

太赫兹表面等离子激元及其应用

刘濮鲲*, 黄铁军

(北京大学电子学系, 北京 100871)

摘要: 金属或半导体与介质分界面上的电子与光子相互作用形成的光学表面等离子激元(SPP)以及人工超构材料或二维原子晶体材料表面上的电子与太赫兹波或微波相互作用形成的人工表面等离子激元(SSP)是小型化与集成化太赫兹有源/无源器件和太赫兹超分辨率成像的重要物理基础。随着太赫兹科学技术的发展,太赫兹表面等离子激元研究在国际上受到很大关注。本文介绍了传统的光学表面等离子激元及其发展,详细阐述了太赫兹波段的人工表面等离子激元(SSP)和石墨烯表面等离子激元(GSP)的基本原理和发展历程,对表面等离子激元在太赫兹波段的新颖辐射源、无源器件、超分辨率成像及其他领域的应用进行了较为全面的总结和评述,并对该领域未来进一步发展的方向进行了展望。

关键词: 太赫兹; 表面等离子激元; 亚波长周期结构; 石墨烯; 衍射极限

中图分类号: O441.6; O441.4; O439 **文献标识码:** A

Terahertz surface plasmon polaritons and their applications

LIU Pu-Kun*, HUANG Tie-Jun

(Department of Electronics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Surface plasmon polaritons (SPP) arising from the interactions between electrons and photons at the metal/semiconductor-dielectric interfaces, and spoof surface plasmons (SSP) supporting by the metamaterials or the interactions between surface electrons and terahertz/microwave waves of polyatomic crystals, are the essential foundation for breaking the diffraction limit and building integrated terahertz active/passive devices. This paper introduces the basic principles, evolution processes of conventional optical SSP, terahertz SPP and graphene surface plasmon polaritons (GSP). The detailed summary and discussion of terahertz plasmons in the applications of terahertz sources, passive devices, super-resolution imaging and so on are also presented. In the last, we discuss the developing prospects of the terahertz plasmons.

Key words: terahertz, surface plasmon polaritons, subwavelength periodic structure, graphene, diffraction limit

PACS: 73. 20. Mf, 52. 35. -g, 52. 77. -j, 63. 22. Rc, 87. 50. U-

引言

表面等离子激元(Surface Plasmon Polaritons, SPP)是光波入射到金属(或半导体)材料表面形成的一种特殊的电磁极化模式。由于材料表面自由载流子的集体振荡使得SPP具有一系列新颖而独特的光

学和物理性质^[1-2],如近场增强效应、局域谐振效应、增强光与物质的相互作用等。近年来,SPP的研究正在以惊人的速度发展,国际上有数百个研究团队争相开展SPP的研究,已经形成了一门以SPP的激发、传输调控、探测和应用为主的学科,即表面等离子激元光子学(Plasmonics)^[1-2],并在亚波长光子学^[3]、

收稿日期: 2019-12-10, 修回日期: 2020-01-06

Received date: 2019-12-10, Revised date: 2020-01-06

基金项目: 国家自然科学基金(61971013), 国家重点研发计划(2019YFA0210203)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (61971013), the National Key Research and Development Program of China (2019YFA0210203)

作者简介(Biography): 刘濮鲲(1965-),男,四川成都人,博士,教授,主要研究领域为微波、毫米波与太赫兹电子学. E-mail: pkliu@pku.edu.cn

*通讯作者(Corresponding author): Email: pkliu@pku.edu.cn

增强的拉曼光谱学^[4]、突破衍射的纳米光子学^[5]、超快光子学^[6]、转换光学^[7]、非线性光子学^[8]等领域得到了大量研究和应用。此外,由于SPP涉及金属和半导体结构材料的光响应及光与物质的相互作用,其展示出来的优异特性也逐渐渗透到其他领域,形成了一些交叉学科,如量子等离激元光子学^[9]、半导体等离激元放大器和激光器^[10]和石墨烯等离激元光子学^[11]等。与此同时,随着太赫兹科学技术的发展以及电磁超材料和超表面研究热潮的兴起,结合了SPP和超材料/超表面双重特点的太赫兹SPP也引起了人们极大的兴趣,并在新型太赫兹器件、太赫兹超分辨率成像和太赫兹通信等方面具有重要的应用前景。

本文首先系统阐述了光学表面等离激元、人工表面等离激元和石墨烯表面等离激元的概念和发展,然后重点介绍太赫兹SPP在新型太赫兹辐射源、太赫兹无源器件以及太赫兹超分辨率成像等领域的应用,并对太赫兹SPP的发展进行展望。

1 光学表面等离激元

光学表面等离激元,即金属与介质分界面的SPP模式,是发展最早,也是发展相对比较成熟的一类。最早有关SPP的研究可追溯到20世纪初。1902年,R. W. Wood等人用光照射光栅后观察到不均匀的明暗相间的条纹,即Wood异常(Wood Anomaly)^[12],当时还没有SPP的概念。1956年,David Pines从理论上描述了带电粒子穿透金属之后的能量损耗特性,并将其归因于金属中自由电子的集体振荡。类比于早期气体放电中的等离子体振荡,他把这种振荡称之为“等离激元(Plasmons)”^[13]。就在同一年,Robert Fano为描述透明介质中的束缚电子与光之间的耦合振荡,引入了“极化激元”这一术语^[14]。至此,SPP的概念逐步成形。1957年,Rufus Ritchie发表了关于金属-介质分界面的SPP的理论文章,同时还讨论了金属薄膜中的损耗问题^[15],这也被认为是第一个真正关于SPP的理论工作。SPP的第二个重要突破是关于SPP的激发问题。理论研究发现,SPP是存在于分界面表面的局域模,是非辐射的,其模式与自由空间的光波矢存在较大的不匹配,因此使得通过直接的光入射激发SPP变得困难。直到1968年,E. Kretschmann、H. Reather^[16]和A. Otto^[17]分别提出了多种在金属薄膜上光学激发SPP的方法。至此,关于SPP的理论研究和实际应用才得以全面开展起来。

如图1(a)和(b)所示^[3],沿着金属与介质分界面上传播的SPP模式是一种沿传播方向极化的横磁(TM)模,其主要电磁场分量为 E_z 、 E_x 和 H_y ,并被局附在亚波长量级,在金属和介质内部沿 z 轴方向指数衰减。这种沿表面传输的电磁模式与自由空间和波导器件中的模式有很大区别,其色散公式为^[18]

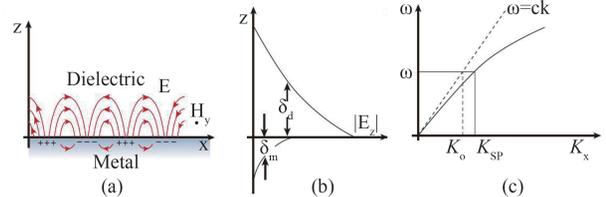


图1 (a)金属与介质分界面的SPP示意图^[3], (b)SPP模式的电磁场沿垂直金属表面方向的变化情况^[3], (c)金属与介质分界面SPP模式的色散曲线^[3]

Fig. 1 (a) Distributions of SPP near the metal-dielectric surface^[3], (b) dependence of SPP mode on the distance in the direction perpendicular to the metal surface^[3], (c) dispersion curve of SPP mode on the metal-dielectric surface^[3]

$$k_{sp} = k_0 \sqrt{\frac{\epsilon_d \epsilon_m(\omega)}{\epsilon_d + \epsilon_m(\omega)}} \quad (1)$$

式中 k_{sp} 为SPP沿传播方向的波矢, $k_0=\omega/c$ 是自由空间的光波矢, ϵ_m 和 ϵ_d 分别为金属和介质的介电常数。通常,金属的介电特性由Drude模型描述,即

$$\epsilon_m(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma_c)} \quad (2)$$

这里 $\omega_p = \sqrt{ne^2/m_0\epsilon_0}$ 是金属的等离子体频率,其中 e 和 m_0 分别是电子电荷和质量, n 为金属的电子密度, ϵ_0 是真空中介电常数; γ_c 是弛豫频率,表征电子运动引起的散射损耗,一般为常数。由此可见,由于金属的介电常数为复数,因此SPP的波矢亦为复数,其实部代表传播常数,虚部与传输损耗相关。

当 ω 小于且接近 ω_p 时, $\epsilon_m(\omega)$ 的实部小于0,且实部远大于虚部(相对介电常数的虚部代表材料损耗)。对金和银等部分贵金属而言,其体等离子体频率(以银为例, $\omega_p=11.9989 \times 10^{15}$ / s)处于光学频率范围,因此可以在特定频率范围激发SPP。图1(c)^[3]给出了根据式(1)画出的色散曲线。图中短划线为光线,可以看到色散曲线在光线右侧,即 $k_{sp} > k_0$ 。这意味着SPP的波矢量和入射光的波矢不匹配,所以不能采用常规手段激发SPP。常见的SPP激发方式主要包括棱镜耦合、光栅耦合、探针耦合、狭缝耦

合、聚焦激光束耦合以及带电粒子轰击耦合等,其中效率较高的耦合方式为棱镜耦合和光栅耦合。棱镜耦合实现波矢匹配的原理为,当特定频率光束以特定的入射角进入棱镜内部后,在出射界面发生全反射,产生与SPP波矢匹配的凋落波(evanescent waves),如图2(a)所示^[19]。而光栅耦合的原理为,入射光被光栅调制,散射光的波矢会叠加光栅的空间傅里叶分量(即 $2n\pi/p$, n 为任意整数, p 为光栅周期),其中某一阶散射光的波矢和SPP实现匹配,如图2(b)所示^[19]。

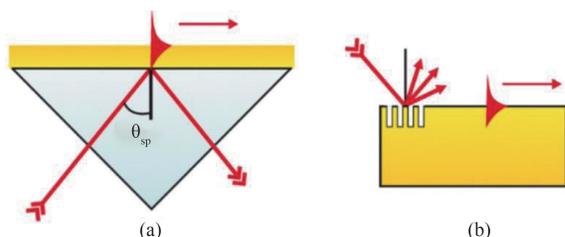


图2 (a)棱镜耦合实现波矢匹配原理^[19], (b)光栅耦合实现波矢匹配原理^[19]

Fig. 2 (a) Schematic of matching wavevector using a prism^[19], (b) schematic of matching wavevector using a grating^[19]

SPP独特的慢光和局光特性,使得其在纳米尺度的光操控^[19]、单分子水平的生物探测^[20]、亚波长孔径的光透射增强^[21]和突破衍射极限的超分辨率光学成像^[22]等众多纳米光子学领域发挥着重要作用。在诸多应用中,SPP的优势主要在于其在近场(由于SPP以慢波形式存在,其波长小于自由空间波长,在垂直其传输方向的场强呈指数衰减,因而所谓的近场指的是这些衰减场还能被检测到的区域,通常是一个波长或亚波长的距离;而对应的远场则是指器件不受工作波长限制的区域,从距离上来说,至少要有几个波长以上)的高精度、高灵敏度和高局附性。随着摩尔定律的临近失效,传统的光刻、光数据存储和光路集成等领域的进一步发展正在面临着一系列技术瓶颈,而SPP为突破这些关键瓶颈提供了很好的解决思路。使用SPP波导,可以进一步提升电路的集成度,达到亚波长尺度。人们在理论和实验上研究了一系列突破衍射极限的SPP功能器件,例如分光器、布拉格光栅干涉器、环形共振器、弯曲波导、纳米腔等^[23]。这些SPP功能器件在尺度上远小于相应的传统光子学器件。传统光刻技术加工精度的进一步提升也受到衍射极限的限制,而SPP可以局限在非常小的空间内,并且其近场

能量很强,所以可以利用SPP实现纳米尺度的光学刻蚀^[24];SPP在光学传感领域也存在重要应用,利用SPP的近场局光特性,可以提高半导体光探测器的响应效率^[25]以及提高太阳能电池的光电转换效率^[26]等;在新型光源方面,SPP的激发可以增大In-GaN/GaN量子阱的内量子效率,从而催生出新型的高亮度和高速运作的半导体发光二极管(LED)^[27]。

实际上,凋落波在近场超透镜中的幅度放大也得益于SPP的激发。近年来,基于相位可调的SPP驻波条纹出现了一种被称之为等离激元照明显微(Plasmonic Structured Illumination Microscopy, PSIM)成像技术^[28-29],如图3所示^[30]。根据莫尔效应(Moiré Effect)^[31]可知,当具有不同相位的SPP驻波条纹分别照射目标时,叠加后的图像同时包括凋落波和行波空间频率分量,经过多次照射以及进行空间频率解缠绕之后,就可以重构亚波长的目标图像。由于PSIM技术具有相对较快的成像速度和较低的光子能量,所以比较适用于对活体组织的生物医学成像。

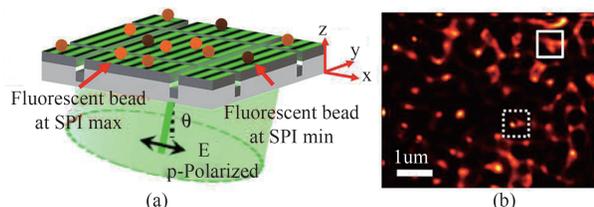


图3 等离激元结构型照明显微成像技术^[30](a)原理示意图, (b)成像结果

Fig. 3 Structural illumination microscopic imaging based on SPP^[30] (a) The schematic illustration, (b) the imaging results

2 人工表面等离激元

在太赫兹频段,金属表面虽然也可以支持表面波,这种表面波也被称之为 Sommerfeld-Zenneck 波^[32-33],但是该表面波的局附能力十分微弱。这是因为,在长波波段(例如太赫兹和微波波段),虽然金属的介电常数的实部仍然小于0,但是工作频率要远小于金属的体等离子体频率。由式(2)可知,此时介电常数的虚部将起主导作用,因此金属在太赫兹频段的等离子体响应十分微弱。研究发现,通过人工掺杂的方法可以使一些半导体材料(如InSb)也产生对太赫兹波的等离子体响应^[34],但是此种材料的损耗相对比较严重,关于半导体材料的SPP研究在太赫兹频段并非主流。

2004年,英国伦敦帝国理工学院的J. Pendry教

授提出可通过在金属平板中构造亚波长的方孔阵列的方式在太赫兹波段获得SPP,如图4(a)所示^[35]。这里要求方孔的边长和周期远远小于自由空间波长。通过麦克斯韦方程组和边界条件求解出来的色散曲线如图4(b)所示^[35]。我们可以看到,这种结构的色散和图1(c)相似,也表现出了明显的慢光特性。从等效媒质理论出发,可以发现通过这种亚波长阵列开孔的方式降低了金属的等效体等离子体频率,因此可以在太赫兹频段甚至更低的频段激发SPP。为了与光学波段真正的SPP模式相区分,存在于太赫兹或微波波段周期性金属结构的这种表面波被称之为类表面等离激元(Mimicking Surface Plasmons)或人工表面等离激元(Spoof Surface Plasmons)。我们在文中将周期结构表面的SPP模式都统一称作人工表面等离激元(SSP)。2005年,Hibbins等人^[36]在微波频段利用这种结构实验证实了SSP的存在。2008年,西班牙马德里自治大学的Garcia-Vidal^[37]研究团队将这些方形通孔变为方形凹槽在太赫兹频段进一步证实了SSP的存在。

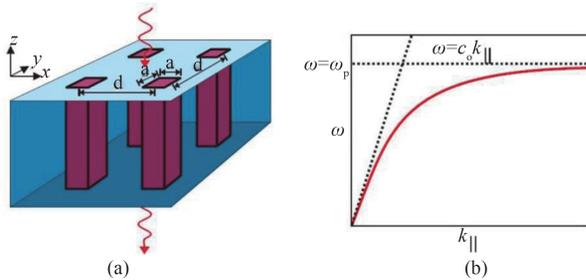


图4 (a)金属平板中亚波长方孔阵列示意图^[35], (b)SSP的色散曲线^[35]

Fig. 4 (a) Subwavelength hole array arranged in a metallic layer^[35], (b) dispersion curves of SSP^[35]

对比传统光学SPP, SSP具有更好的可调节性,在设计SSP器件的时候有了更大的灵活性。SSP和光学SPP不同的地方还在于, SSP存在许多导带和禁带。在图5(a)和(b)中^[38]展示了亚波长周期金属光栅及其SSP模式的色散曲线。从图中可以看出,通过调整光栅的结构参数可任意操控SSP模式。在任意的导带中, SSP的切向波矢总是大于自由空间波矢,表现为非辐射的表面波。每一个导带都存在一个截止频率,当工作频率低于截止频率时候,每一频率都对应特定的SSP模式。当工作频率远离截止频率的时候, SSP模式的局附性差,当工作频率接近于截止频率时候, SSP模式的切向波矢会非常大,

表面波的局附能力增强。由于SSP独特的特性,很快吸引了大量的关注,大量能支持SSP的亚波长金属周期结构在太赫兹波段提出并得以验证,比如亚波长金属褶皱线^[39-40]、周期螺旋开槽线^[41-42]、三角楔子状周期结构^[43-44](如图5(c)所示^[43])、多米诺周期结构^[45]、“V”型周期沟道^[46-47]、“L”型周期金属结构^[48]、周期谐振环^[49]、“蘑菇”形状的高阻抗表面^[50](如图5(d)所示^[50])。这些研究工作主要集中在SSP模式的色散特性。研究发现这些周期金属结构能将电磁能量束缚在亚波长范围之内,可以用于实现低损耗、小尺寸、高灵活性和高局附性的新型传输波导。在接近截止频率时,由于SPP的局附能力急剧增强,欧姆损耗会增加很快,并不适用于远距离电磁能量传输,但可以利用其特性去做分光仪^[51-52]和吸波器^[53]等。图5(e)^[52]展示了分光仪的基本结构,通过逐渐增大光栅中凹槽深度的方式,可以将不同频率的电磁波局限在不同的位置。2013年,东南大学的崔铁军教授团队在一维周期金属光栅的基础上提出了超薄金属光栅^[54],将SSP结构从三维降低到二维。如图5(f)所示^[54],将超薄金属光栅印刷在柔性基底上,可制作出共型的SSP结构。这种结构具有较小的弯折损耗和很高的灵活性,可用于制作可穿戴的通信设备和等离子体集成电路。其在三维弯折情况的验证如图5(g)所示^[54]。该团队此后又研发出了基于超薄光栅的一系列器件,如滤波器^[55]、放大器^[56]、二阶谐波产生器^[57]和SSP天线^[58]等,极大的推动了SSP在通信领域的应用。

除了研究这些周期金属结构本身的传输特性^[39-54]外, SSP的新颖效应还被用来构建各种器件和系统。例如Yu等人^[59]提出在高掺杂半导体量子级联激光器(QCL)表面雕刻一维光栅,在太赫兹频段操控SSP色散,从而实现QCL性能的极大提升。类比于在光学频段的异常透射(EOT),在金属孔阵列周围集成SSP结构也可以增强太赫兹波的透射^[60]。Pendry等提出了基于扇形金属光栅的局域人工表面等离激元结构^[61],并很快被应用于高灵敏度的材料传感探测^[62]。此外, SSP也被证明可以用于波束聚焦和控制^[63-64]、动态开关^[65]、马赫干涉仪^[66]、多波束天线^[67]、群速度调制器^[68-69]、热量增强传输^[70]以及涡旋场激励^[71]等等,在本文的第4章节会进行更详细的介绍。

3 石墨烯表面等离激元

表面等离激元光子学不仅为发展响应速率更

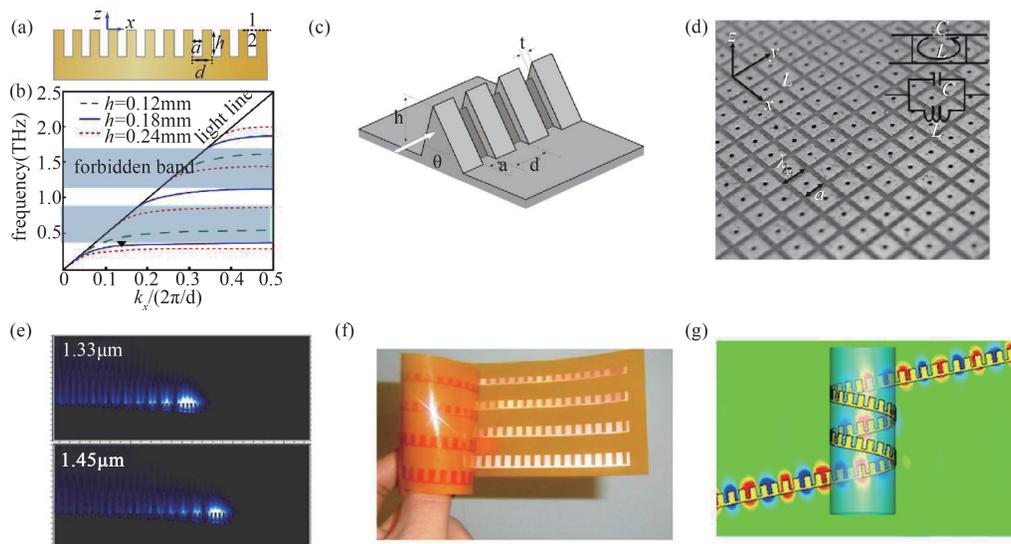


图5 (a)和(b)亚波长周期金属光栅及其色散曲线^[38], (c)三角楔子状周期结构^[43], (d)“蘑菇”形状的高阻抗表面^[50], (e)基于梯度渐变光栅的分光仪^[52], (f)柔性超薄型光栅结构示意图^[54], (g)超薄型光栅的三维仿真验证结果^[54]

Fig. 5 (a) and (b) show the structure and dispersion relation of an ultra-thin subwavelength grating^[38], respectively, (c) sketch of periodic wedges^[43], (d) the high-impedance surface based on “mushroom” structure^[50], (e) the light splitter made by a gradient grating^[52], (f) Photograph of the nearly zero-thickness gratings on a flexible substrate^[54], (g) the simulated field of three-dimensional flexible ultra-thin gratings^[54]

快、结构更为紧凑的新一代光子学和电子学器件提供了新的途径^[72],同时也为新技术和材料的发展与革新带来了新的机遇。表面等离子激元与新材料(或超材料)的结合也是当前相关领域的研究热点,传统的贵金属如金和银,并非最佳的等离子体材料,一个重要的缺陷便是其在高频波段的损耗较大,尽管有低损耗的结构被提出,但这是以牺牲场的局附性为代价的。因此,近来也有研究者提出了其他更好的等离子体材料,比如金属合金、超导体、导电氧化物、金属氮化物、锆化物、氮化物、钙钛矿氧化物和二维原子晶体材料(如石墨烯)等。这些材料在某些方面的特性要优于单一的贵金属^[73],因此引起了人们极大的兴趣。石墨烯是这类新型等离子体材料的代表,石墨烯材料与表面等离子激元相结合的石墨烯表面等离子激元(Graphene Surface Plasmon Polaritons, GSP)研究已经形成一门重要的学科分支,即石墨烯表面等离子激元光子学(Graphene Plasmonics)^[11]。

石墨烯是由单层碳原子层排列组成的蜂窝状结构,是众多碳原子家族中的一种二维材料(图6(a)^[75])。英国曼彻斯特大学的科学家 A. Geim 和 K. S. Novoselov 在 2004 年首次通过机械剥离的方法得到了单层石墨烯,使得石墨烯开始从理论走向实用^[74-75]。与传统半导体材料不同的是石墨烯能带

结构在靠近布里渊区域是线性的,载流子能以极高的迁移率作弹道传输,被称为无质量的狄拉克费米子(Dirac Fermions),费米速度 $v_f \approx 10^6 \text{m/s}$ 。根据入射光能量与费米能级(Fermi Energy, E_f)大小关系可以发生带内跃迁(Intra-band Transition)和带间跃迁(Inter-band Transition),分别为图6(b)^[75]的红色和绿色箭头。石墨烯中的自由载流子与入射光子相互耦合所形成的GSP极大地引起了研究者的兴趣^[11],它是传统表面等离子激元光子学与石墨烯物理学的融合。GSP展示出了与传统SPP模式不一样的电磁特性(根据电导率的不同可支持TE和TM极化模式的SPP),具有强的场局附性,较低的传输损耗和极好的调谐性^[76],GSP这些优越的特性被用来发展新一代的光子学、等离子体学和光电子学器件^[77-78]。图6(c)^[75]给出了不同费米能级的石墨烯电导率随频率的分布(黑色曲线),可以看出其具有很高的调谐性,虚线和实线代表不同的费米能级下的电导率,蓝色和红色分别代表带内跃迁电导率和带间跃迁电导率。由于太赫兹波段的低量子能量,因此对电导率起主导的是带内跃迁。

2012年,美国^[79]和西班牙^[80]的两个研究小组各自独立的借助近场光学显微镜观测到了GSP的高分辨率空间图像,如图7所示^[79]。从入射表面波和边缘反射表面波的干涉条纹中可以计算出等离子激

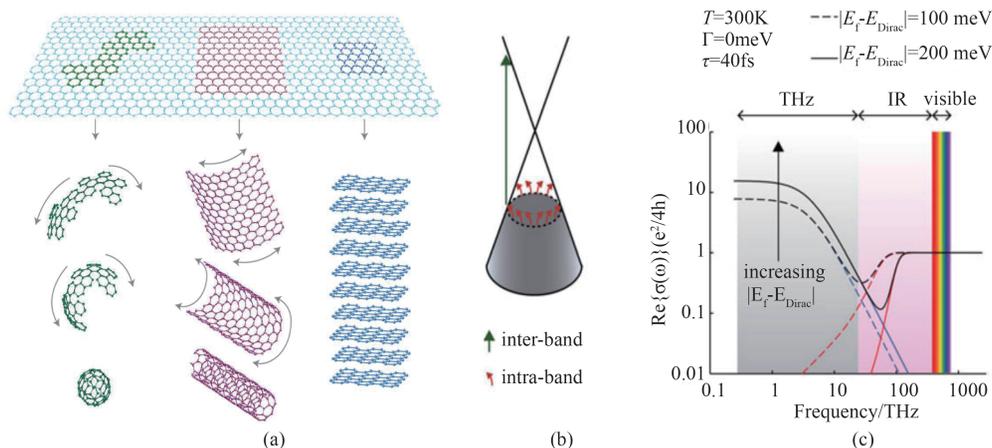


图6 (a)单层石墨烯材料和其他相关碳材料^[75], (b)石墨烯光学带内和带间跃迁, (c)不同费米能级的石墨烯光学电导率(黑色曲线)随频率的变化

Fig. 6 (a) Schematic of graphene monolayer and other related carbon materials^[75], (b) the intraband and interband transitions of the graphene, (c) the optical conductivity of graphene as a function of frequency under different Fermi energy

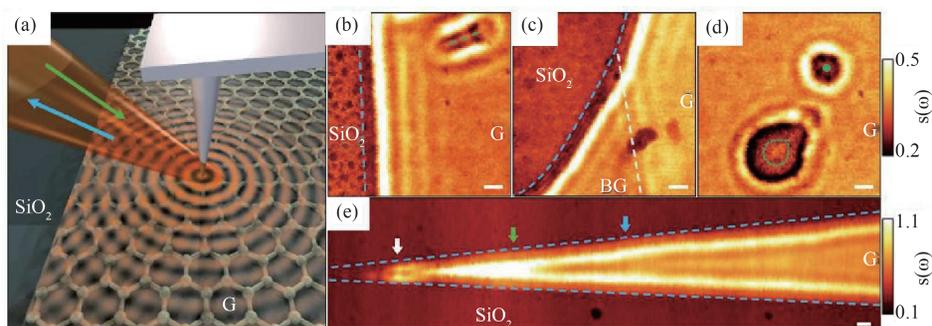


图7 (a)近场光学成像的实验原理示意图,图中G代表石墨烯,虚线代表石墨烯边缘^[79]; (b)-(e)采用近场光学显微镜在零栅压条件下得到的GSP的红外振幅图像^[79]

Fig. 7 (a) Diagram of an infrared near-field experiment^[79], where G represents the graphene and the dashed line is the edge of graphene, (b)-(e) present the images of infrared amplitude of GSP under zero gate voltage, which is obtained by near-field optical microscopy

元波长。该工作是GSP观测研究领域的重要里程碑,为GSP的进一步研究和应用奠定了坚实的基础。石墨烯的载流子浓度和电导率可以通过外加电极、电场、磁场和掺杂等方式改变,因而GSP的共振频率从中红外到太赫兹连续可调,极大拓展了其应用范围。由于其特殊的电子能带结构,GSP具有可调谐性、低本征损耗及电磁场的高度局域化等优异性能,这使得GSP在生物/化学传感器^[81]、有源器件^[82]、光谱学^[83]、太赫兹亚衍射导波系统^[84]以及超分辨率成像^[85-86]等领域具有重要应用。

利用等效媒质理论将石墨烯等效为一层很薄的均匀介质时,可通过调节电参数使得其等效介电常数小于0。因此,利用石墨烯的等离子激元效应,可在太赫兹频段设计超透镜,实现超分辨率成像。这一点在下文的4.3节将会进行介绍。

4 太赫兹表面等离子激元的应用

太赫兹波段的表面等离子激元主要是指SSP和GSP。对于SSP来说可以通过调节周期金属结构的参数来调整其工作频段至太赫兹波段。GSP可以通过调节栅极电压和化学掺杂等方法来调整其工作频率。随着太赫兹科学技术的发展,太赫兹表面等离子激元的研究也逐渐成为热点。下面将从新型太赫兹辐射源、太赫兹无源器件和太赫兹超分辨率成像三个方面来介绍表面等离子激元在太赫兹频段的应用。

4.1 基于表面等离子激元的太赫兹辐射源

太赫兹辐射源,特别是大功率、高效率、结构紧凑的太赫兹源^[87],是制约太赫兹科学技术发展的关键。现有的太赫兹源主要分为三类:光学太赫兹

源^[88]、固态半导体太赫兹源^[89]和真空电子学太赫兹源^[90-92]。其中,光学太赫兹源主要是基于非线性光学效应产生太赫兹波,如光整流、差频或光参量振荡来产生太赫兹波,但面临着光子转化效率低及信噪比降低的难题;固态半导体太赫兹源则包括基于微电子固态集成电路的耿氏振荡器和肖特基二极管等,以及太赫兹量子级联激光器,前者面临材料中载流子迁移速度不够快的问题,后者则要求低温工作环境;真空电子学太赫兹源是基于真空中自由电子与波的相互作用,包括回旋管、自由电子激光(FEL)、返波管(BWO)、扩展相互作用速调管(EIK)和行波管(TWT)等,它们从微波频段提升至太赫兹频段时,则面临器件尺寸缩小、加工困难、所需自由电子电流密度增大,或者需要强磁场、体积笨重等问题。近年来,太赫兹表面等离子激元的发展,为太赫兹辐射源的研究注入了新的活力,使得电子学与光子学相结合的新型太赫兹源的发展成为可能。

前面已经提到,通过光束在棱镜或光栅表面激发 SPP 是常用和已成熟的方法。早期有研究者利用高能电子束垂直穿过金属-介质分界面激发 SPP^[93],并且研究了平行和垂直运动电子束在金属表面产生辐射的机理^[94]。在太赫兹波段,光滑金属表面对于电磁能量局附性较弱,而采用周期金属结构能将表面波限制在近场,即前面提到的人工表面等离子激元(SSP)。由于 SSP 具有良好的场局附和场

增强等特性,基于 SSP 与电子束相互作用的新型太赫兹辐射源近年颇受重视。当电子束飞过金属光栅周期表面时,可产生两种辐射机制:第一种是 Smith-Purcell 辐射,其相互作用点(电子束与光栅结构色散线的交点)在色散线外,且一般工作在高次模式,是一种远场的快波辐射,也是一种非相干辐射,在不同的辐射角度上所获得的辐射波长不同;另一种是 SSP 辐射,其相互作用点在光栅色散线下面,位于慢波区,是一种慢波辐射^[95]。通过电子束与 SSP 相互作用在周期金属结构上产生 Smith-Purcell 超辐射来获得太赫兹波是近年来该领域研究的热点。Smith-Purcell 超辐射是相对于非相干 Smith-Purcell 辐射而言的,它是通过电子束在周期金属结构表面激发 SSP,电子束与 SSP 相互作用之后被调制形成群聚电子束,最后由群聚电子束团在光栅表面激发产生相干的 Smith-Purcell 超辐射。2007 年,韩国首尔大学的 Yong-Min Shin 等人利用对流双电子束在周期金属孔阵列中激发了 Smith-Purcell 超辐射^[96],其辐射强度是单个金属光栅自发辐射强度的 2 倍,其工作示意图和功率频谱如图 8(a)和(b)所示^[96]。

电子科技大学刘盛纲教授团队对电子束与 SSP 在圆柱周期金属结构中的太赫兹辐射进行了研究^[97]。该团队提出了二维金属孔阵列与介质衬底结构,电子束在二维金属孔阵列表面激发 SSP,电子束与 SSP 相互作用产生太赫兹辐射并耦合进入介质衬

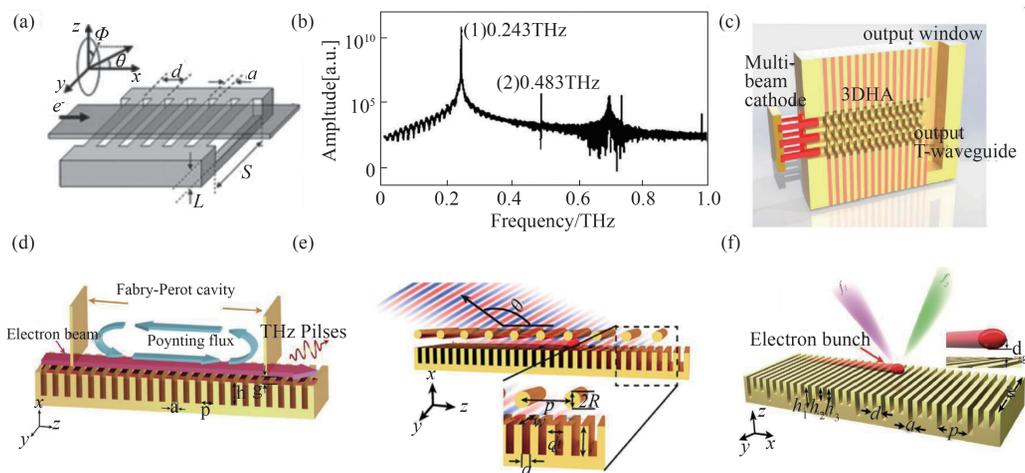


图 8 (a) 电子束和 SSP 结构相互作用示意图^[96], (b) 图(a)结构输出频谱示意图^[96], (c) 多孔电子束与类晶体结构中的 SSP 相互作用辐射^[101], (d) 加载 FP 腔的反馈再生式太赫兹源^[104], (e) 加载周期圆柱的波束扫描太赫兹辐射^[105], (f) 多频率相干空间太赫兹辐射^[106]

Fig. 8 (a) Schematic of interaction between an electron beam and SSP structure^[96], (b) the output spectrum of the system in (a)^[96], (c) the interaction between multiple electron beams and a crystal-like SSP structure^[101], (d) regenerated terahertz source induced by a FP cavity^[104], (e) periodic-cylinders-loaded beam-scanning terahertz radiation^[105], (f) multi-frequency coherent terahertz free-space radiation^[106]

底中,形成衍射辐射^[98]。为了增加电子束与 SSP 的相互作用效率,该团队通过改变结构来增加 SSP 的耦合强度。提出金属光栅-二维网孔阵列-金属光栅的“三明治”结构来提高束-波相互作用效率,两束电子束分别从二维网孔阵列与上下金属光栅的间隔通过,在金属光栅与网孔阵列表面激发的 SSP 通过网孔进行耦合,增强了相互作用区域电场强度,进而提高了相互作用效率^[99]。为了降低对电子束起振电流的要求,提出了利用类晶体的结构,该结构的四壁均可以看成为一个金属光栅,电子束会在四周激发出 SSP 并相互耦合,在相互作用区域形成类似波导模式的分布,提高相互作用场强^[100]。在此基础之上,又提出了多注电子束与类晶体结构相互作用,通过如图 8(c)^[101]的 9 孔电子束在类晶体结构中激发表面波并在相互耦合,可以极大的降低起振电流。此外,基于两段式相互作用结构的太赫兹辐射源也得到了关注,连续电子束在一段光栅上激发出 SSP,电子束与 SSP 相互作用之后形成群聚电子束,群聚电子束可以在光栅表面激发出太赫兹辐射^[102]。作者所在的北京大学团队研究了利用 20 kV/0.5 A 的电子束在金属光栅表面激发 SSP,模拟结果显示,通过电子束与 SSP 相互作用,在 1 THz 的工作频率可获得 66 W 的连续功率输出,相互作用效率达到 1.38%^[103]。若借助光学激光器中再生放大的原理,在金属光栅上如图加载如图 8(d)所示^[104]的 Fabry-Perot (FP) 腔,可进一步提升相互作用效率。利用腔体的反馈再生机制,可将电子束与 SSP 的相互作用长度大大延长,相互作用效率也可得到数倍的提升^[104]。如图 8(e)所示^[105],此团队还在均匀光栅的表面加载一个金属线阵阵列,使光栅的辐射特性改变。当自由电子激励时,会在光栅表面激发出人工表面等离子元并转化为自由空间的相干辐射,辐射角度可在 0~180°中调谐。图 8(f)^[106]中展示了对于均匀光栅的深度调制结构,当系统被自由电子激励时,会同时在多个方向激发出多辐的太赫兹辐射。辐射频率可以通过调节不同的光栅深度进行独立调节,且在电子动能变化过程中辐射频率稳定。后续研究发现电子束与双周期金属光栅结构中的对称模式进行相互作用时,具有超低的传输损耗,采用 19.5 kV/1 A、占空比 0.5 的电子束,在 1 THz 的工作频率可获得 114 W 的功率输出^[107]。此外,他们还提出了利用光栅梯度折射率渐变超表面获得增强型 SSP 辐射的方案,可使电子束与 SSP 模式保持长距离的相速度同步,实现

远程换能,相互作用效率获得进一步提升,粒子模拟结果表明,在 1 THz 的工作频率可实现 66 W 的功率输出,相互作用效率达到 3%^[108]。日本三重大学的 Okajima 等人利用电子束在深度渐变的金属光栅中激发 SSP 获得了太赫兹辐射,但是这种辐射只能针对深度逐渐减小的前向波模式(或者深度逐渐增大的反向波),对于均匀金属光栅不能工作^[109]。

此外,我们也可以设计基于电子束与 SSP 相互作用的太赫兹表面等离子元放大器。在光学波段,研究者利用自由电子在金属银表面激发出 SPP,并通过 SPP 与电子相互作用进行 SPP 波的放大,如图 9(a)所示^[110]。美国 Mountain Technology 的 Yong-Min Shin 等人则利用交错双金属光栅中的 SSP 与自由电子相互耦合来放大太赫兹波,在 220 GHz 利用 20 kV/250 mA 电子束放大 50 mW 小信号,获得了超过 12 dB/cm 的增长率和超过 30% 的带宽,能量转换率为 3%~5.5%^[111]。

石墨烯作为近年兴起的一种新颖材料,具有高电子迁移率、可折叠和可调谐性等,这使得其成为下一代半导体器件的理想替代材料,基于石墨烯材料的太赫兹辐射源也是当前该领域的研究热点。北京大学团队提出了利用电子束在石墨烯条带上激发 GSP,通过电子束与 GSP 相互作用形成太赫兹辐射的方案,如图 9(b)所示^[112]。电子科技大学团队报道了基于自由电子与 GSP 相互作用的切伦科夫辐射源。图 9(c)^[113]显示电子束在石墨烯表面可以激发 GSP,经过电子束-波相互作用产生的太赫兹辐射和介质衬底进行耦合,形成介质中的切伦科夫辐射^[113-115]。此外,该团队还研究了通过回旋电子束在石墨烯加载的介质圆波导中激发 GSP 获得相干可调谐的太赫兹辐射,如图 9(d)所示^[116]。

4.2 太赫兹无源器件

SSP 在太赫兹无源器件中最重要的应用便是新型太赫兹波导。随着频段的升高,由于频率和尺寸的共渡性,传统矩形波导和圆波导在太赫兹频段会面临加工困难和损耗大等问题。基于 SSP 亚波长金属阵列结构的开敞式太赫兹新型波导,可采用 UV-LIGA^[117]等光刻工艺进行加工,不但解决了加工难题,而且波导传输损耗受加工误差的影响较小。2006 年, Garcia-Vidal 等人研究了金属褶皱线的传输特性^[39],通过理论和仿真证明了 SSP 可用于构建突破衍射极限的太赫兹传输波导,其传输特性可通过改变周期结构的参数进行调整。图 10(a)^[39]展示

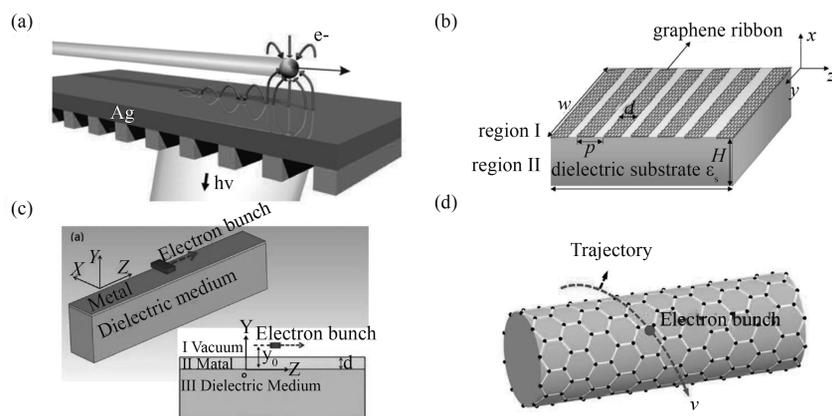


图9 (a) 自由电子在银膜上激发 SPP^[110], (b) 电子束在石墨烯条带光栅表面激发 GSP 产生太赫兹辐射^[112], (c) 电子束在石墨烯表面激发的表面波辐射耦合到介质中形成切伦科夫辐射^[113], (d) 回旋电子束在石墨烯加载的介质圆波导中激发 GSP 获得相干可调谐的太赫兹辐射^[116]

Fig. 9 (a) SPP excitation on a silver layer based on free electrons^[110], (b) terahertz radiation by exciting GSP which is launched by the interaction between electron beams with graphene ribbons^[112], (c) dielectric Cherenkov radiation generated by the interaction between an electron bunch with graphene^[113], (d) Coherent tunable terahertz radiation by exciting GSP with a cyclotron electron beam in a graphene-loaded cylindrical waveguide^[116]

了在 1THz 时太赫兹波的电场分布,可以看出能量的强局附效应;2008 年,他们实验验证了基于方形凹槽的 SSP 在太赫兹波段的传输^[37]。随后基于 SSP 的太赫兹新型波导得到了迅速发展。2009 年,类比于光学频段低损耗的 V 型槽, Garcia-Vidal 等人又提出并研究了如图 10(b)^[46]所示的 V 型亚波长周期结构的传输特性。此种结构对于电磁能量的束缚效果更好,拥有更小弯折损耗。图 10(c)^[46]展示了对应于不同弯曲半径的太赫兹波传输分布,充分验证了 SSP 新型波导的优越性。2010 年, Pendry 提出了如图 10(d)^[45]的多米诺骨牌型金属结构,此结构比较容易加工,且有着较低的损耗和较高的局附能力,在太赫兹传输应用中有很大潜力。图 10(e)中依次展示了基于多米诺结构的功分器、定向耦合器和环形谐振器。当然,在太赫兹波段的 SSP 波导并不局限于上文中提及的结构,理论上亚波长的周期谐振结构都可以用于构建 SSP 波导,其它结构^[39-54]在第 2 章节中已经有所提及。SSP 波导的损耗主要由欧姆损耗、介质损耗和散射损耗构成。作者团队提出了基于双金属光栅^[118-119]的 SSP 传输波导。两层 SSP 之间的相互耦合能增加低频局附性,减小损耗,增强传输距离。由于 SSP 的独特性,基于 SSP 的新型波导具有更大的灵活性,可以根据需要设计出各种开放式结构和共面形状,可调整结构参数去任意改变波导传输特性,甚至可同时实现高隔离度的多路传输^[120],也可以在同一波导上集成不同参数的周期结

构,使其可在多频段工作^[121]。图 10(f)-(h)^[121]展示了几种三维传输的太赫兹波导^[122]。由于 SSP 的强局附性,这几种结构都具有良好的工作特性。

随着太赫兹通信技术的兴起,需要实现更紧凑和小信号串扰的片上太赫兹通信电路,但是这两者是相互矛盾的。传统的微带线在太赫兹波段会出现高损耗和高串扰等问题,极大影响通信速度和质量。2013 年,东南大学团队证明了 SSP 可在超薄的金属结构上传输^[54],可以将 SSP 波导通过电路工艺集成到平面上,为发展太赫兹波段的等离激元电路奠定了基础。2015 年,他们研究了基于 65 nm CMOS 技术的超薄 SSP 波导,如图 11(a)^[123]所示。从图 11(b)^[123]可以看出,对比传统 T 型波导, SSP 波导有着更好的局附性,可以有效减小小传输损耗以及传输线之间的串扰。他们还验证了时域信号可以在 SSP 波导上实现高隔离度传输(如图 11(c)所示)^[124]。对比于微带线结构, SSP 的线间相互串扰要低 10 dB 以上。因此, SSP 波导可以实现更高集成度和更高质量的信号传输,在太赫兹片上通信中具有重要应用前景。

除了直接利用 SSP 结构作为太赫兹波导之外,也可以将 SSP 结构和传统波导相结合,实现对太赫兹波传输的操控。例如在波导内部集成多米诺结构,如图 12(a)^[125]所示,由于波导的高通性质和 SSP 的低通性质,这种结构可用作带通滤波器;得益于 SSP 的局附性,在波导存在如图 12(b)^[125]的扭转变

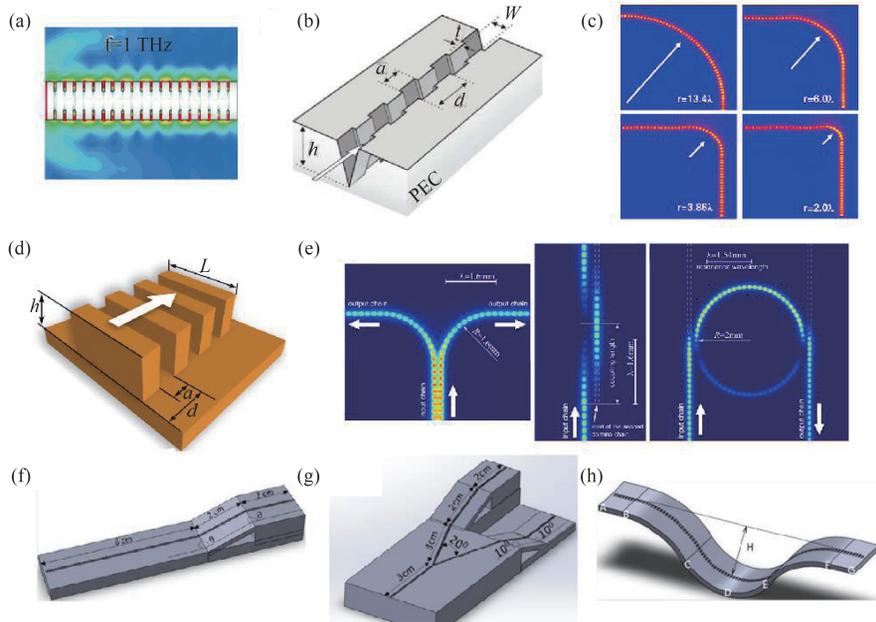


图 10 (a)太赫兹波在金属褶皱线上的传输^[39], (b)V型 SSP 结构示意图^[46], (c)V型结构在不同转弯半径下太赫兹波传输图^[46], (d)Domino型 SSP 结构示意图^[45], (e)基于 Domino型 SSP 结构的功分器、定向耦合器和环形谐振器^[45], (f)-(h)几种不同结构的三维 SSP 传输波导^[121]

Fig. 10 (a) Propagation of terahertz waves on a periodically corrugated metal wire^[39], (b) schematic of a V-shaped SSP structure^[46], (c) the field distributions of SSP on V-shaped under different bending radiuses^[46] (d) the domino-shaped SSP structure^[45], (e) the power divider, directional couplers, and ring resonators based on domino-shaped SSP structure^[45], (f)-(h) several designs for three-dimensional SSP transmission^[121]

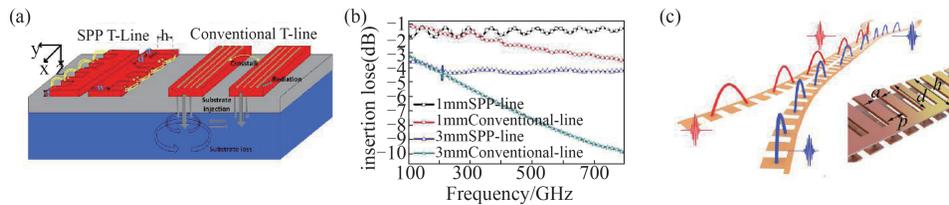


图 11 (a)基于 65nm CMOS 技术的 SSP 传输线和传统 T 型线^[123], (b)SSP 波导和 T 型波导在太赫兹波段的损耗^[123], (c)时域信号在 SSP 波导上高隔离度传输示意图

Fig. 11 (a) SSP waveguide and conventional T-line based on 65nm CMOS technology^[123], (b) loss of SSP waveguide and T-line at terahertz wavelengths^[123], (c) time-domain signals propagate on two closely packed SSP waveguides with high integrity^[124]

换时会有较低反射, 可以用作特殊结构的传输接头。将处于禁带的 SSP 结构和传统微带线等组成多层结构, 然后在 SSP 结构中引入一些处于导带的“缺陷”周期, 在“缺陷”结构附近会引起强烈的 SSP 谐振, 从而影响波导的传输。此种结构可用于控制波导的传输频段和制作窄带高 Q 值带阻滤波器^[126-127]。通过在平行平板波导输出端面上刻蚀亚波长光栅的方法, 可以在特定频率处激发 SSP, 实现如图 12 (c)^[128]波导模式的全反射, 而在其它频率处则实现波导模式的散射。北京大学团队研究了在平行平板、圆形波导和矩形波导的上下壁同时刻蚀亚波长金属光栅, 如图 12(d)^[129]所示, 可以独立控制表面波

在上下壁的光程差去实现如图 12(e)和(f)的高效率波导模式转换和波导转弯^[129]。除了将 SSP 结构集成到波导之中, 也可以直接利用 SSP 波导, 去实现紧凑和高灵活性的滤波器^[130](图 12(g))、定向耦合器^[131, 45, 125]、平面天线^[132](图 12(h)) 和宽带功分器^[133](图 12(i))等。对比传统的无源器件, 基于 SSP 的器件结构尺寸更小, 调谐性更好, 可以共型, 因而更容易集成到传输系统中。

除了利用 SSP 进行太赫兹波的传输和控制之外, 还可以利用其独特的色散特性去设计无源器件。前文中已经提及, 在接近截止频率的时候, SSP 的群速度会极大降低。图 13(a)^[51]展示了基于 SSP

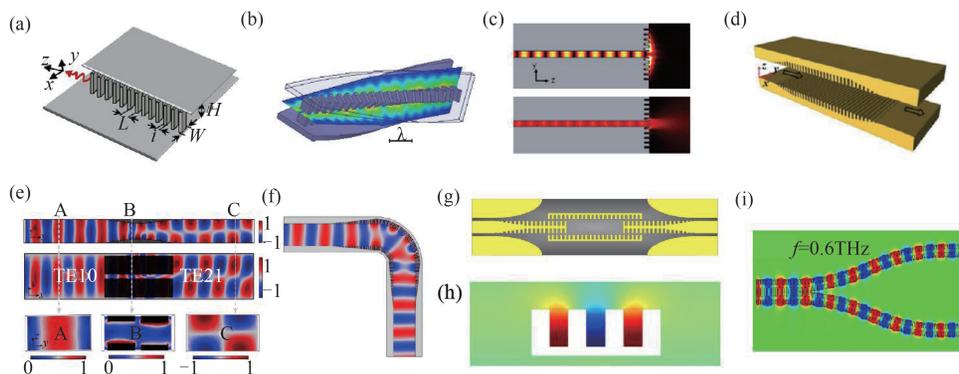


图 12 (a)将 Domino 周期结构集成到传统平行平板波导上^[125], (b)波导扭曲时候电场强度分布图^[125], (c)将亚波长周期光栅刻蚀在平行平板波导出口去控制波导模式的反射和散射^[128], (d)将亚波长周期光栅刻蚀在平行平板波导的上下两侧^[129], (e)利用表面波的相位差实现波导模式转换^[129], (f)利用 SSP 的强局域效应实现波导模式转弯^[129], (g)-(i)基于 SSP 结构的滤波器^[130]、平面天线^[132]和宽带功分器^[133]

Fig. 12 (a) Combination of periodic domino structure with conventional parallel plate waveguide^[125], (b) the electric field distribution when the waveguide is twisted^[125], (c) texturing the subwavelength grating on the output face of a parallel plate waveguide to controlling the reflection and transmission of the waveguide modes^[128], (d) embedding two gratings in the top and bottom plates of the waveguide^[129], (e) realizing the mode conversion by controlling the phase differences between surface waves^[129], (f) achieving efficient modes bending through the high-confined SSP modes, (g)-(i) the SSP-based filter^[130], stripe antenna^[132] and broadband power divider^[133]

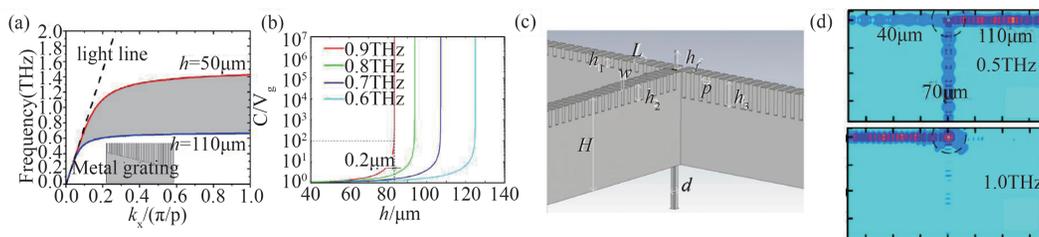


图 13 (a)渐变型光栅及其色散曲线^[51], (b)不同频率下表面等离子激元的群速度随光栅参数的变化^[51], (c)不同深度光栅组成的分流器^[135], (d)在 0.5 THz 和 1 THz 时分流器电场强度分布^[135]

Fig. 13 (a) Gradient metallic grating and its dispersive curves^[51], (b) the group velocity of SSP as a function of frequency^[51], (c) the splitter based on gratings with different groove height^[135], (d) the electric field maps of the splitter at 0.5 THz and 1 THz^[135]

慢波特性的超宽带太赫兹慢波器^[51-52]。随着光栅深度的增加,太赫兹波的群速度会逐渐降低(图 13 (b))。此种仪器可以还作为太赫兹分光仪,因为不同频率的太赫兹波会在光栅的不同位置被截止,实现宽带信号的多路分频^[134]。通过 SSP 的禁带传输理论和耦合理论,可以将不同深度的光栅结构连接在一起(13(c))^[135],实现如图 13(d)^[135]的频率控制的分流器^[135-137]。除此之外,可以让开放性 SSP 结构对天线阵列耦合馈电,由于 SSP 的强色散,在不同频率给予天线阵列的相差不同,可以实现由频率控制的相位扫描功能^[138-140]。由于 SSP 的波长远小于自由空间波长,其传输特性可通过结构参数进行调控。则可以将自由空间波束首先转化为 SSP,实现

对其相位和幅度的操控,然后再辐射出去。通过这种方法可以实现波束的极化转化^[141]、异常反射^[142]和表面波耦合器^[143]等功能。

SSP 的很多特性对周围的环境非常敏感,可以利用此性质制作灵敏的传感器和探测器以及增强太赫兹频谱技术的响应^[144-147]。2013 年,基于图 14 (a)^[147]所示棱镜耦合 SSP 的设备,美国加州理工的 Maier 等人提出了一个对折射率极其敏感的传感设备。当光栅的内部填充材料发生改变时,入射光线的反射系数会发生明显改变。这种探测方法在材料科学中有很潜力。2014 年,该团队基于图 14 (b)^[148]中探针耦合太赫兹 SSP 的方法,在单次测量中得到了待测样本的宽带频谱数据(0.4~1.44

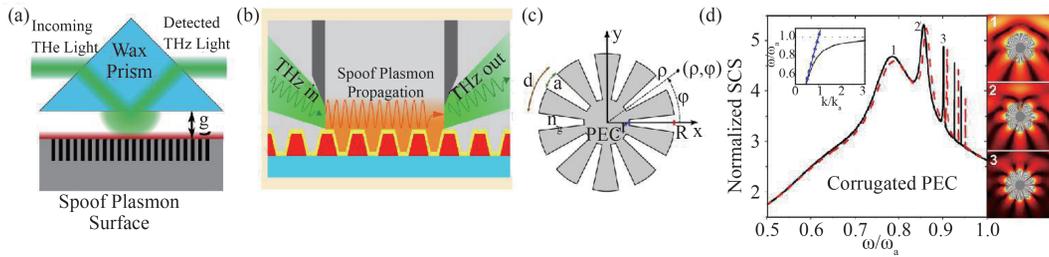


图 14 (a)棱镜耦合 SSP 示意图^[147], (b)尖锐探针散射耦合 SSP 示意图^[148], (c)用于激发 LSSP 的扇形光栅结构图^[61], (d)扇形光栅的散射截面随频率变换, 以及其电谐振模式下的“六极”、“八极”和“十极”模式^[61]

Fig. 14 (a) Schematic of SSP excitation based on a prism^[147], (b) the coupling of SSP through the scattering of a metallic tip^[148], (c) the fan-shaped grating using for exciting LSSP^[61], (d) the calculated scattering cross section of fan-shaped grating as a function of frequency^[61], where the pictures in the insert are hexapole, octapole, and decapole modes of electric resonances

THz)。通过其相位和幅度信息, 可以计算出样本的折射率实部和虚部。在接近截止频率时, SSP 结构增强了样本和太赫兹波之间的相互左右, 从而提升其光谱的吸收峰。后续研究证明了 SSP 的高阶模式会具有更高的传感灵敏度^[149]。类似光学频段的局域表面等离子激元结构, Pendry 等人提出了如图 14 (c)^[61]的亚波长扇形光栅形式的局域人工表面等离子激元(LSSP)。此种 LSSP 可以支持多个谐振模式, 并且可以同时支持电谐振和磁谐振^[150], 图 14(d)^[61]是此种结构的散射截面曲线以及在电谐振模式下的“六极”、“八极”和“十极”谐振模式。2014 年, 东南大学团队发现当扇形光栅的厚度降低到超薄之后依旧可以保持其谐振特性, 并且其谐振特性对于周围环境非常敏感, 可以用于高灵敏度的传感器^[62]。此后有关 LSSP 的研究迅速开展^[151-152], 研究者通过改进 LSSP 的结构去增强其谐振, 也尝试更多方法去激励 LSSP 的高阶谐振模式(称之为暗模式)^[153-154]。除了作为传感器和探测器之外, 当 LSSP 和 SSP 波导相互耦合的时候, 可以实现对波导模式的调控^[155]。LSSP 之间的相互耦合可以用作三维能量传输^[156]和前向/反向波转换器^[157], 不同参数 LSSP 模式之间的干涉可以形成 Fano 振荡^[158]等。

4.3 太赫兹超分辨率成像

太赫兹成像技术是太赫兹波最重要的应用之一。与微波成像及光学成像相比, 太赫兹成像的主要优势是分辨率高、具有一定的穿透性、对人体无损伤等。太赫兹成像技术在安防安检、无损检测、医疗诊断、层析成像和质量监控等方面都具有非常重要的应用前景^[159-160]。现阶段太赫兹成像技术的分辨率都处于厘米至毫米量级^[161-162]。这样的分辨率难以满足很多的应用场景, 比如医疗中病灶区的确认及切除、超大规模集成电路透视及故障排查、活体细胞内的宏观大生物分子的成像等。由衍射极限定律可知, 传统成像方法的分辨率受波长的限制, 承载着目标细节信息的凋落波会在传输过程中指数衰减掉^[163-164], 所以重构后的图像就是模糊的, 无法区分到底是一个点目标还是多个点目标, 如图 15 所示^[164]。要想进一步提高成像分辨率以达到微米甚至是纳米量级, 就必须打破衍射极限, 实现太赫兹超分辨率成像。

近场扫描显微成像技术^[165-166]是突破衍射极限, 获得亚波长分辨率的最直接手段。近场扫描成像技术是利用高分辨率探针在亚波长范围内去照射样本, 或者去抓取含有高分辨率信息的散射场。然

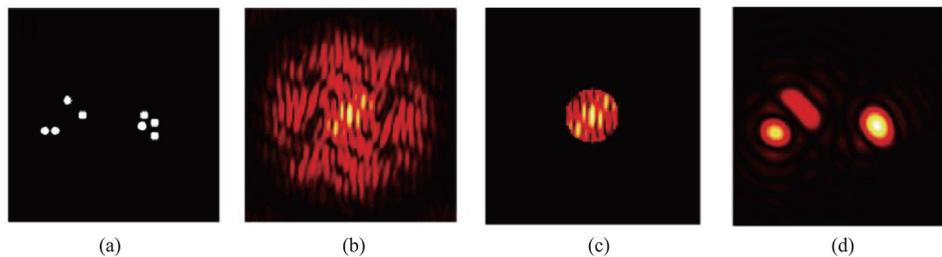


图 15 成像分辨率受限示意图^[164] (a) 实际点目标, (b) 点目标的空间频谱分布, (c) 远场空间频谱分布, (d) 重构后的图像

Fig. 15 The sketch map of imaging process with limited resolution^[164] (a) the target, (b) the totally spatial spectrum of the target, (c) the far-field spatial spectrum, (d) the reconstructed image using the far-field spatial spectrum

后通过逐点扫描,实现对于图像的重建。探针的分辨率决定了成像系统的分辨率。由于SSP能够在深度亚波长量级去操控太赫兹波,因而可以用来制作高分辨率的太赫兹探针。2006年,Garcia-Vidal等人^[39]基于亚波长金属褶皱线提出了锥形渐变的聚焦探针。如图16(a)^[39]所示,在0.6 THz成功地将太赫兹波聚焦到 0.04λ 。研究人员同样用“L”型和Domino型等结构也得到了类似的聚焦效果^[45-46]。如图16(b)所示^[45],当Domino结构的宽度逐渐减小的时候,入射的SSP会被逐渐聚焦到亚波长量级。这些聚焦结构在太赫兹近场扫描成像技术中有重要应用前景。但近场扫描成像技术在单次扫描只能获取一个像素点的信息,成像速度较慢。为提升成像速度,北京大学团队设计了如图16(c)^[38]所示的探针。这种探针可以从SSP的本征模式中提取两个半波长的表面波,形成快速震荡的驻波谐振。当利用这种探针去照射目标时,单次照射就能获得两个像素点的信息,减小了扫描成像所需的时间。图16(d)^[38]展示了被探针照射的两个狭缝在远场的电场分布图。除此之外,该团队还基于非辐射聚焦的原理,运用SSP的近场干涉,设计出了具有较远工作距离的探针^[167]。当探针截取的SSP模式在探针表面发生FP振荡时候,其电场的旁瓣会和主瓣干涉相消,使得主瓣能在较长距离维持聚焦效果。在七阶FP振荡下(图16(e)^[167]),在 0.1λ 的距离取得了

0.06λ 的聚焦效果。研究发现当探针被压缩到超薄尺度的时候,能实现如图16(f)^[167]的二维超聚焦,在 0.1λ 的距离取得了 $0.0077\lambda^2$ 聚焦效果。为了避免机械扫描,实现近实时成像,该组还提出了空间频谱采样的成像方法。即使用SSP结构对于目标的空间频谱进行快速抓取,利用反傅里叶变化进行远场图像重建,利用此方法在0.26THz得到了 0.16λ 的分辨率^[168]。

打破衍射极限实现超分辨率成像的另一个思路是借助完美透镜结构将目标散射波的凋落波成份进行放大或者转换成自由空间的行波。超透镜结构的基本原理是借助等离子激元结构对凋落波响应。与近场显微成像不同的是,超透镜结构不需要逐点扫描,可以实现实时成像^[169]。2015年,北京大学团队基于双曲超材料提出了一种梯度折射率超透镜,如图17(a)所示^[171]。此种超透镜^[170-171]不仅实现了 $\lambda/5$ 分辨率的实时成像,还实现了传统透镜的傅里叶变化功能。但此种透镜^[171]的构建较为复杂,需要多层介质的堆叠。在太赫兹波段,石墨烯^[172-173]支撑的GSP具有传输和放大凋落波的功能,可用于制作结构更简单的超透镜。2012年,Taubner等人利用两层石墨烯针对金属狭缝进行成像,图17(b)^[174]展示了仿真结果,该石墨烯超透镜在太赫兹和红外波段可以获得 $\lambda/7$ 的分辨率,并且可以利用石墨烯的可调谐性实现宽频带工作。2014年,实验

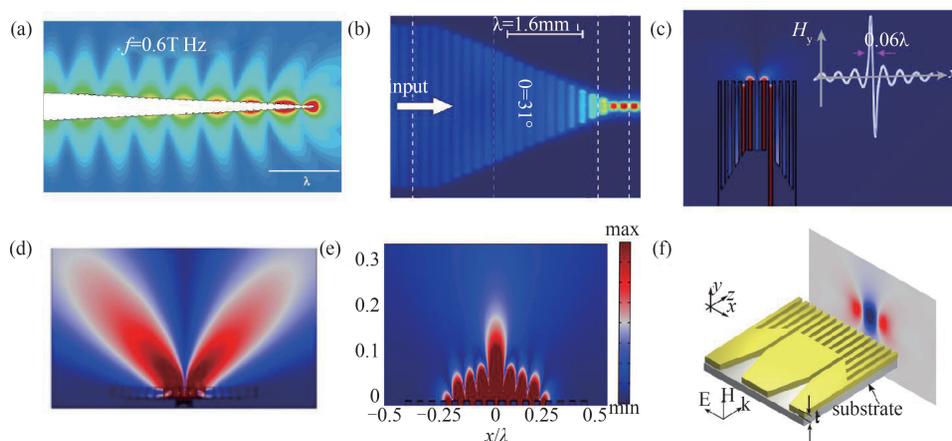


图16 (a) 渐变金属褶皱线探针^[39], (b) Domino结构尺寸逐渐减小SSP聚焦分布^[45], (c)截断光栅支持的SP2模式^[38], (d)被探针照射的两个狭缝电场分布图^[38], (e)七阶Fabry-Perot振荡下, SSP的非辐射聚焦示意图^[167], (f)基于超薄光栅的二维聚焦示意图^[167]

Fig. 16 (a) The probe based on gradient corrugated metal wires^[39], (b) the focusing of SSP waves by gradually varying the domino structure^[45], (c) the SP2 mode in a truncated grating^[38], (d) the electric field snapshot of two targets illuminated by the probe^[38], (e) the radiationless focusing of SSP waves through 7th-order Fabry-Perot resonance^[167], (f) the two-dimensional super-focusing behavior by an ultra-thin grating^[167]

进一步证明了 GSP 对凋落波的放大效应,如图 17(c)所示^[175],在单层石墨烯的协助下,被覆盖的亚波长金属圆孔目标能够被探针识别。以上研究都是只能在近场工作的超透镜,工作距离有限。为了能将超分辨率的图像传输到远场。在 2012 年,丹麦理工大学的 Andryieuski 等人提出利用石墨烯和电介质多层堆叠的方式来构建 Hyperlens,其结构如图 17(d)所示^[85],这种结构可以在远场获得 $\lambda/5$ 的分辨率。2013 年,美国威斯康辛大学的 Forati 等人通过电压周期调节单层石墨烯电导率,实现了一种基于渠道运输原理(Canalization Regime)的平面 Hyperlens,如图 17(e)^[86]所示。但是,这种平面 Hyperlens 只能实现无放大的近场成像。2017 年,北京大学团队利用如图 17(f)^[176]的周期型调制电极,将均匀石墨烯等效为角向周期分布的石墨烯条带。目标散落的凋落波可以转化为 GSP,实现对于目标信息的传输。由于透镜的扇形结构,凋落波在传输的时候逐渐被压缩为行波,从而实现远场超分辨成像。其对于两个亚波长孔径的成像如图 17(g)^[176]如所示,可以看出两个目标在远场被完美分辨。由于石墨烯的可调节性,此透镜可以在 4.5THz-9THz 之间宽带工作。为进一步减小超透镜的体积。该团队还报导了基于石墨烯四波混频过程的远场超分辨率成像(图 17(h))^[177]。四波混频过程是两种频率光相

互作用产生新频率光的三阶非线性过程,因此原频率中的凋落波可以转化为新频率中的行波,进而在新频段实现非线性超分辨率成像。石墨烯在太赫兹频段下具有较强非线性响应的特性,以石墨烯为透镜,只需要对物体照射泵浦光,表征物体特征信息的低频分量充当信号光,然后就可以在四波混频波频率探测出物体成像信息。仿真证明,这种结果可以取得 $\lambda/5$ 的远场分辨率。但由于石墨烯的制备比较困难,同时损耗也较大,实际应用时也存在一定的困难。后续研究发现,可以将引文^[176]的条带石墨烯结构优化为亚波长金属光栅^[178]。这种新型结构可以支持 SSP,且加工难度和损耗都优于石墨烯,在 FP 振荡下可以实现对于凋落波的完美透射,从而可以在太赫兹波段实现低损耗的远场超分辨率成像。

4.4 其他应用

SSP 结构除了作为无源器件之外,还可以与一些有源器件或者可调谐器件结合,实现具有高调谐性、多功能和可重构的新型器件。2009 年,美国密西根大学的 Song 和 Mazumder^[179]在 SSP 波导中填充电光材料验证了一种有源太赫兹开关。当给予一个电压信号时,电光材料的折射率会发生改变,从而改变 SSP 的传输特性,实现通路或者断路的功能。图 18(a)^[179]中展示了利用这种有源开关在 1.6THz

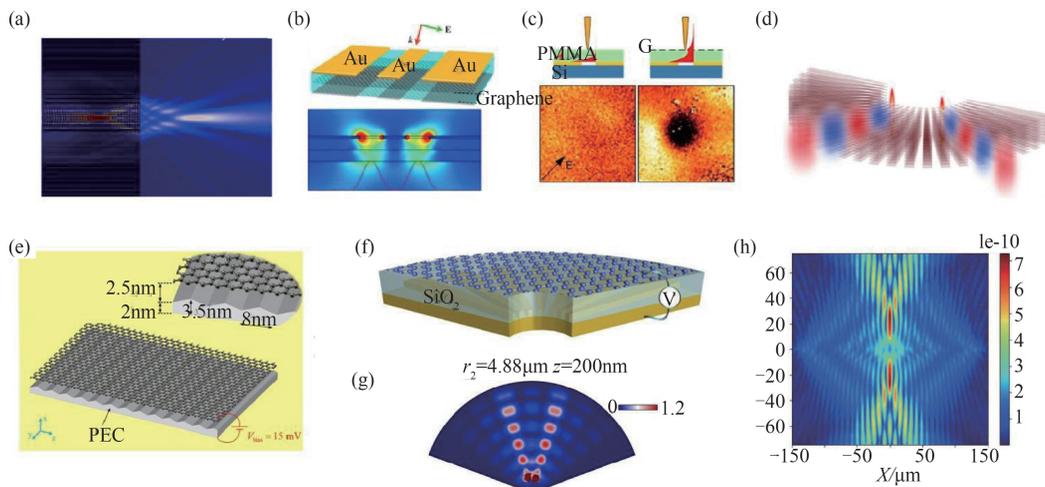


图 17 (a)基于梯度双曲超材料的超透镜^[171], (b)多层石墨烯超透镜^[174], (c)单层石墨烯对凋落波的共振增强^[175], (d)石墨烯 Hyperlens^[85], (e)基于渠道运输原理的平面石墨烯 Hyperlens^[86], (f)扇形石墨烯 hyperlens 结构示意图^[176], (g)对于两个亚波长距离点目标成像电场幅度分布^[176], (h)基于四波混频的石墨烯超透镜成像电场分布图^[177]

Fig. 17 (a) The superlens built by hyperbolic metamaterials^[171], (b) schematic of multilayer graphene superlens^[174], (c) the resonantly amplifying of evanescent waves by single layer of graphene^[175], (d) hyperlens based on graphene^[85], (e) the planar graphene superlens working in the canalization regime^[86], (f) the sketch of fan-shaped graphene hyperlens^[176], (g) the far-field image of two targets with subwavelength distance^[176], (h) the field distribution of a graphene superlens using the four-waves mixing^[177]

实现的多路复用器。他们后续又在波导中接入一个高Q值的SSP谐振器来进一步提高开关的反应速度和减小器件体积^[180-181]。2017年,东南大学团队提出了在亚波长金属光栅中接入可调变容器和控制电路的可重构SSP电路,如图18(b)所示^[182]。通过电控信号去调节电容器的电容,就能动态的调控SSP的色散特性,进而实现可重构和可编程的SSP波导。在此基础上,他们将亚波长开路光栅优化为短路光栅(18(c))^[183],证明了短路光栅具有更为优越的调谐能力和更高的紧凑性。基于此结构,他们提出了一种具有高频率调谐能力的功分器。由于加工和测试的困难,现阶段提出的可调谐SSP器件^[182-185]大多都工作在微波频段(文献[182]中提出,在太赫兹波段可以用MEMS或者 $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ (BST)代替可调电容器)。在太赫兹频段可调谐器件的制备需要进一步的研究和发展,从而扩充SSP器件的应用范围。

除了SSP应用的拓展,SSP的激发也是现阶段研究的热点之一。从前文可知,SSP模式是一种非辐射的表面波,其波矢和传统行波的波矢不匹配,因此也必须采用特殊方式进行激发。由于波矢匹配的原理不变,所以也可以采用和光学SPP类似的耦合方式,如棱镜耦合、探针耦合、狭缝耦合等。但是这些耦合方式的耦合效率都相对较低。超表面的快速发展为更加灵活的波束调控提供了新的平台^[186-189],也为SSP的耦合带来了新的可能性。2012年,复旦大学的周磊教授团队提出利用反射型梯度超表面来赋予行波一个额外的波矢,从而实现波矢匹配,其结构如图19(a)所示^[190]。其研究结果表明,对于任意大于临界值的入射角,入射波能够以接近100%的效率耦合成表面波。由于表面波不是超表面的本征模式,反射型超表面难以实现宽波束的行波到凋落波的耦合。2016年,他们又提出利用透射型梯度超表面,如图19(b)所示^[191],来实现高效率宽波束的SSP耦合。但是此种方法

带宽窄,SSP的耦合方向也不可控。为了实现SSP电路的宽带高效率的信号馈入和提取,东南大学团队设计了如图19(c)^[192]所示的共面波导SSP耦合器,实现了传统波导到超薄光栅结构的宽带耦合。实验结果显示,该双端口系统能在2GHz~11GHz频率范围内实现大于-5dB的SSP信号传输。南京航空航天大学的刘亮亮和顾长青等人^[193]设计了一种敞口式的同轴波导耦合器,也实现了传统波导到金属褶皱线SSP结构的耦合。在太赫兹波段,为了减小加工难度,实现更简单的行波到表面波耦合,北京大学团队设计了如图19(d)所示^[194]的宽带耦合器。耦合器中包括了锥形平行板波导和的深度渐变光栅。锥形平行板波导主要用将入射能量压缩到亚波长尺度从而提升耦合效率。渐变光栅可以实现TEM模式波矢到SSP表面波波矢的平滑过渡。实验证明,该耦合器在SSP的整个频带都有较好的工作特性,但此种方法激发的SSP其传输方式不能灵活操控。在后续工作中该团队使用了多个狭缝阵列,通过斜入射光来完成SSP的可控激励和传输,其设计的定向激发器的结构如图19(e)所示^[195]。当入射波束从背面照射耦合区域时,在结构的上表面每一个狭缝都作为独立的激励源激发SSP模式沿光栅表面传输。不同源之间的SSP模式会产生相互干涉,这样表面波就只沿一个方向传输。同样道理,通过狭缝的耦合,反过来表面波也可以转换成远场波束。此时,每一个狭缝都可以看作由表面波馈电的辐射源。各个辐射源辐射的电磁波在空间中干涉,形成具有一定指向的窄波束,如图19(f)所示^[195]。为了提升定向耦合的效率和定性性,此课题组将金属狭缝优化为周期金属散射圆柱。双向SSP耦合效率提升至90%以上,定向耦合效率也可以达到80%以上,通过调节入射角度可以改变带宽和耦合方向^[196]。除此之外,多功能的SSP耦合器也在应用中具有很大潜力。北京大学团队结合了几何相位超表面和传输相位

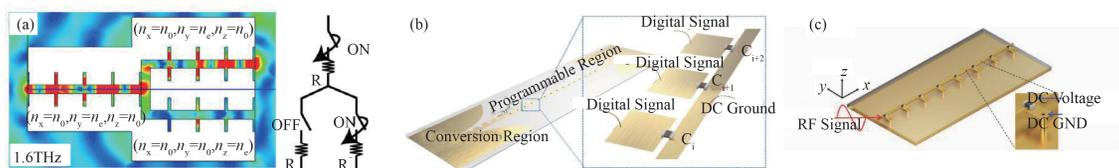


图18 (a)基于可重构SSP波导的多路复用器^[179], (b)结合了可调电容器的开路型光栅^[182], (c)结合了可调电容器的短路型光栅^[183]

Fig. 18 (a) The imaging of multiplexer based on reconfigurable SSP waveguide^[179], (b) the open-end grating with combination of varactors^[182], (c) the short-end grating with combination of varactors^[183]

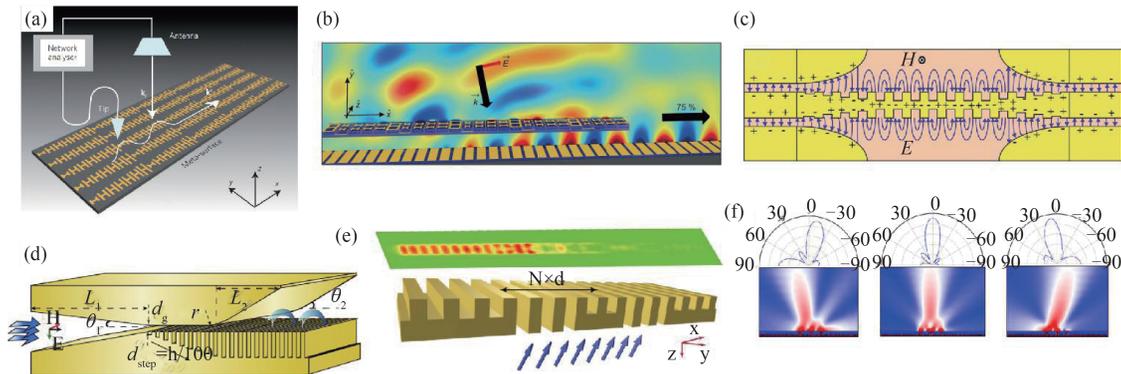


图 19 (a)基于反射型超表面的 SSP 耦合器^[190], (b)基于透射型超表面的 SSP 耦合器^[191], (c)共面波导到超薄光栅耦合器^[192], (d)平面反射型光栅 SSP 耦合器结构示意图^[194], (e) SSP 定向激发器的结构示意图^[195], (f) $f=0.36\text{ THz}, 0.38\text{ THz}, 0.40\text{ THz}$ 时的远场方向图及空间二维电场幅度分布^[195]

Fig. 19 (a) The SSP coupler based on reflective metasurfaces^[190], (b) the SSP coupler based on transmissive metasurfaces^[191], (c) the conversion between SSP structure and the conventional coplanar waveguide^[192], (d) the schematic of a coupler for the reflective metallic grating^[194], (e) the sketch of directional SSP coupler^[195], (f) the far-field angular scattering patterns and the near-field two-dimensional electric field distributions at $0.36\text{ THz}, 0.38\text{ THz},$ and 0.40 THz ^[195]

超表面提出一种多功能耦合器,集成了 SSP 耦合和异常反射两种功能。通过控制入射波的激发即可控制耦合器的功能^[197]。

5 总结与展望

本文首先介绍了传统的光学表面等离子激元,然后详细阐述了太赫兹波段的 SSP 和 GSP 的基本原理和发展历程,并对表面等离子激元在太赫兹波段的新颖辐射源、无源器件、超分辨率成像及其他领域的应用进行了评述。不难发现,由于太赫兹表面等离子激元的强局附性和可调节性等优点,基于太赫兹表面等离子激元的器件有其独特优势。近年来,随着太赫兹科学技术的发展,太赫兹表面等离子激元在国际上受到很大关注,相关研究工作不断深入,并取得了许多令人瞩目的成果,在填补太赫兹“空白”方面做出了实质性的贡献。当然,太赫兹表面等离子激元虽然具有极其诱人的应用前景,但目前大多数研究仍停留在实验室阶段,还有很多实用化的技术难题需要解决。我们认为,该领域未来进一步发展的方向包括:1)进一步拓展太赫兹表面等离子激元的应用范围,提升器件的性能,降低器件制造难度,尽快将器件实用化;2)深入研究和发新型太赫兹表面等离子激元的结构,寻找损耗更低、局附性更强、灵活度更高的表面等离子激元结构;3)利用太赫兹表面等离子激元减小太赫兹辐射源的体积,增大辐射功率,提高辐射频率和效率,探索降低辐射源的电压电流阈值的新机制,实现片上太赫兹辐射源;4)目前主流

的太赫兹超透镜只能实现对高对比度点目标的成像,因此基于表面等离子激元对于凋落波的放大作用,探索和发展更实用化的远场太赫兹超透超镜,对生物医学成像、层析成像、无损检测及电路缺陷检测等应用都有重要价值;5)鉴于现阶段很多基于表面等离子激元的无源器件性能都比较优越,建议下一步积极研发太赫兹波段的系统设备,比如通信设备、医疗诊断设备、探测设备、频谱设备和成像设备等;6)利用表面等离子激元增强太赫兹频谱技术的灵敏度,特别是局域表面等离子激元结构和其他基于表面等离子激元的谐振结构,可极大增强太赫兹频谱设备的灵敏度,这对材料科学、病症的早期诊断以及药品成分分析等具有重要意义。

References

- [1] Maier S A, Atwater H A. Plasmonics: Localization and guiding of electromagnetic energy in metal/ dielectric structures [J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **98**(1): 011101.
- [2] Hayashi S, Okamoto T. Plasmonics: visit the past to know the future [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2012, **45**: 433001.
- [3] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics [J]. *Nature*, 2003, **424**: 824–830.
- [4] Stiles P L, Dieringer J A, Shah N C, *et al.* Surface-enhanced Raman spectroscopy [J]. *Annu. Rev. Anal. Chem.*, 2008, **1**: 601–626.
- [5] Gramotnev D K, Bozhevolnyi S I. Plasmonics beyond the diffraction limit [J]. *Nature Photon.*, 2010, **4**: 83–91.
- [6] MacDonald K F, Sá mson Z L, Stockman M I, *et al.* Ultrafast active plasmonics [J]. *Nature Photon.*, 2009, **3**: 55–58.
- [7] Huidobro P A, Nesterov M L, Martín-Moreno L, *et al.*

- Transformation optics for plasmonics [J]. *Nano Lett.*, 2010, **10**: 1985–1990.
- [8] Kauranen M, Zayats A V. Nonlinear plasmonics [J]. *Nature Photon.*, 2012, **6**: 737–748.
- [9] Tame M S, McEnery K R, Özdemir S K, *et al.* Quantum plasmonics [J]. *Nature Phys.*, 2013, **9**: 329–340.
- [10] Berini P, Leon I D. Surface plasmon – polariton amplifiers and lasers [J]. *Nature Photon.*, 2012, **6**: 16–24.
- [11] Grigorenko A N, Polini M, Novoselov K S. Graphene plasmonics [J]. *Nature Photon.*, 2012, **6**: 749–758.
- [12] Wood R W. On a remarkable case of uneven distribution of light in a diffraction grating spectrum [J]. *Proceedings of the Physical Society of London*, 1902, **18**(1): 269–275.
- [13] Pines D. Collective energy losses in solids [J]. *Rev. Mod. Phys.*, 1956, **28**(3): 184.
- [14] Fano U. Atomic Theory of electromagnetic interactions in dense materials [J]. *Phys. Rev.*, 1956, **103**(5): 1202.
- [15] Ritchie R H. Plasma losses by fast electrons in thin films [J]. *Phys. Rev.*, 1957, **106**(5): 874–881.
- [16] Kretschmann E, Reather H. Radiative decay of non-radiative surface plasmons excited by light [J]. *Z. Naturforsch.*, 1968, **23A**: 2135–2136.
- [17] Otto A. Excitation of nonradiative surface plasma waves in silver by the method of frustrated total reflection [J]. *Z. Phys.*, 1968, **216**(4): 398–410.
- [18] Maier S A. Plasmonics: fundamentals and applications [M]. Springer Science & Business Media, 2007.
- [19] Zayats A V, Smolyaninov I I, Maradudin A A. Nano-optics of surface plasmon polaritons [J]. *Phys. Rep.*, 2005, **408**(3): 131–314.
- [20] Nie S, Emory S R. Probing single molecules and single nanoparticles by surface-enhanced Raman scattering [J]. *Science*, 1997, **275**(5303): 1102–1106.
- [21] Barnes W L, Murray W A, Dintinger J, *et al.* Surface plasmon polaritons and their role in the enhanced transmission of light through periodic arrays of subwavelength holes in a metal film [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **92**(10): 107401.
- [22] Smolyaninov I I, Elliott J, Zayats A V, *et al.* Far-field optical microscopy with a nanometer-scale resolution based on the in-plane image magnification by surface plasmon polaritons [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **94**(5): 057401.
- [23] Brongersma M L, Kik P G. Surface plasmon nanophotonics [M]. Springer, 2007.
- [24] Luo X, Ishihara T. Surface plasmon resonant interference nanolithography technique [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(23): 4780–4782.
- [25] Homola J, Yee S S, Gauglitz G. Surface plasmon resonance sensors: review [J]. *Sensor Actuat B-Chem.*, 1999, **54**(1): 3–15.
- [26] Derkacs D, Lim S H, Matheu P, *et al.* Improved performance of amorphous silicon solar cells via scattering from surface plasmon polaritons in nearby metallic nanoparticles [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(9): 93103–93103.
- [27] Okamoto K, Niki I, Shvartser A, *et al.* Surface-plasmon-enhanced light emitters based on InGaN quantum wells [J]. *Nature Mater.*, 2004, **3**(9): 601–605.
- [28] Mudry E, Belkebir K, Girard J, *et al.* Structured illumination microscopy using unknown speckle patterns [J]. *Nature Photon.*, 2012, **6**(5): 312–315.
- [29] Ponsetto J L, Wei F, Liu Z. Localized plasmon assisted structured illumination microscopy for wide-field high-speed dispersion-independent super resolution imaging [J]. *Nanoscale*, 2014, **6**(11): 5807–5812.
- [30] Wei F, Lu D, Shen H, *et al.* Wide field super-resolution surface imaging through plasmonic structured illumination microscopy [J]. *Nano Lett.*, 2014, **14**(8): 4634–4639.
- [31] Wei F, Ponsetto J L, Liu Z. Plasmonic structured illumination microscopy [J]. *Nano Lett.*, 2010, **10**(7): 2531–2536.
- [32] Jeon T I, Zhang J, Grischkowsky D. THz Sommerfeld wave propagation on a single metal wire [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(16): 161904.
- [33] Jeon T I, Grischkowsky D. THz Zenneck surface wave (THz surface plasmon) propagation on a metal sheet [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(6): 061113.
- [34] Hanham S M, Fernandez-Dominguez A I, Teng J H, *et al.* Broadband terahertz plasmonic response of touching InSb disks [J]. *Adv. Mater.*, 2012, **24**(35): OP226–OP230.
- [35] Pendry J B, Martín-Moreno L, García-Vidal F J. Mimicking surface plasmons with structured surfaces [J]. *Science*, 2004, **305**(5685): 847–848.
- [36] Hibbins A P, Evans B R, Sambles J R. Experimental verification of designer surface plasmons [J]. *Science*, 2005, **308**(5722): 670–672.
- [37] Williams C R, Andrews S R, Maier S A, *et al.* Highly confined guiding of terahertz surface plasmon polaritons on structured metal surfaces [J]. *Nature Photon.*, 2008, **2**(3): 175–179.
- [38] Tang H H, P K Liu. Terahertz far-field super-resolution imaging through spoof surface plasmons illumination [J]. *Opt. Lett.*, 2015, **40**(24): 5822–5825.
- [39] Maier S A, Andrews S R, Martín-Moreno L, *et al.* Terahertz surface plasmon-polariton propagation and focusing on periodically corrugated metal wires [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **97**(17): 176805.
- [40] Wang K, Mittleman D M. Dispersion of surface plasmon polaritons on metal wires in the terahertz frequency range [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **96**(15): 157401.
- [41] Fernández-Domínguez A I, Williams C R, García-Vidal F J, *et al.* Terahertz surface plasmon polaritons on a helically grooved wire [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **93**(14): 141109.
- [42] Rütting F, Fernández-Domínguez A I, Martín-Moreno L, *et al.* Subwavelength chiral surface plasmons that carry tuneable orbital angular momentum [J]. *Phys. Rev. B*, 2012, **86**(7): 075437.
- [43] Fernández-Domínguez A I, Moreno E, Martín-Moreno L, *et al.* Terahertz wedge plasmon polaritons [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(13): 2063–2065.
- [44] Gao Z, Zhang X, Shen L. Wedge mode of spoof surface plasmon polaritons at terahertz frequencies [J]. *J. Appl. Phys.*, 2010, **108**(11): 113104.
- [45] Martín-Cano D, Nesterov M L, Fernandez-Dominguez A I, *et al.* Domino plasmons for subwavelength terahertz circuitry [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(2): 754–764.
- [46] Fernández-Domínguez A I, Moreno E, Martín-Moreno

- L, *et al.* Guiding terahertz waves along subwavelength channels [J]. *Phys. Rev. B*, 2009, **79**(23): 233104.
- [47] Jiang T, Shen L, Wu J, *et al.* Realization of tightly confined channel plasmon polaritons at low frequencies [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, **99**(26): 261103.
- [48] Martin-Cano D, Quevedo-Teruel O, Moreno E, *et al.* Waveguided spoof surface plasmons with deep-subwavelength lateral confinement [J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(23): 4635–4637.
- [49] Kumar G, Cui A, Pandey S, *et al.* Planar terahertz waveguides based on complementary split ring resonators [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(2): 1072–1080.
- [50] Lockyear M J, Hibbins A P, Sambles J R. Microwave surface-plasmon-like modes on thin metamaterials [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, **102**(7): 073901.
- [51] Gan Q, Fu Z, Ding Y J, Bartoli F J. Ultrawide-bandwidth slow-light system based on THz plasmonic graded metallic grating structures [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, **100**(25): 256803.
- [52] Gan Q, Ding Y J, Bartoli F J. “Rainbow” trapping and releasing at telecommunication wavelengths [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, **102**(5): 056801.
- [53] Pang Y, Wang J, Ma H, *et al.* Spatial k-dispersion engineering of spoof surface plasmon polaritons for customized absorption [J]. *Sci. Rep.*, 2016, **6**: 29429.
- [54] Shen X, Cui T J, Martin-Cano D, *et al.* Conformal surface plasmons propagating on ultrathin and flexible films [J]. *PNAS*, 2013, **110**(1): 40–45.
- [55] Gao X, Zhou L, Liao Z, *et al.* An ultra-wideband surface plasmonic filter in microwave frequency [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2014, **104**(19): 191603.
- [56] Zhang H C, Liu S, Shen X, *et al.* Broadband amplification of spoof surface plasmon polaritons at microwave frequencies [J]. *Laser Photon. Rev.*, 2015, **9**(1): 83–90.
- [57] Zhang H C, Fan Y, Guo J, *et al.* Second-harmonic generation of spoof surface plasmon polaritons using nonlinear plasmonic metamaterials [J]. *ACS Photonics*, 2015, **3**(1): 139–146.
- [58] Xu J J, Zhang H C, Zhang Q, *et al.* Efficient conversion of surface-plasmon-like modes to spatial radiated modes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2015, **106**(2): 021102.
- [59] Yu N, Wang Q J, Kats M A, *et al.* Designer spoof surface plasmon structures collimate terahertz laser beams [J]. *Nature Mater.*, 2010, **9**(9): 730–735.
- [60] Miyamaru F, Kamijyo M, Hanaoka N, *et al.* Controlling extraordinary transmission characteristics of metal hole arrays with spoof surface plasmons [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, **100**(8): 081112.
- [61] Pors A, Moreno E, Martin-Moreno L, *et al.* Localized spoof plasmons arise while texturing closed surfaces [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2012, **108**(22): 223905.
- [62] Shen X, Cui T J. Ultrathin plasmonic metamaterial for spoof localized surface plasmons [J]. *Laser Photon. Rev.*, 2014, **8**(1): 137–145.
- [63] Monnai Y, Altmann K, Jansen C, *et al.* Terahertz beam steering and variable focusing using programmable diffraction gratings [J]. *Opt. Express*, 2013, **21**(2): 2347–2354.
- [64] Yang J, Wang J, Feng M, *et al.* Achromatic flat focusing lens based on dispersion engineering of spoof surface plasmon polaritons [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2017, **110**(20): 203507.
- [65] Wan X, Yin J Y, Zhang H C, *et al.* Dynamic excitation of spoof surface plasmon polaritons [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2014, **105**(8): 083502.
- [66] Xu Z, Mazumder P. Bio-Sensing by mach-zehnder interferometer comprising doubly-corrugated spoofed surface plasmon polariton (DC-SSPP) waveguide [J]. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, 2012, **2**(4): 460–466.
- [67] Han Y, Li Y, Ma H, *et al.* Multibeam antennas based on spoof surface plasmon polaritons mode coupling [J]. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2017, **65**(3): 1187–1192.
- [68] Wang Z, Wang J, Ma H, *et al.* High-efficiency real-time waveform modulator for free space waves based on dispersion engineering of spoof surface plasmon polaritons [J]. *J Phy D: Appl Phys.*, 2017, **50**(21): 215104.
- [69] Wang Z, Wang J, Wang X, *et al.* Real-time waveform modulator based on dispersion engineering of magnetic surface plasmons [J]. *J Phy D: Appl Phys.*, 2018, **123**(24): 245106.
- [70] Dai J, Dyakov S A, Yan M. Enhanced near-field radiative heat transfer between corrugated metal plates: Role of spoof surface plasmon polaritons [J]. *Phys. Rev. B*, 2015, **92**(3): 035419.
- [71] Su H, Shen X, Su G, *et al.* Efficient generation of microwave plasmonic vortices via a single deep-subwavelength meta-particle [J]. *Laser Photon. Rev.*, 2018, **12**(9): 1800010.
- [72] Brongersma M L, Shalaev V M. The case for plasmonics [J]. *Science*, 2010, **328**(5977): 440–441.
- [73] Naik G V, Shalaev V M, Boltasseva A. Alternative plasmonic materials: beyond gold and silver [J]. *Adv. Mater.*, 2013, **25**(24): 3264–3294.
- [74] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, *et al.* Electric field effect in atomically thin carbon films [J]. *Science*, 2004, **306**(5696): 666–669.
- [75] Geim A K, Novoselov K S. The rise of graphene [M]. *Nanoscience and Technology: A Collection of Reviews from Nature Journals.*, 2010: 11–19.
- [76] Mikhailov S A, Ziegler K. New electromagnetic mode in graphene [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, **99**(1): 016803.
- [77] Bao Q, Loh K P. Graphene photonics, plasmonics, and broadband optoelectronic devices [J]. *ACS Nano*, 2012, **6**(5): 3677–3694.
- [78] De Abajo F J G. Graphene plasmonics: challenges and opportunities [J]. *ACS Photonics*, 2014, **1**: 135–152.
- [79] Fei Z, Rodin A S, Andreev G O, *et al.* Gate-tuning of graphene plasmons revealed by infrared nano-imaging [J]. *Nature*, 2012, **487**(7405): 82–85.
- [80] Chen J, Badioli M, Alonso-González P, *et al.* Optical nano-imaging of gate-tunable graphene plasmons [J]. *Nature*, 2012, **487**(7405): 77–81.
- [81] Yang G, Lee C, Kim J, *et al.* Flexible graphene-based chemical sensors on paper substrates [J]. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2013, **15**(6): 1798–1801.
- [82] Zhao T, Hu M, Zhong R, *et al.* Cherenkov terahertz radiation from graphene surface plasmon polaritons excited by an electron beam [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2017, **110**(23): 231102.

- [83] Malard L M, Pimenta M A A, Dresselhaus G, *et al.* Raman spectroscopy in graphene [J]. *Phys. Rep.*, 2009, **473** (5): 51–87.
- [84] Christensen J, Manjavacas A, Thongrattanasiri S, *et al.* Graphene plasmon waveguiding and hybridization in individual and paired nanoribbons [J]. *ACS Nano*, 2011, **6** (1): 431–440.
- [85] Andryieuski A, Lavrinenko A V, Chigrin D N. Graphene hyperlens for terahertz radiation [J]. *Phys. Rev. B*, 2012, **86**(12): 121108.
- [86] Forati E, Hanson G W, Yakovlev A B, *et al.* Planar hyperlens based on a modulated graphene monolayer [J]. *Phys. Rev. B*, 2014, **89**(8): 081410.
- [87] Dhillon S S, Vitiello M S, Linfield E H, *et al.* The 2017 terahertz science and technology roadmap [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2017, **50**(4): 043001.
- [88] Fülöp J A, Pálfalvi L, Almási G, *et al.* Design of high-energy terahertz sources based on optical rectification [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**: 12311 – 12327.
- [89] Samoska L A. An overview of solid-state integrated circuit amplifiers in the submillimeter-wave and THz regime [J]. *IEEE Trans. THz Sci. Technol.*, 2011, **1**: 9 – 24.
- [90] Parker R K, Jr. Abrams R H, Danly B G, *et al.* Vacuum electronics [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 2002, **50**: 835 – 845.
- [91] Booske J H. Plasma physics and related challenges of millimeter-wave-to-terahertz and high power microwave generation [J]. *Phys. Plasma*, 2008, **15**(5): 055502.
- [92] Booske J H, Dobbs R J, Joye C D, *et al.* Vacuum Electronic High Power Terahertz Sources [J]. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, 2011, **1**(1): 54–75.
- [93] Vesseur E J R, Aizpurua J, Coenen T, *et al.* Plasmonic excitation and manipulation with an electron beam [J]. *MRS bulletin.*, 2012, **37**(08): 752–760.
- [94] Cai W, Sainidou R, Xu J, Polman A, *et al.* Efficient Generation of Propagating Plasmons by Electron Beams [J]. *Nano Lett.*, 2009, **9**(3): 1176–1181.
- [95] Matsui T A. Brief Review on Metamaterial-Based Vacuum Electronics for Terahertz and Microwave Science and Technology [J]. *J. Infrared Millim. Te.*, 2017, **38** (9): 1140–1161.
- [96] Shin Y, So J, Jang K, *et al.* Superradiant terahertz Smith-Purcell radiation from surface plasmon excited by counter-streaming electron beams [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90** (3): 031502.
- [97] Zhang Y, Hu M, Yang Y, *et al.* Terahertz radiation of electron beam - cylindrical mimicking surface plasmon wave interaction [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2009, **42**: 045211.
- [98] Liu S, Hu M, Zhang Y, *et al.* Electromagnetic diffraction radiation of a subwavelength-hole array excited by an electron beam [J]. *Phys. Rev. E*, 2009, **80**(3): 036602.
- [99] Zhang Y, Zhou Y, Dong L. THz radiation from two electron-beams interaction within a bi-grating and a sub-wavelength holes array composite sandwich structure [J]. *Opt. Express*, 2013, **21**(19): 1951–21960.
- [100] Zhou Y, Zhang Y, Jiang G, *et al.* Coherent terahertz radiation generated from a square-shaped free-electron beam passing through multiple stacked layers with sub-wavelength holes [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2015, **48** (34): 345102.
- [101] Zhang Y, Zhou Y, Gang Y, *et al.* Coherent Terahertz radiation from multiple electron beams excitation within a plasmonic crystal-like structure [J]. *Sci. Rep.*, 2017, **7**: 41116.
- [102] Zhang Y X, Zhou Y C, Dong L, *et al.* Coherent terahertz radiation from high-harmonic component of modulated free-electron beam in a tapered two-asymmetric grating structure [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, **101**(12):123503.
- [103] Liu Y Q, Kong L B, Du C H, *et al.* A terahertz electronic source based on the spoof surface plasmon with sub-wavelength metallic grating [J]. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2016, **44**(6): 930–937.
- [104] Zhu J F, Du C H, Bao L Y, *et al.* Regenerated amplification of terahertz spoof surface plasmon radiation [J]. *New J. Phys.*, 2019, **21**(3): 033021.
- [105] Zhu J F, Du C H, Huang T J, *et al.* Free-electron-driven beam-scanning terahertz radiation [J]. *Opt. express*, 2019, **27**(18): 26192–26202.
- [106] Zhu J F, Du C H, Li F H, *et al.* Free-electron-driven multi-frequency terahertz radiation on a super-grating structure[J]. *IEEE Access*, 2019, **7**: 181184–181190.
- [107] Liu Y Q, Du C H, Liu P K. Terahertz electronic source based on spoof surface plasmons on the doubly corrugated metallic waveguide [J]. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2016, **44**(12): 3288–3294.
- [108] Kong L B, Huang C P, Du C H, *et al.* Enhancing spoof surface-plasmons with gradient metasurfaces [J]. *Sci. Rep.*, 2015, **5**: 8772.
- [109] Okajima A, Matsui T. Electron-beam induced terahertz radiation from graded metallic grating [J]. *Opt. Express*, 2014, **22**(14): 17490–17496.
- [110] So J K, García de Abajo F J, MacDonald K F, *et al.* Amplification of the evanescent field of free electrons [J]. *ACS Photonics*, 2015, **2**(9): 1236–1240.
- [111] Shin Y M, Barnett L R. Intense wideband terahertz amplification using phase shifted periodic electron-plasmon coupling [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(9): 091501.
- [112] Liu Y Q, Liu P K. Excitation of surface plasmon polaritons by electron beam with graphene ribbon arrays [J]. *J. Appl. Phys.*, 2017, **121**(11): 113104.
- [113] Liu S, Zhang P, Liu W, *et al.* Surface polariton Cherenkov light radiation source [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2012, **109** (15): 153902.
- [114] Gong S, Zhao T, Sanderson M, *et al.* Transformation of surface plasmon polaritons to radiation in graphene in terahertz regime [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2015, **106**(22): 223107.
- [115] Tao Z, Ren-Bin Z, Min H, *et al.* Tunable terahertz radiation from arbitrary profile dielectric grating coated with graphene excited by an electron beam [J]. *Chinese Phys. B*, 2015, **24**(9): 094102.
- [116] Zhao T, Gong S, Hu M, *et al.* Coherent and tunable terahertz radiation from graphene surface plasmon polaritons excited by cyclotron electron beam [J]. *Sci. Rep.*, 2015, **5**: 16059.
- [117] Chang H K, Kim Y K. UV-LIGA process for high aspect ratio structure using stress barrier and C-shaped etch

- hole [J]. *Sensor Actuat A - Phys.*, 2000, **84** (3) : 342–350.
- [118] Liu Y Q, Kong L B, Du C H, *et al.* Spoof surface plasmon modes on doubly-corrugated metal surfaces at terahertz frequencies [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2016, **49** (23) : 235501.
- [119] Liu Y Q, Kong L B, Liu P K. Long-range spoof surface plasmons on the doubly corrugated metal surfaces [J]. *Opt. Commun.*, 2016, **370**: 13–17.
- [120] Liu L, Li Z, Gu C, *et al.* Multi-channel composite spoof surface plasmon polaritons propagating along periodically corrugated metallic thin films [J]. *J. Appl. Phys.*, 2014, **116**(1) : 013501.
- [121] Gao X, Shi J H, Ma H F, *et al.* Dual-band spoof surface plasmon polaritons based on composite-periodic gratings [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2012, **45**(50) : 505104.
- [122] Pandey S, Gupta B, Nahata A. Terahertz plasmonic waveguides created via 3D printing [J]. *Opt. Express*, 2013, **21**(21) : 24422–24430.
- [123] Liang Y, Yu H, Zhang H C, *et al.* On-chip sub-terahertz surface plasmon polariton transmission lines in CMOS [J]. *Sci. Rep.*, 2015, **5**: 14853.
- [124] Zhang H C, Cui T J, Zhang Q, *et al.* Breaking the challenge of signal integrity using time-domain spoof surface plasmon polaritons [J]. *ACS photonics*, 2015, **2** (9) : 1333–1340.
- [125] Ahmadi-Boroujeni M, Altmann K, Scherger B, *et al.* Terahertz parallel-plate ladder waveguide with highly confined guided modes [J]. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, 2013, **3**(1) : 87–95.
- [126] Kim S H, Oh S S, Kim K J, *et al.* Subwavelength localization and toroidal dipole moment of spoof surface plasmon polaritons [J]. *Phys. Rev. B*, 2015: **91**(3), 035116.
- [127] Xu B, Li Z, Liu L, *et al.* Tunable band-notched coplanar waveguide based on localized spoof surface plasmons [J]. *Opt. Lett.*, 2015, **40**(20) : 4683–4686.
- [128] Liu J, Mendis R, Mittleman D M. Designer reflectors using spoof surface plasmons in the terahertz range [J]. *Phys. Rev. B*, 2012, **86**(24) : 241405.
- [129] Tang H H, Huang B, Huang T J, *et al.* Efficient waveguide mode conversions by spoof surface plasmon polaritons at terahertz frequencies [J]. *IEEE Photonics J*, 2017, **9**(1) : 1–10.
- [130] Yin J Y, Ren J, Zhang H C, *et al.* Broadband frequency-selective spoof surface plasmon polaritons on ultrathin metallic structure [J]. *Sci. Rep.*, 2015, **5**: 8165.
- [131] Liu X, Feng Y, Chen K, *et al.* Planar surface plasmonic waveguide devices based on symmetric corrugated thin film structures [J]. *Opt. Express*, 2014, **22** (17) : 20107–20116.
- [132] Han Z, Zhang Y, Bozhevolnyi S I. Spoof surface plasmon-based stripe antennas with extreme field enhancement in the terahertz regime [J]. *Opt. Lett.*, 2015, **40** (11) : 2533–2536.
- [133] Cui T J, Shen X. THz and microwave surface plasmon polaritons on ultrathin corrugated metallic strips [J]. *Terahertz Science and Technology*, **2013** **6**(2) : 147–164.
- [134] Zhou Y J, Yang B J. A 4-way wavelength demultiplexer based on the plasmonic broadband slow wave system [J]. *Opt. Express*, 2014, **22**(18) : 21589–21599.
- [135] Zhou Y J, Cui T J. Multidirectional surface-wave splitters [J]. *Appl. Phys. Lett.* 2011, **98**(22) : 221901.
- [136] Gan Q, Fu Z, Ding Y J, *et al.* Bidirectional subwavelength slit splitter for THz surface plasmons [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(26) : 18050–18055.
- [137] Zhou Y J, Yang X X, Cui T J. A multidirectional frequency splitter with band-stop plasmonic filters [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2014, **115**(12) : 123105.
- [138] Yi H, Qu S W, Bai X. Antenna array excited by spoof planar plasmonic waveguide [J]. *IEEE Antenn. Wirel. Pr.*, 2014, **13**: 1227–1230.
- [139] Yin J Y, Ren J, Zhang Q, *et al.* Frequency-controlled broad-angle beam scanning of patch array fed by spoof surface plasmon polaritons [J]. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2016, **64**(12) : 5181–5189.
- [140] Guan D F, You P, Zhang Q, *et al.* A wide-angle and circularly polarized beam-scanning antenna based on microstrip spoof surface plasmon polariton transmission line [J]. *IEEE Antenn. Wirel. Pr.*, 2017, **16**: 2538–2541.
- [141] Li Y, Zhang J, Ma H, *et al.* Microwave birefringent metamaterials for polarization conversion based on spoof surface plasmon polariton modes [J]. *Sci. Rep.*, 2016, **6**: 34518.
- [142] Yang J, Wang J, Li Y, *et al.* Broadband planar achromatic anomalous reflector based on dispersion engineering of spoof surface plasmon polariton [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2016, **109**(21) : 211901.
- [143] Chen H, Ma H, Wang J, *et al.* Broadband spoof surface plasmon polariton couplers based on transmissive phase gradient metasurface [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2017, **50**(37) : 375104.
- [144] Shi X, Qin J, Han Z. Enhanced terahertz sensing with a coupled comb-shaped spoof surface plasmon waveguide [J]. *Opt. Express*, 2017, **25**(1) : 278–283.
- [145] Ma Z, Hanham S M, P. Arroyo Huidobro, *et al.* Terahertz particle-in-liquid sensing with spoof surface plasmon polariton waveguides [J]. *APL Photonics*, 2017, **2** (11) : 116102.
- [146] Chen X, Fan W. Ultrasensitive terahertz metamaterial sensor based on spoof surface plasmon [J]. *Sci. Rep.*, 2017, **7**(1) : 2092.
- [147] Ng B, Wu J, Hanham S M, *et al.* Spoof plasmon surfaces: a novel platform for THz sensing [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2013, **1**(8) : 543–548.
- [148] Ng B, Hanham S M, Wu J, *et al.* Broadband terahertz sensing on spoof plasmon surfaces [J]. *ACS Photonics*, 2014, **1**(10) : 1059–1067.
- [149] Yao H, Zhong S. High-mode spoof SPP of periodic metal grooves for ultra-sensitive terahertz sensing [J]. *Opt. Express*, 2014, **22**(21) : 25149–25160.
- [150] Huidobro P A, Shen X, Cuerda J, *et al.* Magnetic localized surface plasmons [J]. *Phys. Rev. X*, 2014, **4**(2) : 021003.
- [151] Li Z, Xu B, Gu C, *et al.* Localized spoof plasmons in closed textured cavities [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2014, **104** (25) : 251601.
- [152] Zhang J, Liao Z, Luo Y, *et al.* Spoof plasmon hybridization [J]. *Laser Photon. Rev.*, 2017, **11**(1) : 1600191.

- [153] Chen L, Wei Y, Zang X, *et al.* Excitation of dark multipolar plasmonic resonances at terahertz frequencies [J]. *Sci. Rep.*, 2016, **6**: 22027.
- [154] Chen L, Xu N, Singh L, *et al.* Defect-Induced Fano Resonances in Corrugated Plasmonic Metamaterials [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2017, **5**(8): 1600960.
- [155] Shen X, Cui T J. Planar plasmonic metamaterial on a thin film with nearly zero thickness [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, **102**(21): 211909.
- [156] Gao F, Gao Z, Zhang Y, *et al.* Vertical transport of sub-wavelength localized surface electromagnetic modes [J]. *Laser Photon. Rev.*, 2015, **9**(5): 571–576.
- [157] Gao Z, Gao F, Zhang Y, *et al.* Forward/Backward Switching of Plasmonic Wave Propagation Using Sign-Reversal Coupling [J]. *Adv. Mater.*, 2017, **29** (26) : 1700018.
- [158] Liao Z, Pan B C, Shen X, *et al.* Multiple Fano resonances in spoof localized surface plasmons [J]. *Opt. Express*, 2014, **22**(13): 15710–15717.
- [159] Ferguson B, Zhang X C. Materials for terahertz science and technology [J]. *Nature Mater.*, 2002, **1**(1), 26.
- [160] Duling I, Zimdars D. Terahertz imaging: revealing hidden defects [J]. *Nature Photon.*, 2009, **3**(11): 630.
- [161] Chan W L, Deibel J, Mittleman D M. Imaging with terahertz radiation [J]. *Rep. Prog. Phys.*, 2007, **70** (8) : 1325.
- [162] Lee A W M, Qin Q, Kumar S, *et al.* Real-time terahertz imaging over a standoff distance (>25 meters) [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(14): 141125–141125.
- [163] Pendry J B, Negative refraction makes a perfect lens [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**(18): 3966.
- [164] Xiong Y, Liu Z, Sun C, *et al.* Two-dimensional imaging by far-field superlens at visible wavelengths [J]. *Nano Lett.*, 2007, **7**(11): 3360–3365.
- [165] Born M, Wolf E. Principles of optics [M]. Pergamon, New York 1980.
- [166] Betzig E, Finn P L, Weiner J S. Combined shear force and near-field scanning optical microscopy [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **60**(20): 2484–2486.
- [167] Huang T J, Liu J Y, Yin L Z, *et al.* Superfocusing of terahertz wave through spoof surface plasmons [J]. *Opt. Express*, 2018, **26**(18): 22722–22732.
- [168] Huang T J, Yin L Z, Shuang Y, *et al.* Far-field sub-wavelength resolution imaging by spatial spectrum sampling [J]. *Phys. Rev. Appl.*, 2019, **12**(3): 034046.
- [169] Fang N, Lee H, Sun C, *et al.* Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens [J]. *Science*, 2005, **308**(5721): 534–537.
- [170] Tang H H, Liu P K. Long-distance super-resolution imaging assisted by enhanced spatial Fourier transform [J]. *Opt. Express*, 2015, **23**(18): 23613–23623.
- [171] Tang H H, Liu P K. Terahertz metalenses for evanescent wave focusing and super-resolution imaging [J]. *J. Electromagnet. Wave Appl.*, 2015, **29**(13): 1776–1784.
- [172] Ju L, Geng B, Horn J, *et al.* Graphene plasmonics for tunable terahertz metamaterials [J]. *Nat. Nanotechnology*, 2011, **6**(10): 630–634.
- [173] Low T, Avouris P. Graphene plasmonics for terahertz to mid-infrared applications [J]. *ACS Nano*, 2014, **8**(2): 1086–1101.
- [174] Li P, Taubner T. Broadband subwavelength imaging using a tunable graphene-lens [J]. *ACS Nano*, 2012, **6** (11): 10107–10114.
- [175] Li P, Wang T, Böckmann H, *et al.* Graphene-enhanced infrared near-field microscopy [J]. *Nano Lett.*, 2014, **14** (8): 4400–4405.
- [176] Tang H H, Huang T J, Liu J Y, *et al.* Tunable Terahertz Deep Subwavelength Imaging Based on a Graphene Monolayer [J]. *Sci Rep.*, 2017, **7**: 46283.
- [177] Liu J Y, Huang T J, Liu P K. Terahertz super-resolution imaging using four-wave mixing in graphene [J]. *Opt. Lett.*, 2018, **43**(9): 2102–2105.
- [178] Huang T J, Tang H H, Tan Y, *et al.* Terahertz super-resolution imaging based on subwavelength metallic grating [J]. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2019, **67**(10): 1109.
- [179] Song K, Mazumder P. Active terahertz spoof surface plasmon polariton switch comprising the perfect conductor metamaterial [J]. *IEEE Trans. Electron Dev.*, 2009, **56** (11): 2792–2799.
- [180] Aghadjani M, Mazumder P. Terahertz switch based on waveguide-cavity-waveguide comprising cylindrical spoof surface plasmon polariton [J]. *IEEE Trans. Electron Dev.*, 2015, **62**(4): 1312–1318.
- [181] Song K, Mazumder P. Dynamic terahertz spoof surface plasmon polariton switch based on resonance and absorption [J]. *IEEE Trans. Electron Dev.*, 2011, **58**(7): 2172–2176.
- [182] Zhang H C, Cui T J, Xu J, *et al.* Real-time controls of designer surface plasmon polaritons using programmable plasmonic metamaterial [J]. *Adv. Mater. Technol.*, 2017, **2**(1): 1600202.
- [183] Zhang X, Tang W X, Zhang H C, *et al.* A Spoof Surface Plasmon Transmission Line Loaded with Varactors and Short-Circuit Stubs and Its Application in Wilkinson Power Dividers [J]. *Adv. Mater. Technol.*, 2018, **3** (6) : 1800046.
- [184] Tang X L, Zhang Q, Hu S, *et al.* Capacitor-Loaded Spoof Surface Plasmon for Flexible Dispersion Control and High-Selectivity Filtering [J]. *IEEE Microw. Wirel. Comp.*, 2017, **27**(9): 806–808.
- [185] Zhang H C, He P H, Gao X, *et al.* Pass-band reconfigurable spoof surface plasmon polaritons [J]. *J. Phys.: Condens. Matter.*, 2018, **30**(13): 134004.
- [186] Kildishev A V, Boltasseva A, Shalaev V M. Planar photonics with metasurfaces [J]. *Science*, 2013, **339** (6125): 1232009.
- [187] Han F Y, Huang T J, Yin L Z, *et al.* Superfocusing plate of terahertz waves based on a gradient refractive index metasurface [J]. *J. Appl. Phys.*, 2018, **124** (20) : 204902.
- [188] Yin L Z, Huang T J, Han F Y, *et al.* Terahertz multi-channel metasurfaces with sparse unit cells [J]. *Opt. Lett.*, 2019, **44**(7): 1556–1559 (2019).
- [189] Han F Y, Li F H, Liu J Y, *et al.* Effective-Medium Characteristics of Reflective Metasurface: A Quasi-One-Port Network Theory [J]. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 2019, **67**(8): 3284–3296.
- [190] Sun S, He Q, Xiao S, *et al.* Gradient-index meta-sur-

- faces as a bridge linking propagating waves and surface waves [J]. *Nature Mater.*, 2012, **11**(5): 426–431.
- [191] Sun W, He Q, Sun S, *et al.* High-efficiency surface plasmon meta-couplers: concept and microwave-regime realizations [J]. *Light Sci. Appl.*, 2016, **5**(1): e16003.
- [192] Ma H F, Shen X, Cheng Q, *et al.* Broadband and high-efficiency conversion from guided waves to spoof surface plasmon polaritons [J]. *Laser Photon. Rev.*, 2014, **8**(1): 146–151.
- [193] Liu L, Li Z, Gu C, *et al.* Smooth bridge between guided waves and spoof surface plasmon polaritons [J]. *Opt. Lett.*, 2015, **40**(8): 1810–1813.
- [194] Tang H H, Ma T J, Liu P K. Experimental demonstration of ultra-wideband and high-efficiency terahertz spoof surface plasmon polaritons coupler [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2016, **108**(19): 191903.
- [195] Tang H H, Tan Y, Liu P K. Near-Field and Far-Field Directional Conversion of Spoof Surface Plasmon Polaritons [J]. *Sci Rep.*, 2016, **6**: 33496.
- [196] Huang T J, Yin L Z, Liu J Y, *et al.* High-efficiency directional excitation of spoof surface plasmons by periodic scattering cylinders [J]. *Opt. Lett.*, 2019, **44**(16): 3972–3975.
- [197] Yin L Z, Huang T J, Han F Y, *et al.* High-efficiency terahertz spin-decoupled meta-coupler for spoof surface plasmon excitation and beam steering [J]. *Opt. Express*, 2019, **27**(13): 18928–18939.