

表面等离子激元与磁表面等离子激元^{*}

王振林[†] 陈卓 唐超军

(南京大学物理系 固体微结构物理国家重点实验室 南京 210093)

摘要 金属微纳结构体系中的表面等离子激元以及磁表面等离子激元因其独特的光学特性吸引了研究者的极大兴趣,成为当前的热点研究领域之一.文章对表面等离子激元尤其是磁表面等离子激元的特点、基本现象、新颖效应及其应用研究前景的最新发展进行了介绍.

关键词 表面等离子激元,磁表面等离子激元,超构材料,负磁导率,金属微纳结构

Surface plasmons and magnetic surface plasmons

WANG Zhen-Lin[†] CHEN Zhuo TANG Chao-Jun

(Department of Physics and National Laboratory of Solid State Microstructures, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract Surface plasmons and magnetic surface plasmons in metallic micro- and nano-structures have attracted much interest and are becoming hot research topics in recent years because of their remarkable optical properties. In this paper, a brief review is given with regard to recent progress in research on the characteristics, basic phenomena, novel effects and applications of surface plasmons, especially magnetic surface plasmons.

Keywords surface plasmons, magnetic surface plasmons, metamaterials, negative permeability, metallic micro- and nano-structures

1 引言

光与物质之间的相互作用从来都是物理学核心问题之一,而对它的理解乃至于对它进行控制一直是物理学的热点研究课题.近年来,人们对光与金属微纳结构表面的电子相互作用而形成的元激发——表面等离子激元(surface plasmons, SPs)的研究在不断深入,取得了众多令人鼓舞的新进展,并且迅速向其他领域交叉渗透.作者在2010年发表的《表面等离子激元研究新进展》一文中介绍了当前与表面等离子激元相关的最新研究进展^[1].作者希望通过本文对表面等离子激元特别是磁表面等离子激元的特点、基本现象、新颖效应及其应用前景的最新发展进行一个较为全面的介绍.

金属纳米颗粒在可见光区表现出的很强的宽带光吸收特征^[2],是由于金属表面的自由电子在电磁场的驱动下,在颗粒表面发生集体振荡,产生了局域表面等离子激元(localized surface plasmons, LSPs).伴随LSPs的激发,可以在颗粒表面数十纳米区域产生极大的电场增强,进而可以显著地提高该区域的许多非线性光学过程的效率^[3].最近有人提出,在电场增强区域引入增益介质,补偿金属的损耗,有可能产生受激放大表面等离子激元辐射^[4,5].

我们知道,麦克斯韦方程组中有两个重要的参数,介电常数(ϵ)和磁导率(μ),分别用来描述物质对

^{*} 国家自然科学基金(批准号:10734010;11021403;11104136)、国家重点基础研究发展计划(批准号:2012CB921500)资助项目
2012-01-28 收到

[†] 通讯联系人. Email: zlwang@nju.edu.cn

电磁波中电场和磁场的响应特性. 自然界中存在的大多数物质都能与电磁波的电场产生响应, 但是迄今为止, 人们还没有发现能对高频电磁波(如可见光波段)的磁场产生响应的天然材料. 正是基于此, 在经典的电动力学和光学中, 一般认为材料的相对磁导率 $\mu_r = 1$. 从理论上讲, 如果能够改变材料的磁导率, 有可能为人们控制光与物质的相互作用提供新的调控手段.

2 人工“磁原子”

2.1 金属开口谐振环

早在 1968 年, 前苏联科学家 Veselago 就提出这样的假设: 若材料的介电常数和磁导率同时为负值, 那么材料的折射率将为负值^[6]. 他同时预测这会导致一系列与自然法则不同的有趣现象, 其中最直接的结果就是, 光线从正折射率材料中入射到与负折射率材料的分界面处时, 折射光线将与入射光线位于界面法线的同侧. 然而在 Veselago 提出负折射率这一物理概念之后的数十年内, 人们并没有在实验研究上取得任何进展, 主要原因就在于自然界中找不到一种材料在同一波段其介电常数和磁导率同时为负值.

近年来, 人们发现通过对金属微结构和对称性的设计与优化, 可以产生奇特的光学效应. 例如, 在一些特殊的人工金属微结构单元中, LSPs 共振激发可导致金属微结构对入射电磁波产生很强的磁响应. 因此通常把这种 LSPs 称为磁表面等离子激元 (magnetic surface plasmons, MSPs)^[7]. 近十年来, 采用这些具有磁响应的单元作为人工“磁原子”已被成功地应用于实现具有负折射效应的人工电磁材料^[8]. 负折射率材料的研究之所以受到广泛的关注, 其原因除了它具备了自然界材料所没有的特异性 (例如负折射效应、反常多普勒效应^[9]) 外, 更在于人们利用负折射率材料可以实现对物体隐身的效果^[10], 实现突破衍射极限的亚波长分辨率成像, 等等^[11,12], 从而有可能对物理学、工程学、光学和材料学等领域的研究产生重大的影响. 负折射率材料研究进展也因此两次入选 *Science* 杂志年度十大科技进展之一^[13].

通过人工微结构手段实现负有效磁导率的创新思想最初是由 Pendry 在 1999 年提出的^[14]. Pendry 指出, 对于非磁性金属构成的开口谐振环 (split ring resonators, SRRs), 当入射电磁波的磁场分量垂直

于开口环面时, LSPs 共振激发会在开口谐振环的两个臂上产生反向的电流. Pendry 预测, 可以利用所诱导的涡流电流具有的抗磁性来实现负的有效磁导率. 这一机制在物理学上等价于常见的电感-电容 (LC) 共振: 开口环的金属部分等效于电路中的电感, 而开口部分等效于电路中的电容; 在接近 LC 共振时, 可产生负磁导率响应特性, 如图 1 所示^[15].

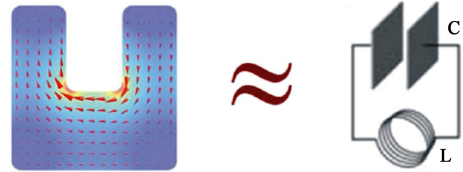


图 1 金属开口共振环发生磁共振时的磁场和电流分布示意图^[15]. (图中 C 为电容, L 为电感)

对于金属而言, 在等离子体频率以下很宽的频段内, 其介电常数都是负值. 因此, 利用金属细线与金属开口环的组合, 有可能实现有效折射率为负值的超构材料 (metamaterial). Shelby 等人将双金属开口谐振环与金属细线组装起来, 如图 2 所示. 由于毫米尺寸的金属开口谐振环的磁共振在 10 GHz 频段, 因此整个结构在 GHz 波段产生了负的有效折射率^[8]. 目前, 采用金属开口谐振环已成为在微波段甚至近红外波段实现人工负折射现象的重要途径之一^[16-19].

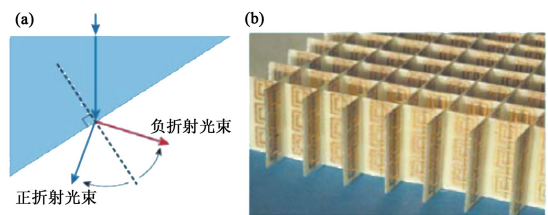


图 2 金属开口谐振环与金属细线的组合结构的负折射率超构材料首次在微波段观测到负折射现象^[8]

自从在实验上首次证实金属开口环在微波段的抗磁响应特性以来, 人们一直致力于提高磁响应的共振频率. 由于金属开口谐振环的磁共振频率与环的尺寸近似成反比的标度律关系, 因而运用现代微纳加工技术 (如离子束刻蚀和电子束曝光等手段), 可以使开口环的尺度不断缩小, 随之使得磁共振的频率也由最初的微波段逐渐蓝移到太赫兹和中红外波段, 并在最近成功地达到了近红外区^[20,21].

不同于上述成本极高的微纳加工技术, 王振林课题组最近首次发展了一种低成本、高效的角度分辨纳米球印刷技术, 利用在楔形微通道内自组织形成的单畴二维胶体晶体为掩膜^[22], 通过热蒸发沉积金属并控制蒸发束与衬底法向之间的角度, 分次蒸

发,形成部分重叠的双三角金属纳米结构,这一结构的单元是两对开口相向的双三角结构,如图3所示^[23].作者从实验和理论上证实,在光垂直入射时,部分重叠双三角金属纳米结构能够产生两种LSPs共振:当入射光偏振垂直于三角形的底边时,可以产生LSPs模式;当偏振平行于双三角形底边时,入射光电场驱动MSPs模式的激发,但此时每个单元中两个MSPs模式反相.在斜入射情况下,上述结构在入射光磁场分量的驱动下能够在同一单元中激发同位相的MSPs模式^[24].作者发现,通过控制双三角形颗粒的重叠程度,以及采用不同直径的胶体微球做掩模,可以对上述LSPs和MSPs模式实现有效调控,而磁共振响应频率可蓝移到 $1.2\mu\text{m}$ 附近^[23].

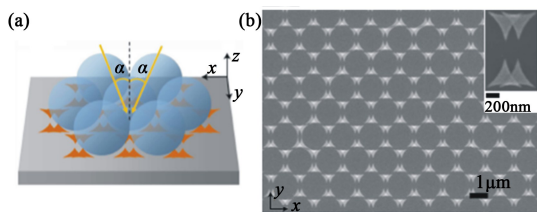


图3 (a)采用角度分辨纳米球刻印技术制备部分重叠双三角金属纳米结构组成的超构材料的示意图(图中 α 为金属沉积角度);(b)以直径为 $1.59\mu\text{m}$ 的微球组成的二维胶体晶体为掩模板,金属沉积角度为 $\alpha=\pm 7.5^\circ$ 时制备的金纳米双三角形平面超构材料.插图为样品放大的扫描电子显微镜(SEM)照片^[23]

2.2 金属纳米棒对及金属“渔网”结构

随着金属开口环尺度的减小,其磁共振频率不断向近红外波段逼近,在接近可见光的长波长区域时,由于金属开口环的磁共振趋近饱和,其磁共振频率将不再随尺度的减少而增加^[25].2005年,国际上多个研究组提出利用成对金属纳米棒作为磁共振超构材料的构造单元(如图4所示),以进一步提高磁共振频率^[26-28].在这种金属纳米棒对的结构中,当激发光的偏振方向与纳米棒的轴向平行时,会在纳米棒对中诱导出反向电流振荡,从而在纳米棒之间激发MSPs模式^[29].与金属开口谐振环结构相比,金属纳米棒对结构的优点在于:采用垂直入射电磁波的电场分量即可激发结构单元的MSPs模式,同时采用这种结构极有可能在光频段实现负的有效磁导率^[30].

近十年来,人们采用不同金属结构在提高MSPs共振频率方面取得了很大的进展^[30].值得指出的是,在2005年,Brueck等人设计出了新的实现负折射的人工结构——“双渔网”结构^[31].双层“渔网”构型是由两层“渔网”状金属膜和介质隔层组成^[32],其中较宽的条状双层金属部分提供了负磁导

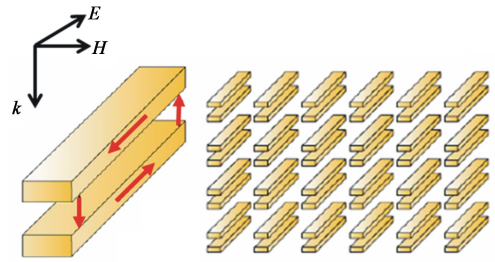


图4 金属纳米棒对发生磁共振时的电流分布示意图以及相应的电磁波入射与偏振方向^[29](图中 E 为电场, H 为磁场, k 为波矢)

率,而较窄的条状双层金属部分提供了负的介电常数.目前,利用这种双层“渔网”结构已经成功地在 1400nm 的红外波长^[33]和 780nm 的可见光波长^[34]时获得了负有效折射率.南京大学祝世宁研究组预见多层体系中借助金属膜层的反对称电流之间相消干涉,有可能使金属层中的电流得到进一步的降低^[35],从而降低体系的损耗,以提高超构材料的品质因子.2008年,美国加州大学伯克利分校的张翔研究组采用微加工技术制备出厚度达21层的三维“渔网”结构^[36],如图5所示,这种超构材料在波长为 1775nm 时折射率为 -1.23 ,而对应的品质因数(折射率实部与虚部之比)达3.5.

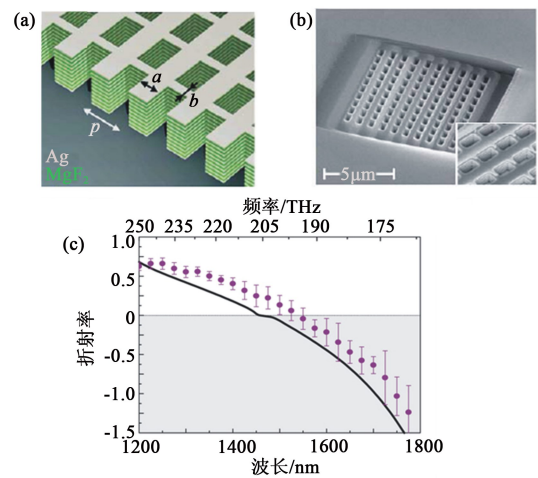


图5 (a)多层“渔网”结构示意图(图中 p 为周期, a 为条状双层金属较宽部分的宽度, b 为条状双层金属较窄部分的宽度);(b)样品的SEM照片;(c)实验和理论模拟所得的折射率随波长的变化关系^[36]

2.3 磁表面等离子激元中的损耗补偿

在近红外和可见光区,金属材料本身的损耗将会极大地制约着负折射材料的性能和潜在的各种应用,人们认识到单纯地依靠结构设计的优化已经无法解决这一问题.为此,人们提出了一种可能的解决方法,即在金属结构中引入光学增益介质材料来补

偿 MSPs 共振时的欧姆损耗^[37-40]. 最近, 美国普渡大学的研究组通过将双层“渔网”结构的共振响应波长设计在罗丹明(Rh800)分子的荧光峰 725nm 附近(如图 6 所示), 从实验上证实了这一方案的可行性^[41]. 在实验中, 他们发现, 在可见光 722nm 至 738nm 之间的范围内, 体系的损耗都得到了弥补, 使得原先受限于损耗的负折射率和品质因数都得到了极大的改善. 例如, 在波长 737nm 处, 负折射率从 -0.66 提高到 -1.017, 相应的品质因数也从 1 提高到了 26. 这项研究对未来基于负折射材料的相关光子器件的研制无疑将起到重要的推动作用.

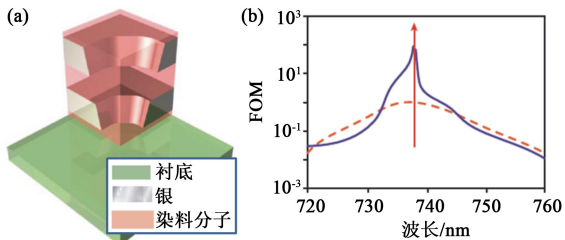


图 6 (a) 掺有增益介质材料的双层“渔网”结构示意图; (b) 有增益和无增益情况下的有效品质因数(FOM)随波长变化关系^[41]

2.4 人工“磁原子”的相互作用

传统的超构材料中不考虑人工“原子”之间的相互作用, 其光学性质只是许多“原子”共振特性的平均效应. 当这些人工“原子”距离非常近时, 彼此会发生相互作用, 从而导致有趣的耦合效应. 在周期排列的金属开口环阵列中, 当相邻的开口环距离较近时, 开口环之间的电偶极子和磁偶极子的近场耦合, 会导致开口环阵列整体的 MSPs 频率相对于单个开口环的共振频率发生移动^[42]. 研究表明, 除了受相邻的开口环之间的相对距离影响外, 开口环之间的相对排列的取向也会使得 MSPs 共振频率发生移动或产生模式劈裂现象^[43,44]. 最近, 德国斯图加特大学研究组与南京大学祝世宁研究组合作, 制备出了具有空间手性结构特征的人工“原子”组成的三维超构材料(如图 7 所示), 并观察到不同空间异构体的 MSPs 杂化以及圆二色特性^[45]. 这种人工磁“原子”之间的耦合作用也为操控和剪裁超构材料的 MSPs 响应提供了新的手段.

利用金属纳米颗粒之间的 LSPs 的耦合作用可以构筑一种一维金属纳米颗粒链作为表面等离子体波导^[46], 利用 MSPs 之间的耦合也可能构造出一类新型的亚波长光波导^[47-50]. 由于 MSPs 的辐射损耗远比基于电共振的 LSPs 要小, 因而这种利用 MSPs 耦合形成的 MSPs 波导, 在传输距离上要优于前者.

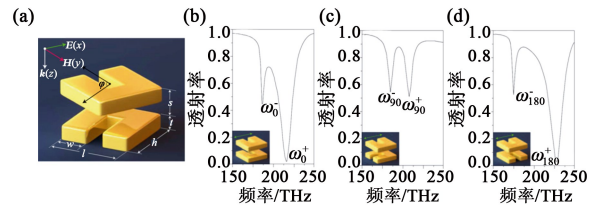


图 7 (a) 由两个金属开口共振环形成的三维超构材料结构单元示意图; (b)—(d) 为两个开口共振环之间成不同角度时, MSPs 模式产生不同的杂化现象^[45]

例如, 南京大学刘辉等人提出了一种由相互连接的金属开口环构成的一维人工“磁原子”链来传输 MSPs 波, 如图 8 所示^[51]. 这种波导能量传输机制是基于 MSPs 激发引起的“磁原子”之间的传导电流交换作用, 它可以提高 MSPs 波的传输性能. 南京大学祝世宁研究组在 MSPs 波导研究方面做了一系列的理论研究与实验探索工作^[51-56], 通过结构调控相关的耦合, 构造出具有负色散性质的亚波长波导^[57], 在双原子链中, 磁共振耦合会导致 MSPs 的声学支与光学支^[55]. 这些研究为设计构造新型的亚波长光学器件提供了新的思路.

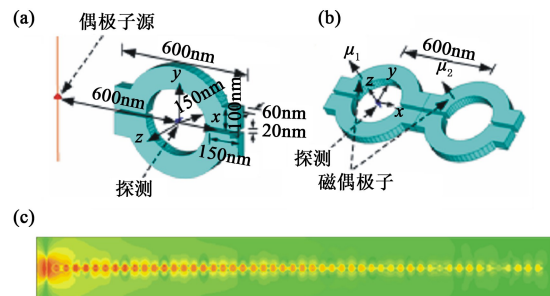


图 8 (a) 单个开口共振环示意图; (b) 磁表面等离激元波传输线中由两个相互连接的开口共振环构成的单元结构示意图; (c) 时域有限差分法(FDTD)模拟显示了磁表面等离激元波在由 50 个开口共振环组成的波导中的传播^[51]

3 金属开口谐振环探测光谱磁场

近年来, 金属微纳结构中的 MSPs 激发除了可提供负磁导率用于构筑超构材料之外, 在其他相关领域也有着重要的应用. 最近, 荷兰 AMOLF 研究院的 Burresti 等人将金属开口环具有磁响应这一特性应用到对光频磁场的探测上. 他们在玻璃光纤尖端制备了一个金属开口谐振环, 作为近场扫描显微镜的探针, 利用金属开口环对光频磁场的强烈响应, 将光耦合进光纤, 并与原参考光干涉(如图 9 所示), 从而分离出光纤尖端的磁场分量的幅度和相位. 利用这种功能型探针, Burresti 等人成功地探测到了脊型介质波导中传播的波导模式的磁场分量信号, 证

实了此类波导中的磁场分量与电场分量之间存在 90° 的位相差^[58].

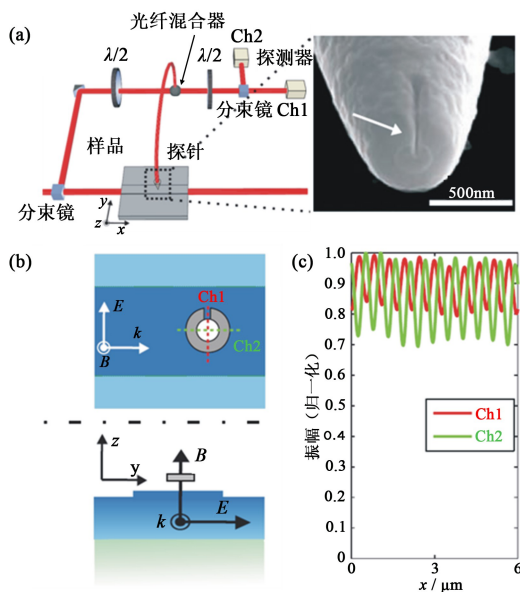


图9 (a) 金属开口环作为近场扫描显微镜探针进行光频磁场探测的示意图(Ch1 为信号通道 1, Ch2 为信号通道 2); (b) 金属开口环探针在探测波导模式时与电场和磁场的相对位置示意图; (c) 探测到的近场信号, 其中 Ch1 对应于电场产生的信号, 而 Ch2 对应于磁场(B_z)产生的信号^[58]

4 磁表面等离子激元的非线性效应

以上介绍的是与 MSPs 激发相关的线性效应. 负折射材料在空间域和频率域的一系列新颖的非线性光学现象最近也开始受到人们的关注^[30]. 在频率域的一个短脉冲的光谱范围, 可涵盖负折射材料的折射率从正值变为负值的一段频率区间, 这使得折射率正负不同的区域的谱分量可以由于材料的非线性而耦合在一起, 导致了一些新颖的非线性光学效应. 例如, 负折射率材料可以支持一类新型的、在正折射率材料中无法存在的光孤子^[59]. 在空间域中, 正、负折射率材料的分界面上的折射率变号亦可以导致一些新的非线性现象. 例如, 由于负折射率材料中坡印廷矢量和波矢方向相反, 因而可产生“反向”的位相匹配^[60] 以及二次谐波与基波反向传输^[61-63].

德国卡尔斯鲁厄大学的 Klein 等人于 2006 年首次报道了 MSPs 激发时的金属开口环阵列的二次谐波产生特性^[64] (如图 10 所示). 在实验中, 他们发现, 当入射基波的偏振方向与开口环底部平行并且满足激发 MSPs 共振的条件时, 可以观察到比噪音信号要高近 500 倍的二次谐波信号, 并且二次谐波

信号的偏振与入射光偏振正交; 当偏振方向旋转 90° 后, 入射基波由于无法激发开口环的 MSPs 模式, 此时二次谐波信号强度低到无法检测^[64], 并得出当基波能够激发 MSPs 并且频率匹配时, 二次谐波产生具有最高的效率的结果^[65].

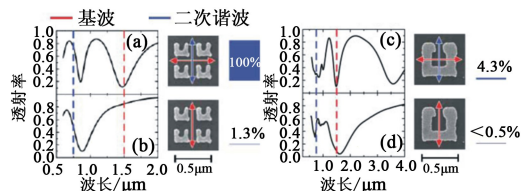


图 10 (a) — (d) 左边为线性透射谱, 中间为 SEM 照片, 右边为倍频信号强度. 红色箭头是入射场偏振方向, 蓝色箭头是倍频信号偏振方向^[64] (见《物理》网刊彩图)

5 光频磁场增强

MSPs 在光频磁场的探测和非线性效应研究方面的潜在应用直接吸引了人们对于增强光频磁场的关注. 伴随 LSPs 的激发, 可以在金属颗粒的表面数十纳米区域产生局域电场的增强, 在此基础上, 人们已经证实, 将两个靠近的相同金属纳米颗粒形成二聚体(dimer)或者形成所谓的蝴蝶结(bowtie), 都可以使得间隙中的电场得到进一步的增强. 然而, 对于近红外和可见光区的电磁波, 如何在纳米区域实现相应数量级的磁场增强效果, 目前还缺少相应的物理手段^[66].

王振林课题组最近提出, 采用周期结构中衍射耦合机制可以使光频区人工磁原子局域磁场得到进一步的增强^[67], 如图 11 所示. 这一物理思想类似于金属纳米颗粒阵列中 LSPs 共振的衍射耦合效应. 以金属纳米棒对形成的二维有序排列为例, 当阵列的周期接近于 MSPs 的共振波长时, 伍德(Wood)反常形成的衍射波和磁“原子”中的 MSPs 共振产生强烈的远场耦合效应, 从而形成一种窄带的、杂化共振模. 由于衍射波是沿着阵列的表面传播, 因此与单个磁“原子”和激发光的耦合相比, 通过衍射波与 MSPs 的耦合, 可以极大地提高相互作用的效率. 作者通过数值计算证实, 在可见光区域, 这种杂化共振模在磁“原子”附近产生的最大磁场强度要比纯粹 MSPs 共振产生的磁场强度提高一个数量级, 可以达到入射光磁场强度的 450 倍.

6 结束语

近几十年来, 与表面等离子激元和磁表面等离子激

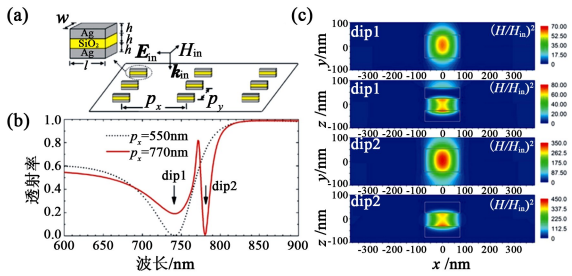


图 11 (a) 成对的金属纳米棒组成的二维长方阵列结构示意图 (E_{in} 为入射电场, k_{in} 为入射波矢, H_{in} 为入射磁场); (b) 光垂直入射下体系的透射谱; (c) 为 (b) 中所标注的透射谷 1 (dip1) 和 2 (dip2) 处相对磁场强度在 xoy 和 xoz 平面内的分布, $(H/H_{in})^2$ 为局域磁场与入射磁场的强度比^[67]

元相关的研究内容已经非常广泛,除了能够提高近场显微镜的分辨率,提升发光二极管的效率,在纳米尺度实现电磁场的调控和实现隐身等外,还在包括数据存储、亚波长结构波导、光镊、生物传感器、太阳能电池等应用研究领域,提供了新的机遇.与此同时,人们也在不断地探索和提出具有磁响应的新型微纳结构,例如由 3 个纳米球壳组成的三聚体结构可以有效地支持一类低阶磁表面等离子激元模式,即磁偶极模式^[68].国内许多科研机构都在这一新兴学科领域开展了卓有成效的研究工作.当然为了能够将 SPs 和 MSPs 相关的基础研究成果运用到实践中,人们还需面临各种挑战.例如,目前关于磁表面等离子激元或负折射材料中的非线性光学效应的研究,现阶段大部分集中于理论研究,如何在实验上去验证这些新颖的非线性光学效应,以及如何利用增益机制有效地降低人工超构材料的损耗等,都还需要继续开展更广泛和深入的研究.

参考文献

- [1] 王振林. 物理学进展, 2009, 29(3): 287 [Wang Z L. Progress in Physics, 2009, 29(3): 287 (in Chinese)]
- [2] Kreibitz U, Vollmer M. Optical Properties of Metal Clusters. Berlin: Springer, 1995
- [3] Hillenbrand R, Taubner T, Keilmann F. Nature, 2002, 418 (6894): 159
- [4] Bergman D J, Stockman M I. Phys Rev Lett., 2003, 90(02): 027402
- [5] Noginov M A, Zhu G, Belgrave A M *et al.* Nature, 2009, 460 (7259): 1110
- [6] Veselago V. Sov. Phys. Usp., 1968, 10(4): 509
- [7] Gollub J R, Smith D R, Vier D C *et al.* Phys. Rev. B, 2005, 71 (19): 195402
- [8] Shelby R, Smith D, Schultz S. Science, 2001, 292(5514): 77
- [9] Seddon N, Bearpark T. Science, 2003, 302(5650): 1537
- [10] Pendry J, Schurig D, Smith D. Science, 2006, 312(5781): 1780
- [11] Pendry J. Phys. Rev. Lett., 2000, 85(18): 3966
- [12] Fang N, Lee H, Sun C *et al.* Science, 2005, 308(5721): 534
- [13] Science, 2003, 302(5653): 2043; Science, 2006, 314(5807): 1841
- [14] Pendry J, Holden A, Robbins D *et al.* IEEE Trans. Microw. Theory Techn., 1999, 47(11): 2075
- [15] Linden S, Enkrich C, Wegener M *et al.* Science, 2004, 306 (5700): 1351
- [16] Smith D R, Padilla W J, Vier D C *et al.* Phys. Rev. Lett., 2000, 84(18): 4184
- [17] Parazzoli C G, Gregor R B, Li K *et al.* Phys. Rev. Lett., 2003, 90(10): 107401
- [18] Bayindir M, Aydin K, Ozbay E *et al.* Appl. Phys. Lett., 2002, 81(1): 120
- [19] Gregor R B, Parazzoli C G, Li K *et al.* Appl. Phys. Lett., 2003, 82(14): 2356
- [20] Enkrich C, Pérez-Willard F, Gerthsen D *et al.* Adv. Mater., 2005, 17(21): 2547
- [21] Enkrich C, Wegener M, Linden S *et al.* Phys. Rev. Lett., 2005, 95(20): 203901
- [22] Sun J, Tang C J, Zhan P *et al.* Langmuir, 2010, 26(11): 7859
- [23] Cao Z S, Pan J, Chen Z *et al.* Chin. Phys. Lett., 2011, 28(5): 057302
- [24] Pan J, Chen Z, Yan Z D *et al.* AIP Advances, 2011, 1(4): 042114
- [25] Zhou J, Koschny T, Kafesaki M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2005, 95(22): 223902
- [26] Zhang S, Fan W, Minhas B K *et al.* Phys. Rev. Lett., 2005, 94 (03): 037402
- [27] Enkrich C, Wegener M, Linden S *et al.* Phys. Rev. Lett., 2005, 95(20): 203901
- [28] Dolling G, Enkrich C, Wegener M *et al.* Opt. Lett., 2005, 30 (23): 3198
- [29] Cai W, Chettiar U, Yuan H *et al.* Opt. Express, 2007, 15(6): 3333
- [30] Shalae V. Nat. Photonics, 2007, 1(1): 41
- [31] Zhang S, Fan W, Panoiu N C *et al.* Phys. Rev. Lett., 2005, 95 (13): 137404
- [32] Dolling G, Enkrich C, Wegener M *et al.* Science, 2006, 312 (5775): 892
- [33] Dolling G, Enkrich C, Wegener M *et al.* Opt. Lett., 2006, 31 (12): 1800
- [34] Dolling G, Wegener M, Linden S *et al.* Opt. Lett., 2007, 32 (5): 551
- [35] Li T, Liu H, Wang F *et al.* Opt. Express, 2006, 14(23): 11155
- [36] Valentine J, Zhang S, Zentgraf T *et al.* Nature, 2008, 455 (7211): 376
- [37] Noginov M A, Zhu G, Bahoura M *et al.* Opt. Lett., 2006, 31 (20): 3022
- [38] Ramakrishna S A, Pendry J B. Phys. Rev. B, 2003, 67(20): 201101(R)
- [39] Klar T A, Kildisher A V, Drachev V P *et al.* IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., 2006, 12(6): 1106
- [40] Sarychev A K, Tartakovskiy G. Phys. Rev. B, 2007, 75(08):

- 085436
- [41] Xiao S, Drachev V P, Kildishev A V *et al.* Nature, 2010, 466 (7307): 735
- [42] Sersic I, Frimmer M, Verhagen E *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2009, 103(21): 213902
- [43] Liu N, Kaiser S, Giessen H. Adv. Mater. , 2008, 20(23): 4521
- [44] Feth N, König M, Husnik M *et al.* Opt. Express, 2010, 18 (7): 6545
- [45] Liu N, Liu H, Zhu S N, Giessen H. Nat. Photonics, 2009, 3 (3): 157; Liu H, Cao J X, Zhu S N *et al.* Phys. Rev. B, 2010, 81: 241403 (R)
- [46] Quinten M, Leitner A, Krenn J R *et al.* Opt. Lett. , 1998, 23 (17): 1331
- [47] Shamonina E, Kalinin V A, Ringhofer K H *et al.* J. Appl. Phys. , 2002, 92(10): 6252
- [48] Shamonina E, Solymar L. J. Phys. D: Appl. Phys. , 2004, 37(3): 362
- [49] Sydoruk O, Zhuromskyy O, Shamonina E *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2005, 87(07): 072501
- [50] Freire M J, Marques R, Medina F *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2004, 85(19): 4439
- [51] Liu H, Genov D A, Wu D M *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2006, 97 (24): 243902
- [52] Wang S M, Li T, Liu H *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2008, 93 (23): 233102
- [53] Wang S M, Li T, Liu H *et al.* Opt. Express, 2008, 16(6): 3560
- [54] Wang F M, Liu H, Li T *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2007, 91 (13): 133107
- [55] Liu H, Li T, Wang Q J *et al.* Phys. Rev. B, 2009, 79 (02): 024304
- [56] Li T, Ye R X, Li C *et al.* Opt. Express, 2009, 17(14): 11486
- [57] Wang S M, Li T, Liu H *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2008, 93 (23): 233102
- [58] Burresti M, van Oosten D, Kampfrath T *et al.* Science, 2009, 326(5952): 550
- [59] Gabitov I R, Indik R A, Litchinitser N M *et al.* J. Opt. Soc. Am. B, 2006, 23(3): 535
- [60] Popov A K, Shalaev V M. Appl. Phys. B, 2006, 84(1): 131
- [61] Agranovich V M, Shen Y R, Baughman R H *et al.* Phys. Rev. B, 2004, 69(16): 165112
- [62] Shadrivov I V, Zharov A A, Kivshar Y S. J. Opt. Soc. Am. B, 2006, 23(3): 529
- [63] Zharov A A, Zharova N A, Shadrivov I V *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2005, 87(09): 091104
- [64] Klein M W, Enkrich C, Wegener M *et al.* Science, 2006, 313 (5786): 502
- [65] Klein M W, Wegener M. Opt. Express, 2007, 15(8): 5238
- [66] Koo S, Kumar M S, Shin J *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2009, 103 (26): 263901
- [67] Tang C J, Zhan P, Cao Z S *et al.* Phys. Rev. B, 2011, 83(04): 041402(R)
- [68] Fan J A, Wu C, Bao K *et al.* Science, 2010, 328(5982): 1135