

表面等离激元量子信息应用研究进展

李明 陈阳 郭光灿 任希锋

Recent progress of the application of surface plasmon polariton in quantum information processing

Li Ming Chen Yang Guo Guang-Can Ren Xi-Feng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 144202 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.144202

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.144202>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I14>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一维自旋 1 键交替 XXZ 链中的量子纠缠和临界指数

Quantum entanglement and critical exponents in one-dimensional spin-1 bond-alternating XXZ chains

物理学报.2017, 66(12): 120301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.120301>

基于量子图态的量子秘密共享

Quantum secret sharing with quantum graph states

物理学报.2016, 65(16): 160301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.160301>

纠缠比特在不同噪声环境和信道下演化规律的实验研究

Evolutions of two-qubit entangled system in different noisy environments and channels

物理学报.2016, 65(3): 030303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.030303>

量子 BB84 协议在联合旋转噪声信道上的安全性分析

Security analysis of BB84 protocol in the collective-rotation noise channel

物理学报.2016, 65(3): 030302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.030302>

光学体系宏观-微观纠缠及其在量子密钥分配中的 $\square\tau$

Macro-micro entanglement in optical system and its application in quantum key distribution

物理学报.2015, 64(14): 140303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.140303>

专题: 电磁波衍射极限

表面等离激元量子信息应用研究进展*

李明 陈阳 郭光灿 任希锋†

(中国科学技术大学, 中国科学院量子信息重点实验室, 合肥 230026)

(中国科学技术大学, 量子信息与量子科技前沿协同创新中心, 合肥 230026)

(2017年3月24日收到; 2017年4月26日收到修改稿)

近年来表面等离激元得到了越来越多的关注和研究, 得益于其能把电磁场束缚在金属-介质界面附近的亚波长尺度范围内. 本文回顾了近年来表面等离激元在量子信息领域中的理论和实验研究, 包括表面等离激元的基本量子性质、表面等离激元量子回路、在量子尺度下与物质的相互作用及其潜在应用. 量子表面等离激元开辟了对表面等离激元基本物理性质研究的新方向, 可以应用于高度集成化的量子集成光学回路, 同时也可以用来增强光与量子发光体的相互作用.

关键词: 表面等离激元、量子信息、量子光学回路、量子发光体

PACS: 42.50.Ex, 03.67.-a, 73.20.Mf, 42.79.-e

DOI: 10.7498/aps.66.144202

1 量子表面等离激元简介

表面等离激元(SPP)是由电磁波和金属内电子的集体振荡共同支持的电磁场, 它存在于正介电常数介质(如硅、二氧化硅、聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)及传统的光学材料)和负介电常数介质(如金属、超导体和石墨烯等)的界面^[1], 一般可以通过光学耦合或电子束轰击的方法激发. SPP的场模在两种介质中都以很快的速度衰减, 从而提供了一种把光场压缩在突破传统光学衍射极限的纳米尺度的方法^[2,3]. 1997年, Takahara等^[4]在一个具有负介电常数的纳米线上发现光场模式的体积并不受传统正介电常数材料中衍射极限的限制, 由此SPP对于光场的束缚性质得到重视. 在随后的研究中, 人们发现在正介电常数和负介电常数介质的界面都存在这种受到束缚的光场模式, 包括传输模式和局域模式. 目前, 对于SPP的研究已经覆盖了从微波到光学波段得很大频率范围.

这种超强的光场模的空间压缩可以用来减小集成光学器件的尺寸、提高光学系统的空间分辨率并且增强光与物质的相互作用. 基于SPP结构的突破衍射极限的光刻技术^[5]、超紧凑的集成化光学器件和回路^[6]、纳米尺度的光学荧光增强^[7,8]、拉曼增强^[9-11]、纳米激光器、放大器^[12,13]、光学天线^[14]、生物探测和传感技术^[15]等都已经开发出来并得到应用.

20世纪, 量子光学理论的快速发展也激励着对SPP在量子层面的研究. 同传统光学场的量子性质类似, SPP的基本量子性质的理论已经有了较完备的发展. 20世纪50年代, 文献^[16-18]提出了一种模型, 对金属中的等离激元波进行量子化, 发展出量子化的表面等离激元波的描述方法, 此描述同时包含了电磁波和集体电子振荡的行为. 这种量子化的SPP被看作是一种“准粒子”, 和光子一样具有玻色子的性质. 以此为基础, 此后对SPP的量子化分为传输的SPP和局域的SPP两类^[19,20]. 然而受

* 国家自然科学基金(批准号: 11374289, 61590932)、国家重点研发计划(批准号: 2016YFA0301700)、中央高校基本科研业务费和集成光电子学国家重点联合实验室开放基金(批准号: IOSKL2015KF12)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: renxf@ustc.edu.cn

限于实验测量技术、微纳加工技术和电磁波计算模拟等的不足,对量子表面等离激元的实验研究直到近二十年才得到发展.

本文介绍SPP在量子信息领域中的主要研究方向.首先介绍SPP的基本量子性质研究,这些研究是SPP在量子领域得到应用的基础;然后介绍量子表面等离激元的两个主要研究方向,一个是SPP在量子集成回路中的应用,一个是SPP与量子发光体之间的相互作用;最后探讨量子表面等离激元发展所面临的挑战以及未来潜在应用的展望.

2 表面等离激元的基本量子性质研究

对SPP基本量子性质的实验研究始于2002年,Altewishcher等[21]验证了量子偏振纠缠的双光子态在转化为SPP然后再转化为光子的过程中,纠缠度能够得到很好的保持.研究者通过自发参量下转换过程制备了双光子偏振纠缠态,将光子对中的一

个或两个照射到金属薄膜的小孔阵列上(图1(a)),然后收集透射光子,最后检测双光子的纠缠性质.由于金属薄膜上的小孔远小于光子波长,反常透射的光子经历了转化为SPP后再转化为光子的过程[22].量子测量结果表明,在光子-SPP-光子的转化过程中,光子对之间的纠缠性质得到了保持.随后在2005年,Fasel等[23]证明了双光子之间的时间-能量纠缠在长程SPP波导中也能够得到保持.2006年,Ren等[24]利用光子的空间模式,在金属孔阵结构中实现了轨道角动量纠缠光子态的透射,这为SPP在高维量子信息处理过程的应用提供了依据.同期,Guo等[25]通过马赫-曾德尔干涉观测了在光子-SPP-光子的转化过程中双光子的德布罗意波长.此后,Huck等[26]也证明了量子表面激元能够应用于连续变量量子态的传输和操作.这些实验都证明了可以制作SPP之间的纠缠应用于量子信息处理过程,比如基于SPP的远程控制[27].

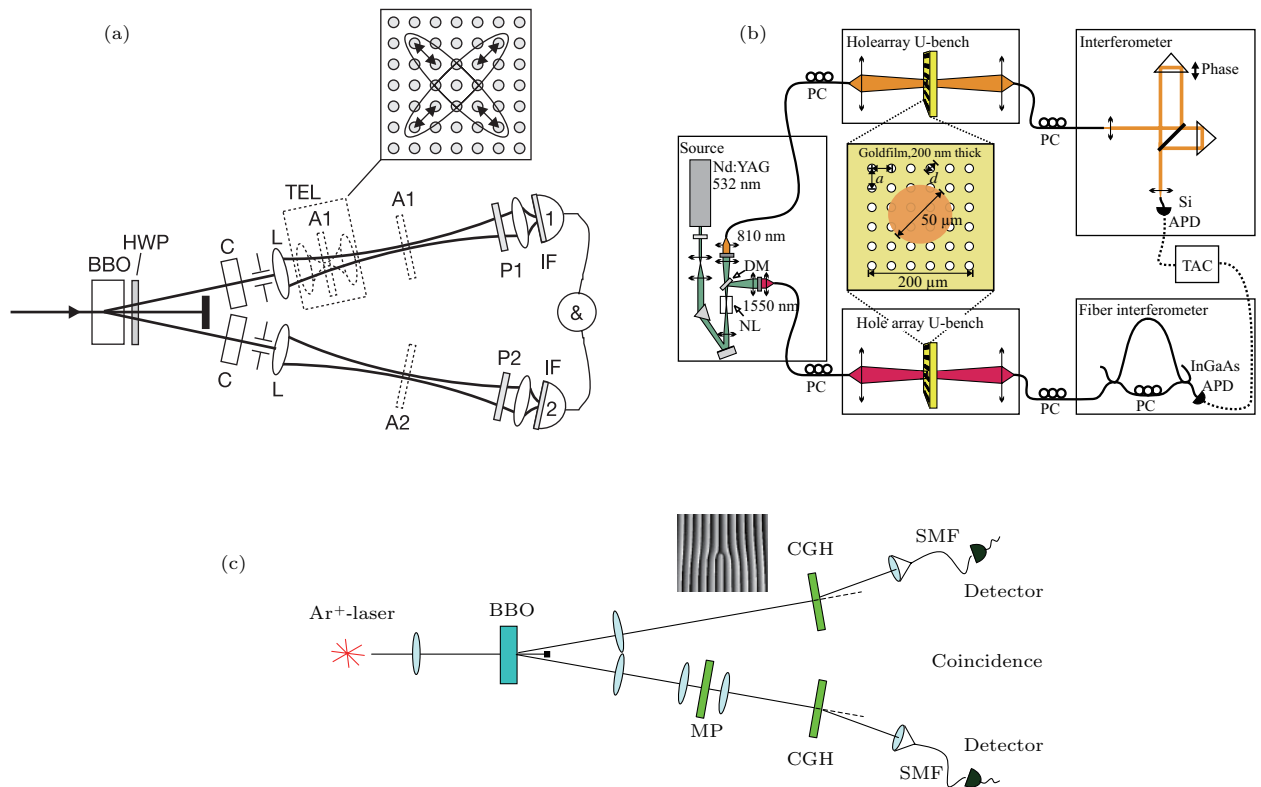


图1 SPP对量子纠缠性质的保持 (a) 双光子偏振纠缠态通过金属孔阵结构[21]; (b) 能量-时间纠缠态通过金属孔阵结构和长程SPP波导[23]; (c) 轨道角动量纠缠态通过金属孔阵结构[24]

Fig. 1. Preservation of quantum entanglement: (a) Transmission of polarization entangled state through metallic hole array[21]; (b) transmission of energy-time entangled state through metallic hole array and long range SPP waveguide[23]; (c) transmission of OAM entangled state through metallic hole array[24].

3 表面等离激元的量子统计性质

在量子力学中, 粒子的一个最基本特性就是能够同时表现出波动性和粒子性, 也就是波粒二象性^[28]. 波动性意味着粒子可以携带相位信息, 体现出波的干涉性质. 粒子性主要体现在粒子的统计性质上面. 为了验证SPP的量子性质, 波粒二相性这个最基本的量子力学问题需要得到证明. 2007年, Lukin研究组^[29]通过单个量子点与金属纳米线的耦合首次证明了单个SPP的粒子性. 2009年, Kolesov等^[30]将单个氮空位(NV)色心与金属银纳米线耦合, NV色心会自发辐射单个光子到纳米线中的SPP模式中, 从而激发单个的SPP. 实验者对从纳米线中SPP模式辐射出来的光子进行了二阶关联测量和干涉测量. 在这个实验中, 单个NV色心一次只能辐射一份能量, 这样就保证了

激发的SPP是单个的. 图2(a)中二阶关联测量的结果证明了被激发的SPP是单个的, 其粒子性得到证明, 而单个光子的自我干涉证明了其波动性^[30]. 随后在2014年, Piazza等^[31]也观测到了SPP的波粒二相性. 同光子一样, SPP也可以被制备成各种量子态, 这些量子态可以由粒子数的量子统计性质来表征. 在2012年, Maier研究组^[32]利用参量下转换的光学量子态在金属脊形波导中激发了SPP的粒子数态、Fock态, 然后对在SPP波导两端辐射出的光子进行量子统计性质测量. 对于少数光子的Fock态的实验结果证明了SPP能够保持Fock态的量子性质(图2(b)). 在这项研究中, 他们着重分析了SPP在传输中的损耗效应. 实验结果表明, SPP传输所引起的损耗可以看作是一种线性非关联的马尔可夫环境, 它并不影响量子态的关联性质. 所以, SPP的传输损耗可以用经典的方法来处理.

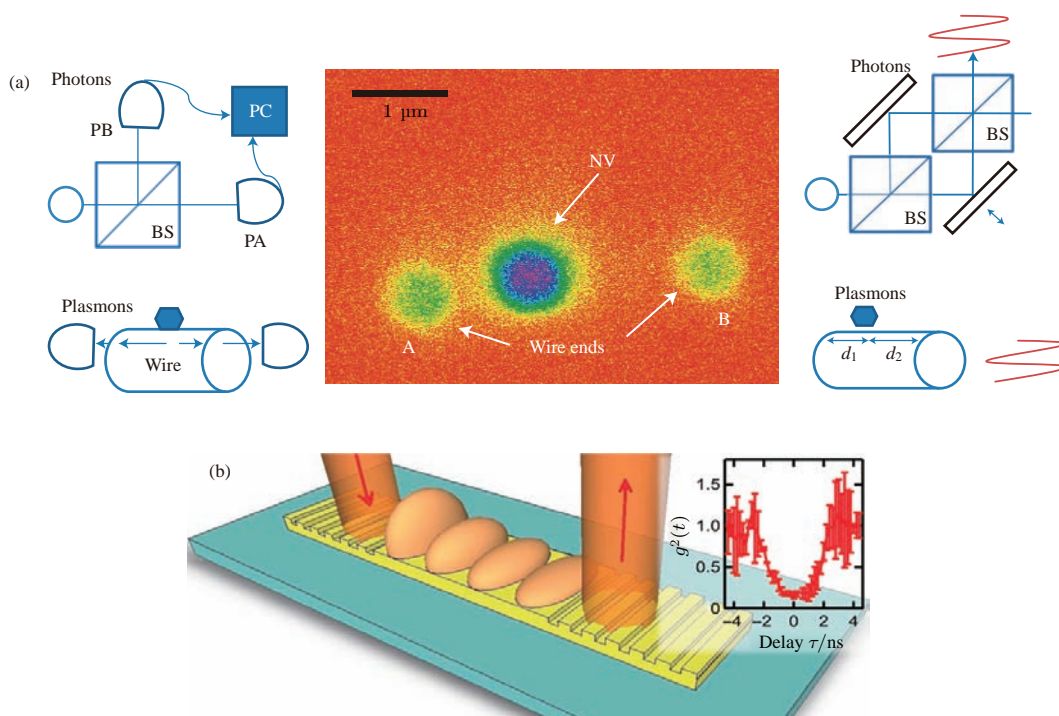


图2 SPP的量子统计性质 (a) 单个NV色心与金属纳米线耦合激发单个表面等离激元, 测量其波粒二相性^[30]; (b) 金属脊形波导中表面等离激元 Fock态的二阶关联测量^[32]

Fig. 2. Quantum statistical property of SPP: (a) Single NV center coupled to silver nanowire^[30]; (b) Fock state in SPP waveguide^[32].

上述工作都是研究光子与SPP的转化过程, 最终利用对光子的测量来验证SPP的量子性. 更为严谨的证明方法应该是在一个全SPP的回路中制备SPP的量子态并直接探测. 量子态的直接制备可以通过SPP波导与量子发光体的耦合或者在

SPP中加入量子操作来实现, 而SPP的直接探测可以通过电学的方法实现^[33]. 但这些初步的实验仍然证明了量子态、量子操作等量子信息过程都可以通过对SPP的编码来实现. 这为量子表面等离激元进一步的应用奠定了基础.

4 量子表面等离激元集成回路

因为SPP可以把光场束缚在纳米尺度,这就意味着对SPP进行操控的集成化光学器件可以缩小到纳米尺度而不受传统光学的衍射极限限制.在经典光学的研究中,基于SPP构建的器件、回路已经得到广泛的研究.比如,邹长铃、任希锋等提出的基于介质波导和金属膜的SPP偏振分束器^[34]、检偏器^[35]、光学吸收器^[36].徐红星研究组^[37]提出的利用金属纳米线搭建的光信号处理逻辑门等.同样,如果SPP光学器件能够保持量子态的相干性,这些集成的SPP器件和回路也能应用于搭建集成的量子表面等离激元光学网络^[38]、回路^[39].这样就可以大大缩小量子表面等离激元集成回路的尺寸.对于这样一个回路,它应该包括SPP的产生、量子操作和SPP的测量.

在量子集成回路中,量子化的SPP的激发可以通过间接和直接的方法.间接的方法是把外界产生的单光子源,比如自发参量下转换、晶体中的量子发光体等,利用波导耦合、光栅耦合、棱镜耦合等方法耦合到SPP波导中^[32,40-42].一种高效的方法就是利用介质波导和SPP波导之间的绝热耦合,高效地激发SPP波导中的模式^[43,44].理论上,这种效率可以达到90%以上.对于直接的方法,近年来研究的主流是把单个量子发光体,包括量子点、NV色心等放在金属波导的附近^[29,30].因为量子发光体与SPP波导会有很高的耦合强度,大部分能量会自发辐射到金属波导中,形成量子化的表面等离激元态.把量子发光体放到小的金属结构附近,在满足频率匹配的情况下,发光体就会自发辐射到金属结构的局域模式中,激发局域的量子表面等离激元.如果把发光体黏在基于原子力显微镜系统的近场光学探针上,就可以精确地控制所要激发的SPP的位置.这种机制我们会在后文详细讨论.另外一种潜在的方法就是在SPP模式覆盖区域填充非线性介质材料^[45],利用SPP的自发参量下转换直接产生SPP量子态.因为SPP模式的超小模式面积,可以期待这种方法能得到比介质波导中更高的效率.目前,已经在金属薄膜上实现了SPP的倍频,并且能在动量空间上区分介质中的非线性过程和金属中的非线性过程^[46].我们可以期待自发参量下转换在表面等离激元回路中的实现.

SPP量子态的操控可以参考集成介质光学波导中光子量子态的操控^[47],利用微纳加工的金属波导、电介质加载波导或者金属纳米线的回路来实现.以路径编码为例,对于SPP量子态的操作可以通过SPP搭建的定向耦合器和相位延迟的组合来实现,这种基于线性操作的方法是概率性的,需要通过后选择来选择需要的量子态.为了提高效率,一种可能的方法是利用非线性,包括SPP与SPP之间的非线性相互作用和SPP与物质之间的相互作用.但是,由于材料的非线性系数太低,SPP与SPP之间的非线性相互作用很弱,所以很难用这种原理来实现想要的量子操作.而SPP与物质的相互作用则可能解决这一问题,因为SPP的模式面积很小,它与量子发光体的相互作用很强,特别是纳米颗粒附近的局域SPP,这样就有很强的非线性,以实现需求的量子操作.目前基于这种机制的SPP量子操作的研究刚刚开展,因此在这一节,我们主要介绍基于线性操作方案来实现SPP量子回路.

在上述量子表面等离激元的实验研究中,人们只研究了单个SPP量子性质.而对SPP量子操作要依赖于多个表面等离激元之间的量子干涉,也就是光子之间的Hong-Ou-Mandel (HOM)干涉,这也是实现量子表面等离激元回路的基础.2012年,Fujii等^[48]验证SPP并不会改变光子的不可区分性.随着微纳加工技术的发展,在集成SPP波导中实现SPP之间的量子干涉成为可能.2013年,Zwiller研究组^[49]在集成芯片上加工出基于金条SPP波导的分束器,将自发参量下转换产生的双光子对耦合入金条波导激发两个相干的SPP,通过二阶关联测量首次观测到了两个SPP之间的量子干涉,最终实验得到了43%的干涉可见度(图3(a)).然而这个干涉可见度并没有达到量子干涉的下界,因为两个相干激光脉冲的干涉可见度最高也能够达到50%.为了在集成SPP回路中真正实现SPP的量子干涉,文献^[50-52]分别利用电介质加载的杂化SPP波导在同期实现了高于经典极限50%的双SPP量子干涉,其中任希锋研究组^[51]得到了迄今为止最高的95.7%的干涉可见度.这些实验充分证明了SPP和光子一样具有玻色子的性质,可以用于集成化的量子信息处理过程,比如以干涉为基础搭建量子C-NOT门等逻辑器件.同时,任希锋组的工作也指出了损耗对于集成SPP器件以及对量子干涉的影响.SPP模式作为一个损耗的热库确

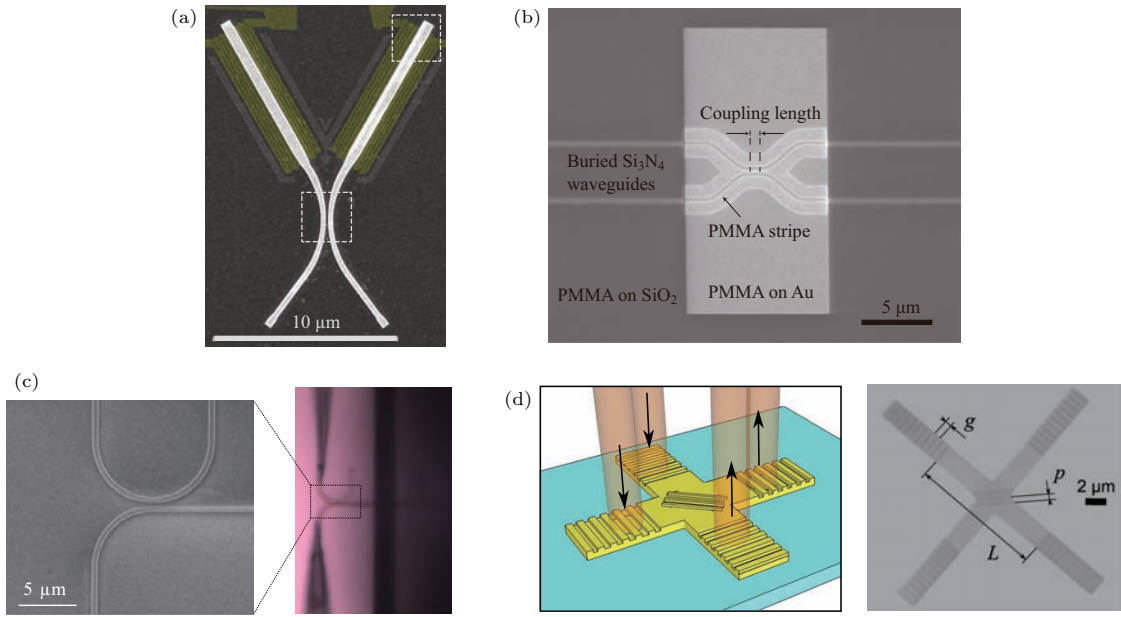


图3 SPP间的量子干涉 (a) 金属条形波导中两个SPP的量子干涉, 测量方法为集成的超导探测器 [49]; (b)—(d) 电介质加载波导中SPP间的量子干涉, 这种结构克服了损耗的影响, 可以得到更高的干涉可见度 [50,51]

Fig. 3. Quantum interference of SPP: (a) HOM interference of SPP in gold stripe waveguide [49]; (b)—(d) HOM interference of SPP in dielectric loaded SPP waveguide, such structures can reduce losses and achieve higher visibility [50,51].

实会影响集成器件的性质, 从而降低量子干涉的干涉可见度. 最近, 在实验上也观测到了SPP之间的凝聚和反凝聚现象 [53]. 所以在实际的应用中, 要考虑使用损耗低的材料, 或者使用介质杂化的波导.

2016年, 南京大学李涛、祝世宁课题组基于SPP之间的基本量子干涉, 实现了基于SPP的量子控制非门的操作 [54]. 如图4(a)所示, 整个器件的工作区域只有 $14 \mu\text{m} \times 14 \mu\text{m}$. 基于量子控制非门, 整个量子集成回路的操作都可以实现. 此外, 量子态的转移, 纠缠的产生都可利用这种原理得以实现. 在文献 [21, 23, 24] 中, 纠缠的验证仅仅是基

于百纳米量级的金属薄膜, 远小于光的波长, 这并不能证明量子纠缠在很长传输距离的集成电路中能够得到保持. 2015年, 任希锋研究组也在实验上证明了基于SPP的量子偏振纠缠态可以在亚波长尺度的波导中传输 [55]. 他们利用光纤锥把偏振纠缠的光子导入到半径为 160 nm 的金属银纳米线波导中. 在传输了 $10 \mu\text{m}$ 以上的距离后, 光子之间的偏振纠缠依然得到保持. 这种光纤集成的SPP结构可以作为量子探针, 同时实现超分辨和超灵敏的表面等离激元量子探测和传感 [56,57].

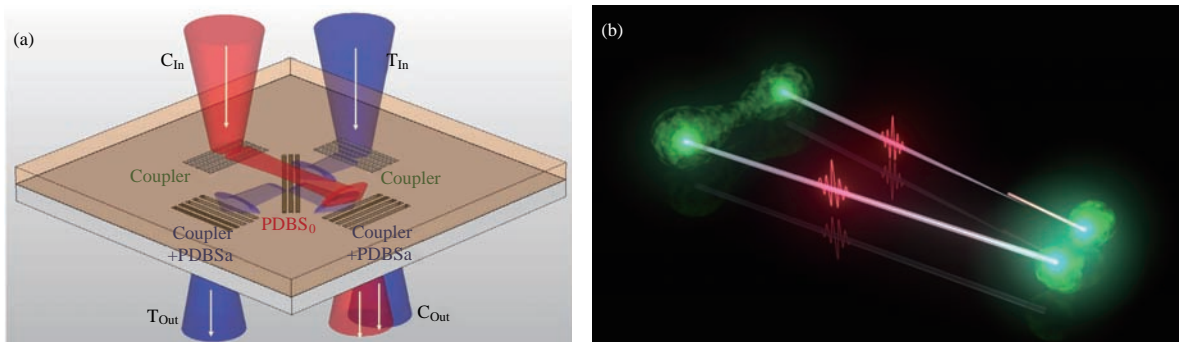


图4 简单SPP量子回路 (a) 基于SPP的量子C-NOT门 [54], 这个结构中整个逻辑门的尺寸为 $14 \mu\text{m} \times 14 \mu\text{m}$; (b) 量子偏振纠缠态在纳米尺度波导中的传输 [55], 金属纳米线的半径约为 160 nm

Fig. 4. Simple SPP quantum circuits: (a) Quantum C-NOT gate based on SPP [54], the total size is $14 \mu\text{m} \times 14 \mu\text{m}$; (b) transmission of photonic quantum polarization entangled state in a silver nanowire waveguide [55].

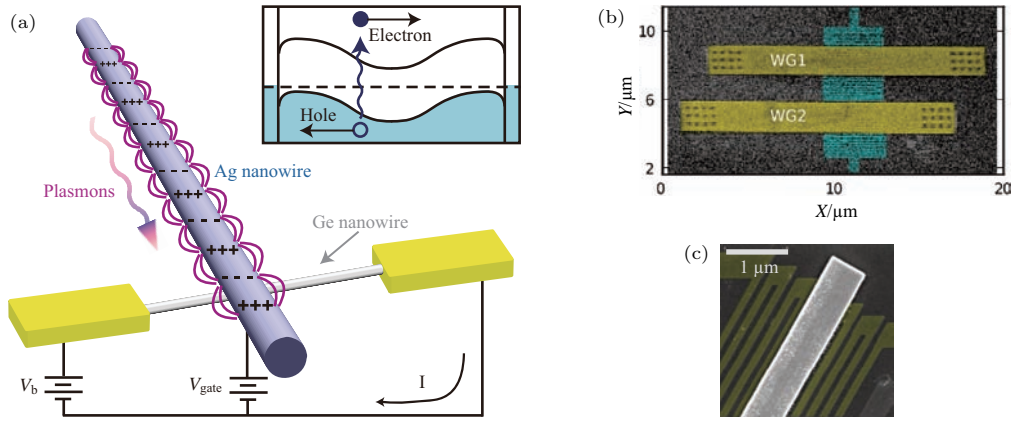


图 5 SPP 的直接探测方法 (a) 直接电学探测 [33]; (b), (c) 超导探测器掩埋波导附近探测 [49,58]

Fig. 5. Direct detection of SPP: (a) Electric detection method [33]; (b), (c) integrated super-conducting detectors [49,58].

在 SPP 的探测方面, 可以直接利用电学方法. 实验证明, 当把金属纳米线波导放在一个锗的场效应管上面, SPP 的电场激发了锗纳米线中的电子空穴对, 然后形成电流被探测 [30](图 5(a)). 为了进一步提高单个 SPP 的探测效率以及提高探测器的性质, 可以利用超导探测器(图 5(b) 和图 5(c) 铺设在 SPP 波导附近进行探测 [49,58]. 这样, 整个量子回路都可以以 SPP 的形式得到实现, 而不需要转化为光子或者使用远场的辅助方法.

上述实验结果表明, SPP 量子态的初态制备、量子操作、探测都可以在一个集成的 SPP 回路中得到实现, 而不需要远场的辅助手段.

5 表面等离激元与量子发光体的相互作用

光与量子发光体的相互作用一直是研究的热点, 一方面是为了调制量子发光体的辐射性质, 制作具有良好性质的单光子源, 或者制备表面等离激元回路中的光源; 第二则是通过光与量子发光体的相互作用引入非线性, 实现对单光子信号的量子操作. 然而一个显然而又致命的问题就是, 光学模式与量子发光体的空间尺寸差别很大, 导致相互作用强度非常弱. 想要得到足够强的耦合作用, 可以利用光学微腔来提高光模的模式密度 [59], 从而增强与量子发光体的相互作用. 随之而来的问题就是, 量子发光体与光学微腔的频率匹配比较困难, 而且高 Q 值的腔很难把光能量辐射出来. 一个可行的替代方案就是引入 SPP, 无论是传输模式和局

域模式 SPP 都能把光膜束缚在一个远低于光学衍射极限的尺度. 由于光与量子偶极子的耦合强度 $g \propto \sqrt{1/V}$, 因此 SPP 可以大大增强光与量子发光体的相互作用 [60]. 关于 SPP 与量子发光体系综相互作用的工作已经有了很细致的研究. 在本文中, 我们主要讨论单个量子发光体与 SPP 的相干相互作用.

在弱耦合的机制下, SPP 模式与量子发光体的耦合体现在对量子发光体辐射性质的调制上, 比如改变发光体的自发辐射速率 [61]. 此时, SPP 模式的影响可以用 Purcell 系数 [62] 来描述. 当把量子发光体放到金属表面或者金属纳米结构附近时, SPP 模式会激发量子发光体, 同时发光体也会直接自发辐射单光子进入 SPP 模式 [63]. 由于 SPP 模式的电场分布被局域起来, 因此它可以增加对量子发光体的激发效率, 同时也加快量子发光体的辐射速率. 2007 年, 哈佛大学的 Lukin 研究组 [29] 首次实现了单个量子点与金属银纳米线上的表面等离激元模式之间的耦合(图 6(a)). 之后, 也在实验上观测到了 NV 色心与金属银纳米线上的传输 SPP 模式的耦合 [30]. 其中, Lukin 研究组在实验上观测到了金属银纳米线中传输 SPP 模式对单个量子点荧光有 2.5 倍的增强. 基于传输的 SPP 模式, Chang 等在理论上提出了利用表面等离激元模式来实现对量子发光体荧光的高效率收集 [64], 以及单光子级别的晶体管 [65]. 而局域 SPP 模式与量子发光体耦合时, 可以用腔量子电动力学的方法来处理 [19,66]. 虽然损耗的作用导致 SPP 纳米腔的 Q 值很低, 但是超小的模式面积依然提供了很强的耦合强度. 由于

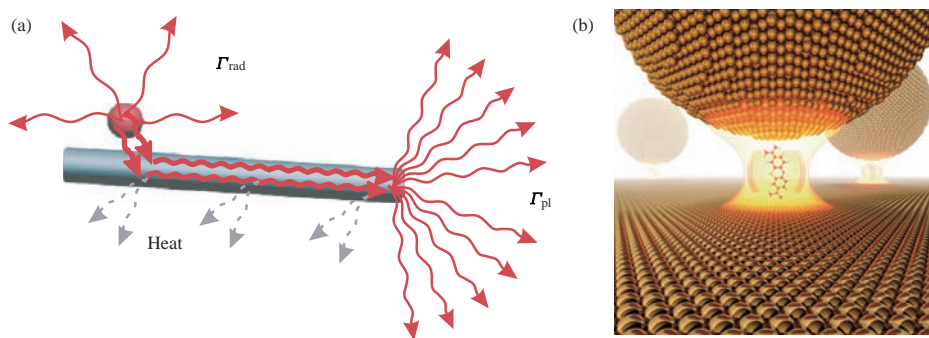


图6 SPP与单个量子发光体的相互作用 (a) 金属银纳米线与单个量子点耦合, 量子点荧光自发辐射到传输SPP模式中 [29]; (b) 局域SPP模式与单个分子在室温下发生强耦合, 实验中观测到光谱的劈裂 [79]

Fig. 6. Interaction between SPP and single quantum emitter: (a) Coupling between silver nanowire and single quantum dot [29]; (b) strong coupling between single molecule and localized SPP mode [79].

更强的耦合强度, 大部分能量辐射到SPP模式中, 最终可以利用局域SPP模式向自由空间的辐射来探测量子发光体的荧光. 在这里局域SPP模式充当了天线的作用, 可以诱导发光体自发辐射到需要的通道中去, 比如用来控制量子发光体荧光的发射方向、偏振、模式 [67–69] 等. 此外, 这种SPP模式增强耦合的机制还能导致电磁诱导透明、非反转激光等现象 [70–72]. 在国内, 徐红星研究组在量子点与金属银纳米线的耦合研究方面也做出了许多杰出的工作 [73]. 比如利用量子点作为辅助手段研究银纳米线的传输模式 [74], 测量量子点在银纳米线附近的辐射及非辐射速率等 [75].

值得注意的是, 由于金属支持的SPP模式存在损耗, 量子发光体荧光增强的机制受到了非辐射跃迁的限制 [76]. 当发光体靠近金属时, 非辐射跃迁的作用变强, 以至产生荧光猝灭的现象. 所以在利用SPP模式进行荧光增强时, 要优化量子发光体与金属结构的距离.

如果进一步缩小局域SPP模式的体积, 增大耦合强度, 使得耦合速率大于SPP模式的损耗衰减速率和发光体的损耗速率时, 就进入了强耦合的机制. 在这个机制下, 量子发光体辐射能量到SPP模式, 而且SPP模式还能再激发量子发光体. 所以SPP模式不能仅仅被看作是对量子发光体的扰动, 要当作一个整体看待, 最终会观测到光-物质能级的Rabi劈裂. 前几年, 科学家们已经在实验上观测到局域SPP模式与分子、量子点系综在强耦合机制下的相互作用 [77,78]. 然而直到2016年, 才在实验上观测到了单个量子发光体与局域SPP模式的强耦合作用, Chikkaraddy等在室温下观测到了局域SPP模式与单分子的强耦合相互作用(图6(b)).

他们制作了金属颗粒-金属膜的间隙结构, 在间隙中存在很强的局域SPP模式, 把单分子放置在这个模式中, 由于强耦合, 最终他们观测到了单分子光谱的Rabi劈裂(图6(b)) [79]. 在这种机制下, 可以用SPP模式与多个发光体耦合, 实现它们之间的纠缠 [80,81]. 也可以利用强耦合产生的非线性来搭建单光子级别的开关、逻辑门等.

6 损耗在量子表面等离子激元中的效应

需要特别指出的是, 虽然SPP在量子领域有着很多优异的性质, 但其固有损耗一直是一个致命的问题. 一方面, 损耗会影响整个器件或者回路的整体效率; 另一方面, 损耗直接关系到SPP与SPP相互作用、SPP与量子发光体相互作用中的物理机制. 在多个SPP之间进行量子干涉时, 损耗不仅仅会降低计数率, 还会降低量子干涉的干涉可见度 [49–52]. 两个SPP模式耦合时, 由于整个金属热库的存在, 耦合系数是一个复数, 也就是说SPP模式会有寿命交换. 新的本征模式中, 有的模式损耗变大, 有的损耗变小. 经过一段传输后, 只有少数损耗小的模式被保留下来, 一部分量子相干性受到了破坏 [51]. 近期, 已经在实验上观测到了损耗导致双SPP量子干涉图样的改变. 解决这种问题的一个方法就是使用电介质加载的SPP波导, 利用介质进行传输, 金属进行束缚. 在进行SPP与量子发光体耦合时, SPP模式损耗速率的大小直接决定了耦合机制的强弱, 从而决定其应用范围. 所以在利用SPP进行量子信息处理的过程中, 一定要谨慎对待损耗这个问题, 并努力削弱它的影响. 比如, 利用吸收小的材料, 如石墨烯等 [82], 来降低损耗的

影响. 也可以设计长程 SPP 波导, 但这会大大减小 SPP 模式的局域程度. 在经典光学中, 可以在 SPP 传输的过程中加入增益介质, 补偿传输中金属的吸收. 目前这种方案在传输量子信号时能否保持量子相干性尚无明确的结论, 还需要进一步的研究.

7 总结和展望

本文总结了量子表面等离激元的研究进展, 从 SPP 的基本量子性质开始, 到搭建量子表面等离激元回路及其与单个量子发光体的相互作用. 这些研究都初步证明了 SPP 在缩小量子器件尺寸、增强光与物质相互作用方面的优越性. 在实际应用方面, SPP 与 SPP 之间, SPP 与物质之间的非线性相互作用研究亟待开展, 因为必要的量子操作需要这些相互作用来完成. SPP 与 SPP 的相互作用可以实现 SPP 编码的量子态的制备以及在不同频率之间的转移. 在 SPP 与量子发光体的相互作用的研究中, 可以利用 SPP 与发光体的耦合实现多种性质的量子单光子源, 也可以应用于制作亚波长尺度的光晶格与超冷原子相互作用^[83]. 在强耦合机制下, 用局域 SPP 能够实现多个发光体之间的量子纠缠. 在接下来的研究中, 解决损耗和缩小模式体积是一个非常重要的研究方向, 一方面可以寻找新的材料设计新的结构, 另一方面也可以利用介质与金属的复合结构来降低损耗的影响. 而最近强耦合的实现已经证明 SPP 的优越性能够压制其损耗的影响, 对下一步研究起到至关重要的作用. 由量子光学与表面等离激元光学结合而产生的量子表面等离激元光学, 作为新兴研究方向, 不仅使 SPP 基本物理性质的研究更深入, 同时也提供了量子信息研究中若干难题的解决方案. 我们相信, 随着实验和理论技术的发展, 量子表面等离激元能够在物理研究和实际应用中大放异彩.

参考文献

- [1] Raether H 1988 *Surface Plasmons on Smooth Surfaces* (Berlin, Heidelberg: Springer)
- [2] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W 2003 *Nature* **424** 824
- [3] Gramotnev D K, Bozhevolnyi 2010 *Nature Photon.* **4** 83
- [4] Takahara J, Yamagishi S, Taki H, Morimoto A, Kobayashi T 1997 *Opt. Lett.* **22** 475
- [5] Fang N, Lee H, Sun C, Zhang X 2005 *Science* **308** 534
- [6] Takahara J 2009 *In Plasmonic Nanoguides and Circuits* (Ch. 2) (Pan Stanford Publishing)
- [7] Wang L L 2012 *Ph. D. Dissertation* (Hefei: University of Science and Technology of China) (in Chinese) [王鲁楷 2012 博士学位论文 (合肥: 中国科学技术大学)]
- [8] Sadeghi S M, West R G 2011 *Nejat A Nanotechnology* **22** 405202
- [9] Nie S, Emory S R 1997 *Science* **275** 1102
- [10] Fleischmann M, Hendra P J, Mc Quillan A 1974 *J Chem. Phys. Lett.* **26** 163
- [11] Jeanmaire D L, van Duyne R P 1977 *J. Electroanal. Chem. Interfac. Electrochem.* **84** 1
- [12] Berini P, de Leon J 2012 *Nature Photon.* **6** 16
- [13] Bergman D J, Stockman M I 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 027402
- [14] Giannini V, Fernández-Dominguez A I, Heck S C, Maier S A 2011 *Chem. Rev.* **111** 3888
- [15] Anker J N, Hall W P, Lyandres O, Shah N C, Zhao J, van Duyne R P 2008 *Nat. Mater.* **7** 442
- [16] Pines D A 1953 *Phys. Rev.* **92** 626
- [17] Hopfield J J 1958 *Phys. Rev.* **112** 1555
- [18] Elson J M, Ritchie R H 1971 *Phys. Rev. B* **4** 4129
- [19] Waks E, Sridharan D 2010 *Phys. Rev. A* **82** 043845
- [20] Tame M S, Lee C, Lee J, Ballester D, Paternostro M, Zayats A V, Kim M S 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 190504
- [21] Altewischer E, van Exter M P, Woerdman J P 2002 *Nature* **418** 304
- [22] Ebbesen T W, Lezec H J, Ghaemi H F, Thio T, Wolff P A 1998 *Nature* **391** 667
- [23] Fasel S, Robin F, Moreno E, Erni D, Gisin N, Zbinden H 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 110501
- [24] Ren X F, Guo G P, Huang Y F, Li C F, Guo G C 2006 *Europhys. Lett.* **76** 753
- [25] Guo G P, Ren X F, Huang Y F, Li C F, Ou Z Y, Guo G C 2007 *Phys. Lett. A* **361** 218
- [26] Huck A, Smolka S, Lodahl P, Sørensen A S, Boltasseva A, Janousek J, Andersen U L 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 246802
- [27] Ren X F, Guo G P, Huang Y F, Wang Z W, Zhang P, Guo G C 2008 *Europhys. Lett.* **84** 30005
- [28] Tang J S, Li Y L, Xu X Y, Xiang G Y, Li C F, Guo G C 2012 *Nat. Photon.* **6** 600
- [29] Akimov A V, Mukherjee A, Yu C L, Chang D E, Zibrov A S, Hemmer P R, Lukin M D 2007 *Nature* **450** 402
- [30] Kolesov R, Grotz B, Balasubramanian G, Stöhr R J, Nicolet A A L, Hemmer P R, Jelezko F, Wrachtrup J 2009 *Nat. Phys.* **5** 470
- [31] Piazza L U C A, Lummen T T A, Quinonez E, Murooka Y, Reed B W, Barwick B, Carbone F 2015 *Nat. Commun.* **6** 6407
- [32] Di Martino G, Sonnefraud Y, Kéna-Cohen S, Tame M, Ozdemir S K, Kim M S, Maier S A 2012 *Nano Lett.* **12** 2504
- [33] Falk A L, Koppens F H, Yu C L, Kang K, de Leon Snapp N, Akimov A V, Park H 2009 *Nat. Phys.* **5** 475
- [34] Zou C L, Sun F W, Dong C H, Ren X F, Chen X D, Cui J M, Han Z F, Guo G C 2011 *Opt. Lett.* **36** 3630
- [35] Dong C H, Zou C L, Ren X F, Guo G C, Sun F W 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 041104

- [36] Xiong X, Zou C L, Ren X F, Guo G C 2014 *IEEE Photon. Tech. Lett.* **26** 1726
- [37] Wei H, Wang Z, Tian X, Kall M, Xu H 2011 *Nat. Commun.* **2** 387
- [38] Holtfrerich M W, Dowran M, Davidson R, Lawrie B J, Pooser R C, Marino A M 2016 *Optica* **3** 985
- [39] De Leon N P, Lukin M D, Park H 2012 *IEEE J. Select. Topics in Quantum Electron.* **18** 1781
- [40] Otto A 1968 *Zeitschrift für Physik* **216** 398
- [41] Kano H, Mizuguchi S, Kawata S 1998 *JOSAB* **15** 1381
- [42] Guo X, Ma Y G, Wang Y P, Tong L M 2013 *Laser Photon. Rev.* **7** 855
- [43] Dong C H, Ren X F, Yang R, Duan J Y, Guan J G, Guo G C, Guo G P 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 221109
- [44] Guo X, Qiu M, Bao J, Wiley B J, Yang Q, Zhang X, Tong L 2009 *Nano Lett.* **9** 4515
- [45] Kauranen M, Zayats A V 2012 *Nat. Photon.* **6** 737
- [46] Grosse N B, Heckmann J, Woggon U 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 136802
- [47] Politi A, Cryan M J, Rarity J G, Yu S, O'Brien J L 2008 *Science* **320** 646
- [48] Fujii G, Segawa T, Mori S, Namekata N, Fukuda D, Inoue S 2012 *Opt. Lett.* **37** 1535
- [49] Heeres R W, Kouwenhoven L P, Zwiller V 2013 *Nat. Nanotech.* **8** 719
- [50] Fakonas J S, Lee H, Kelaita Y A, Atwater H A 2014 *Nat. Photon.* **8** 317
- [51] Cai Y J, Li M, Ren X F, Zou C L, Xiong X, Lei H L, Liu B H, Guo G P, Guo G C 2014 *Phys. Rev. Appl.* **2** 014004
- [52] Di Martino G, Sonnefraud Y, Tame M S, Kéna-Cohen S, Dieleman F, Özdemir Ş K, Maier S A 2014 *Phys. Rev. Appl.* **1** 034004
- [53] Vest B, Dheur M, Devaux E, Ebbesen T W, Baron A, Rousseau E, Hugonin J P, Greffet J, Messin G, Marquier F 2016 arXiv:161007479 [quant-ph]
- [54] Wang S M, Cheng Q Q, Gong, Xu P, Sun C, Li L, Li T, Zhu S N 2016 *Nat. Commun.* **7** 11490
- [55] Li M, Zou C L, Ren X F, Xiong X, Cai Y J, Guo G P, Tong L M, Guo G C 2015 *Nano Lett.* **15** 2380
- [56] Fan W, Lawrie B J, Pooser R C 2015 *Phys. Rev. A* **92** 053812
- [57] Lee C, Dieleman F, Lee J, Rockstuhl C, Maier S A, Tame M 2016 *ACS Photon.* **3** 992
- [58] Heeres R W, Dorenbos S N, Koene B, Solomon G S, Kouwenhoven L P, Zwiller V 2009 *Nano Lett.* **10** 661
- [59] Hood C J, Chapman M S, Lynn T W, Kimble H J 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 4157
- [60] Chang D E, Sørensen A S, Hemmer P R, Lukin M D 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 053002
- [61] Drexhage K H, Kuhn H, Schäfer F P 1968 *Phys. Chem.* **72** 329
- [62] Purcell E M 1946 *Phys. Rev.* **69** 674
- [63] Li M, Xiong X, Yu L, Zou C L, Chen Y, Liu D, Guo G C 2017 ar Xiv:170102935
- [64] Chang D E, Sørensen A S, Hemmer P R, Lukin M D 2007 *Phys. Rev. B* **76** 035420
- [65] Chang D E, Sørensen A S, Demler E A, Lukin M D 2007 *Nat. Phys.* **3** 807
- [66] Trügler A, Hohenester U 2008 *Phys. Rev. B* **77** 115403
- [67] Curto A G, Volpe G, Taminiu T H, Kreuzer M P, Quidant R, van Hulst N F 2010 *Science* **329** 930
- [68] Kinkhabwala A, Yu Z, Fan S, Avlasevich Y, Müllen K, Moerner W E 2009 *Nature Photon.* **3** 654
- [69] Koenderink A F 2010 *Opt. Lett.* **35** 4208
- [70] Rice P R, Brecha R J 1995 *Opt. Commun.* **126** 230
- [71] Ridolfo A, Di Stefano O, Fina N, Saija R, Savasta S 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 263601
- [72] Yannopoulos V, Paspalakis E, Vitanov N V 2009 *Phys. Rev. Lett.* **103** 063602
- [73] Li Q, Wei H, Xu H X 2014 *Nano Lett.* **14** 3358
- [74] Zhang S, Wei H, Bao L, Hakanson U, Halas N J, Nordlander P, Xu H X 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 096801
- [75] Li Q, Wei H, Xu H X 2015 *Nano Lett.* **15** 8181
- [76] Anger P, Bharadwaj P, Novotny L 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 113002
- [77] Passmore B S, Adams D C, Ribaudo T, Wasserman D, Lyon S, Davids P, Shaner E A 2011 *Nano Lett.* **11** 338
- [78] Vasa P, Wang W, Pomraenke R, Lammers M, Maiuri M, Manzoni C, Lienau C 2013 *Nature Photon.* **7** 128
- [79] Chikkaraddy R, de Nijs B, Benz F, Barrow S J, Scherman O A, Rosta E, Baumberg J J 2016 *Nature* **535** 127
- [80] Martin-Cano D, González-Tudela A, Martín-Moreno L, Garcia-Vidal F J, Tejedor C, Moreno E 2011 *Phys. Rev. B* **84** 235306
- [81] Lin Z R, Guo G P, Tu T, Li H O, Zou C L, Chen J X, Guo G C 2010 *Phys. Rev. B* **82** 241401
- [82] Constant T J, Hornett S M, Chang D E, Hendry E 2016 *Nat. Phys.* **12** 124
- [83] Gullans M, Tiecke T G, Chang D E, Feist J, Thompson J D, Cirac J I, Lukin M D 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 235309

SPECIAL ISSUE—Diffraction limit of electromagnetic waves

Recent progress of the application of surface plasmon polariton in quantum information processing*

Li Ming Chen Yang Guo Guang-Can Ren Xi-Feng[†]

(Chinese Academy of Sciences Key Laboratory of Quantum Information, University of Science and Technology of China,
Hefei 230026, China)

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

(Received 24 March 2017; revised manuscript received 26 April 2017)

Abstract

Surface plasmon polariton has attracted more and more attention and has been studied extensively in the recent decades, owing to its ability to confine the electro-magnetic field to a sub-wavelength scale near the metal-dielectric interface. On one hand, the tightly confined surface plasmonic modes can reduce the size of integrated optical device beyond the diffraction limit; on the other hand, it provides an approach to enhancing the interaction between light and matter. With the development of experimental and numerical simulation techniques, its investigation at a quantum level has become possible. In the recent experiments, scientists have realized quantum interference between single plasmons in a nanoscale waveguide circuit and achieved the strong coupling between photons and single molecules by using plasmonic structure, which demonstrates its superiority over the traditional optics. Here, we review the theoretical and experimental researches of surface plasmon polariton in the field of quantum information processing. First, we introduce the experiments on the basic quantum properties of surface plasmons, including the preservation of photonic entanglement, wave-particle duality and quantum statistical property. Second, we review the research work relating to the generation, manipulation and detection of surface plasmons in a quantum plasmonic integrated circuit. Then, we present the research of the interaction between surface plasmons and single quantum emitters and its potential applications. Finally, we make a discussion on how the intrinsic loss affects the quantum interference of single plasmons and the coupling between quantum emitters. The collision and combination of quantum optical and plasmonic fields open up possibilities for investigating the fundamental quantum physical properties of surface plasmons. It can be used to make ultra-compact quantum photonic integrated circuits and enhance the interaction strength between photons and quantum emitters.

Keywords: surface plasmon polariton, quantum information, photonic quantum circuit, quantum emitter

PACS: 42.50.Ex, 03.67.-a, 73.20.Mf, 42.79.-e

DOI: 10.7498/aps.66.144202

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11374289, 61590932), the National Key Research and Development Program, China (Grant No. 2016YFA0301700), the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China and the Open Fund of the State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics (Grant No. IOSKL2015KF12).

[†] Corresponding author. E-mail: renxf@ustc.edu.cn