

引用格式: WU Yunkun, REN Xifeng. Applications of Silver Nanowires in Quantum Optics (Invited) [J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(5):0551306

吴贇琨,任希锋. 银纳米线波导在量子光学中的应用(特邀)[J]. 光子学报, 2022, 51(5):0551306

银纳米线波导在量子光学中的应用(特邀)

吴贇琨^{1,2},任希锋^{1,2}

(1 中国科学技术大学 中科院量子信息重点实验室, 合肥 230026)

(2 中国科学技术大学 量子信息与量子物理协同创新中心, 合肥 230026)

摘要:量子表面等离激元近年来发展迅速,引起了极大的关注。而银纳米线由于自身的多种优势成为量子表面等离激元的代表性载体之一,是该领域很多工作中的重要元器件。回顾了近年来基于银纳米线的表面等离激元在量子信息领域中的理论和实验研究进展,主要包括表面等离激元自身和在银纳米线上传输的基本性质,银纳米线与量子发光点的相互作用、构建量子集成表面等离激元回路以及在量子精密传感领域的应用。最后提出了利用银纳米线实现量子表面等离激元应用过程中尚存的困难与挑战,以及可能的解决方法与未来研究方向。

关键词:银纳米线;表面等离激元;量子集成回路;光与物质相互作用;量子表面等离激元

中图分类号:O431.2

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20225105.0551306

0 引言

表面等离激元(Surface Plasmon Polariton, SPP)是金属与介质界面上自由电子集体震荡所产生的电磁场^[1],具有能够突破光学衍射极限,将能量限制在亚波长尺寸区域的特点。这一独特性质由 TAKAHARA J 等于 1997 年发现^[2],提供了一种精密操控光场、发展超紧密集成光学回路等应用的新途径。二十年多年来,表面等离激元得到了广泛研究和高速发展,在纳米光子激光器和放大器^[3-4]、纳米光学天线^[5]、生物化学传感^[6]、超紧凑的集成光学回路^[7]、突破衍射极限的光刻^[8]等经典光学技术中都已得到了广泛应用。与此同时,光学领域另一革命性的突破——量子光学自诞生以来蓬勃发展,也激励着科研人员对表面等离激元进行量子层面的探索和研究。20 世纪 50 年代已经发展出对金属中 SPP 进行量子化的理论描述方法^[9-12],该描述将 SPP 作为一种“准粒子”来看待,其很多量子性质也在后续工作中得到了研究和证明^[13-14],这使得人们对构建在量子水平上运行的表面等离激元纳米装置越发感到兴奋,并由此发展出将表面等离激元和量子光学相结合的新兴研究方向——量子表面等离激元^[15-16]。特别是近年来微纳加工技术的提高,多种实验测量手段和强大电磁模拟方法的出现,更为该领域的发展提供了条件。

多种纳米结构都可以有效地传输局域量子表面等离激元,如纳米颗粒^[17]、纳米孔洞^[18-19]、槽状和脊状波导^[20-21]、纳米天线^[22-23]等等,其中一维波导结构能够在保持对光场高束缚性的同时,对光场的传播方向进行更好的引导和控制,因此在很多工作中被采用。金属纳米线是最常用和最有代表性的一维等离激元波导之一,常见材料包括金、银、铜、铝等。与其他金属材料相比,银具有最佳的导电和导热性能,是电互联的理想材料^[24]。同时,金属银在 300~1 200 nm 的光谱范围内都能支持良好的强共振,因此拥有从近紫外到近红外的超宽应用带宽^[25]。具体到银纳米线这一结构,也在实际应用中有很多得天独厚的优势,比如良好的单晶结构、相对较低的传输损耗、成熟的制备工艺等等^[26]。银纳米线上支持多种 SPP 模式,这些模式具有各不相同的光学特性,因此选择性激发和控制银纳米线上特定的 SPP 模式能够实现不同的功能^[27]。进一步地,将

基金项目:国家自然科学基金(Nos.11774333, 62061160487),中央高校基本科研业务费专项

第一作者:吴贇琨(1995—),女,博士后,主要研究方向为量子等离激元。Email: wuyk123@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:任希锋(1980—),男,教授,博士,主要研究方向为微纳和集成量子光学。Email: renxf@ustc.edu.cn

收稿日期:2022-04-14;录用日期:2022-05-16

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

银纳米线放置于不同的基底上,或对多根银纳米线进行级联和叠放,能够产生束缚更为紧密的 gap-SPP 模式,对光场有更为强烈的局域增强效应^[28]。由于银纳米线上 SPP 的超高模式密度,利用银纳米线与单发光点进行耦合能够显著增强二者间的相互作用,从而有效调控单发光点的发射性质。而单个 SPP 在银纳米线上的紧束缚传输,又使得利用银纳米线搭建超紧凑集成量子表面等离激元回路成为可能,一系列相关研究工作都已卓有成效^[29]。

本文主要介绍银纳米线在量子光学和量子信息技术研究方向上的相关工作。首先对 SPP 自身和银纳米线上 SPP 的性质进行介绍,包括光学性质和量子性质,这些基本特性是银纳米线在量子光学领域得到应用的基础;然后介绍银纳米线应用在量子光学和量子信息的主要研究方向,展示和介绍其中代表性和最新的相关工作,包括与发光点进行相互作用,搭建量子集成表面等离激元回路和量子精密测量等;最后对目前银纳米线应用于量子光学工作中所面临的挑战和困难进行总结,并简要展望可能的解决方法和未来潜在的发展方向。

1 表面等离激元简介

近年来传统硅基电子回路的发展道路遭遇了瓶颈,一系列由于集成度提高随之而来的散热、能耗和延迟等问题难以解决,且逐渐逼近其带宽和信息传输速率的理论阈值。光子体系在这些方面表现出极大的天然优势:光子能够以光速进行传播,并且光脉冲的宽度可低于飞秒量级,因此相比于电子体系能够带来带宽和响应速度上数量级的提升。然而,虽然光子具有上述以及多自由度、良好的相干性质、较低的损耗等众多优点,但同时光子体系也存在两个最为关键和突出的缺陷,即相对较弱的光与物质相互作用和难以避免的光学衍射极限限制。光子和电子这些自身的固有缺陷极大地限制了其进一步发展,幸运的是,SPP 在很多方面继承了二者的优点,并且可能同时规避它们的很多缺陷。SPP 在保持光子传输速率和带宽的同时,能够突破光学衍射极限和显著增强光与物质相互作用,是一种极有潜力的信息载体,在信息处理中有着极大的应用前景。

首先从经典电磁场理论出发,介绍表面等离激元的基本性质。由于表面等离激元是金属与介质界面上集体震荡的自由电子形成的电磁场,将垂直于交界面的方向定义为 y ,光场传播平面定义为 xy 平面,并假设 $y > 0$ 部分为介质(对应介电系数 ϵ_1), $y < 0$ 部分为金属(对应介电系数 ϵ_2),则只有在 y 方向有电场分量的横磁模(Transverse Magnetic, TM)能够对界面上的表面等离激元进行有效激发^[30]。对于一个 TM 电磁波,其电场和磁场可分别表示为

$$\begin{aligned}\vec{E} &= [E_x, E_y, 0] \exp(i(k_x x + k_y y) - \omega t) \\ \vec{H} &= [0, 0, H_z] \exp(i(k_x x + k_y y) - \omega t)\end{aligned}\quad (1)$$

在无源场中,由麦克斯韦方程可得

$$H_z = \frac{\epsilon \omega E_x}{k_y} \quad (2)$$

因此可将磁场强度用电场分量进行表示。进一步地,考虑在金属和介质的交界面,根据边界连续条件可得

$$\begin{aligned}k_{x1} &= k_{x2} = k_x \\ \frac{k_{y1}}{\epsilon_1} &= -\frac{k_{y2}}{\epsilon_2}\end{aligned}\quad (3)$$

其中下标 1,2 表示在两种不同材料中的情况。同时由矢量分解关系有

$$k_{yj}^2 = \epsilon_j k_0^2 - k_x^2 \quad (4)$$

联立式(1)~(4),可求解出在平坦界面上传播的表面等离激元的色散关系为

$$\begin{aligned}k_x &= \frac{\omega}{c} \left(\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2} \right)^{1/2} \\ k_{yj} &= \pm \frac{\omega}{c} \left(\frac{\epsilon_j^2}{\epsilon_1 + \epsilon_2} \right)^{1/2}\end{aligned}\quad (5)$$

由此可以看出,SPP 与自由空间的光波之间存在明显的动量失配^[31],因此自由空间入射光无法直接激发

SPP,通常需要借助光的折射、衍射或散射等方式进行动量补偿。

同样根据 SPP 波矢表达式, SPP 在平行于界面方向的波矢 k_x 为一复数,而在垂直于银纳米线方向的波矢 k_{yj} 为一纯虚数。这表示 SPP 在平行于界面的方向上以行波的形式一边震荡传输一边逐渐衰减,而在垂直于界面的方向上以倏逝波的形式迅速衰减,由此可以定义几个常用的 SPP 特征长度。 k_x 的实部决定了 SPP 的波长,也就是沿着界面传播时电场场强的震荡周期

$$\lambda_{\text{spp}} = \lambda_0 \sqrt{\frac{\epsilon_1 + \epsilon_{2r}}{\epsilon_1 \epsilon_{2r}}} \quad (6)$$

式中,下标 r 表示金属介电常数实部,可见 λ_{spp} 总是小于入射光波长,因此在超分辨的传感和探测中有极大的应用潜力。另一个重要的特征长度是 SPP 的传播长度 L_x ,其定义为 SPP 沿着界面传播到强度衰减为初始值 $1/e$ 时所经过的距离,由 k_x 的虚部所决定

$$L_x = \frac{1}{k_0} \left(\frac{\epsilon_1 + \epsilon_{2r}}{\epsilon_1 \epsilon_{2r}} \right)^{3/2} \frac{\epsilon_{2r}^2}{\epsilon_{2i}} \quad (7)$$

类似地, SPP 在垂直界面方向传输到强度衰减为初值 $1/e$ 所经过的距离定义为穿透深度 L_y ,由 k_{yj} 所决定

$$L_y = \frac{1}{|k_{yi}|} \quad (8)$$

式中,下标 i 均表示取虚部,由此可见 L_y 在两个相反的方向都总小于入射光波长,再次证明了能量在垂直于界面的方向能够被有效束缚在亚波长尺度,并产生极大的局域增强效应。由此通过简要的理论推导,证明了表面等离激元突破光学衍射极限的能量局域。该独特的性质使得表面等离激元得以在包括微纳光学、集成光学和量子光学的众多领域中得到广泛而有效的应用,在关于银纳米线的众多研究中,该优势同样得到了充分的发挥和利用。

2 银纳米线上 SPP 的性质

2.1 基本光学性质

银纳米线是一种具有对称性的准一维纳米结构,根据第 1 节,其 SPP 能量能够在银纳米线与周围介质交界处的亚波长区域内被局域和传输。由于相位失配,最常用的激发银纳米线上 SPP 的方法是用物镜聚集在纳米线端点或其表面缺陷处,通过散射实现动量匹配,而聚焦在纳米线中间的平滑区域则难以激发 SPP。这一过程反过来也成立,即纳米线上的 SPP 只会在端点或表面缺陷处以光子形式散射到自由空间中^[32],因此为了减少传输过程中额外的散射损耗,银纳米线应尽量保证表面的光洁和平滑。目前银纳米线的生产工艺已经十分成熟,发展出了包括气相制备^[33]、光刻^[34-35]、熔拉^[36]等在内的多种物理方法,以及以溶液反应为代表的化学方法^[37-38],能够制备出具有不同几何形貌和表面特征的银纳米线。

DITLBACHER H 等在 2005 年利用扫描近场光学显微镜 (Scanning Near-field Optical Microscope, SNOM) 技术,在实验中直接观测到了银纳米线上传输的 SPP 光场分布,并证明了其周期(波长)约为一半激光波长^[39]。同时他们发现单晶纳米线的传输效率和端面反射率与多晶相比更高,因此单晶银纳米线可以看做一种 SPP 的 F-P 腔。同时银纳米线上传输 SPP 的模式体积随波长变化不敏感,因此在从可见光到近红外的超宽工作带宽中,银纳米线都能够将能量有效束缚在亚波长尺度内,并产生极大的局域增强效应。这些优良的光学性质是表面等离激元的固有性质,接下来将介绍银纳米线自身特定的几何结构和材料所带来的光学性质。

一根银纳米线上能够同时支持多种 SPP 模式,单晶银纳米线的横截面近似为五边形,这里为了简化计算过程,将银纳米线端面设定为圆形代替。首先给出悬空银纳米线上最低阶的两种模式,分别是横磁模 TM_{01} (图 1(a)) 和杂化模式 HE_{11} (图 1(b)),其中 TM_{01} 为银纳米线的基模, HE_{11} 为包含两个互相垂直简并模式的二阶模^[40]。这两种模式显而易见具有很多迥然不同的性质,如不同的近场电磁场能量分布,从而进一步带来了不同的远场辐射特性;基模的有效折射率虚部高于二阶模,因此对应于一个相对更短的有效传输距离;二者的偏振、模式面积、SPP 波长等光学特性都互不相同。图 1(c) 展示了二者的有效模式面积随银纳米线半径的变化情况。有效模式面积定义为

$$A_{\text{eff}} = \frac{\int \epsilon |E|^2 dS}{\max[\epsilon |E|^2]} \quad (9)$$

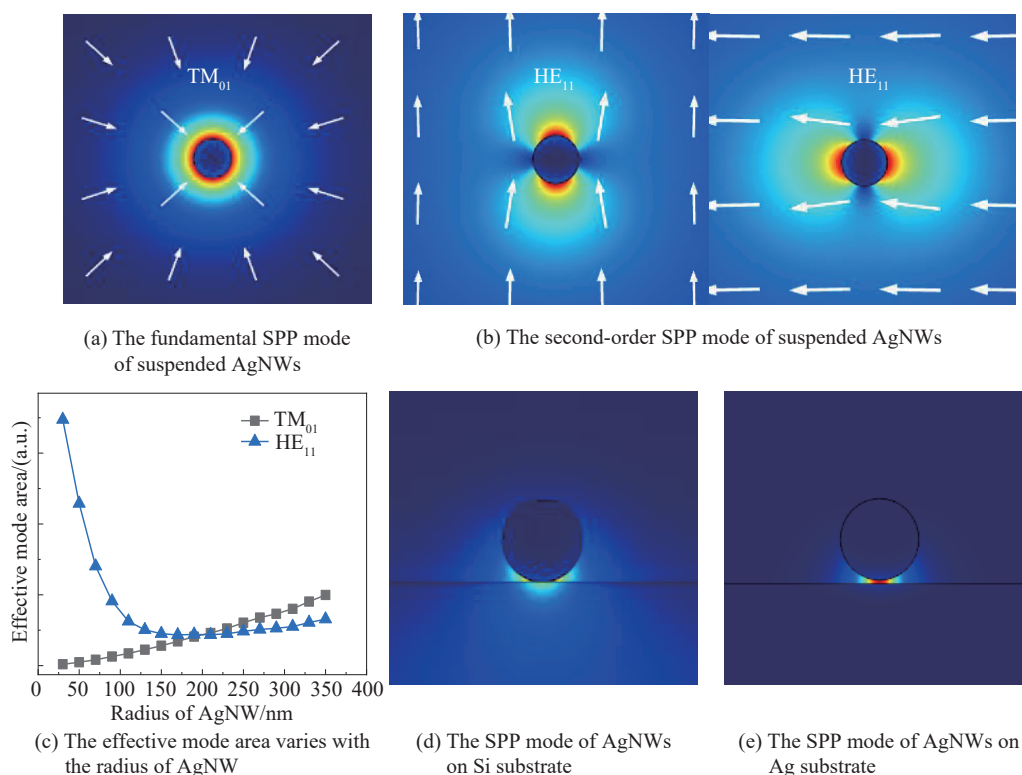


图1 银纳米线上 SPP 模式的基本光学性质

Fig. 1 The basic optical characters of SPP modes on AgNWs

该参数常被用于衡量能量的束缚程度。由此可见随着银纳米线半径的减小,二阶模 HE₁₁ 逐渐呈现出场模趋于发散的现象,证明其是一种准截止模式;而基模不存在截止半径,在任意半径的银纳米线上都能有效束缚能量,因此在利用银纳米线 SPP 超小模式面积以得到高空间分辨率的应用中,需要选择基模进行激发^[41-42]。另一方面,基模始终保持径向的偏振特性,而二阶模则能够保持激发光的线偏振性质,因此能够利用银纳米线的二阶模对偏振进行编码,从而携带信息甚至偏振纠缠态^[43]。由此可见分析和控制纳米线上激发的 SPP 模式具有重要的意义,近年来也有利用近场^[44-47]、远场^[27]等不同技术的相关工作报道,为银纳米线的进一步研究和应用铺平了道路。

在更多的实验中,银纳米线被置于各种不同的基底之上,图 1(d)、(e) 分别给出了银纳米线放在硅衬底和间隔 10 nm 放在银衬底上的模式分布。可以明显观察到,衬底的存在使得 SPP 的能量分布更集中于纳米线与衬底之间的间隙区域,尤其是当银纳米线置于像银这种金属基底上时,能够产生更为紧凑的 gap-SPP 模式^[46],同时间隙中的电场强度得到强烈的增益,类似的现象也发生在两根靠得很近的相邻平行银纳米线中间。由此可见,银纳米线被放置于衬底上,或模式体积内存在其他结构时,其 SPP 模式会受到强烈的调制,包括模式分布在内的很多性质都会发生改变^[48]。因此在实际应用中银纳米线与周围环境间的耦合作用影响不可忽略,但这也反过来给了银纳米线用于某些要求更高态密度应用的更多可能性。

虽然本征模 TM₀₁ 和 HE₁₁ 沿银纳米线传播时的电场振幅都是横向对称且均匀分布的(图 2(a)、(b)),但当这两种模式同时在银纳米线上被激发时,二者会发生干涉和干扰,并且由于它们具有的横向对称性并不相同,因此会形成不对称的之字形电场分布,如图 2(c)。同时该之字形电场分布呈现出明显的周期性,这是由于 SPP 的拍频效应所造成的。基模与二阶模的有效折射率有一定差异,因而在传播一段距离后会分别累计不同的相位,导致电场的最大值在传播方向上周期性出现。该周期可由 $\Delta = \lambda(n_{\text{TM}} - n_{\text{HE}})$ 计算得到^[49]。考虑到这两种模式的有效折射率都对银纳米线半径存在依赖关系,更细的银纳米线上将对应更短的之字形周期。

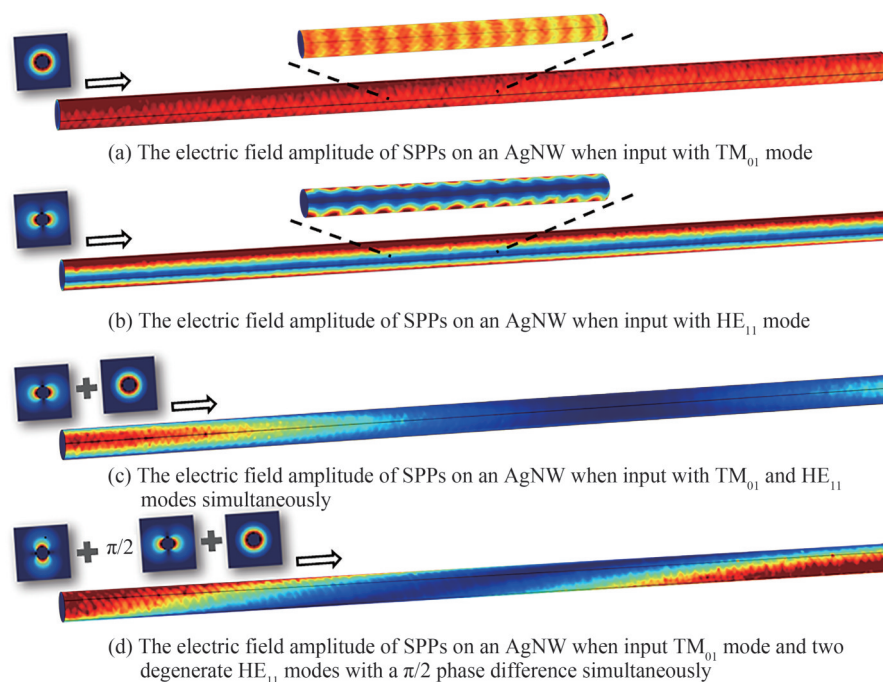


图2 银纳米线上 SPP 模式的传输性质

Fig. 2 The propagating properties of SPP modes on AgNWs

而当二阶模 HE_{11} 的两个简并模式之间相差 $\pi/2$ 相位,并在同一根银纳米线上进行叠加时,则会形成一个具有螺旋相位分布的态,这种螺旋模式再与基模 TM_{01} 进行干涉,能够进一步产生一个沿银纳米线表面螺旋分布的近场能流,如图 2(d)。该现象在文献^[50]中通过利用量子点覆盖银纳米线,在不同线偏振光激发银纳米线上的 SPP 时,观察分析量子点的荧光强度图而间接证明。进一步地,当银纳米线置于基底上时,采用不同的圆偏振光直接激发 SPP 能够指向不同的空间路径^[51-52]。这种自旋相关的定向激发是由于光的自旋-轨道角动量耦合(Spin-orbit Interaction, SOI)所导致的^[53-54],当圆偏振光在均匀介质中沿着弯曲的轨道运动时,光子的自旋角动量耦合至其轨道角动量,而假设总角动量需要保持守恒,从而自旋相关的空间偏差随之产生。光子的这种 SOI 效应在介质中一般非常微弱,但在 SPP 存在的金属和介质界面处,由于较大的介电常数梯度,使得该效应发挥着不可忽视的作用。这些手性和自旋依赖的 SPP 在银纳米线上传播的性质,在近年吸引了广泛的兴趣和研究,可进一步用于实现可控的传播方向调制和信息编码等应用中。

2.2 量子性质

虽然 20 世纪 50 年代已经发展出对表面等离激元进行量子化的理论描述方法^[55-56],但由于当时实验和模拟技术的限制,直到 2002 年才首次报导了对 SPP 量子性质的实验研究工作^[57]。在该工作中双光子偏振纠缠态经历了先转化为 SPP,然后再次转化为光子辐射到自由空间被探测的过程,并对最终得到的光学态进行了量子测量和分析。实验结果证明,在这整个过程中,量子态的纠缠性质一直得到了良好的保持。此后其他的量子纠缠态,如时间-能量纠缠^[58]、轨道角动量纠缠^[59]、连续变量量子态^[60]等也都被转为 SPP 后再次以光子形式被探测,证明了 SPP 能够实现良好的量子纠缠性质,从而在量子集成回路中得到应用。接下来详细介绍利用银纳米线上 SPP 来产生或传输量子纠缠态的代表性工作。

量子力学的基本特性之一是单个量子激子能够同时表现出波和粒子的性质,也就是波粒二象性。其中波动性主要体现在能够根据相位进行各种干涉作用,而粒子性则主要体现在其统计分布的规律上。最早同时证明 SPP 具有波粒二象性的实验就是在银纳米线上完成^[61],由 KOLESOV R 等利用单个氮空位(Nitrogen-Vacancy, NV)色心激发银纳米线上的 SPP,再传输至银纳米线两个端点后,再次转化为光子形式辐射到自由空间进行测量。实验示意如图 3(a),因此在这个过程中银纳米线也同时充当了分束器(Beam Splitter, BS)的功能,使得被激发的 SPP 沿前后两个传输方向被分开,从而可以直接对从两端口出射的光子

进行二阶关联函数测量,如图3(b)。实验结果表现出典型的单粒子自相关二阶关联特性,证明了被激发的SPP每次只能辐射一份能量,即被单NV色心所激发的SPP也是单个的,其粒子分布性质得到了证明。波动特性则通过SPP的自干涉来证明,类比光波在马赫曾德干涉仪(Mach-Zehnder interferometer, MZ interferometer)中干涉的过程,被激发的SPP向前和向后传播可以视为第一个BS,向后传输的SPP在银纳米线后端面反射后与向前传输的SPP在前端面汇合,前端面可以视为第二个BS,并在端面处具有不同光程的相干SPP发生干涉(另一个方向亦然)。因此直接测量银纳米线端口的SPP散射强度能够观察到明显的干涉条纹,如图3(c),SPP的波动性由此得到了证明。

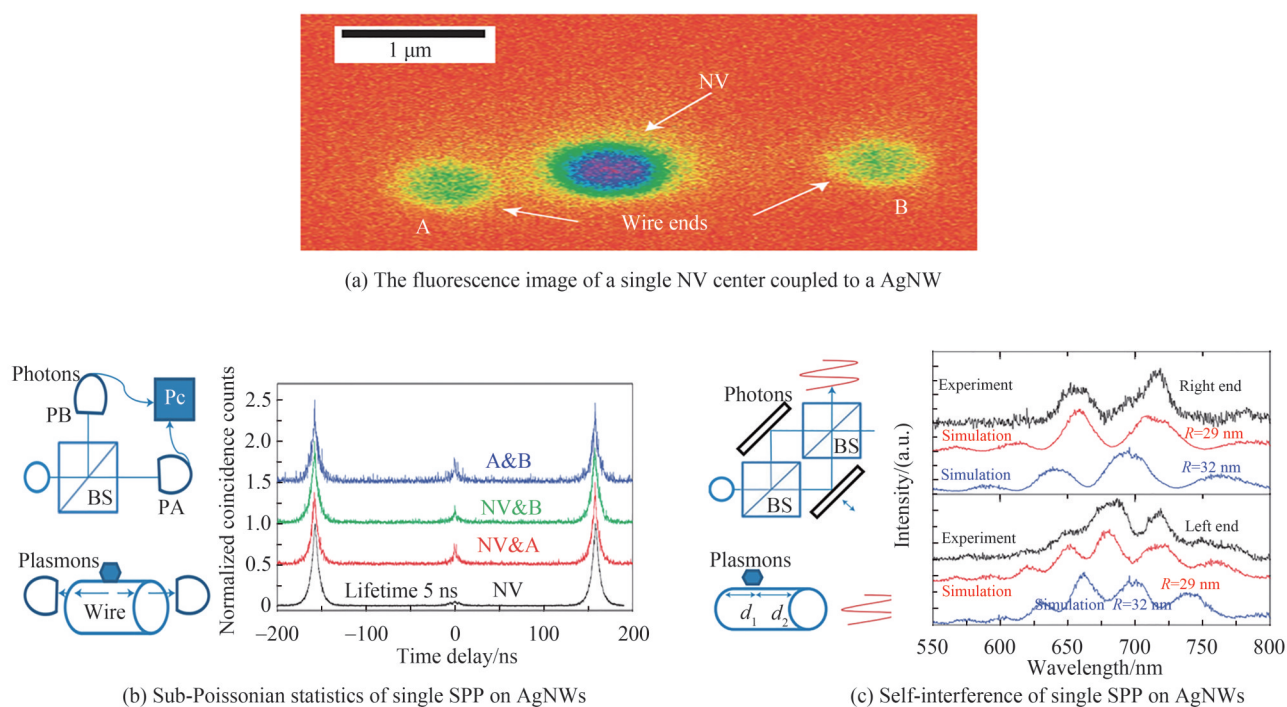
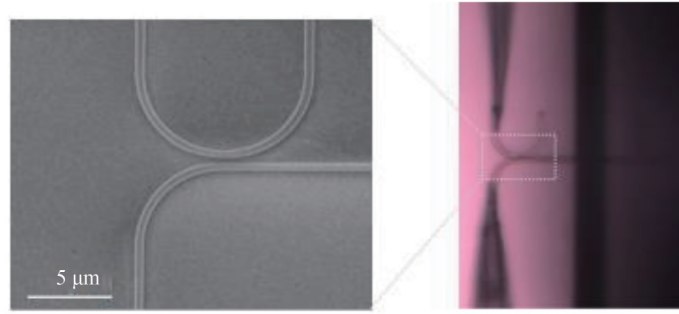


图3 银纳米线上SPP波粒二象性的实验证明^[61]

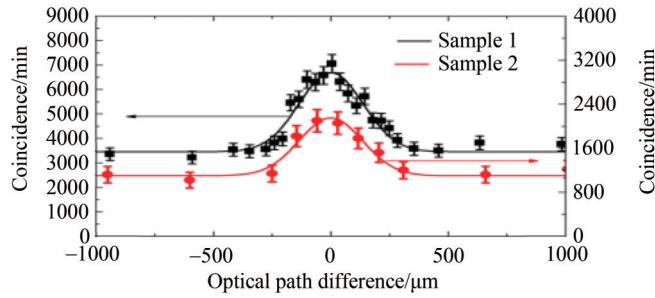
Fig. 3 Experimental demonstration on Wave-particle duality of single SPP on AgNWs^[61]

KOLESOV R等的工作关注在银纳米线上单个SPP量子性质的研究,也仅涉及到SPP的一阶干涉。而多光子之间的二阶强度干涉是光场量子化后其量子性质的重要体现方式,其中最具代表性的便是Hong-Ou-Mandel(HOM)干涉。全同光子对转化为SPP再转化回光子后,其全同性质仍然得到保存,能够继续发生HOM干涉的特性已经在2012年得到验证^[62]。但想要证明SPP自身的量子性质,需要SPP在SPP波导中直接进行HOM干涉。干涉可见度高于经典极限的双SPP量子干涉已经在多个工作中被报道^[63-65],其中任希锋课题组获得了高达95.7%的SPP HOM干涉可见度(如图4),充分证明了SPP的玻色量子性质^[65]。虽然为了减少损耗得到更高的干涉可见度,这一部分的工作都选择了介质加载的杂化SPP波导,而不是在银纳米线上完成,但银纳米线上的SPP同样具备这一基本性质,这也是利用银纳米线搭建量子集成SPP回路,并在其中实现各种量子门操作、制备SPP纠缠态、进行量子隐形传态等一系列工作的基础。

值得一提的是,虽然光子的众多量子性质在转化为SPP的过程中都能够保持,但由于欧姆损耗和表面散射等各种损耗的存在,容易导致量子退相干,这一现象也已经在多个工作中被证实。目前也有一些关于SPP损耗的研究,如MARTINO D等发现SPP传播过程中的损耗与不相关的马尔科夫线性损失模型一致^[66]。除了线性损耗之外,量子SPP中的色散效应也被FUJII G等研究^[67],发现可能导致SPP系统的时间和光谱模式失真,因此在银纳米线上量子SPP的实验中也要考虑损耗对实际结果的影响。但反过来,利用这些损耗有时也能达到非常规的效果,如理论和实验上都证明了由于损耗而造成的SPP反凝聚现象^[68],这意味对待SPP系统的损耗仍需要更深入的研究和理解,从而进一步控制甚至利用损耗^[69]。



(a) The SEM and CCD image of a plasmonic DC structure



(b) Quantum interference of single SPP on DLSPPWs

 图4 SPP之间发生HOM干涉的实验证明^[65]

 Fig.4 Experimental demonstration on HOM interference between SPPs^[65]

3 银纳米线在量子光学中的应用

第2节中从银纳米线自身材料和结构、SPP光学性质和量子性质等多个方面列举了银纳米线在实际应用的优势。在经典光学中银纳米线已经被用于传统波导^[70]、集成激光器^[71]、柔性光电探测器^[72]、表面增强拉曼散射(Surface Enhanced Raman Scattering, SERS)^[73]等众多应用中,而基于上述的优势和特点,银纳米线在量子光学领域也有着极大的应用潜力和空间,本节将主要从银纳米线与发光点相互作用、搭建量子集成回路、用于量子精密测量三个方面介绍近年来相关的工作进展。

3.1 银纳米线与量子发光体相互作用

利用SPP与发光体进行相互作用是一直以来的研究热点,银纳米线是最常用的SPP结构之一,在弱耦合和强耦合范围都有应用和研究。随着研究的深入,近年来该方向的研究热点逐渐转向银纳米线对单个量子发光点(Single Photon Emitters, SPEs)进行调制作用,本文主要介绍这部分的相关工作。

3.1.1 Purcell效应

确定性单光子源在量子信息和量子计算领域都是关键性元器件,衡量一个单光子源的品质主要有三个指标:单光子纯度、全同性和亮度。为了获得更佳性质的单光子源,包括原子、分子、量子点、色心在内的多种材料体系都得到了大量的研究和发展,其中提高其发光效率的重要研究手段之一,就是利用其它微纳结构与单光子源进行相互作用。

一般而言,单个量子发光点的发光为自发辐射过程,其自发辐射速率是该发光点的内秉属性。然而PURCELL E M在1946年开创性的工作中指出,量子发光点的自发辐射速率也能被周围环境所影响和调制,这个现象就是著名的Purcell效应^[74],该调制因子也被称为Purcell因子,并随后被DREXHAGE K H的实验所证明^[75]。在大部分工作中,Purcell因子以腔量子电动力学和腔品质因子的形式给出,这里给出在一维SPP波导结构下该过程简要的理论描述^[76]。

根据费米黄金定律^[77],SPE的自发辐射速率与该处的局域态密度(Local Density Of States, LDOS)成正比^[78]

$$\Gamma(\omega, r_0, \hat{\mu}) = \frac{\pi d^2 \omega}{3\hbar \epsilon_0} \rho(\omega, r_0, \hat{\mu}) \quad (10)$$

式中, Γ 是光源的自发辐射速率, ω 是跃迁频率, d 是跃迁偶极矩大小, r_0 表示位置, $\hat{\mu}$ 为偶极子取向单位矢量, ρ 为 LDOS, 其物理意义为单位频率和空间的光场数目, 可通过并矢格林函数 $G(r, r, \omega_0)$ 求得

$$\rho(\omega, r_0, \hat{\mu}) = 6\omega [\hat{\mu} \cdot \text{Im} \{G(r_0, r_0, \omega_0)\} \cdot \hat{\mu}] / (\pi c^2) \quad (11)$$

而对一个传播轴为 z 轴的一维表面等离激元波导而言, 其附近的并矢格林函数可近似写为

$$G(r, r, \omega_0) = \frac{j\pi c^2 |E(x, y)|^2}{\omega N v_g} \quad (12)$$

式中, v_g 为群速度, 其值为

$$v_g = \frac{\int_{A_\infty} (\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) \cdot \mathbf{z} dA}{\int_{A_\infty} \epsilon_0 \epsilon(x, y) |E(x, y)|^2 dA} \quad (13)$$

N 为归一化因子, 其值为

$$N = 2\pi \int_{A_\infty} \epsilon_0 \epsilon(x, y) |E(x, y)|^2 dA \quad (14)$$

式中, 积分下标 A_∞ 表示对整个横截面进行积分运算。于是将关于并矢格林函数的表达式代入 LDOS 和衰减速率的表达式中, 即可计算出一个单发射点自发辐射到该 SPP 模式通道, 与在真空态中自发辐射 Γ_0 的速率之比为

$$\frac{\Gamma(\omega, r_0, \hat{\mu})}{\Gamma_0} = \frac{6\pi^2 c^3 |E(x, y) \cdot \hat{\mu}|^2}{\omega^2 N v_g} \quad (15)$$

式(15)给出了一个 SPE 能量辐射到波导导模通道中的自发辐射速率表达式, 总自发辐射速率应该再加上辐射到自由空间和非辐射通道的速率, 该值可以通过求解全场的电流密度计算得到。但在很多应用中, 表面等离激元波导的影响要远远超过另两个通道, 因此该式可以用来近似作为 Purcell 因子的表达式, 并配合已经很成熟的各种数值计算方法, 如有限元法和时域有限差分法等进行仿真计算。在实验中, Purcell 因子的测量通常通过 SPE 的辐射寿命变化进行表征, 同时能够观察到其发光强度的提高。

3.1.2 弱耦合

由于微纳结构与发光体之间的耦合强度正比于 $(1/V_{\text{eff}})^{1/2}$, 其中 V_{eff} 为微纳结构的有效模式体积^[79]。因此具有较大模式体积的介质波导很难与 SPE 进行较强的相互作用, 强色散的光子晶体波导可以通过减慢光的群速度来对弱相互作用进行补偿, 但较大的模式体积仍然使其难以对单个 SPE 进行局域操控; 高品质因子的光学纳米腔也能够有小模式体积, 但又会带来信号能量难以提取的新挑战, 且一般工作带宽较窄。幸运的是银纳米线在这些问题中都有着天然的优势, SPP 的小模式体积提供了更高的模式密度, 从而能够实现更强的 SPP-SPE 相互作用和突破衍射极限的局域控制, 并且由于银纳米线的超宽工作带宽, 这一局域增强效果并不受到窄共振线宽的约束。

在弱耦合范围内, 银纳米线与 SPE 进行相互作用一般是对发光体进行有效的调控, 从而达到高效收集, 或改善辐射性能的目的^[80]。如 3.1.1 节所述, 由于银纳米线 SPP 模式区域内超高的局域态密度, 最常见的对 SPE 的调控是改变其辐射速率和发光强度^[81]。利用银纳米线对 SPE 进行调控, 观察到寿命大幅降低和发光强度得到显著增益的工作有很多。其中最早的代表性实验工作, 由哈佛大学 LUKIN M D 课题组于 2007 年完成, 首次实现了银纳米线与单量子点的耦合, 并同时观察到了单量子点荧光 2.5 倍的增强^[82]。此后利用银纳米线对多种类型的 SPE, 如单量子点 (Quantum Dot, QD)、二维材料单缺陷发光、NV 色心等进行耦合都已经在实验上实现^[83-84], 并且调制特性扩展到辐射方向、偏振、模式等多个自由度^[85]。在这类工作中, 如何精准控制 SPE 的位置, 使其刚好位于银纳米线 SPP 的超小模式体积内是实验的难点。最常用的方式一般有两类: 利用纳米针尖或其他材料转移技术, 事先将 SPE 转移至银纳米线附近^[84], 如图 5 所示; 另一种替代方法是在基底上随机散落大量 SPEs 和银纳米线, 然后再通过后续观测手段找到其相对位置满足要求的样品, 最后进行测量^[85], 如图 6 所示。在该工作中单 QD 的辐射模式因为银纳米线的对称结构分裂为两瓣, 辐射方向与辐射偏振同时受到调控。

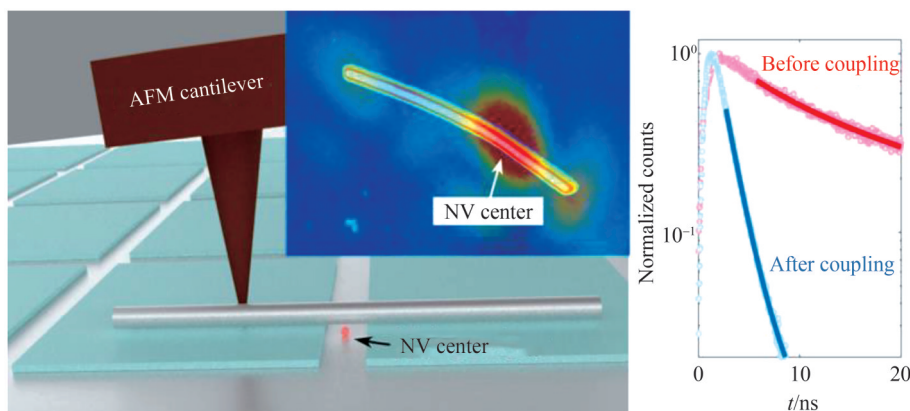


图5 银纳米线调制单个NV色心辐射寿命^[84]
 Fig. 5 Modulating the lifetime of a single NV center with AgNWs^[84]

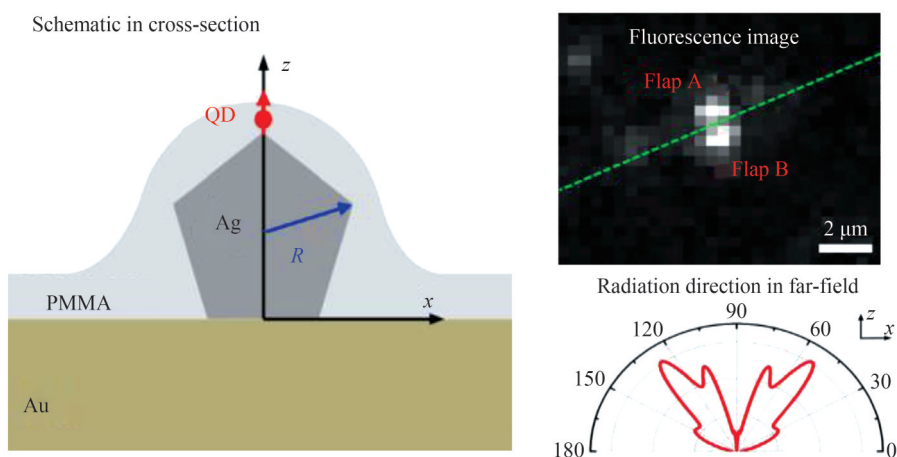


图6 银纳米线调制单量子点辐射方向^[85]
 Fig. 6 Modulating the radiation direction of a single QD with AgNWs^[85]

但是很显然这两种常见方式或者操作难度较大,或者成功概率较低。近年来逐渐发展出一些无需事先材料转移也能够确定性对SPE进行调控的方法。TAO Cai等报道了一种通过银纳米线带来的应变梯度,诱导覆盖的二维材料 WSe_2 在银纳米线表面处自然产生SPE,从而实现SPE与SPP自对准而进行高效耦合的方案^[83],如图7。类似地,也可以利用化学方法实现SPE与银纳米线的自组装,如将单个NV色心自下而上

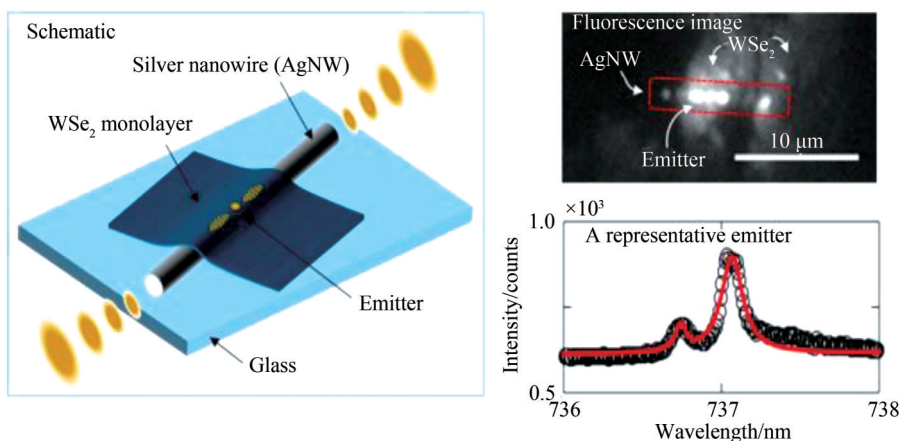


图7 银纳米线与 WSe_2 单缺陷点发光自对准耦合^[83]
 Fig.7 The self-aligned coupling between SPEs in WSe_2 monolayer and AgNWs^[83]

自组装至银纳米线端面附近等^[86]。将控制相对位置的途径从移动SPE改为移动银纳米线^[87],任希锋课题组近期完成了利用光纤锥使银纳米线悬空作为一根可自由移动的探针对SPE进行调控的工作,如图8所示。从3.1.1节中LDOS和Purcell因子的表达式,可以看出二者都强烈依赖于偶极矩的矢量方向,由此该工作进一步从实验和理论详细研究了这种悬空银纳米线调制方案对SPE偏振的依赖关系,最终利用同一根探针针对衬底上任意位置的单QD实现了平均Purcell因子为3.38的寿命调控,以及对同一个氮化硼单缺陷发光实现寿命增加和减小的可控切换调制^[88]。同时在这些银纳米线与SPE高效耦合的工作中,为SPE产生了一个新的辐射通道,即大量的SPE能量耦合至银纳米线的SPP模式中,因此银纳米线同时也可作为天线实现对SPE辐射的高效收集。这种SPP增强耦合的机制在电磁诱导透明、非反转激光等现象中也扮演了重要角色^[89-90]。

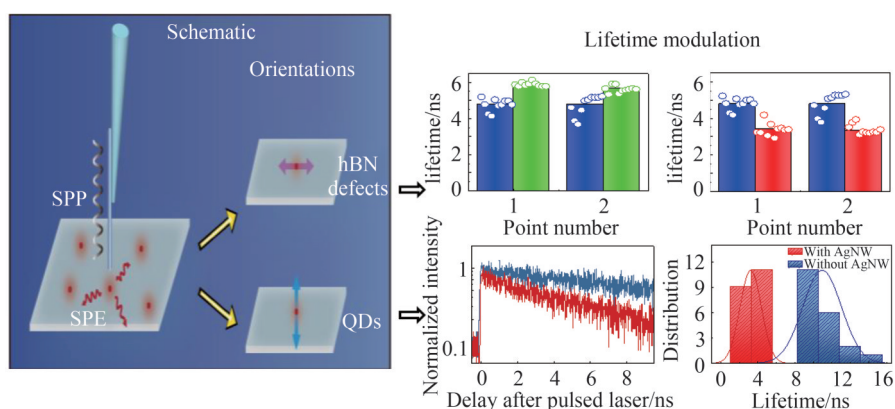


图8 银纳米线探针对基底上任意位置SPE的偏振依赖寿命调制^[88]

Fig.8 The polarization-dependent lifetime modulations of arbitrary SPEs on substrate with an AgNW probe^[88]

除了与单个SPE进行耦合,一根银纳米线同时耦合两个甚至更多的SPE的情形在实际实验中更为普遍,也对构建多SPE-SPP杂化回路系统具有重要意义。BOUCHET D等通过直接激发与银纳米线耦合的单个QD发射单个SPP,并远程激发与银纳米线耦合的荧光分子,同时观察到了受体荧光分子与QD表现出协同关联的闪烁行为,证明了二者的线性相关^[91],如图9所示,也验证了早前对于耦合至同根银纳米线的多个SPE之间的远程量子关联的理论^[92]。武汉大学徐红星课题组同样在一根银纳米线上耦合了多个SPE,并通过调节银纳米线上的SPP干涉场实现了对不同SPE的局域激发,由于SPP的波长小于衍射极限,该方法能够对多个SPE进行超分辨的控制^[93],如图10。由此可见这种与多SPE耦合的杂化SPP波导结构不仅能够提高能量传输距离,实现对SPE突破衍射极限的操纵,也提供了一种新的超分辨成像方法,并且开辟了研

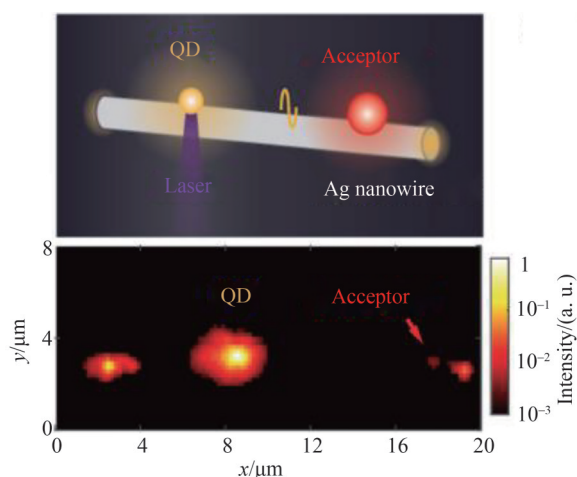


图9 银纳米线上单量子点和单荧光分子的关联发射^[91]

Fig.9 The correlated emission between a single QD and a fluorescent nanobead on the same AgNW^[91]

究超辐射等协同发射现象的新途径。另一方面,研究单个SPE与多个表面等离子激元电磁场的相互作用也极具研究价值。2020年,SCHÖRNER C和LIPPITZ M在两根单晶银纳米线间隙中同时传输可见波段的泵浦SPP和红移的耗尽SPP,并将单个甲苯二亚胺分子放置于gap-SPP模式场内,同时与两种SPP进行相互作用,从而观察到的荧光发生受激发射损耗(Stimulated Emission Depletion, STED)现象^[94],如图11。该工作证明了单分子与SPP之间的远程非线性四波混频效应,并且效率比远程激励方式提高了五十倍,推动了功能性量子SPP回路的发展。

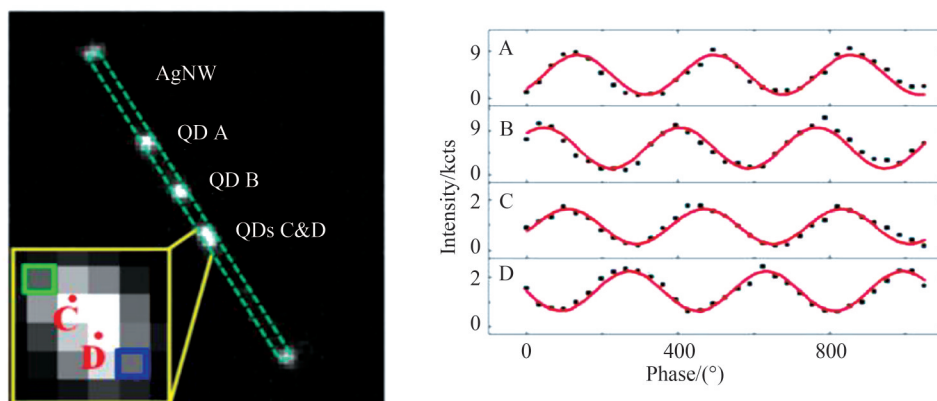


图10 一根银纳米线与多个单量子点进行耦合^[93]

Fig. 10 The coupling between several single QDs and an AgNW^[93]

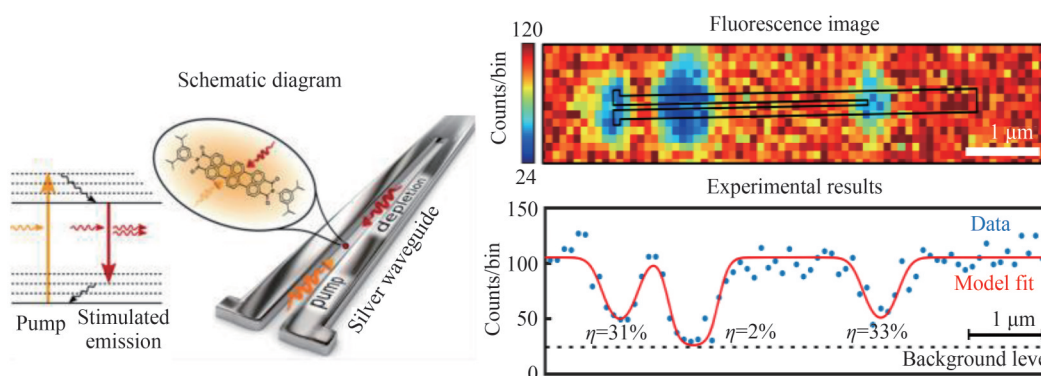


图11 SPE与银纳米线SPP之间远程非线性四波混频^[94]

Fig. 11 The remote nonlinear four-wave mixing between SPE and SPP on AgNWs^[94]

3.1.3 强耦合

当光与SPP之间的耦合强度继续增大,甚至耦合速率超过其衰减速率时,便进入到强耦合的相互作用机制^[95]。此时能量在SPP与光子之间来回相干振荡,因此SPP的存在不能够仅仅看作是对光子的干扰或影响,而应该将二者看作一个整体系统看待,从而可以在实验上观察到能级的Rabi劈裂^[96-97]。强耦合这种独特的相互作用机制能带来迷人的物理和化学性质,因此在包括量子信息的许多领域都有应用,如量子霍尔效应、玻色-爱因斯坦凝聚、超流体、拉曼散射等等。SPP也是探索强耦合现象的常用体系之一,从SPP模式与系综发光体之间的强耦合相互作用^[98],到SPP与单个发光体之间强耦合相互作用都逐一在实验上被实现^[99-101],且大部分是利用具有超高局域态密度的强局域gap-SPP模式。

银纳米线与量子发光体在强耦合相互作用下的工作目前还相对较少,2018年GARY B等报道了在一个开放的单根银纳米线纳米腔中,实现了与菁染料(TDBC)激子之间强耦合的工作^[102]。该工作中通过背向焦平面显微镜对银纳米线上SPP的倏逝波进行观察和测量,并通过改变波长最终得到色散曲线。在银纳米线上沉积一层TDBC-PVA薄膜后,测量到的色散曲线呈现出强耦合典型的反交叉现象,计算出的Rabi分裂频率最大可达 $\Omega=390\pm 80$ meV,如图12。此外一些诸如利用两根相对的、端面形状为锥形的银纳米线实现

强耦合的仿真方案^[103-104],或是金属纳米线波导与两个三能级SPE同时发生强耦合,从而使这两个SPE之间实现量子纠缠的方案等理论相关研究也早有报道^[105-106],但其在银纳米线上的实验验证还待研究。

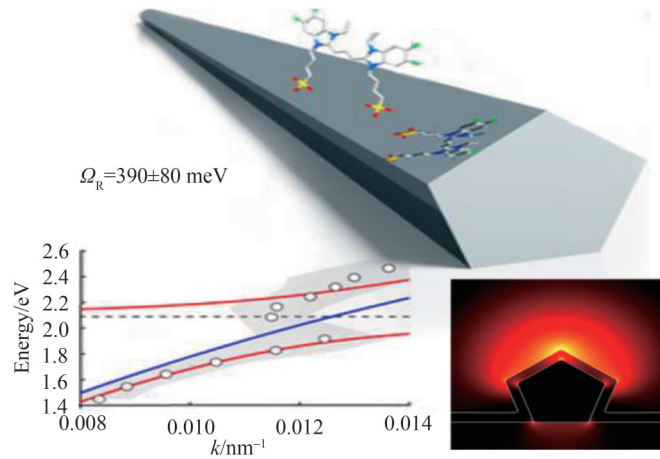


图12 单根银纳米线纳米腔与菁染料激子之间强耦合^[102]
Fig. 12 Strong coupling between the TDBC exciton and AgNW nanocavity^[102]

3.1.4 当前困难和可能发展

利用银纳米线实验实现SPP-SPE强耦合目前仍然颇具挑战,主流的思路是采用具有更紧束缚能量的gap-SPP模式。为了提高耦合强度,除了需要从理论上更加仔细地设计具有强Purcell效应、高量子产率和合理传播长度的耦合结构之外,同时要求实验上银纳米线具有更精细的几何结构,可能通过对银纳米线进行进一步微纳加工,或探索具有特殊形貌银纳米线的制备工艺实现。在实验上,银纳米线与SPE之间的相对位置也需要更为精准的纳米级控制,各种诸如原子力显微镜的近场工具和技术可以在其中得到应用。在弱耦合方面,除了实现更大的Purcell因子、更灵活的调制手段、更高的收集效率等方向,也逐渐朝着与多个SPE同时耦合的复杂杂化体系发展,可能需要首先对精准定位SPE,并独立实现每个SPE可控激发的方式进行探索性研究。

3.2 银纳米线搭建量子集成回路

搭建量子集成回路是银纳米线在量子信息和量子光学中的另一重要应用,因为SPP的亚波长局域和显著的电场增强效应,使得基于SPP的量子回路可以不受光学衍射极限限制而缩小至纳米尺寸^[107]。同时SPP之间的近场干涉,以及模式内增强的电磁场,对产生线性和非线性作用,实现更多样的光场操控提供了可能^[108-110]。同时银纳米线是一种良好的SPP波导,不管是与多根银纳米线进行进一步级联,还是与其他微纳结构形成杂化系统都有着天然的优势。对于一个完整的量子SPP集成回路,应该包括量子SPP的产生、态操作和测量三个部分,但由于目前工作中银纳米线几乎不会直接作为SPP探测器工作,这里主要从前两个方面进行介绍。

3.2.1 量子SPP产生

银纳米线上量子SPP的产生,一般采用外部SPE与银纳米线耦合的直接方法,或将制备好的量子态与银纳米线耦合的间接方法。对于产生单个SPP而言,近年来的研究主流还是采用各种不同的SPE,如单个QD、二维材料单缺陷、NV色心等等直接进行激发。在2.1.1节Purcell效应的介绍中已经指出,当SPE置于银纳米线附近时,能够打开一个自发辐射至银纳米线SPP模式的新通道,尤其是当二者之间的相互作用较强时,意味着SPE的大量能量耦合至SPP能量,从而实现了银纳米线上单个SPP的有效激发。因此这部分工作与之前的银纳米线与单SPE相互作用有很大重合^[111-116],由于前面已经做了详细介绍,这里仅给出几个代表性工作。图13(a)和图13(b)分别展示了单个QD和单个NV色心与银纳米线耦合,激发单个SPP的实验示意图^[117-118],对SPP的散射光进行二阶自关联函数的测量都能得到典型的单光子源HBT(Handury Brown-Twiss)图样。图14展示了徐红星课题组同时将两个单QD与同根银纳米线进行耦合,并通过超分辨成像和时间轨迹测量相结合的方式,分析了每个QD独立激发产生单个SPP的情况^[119]。该工作与之前介绍

的同课题组利用银纳米线超分辨局域激发单个 QD 的工作相比,设计思路一脉相承,但实现方法和实验目的刚好相反。

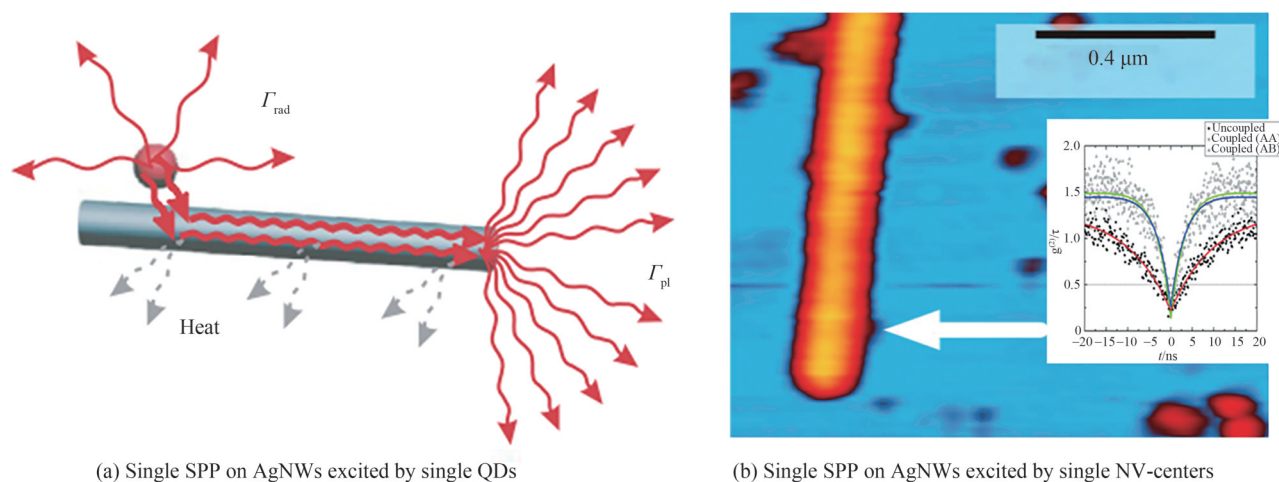


图 13 各种 SPE 激发产生银纳米线上单 SPP^[117-118]
 Fig. 13 Single SPP on AgNWs excited by different kinds of SPEs^[117, 118]

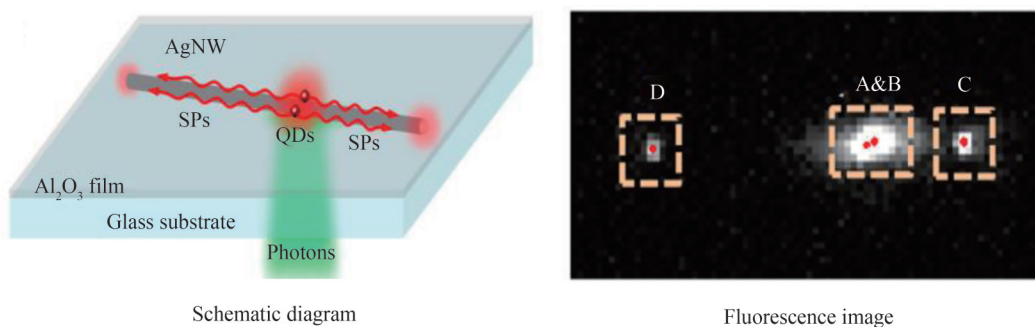


图 14 多个 QDs 独立激发产生银纳米线上单 SPP^[119]
 Fig. 14 Resolving single SPP generated by a pair of quantum dots on an AgNW^[119]

除了产生单个 SPP 以外,在银纳米线上产生其他非经典态 SPP 的常用方法,是将已经制备好的非经典光学态,如自发参量下转换产生的关联双光子、量子纠缠态等耦合至银纳米线进行激发。能够这样直接利用量子光学态对 SPP 进行泵浦,实现量子光态至量子 SPP 态的转换,得益于在第 2 节中提到的 SPP 能够对激发态的量子性质进行保持和传递的能力。同时由于前面介绍的波矢失配,远场激发一般要用物镜聚焦在银纳米线散射点^[32],或是利用光栅、棱镜等波矢补偿进行耦合,但这些传统的远场方式激发效率仍然较低^[120-121],低耦合效率和其他光学损耗会造成退相干和量子性质的丢失。近年来涌现了很多利用其它微纳结构与银纳米线形成杂化系统,从而进行近场耦合和高效激发 SPP 的工作^[122-123],其中一种光纤锥耦合金属纳米线的杂化波导结构被多次报道。该结构能够将光纤中的光场模式进行绝热压缩,再通过近场耦合的方式,实现光纤锥中波导模式与金属纳米线上 SPP 模式之间的高效相互转换^[124-126]。这种光纤锥-银纳米线杂化波导结构天然满足光纤集成,是一种高效率激发银纳米线上 SPP 的方式,除了在经典光学中被用于模式控制^[27]、生物内窥镜^[41,127]、高效率近场探针^[128]等应用以外,最近在量子 SPP 中也得到了研究。任希锋课题组利用该杂化结构,先后在银纳米线上激发了 SPP 偏振纠缠态和量子 NOON 态^[43,129],分别如图 15(a)、(b)所示。这些量子 SPP 态在银纳米线端点再次转化为光子辐射出来并被测量,测量结果显示在银纳米线上产生并传输超过 10 μm 后,其量子态保真度仍然分别高达 93.2% 和 87.9%。由于在这些工作中,SPP 量子纠缠态同时被束缚在亚波长尺寸,该结构在传输量子态,实现超分辨和超灵敏的精密测量和传感中有极大的应用潜力。

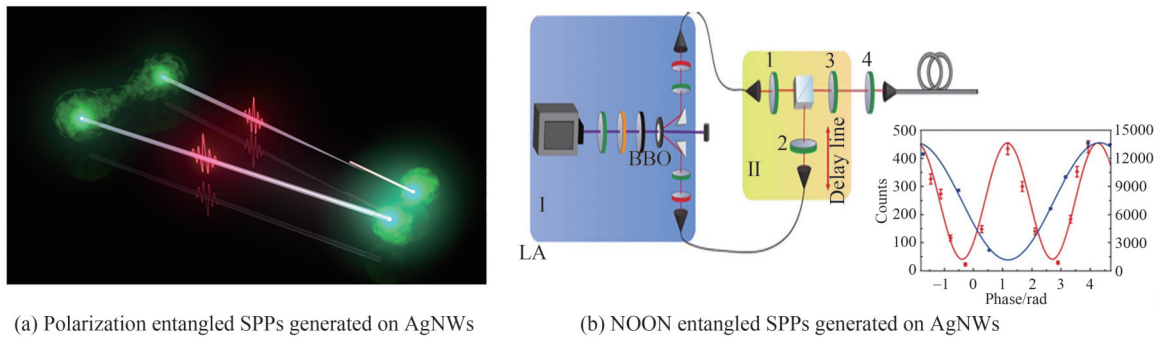


图 15 银纳米线上 SPP 纠缠态的产生^[43,129]
 Fig. 15 The entangled SPPs generated on AgNWs^[43,129]

3.2.2 量子 SPP 操控

如 2.2 节所述,由于银纳米线上支持多个传播模式,在多模叠加的情况下 SPP 在银纳米线上的传输表现出多种有趣的性质,包括之字形电场分布、拍频特性、手性和自旋依赖传播等等。这些性质可用于操控银纳米线上 SPP 的电磁场,进而实现不同功能的光子器件。比如通过改变激发光偏振,调节合适的相位关系等,可以控制银纳米线上的模式分量和电场分布,从而提供了一种银纳米线网络中 SPP 路由的方式。而由于基模和二阶模具有不同的横向对称性,因此通过引入结构对称破缺,能够实现银纳米线上的模式转换。常见的方式包括在银纳米线附近放置纳米颗粒破坏对称性,构建分叉或交叉的银纳米线网络,以及采用弯曲的银纳米线等等。基于这些性质和思路,在经典光学中银纳米线已经被应用于各种光学调控的 SPP 回路元件^[130-131],如级联多根银纳米线,并在不同端口入射特定 SPP,通过这些银纳米线与相邻纳米线 SPP 之间的相干干涉,能够以多种方式组合信号,从而实现分路器、路由器、开关、多路复用器等多输入、多输出的 SPP 集成电路器件^[132],如图 16(a)。在此基础上,徐红星课题组通过精确设计利用多根银纳米线上 SPP 的干涉,搭建了 OR 和 NOT 逻辑门,并更进一步级联实现了表面等离激元 NOR 逻辑门^[133],如图 16(b)。这种普适逻辑门操作是进行布尔逻辑运算的重要元素,对实现可扩展的复杂集成光学处理芯片有着重要意义。童利民课题组同样在利用金属纳米线搭建集成电路的研究方向上做了大量工作,不管是直接对纳米线自身形貌和结构进行微纳加工,使之成为功能性集成元件^[134],还是将金属纳米线与更为成熟的硅基光子芯片进行灵活、精准的集成化^[123],都对在银纳米线上利用 SPP 实现多种光学调控提供了思路和参考。近年来随着微纳器件与矢量光场的结合,一系列关于银纳米线手性^[135-136],基于纳米线的轨道角动量选择转向器^[137]、轨道角动量读出^[138]等等功能性器件或内在物理性质得到了更深入的研究,使着银纳米线上的光场调控朝着矢量和复杂化的方向发展。同时由于这些银纳米线器件上能够传输和保持量子 SPP 的相干性和其他性质,因此同样适用于搭建集成的量子 SPP 光学网路,实现对 SPP 态的线性操作。2.2 节中也已经介绍过 SPP 的玻色性质能够实现量子 HOM 干涉,以此为基础可以搭建量子 C-NOT 等逻辑门操作,进一步丰富银纳米线上的集成化量子信息处理过程。

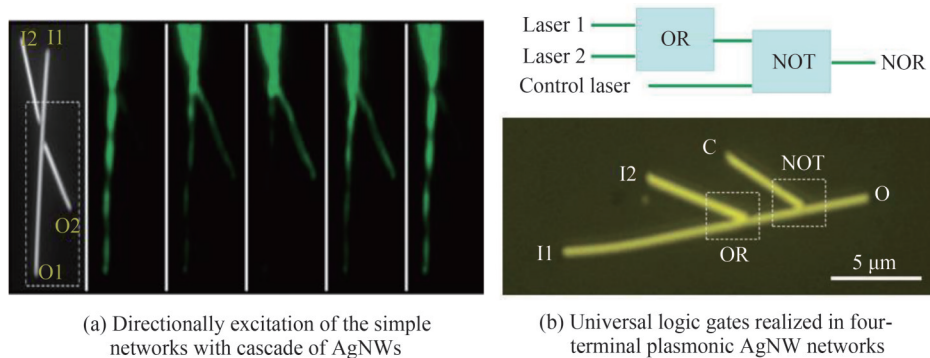


图 16 利用级联银纳米线搭建集成功能性器件和量子逻辑门^[132, 133]
 Fig. 16 The integrated functional devices and quantum logic gates realized with cascade of AgNWs^[132, 133]

银纳米线上 SPP 之间的非线性作用,或 SPP 与其他物质之间的非线性作用(如 SPP-SPE 强耦合)同样能够实现量子态操作,且与线性操作相比,非线性能够提供更为高效的操控,是更为理想的实现途径。经典光学中已有不少利用银纳米线增强非线性的工作报道,如徐红星课题组在 2017 年介绍了一种银纳米线-单层二硫化钼的杂化体系,利用远程激发的 SPPs 在单根银纳米线中产生了轴向准直但横向发散的二次谐波 SHG,为在亚波长波导中产生和操纵 SHG 发射奠定了基础,同时为实现片上高效的非线性光学提供了新的可能^[139]。但由于哪怕经过 SPP 增益后的非线性作用一般仍然较弱,实验上在银纳米线上通过非线性直接实现复杂量子操作难度太大,目前基于该机制的量子操作研究大多还停留在理论层面,一些新方案被提出亟待验证和实现。LUKIN M D 课题组在早期曾经提出过利用 SPE 与金属纳米线上传输 SPP 之间的强耦合,将该系统作为一个非线性双光子开关的方案^[140]。除此之外,该工作详细讨论了通过调节纳米线和 SPE 的相互作用从而实现单光子晶体管功能的可能性,其中作为控制门‘gate’的单个光子存在与否,能够有效决定后续作为信号‘signal’的光子是继续沿纳米线传播或被阻断,如图 17。中科大孙方稳课题组于近期最新报道了利用银纳米线-蝴蝶结天线结构对自由空间微波场进行收集、局域、和增强与电子自旋相互作用的工作^[141],如图 18。实验上除了观察到 8 个数量级的微波能量增强,和 4 个数量级的相互作用提升之外,该工作同时证明了银纳米线-蝴蝶结结构能够用于高空间分辨率的量子比特操控。因为该结构具有偏振敏感性,使得通过自由空间微波场偏振的改变,对自选比特的选择性操控成为可能。由于 SPP 与量子发光点之间实现较强非线性作用相对而言更容易实现,因此在介绍 SPP 与 SPE 进行耦合的部分工作也有应用于 SPP 回路量子操作的极大潜力。

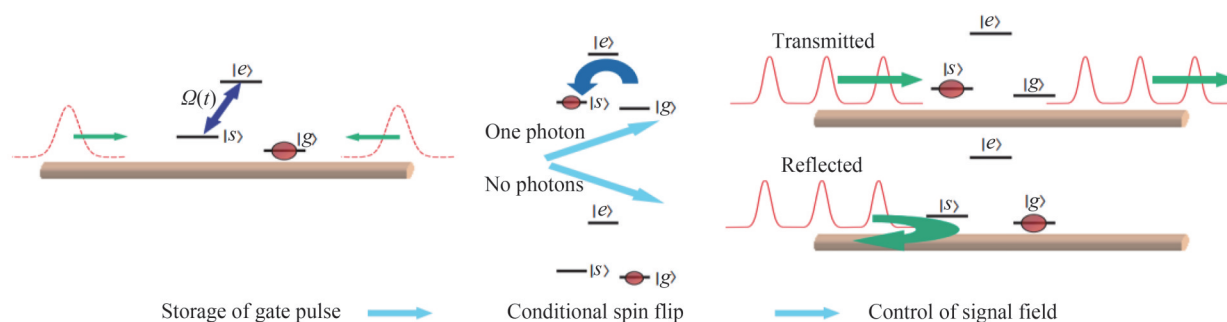


图 17 利用 SPEs 与金属纳米线强耦合实现单光子晶体管的设想^[140]

Fig. 17 The proposal of a single-photon transistor using the strong coupling between the SPEs and metal nanowires^[140]

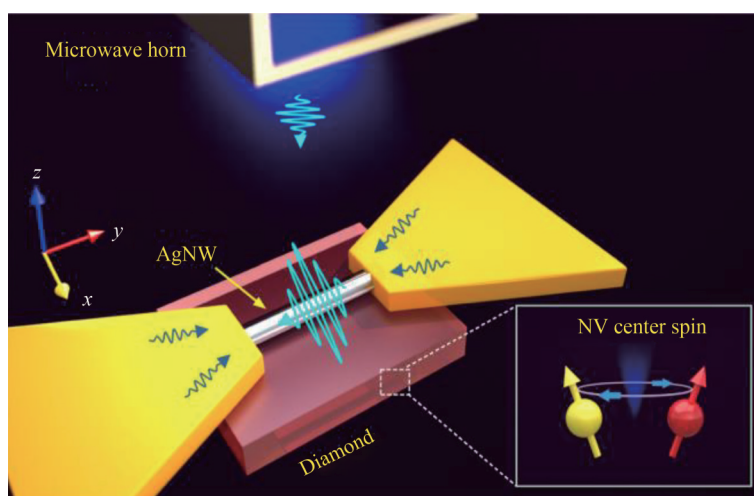


图 18 银纳米线-蝴蝶结结构用于高空间分辨率的量子比特操控^[141]

Fig. 18 Manipulation of the qubits with high-resolution using an AgNW-bowtie hybrid structure^[141]

SPP 集成电路中能够通过电学方法直接实现对量子 SPP 的测量^[142-144],但是银纳米线在这类工作中一般扮演被探测的 SPP 载体而非探测器的角色,如银纳米线上 SPP 的电场激发锗纳米线产生电子空穴对,从而

形成电流被直接探测^[142]。或将银纳米线或其他 SPP 波导置于超导探测器上,也是常用的高灵敏 SPP 测量方式^[143-144],这些方法都是采用电学方式直接对 SPP 进行测量而非转化为光子作为辅助,证明了搭建包括产生、操作到测量的完整超紧凑量子 SPP 集成回路的可行性,而银纳米线在其中必能由于自身独特优势而发挥重要作用。

3.2.3 当前困难和可能发展

利用银纳米线搭建量子集成回路的最大困难仍然体现在较高的传输损耗上,它不可忽略地影响了其中 SPP 量子性质的保持和传递,进而极大限制了大型和复杂化量子集成 SPP 回路的搭建。为了保持严格场束缚的同时降低 SPP 的欧姆损耗,杂化 SPP 波导结构被提出和引入实验。不管是银纳米线作为天线,将 SPP 耦合至介质波导中进一步远距离传输;或是使得杂化 SPP 的模场大部分位于介质材料中,从而降低损耗实现更长的传播距离,都能够有效减少银纳米线自身 SPP 本征传输模式的损耗影响。另一方面,由于银纳米线上 SPP 对介质环境表现出强烈的依赖性,因此可以通过改变周围介质的介电常数来调节银纳米线上 SPP 的特性,尤其是如果引入折射率能够进行主动和可逆调谐的介质材料,有望实现各种高性能的 SPP 器件。除此之外,采用增益材料的补偿方案,和新颖的纳米线制作技术也有待进一步研究。总体来说,将银纳米线与纳米光子和纳米电子器件相结合,将能够在量子 SPP 集成回路的发展中发挥重要作用。

3.3 银纳米线用于量子精密测量

3.3.1 相关理论和实验

银纳米线上紧束缚的 SPP 模式天然具有突破衍射极限的超分辨能力,而 SPP 模式内较大的态密度又能有效增强相互作用,对各种线性及非线性光学过程进行放大,因而银纳米线在提高传感和测量的空间分辨率、增强信号对比度上都是极有优势的工具^[145],在经典光学领域中已经被应用于针尖增强拉曼散射^[146-147]、单细胞荧光温度计^[148]、压力传感^[149]、折射率变化传感^[150]、 Hg^{2+} 离子浓度传感^[151]等各种传感和测量工作中。量子信息技术和量子光学的高速发展也为光学传感、测量和成像提供了一个新平台和途径,多种特殊测量技术^[152-153]和包括使用非经典态作为光源等新型实验方法^[154-156],被开发出来进一步提高了传感和测量的性能,并成为一个新的研究方向——量子精密传感/测量。因而将天然具有亚波长尺寸的银纳米线 SPP,与量子精密传感/测量方法相结合,即有可能实现空间分辨率与测量灵敏度同时提高,甚至超越经典极限的传感、测量和成像。

用单发光点作为纳米点状探针对银纳米线进行精准扫描,利用 SPP 与 SPE 之间局域相互作用,通过测量 SPE 状态的变化,如自发辐射速率、寿命分布等,能够进一步分析得到银纳米线亚波长范围内局域态密度的超分辨分布图^[157-158],如图 19、图 20 所示。虽然在这些工作中,银纳米线是作为产生被测量电磁场的待测物,但这些实验方案完全可以反过来,将银纳米线作为纳米探针^[87],将 SPEs 或其他量子发光体作为待测物,同样能够得到突破光学衍射极限,并且高对比度的传感和成像。由此可见一根灵活、位置精确可控的银纳米线,再加上其中传输的具有量子性质的 SPP,在量子精密传感、量子成像等应用中大有可为^[129]。采用某些特殊的量子 SPP 态能够从原理上突破噪声极限,提高测量灵敏度。以样品吸收率/透过率的测量和成像为

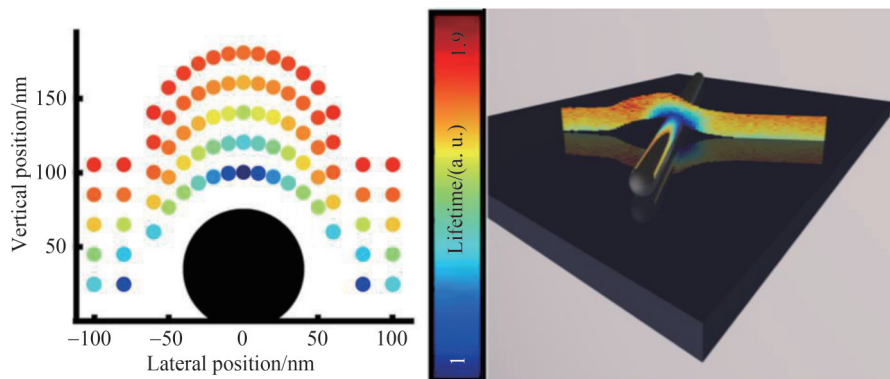


图 19 利用银纳米线上 SPP 对 NV 色心寿命调制实现超分辨局域态密度测量^[157]

Fig. 19 Quantitative analysis of the LDOS with super-resolution via the manipulation of NV-centers' lifetimes by AgNWs^[157]

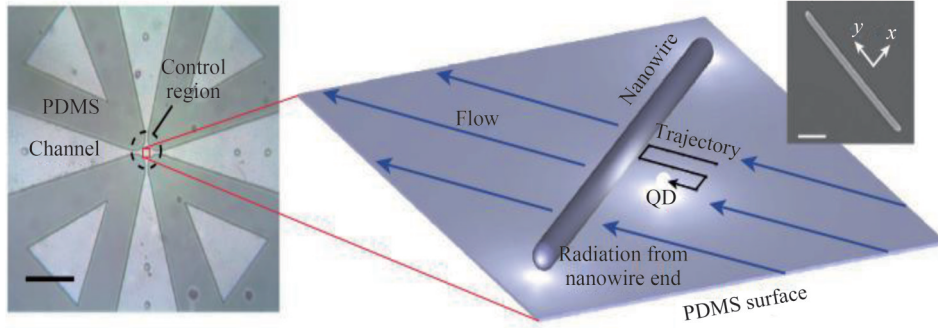

 图20 利用银纳米线上SPP与单量子点之间相互作用实现超分辨成像^[158]

 Fig. 20 Super-imaging realized by the interaction between a single QD and the SPP of AgNW^[158]

例,其物理模型可以理解为一束作为光源的照明光子态和一个真空态,同时从不同方向入射一个透过率为 η 的BS后,透过的光束被接收和探测的过程^[159-160]。该过程在量子光学中能够以玻色产生湮灭算符的形式表示,对应的透射湮灭算符 \hat{b}_1 和反射湮灭算符 \hat{b}_2 可分别表示为

$$\begin{aligned}\hat{b}_1 &= \sqrt{\eta} \hat{a} + i\sqrt{1-\eta} \hat{v} \\ \hat{b}_2 &= \sqrt{1-\eta} \hat{v} + i\sqrt{\eta} \hat{a}\end{aligned}\quad (16)$$

式中, \hat{a} 为入射照明光子态 $|\hat{n}\rangle$ 的湮灭算符, \hat{v} 为入射真空态 $|0\rangle$ 的湮灭算符。因此用于测量的入射照明光子数可写为 $\hat{n} = \hat{a}^\dagger \hat{a}$,同理被探测器接收的最终透射光子态 $|\hat{N}\rangle$ 的统计分布规律也可以用算符表示为

$$\begin{aligned}\langle \hat{N} \rangle &= \langle \hat{b}_1^\dagger \hat{b}_1 \rangle = \eta \langle \hat{n} \rangle \\ \langle \Delta^2 \hat{N} \rangle &= \langle \hat{b}_1^\dagger \hat{b}_1 \hat{b}_1^\dagger \hat{b}_1 \rangle - \langle \hat{b}_1^\dagger \hat{b}_1 \rangle^2 = \eta^2 \langle \Delta^2 \hat{n} \rangle + \eta(1-\eta) \langle \hat{n} \rangle\end{aligned}\quad (17)$$

式中, $\langle \hat{N} \rangle$ 是被探测到的平均光子数算符, $\langle \Delta^2 \hat{N} \rangle$ 是被探测到的光子数方差算符,表示光子数自身波动带来的本征噪声水平。因此可以看到最终测量的光子数的不确定度直接取决于用于入射的照明光子态自身的扰动和不确定度。对于一个光子态的统计分布规律,可以以法诺因子(Fano factor)来衡量其非经典程度,定义为 $F = \langle \Delta^2 \hat{n} \rangle / \langle \hat{n} \rangle$ 。对于一个经典光学态有 $F_{\text{classical}} \geq 1$,其中取等号时为经典极限,对应于满足泊松分布的相干态。而对于非经典量子光学态,其统计规律可以是亚泊松分布,即 $0 \leq F_{\text{non-classical}} < 1$,其中极限 $F = 0$ 在理想的Fock态中达到。由此可见采用非经典光态作为入射态进行测量,能够天然降低测量的本征噪声水平,从而提高测量信噪比和灵敏度。除了该吸收率测量例子,利用其它量子态如NOON态实现对样品相位的超灵敏测量也早已在多个实验中得到证明。因此利用银纳米线传输各种量子SPP态也能够实现灵敏度增强的测量或成像,再结合SPP自身的超分辨能力,在量子精密传感领域有极大发展潜力。

光纤锥-银纳米线杂化结构就是一根天然的适用于量子精密测量和成像的探针,将其组装进商业近场扫描系统,并激发其中的量子SPP即可实现量子近场测量和成像。值得一提的是,法诺因子 F 在经过一个效率为 η_c 的光路后,最终探测到的光子态法诺因子会退化为 $F_{\text{det}} = \eta_c F + 1 - \eta_c$,因此哪怕对于一个理想的Fock态照明光源,经过损耗后仍然有 $F_{\text{det}} = 1 - \eta_c$ 。这里的 η_c 不仅表示之前物理模型中的样品自身透过率,更包括整个过程光路中的各种损耗以及探测效率。因此损耗在量子测量和量子成像中的影响不可忽略,因为损耗会造成量子态的退相干,带来真空涨落的噪声。所以利用透过率一般在 10^{-5} 量级的传统商业近场探针传输量子态,以期达到同样的目的并不可行,进一步提高光纤锥-银纳米线这一结构,或者其他新型近场光学探针的整体效率更为实际和有意义。文献[87]和[128]都已经报道了利用这种杂化结构作为真实近场探针,对样品进行近场光学扫描成像的工作。并且这两个工作中都实现了远超商业探针的光学效率,向着未来利用该结构真正实现同时突破光学衍射极限,和散粒噪声极限的量子近场显微镜的目标更进一步。

3.3.2 当前困难和可能发展

目前真正将银纳米线应用于量子精密测量的工作还寥寥无几,这主要由于该目标要求的各种条件,包括SPP保持良好的量子性质、SPP模式体积突破衍射极限到纳米尺寸,以及对待测样品和探针直接实现灵活而精准的操控等等,在实验上难以同时满足。更小的模式体积一般需要更细的银纳米线,但这会带来更大的传输损耗和要求更高的控制精度,而大传输损耗则不利于量子性质的保持。另一方面来说,某些特殊的量子态在银纳米线上的传输,如偏振纠缠态的量子性质一般需要通过银纳米线的高阶模进行保持,但高阶模则对应更弱的能量束缚和更差的空间分辨率。对银纳米线实现灵活而精准的一系列微纳机械操作,如任意移动、纳米级定位等也要求更优秀的工程技术和实验方案。类似的,这些困难也可能通过银纳米线与其他介质纳米器件耦合的杂化系统加以克服。通过尽可能提高耦合效率,降低光学损耗,采用合适的自由度编码量子信息等方面进行优化,银纳米线在量子精密测量上进行实际应用依然潜力无限。

4 总结与展望

本文梳理了银纳米线在量子光学领域的相关研究进展,从银纳米线上SPP的基本光学性质和量子性质开始,重点介绍了银纳米线纳米级的SPP模式体积、较高的模式密度,以及能够对光子量子特性进行良好保持和传输的特点和突出优势。这些性质为银纳米线在量子光学的广泛应用提供了基础,在与量子发光点相互作用方面,弱耦合机制下能够实现具有更优良性质的量子光源,在强耦合机制下能够实现多个发光体之间的量子纠缠;利用银纳米线中SPP之间或与其他物质之间的线性和非线性相互作用能够实现各种量子操控,从而实现超小型集成量子SPP回路的搭建;而将银纳米线能够突破光学衍射极限的优势与量子计量能够突破散粒噪声极限的优势相结合,应用在传感和测量成像,有望实现分辨率和灵敏度的同时提高。

然而,SPP的许多量子特性仍然有待更深入的研究,在利用银纳米线实现真正可实用化的量子器件过程中,许多问题仍有待解决。在对不同应用的具体单独介绍中,都可以发现银纳米线上SPP损耗所带来的影响和限制,这也是其他等离激元器件共同面临的问题。对于降低SPP的传输损耗,可以通过采用吸收尽可能小的材料如石墨烯等实现长程SPP^[161]。近年来也有些工作指出损耗可以通过在SPP波导附近加入增益介质来进行补偿^[162],但这些工作仍是在经典光学范畴进行研究的,该技术可能会影响量子态在传输中的相干性质。目前来看,将银纳米线与介质波导耦合形成杂化量子系统还是最为有效和实际的途径,以平衡损耗与束缚的关系^[79,163-164]。但从另一方面讲,利用SPP损耗,研究其特殊的耗散效应也是未来的一个研究方向^[165]。银纳米线容易在空气中发生氧化是另一个实际应用中的挑战,创造一个无氧工作环境显然需要较高的成本,很多场景下也难以适用。目前常用的方法是在银纳米线外包裹一层其他稳定材料防止氧化^[166],但这可能会在某种程度上削弱局域效果,尤其是对小直径银纳米线影响尤甚。除了对这些亟待解决的挑战的探索,未来银纳米线在量子光学中的研究可能会朝着复杂化和级联化发展,如与多个SPE、多种其他微纳光子器件、或是多根银纳米线之间的相互作用和集成。同时从控制银纳米线上SPP的强度、偏振、路径等相对较简单的特性之后,进一步利用银纳米线携带矢量化和具有更高维度量子信息的研究也已经开始。进一步增强银纳米线与各种量子发射体之间的相互作用,以至实现强耦合的实验研究也仍然会是热门方向。为了实现这些目标,除了需要对等离激元量子特性更深刻的理论理解之外,对银纳米线自身的基本性质研究和制作工艺也需要相应跟上,如对其介电常数更多的理论和实验研究^[167],更精准控制银纳米线尺寸的相关工艺,和制备或加工具有特殊端面形状,如锥形针尖的银纳米线^[168],用纳米颗粒甚至多个纳米颗粒对银纳米线进行修饰等等。探索这些令人兴奋的新兴前沿领域和寻找解决这些问题的答案,必定能使银纳米线在量子光学中的研究进入到一个全新而富有成效的阶段,在更多的实际应用中大放异彩。

参考文献

- [1] OZBAY E. Plasmonics: merging photonics and electronics at nanoscale dimensions [J]. *Science*, 2006, 311 (5758): 189-193.
- [2] TAKAHARA J, YAMAGISHI S, TAKI H, et al. Guiding of a one-dimensional optical beam with nanometer diameter

- [J]. *Optics Letters*, 1997, 22(7): 475-477.
- [3] BERINI P, DE LEON I. Surface plasmon-polariton amplifiers and lasers[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(1): 16-24.
- [4] 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.
- [5] GIANNINI V, FERNÁNDEZ-DOMÍNGUEZ A I, HECK S C, et al. Plasmonic nanoantennas: fundamentals and their use in controlling the radiative properties of nanoemitters[J]. *Chemical Reviews*, 2011, 111(6): 3888-3912.
- [6] ANKER J N, HALL W P, LYANDRES O, et al. Biosensing with plasmonic nanosensors [J]. *Nanoscience and Technology: A Collection of Reviews from Nature Journals*, 2010: 308-319.
- [7] TAKAHARA J. Plasmonic nanoguides and circuits[M]. Singapore:Pan Stanford Publishing, 2009, ch2, 33-62.
- [8] FANG N, LEE H, SUN CHENG, et al. Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens [J]. *Science*, 2005, 308(5721): 534-537.
- [9] ELSON J M, RITCHIE R H. Photon interactions at a rough metal surface[J]. *Physical Review B*, 1971, 4(12): 4129.
- [10] HOPFIELD J J. Theory of the contribution of excitons to the complex dielectric constant of crystals[J]. *Physical Review*, 1958, 112(5): 1555.
- [11] PINES D. A collective description of electron interactions: IV. Electron interaction in metals[J]. *Physical Review*, 1953, 92(3): 626.
- [12] PINES D, BOHM D. A collective description of electron interactions: II. Collective vs individual particle aspects of the interactions[J]. *Physical Review*, 1952, 85(2): 338.
- [13] TAME M S, LEE C, LEE J, et al. Single-photon excitation of surface plasmon polaritons[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(19): 190504.
- [14] WAKS E, SRIDHARAN D. Cavity QED treatment of interactions between a metal nanoparticle and a dipole emitter[J]. *Physical Review A*, 2010, 82(4): 043845.
- [15] XU Da, XIONG Xiao, WU Lin, et al. Quantum plasmonics: new opportunity in fundamental and applied photonics[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2018, 10(4): 703-756.
- [16] LI Ming, CHEN Yang, GUO Guangcan, et al. Recent progress of the application of surface plasmon polariton in quantum information processing[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(14): 144202.
李明, 陈阳, 郭光灿, 等. 表面等离激元量子信息应用研究进展[J]. *物理学报*, 2017, 66(14): 144202.
- [17] 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.
- [18] REN X F, GUO G P, ZHANG P, et al. Remote control of extraordinary transmission through subwavelength hole arrays [J]. *Europhysics Letters*, 2008, 84(3): 30005.
- [19] GARCÍA M A. Surface plasmons in metallic nanoparticles: fundamentals and applications [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2011, 44(28): 283001.
- [20] BOZHEVOLNYI S I, VOLKOV V S, DEVAUX E, et al. Channel plasmon subwavelength waveguide components including interferometers and ring resonators[J]. *Nature*, 2006, 440(7083): 508-511.
- [21] STOCKMAN M I. Nanofocusing of optical energy in tapered plasmonic waveguides[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93(13): 137404.
- [22] MUEHLSCHLEGEL P, EISLER H J, MARTIN O J F, et al. Resonant optical antennas [J]. *Science*, 2005, 308(5728): 1607-1609.
- [23] GIANNINI V, FERNÁNDEZ-DOMÍNGUEZ A I, HECK S C, et al. Plasmonic nanoantennas: fundamentals and their use in controlling the radiative properties of nanoemitters[J]. *Chemical Reviews*, 2011, 111(6): 3888-3912.
- [24] RYCENGA M, COBLEY C M, ZENG Jie, et al. Controlling the synthesis and assembly of silver nanostructures for plasmonic applications[J]. *Chemical Reviews*, 2011, 111(6): 3669-3712.
- [25] MADARIA A R, KUMAR A, ISHIKAWA F N, et al. Uniform, highly conductive, and patterned transparent films of a percolating silver nanowire network on rigid and flexible substrates using a dry transfer technique [J]. *Nano Research*, 2010, 3(8): 564-573.
- [26] BARDET L, PAPANASTASIOU D T, CRIVELLO C, et al. Silver nanowire networks: ways to enhance their physical properties and stability[J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(11): 2785.
- [27] WU Yunkun, LU Liu, CHEN Yang, et al. Excitation and analyzation of different surface plasmon modes on a suspended Ag nanowire[J]. *Nanoscale*, 2019, 11(46): 22475-22481.
- [28] SCHULLER J A, BARNARD E S, CAI Wenshan, et al. Plasmonics for extreme light concentration and manipulation [J]. *Nature Materials*, 2010, 9(3): 193-204.
- [29] XIONG Xiao, ZOU Changling, REN Xifeng, et al. Silver nanowires for photonics applications [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2013, 7(6): 901-919.
- [30] WANG Zhenlin, Research progress of surface plasmon polaritons [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 (3): 287-324.
- [31] HOPFIELD J J. Theory of the contribution of excitons to the complex dielectric constant of crystals[J]. Physical Review, 1958, 112(5): 1555.
- [32] SANDERS A W, ROUTENBERG D A, WILEY B J, et al. Observation of plasmon propagation, redirection, and fan-out in silver nanowires[J]. Nano Letters, 2006, 6(8): 1822-1826.
- [33] KANG T, CHOI W, YOON I, et al. Rainbow radiating single-crystal Ag nanowire nanoantenna[J]. Nano Letters, 2012, 12(5): 2331-2336.
- [34] SCHIDER G, KRENN J R, HOHENA U A, et al. Plasmon dispersion relation of Au and Ag nanowires[J]. Physical Review B, 2003, 68(15): 155427.
- [35] KRENN J R, WEEBER J C. Surface plasmon polaritons in metal stripes and wires[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2004, 362(1817): 739-756.
- [36] TYAGI H K, LEE H W, UEBEL P, et al. Plasmon resonances on gold nanowires directly drawn in a step-index fiber[J]. Optics Letters, 2010, 35(15): 2573-2575.
- [37] SUN Yugang, YIN Yadang, MAYERS B T, et al. Uniform silver nanowires synthesis by reducing AgNO₃ with ethylene glycol in the presence of seeds and poly(vinyl pyrrolidone)[J]. Chemistry of Materials, 2002, 14(11): 4736-4745.
- [38] SUN Yugang, GATES B, MAYERS B, et al. Crystalline silver nanowires by soft solution processing[J]. Nano Letters, 2002, 2(2): 165-168.
- [39] DITLBACHER H, HOHENA U A, WAGNER D, et al. Silver nanowires as surface plasmon resonators[J]. Physical Review Letters, 2005, 95(25): 257403.
- [40] BARTHES J, BOUHELIER A, DEREUX A, et al. Coupling of a dipolar emitter into one-dimensional surface plasmon[J]. Scientific Reports, 2013, 3(1): 1-8.
- [41] YAN Ruoxue, PARK J H, CHOI Y, et al. Nanowire-based single-cell endoscopy[J]. Nature Nanotechnology, 2012, 7(3): 191-196.
- [42] GU Fuxing, ZENG Heping, TONG Liming, et al. Metal single-nanowire plasmonic sensors[J]. Optics Letters, 2013, 38(11): 1826-1828.
- [43] LI Ming, ZOU Changling, REN Xifeng, et al. Transmission of photonic quantum polarization entanglement in a nanoscale hybrid plasmonic waveguide[J]. Nano Letters, 2015, 15(4): 2380-2384.
- [44] VERHAGEN E, SPASENOVIĆ M, POLMAN A, et al. Nanowire plasmon excitation by adiabatic mode transformation[J]. Physical Review Letters, 2009, 102(20): 203904.
- [45] LIU Ning, LI Zhipeng, XU Hongxing. Polarization-dependent study on propagating surface plasmons in silver nanowires launched by a near-field scanning optical fiber tip[J]. Small, 2012, 8(17): 2641-2646.
- [46] LI Zhipeng, BAO Kui, FANG Yurui, et al. Effect of a proximal substrate on plasmon propagation in silver nanowires[J]. physical review B, 2010, 82(24): 241402.
- [47] LIU Aiping, ZOU Changling, REN Xifeng, et al. Independently analyzing different surface plasmon polariton modes on silver nanowire[J]. Optics Express, 2014, 22(19): 23372-23378.
- [48] ZOU Changling, SUN Fangwen, XIAO Yunfeng, et al. Plasmon modes of silver nanowire on a silica substrate[J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(18): 183102.
- [49] WEI Hong, PAN Deng, ZHANG Shunping, et al. Plasmon waveguiding in nanowires[J]. Chemical Reviews, 2018, 118(6): 2882-2926.
- [50] ZHANG Shunping, WEI Hong, BAO Kui, et al. Chiral surface plasmon polaritons on metallic nanowires[J]. Physical Review Letters, 2011, 107(9): 096801.
- [51] LIN Jiao, MUELLER J P B, WANG Qian, et al. Polarization-controlled tunable directional coupling of surface plasmon polaritons[J]. Science, 2013, 340(6130): 331-334.
- [52] YIN Xiaobo, YE Ziliang, RHO J, et al. Photonic spin Hall effect at metasurfaces[J]. Science, 2013, 339(6126): 1405-1407.
- [53] PETERSEN J, VOLZ J, RAUSCHENBEUTEL A. Chiral nanophotonic waveguide interface based on spin-orbit interaction of light[J]. Science, 2014, 346(6205): 67-71.
- [54] SHITRIT N, YULEVICH I, MAGUID E, et al. Spin-optical metamaterial route to spin-controlled photonics[J]. Science, 2013, 340(6133): 724-726.
- [55] PINES D. A collective description of electron interactions: IV. Electron interaction in metals[J]. Physical Review, 1953, 92(3): 626.
- [56] HOPFIELD J J. Theory of the contribution of excitons to the complex dielectric constant of crystals[J]. Physical Review, 1958, 112(5): 1555.
- [57] ALTEWISCHER E, EXTER M PVAN, WOERDMAN J P. Plasmon-assisted transmission of entangled photons[J]. Nature, 2002, 418(6895): 304-306.

- [58] FASEL S, ROBIN F, MORENO E, et al. Energy-time entanglement preservation in plasmon-assisted light transmission [J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(11): 110501.
- [59] REN Xifeng, GUO Guoping, HUANG Yunfeng, et al. Plasmon-assisted transmission of high-dimensional orbital angular-momentum entangled state[J]. *Europhysics Letters*, 2006, 76(5): 753.
- [60] HUCK A, SMOLKA S, LODAHL P, et al. Demonstration of quadrature-squeezed surface plasmons in a gold waveguide [J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102(24): 246802.
- [61] KOLESOV R, GROTZ B, BALASUBRAMANIAN G, et al. Wave-particle duality of single surface plasmon polaritons [J]. *Nature Physics*, 2009, 5(7): 470-474.
- [62] FUJII G, SEGAWA T, MORI S, et al. Preservation of photon indistinguishability after transmission through surface-plasmon-polariton waveguide[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(9): 1535-1537.
- [63] HEERES R W, KOUWENHOVEN L P, ZWILLER V. Quantum interference in plasmonic circuits [J]. *Nature Nanotechnology*, 2013, 8(10): 719-722.
- [64] FAKONAS J S, LEE H, KELAITA Y A, et al. Two-plasmon quantum interference[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(4): 317-320.
- [65] CAI Yongjin, LI Ming, REN Xifeng, et al. High-visibility on-chip quantum interference of single surface plasmons[J]. *Physical Review Applied*, 2014, 2(1): 014004.
- [66] DI MARTINO G, SONNEFRAUD Y, KÉNA-COHEN S, et al. Quantum statistics of surface plasmon polaritons in metallic stripe waveguides[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(5): 2504-2508.
- [67] FUJII G, SEGAWA T, MORI S, et al. Preservation of photon indistinguishability after transmission through surface-plasmon-polariton waveguide[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(9): 1535-1537.
- [68] VEST B, DHEUR M C, DEVAUX É, et al. Anti-coalescence of bosons on a lossy beam splitter[J]. *Science*, 2017, 356(6345): 1373-1376.
- [69] LI Ming, ZOU Changling, GUO Guangcan, et al. Effect of unbalanced and common losses in quantum photonic integrated circuits[J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(9): 092701.
- [70] SUN Mengtao, ZHANG Zhenglong, WANG Peijie, et al. Remotely excited Raman optical activity using chiral plasmon propagation in Ag nanowires[J]. *Light: Science & Applications*, 2013, 2(11): e112.
- [71] RUSSELL K J, HU E L. Gap-mode plasmonic nanocavity[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(16): 163115.
- [72] ZHAN Yaohui, LI Xiaofeng, WU Kai, et al. Coaxial Ag/ZnO/Ag nanowire for highly sensitive hot-electron photodetection[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(8): 081109.
- [73] JEONG D H, ZHANG Youxiang, MOSKOVITS M. Polarized surface enhanced Raman scattering from aligned silver nanowire rafts[J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2004, 108(34): 12724-12728.
- [74] PURCELL E M. Spontaneous emission probabilities at radio frequencies[J]. *Physical Review*, 1946, 69: 681.
- [75] DREXHAGE K H. Influence of a dielectric interface on fluorescence decay time [J]. *Journal of luminescence*, 1970, 1: 693-701.
- [76] SPRIK R, TIGGELEN B AVAN, LAGENDIJK A. Optical emission in periodic dielectrics [J]. *Europhysics Letters*, 1996, 35(4): 265.
- [77] NOVOTNY L, HECHT B. Principles of nano-optics[M]. Cambridge, England:Cambridge university press, 2012.
- [78] TAI C T. Dyadic green functions in electromagnetic theory[M]. Piscataway, New Jersey: IEEE, 1994, 2nd ed.
- [79] CHANG D E, SØRENSEN A S, HEMMER P R, et al. Quantum optics with surface plasmons [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97(5): 053002.
- [80] DREXHAGE K H, KUHN H, SCHÄFER F P. Variation of the fluorescence decay time of a molecule in front of a mirror [J]. *Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie*, 1968, 72(2): 329-329.
- [81] PURCELL E M, TORREY H C, POUND R V. Resonance absorption by nuclear magnetic moments in a solid [J]. *Physical Review*, 1946, 69(1-2): 37.
- [82] AKIMOV A V, MUKHERJEE A, YU C, et al. Generation of single optical plasmons in metallic nanowires coupled to quantum dots[J]. *Nature*, 2007, 450(7168): 402-406.
- [83] CAI Tao, DUTTA S, AGHAEIMEIBODI S, et al. Coupling emission from single localized defects in two-dimensional semiconductor to surface plasmon polaritons[J]. *Nano Letters*, 2017, 17(11): 6564-6568.
- [84] KUMAR S, ANDERSEN S K H, BOZHEVOLNYI S I. Extremely confined gap-plasmon waveguide modes excited by nitrogen-vacancy centers in diamonds[J]. *ACS Photonics*, 2018, 6(1): 23-29.
- [85] ZHANG Guorui, GU Ying, GONG Qihuang, et al. Symmetry-tailored patterns and polarizations of single-photon emission[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(11): 3557-3565.
- [86] TRAN T T, FANG Jinghua, ZHANG Hao, et al. Facile self-assembly of quantum plasmonic circuit components [J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(27): 4048-4053.
- [87] WU Yunkun, LIU Xiaojing, QI Xiaozhuo, et al. Near-field modulation of single photon emitter with a plasmonic probe

- [J]. Applied Physics Letters, 2021, 118(10): 104002.
- [88] LIU Xiaojing, WU Yunkun, QI Xiaozhuo, et al. Near-field modulation of differently oriented single photon emitters with a plasmonic probe[J]. Nano Letters, 2022, 22(6): 2244-2250.
- [89] RIDOLFO A, DI STEFANO O, FINA N, et al. Quantum plasmonics with quantum dot-metal nanoparticle molecules: influence of the Fano effect on photon statistics[J]. Physical Review Letters, 2010, 105(26): 263601.
- [90] YANNOPAPAS V, PASPALAKIS E, VITANOV N V. Plasmon-induced enhancement of quantum interference near metallic nanostructures[J]. Physical Review Letters, 2009, 103(6): 063602.
- [91] BOUCHET D, LHUILLIER E, ITHURRIA S, et al. Correlated blinking of fluorescent emitters mediated by single plasmons[J]. Physical Review A, 2017, 95(3): 033828.
- [92] YANG Wanli, AN Junhong, ZHANG Chengjie, et al. Dynamics of quantum correlation between separated nitrogen-vacancy centers embedded in plasmonic waveguide[J]. Scientific Reports, 2015, 5(1): 1-9.
- [93] LI Qiang, PAN Deng, WEI Hong, et al. Plasmon-assisted selective and super-resolving excitation of individual quantum emitters on a metal nanowire[J]. Nano Letters, 2018, 18(3): 2009-2015.
- [94] SCHÖRNER C, LIPPITZ M. Single molecule nonlinearity in a plasmonic waveguide[J]. Nano Letters, 2020, 20(3): 2152-2156.
- [95] WAKS E, SRIDHARAN D. Cavity QED treatment of interactions between a metal nanoparticle and a dipole emitter[J]. Physical Review A, 2010, 82(4): 043845.
- [96] 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.
- [97] VASA P, LIENAU C. Strong light-matter interaction in quantum emitter/metal hybrid nanostructures [J]. Acs Photonics, 2018, 5(1): 2-23.
- [98] TUMKUR T U, ZHU G, NOGINOV M A. Strong coupling of surface plasmon polaritons and ensembles of dye molecules[J]. Optics Express, 2016, 24(4): 3921-3928.
- [99] TRÜGLER A, HOHENESTER U. Strong coupling between a metallic nanoparticle and a single molecule[J]. Physical Review B, 2008, 77(11): 115403.
- [100] CHIKKARADDY R, DE NIJS B, BENZ F, et al. Single-molecule strong coupling at room temperature in plasmonic nanocavities[J]. Nature, 2016, 535(7610): 127-130.
- [101] LIU R, ZHOU Z K, YU Y C, et al. Strong light-matter interactions in single open plasmonic nanocavities at the quantum optics limit[J]. Physical Review Letters, 2017, 118(23): 237401.
- [102] BEANE G, BROWN B S, JOHNS P, et al. Strong exciton-plasmon coupling in silver nanowire nanocavities[J]. The Journal of Physical Chemistry Letters, 2018, 9(7): 1676-1681.
- [103] LAMRI G, VELTRI A, AUBARD J, et al. Polarization-dependent strong coupling between silver nanorods and photochromic molecules[J]. Beilstein Journal of Nanotechnology, 2018, 9(1): 2657-2664.
- [104] HUANG Chengping, YIN Xiaogang, KONG Lingbao, et al. Interactions of nanorod particles in the strong coupling regime[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2010, 114(49): 21123-21131.
- [105] MARTIN-CANO D, GONZÁLEZ-TUDELA A, MARTÍN-MORENO L, et al. Dissipation-driven generation of two-qubit entanglement mediated by plasmonic waveguides[J]. Physical Review B, 2011, 84(23): 235306.
- [106] YANG J, LIN G W, NIU Y P, et al. Quantum entangling gates using the strong coupling between two optical emitters and nanowire surface plasmons[J]. Optics Express, 2013, 21(13): 15618-15626.
- [107] WANG Shushu, WANG Danqing, HU Xiaopeng, et al. Compact surface plasmon amplifier in nonlinear hybrid waveguide[J]. Chinese Physics B, 2016, 25(7): 077301.
- [108] LI Lin, LI Tao, TANG Xiaomei, et al. Plasmonic polarization generator in well-routed beaming[J]. Light: Science & Applications, 2015, 4(9): e330-e330.
- [109] CHEN Ji, LI Tao, WANG Shuming, et al. Multiplexed holograms by surface plasmon propagation and polarized scattering[J]. Nano Letters, 2017, 17(8): 5051-5055.
- [110] WANG S M, CHENG Q Q, Gong Y X, et al. A $14 \times 14 \mu\text{m}^2$ footprint polarization-encoded quantum controlled-NOT gate based on hybrid waveguide[J]. Nature Communications, 2016, 7(1): 1-5.
- [111] FEDUTIK Y, TEMNOV V V, SCHÖPS O, et al. Exciton-plasmon-photon conversion in plasmonic nanostructures [J]. Physical Review Letters, 2007, 99(13): 136802.
- [112] KOLESOV R, GROTZ B, BALASUBRAMANIAN G, et al. Wave-particle duality of single surface plasmon polaritons[J]. Nature Physics, 2009, 5(7): 470-474.
- [113] GAEBEL T, DOMHAN M, POPA I, et al. Room-temperature coherent coupling of single spins in diamond[J]. Nature Physics, 2006, 2(6): 408-413.
- [114] CHILDRESS L, DUTT M V G, TAYLOR J M, et al. Coherent dynamics of coupled electron and nuclear spin qubits in diamond[J]. Science, 2006, 314(5797): 281-285.

- [115] LI Qiang, WEI Hong, XU Hongxing. Quantum yield of single surface plasmons generated by a quantum dot coupled with a silver nanowire[J]. *Nano Letters*, 2015, 15(12): 8181–8187.
- [116] CHEN Guangyin, CHEN Y, CHUU D. Spontaneous emission of quantum dot excitons into surface plasmons in a nanowire[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(19): 2212–2214.
- [117] AKIMOV A V, MUKHERJEE A, YU C L, et al. Generation of single optical plasmons in metallic nanowires coupled to quantum dots[J]. *Nature*, 2007, 450(7168): 402–406.
- [118] HUCK A, KUMAR S, SHAKOOR A, et al. Controlled coupling of a single nitrogen–vacancy center to a silver nanowire[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106(9): 096801.
- [119] LI Qiang, WEI Hong, XU Hongxing. Resolving single plasmons generated by multi-quantum-emitters on a silver nanowire[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(6): 3358–3363.
- [120] OTTO A. Excitation of nonradiative surface plasma waves in silver by the method of frustrated total reflection [J]. *Zeitschrift für Physik A Hadrons and Nuclei*, 1968, 216(4): 398–410.
- [121] GUO Xin, MA Yaoguang, WANG Yipei, et al. Nanowire plasmonic waveguides, circuits and devices [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2013, 7(6): 855–881.
- [122] GUO Xin, QIU Min, BAO Jiming, et al. Direct coupling of plasmonic and photonic nanowires for hybrid nanophotonic components and circuits[J]. *Nano Letters*, 2009, 9(12): 4515–4519.
- [123] CHEN Bigeng, WU Hao, XIN Chenguang, et al. Flexible integration of free-standing nanowires into silicon photonics [J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 1–7.
- [124] DONG Chunhua, REN Xifeng, YANG Rui, et al. Coupling of light from an optical fiber taper into silver nanowires[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(22): 221109.
- [125] GUO Xin, QIU Min, BAO Jiming, et al. Direct coupling of plasmonic and photonic nanowires for hybrid nanophotonic components and circuits[J]. *Nano Letter*, 2009, 9, 12, 4515–4519.
- [126] YAN R, PAUSAUSKIE P, HUANG J, et al. Direct photonic–plasmonic coupling and routing in single nanowires[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(50): 21045–21050.
- [127] LU G, DE KEERSMAECKER H, SU L, et al. Live-cell SERS endoscopy using plasmonic nanowire waveguides[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(30): 5124–5128.
- [128] KIM S, YU N, MA X, et al. High external-efficiency nanofocusing for lens-free near-field optical nanoscopy[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(9): 636–643.
- [129] CHEN Yang, LEE C, LU Liu, et al. Quantum plasmonic N00N state in a silver nanowire and its use for quantum sensing[J]. *Optica*, 2018, 5(10): 1229–1235.
- [130] FANG Yurui, LI Zhipeng, HUANG Yingzhou, et al. Branched silver nanowires as controllable plasmon routers[J]. *Nano Letters*, 2010, 10(5): 1950–1954.
- [131] LI Zhipeng, ZHANG Shunping, HALAS N J, et al. Coherent modulation of propagating plasmons in silver–nanowire–based structures[J]. *Small*, 2011, 7(5): 593–596.
- [132] WEI Hong, LI Zhipeng, TIAN Xiaorui, et al. Quantum dot–based local field imaging reveals plasmon–based interferometric logic in silver nanowire networks[J]. *Nano Letters*, 2011, 11(2): 471–475.
- [133] WEI Hong, WANG Zhuoxian, TIAN Xiaorui, et al. Cascaded logic gates in nanophotonic plasmon networks[J]. *Nature Communications*, 2011, 2(1): 1–5.
- [134] ZHANG Xining, MA Zhe, LUO Rui, et al. Single–nanowire surface plasmon gratings[J]. *Nanotechnology*, 2012, 23(22): 225202.
- [135] TANEJA C, PAUL D, PAVAN KUMAR G V. Experimental observation of transverse spin of plasmon polaritons in a single crystalline silver nanowire[J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 119(16): 161108.
- [136] GUO Quanbing, FU Tong, TANG Jibo, et al. Routing a chiral Raman signal based on spin–orbit interaction of light[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123(18): 183903.
- [137] REN Haoran, WANG Xiaoxia, LI Chenhao, et al. Orbital–angular–momentum–controlled hybrid nanowire circuit[J]. *Nano Letters*, 2021, 21(14): 6220–6227.
- [138] SHARMA D K, KUMAR V, VASISTA A B, et al. Optical orbital angular momentum read–out using a self–assembled plasmonic nanowire[J]. *ACS Photonics*, 2018, 6(1): 148–153.
- [139] LI Yang, KANG Meng, SHI Junjun, et al. Transversely divergent second harmonic generation by surface plasmon polaritons on single metallic nanowires[J]. *Nano Letters*, 2017, 17(12): 7803–7808.
- [140] CHANG D E, SØRENSEN A S, DEMLER E A, et al. A single–photon transistor using nanoscale surface plasmons [J]. *Nature Physics*, 2007, 3(11): 807–812.
- [141] CHEN Xiangdong, WANG Enhui, SHAN Longkun, et al. Focusing the electromagnetic field to $10^{-6}\lambda$ for ultra-high enhancement of field–matter interaction[J]. *Nature Communication*, 2021, 12: 6389.
- [142] FALK A L, KOPPENS F H L, CHUN L Y, et al. Near-field electrical detection of optical plasmons and single

- plasmon sources[C]. Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation, IEEE, 2010.
- [143] HEERES R W, KOUWENHOVEN L P, ZWILLER V. Quantum interference in plasmonic circuits [J]. *Nature Nanotechnology*, 2013, 8(10): 719-722.
- [144] HEERES R W, DORENBOS S N, KOENE B, et al. On-chip single plasmon detection [J]. *Nano Letters*, 2010, 10(2): 661-664.
- [145] NIE S, EMORY S R. Probing single molecules and single nanoparticles by surface-enhanced Raman scattering [J]. *Science*, 1997, 275(5303): 1102-1106.
- [146] CHANG S, KO H, GUNAWIDJAJA R, et al. Raman markers from silver nanowire crossbars [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2011, 115(11): 4387-4394.
- [147] LEE S J, BAIK J M, MOSKOVITS M. Polarization-dependent surface-enhanced Raman scattering from a silver-nanoparticle-decorated single silver nanowire [J]. *Nano Letters*, 2008, 8(10): 3244-3247.
- [148] BU Congcong, MU Lixuan, CAO Xingxing, et al. Silver nanowire-based fluorescence thermometer for a single cell [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(39): 33416-33422.
- [149] WANG Wenhui, YANG Qing, FAN Fengru, et al. Light propagation in curved silver nanowire plasmonic waveguides [J]. *Nano Letters*, 2011, 11(4): 1603-1608.
- [150] FU Xiangyong, LU Ying, HUANG Xiaohui, et al. Surface plasmon resonance sensor based on photonic crystal fiber filled with silver nanowires [J]. *Optica Application* 2011, 41(4): 941-951.
- [151] RAHMAN M T, KABIR M F, GURUNG A, et al. Graphene oxide-silver nanowire nanocomposites for enhanced sensing of Hg²⁺ [J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2019, 2(8): 4842-4851.
- [152] SAMANTARAY N, RUO-BERCHERA I, MEDA A, et al. Realization of the first sub-shot-noise wide field microscope [J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 6(7): e17005.
- [153] BRIDA G, GENOVESE M, BERCHERA I R. Experimental realization of sub-shot-noise quantum imaging [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(4): 227-230.
- [154] SABINES-CHESTERKING J, WHITTAKER R, JOSHI S K, et al. Sub-shot-noise transmission measurement enabled by active feed-forward of heralded single photons [J]. *Physical Review Applied*, 2017, 8(1): 014016.
- [155] TAYLOR M A, JANOUSEK J, DARIA V, et al. Biological measurement beyond the quantum limit [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(3): 229-233.
- [156] RIBEIRO P H S, SCHWOB C, MAÎTRE A, et al. Sub-shot-noise high-sensitivity spectroscopy with optical parametric oscillator twin beams [J]. *Optics Letters*, 1997, 22(24): 1893-1895.
- [157] SCHELL A W, ENGEL P, WERRA J F M, et al. Scanning single quantum emitter fluorescence lifetime imaging: quantitative analysis of the local density of photonic states [J]. *Nano Letters*, 2014, 14(5): 2623-2627.
- [158] ROPP C, CUMMINS Z, NAH S, et al. Nanoscale imaging and spontaneous emission control with a single nano-positioned quantum dot [J]. *Nature Communications*, 2013, 4(1): 1-8.
- [159] TAPSTER P, SEWARD S, RARITY J. Sub-shot-noise measurement of modulated absorption using parametric down-conversion [J]. *Physical Review A*, 1991, 44(5): 3266.
- [160] WHITTAKER R, ERVEN C, NEVILLE A, et al. Absorption spectroscopy at the ultimate quantum limit from single-photon states [J]. *New Journal of Physics*, 2017, 19(2): 023013
- [161] CONSTANT T J, HORNETT S M, CHANG D E, et al. All-optical generation of surface plasmons in graphene [J]. *Nature Physics*, 2016, 12(2): 124-127.
- [162] BERINI P, DE LEON I. Surface plasmon-polariton amplifiers and lasers [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(1): 16-24.
- [163] MOISEEV S A, KAMLI A A, SANDERS B C. Low-loss nonlinear polaritonics [J]. *Physical Review A*, 2010, 81(3): 033839.
- [164] TAME M S, MCENERY K R, ÖZDEMİR Ş K, et al. Quantum plasmonics [J]. *Nature Physics*, 2013, 9(6): 329-340.
- [165] VERSTRAETE F, WOLF M M, CIRAC J I. Quantum computation and quantum-state engineering driven by dissipation [J]. *Nature Physics*, 2009, 5(9): 633-636.
- [166] YIN Yadong, LU Yu, SUN Yugang, 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.
- [167] QUINTEN M. Optical constants of gold and silver clusters in the spectral range between 1.5 eV and 4.5 eV [J]. *Zeitschrift für Physik B Condensed Matter*, 1996, 101(2): 211-217.
- [168] LIU Qiushi, KIM S, MA Xuezi, et al. Ultra-sharp and surfactant-free silver nanowire for scanning tunneling microscopy and tip-enhanced Raman spectroscopy [J]. *Nanoscale*, 2019, 11(16): 7790-7797.

Applications of Silver Nanowires in Quantum Optics (Invited)

WU Yunkun^{1,2}, REN Xifeng^{1,2}

(1 CAS Key Laboratory of Quantum Information, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

(2 Synergetic Innovation Center of Quantum Information & Quantum Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Surface plasmon polariton has attracted more and more attention in recent years, since it possesses the ability to break the optical diffraction limit and confine the electromagnetic field at sub-wavelength scale. Besides the investigations in classical regime, the rapidly developed quantum optics and quantum information technologies also provide a new perspective to investigate the surface plasmons at a quantum level, thus growing the new era for both quantum optics and plasmons. Among numerous kinds of nanostructures to support the quantum plasmons, silver nanowire (AgNW) has become one of the most popular and typical plasmonic one-dimensional waveguide. It has been widely used in the quantum information processing thanks to the mature preparation process and several natural advantages such as a single-crystal structure and relatively low absorption. On one hand, the quantum behaviors of the surface plasmon polaritons can be investigated experimentally on the silver nanowires; on the other hand, the silver nanowires can also served as functional quantum devices to realize various applications in quantum information.

Here, we review the progress of the representative theoretical and experimental works of quantum information processes using the surface plasmons on AgNWs from three aspects. First of all, we introduce the basic optical properties and the quantum properties of the surface plasmons on silver nanowires. The lower-order plasmon modes on silver nanowires have been shown, and it can be found that each of them possesses different polarization properties, electromagnetic field distributions, the abilities to confine the energy and other fundamental optical characteristics. Therefore it is of great importance to control and select the desired modes in specific researches. The influence of the substrate on the modes has also been discussed and shown to be non-negligible. For the quantum part, we introduce the early theories for quantizing plasmonic waves in metals, and many subsequent experiments which have demonstrated the wave-particle duality, non-classical statistical property, the property as Bosons and other quantum properties of the plasmons on the AgNWs. All of these important characteristics are the fundamental of the further applications of the silver nanowires in quantum information.

Secondly, we have presented the applications of silver nanowires in the quantum information processing so far, which is the main part of the manuscript. We have summarized them into three application directions in detail. The first one is using the silver nanowires to couple with sorts of quantum single photon emitters. Nowadays most experimental works are within the weak coupling region and propose to modulate the radiation properties of the quantum single photon emitters, in order to further improve the performance or realize efficient collection. Meanwhile the strong coupling between the silver nanowire and emitters could dramatically enhance the nonlinear interactions, which has great potential for deterministic quantum manipulation. But to experimentally realize the strong coupling by AgNWs is still a challenge and most works remain theoretical proposals. Another trending research direction focuses on building the quantum plasmonic circuits with silver nanowires. Multiple kinds of plasmonic quantum states, including Fock states, polarization entangled states, NOON states and so on, have been generated and then propagate on silver nanowires. Linear and non-linear operations of the quantum plasmons through the cascade of the AgNWs have also been realized in many works. Several significant breakthroughs and latest developments are introduced, demonstrating the possibility of achieving a complete process, composed of the generations, operations and measurements of the quantum plasmons, in an integrated plasmonic circuit at nanoscale. The last potential application direction is using the quantum plasmons on AgNWs to improve the measurements and sensing. To combine the natural advantages of the plasmons for breaking the optical diffraction limit and the novel non-classical properties of the quantum states for breaking the shot noise limit, the AgNWs can transmit different quantum plasmonic states and served as quantum probes in sensing and measurements. Therefore, it provides a route to enhance the spatial resolution and sensitivities of the measurements at the same time. Though the experimental works in quantum sensing and quantum

metrology with AgNWs are not as many as that of the aforementioned two directions, great potentials have been proved in sorts of present related works.

Finally, we have pointed out some problems still waiting to be solved, and discussed the possible developments of the silver nanowires applying in quantum optics and quantum plasmons in the future. More studies on the effect of loss in quantum information process are needed, including to further decrease the loss, or utilize the loss itself of the silver nanowires. To construct hybrid systems integrated of the AgNWs with other nano-optical devices might be a practical way to balance the trade-off relationship between loss and binding. Other challenges such as to prevent the silver nanowires from oxidation, to experimentally achieve stronger coupling strength and more complicated circuits with AgNWs, also remain to be overcome. Further improving the experimental technology and investigating the preparation methods of AgNWs with special morphology could be helpful, and might offer novel insights into the quantum information. Besides, deeper understanding of the fundamental properties of the silver nanowires and the quantum plasmons would lead to a new frontier in quantum applications such as ultra-compact quantum integrated circuitry, single-photon sources with high performance, quantum sensing beyond the optical diffraction limit, etc.

Key words: Silver nanowire; Surface plasmon polariton; Quantum integrated circuit; Optical-matter interaction; Quantum plasmonic

OCIS Codes: 230.5590; 230.7370; 240.6680; 270.5585