

# 保偏等离子激元纳米光波导、 等离子激元纳米光子路由器和多路转接器评述

李志鹏 方蔚瑞 黄映洲 徐红星<sup>†</sup>

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

从上世纪中叶发展起来的信息技术,革命性地改变了人们的社会生活方式和经济增长模式.然而,随着现代加工工艺的不断进步和电子器件集成化程度的提高,电子芯片的物理瓶颈,如量子尺寸效应和热效应等,对目前信息技术的发展将有着不可避免的制约.而光子作为信息的载体有着电子无法比拟的优势,如高带宽、高密度、高速度和低耗散等,光信号传输速度比电子快 1000 倍,而且光信号可以携带强度、偏振、相位和频率等信息,可以突破二进制的限制.可是由于光的衍射极限的存在,光学元器件和芯片却很难做到小型化,因而很难实现大规模的集成.等离子激元,即在光激发下的金属纳米结构中自由电子气集体振荡,是目前可以突破光的衍射极限来实现在纳米尺度上对光进行操纵的新型量子态.实现对等离子激元的操控可以为光学元器件和芯片小型化,以及在未来信息领域超越摩尔定律带来曙光.纳米光学处理器的研制,需要解决纳米光源、纳米光波导、纳米分光路由装置、等离子激元逻辑与运算元件、纳米光电和电光转换装置等一系列纳米光学元件的设计和制造问题.目前,对等离子激元光子学(Plasmonics)的研究已经成为国际上竞争非常激烈的研究领域<sup>[1]</sup>.

最近几年,人们发现金或银的纳米线是很好的表面等离子激元的载体<sup>[2]</sup>.获得金属纳米线的方法通常有两种:微纳米加工(EBL 等)或者化学合成.然而,微加工得到的纳米线结构往往是非晶态,其表面形貌粗糙,表面散射较强,无法承载长程的表面等离子体传播.化学合成的纳米线<sup>[3]</sup>具有特定的晶格结构,缺陷少,其表面形貌光滑,可以将表面等离子体传递几十个微米.最近,李志鹏等研究人员发现,在合成的纳米线中,表面等离子体的偏振特性与纳米线的宽度、长度以及端面形貌都有关系<sup>[4]</sup>.在图 1(a),(b),(c)中,用高会聚激光照射银纳米线一端,激发在纳米线中传播的等离子激元,并在另一端重新以光的形式发射出来并被 CCD 收集.纳米线发射光的偏振态通过旋转 CCD 前的偏振片来测量.在图 1(d),(e)中,发射光的偏振态和强度随着入射光的偏振方向的旋转而改变,发射偏振与入射偏振

有着确定的线性对应关系(见图 1(e)).该对应关系说明,该纳米线中传播的表面等离子激元保持了其偏振特性.然而,更多的实验发现,在更多的纳米线中,偏振对应关系并非都为线性,而是与线的直径、长度以及纳米线的端面形貌有关.为了理解这一现象,必须从纳米线中传播的表面等离子激元的物理本质入手.一维纳米线中传播的等离子激元,其载体为振荡的自由电子气.按照其振荡方向与传播方向的关系,分为纵模( $m=0$ )和横模( $m=1$ )两种基本模式.纵模的振荡方向平行于纳米线,而横模垂直于纳米线.一般来讲,对于直径小于 100nm 的线来说,入射偏振平行于纳米线( $\alpha=0^\circ$ )激发的是纵模,垂直于纳米线( $\alpha=90^\circ$ )激发的是横模.纳米线的发射光是这两种模式的叠加.这两种模式有着各自的激发效率和衰减速率,并且与直径和端面形貌有关.因此,发射偏振态就因不同的线而不同.实验上,我们分别发现了具有保偏和偏振旋转功能纳米线.我们可以通过 FIB 等技术对纳米线的长度和端面进行修改,进而获得需要的表面等离子激元偏振态.

利用纳米线分支结构,方蔚瑞等研究人员实现了表面等离子激元的分光<sup>[5]</sup>(见图 2(a)).在纳米表面等离子激元波导的分叉结构中,通过改变入射光的不同偏振方向,可以控制等离子激元传向不同的波导分支(见图 2(b),2(c)).以 632.8 nm 的激光激发为例,当入射光偏振为  $-60^\circ$  时,等离子激元主要沿纳米线主干传播;而当入射偏振为  $60^\circ$  时,绝大部分表面等离子激元被耦合入分支.因此,通过调控入射偏振可以实现纳米尺度的光子路由;而且在相同的波导的分叉结构中,不同波长的光可以独立控制其传播到不同的波导分支,从而实现纳米尺度的光子多路转接(见图 2(d)).这种纳米分支结构中偏振依赖的分光现象,同样可以用传播的表面等离子激元的模式来理解.一般对于银纳米线来说,不同的等离子激元的模式是同时存在的,不同的入射光偏振会激发不同比例的表面等离子激元的模式.随

2010-07-12 收到

<sup>†</sup> 通讯联系人. Email: hongxingxu@iphy. ac. cn

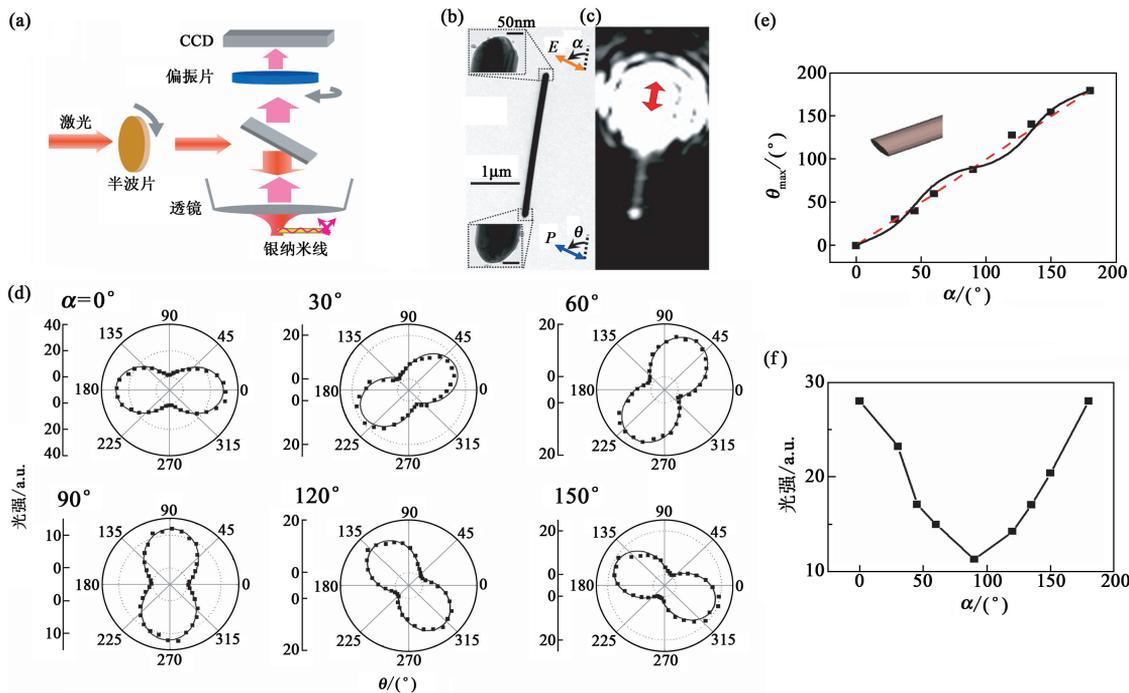


图1 光激发银纳米线中等离激元的传播与发射的偏振依赖特性<sup>[4]</sup> (a)实验装置示意图;(b)银纳米线透射电镜图(插图标尺为50nm);(c)纳米线在显微镜下被633nm激光激发光学图像(箭头为入射光偏振方向);(d)出射光强与偏振片旋转角度 $\theta$ 的关系;(e)出射偏振方向与入射偏振方向的关系(曲线为模拟结果);(f)出射最大光强与入射偏振方向的关系

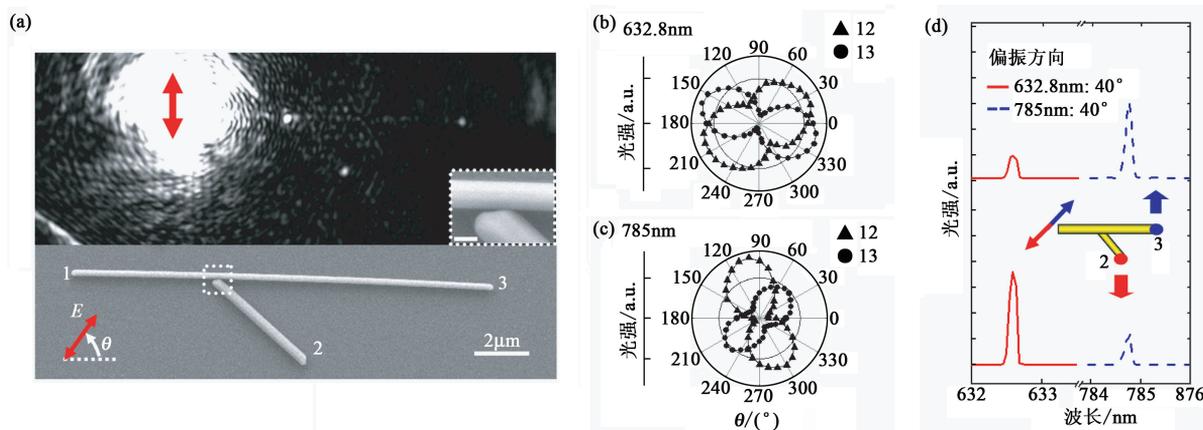


图2 分叉纳米线结构中可控光传导与分光性质<sup>[5]</sup> (a)银纳米线分叉结构光学激发图像,箭头为入射光偏振方向,1,2,3分别代表Y形结构的3个端点;(b)和(c)为出射光强与偏振片旋转角度 $\theta$ 的关系,其中▲12表示1端点激发、2端点收集的情况,●13表示1端点激发、3端点收集的情况。(b)和(c)中激发波长分别为632.8nm和785nm;(d)632.8nm和785nm两束激光同时从1端导入纳米线时2端和3端的出射光谱

着入射偏振的变化,不同强度和位相的等离激元模式叠加,形成了绕着主干纳米线分布的周期性强度变化.当分叉点处于主干上的位置,对应着极大值时,分支纳米线可以将大部分的表面等离激元能量耦合进来;而当分叉位置对应主干上周期发布的光强的极小值时,分支纳米线对主干传播的表面等离激元的影响很小,因而没有分光作用.这一发现将在构造基于等离激元的纳米光子处理器及新型的光子学通信器件中有着重要应用.

### 参考文献

[1] Zia R, Schuller J A, Chandran A *et al.* *Mater. Today*, 2006, 9 (7-8): 20  
 [2] Ditlbacher H, Hohenau A, Wagner D *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2005, 95(25): 257403  
 [3] Sun Y G, Mayers B, Herricks T *et al.* *Nano Lett.*, 2003, 3(7): 955  
 [4] Li Z P, Bao K, Fang Y R *et al.* *Nano Lett.*, 2010, 10(5): 1831  
 [5] Fang Y R, Li Z P, Huang Y Z *et al.* *Nano Lett.*, 2010, 9(5): 1950