域近场, 在银纳米线的端面相互作用补偿了表面等离子体和激发光之间的动量失谐量, 从而表面等离子体被激发并沿着银纳米线的表面传输<sup>[14]</sup>. 以银纳米线纵轴为  $x$  轴建立如图 1 所示的直角坐标系, 在银纳米线表面传输的表面等离子体的电场可以表示为

$$\mathbf{E}_{\text{SPP}}(x, t) = \mathbf{E}_0 \exp\left(-i\omega t + \frac{i2\pi n_{\text{eff}} x}{\lambda_0}\right) \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{E}_0$  是激发的表面等离子体的初始振幅,  $n_{\text{eff}}$  是表面等离子体的有效折射率,  $\omega$  和  $\lambda_0$  分别为激发光的角频率和自由空间波长. 表面等离子体在传播过程中由于介质的吸收及模式散射等原因而在传输损耗, 所以  $n_{\text{eff}}$  是一个复数, 它的虚部  $\text{Im}(n_{\text{eff}})$  表示传输损耗. 定义传输长度为场的强度衰减为原来的  $1/e$  时所走过的距离, 则表面等离子体的模式传输长度为

$$L = \lambda_0 / [4\pi \text{Im}(n_{\text{eff}})] \quad (2)$$

在 COMSOL 4.2 平台对银纳米线上表面等离子体传输的模式场分布进行有限元数值模拟. 模拟结构和实验样品结构一样, 它的横截面如图 3(a), 银纳米线的直径为  $300 \text{ nm}$ , 外面包一层  $25 \text{ nm}$  的二氧化硅层, 放置于二氧化硅基底上, 并在样品上覆盖一层  $100 \text{ nm}$  厚的 PMMA. 对于  $\lambda_0 = 671 \text{ nm}$  的入射光激发, 银的介电常量取  $\epsilon_m = -18.45 + 1.20i$ , PMMA 和二氧化硅的折射率分别取  $1.49$  和  $1.5$ <sup>[15]</sup>. 经过数值模拟得到表面等离子体在纳米线上的两个传输模式, 场强度分布如图 3(b) 基模和 (c) 高阶模, 箭头表示电场的矢量方向. 这两个模式的有效折射率分别为  $n_0 = 1.66 - 0.013i$  和  $n_1 = 1.43 - 0.014i$ , 由式 (2) 可得这两个模式对应的模式传输长度分别为  $4.11 \mu\text{m}$  和  $3.81 \mu\text{m}$ <sup>[11]</sup>.

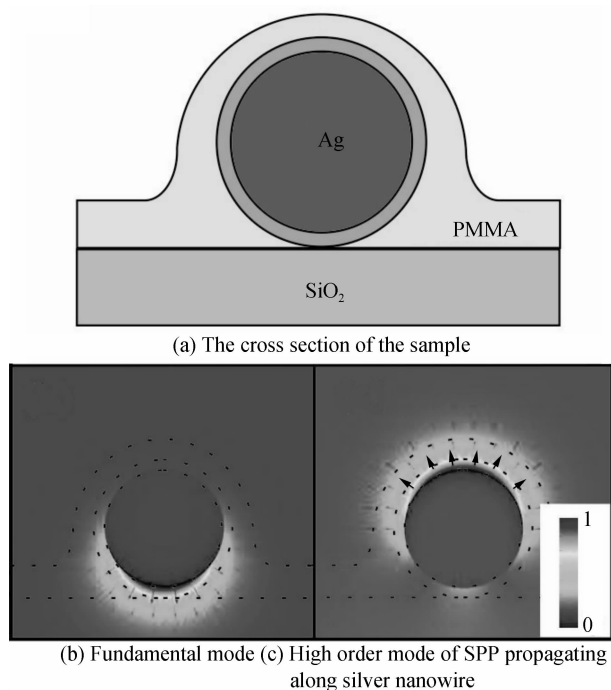


图 3 数值模拟结果

Fig. 3 Numerical calculation results

从图 3(c) 可以看出高阶模的能量主要沿着银纳米线的上表面传输, 这部分能量能够被在样品上表面扫描的收集探针探测到, 所以在实验测得的表面等离子体场分布图 (图 2(a)) 中, 靠近激发端 (左端) 的银纳米线上有场强分布. 伴随着表面等离子体的激发, 其它散射波也被激发, 在靠近激发端附近, 除了高阶表面等离子体被探测到, 其它散射波也被测到, 但从测得的 NSOM 图可以看出, 强度主要分布在银纳米线上 (白色虚线内), 说明测得的主要是表面等离子体, 其它散射波可以忽略. 虽然高阶模表面等离子体的模式传输长度为  $3.81 \mu\text{m}$ , 但是从图 2(b) 可以看出, 它的实际传输长度小于  $1 \mu\text{m}$ , 远小于模式传输长度. 高阶模的能量分布在银纳米线的上表面附近, 而且相当一部分能量分布在空气中, 由于 PMMA 和空气界面存在缺陷, 对表面等离子体的散射损耗大, 导致高阶模能量呈现指数衰

减,实际传输长度远小于模式传输长度,图 2(a)中点 A 之后的银纳米线上就基本测不到场强。

不同于高阶模,基模表面等离子体的能量主要局域在银纳米线和二氧化硅基底之间,这部分能量不能被位于样品上表面扫描的收集探针探测到,所以在银纳米线上测得的强度是高阶模表面等离子体,即图 2(a)中靠近激发端的场。在银纳米线右端的端面处,由于收集探针可以距离银纳米线和介质基底界面足够近,所以可以探测到基模表面等离子体的场。实验所测的银纳米线长度为  $11\ \mu\text{m}$ ,远大于数值模拟得到的基模表面等离子体的模式传输长度( $4.11\ \mu\text{m}$ ),但实验在银纳米线的右端测到了强度分布,而且比激发端附近的强度大。分析原因为:1)在样品制备过程中银纳米线和基底介质之间容易形成均匀的界面,存在的缺陷少,对表面等离子体的散射损耗小,相对稳定的传输环境使得基模表面等离子体的实际传输长度接近模式传输长度;2)采用探针近场激发表面等离子体,有效减少了激发时产生的散射损耗,提高了激发效率,被激发的表面等离子体强度大;3)银纳米线端面的散射增强效应,使得端面及附近有表面等离子体场分布;4)收集探针的近场增强作用提高了收集效率。所以,虽然表面等离子体从银纳米线的激发端传到另一端,经过的长度大于模式传输长度,衰减后的能量已经小于原来的,但是仍然有相当强的能量能够到达银纳米线的另一端,且被测量到。所以图 2(a)中银纳米右端面附近出现场强分布,而且在端面处得到场强极大值。

在集成光学中,要保证信息传输的效率,器件对传输载体的传输损耗必须足够小。高阶模表面等离子体受散射损耗大导致传输长度小,限制了传输信息的效率。而基模表面等离子体的能量沿着银纳米线和介质基底之间传输,散射损耗小,能够提供足够大的传输长度,保证了集成器件的传输效率。另一方面,集成器件的尺度往往比较密集,除了要求高的传输效率,还要避免相邻器件之间信息的串扰。高阶表面等离子体的能量分布在银纳米线的上表面,容易延伸到相邻器件而产生干扰,而且这部分场也容易受到周围环境的影响。所以高阶模表面等离子体不适合作为集成光学的信息载体。而基模表面等离子体不仅具有比高阶表面等离子体大的传输长度,而且它的能量被很好地束缚在银纳米线和介质基底之间传输。在信息传输过程中,加载在基模表面等离子体上的信息不容易受周围环境的影响,避免了与周围器件产生串扰,既能提高集成器件的集成度还保证了信息的质量。除此之外,传输信息的安全性也是至关重要的。在样品表面扫描的收集探针无法探测到基模表面等离子体,因为除了银纳米线的端面处,探针无法进入基模表面等离子体所在的区域内。将信息加载在基模表面等离子体上传输,可以有效防止外界仪器的探测,从而防止信息被窃取,保证了信息传输的安全性。

### 3 结论

通过双探针近场光学扫描显微镜实现近场激发和近场收集银纳米线上的表面等离子体。用有限元法数值模拟银纳米线上的传输模式,并分析近场探测的结果。高阶表面等离子体由于受表面缺陷散射的影响传输损耗大,而且容易受周围环境影响。而基模表面等离子体将能量束缚于银纳米线和介质基底之间传输,不但散射损耗小保证了传输效率,而且在传输过程中与周围环境作用小,可以防止集成器件之间产生信息串扰。基模表面等离子体作为传输信息的载体,既可以提高集成器件的集成度,还可以保证信息质量和安全性,对推动集成光学的发展具有重要作用。

#### 参考文献

- [1] EBBESEN T W, LEZEC H J, GHAEMI H F, *et al.* Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays[J]. *Nature*, 1998, **391**(6668): 667-669.
- [2] BARNES W L, DEREUX A, EBBESEN T W. Surface plasmon subwavelength optics[J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 824-830.
- [3] OZBAY E. Plasmonics: Merging photonics and electronics at nanoscale dimensions[J]. *Science*, 2006, **311**(5758): 189-193.
- [4] WEI H, WANG Z, TIAN X, *et al.* Cascaded logic gates in nanophotonic plasmon networks[J]. *Nature Communications*, 2011, **2**: 387.
- [5] REN X F, GUO G P, HUANG Y F, *et al.* Plasmon-assisted transmission of high-dimensional orbital angular-momentum entangled state[J]. *Europhysics Letters*, 2006, **76**(5): 753-759.
- [6] LIU A, RUI G, REN X, *et al.* Encoding photonic angular momentum information onto surface plasmon polaritons with plasmonic lens[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(22): 24151-24159.
- [7] LI Z, HAO F, HUANG Y, *et al.* Directional light emission from propagating surface plasmons of silver nanowires[J]. *Nano Letters*, 2009, **9**(12): 4383-4386.
- [8] MA Y, LI X, YU H, *et al.* Direct measurement of propagation losses in silver nanowires[J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(8): 1160-1162.
- [9] SUN Y, XIA Y. Large-scale synthesis of uniform silver nanowires through a soft, self-seeding, polyol process[J]. *Advanced Materials*, 2002, **14**(11): 833-837.
- [10] YIN Y, LU Y, SUN Y, *et al.* Silver nanowires can be directly coated with amorphous silica to generate well-controlled coaxial nanocables of silver/silica [J]. *Nano Letters*, 2002, **2**(4): 427-430.
- [11] ZOU C L, SUN F W, XIAO Y F, *et al.* Plasmon modes of silver nanowire on a silica substrate[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **97**(18): 183102.
- [12] REN X, LIU A, ZOU C, *et al.* Interference of surface plasmon polaritons from a 'point' source[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, **98**(20): 201113.
- [13] DANG Qun, BAI Yong-lin, ZHANG Gong-li, *et al.* A method to process the row-noise in image of near-field optical scanning microscopy[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(8): 748-751.  
党群, 白永林, 张工力, 等. 近场光学扫描显微镜图象的行噪音处理[J]. *光子学报*, 2000, **29**(8): 748-751.
- [14] ZAO Wei, ZHAO Xiao-peng. Relationship of surface plasmon polaritons and nanoparticles morphology[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(4): 556-560.  
赵炜, 赵晓鹏. 纳米粒子形貌与表面等离子体激元关系[J]. *光子学报*, 2011, **40**(4): 556-560.
- [15] PALIK E D. Handbook of optical constants of solids[M]. Academic, 1998.