



表面等离子体激元的原理与应用

王强¹, 陈泳竹^{2*}

(1. 广东技术师范大学光电工程学院, 广东 广州 510665; 2. 广东技术师范大学研究生院, 广东 广州 510665)

摘要: 光与物质之间的相互作用, 被视为光学应用的最基础物理问题。由光与凝聚态物质之间的相互作用形成的表面等离子体激元 (Surface Plasmon Polaritons, SPPs), 是一种新型的元激发准粒子, 因其具有独特的色散和局域场增强特性引起广泛关注。SPPs 器件打破了传统光学衍射限制, 在纳米光子器件中有独特优势, 应用于微纳光子学的前沿研究。阐述了 SPPs 的色散关系、激发方式、传播形式和物理性质, 重点探讨了 SPPs 在波导、近场光学、传感器、生物医疗、光子芯片、表面增强拉曼散射和太阳能电池等方面的应用, 并提出了研究前景。

关键词: 表面等离子体激元; 衍射极限; 局域场增强; 表面等离子体共振; 亚波长光学应用; 波导; 光子芯片; 原理
中图分类号: O436 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9981(2024)01-0081-14

引文格式: 王强, 陈泳竹. 表面等离子体激元的原理与应用[J]. 材料研究与应用, 2024, 18(1): 81-94.

WANG Qiang, CHEN Yongzhu. Principles and Applications of Surface Plasmon Polaritons[J]. Materials Research and Application, 2024, 18(1): 81-94.

0 引言

新世纪以来, 计算机技术的迅猛发展和理论知识的不断创新, 给人类生活带来极大便利的同时也加快了科学发展的脚步。电子线路固有的发热现象和数据传输能力不足, 极大地限制了计算机运行速度的大幅度提高。为了突破现有理论和技术壁垒, 大幅提高计算机的运行效率, 科学家们想到了用光信号取代电信号的制造集成芯片的办法。这是因为与电子设备相比, 光子设备并不会产生过多的热能, 并且光子比电子拥有更强的数据传输能力。光子集成电路不易受到温度、电磁场和噪声变化的影响, 同时具有高计算速度、低功耗等传统电子集成电路所没有的优势^[1]。

在传统光学系统中, 小物体表面通过光学系统成像获得的并不是理想像点, 而是所谓的爱里斑^[2]。这是因为受瑞利判据^[3]限制 (即受衍射极限限制), 很难将光聚集在小于光波长的尺寸范围内。光学器件尺寸的微型化及其纳米尺度集成、光场控制, 实现高准直、超衍射的各种新型光源及纳米光子学器件^[4]是当下的一个热点研究课题。当前, 人们提高光学器件纳米尺度集成度一般会采取 3 种方式。(1) Silicon On Insulator 技术, 其结构由顶部单晶硅层组

成, 通过绝缘层与体衬底分离或由绝缘衬底直接支撑, 在硅晶体管之间加入绝缘体物质, 可使两者之间的寄生电容比原来的少上一倍^[5]; (2) 光子晶体技术, 是指具有光子带隙特性的人造周期性电介质结构 (或称为光子带隙晶体结构), 光子晶体中是由光的折射率指数的周期性变化产生了光带隙结构, 从而由光带隙结构控制着光在光子晶体中的运动^[6]; (3) 表面等离子体激元 (Surface Plasmon Polaritons, SPPs) 技术, 其具有可突破衍射极限, 并可在亚波长领域中实现对光子操控, 最终实现光子器件微型化。其中, SPPs 技术因具有灵敏度高、设计简单和成本低的优点而被人们广泛研究, 并且发展成为了纳米光子学^[7]的一个重要分支—表面等离子体光学。因此, 深入研究 SPPs 的特性及其应用具有非常重要的现实意义。

1 表面等离子体光学的形成和发展

超构材料自 21 世纪初被提出以来, 一直被视为电磁学领域的重大突破。然而, 早期超构材料的研究主要集中在微波范围。为了满足更多的需求, 学者们把研究重点放在光波段于亚波长结构中光子与电子耦合的新学科, 即表面等离子体光学。表面等

收稿日期: 2023-06-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61475038)

作者简介: 王强, 硕士研究生, 研究方向为微纳光场、表面等离子体激元、波导。E-mail: 409964891@qq.com。

通信作者: 陈泳竹, 博士, 教授, 研究方向为光电传感、微纳光场聚焦子等。E-mail: chyzh1160@126.com。

离子体光学是纳米光子学领域中的重要组成部分,主要探索电磁场是如何被限制在小于光波长的维度及具有的物理特性,其是基于金属界面或金属纳米结构上电磁波和电子之间的相互作用过程,从而实现了亚波长的光学近场的增强。同时,科学家们通过物理实验发现,等离子体通常可分为两大类型,即

传播型表面等离子体^[8]和局域表面等离子体^[9]。由于表面等离子体激元具有异常的光学透射能力,因此引起人们对表面等离子体光学研究的热潮。图1为现代表面等离子体光学的主要研究方向,在整个20世纪中表面等离子体都在各种不同的环境中被不断发现和定义。

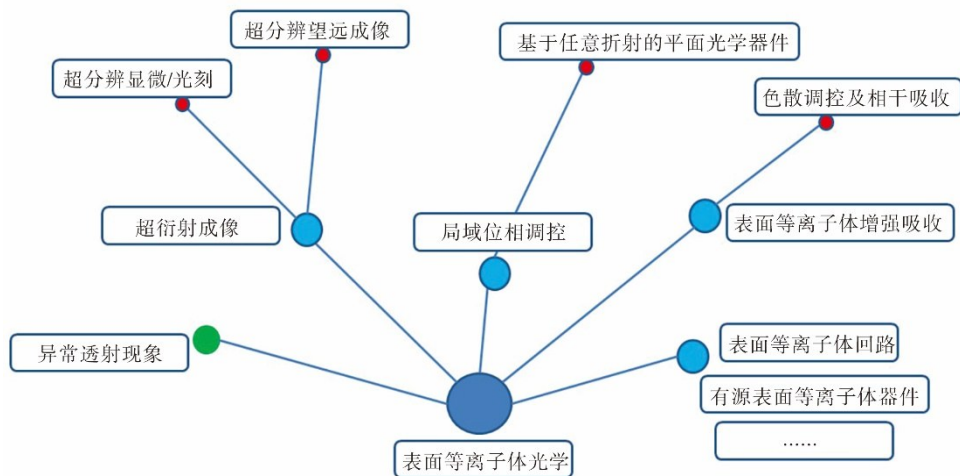


图1 现代表面等离子体光学的主要研究方向^[10]

Figure 1 Main research areas in modern surface plasma optics

表面等离子体光学实验可以追溯到1704年,其由牛顿所做的多棱镜表面受抑全反射(Frustrated Total Reflection, FTR)实验,观测到当某个凸透镜片触及棱镜的全反射面时,光在接触点的周围所被照射的局部范围,大大地超出了接触点的宽度范围,在全反射的过程中有部分光线通过棱镜的全反射面后穿过空气层从而到达凸透镜表面上,说明了有额外的光场产生,定义为倏逝波^[11](Evanescent Wave, EW)。1902年,Wood^[12]研究发现当可见的反射光波进入到金属光栅中时,反射光谱形成了不同寻常的衍射现象,被定义为Wood异常。在1907年,Zenneck^[13]从理论上证实了在金属材料与介质相互之间的界面上可以支持一种射频表面电磁波。在1908年,Mie^[14]提出了基于球形粒子的光散射理论。1941年,Fano^[15]将在金属光栅中发现的Wood反常现象同Zenneck的理论研究成果联系在一起,认识到Wood反常与局域在金属材料表面上的电磁状态变化有关联,并由此提出了金属表面上等离子体波的理论。

为了找到自由电子穿过金属薄片时,产生的特征能量损失问题。1956年,Pines^[16]通过大量实验和理论分析,在金属表面电子之间相互作用的行为过程中观测到了等离子体激元振荡的效应,并把它定名为等离子体激元,该效应为特征能量损失的研究提供了理论依据。1957年,Ritchie^[17-18]在理论上对

自由电子的特征能量损失与金属表面所形成的等离子体激元振荡行为做了进一步深入研究,证明了金属中表面等离子体的存在,并首次在理论上对表面等离子体作出了阐述并发现,等离子体模可能产生并存在于金属表面附近,随后又用在光栅上产生的表面等离子体共振现象来说明了金属光栅的异常行为^[18]。同年,Ferrell^[19]认为在金属表面和周围介质的界面中存在可以和表面等离子体互相耦合的电磁波,并第一次推论出表面等离子体的色散关系。1968年,Otto^[20]开创性的使用衰减全反射(Attenuated Total Reflection, ATR)通过对棱镜结构进行全面详细的深度研究,最终实现了表面等离子体的激发。

2 表面等离子体激元的基本理论

2.1 表面等离子体激元的概念

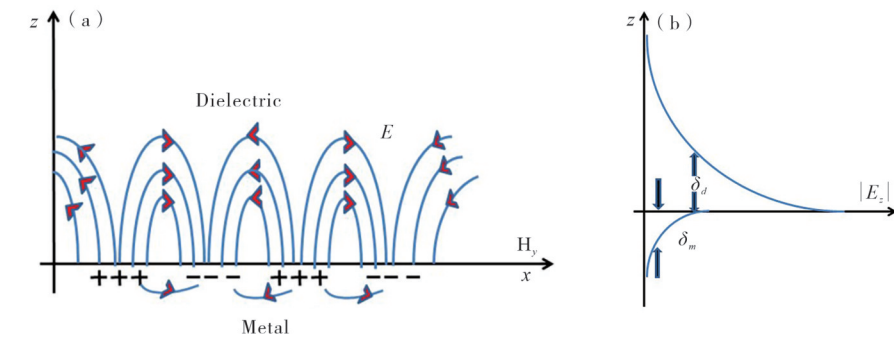
表面等离子体激元(Surface Plasmon Polaritons, SPPs)是一种准二维的电磁激发,其沿金属-介质界面传播,场分量以指数衰减的形式被束缚在金属-介质界面而不会向外辐射,当入射光照射到金属材料表面与电介质分界面时,金属表面的自由电子就会发生集体振荡,这时入射光与表面等离子体激元之间就会耦合形成一种沿金属-介质界面传播的电磁波,电磁场会对金属的表面造成局域性增强的影响,这个过程被称为表面等离子体激元现象。除

了金属材料,像以石墨烯为代表的一些二维材料和其它类金属材料的表面,也支持表面等离子共振效应。以石墨烯为例,虽然石墨烯材料不是金属,但是由于其单层厚度和高导电性质,其表面支持表面等离子共振,当光线在石墨烯表面传播时可以与表面自由电子相互作用,并且激发表面等离子共振模式。此外,各种类金属材料,如碳化硅、硝酸铝、二氧化钛等也支持表面等离子共振,这些材料的表面虽然不是金属,但仍然具有高电导率和低界面反射率的特点,可以支持表面等离子共振的产生。

2.2 表面等离子体激元的特性

在很早之前,物理学家们就对 SPPs 的理论展开了研究。SPPs 是由入射光波与金属表面的自由电子相互耦合形成的,因此就不可避免的需要研究金属的光学特性。在物理光学中,一个物质的光学

特性往往用介电常数进行描述的,不同频率的入射光照射在金属表面所产生的介电常数也是不一样的,把这种特性称为金属的色散。事实上,在 20 世纪初,Bade^[21]就在国际上率先提出了用一种自由电子模型(即后来被广为流传的 Drude 模型)来描述金属的物理性质,但是 Drude 模型没有严谨地考虑到金属中离子的变化。1998 年,为了更加详细的描述由电子跃迁对金属介电常数产生的影响,Rakic 等^[22]将自由电子导电的 Drude 模型和偶极子振荡的 Lorentz 模型相结合,推出了一个简明的 Drude-Lorentz 模型,该模型比 Drude 模型更加精确。按常规来讲,光无法穿透金属,但是当入射光在金属表面上转换为 SPPs 模式后,就会传播并随着金属内部的欧姆效应而逐渐减弱。金属与介电材料之间的 SPPs 具有电磁波和表面电荷特征,结果如图 2 所示^[23]。



(a)—SPPs 的传播图像;(b)—SPPs 在垂直方向上的能量分布。

(a)—propagation image of surface plasmon; (b)—energy distribution of surface plasmon in the vertical direction.

图2 金属-介质表面 SPPs 的传输示意图^[23]

Figure 2 Schematic diagram of the transport of SPPs on the metal-dielectric surface

通过求解边界条件下的 Maxwell 方程组^[24],可以得到关于 SPPs 的色散特性,SPPs 的传播波矢由下式表示。

$$\beta = k_0 \sqrt{\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}} \quad (1)$$

其中, β 为 SPPs 的传播波矢、 k_0 为光在真空中的传播波矢、 ω 为角速度、 c 为光速、 ϵ_1 是金属的介电常数、 ϵ_2 是介质的介电常数。SPPs 的色散关系,描述了其固有特性,结果如图 3 所示^[25]。从图 3 可以看出,需要选用适当的方法才能实现表面等离子体波与入射光共振的条件,即让金属表面等离子体波的色散曲线能够与入射光波的色散曲线形成交点,保证他们在该点位置的频率和波数保持一致,实现金属表面的等离子体和入射光共振耦合。

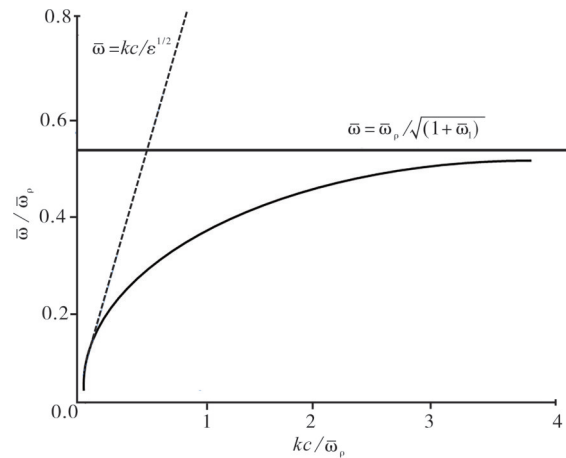


图3 金属-电介质界面的 SPPs 色散曲线^[25]

Figure 3 Dispersion curves of SPPs at the metal-dielectric interface.

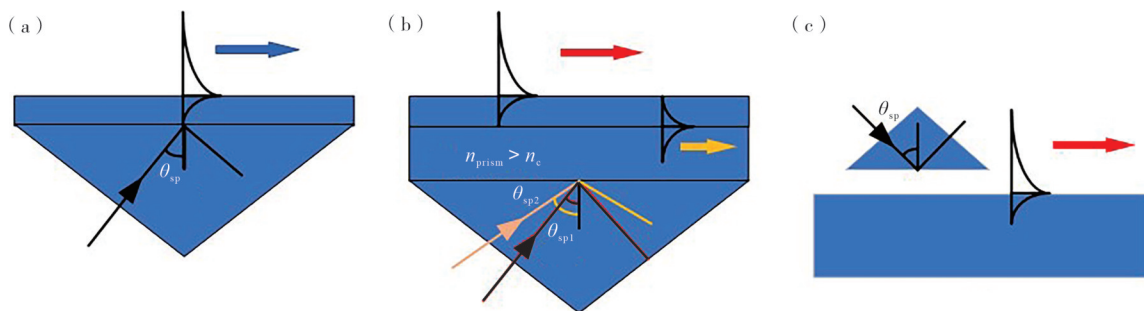
2.3 表面等离子体激元的激发方式

在早期的科学研究中,由于受到当时物理学、化学、材料学等科学技术的限制,人们激发表面等离子体的方法有限。考虑到材料的因素,研究人员通常会选择由金属激发从而得到SPPs。由SPPs的色散关系可知,在相同的频率下SPPs的波矢 k_{spp} 大于介质中的光波波矢 k ,这使得SPPs的动量无法直接与入射光的光子动量相匹配,除非采用特殊的结构设计使得相位匹配条件得到满足,否则常规的入射光并不能激发SPPs模式。一般而言,SPPs可以被电子激发^[26]或被光子激发^[27]。其中光子激发又可依据不同途径分为棱镜激发、光栅激发、近场激发等。

2.3.1 棱镜激发

由SPPs的色散关系可知,光与SPP之间的动

量是不匹配的,为了解决光子动量和SPP波矢之间的匹配问题,可以使用棱镜耦合器^[28-29]、光栅耦合器^[30-31]、光纤和波导耦合器^[32-33]等不同的耦合器进行配置。其中,棱镜耦合是一种基于衰减内全反射理论的耦合手段,将金属薄膜镀在玻璃或石英的棱镜上,一侧是高折射率的光学材料、另一侧是低折射率的空气,当入射光以大于全反射角的角度入射到金属和棱镜界面上时就会发生全反射,透射光的波矢在平行界面上的分量与SPPs波的波矢相匹配,从而激发出金属和空气界面的SPPs。同时,要求金属薄膜的厚度不能太厚,否则倏逝波未到达界面就消耗殆尽了。一般的棱镜耦合结构,可以分为克雷奇曼结构^[34]和奥托结构^[35]两种(见图4),对于较厚的金属薄膜克雷施曼结构不能用于激发SPPs。



(a)—克雷奇曼几何;(b)—双层克雷奇曼几何;(c)—Otto几何。

(a)—Kretschman geometry;(b)—bilayer Kretschman geometry;(c)—Otto geometry.

图4 SPPs激发结构^[34-35]

Figure 4 SPP excitation structure

2.3.2 光栅激发

存在于金属和介质之间边界的SPPs,沿表面的动量大于介质中相同频率的光子的动量。因此,要将辐射与SPPs耦合,就需要一些机制来增强光子动量或减少SPPs动量,这可以通过使用光栅上行

射得到的量子来实现(见图5)。通过利用光栅增强使光子动量与SPPs动量之间形成匹配,这种独特的衍射光栅结构能够产生表面等离子体波,这也是当下学者们研究的热点之一,如高效多层介质衍射光栅、介质层状衍射光栅^[36]等。

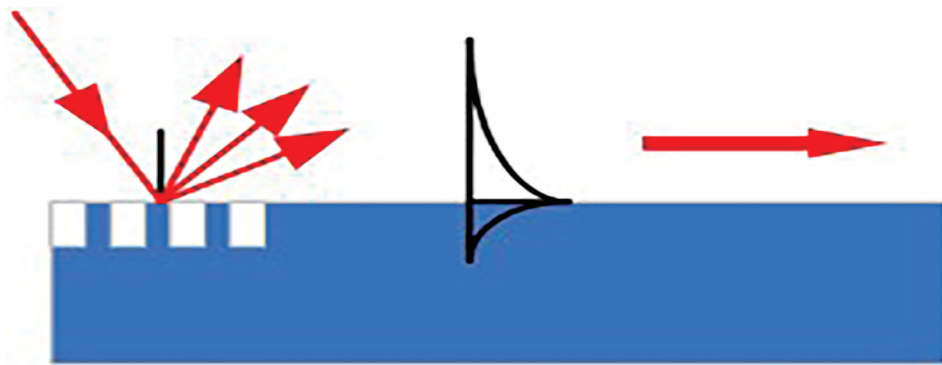


图5 光栅上的衍射激发SPPs

Figure 5 SPP excitation structure on grating diffraction

2.3.3 近场激发

通过扫描近场光学显微镜(Scanning Near

Field Optical Microscopy, SNOM)的尖端探头发出光,能在金属表面激发形成SPPs,即从尖端探头发

出的光子隧穿过金属的表面,倏逝波在金属表面便会激发出SPPs。而对于粗糙金属表面,则不需任何多余结构也能够激发SPPs,这是由于近场附近的衍

射效应存在各个方向的波矢量,可满足动量匹配在金属表面耦合形成SPPs,属于非谐振激发。图6为近场激发SPPs。

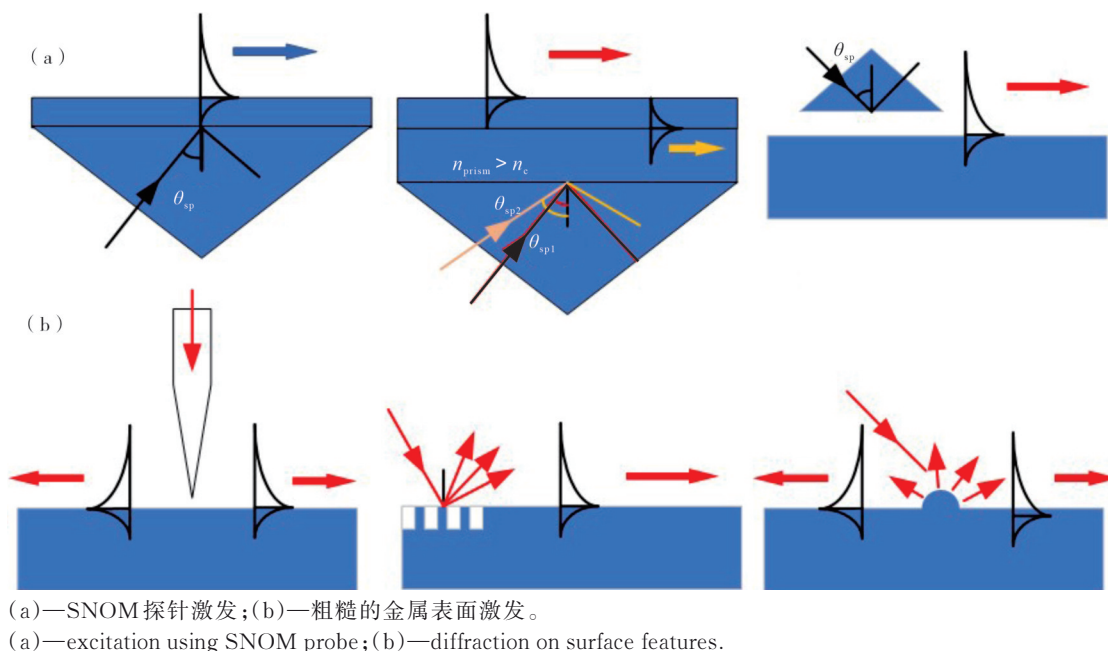


图6 近场激发SPPs

Figure 6 Near-field excited SPPs

3 表面等离子体激元的应用

在日常生活中,最常见的3种物体状态分别是固态、液态和气态。等离子态则为第4种物理状态,因其特殊的物理特性,具有非常重要的应用作用。由于技术和材料滞后的原因,人们早期观测SPPs的方法有限,通常通过金属-介质表面来获得SPPs。金属表面产生SPPs不是很难的问题,如何将产生的SPPs的特性及效应完美的展现出来,则是需要解决问题的关键。然而,一方面金属表面SPPs的传播距离有限,另一方面早期的技术水平滞后导致的精度不够,这都极大地限制了SPPs的应用。近些年以来,微纳技术获得迅速发展,SPPs在其中扮演着重要的角色,二者相互关联相互促进,致使SPPs的研究发展达到了一个高峰。与此同时,伴随着物理学、化学、材料学的进步,人们陆续在半导体^[38-39]、石墨烯^[40-41]、拓扑绝缘材料^[42-43]等新型材料中都观测到了SPPs。同时,利用电感耦合等离子体刻蚀可对Ga₂N材料^[44]的工艺进行研究,甚至等离子体电化学法在处理污水方面^[45]也有不错的效果。SPPs在SPPs波导、近场光学、传感器、生物医药、光子芯片、表面增强拉曼散射、太阳能电池等亚波长光学方面,均具有非常广阔的应用前景。

3.1 SPPs波导

在大部分的光子器件中,几乎都能找到波导结构。然而,在过去的几十年中,波导的基本原理并未取得实质性的突破。科学家们为了制造出更智能化和微型化的器件,通过控制激发SPPs得到了更小型化、多功能的光波导结构,同时对亚波长尺度波导结构也进行了设计探寻,如纳米粒子链等离子体波导^[46-49]、纳米等离子槽波导^[50-51]等。

2009年,中国科学院上海光学精密机械研究所的曾夏辉研究小组^[52],对亚波长锥形波导的电磁场分布及传输特性进行了研究并指出,常见的可以突破亚波长空间限制的金属波导主要有纳米粒子基波导和金属-绝缘体-金属波导两种,通过数值求解得到本征值,证明时间平均能量的分布在锥形波导内呈现出周期性变化,这为真正的纳米级光学和光子元件的发展提供了令人兴奋的机会。值得指出的是,亚波长锥形波导的尺寸远小于光波的波长,因此可以实现超深亚波长光场的传输,该特点使得亚波长锥形波导在纳米光子学和纳米传感器等领域中具有广泛的应用潜力。同时,亚波长锥形波导的结构可以优化光的传输效率,由于其特殊的电磁场分布特性,可以减少光的能量损耗、提高传输效率,但亚波长锥形波导的制备相对复杂,需要高精度的纳米

加工技术和制备工艺,增加了制备成本和难度。2011年,I. Y. Park等研究小组^[53]通过实验成功利用等离子体产生超短的光脉冲(见图7),设计了一个三维波导来集中入射的近红外脉冲集中到一个亚波长点上,使高次谐波产生的极紫外光脉冲具有高度的时空相干性。波导是一个由银制成的金属纳米结构,有一个空心孔的锥形锥体,其椭圆截面从进气孔开始逐渐减小。当入射的近红外脉冲以75 MHz的重复率集中在入口孔时,每个近红外脉冲通过锥形孔向出口孔传播,孔内的电场强度经历了一个实质性的提升,SPPs被引导汇聚到出口孔附近的亚波长点,最终在强度场中产生可以沿波导传播的入射近红外脉冲。金属波导在飞秒近红外光脉冲等离子体纳米聚焦中具有紧凑性、高功率承受能力和高光利用率等优点,但也面临着衰减损耗、色散效应和材料选择限制等缺点。

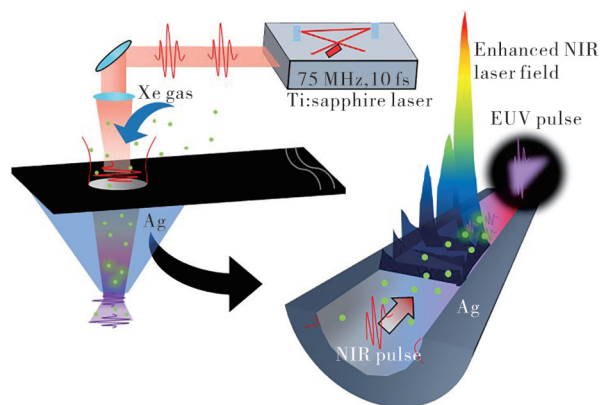


图7 金属中高谐波产生相干超短脉冲波导光脉冲的等离子体纳米聚焦^[54]

Figure 7 Plasmonic nanofocusing of light pulses for high harmonic generation of coherent ultrashort pulse waveguides in metals

随着技术的发展,光学器件已经向纳米尺度过渡了,而通过开展对金属波导透过率增强的研究将

对新型的光学器件有着非常重要的理论意义,同时在超高分辨率成像^[55]、表面等离子体波导^[56]、表面等离子共振成像^[57]等领域也将会拥有十分广阔的应用前景。

获取微型化、高性能的SPPs,是当前物理学界的研究热点。2022年,国内的王俊^[58]提出了一种基于共面波导的新型人工表面等离子体激元(Spoof Surface Plasmon Polaritons, SSPPs),该设计不仅实现了高效的传输特性,还不需要传统的模式转化结构实现了微型化,研究SSPPs工作机理的同时也设计了具有加工成本低、制造简单且易操作等优点的

相关器件,如新型基于SSPPs的功分器、频率分隔器和高效带通滤波器。对于SPPs波导的研究,众多学者们一直都在理论和实验的道路上不断前进着。

3.2 近场光学领域的应用

人们希望建最大物体的同时也希望可以观察到最小的物体,光学显微镜便是最好的工具。但是,在纳米领域中由于衍射极限的限制,很难造出观察尺度更小的显微镜。随着物理光学理论的发展,科学家们为了打破衍射极限以及得到更高的分辨率,近场光学应运而生^[59]。

早在1986年,A. MinoVich^[60]就提出了一种新的高分辨率成像方法,即近场扫描光学显微镜(可控制并观察纳米尺度分辨率的光),这比传统光学显微镜达到的半波长分辨率要小得多。值得注意的是,SNOM的关键元素是探针,通常的SNOM探针是在金属涂层的锥形光纤末端形成的一个小孔,探头的效率会受到通过孔耦合的少量光的限制,但是采用SPPs制作而成的探针会打破限制,从而提高光学成像的效率。1995年,Y. K. Kim等^[61]提出了一种基于表面等离子体共振的新型扫描近场光学显微镜(Scanning plasmon optical microscope, SPOM),通过质子的散射,增强的场在单个表面不规则处被定位,并且散射的质子会产生一个锥形辐射,其强度的变化由栅格扫描探针尖和增强场之间的相互作用引起的,该技术提供横向分辨率超过了衍射极限,具有更高灵敏度的优势,同时又可在个别表面不规则区域实现增强电场的局域化,提供高灵敏度的局域光学相互作用,更好地实现探针和样品之间的耦合,基于此也限制了一些应用场景,特别是对于需要保持样品完整性和表面干净性的高灵敏度测量。

在近场光学显微镜的背景下,SPPs在增强电磁场方面也扮演着很重要的角色。例如,SPPs的聚焦可能有助于恢复金属涂层^[62]、纤维基的近场探针的电磁限制^[63]等。除此之外,SPPs也能够Kretschmann全内反射装置的薄膜表面被激发,增强的场会因为SPPs的不规则性从而产生锥形辐射。由于SPPs可增强信号,一个小的散射体就能够作为探针而十分的简便,对于提高信息的采集效率也将会贡献更多的可能性。表面等离子体在近场光学领域中,具有高分辨率及超分辨成像等优点。然而,衰减效应、环境敏感性和制备集成难度等缺点,需要加以考虑并解决。

3.3 SPPs的传感器

金属纳米结构的光学特性与介质的折射率是相

互联系的,因此当介质结构的折射率发生变化时,表面等离子体的共振模式也会随之改变。由于这个独特性,SPPs在生物化学传感技术方面有广阔前景。

基于纳米光栅的等离子体传感器能够为生物医学应用进行实时检测,但高质量传感器的工艺和低成本制造方法总是难以同时被解决。最近,He等^[64]采取了一种通过使用激光干涉光刻直接在铜基板上图案化光刻胶的一步无蚀刻方法,在铜膜上制作了周期为600 nm的大面积均匀光栅,并以葡萄糖为分析物测试了其折射率感应性能,通过用光刻胶脊代替金属光栅脊,让SPPs的欧姆吸收和辐射散射损失大大降低,与纯金属光栅相比,该结构具有更容易制造的特点,可以成为具有低成本的高质量等离子体传感器。随着技术的进步,小型化、灵活且高效的生物传感器越来越受欢迎。H. Sarker^[65]等提出了一种基于广为人知的表面等离子共振(Surface Plasmon Resonance, SPR)现象的裸露核心光子晶体光纤生物传感器,通过光学软件对该传感器模拟得到其最高分辨率为 7.7×10^{-6} RIU、检测精度为 $0.016\ 598\ \text{nm}^{-1}$,表明所提出的传感器可有效地用于检测不同的生物和化学物质。

当目标物质与SPPs相互作用时,会导致共振角度或共振频率的变化,这种变化可以高度灵敏地检测和测量目标物质的存在、浓度、结构等信息,使其在分子识别和生物传感领域具有很高的灵敏度和精确度。但在某些情况下,可能存在与其他物质的交叉反应或干扰,故在选择性方面会受到限制。Wu等^[66]提出了一种超紧凑的无标签双通道SPR光纤传感器(DSPRFS),该传感器是基于一个独特的双通道结构,通过蚀刻侧孔光纤制造的,其空间灵敏度明显高于传统的SPR生物传感器,具有极其紧凑的结构,能够进行温度补偿,并且适用于葡萄糖和其他生物分析物的现场监测和高精度传感。由于这种新型的超紧凑设计使得光纤传感器的尺寸小巧,可应用于空间受限的场景且更易于集成和部署。同时,双通道SPR光纤传感器可同时检测两个特定目标物质或反应,提供更多的信息和灵敏度,可以使传感器更加多样化和灵活。在实际应用中,光纤传感器可能受到来自样品基质、环境条件以及光纤本身或传感器结构的干扰信号。因此,需要优化传感器的选择性和抗干扰能力。在长期使用和重复测量过程中,光纤传感器的性能和性能稳定性可能会受到影响。图8为一种基于Kretschmann结构的SPR传感器结构图^[67]。

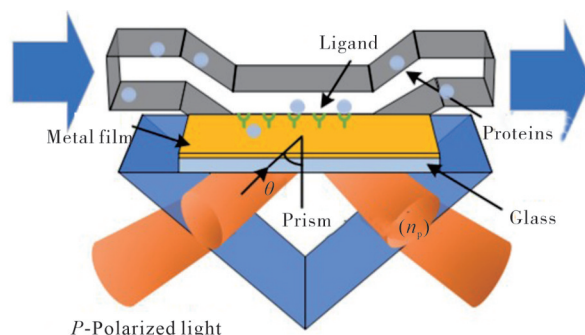


图8 基于Kretschmann配置耦合的SPR传感器^[67]

Figure 8 SPR sensor based on Kretschmann configuration coupling

基于SPPs的化学传感器是一种将外界化学信息转化为可以作为分析使用的信号装置,由于其特性受到周围环境介质的介电常数影响较大,因此当周围介质迅速发生改变时,采用SPPs进行化学检测就变得敏感,结果也会更加精确。例如,当金属纳米颗粒遭到分子受体功能化时,表面附近的环境就会经历了大量的改变,从而触发检测。

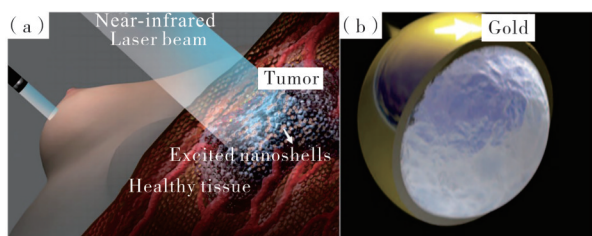
表面等离子体传感器具有高灵敏度、实时监测、多参数分析和无需标记等优点,但也存在选择性限制、环境敏感性和实时监测速度等缺点。在实际应用中,需要综合考虑这些因素,并根据具体的应用需求选择合适的传感器。

3.4 在生物医疗方面的应用

虽然,人类的医疗水平近些年取得了不起的成就,但癌症一直威胁人类健康,给无数家庭带来苦痛。常规的癌症化疗时,虽然也能杀死癌细胞,但正常细胞也会被杀死,对病者的身体造成很大影响。而SPPs的局域场增强特性作为探针时具有超分辨率和高灵敏度,能够作为生物大分子探针,对癌细胞进行追踪,使在手术中在不伤害正常细胞的过程中杀死癌细胞,这不但有广阔前景,也给患者带来了福音。在新时代的医疗诊断中,精准医疗无疑是其中的焦点,因为这会节约患者的成本,减轻病痛。达到精准医疗,需要对疾病的各项指标进行检测,通过产生得到的医疗大数据,从中找出与病理有关的生理指标,最终将诊断疾病的准确性进行提高。SPPs所形成的探针在生物芯片中有着重要作用^[68]。每一种探针分子都会在确定的位置上对待测分子进行检测,方法十分的简单和高效,但也有一些不足,如反应效率低、重复性差等缺点,需要继续改良。

通过SPPs制作的探针在医疗领域也起着重要的作用。通过利用SPPs的局域增强特性来增强物质的发光强度,并将其制作成光热探针,最后通过接

抗体的方式,实现对癌细胞的靶向输运并进行光热治疗^[69],令人惊叹的是,在这个过程中对正常细胞是无损害的。同时,对于光热癌症治疗,学者们也在一直探索其他的可能性。一种新的治疗癌症的方法是利用等离子体效应来摧毁肿瘤,将100 nm宽的金颗粒纳米壳注入细胞表层,纳米壳会嵌入在快速生长的肿瘤中,当近红外激光指向该区域时,其就会穿过皮肤在纳米壳中引起共振电子振荡,加热并杀死肿瘤细胞,而不伤害周围的健康组织(见图9)。



(a)—纳米壳注入细胞时产生电子振荡;(b)—纳米壳的结构。

(a)—nanoshells are injected into cells and generate electron oscillations; (b)—structure of nanoshells.

图9 利用等离子体效应治疗癌症^[70]

Figure 9 Cancer treatment using plasma effect

金属纳米粒子中SPPs也可以进行细胞标记(细胞标签),这项技术对识别癌细胞特别有用。El-Sayed研究小组^[71]发现,具有独特光学特性的金纳米粒子可能作为活体全细胞的生物传感器使用,将胶体金纳米粒子与单克隆抗表皮生长因子受体抗体共轭的金纳米粒子在正常上皮细胞系和两个恶性上皮细胞系中分别进行培养,发现胶体金纳米粒子以分散和聚集的形式出现在细胞质内对恶性细胞的摄取具有非特异性,而单克隆抗表皮生长因子受体抗体共轭的金纳米颗粒特异性地、均匀地与癌型细胞表面结合(亲和力比非癌型细胞大600%),这种特异性和均匀性的结合与加入非癌细胞时观察到的SPR吸收带相比,有一个相对更清晰的红移最大值。此结果表明,由抗体共轭金纳米粒子产生的SPR散射成像或SPR吸收光谱可以在分子生物传感器技术中发挥作用,用于诊断体内和体外的口腔上皮活癌细胞,从而提供一种特异性识别恶性细胞的方法。通过这种独特的标签技术,可以看出表面等离子体技术能够实现无需标记的实时监测,且具有不需要添加任何荧光标记物或放射性示踪剂的优良特性。同时,避免了标记物对样品的影响,可以进行实时、非破坏性的监测,具有简单、快速操作的优势。

3.5 在光子芯片和数据存储方面的应用

智能芯片是当下非常火热的话题,当今智能芯

片的市场主要还是被欧美国家所垄断,中国近几年在芯片领域不断加大布局和投资,目的就是在芯片领域做出突破解决卡脖子的技术问题及突破欧美国家技术封锁^[72]。传统的光学器件无法突破衍射极限的制约,导致无法制作更微型化的器件。SPPs可以突破衍射极限,在芯片制作的过程中利用SPPs的特性一定会产生巨大的优势。由于等离子体组件的存在,使得金属的介电导率较大并具有高度的可调性,特别是在等离子体共振附近。因此,使用等离子体组件来形成基于芯片的纳米光子器件技术的构件,有着连接生物、计算、通信等领域交互的重要作用^[73]。SPPs为数据存储领域提供了很多的研究前景。P. Zijlstra等^[74]通过利用金纳米棒的纵向表面等离子体共振(SPR)的独特属性来实现真正的五维光学记录,其中纵向SPR的出色波长和偏振敏感性为光热记录机制所需的独特能量阈值提供了轴向选择性,而纵向SPPs共振技术使得可以在单个纳米结构上存储多个位信息而实现高容量的存储,利用双光子发光结合SPR检测存储信息可使光盘数据的存储量达到几何倍数增长,可在一个纳米结构上存储多个信息位,增加了信息存储的容量和灵活性,对光存储领域意义重大。图10为金纳米棒的纵向SPPs共振的五维光学存储技术。

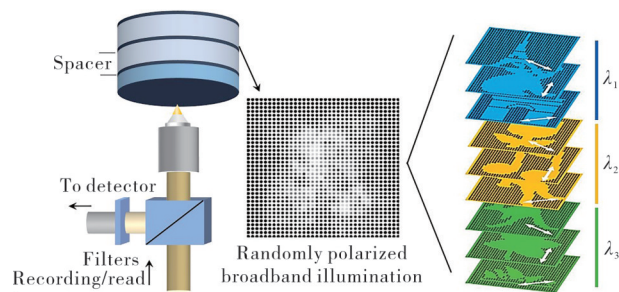


图10 金纳米棒的纵向SPPs共振的五维光学存储技术^[74]

Figure 10 Five-dimensional optical storage technique for longitudinal SPPs resonance of gold nanorods

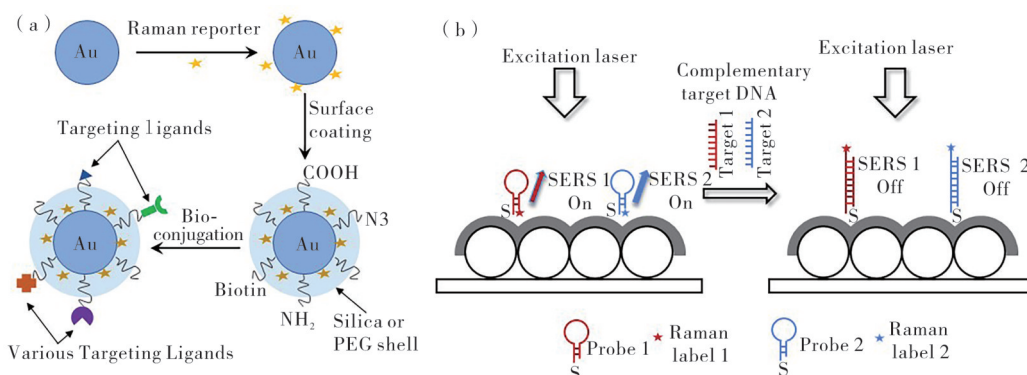
值得注意的是,成功实现这种五维编码的关键是一种记录材料,该材料需满足在所有维度上都是正交的(无论是记录还是读取过程中都如此),同时还能够在每个维度上提供多个记录通道且能够以非破坏性的方式读取,基于SPR金纳米棒的记录材料可以满足上述所有条件。值得一提的是,金纳米棒作为存储介质具有较好的稳定性,这使得该技术在长期存储应用中具有良好的可靠性和寿命。但是,该技术对于精确的光学波长和极化状态具有一定的依赖性,可能受到光源的稳定性限制,而实时的信息检索由于纳米结构的位置和光源的位置对准都会在实际应用中带来一些限制。

Ozbay^[75]指出未来几年的等离激元的研究方向,如开发具有高效的等离激元有机LED、基于等离激元信号实现自主控制等离激元结构的电光和压电调制和增益机制、结合等离激元光学组件将单模光纤直接耦合到等离激元电路、发展深亚尺度波长的等离激元纳米光刻。在过去的十几年中,学者们对于等离激元学的研究已经取得了重大进展。除了创造比传播光波长小得多的新型光子学器件外,等离激元体还有望成为关键的纳米技术,将电子和光子组件结合在同一芯片上,突破目前光学衍射的壁垒,实现更大的价值。

3.6 在表面增强拉曼散射方面的应用

在SPPs的诸多应用中,最引人注目的应用便是表面增强拉曼散射(Surface-Enhanced Raman

Scattering, SERS),由表面等离激元共振所产生的场增强是整个SERS物理增强机制中最主要的来源。研究SPPs的近场和远场行为,是突破SERS技术在灵敏度及可靠性的关键。在1977年,Jeanmaire等^[76]通过实验证明了表面增强拉曼散射并发现:当散射物体放在粗糙的表面上时,拉曼散射信号的振幅就会极大的增强;当局部表面等离激元共振在金属纳米结构上出现时,会产生强电磁场;拉曼散射体受到电磁场的增强影响时,感应偶极子的数量就会提升,非弹性散射的强度也会增加。SERS的应用还有很多,如用作生物标签,SERS标签基本上由一个等离激元核心(一般由Au组成,因为Au的生物相容性比其他分子更好)、一个拉曼基因和一个功能化的保护壳所组成(见图11)。



(a)—SERS标签的一般设计;(b)—采用带拉曼染料组成的结构分子检测病毒DNA序列的示意图。

(a)—general design of SERS tag; (b)—schematic diagram of detection of viral DNA sequences using structured molecules with Raman dye composition.

图11 采用SERS标签的DNA序列检测^[78]

Figure 11 DNA sequence detection using SERS tag

DNA序列的检测为各种应用提供了重要信息,包括遗传病诊断、基因突变鉴定、病原体检测等,但常规的DNA检测方法由于容易出现污染问题常常受到人们诟病,而基于SERS的DNA生物传感器因灵敏度高且无潜在的污染问题被医学者所青睐。M. B. Wabuye等^[77]开发了一种带有拉曼染料组成的结构分子可灵敏地检测多个病毒DNA序列,该纳米探针包括一个金属纳米粒子和一个带有拉曼标签的茎环DNA分子,通过DNA发夹探针序列的特异性和选择性来检测感兴趣的特定目标DNA序列。在没有目标DNA的情况下,茎环结构将拉曼标签保持在金属纳米粒子附近而引起强烈的SERS效应并产生拉曼信号;当互补的目标DNA序列出现时,纳米探针就会与其杂交,导致茎环结构被破坏及拉曼标签与金属纳米粒子物理分离,从而使SERS信号熄灭。通过这种技术可以看出,SERS标签具有非常高的灵敏度,可以通过调整使用的纳米结构表面,使其具有特定的化学选择性,实现特定分子的检测和

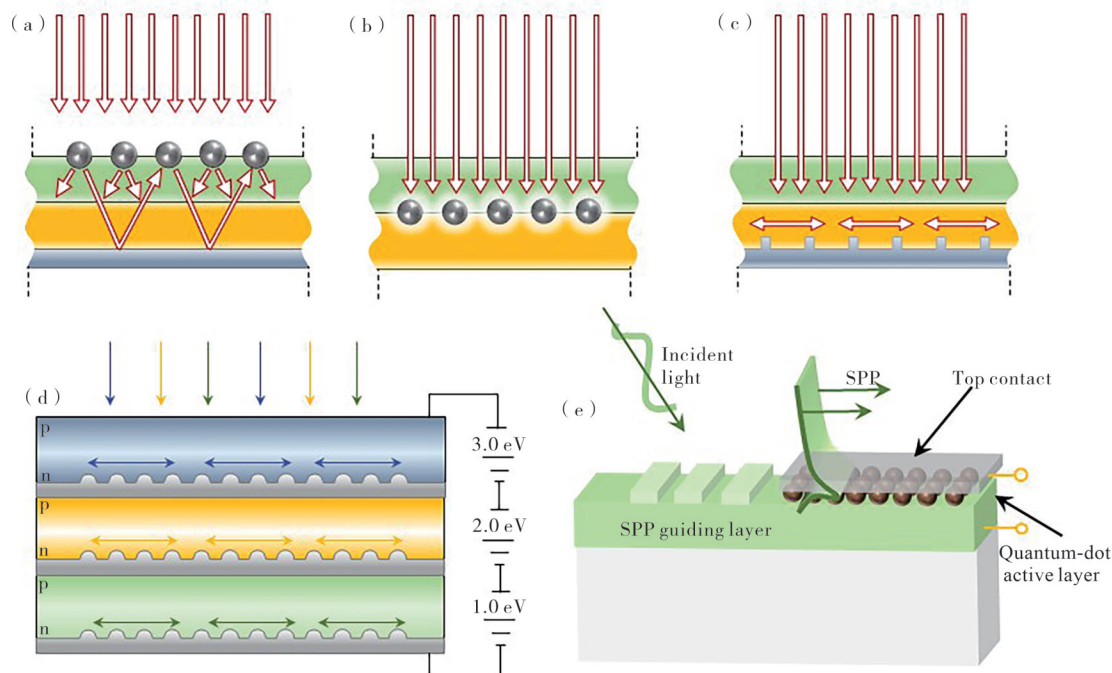
识别。由于SERS标签的高灵敏度和选择性,使其在生物学和医学领域中具有广泛的应用潜力。当然,如何降低SERS标签的制备成本,使其在大规模应用和商业化方面也是一个挑战。SERS被作为新兴的纳米技术得到不断地发展和完善。近年来,伴随着光谱仪器、理论建模及纳米制造的发展,新的检测方案引起了人们对SERS使用的广泛兴趣,并将该技术确立为强大的分析工具。与此同时,由于SERS依赖于局部等离激元的激发,故可以使其成为SPPs共振生物传感的一种特殊的补充,其可以用于识别特定的分子,因此可以用于高效率选择性的分子鉴定,如特异性抗原^[79]、葡萄糖及基因诊断^[80]等。SERS光谱是检测分子界面特征和相互作用,以及研究分子在表面吸附行为的一种非常有效的工具。同时,SERS技术正广泛应用于单分子检测、医学化学、环境科学、生物和医学系统、纳米材料和传感器等领域中。另一方面,将SERS仪器进行微型化和高灵敏度研究也是非常具有研究价值的,需要减少检测系

统和激光激发源的尺寸,小型化的SERS仪器就可以在医疗诊断和环境监测等领域中拥有更大的价值。

3.7 在太阳能电池方面的应用

由于SPPs具有良好的局域场增强特性,可以

解离光激子,并且用于增强活性有机材料的光吸收。近年来,科学家们通过研究发现,金属纳米的微粒及具有纳米结构的表面等离子体激元,可以在有机太阳能电池光电转换效率方面得到广泛地应用^[81]。SPPs增强太阳能电池的光电转换效率可以从3个图形进行解释(见图12)^[82]。



(a)—金属纳米颗粒散射;(b)—局域表面等离子体激发;(c)—表面等离子体激元激发;(d)—等离子体串联式的太阳能电池结构;(e)—等离子体量子点太阳能电池。

(a)—metal nanoparticle scattering; (b)—localized surface plasmon excitation; (c)—surface plasmon exciton excitation; (d)—plasmonic tandem solar cell structure; (e)—plasmonic quantum dot solar cell.

图12 表面等离子体激元提高太阳能电池光吸收效率^[82]

Figure 12 Surface plasmon excitations to improve solar cell light absorption efficiency

在2008年,国外的K. R. Catchpole等^[83]成功实现了SPPs对太阳能电池光电转换效率提高,其将金属颗粒的散射作为增强薄膜太阳能电池的光捕获的一种手段,事实上该方法也是大多数实验工作的机制。局部化的表面质子已经被证明可以在一系列半导体材料及粒子几何形状的太阳能电池中提供实质性的效率提升,但仍然有很多其他的研究值得开展。例如,确保太阳能电池应用的最佳粒子分布、考虑到粒子之间的相互作用及吸收基质的相互作用等。如今,有机薄膜太阳能电池的潜在应用已被广泛探索,以创建基于有机材料的廉价和灵活的太阳能光伏电池^[84]。所有薄膜太阳能电池技术的一个主要限制,对近带隙光的吸收是无效的。因此,解决光吸收有限及提高有机层光吸收率的同时保持有机层的厚度,是推进有机薄膜太阳能电池发展的重要环节。通过研究者不断尝试发现,贵金属纳米粒子

在其表面等离子体共振时的散射是增加薄膜太阳能电池中光吸收的一种有希望的方式,这是由于SPR可提供一个增强的光场,使光被捕获并被引导到活性层,这会增加电池的吸收并改善有机薄膜太阳能电池的性能,这无疑是十分独特且新颖的技术和创新手段。面对当今严峻的能源短缺问题,各国都在寻求新的可再生能源。表面等离子体技术在太阳能电池领域具有光吸收增强、宽波段响应、提高光电转换效率和灵活性等优点。然而,成本和复杂性、可再现性和稳定性及集成难度等方面仍然存在一些挑战,需要进一步研究和解决。科研中需要综合考虑这些优缺点,并根据具体要求进行技术选择与优化。令人欣喜的是,太阳能资源是取之不尽的,利用SPR可提高太阳能电池的光转换效率,这必将成为热点内容吸引更多的学者投入相关研究中。

4 结语

SPPs是由入射光波与金属表面的自由电子相互耦合而形成的一种沿着金属表面传播的近场电磁波,具有在垂直于界面的方向场强度呈现指数衰减现象、突破衍射极限限制、强烈的局域场增强效应、发生在介电符号相反的界面两侧及色散特性,同时激发得到SPPs的方法也在不断的探索中,而传统的通过结构优化方法很难再取得大的突破。通过将特殊材料(半导体,石墨烯等)和金属相混合得到的新材料备受关注,SPPs也将有更大的前景。随着SPPs更多特性的发现,在各个领域中的应用也越来越广泛。总体来说,SPPs在波导、生物医学、近场光学、芯片集成等领域中具有非常大的潜力,但在这些领域中仍然还有很多技术难题没有攻克,这都需要学者们的理论突破以及研究者们的技术创新。

SPPs受到了物理学家、化学家、材料科学家和生物学家的广泛关注,由于其独特的特性已经有了大量的新颖和潜在的应用。我国在芯片领域中的研究还不够深入,尤其当欧美国家对我国采取芯片制裁时感受尤其明显,因此研究SPPs更多的特性从而在芯片制造领域获得突破至关重要,同时在生物荧光追踪、高分辨率光学成像、表面等离子体探测器、表面等离子体调制器、光存储等领域中的研究还有很大空间。有学者做出预测,通过近场光操纵及结合纳米光子技术,将为荧光的生物物理和生物医学应用开辟一个新的时代。SPPs也是纳米光子学的主要组成部分,在纳米尺度上制作微型化和高效能的纳米光子器件来控制光子具有显著的优势,未来的研究应继续深入探索表面等离子体激元的基础理论,这将有助于更好地理解和控制表面等离子体激元的行为,为其应用提供更多可能性。同时,为了实现更高效的表面等离子体激元操控,研究人员也应寻找更多新的材料和结构,包括具有更低损耗和更好增强效应的金属纳米结构、新型二维材料、拓扑绝缘体和功能性纳米结构等。令人兴奋的是,预计未来会出现更多的表面等离子体激元器件,这些器件将通过表面等离子体激元的优异性能而实现更高的性能和功能。目前,表面等离子体激元的研究已经涉及到物理学、化学、材料科学、生物学和医学等多个领域,预计以后会有更多的跨学科研究涌现,这都将推动表面等离子体激元的研究取得更多新的突破和创新应用。最后,希望所有的学者不断探索努力,共同塑造SPPs的未来。

参考文献:

[1] NAGARAJAN R, JOYNER C H, SCHNEIDER R

- P, et al. Large-scale photonic integrated circuits [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2005, 11(1): 50-65.
- [2] RIVOLTA C. Airy disk diffraction pattern: comparison of some values of f/no. and obscuration ratio [J]. Applied Optics, 1986, 25(14): 2404-2408.
- [3] BORN M, WOLF E. Fraunhofer diffraction in optical instruments [C]. London: Cambridge University Press, 1999: 446-472.
- [4] 干福熹,王阳. 突破光学衍射极限,发展纳米光学和光子学[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 57-65.
- [5] CELLER G K, CRISTOLOVEANU S. Frontiers of silicon-on-insulator [J]. Journal of Applied Physics, 2003, 93(9): 4955-4978.
- [6] VLASOV Y A, O'BOYLE M, HAMANN H F, et al. Active control of slow light on a chip with photonic crystal waveguides [J]. Nature, 2005, 438 (7064): 65-69.
- [7] 祝生祥. 传统光学显微镜与近场光学显微镜[J]. 光学仪器, 2000, 22(6): 34-41.
- [8] ZHANG Z, FANG Y, WANG W, et al. Propagating surface plasmon polaritons: Towards applications for remote-excitation surface catalytic reactions [J]. Advanced Science, 2016, 3(1): 1500215.
- [9] HUTTER E, FENDLER J H. Exploitation of localized surface plasmon resonance [J]. Advanced materials, 2004, 16(19): 1685-1706.
- [10] ZAYATS A V, SMOLYANINOV I I, MARADUDIN A A. Nano-optics of surface plasmon polaritons [J]. Physics Reports, 2005, 408 (3-4): 131-314.
- [11] FORNEL DE F. Evanescent waves: From newtonian optics to atomic optics [M]. Berlin: Springer Verlag, 2001: 51-54.
- [12] WOOD R W X. On a remarkable case of uneven distribution of light in a diffraction grating spectrum [J]. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1902, 4 (21): 396-402.
- [13] ZENNECK J. Fortpflanzung ebener elektromagnetischer wellen langs einer ebenen leiterflache [J]. Ann Physik, 1907, 23: 846.
- [14] MIE G. Beiträge zur optik trüber medien, speziell kolloidaler metallösungen [J]. Annalen Der Physik, 1908, 330(3): 377-445.
- [15] FANO U. The theory of anomalous diffraction gratings and of quasi-stationary waves on metallic surfaces (sommerfeld's waves) [J]. Journal of Optical Society of America, 1941, 31: 213-222.
- [16] PINES D. Collective energy losses in solids [J]. Reviews of Modern Physics, 1956, 28(3): 184.

- [17] RITCHIE R H. Plasma losses by fast electrons in thin films[J]. *Physical Review*, 1957, 106(5): 874.
- [18] RITCHIE R H, ARAKAWA E T, COWAN J J, et al. Surface-plasmon resonance effect in grating diffraction [J]. *Physical Review Letters*, 1968, 21(22): 1530.
- [19] FERRELL R A. Predicted radiation of plasma oscillations in metal films [J]. *Physical Review*, 1958, 111:1214-1222
- [20] 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.
- [21] BADE W L. Drude-model calculation of dispersion forces (III). The fourth-order contribution [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1958, 28(2): 282-284.
- [22] RAKIĆ A D, DJURIŠIĆ A B, ELAZAR J M, et al. Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(22): 5271-5283.
- [23] PITARKE J M, SILKIN V M, CHULKOV E V, et al. Theory of surface plasmons and surface-plasmon polaritons [J]. *Reports on Progress in Physics*, 2006, 70(1): 1.
- [24] SAMBLES J R, BRADBERRY G W, YANG F. Optical excitation of surface plasmons: An introduction [J]. *Contemporary Physics*, 1991, 32(3): 173-183.
- [25] ZAYATS A V, SMOLYANINOV I I, MARADUDIN A A. Nano-optics of surface plasmon polaritons [J]. *Physics Reports*, 2005, 408 (3-4): 131-314.
- [26] BHARADWAJ P, BOUHELIER A, NOVOTNY L. Electrical excitation of surface plasmons [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106(22): 226802.
- [27] SAMBLES J R, BRADBERRY G W, YANG F. Optical excitation of surface plasmons: an introduction [J]. *Contemporary Physics*, 1991, 32(3): 173-183.
- [28] 赵孝祥, 许政权. 利用棱镜耦合器测量光波导衬底的折射率[J]. *中国激光*, 1992, 19(6): 426-429.
- [29] 李玉善, 金锋, 林盛强. 棱镜耦合器的输入耦合效率与入射波传播常数的关系[J]. *应用科学学报*, 1985(2): 181-183.
- [30] 田苗, 瞿敏妮, 乌李瑛, 等. 用于垂直耦合的非对称光栅耦合器的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(5): 22-32.
- [31] 袁纵横, 刘永智, 庞涛. 波导光栅耦合器[J]. *半导体光电*, 1997(2): 20-25.
- [32] 尤杨, 赵茗, 杨振宇. 波导与光纤耦合设计研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(2): 62-71.
- [33] 李颖. 光纤—光波导自动耦合技术控制系统的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [34] KRETSCHMANN E, RAETHER H. Radiative decay of non radiative surface plasmons excited by light [J]. *Zeitschrift Für Naturforschung A*, 1968, 23(12): 2135-2136.
- [35] 胡灵犀. 自由电子激发金属中表面等离子体激元的理论与实验研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
- [36] PERRY M D, BOYD R D, BRITTEN J A, et al. High-efficiency multilayer dielectric diffraction gratings [J]. *Optics Letters*, 1995, 20(8): 940-942.
- [37] 武娜娜, 钟莹, 刘海涛. 超越 SNOM 探针通光孔径尺寸的金属纳米间隙超分辨测量[J]. *光子学报*, 2020, 49(5): 63-70.
- [38] 邵先坤, 郝勇敢, 刘同宣, 等. 基于表面等离子体共振效应的 Ag (Au)/半导体纳米复合光催化剂的研究进展[J]. *化工进展*, 2016, 35(1): 131-137.
- [39] 洪霞, 郭雄彬, 方旭, 等. 基于表面等离子体共振增强的硅基锗金属-半导体-金属光电探测器的设计研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(17): 529-535.
- [40] 赵静, 王英, 王义平. 氧化石墨烯增强型表面等离子体共振光纤传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(23): 75-82.
- [41] 袁志豪, 徐俞, 曹冰, 等. 基于石墨烯等离子体的宽带透射式红外光调制器[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(23): 305-312.
- [42] 杨睿. 拓扑绝缘体表面等离子体激元在太赫兹波段的研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2021.
- [43] 顾晓凤. 拓扑绝缘体对表面等离子体激元的调控研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [44] 任远, 刘晓燕, 刘久澄, 等. 电感耦合等离子体刻蚀 GaN 材料的工艺研究[J]. *材料研究与应用*, 2016, 10(3): 214-218.
- [45] 田春锁, 彭雪连, 宋树祥, 等. 等离子体电化学法在污水处理中的应用[J]. *材料研究与应用*, 2020, 14(3): 226-229.
- [46] MAIER S A, KIK P G, ATWATER H A. Optical pulse propagation in metal nanoparticle chain waveguides [J]. *Physical Review B*, 2003, 67(20): 205402.
- [47] KANG Y, ERICKSON K J, TATON T A. Plasmonic nanoparticle chains via a morphological, sphere-to-string transition [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2005, 127(40): 13800-13801.
- [48] FÉVRIER M, GOGOL P, AASSIME A, et al. Giant coupling effect between metal nanoparticle chain and optical waveguide [J]. *Nano Letters*, 2012, 12(2): 1032-1037.
- [49] SOLIS JR D, PAUL A, OLSON J, et al. Turning the corner: Efficient energy transfer in bent plasmonic nanoparticle chain waveguides [J]. *Nano Letters*, 2013, 13(10): 4779-4784.
- [50] FU Y, HU X, LU C, et al. All-optical logic gates based on nanoscale plasmonic slot waveguides [J].

- Nano Letters, 2012, 12(11): 5784-5790.
- [51] 朱凝, 李浩, 张辉. 超薄金属膜 V-型槽等离子波导的定向耦合研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(5): 1554-1557.
- [52] 曾夏辉, 范滇元, 周萍. 亚波长锥形波导的电磁场分布及传输特性[J]. 光学学报, 2009, 29(6): 1487-1492.
- [53] PARK I Y, KIM S, CHOI J, et al. Plasmonic generation of ultrashort extreme-ultraviolet light pulses [J]. Nature Photonics, 2011, 5(11): 677-681.
- [54] ZHANG J, ZHANG L, XU W. Surface plasmon polaritons: Physics and applications [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2012, 45(11): 113001.
- [55] 胡敏. 基于人工表面等离子体的超分辨率电磁目标成像研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [56] 郭亚楠, 薛文瑞, 张文梅. 双椭圆纳米金属棒构成的表面等离子体波导的传输特性分析[J]. 物理学报, 2009, 58(6): 4168-4174.
- [57] 申刚义, 陈义, 张轶鸣, 等. 表面等离子体共振成像[J]. 化学进展, 2010, 22(8): 1648.
- [58] 王俊. 新型共面波导人工表面等离子体激元及其器件的研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.
- [59] SYNGE E H. A suggested method for extending microscopic resolution into the ultra-microscopic region [J]. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1928, 6(35): 356-362.
- [60] MINOVICH A, KLEIN A E, JANUNTS N, et al. Generation and near-field imaging of airy surface plasmons [J]. Physical Review Letters, 2011, 107(11): 116802.
- [61] KIM Y K, LUNDQUIST P M, HELFRICH J A, et al. Scanning plasmon optical microscope [J]. Applied Physics Letters, 1995, 66(25): 3407.
- [62] KIK P G, BRONGERSMA M L. Surface plasmon nanophotonics [M]. Springer Series: Optical Sciences, , 2007: 1-9.
- [63] BOUHELIER A, NOVOTNY L. Near-field optical excitation and detection of surface plasmons [M]. Springer Series: Optical sciences, 2007: 139-153.
- [64] HE Z, KANG G, WANG J, et al. One-step formation of a plasmonic grating with an ultranarrow resonance linewidth for sensing [J]. Optics Letters, 2022, 47(13): 3275-3278.
- [65] SARKER H, ALAM F, KHAN M R, et al. Designing highly sensitive exposed core surface plasmon resonance biosensors [J]. Optical Materials Express, 2022, 12(5): 1977-1990.
- [66] WU S, TAN Q, FORSBERG E, et al. In-situ dual-channel surface plasmon resonance fiber sensor for temperature-compensated detection of glucose concentration [J]. Optics Express, 2020, 28(14): 21046-21061.
- [67] ROH S, CHUNG T, LEE B. Overview of the characteristics of micro-and nano-structured surface plasmon resonance sensors [J]. Sensors, 2011, 11(2): 1565-1588.
- [68] 刘兵. 等离激元纳米颗粒在生物医学中的应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [69] 尹乃强. 医用纳米功能探针的研制及其在荧光、磁性标记和靶向光热治疗方面的应用[D]. 成都: 中国科学技术大学, 2014.
- [70] ATWATER H A. The promise of plasmonics [J]. Scientific American, 2007, 296(4): 56-63.
- [71] EL-SAYED I H, HUANG X, EL-SAYED M A. Surface plasmon resonance scattering and absorption of anti-EGFR antibody conjugated gold nanoparticles in cancer diagnostics: applications in oral cancer [J]. Nano Letters, 2005, 5(5): 829-834.
- [72] 商惠敏. 人工智能芯片产业技术发展研究[J]. 全球科技经济瞭望, 2022, 36(12): 24-30.
- [73] 李钢敏, 李致远, 李正冉, 等. 基于表面等离子体共振的高灵敏度光纤微流控芯片[J]. 中国激光, 2021, 48(1): 107-113.
- [74] ZIJLSTRA P, CHON J W M, GU M. Five-dimensional optical recording mediated by surface plasmons in gold nanorods [J]. Nature, 2009, 459(7245): 410-413.
- [75] OZBAY E. Plasmonics: Merging photonics and electronics at nanoscale dimensions [J]. Science, 2006, 311(5758): 189-193.
- [76] JEANMAIRE D L, VAN DUYN R P. Surface raman spectroelectrochemistry: Part I. Heterocyclic, aromatic, and aliphatic amines adsorbed on the anodized silver electrode [J]. Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry, 1977, 84(1): 1-20.
- [77] WABUYELE M B, VO-DINH T. Detection of human immunodeficiency virus type 1 DNA sequence using plasmonics nanoprobe [J]. Analytical Chemistry, 2005, 77(23): 7810-7815.
- [78] PILOT R, SIGNORINI R, DURANTE C, et al. A review on surface-enhanced Raman scattering [J]. Biosensors, 2019, 9(2): 57.
- [79] GRUBISHA D S, LIPERT R J, PARK H Y, et al. Femtomolar detection of prostate-specific antigen: an immunoassay based on surface-enhanced Raman scattering and immunogold labels [J]. Analytical Chemistry, 2003, 75(21): 5936-5943.
- [80] CULHA M, STOKES D, ALLAIN L R, et al. Surface-enhanced Raman scattering substrate based on a self-assembled monolayer for use in gene diagnostics [J]. Analytical Chemistry, 2003, 75(22): 6196-6201.

- [81] MORFA A J, ROWLEN K L, REILLY T H, et al. Plasmon-enhanced solar energy conversion in organic bulk heterojunction photovoltaics [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(1): 013504.
- [82] ATWATER H A, POLMAN A. Plasmonics for improved photovoltaic devices [J]. *Nature Materials*, 2010, 9(3): 205-213.
- [83] CATCHPOLE K R, POLMAN A. Plasmonic solar cells [J]. *Optics Express*, 2008, 16(26): 21793-21800.
- [84] HARA K, LERTVACHIRAPAIBOON C, ISHIKAWA R, et al. Inverted organic solar cells enhanced by grating-coupled surface plasmons and waveguide modes [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2017, 19(4): 2791-2796.

Principles and Applications of Surface Plasmon Polaritons

WANG Qiang¹, CHEN Yongzhu^{2*}

(1. College of Optoelectronic Engineering, Guangdong Polytechnic Normal University, Guangzhou 510665, China;
2. Graduate School, Guangdong Polytechnic Normal University, Guangzhou 510665, China)

Abstract: The interaction between light and matter has always been of interest to researchers and is regarded as the most fundamental physical problem related to various optical applications. In this regard, a new type of meta-excited quasiparticles, surface plasmon polaritons (SPPs), which are formed by the interaction between light and condensed matter, have begun to emerge as a new type of quasiparticles due to their unique dispersion and local-field enhancement properties. SPPs devices break the traditional optical diffraction limitations and show their unique and significant advantages in nanophotonic devices, which are widely used in the frontiers of micro- and nanophotonics research. The paper briefly describes the dispersion relation, excitation mode, propagation form and physical properties of SPPs, focuses on the applications of SPPs in waveguides, near-field optics, sensors, biomedicine, photonic chips, surface-enhanced Raman scattering and solar energy, and looks forward to the potential applications and research prospects of SPPs.

Keywords: surface plasmon polaritons; diffraction limit; local field enhancement; surface plasmon resonance; subwavelength optical applications; waveguides; photonic chips; principles

(学术编辑:黎小辉)