

2022年太赫兹人工表面等离子激元科技热点回眸

司黎明^{1,2,3},董芳会^{1,2,3},董琳^{1,2},张庆乐^{1,2},吕昕^{1,2,3}

1. 北京理工大学集成电路与电子学院,北京 100081
2. 毫米波与太赫兹技术北京市重点实验室,北京 100081
3. 北京理工大学长三角研究院,嘉兴 314019

摘要 随着第六代通信技术(6G)、空间态势感知等系统对高通量、高带宽要求的进一步提高,太赫兹技术成为国际学术界和工业界的研究热点。2022年,太赫兹人工表面等离子激元研究在国际上受到很大的关注,盘点了该领域的关键热点与新进展,包括基于太赫兹人工表面等离子激元的无源器件、有源器件、传感器、通信系统以及生物医药应用等。人工表面等离子激元对传输的电磁波具有亚波长的电场束缚能力和非线性色散特性,为太赫兹功能器件和系统应用的实现带来了新机遇。

关键词 太赫兹;人工表面等离子激元;传感器;通信

太赫兹(tera hertz, THz)波是指波长在0.03~3 mm范围的电磁波,对应的频率范围为0.1~10 THz,介于微波和红外波段之间^[1-2]。由于太赫兹处于微波和光波段之间,在兼具二者的许多优点的同时,还具备非电离、宽带、对非极性材料吸收小等特点,使其可以实现对不透明材料的高透射率,并且具备

低光子能量和区分材料的能力,这使得太赫兹波在成像、光谱学、生物传感和安全筛选应用中具有巨大的价值。此外,由于太赫兹波具有宽带特性和承载海量信息的能力,太赫兹波有望在下一代超高速通信中发挥重要作用^[3-6]。然而,太赫兹技术的发展仍然受到功能器件缺乏、器件尺寸通常较大并伴

收稿日期:2022-12-31;修回日期:2023-01-03

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFF0604801);国家自然科学基金项目(62271056,62171186,62201037,61527805);北京市自然科学基金-海淀原始创新联合基金项目(L222042);东南大学毫米波国家重点实验室2023年开放课题(K202326);航天九院国防科技重点实验室开放基金项目(6142221200201);北京理工大学基础研究基金中白国际合作项目(BITBLR2020014);高等学校学科科研创新引智计划项目(B14010)

作者简介:司黎明,副教授,研究方向为电磁场与微波技术,电子信箱:lms@bit.edu.cn

引用格式:司黎明,董芳会,董琳,等. 2022年太赫兹人工表面等离子激元科技热点回眸[J]. 科技导报, 2023, 41(1): 173-183; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2023.01.012

有相位失配以及自由空间光路占用过多空间的限制^[7-9]。因此,研制小型化、紧凑化的太赫兹频段功能器件是十分必要的。

表面等离子激元(surface plasmon polariton, SPP)是一种特殊的电磁极化模式,它是由光波入射到金属和介质表面时产生的电磁耦合现象产生的。因为这一特殊的电磁模式,使表面等离子激元具备显著的局域场增强、表面限制特性以及增强光波与物体之间的作用等特点^[10]。表面等离子激元有助于显著减小光学器件尺寸,同时还可以实现在亚波长尺度上对太赫兹波进行微调,因此其在太赫兹领域得到广泛研究。然而,金属对于太赫兹波相当于完美电导体,所以表面等离子激元在特定太赫兹频段并不能很好的限制表面电磁波。近几年,国内外科学家发现通过在金属表面加工周期性沟槽或特定结构就可以很好的束缚住太赫兹波,这种特定结构与金属表面结合产生的电磁模式被叫做人工表面等离子激元(spoof surface plasmon polariton, SSPP)^[11-16]。目前,大部分人工表面等离子激元采用的结构是:多米诺结构^[17]、一维凹槽阵列^[18]、二维孔阵列^[19]、V形凹槽^[20]。人工表面等离子激元具有低损耗、较大传播常数的特性,因此在紧凑、低剖面和高集成度太赫兹器件研究中有很大应用前景。此外,由于电磁波在垂直于人工表面等离子激元结构方向上衰减较快,可以减少相邻太赫兹器件的耦合。探索高性能和多功能人工表面等离子激元平面太赫兹器件具有重要意义。

随着太赫兹技术作为近年来受各国政府广泛重视的一个新兴学科和技术领域,太赫兹人工表面等离子激元的研究也逐渐成为热点。本文介绍2022年太赫兹人工表面等离子激元研究取得的最新进展。

1 太赫兹人工表面等离子激元无源器件

2022年,基于人工表面等离子激元在太赫兹频段低损耗、传播常数大、集成度高、小型化等特点,多种新特性和高性能的太赫兹波导、解复用器、负载、滤波器和天线等无源器件被提出。

太赫兹波导作为太赫兹片上传输系统的基础器件,深受广大学者的关注。但是大部分太赫兹波

导通常因其体积大、高损耗而受到限制。Zhang等^[21]通过利用周期性可旋转金属矩形柱作为人工表面等离子激元的凹槽,制备出了一种小型化、集成度高、可调控的片上波导。通过旋转波导上的旋转柱可以控制人工表面等离子激元2个分支之间的相位差和耦合。在0.58 THz时,该片上波导可以将旋转柱转到36°,产生相位相消的效果,以达到OFF状态,停止传输信号(图1)。同时转到0°、40°、55°时,该波导还会实现不同频率下不同端口输出。经过实验和仿真的验证,其具有很好的一致性。该片上波导具有很好的集成度以及可调控特性,有望应用于太赫兹片上传输系统中。

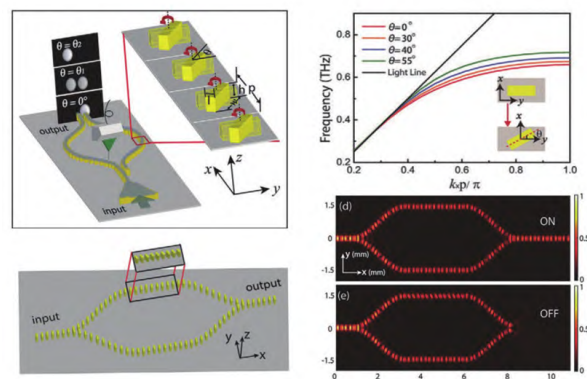


图1 可以实现片上集成可旋转的柱形太赫兹人工表面等离子激元器件

2022年,Li等^[22]通过带阻波导单元和人工表面等离子激元的结合实现了一个三端口的太赫兹频率解复用器(图2)。该复用器由3个人工表面等离子激元波导组成,每个波导由金属柱组合而成。通过改变金属柱尺寸,实现对其带阻效应的调节。经过实验和仿真验证,带阻波导单元长度为1 mm时,该复用器在0.578、0.632、0.683 THz下的消光比分别为21.5、18.0、23.9 dB。该复用器可以集成到太赫兹等离子激元片上系统中,对未来的太赫兹通信应用具有重要价值。

在太赫兹无线通信系统中,多端口电路、分频器、耦合器和混频器都需要良好的匹配负载来实现一个高容量的信号传输。针对传统太赫兹匹配负载辐射损耗大的缺点,Zhang等^[23]利用镍金属设计出一种人工表面等离子激元匹配负载(图3),可应用

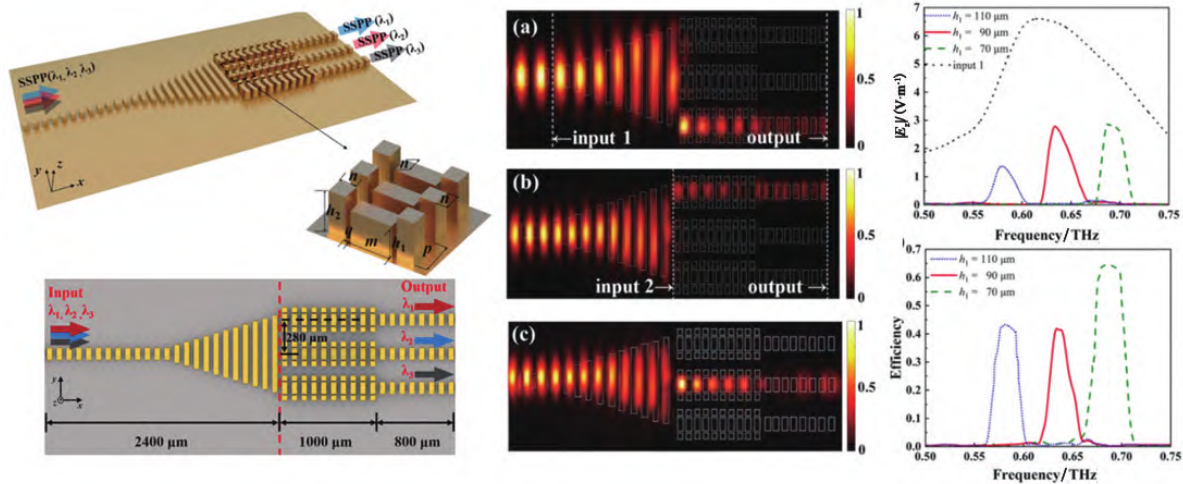


图2 基于带阻波导单元的太赫兹人工表面等离激元解复用器

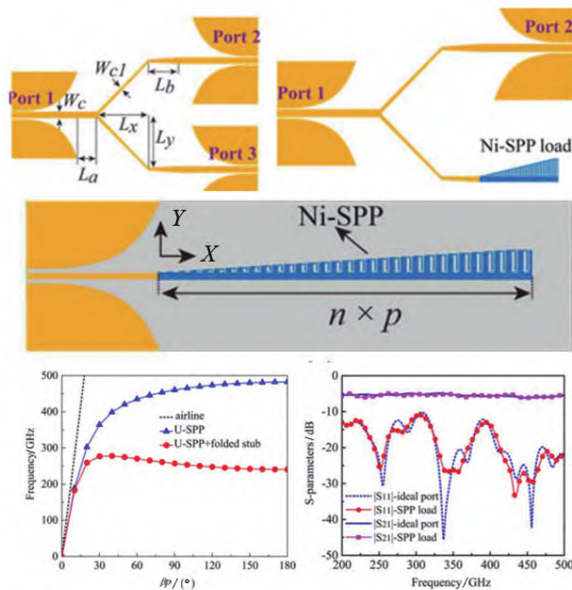


图3 适用于平面太赫兹电路的基于厚衬底微型化人工表面等离激元负载

在厚衬底支撑的太赫兹电路中。这种镍金属人工表面等离激元负载在 195~500 GHz 范围内可以达到回波损耗 (S11) 小于 -20 dB, 物理尺寸仅为 $1.7 \lambda_g \times 0.23 \lambda_g$ (λ_g 是 300 GHz 导波长)。该方法为以厚衬底支撑的太赫兹电路匹配负载的实现提供了一个有效途径。

太赫兹滤波器是传感器、通信系统和成像应用中不可或缺的器件, 通常设计指标要求具有低插入损耗、小型化、宽带化、平面化等特点。2022 年,

Zhu 等^[24]通过利用蚀刻互补开口谐振环设计了一种基于人工表面等离激元的太赫兹片上滤波器, 如图 4 所示。他们通过设计出不同尺寸的互补开口谐振环, 并将其集成在人工表面等离激元的凹槽中, 拓宽了滤波器的抑制频带, 增强了隔离度。经过仿真和实验验证, 在 128~158 GHz 的频率范围内, 滤波器的隔离度大于 10 dB。这种太赫兹滤波器具有结构紧凑、抑制频带宽等优点, 在太赫兹集成器件中具有潜在的应用前景。

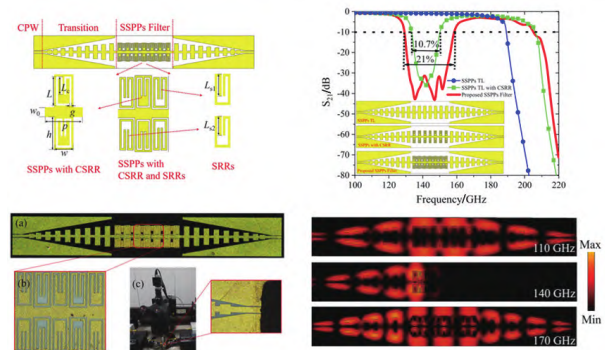


图4 基于人工表面等离激元的宽带抑制的紧凑型太赫兹片上滤波器

2022 年, Yan 等^[25]通过利用共面波导和人工表面等离激元结合, 并在其中间金属线上刻蚀交指结构的方法设计出了一个太赫兹带通滤波器(图 5)。该滤波器在 0.65~2.02 THz 通带内的回波损耗小于 -11 dB, 平均插入损耗为 -2 dB。实测结果与仿

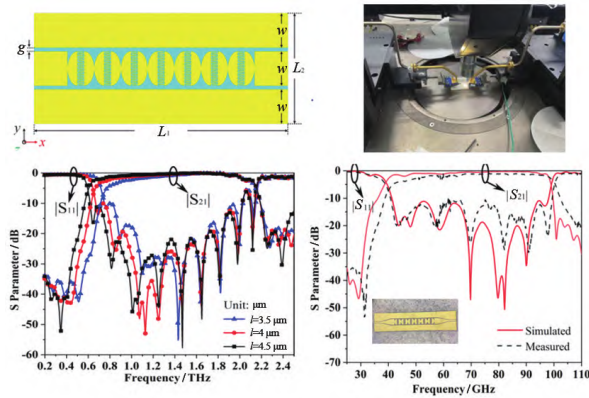


图5 基于共面波导和人工表面等离子激元的太赫兹带通滤波器的太赫兹带通滤波器

真结果吻合较好,因其加工制备简单,且集成度高,有望应用在太赫兹实际工程中。

太赫兹光导天线是产生超宽带太赫兹辐射的重要器件,在下一代无线通信、非电离成像、无损检测、光谱分析等方面都有重要的应用。然而,太赫兹光导天线的低输出效率阻碍了它的应用。Wang等^[26]在太赫兹光导天线中引入人工表面等离子激元结构来抑制宽带中的水平电极模式,如图6所示,与典型的共面条带线光导天线相比,在垂直方向上实现了大约2 dBi的高方向性,相对工作带宽高达48%。这项工作进一步提高了太赫兹光导天线输出功率,为太赫兹光导天线应用提供了一条可行的技术路线。

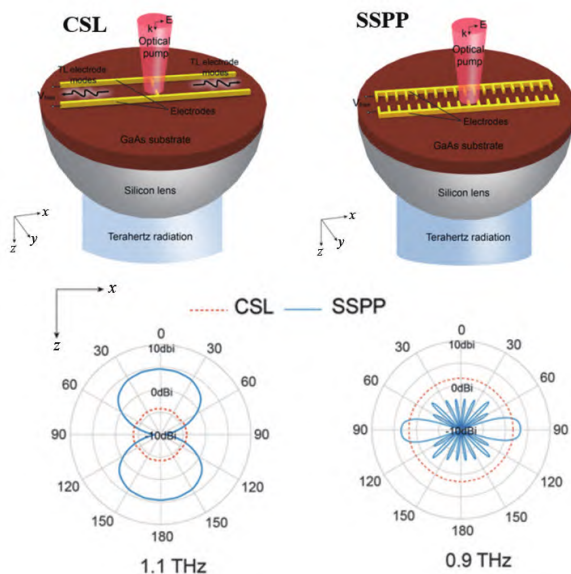


图6 利用人工表面等离子激元改进的太赫兹光导天线

2 太赫兹人工表面等离子激元有源器件

传统的无源人工表面等离子激元器件的功能是完全固定的,一旦制造出来就无法实现功能可重构。非线性器件也是微波电路中重要的组成部分,因为它们可以对入射波提供不同的频率响应,为了获得高效的非线性器件,必须添加一些特殊的结构或材料来增强非线性现象。通常,金属人工表面等离子激元结构在设计后具有固定的光学性质,但在设计中添加如半导体二极管、铁电材料、温度敏感材料和石墨烯等,就可以通过有源激励进行动态调制。

石墨烯(即单层碳原子)具有电子迁移率高、光学透明性好、导热性好、电场下导电性可调等独特特性,可以很好的应用在有源器件中。Feng等^[27]基于石墨烯提出了一种在太赫兹频率下具有显著相位调制的有源金属-石墨烯混合表面等离子器件(图7)。该结构中,利用周期性排列的石墨烯槽取代传统的人工表面等离子激元金属槽,通过施加栅极偏压改变表面等离子激元截止频率并调制慢波相位。通过仿真验证,在-0.5~0.5 V的低偏置条件下,人工表面等离子激元的截止频率从200 GHz移动到177 GHz,在195 GHz下的相位变化可达112°。由于石墨烯的电磁吸收特性,人工表面等离子激元的透过率从140 GHz移动到177 GHz,调制系数超过3 dB。这项工作提供了一种在太赫兹波段中研究有源调制的非互易拓扑人工表面等离子激元的新方法。

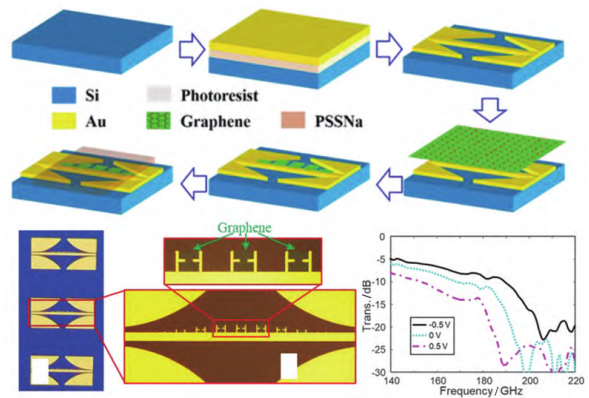


图7 有源可调节金属-石墨烯混合太赫兹表面等离子激元结构

可重构人工表面等离激元波导衰减器是微波应用的基础器件,然而,目前已存在的基于石墨烯人工表面等离激元波导的可调谐衰减器都是在微波频段,可应用在太赫兹频段的可调谐衰减器较少。Hlali等^[28]提出一种基于金属-石墨烯混合结构的太赫兹人工表面等离激元波导上的可调谐衰减器(图8)。通过偏置电压改变石墨烯的化学势,可以调节石墨烯的表面电导率,从而达到调节衰减的目的。通过仿真实验和测试,当化学势从0上升到0.5 eV时,这种衰减器的调节范围为6.02~14.32 dB。该可调谐衰减器可以很好的应用在太赫兹波段。

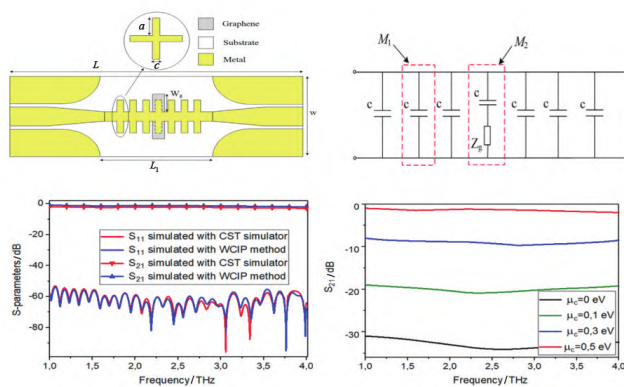


图8 基于金属-石墨烯混合结构的太赫兹可调谐衰减器

人工表面等离激元与超表面结合设计具有很高的集成度,能被很好的应用在太赫兹器件设计领域。Wang等^[29]提出一种工作在太赫兹波段的可调谐非衍射人工表面等离激元液晶超表面(图9)。通

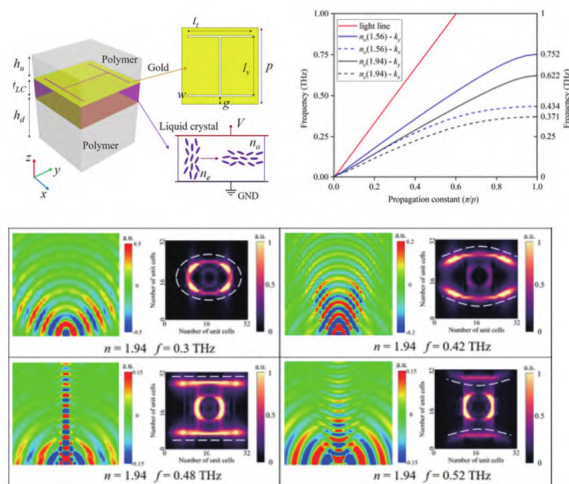


图9 具有液晶太赫兹超表面的可调谐非衍射人工表面等离激元

过调节外部驱动电压,可以连续改变向列型液晶的介电常数和超表面的色散曲线。经过仿真验证,非衍射表面等离激元可实现从0.48 THz到0.54 THz的传输调谐,相对带宽约为12%。这项工作为动态、灵活地控制超表面的色散特性提供了一种新途径。

3 基于太赫兹人工表面等离激元传感器

与其他传感平台相比,太赫兹人工表面等离激元能够极大地增强光与物质相互作用,从而能够实现对小体积样品的检测。同时,人工表面等离激元因为场增强效应对介电常数具有非常高的敏感度,所以其已被研究制备成相关传感器应用于环境检测、医疗健康等领域。

为了满足太赫兹微信号传感平台的高灵敏度、结构紧凑等要求,Yan等^[30]设计出一种基于太赫兹人工表面等离激元平台的一维介质梯度超表面耦合器和人工表面等离激元金属槽阵列组合而成,灵敏度高达517.9 GHz/RIU,分辨率为0.0001 RIU。这项工作为太赫兹人工表面等离激元传感在超薄和紧凑型功能器件上的应用提供一种新方法。

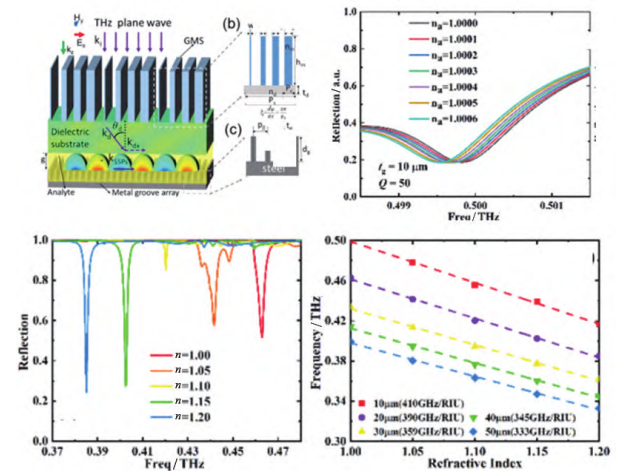


图10 基于一维介质梯度超表面耦合器的太赫兹人工表面等离激元传感器

目前大多数传感器都是基于谐振器的介电常数传感器,因此,原始测量场景中的任何微小偏差

都有很大的可能影响到传感器的工作,导致参数漂移。如果选择差模装置,这个问题会得到解决,而且可以利用这个属性来识别被测物任何可能的变化,即缺陷检测。缺陷检测器件的主要挑战是如何实现良好的灵敏度,为了满足这一需要,Kumari等^[31]提出了一种适用于太赫兹频段的高束缚人工表面等离子激元差分相位传感器(图11)。通过设计的差分分路器,使参考臂与测试臂对应的传输系数相位差增大,可以有效的提高传感器的灵敏度,其性能明显优于传统微带传感器,该项研究可用于介质传感和缺陷检测。

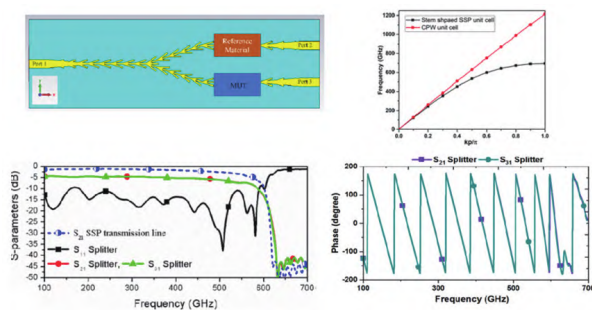


图11 用于介质传感和缺陷检测的差动人工表面等离子激元传感器

Fu等^[32]提出了一种基于四分之一模局部表面均分激励的微流体传感器(图12),该传感器利用局部表面等离子激元优异的场增强和场约束特性,以及双交指结构进一步提高了传感器的灵敏度。通过实验测量,该传感器对纯水的灵敏度可达0.34%,且仅消耗4.57 μL 的液体样品。因其低成本的优点,可以有效应用在实际生活场景中。

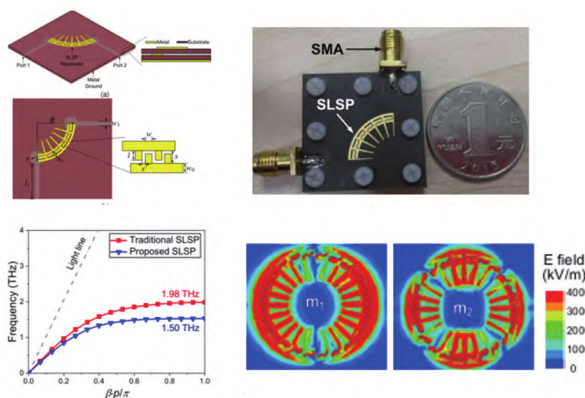


图12 基于四分之一模交指结构的人工表面等离子激元高灵敏度微流控传感器

4 基于太赫兹人工表面等离子激元的通信应用

在未来计算机的百万兆级运算服务中,高速数据通信对片上驱动器的超宽带与低功耗需求越来越迫切。虽然互补金属氧化物半导体(CMOS)技术扩大了规模,并且在工作频率与速度方面的性能得到了提升,但系统整体性能还是受到如电路之间的互联、功耗和信号完整性等方面的限制^[33]。人工表面等离子激元在继承了天然表面等离子激元的特性,如色散特性和场约束性的同时,还具备设计上的灵活性,因此在低损耗和低串扰片上互连方面具有很高的潜力^[34-35]。

Liang等^[36-37]利用硅无源器件限制电磁场使得片上宽带亚太赫兹I/O重驱动器设计变得可行,为节能和不受串扰的开关控制通信提供了一种新方法。该团队利用人工表面等离子激元波导和开口谐振环2种元器件分别构建了亚太赫兹低串扰硅通道、高开关比调制器和亚太赫兹信号源。由这些元器件组成的140 GHz双通道重驱动器完全集成在65 nm CMOS技术系统中(图13)。同时该团队还介绍了这些元器件的基本原理、设计方法和未来太赫兹通信的实现方法,为实现低功耗、耐串扰和高速数据链路提供一种可行思路。这2种元器件在太赫兹下具有良好的色散特性,未来可以朝着体积小、集成度高、性能优异的方向发展,有望在小型化集成电路系统中发挥重要作用。

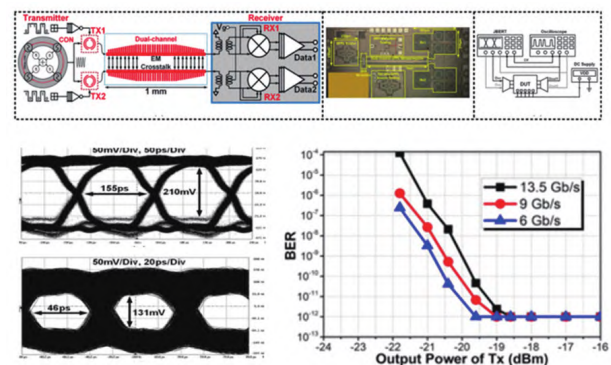


图13 利用人工表面等离子激元波导和开口谐振环进行短程OOK通信

三维狄拉克半金属是一种量子费米子系统,是石墨烯的三维对应物,在太赫兹频率下表现出丰富的等离子体响应。Blessan 等^[38]提出一种基于耦合表面等离激元亚波长波导的三维狄拉克半金属全光太赫兹逻辑门(图 14)。这种在三维狄拉克半金属系统中实现的亚波长太赫兹波导比零折射率超材料更具有优势。基于三维狄拉克半金属多层对称耦合的人工表面等离激元波导,在太赫兹波段实现了包括 OR、AND、XOR、NOR 和 NAND 在内的全光逻辑门。这种太赫兹逻辑门在 ON-OFF 状态下至少具有 50% 最佳传输阈值。该逻辑门可以应用在北斗系统中,有望为太赫兹频段下的光电应用开辟一条道路。

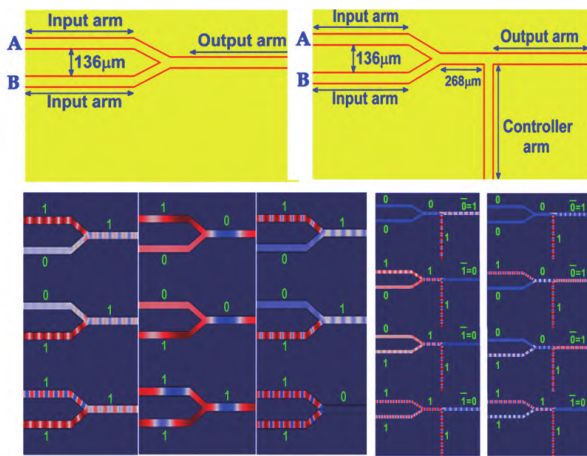


图 14 全光太赫兹逻辑门

人工表面等离激元提供了一种以最小能量预算实现芯片间高速通信的新方法。Imtiaz 等^[39]提出一种基于片上通道电导的人工表面等离激元互连调制(图 15)。通过控制集成在金属格栅中的晶体管的通道电导来实现人工表面等离激元互连的信号调制。通过数值模拟验证,2.8 GHz 的载频对 0.1 GHz 和 0.5 GHz 的信号调幅时域响应良好。该装置通过控制信道的电导,可以为其他的载波频率和消息信号调制传输信号的幅值。

5 基于太赫兹人工表面等离激元的生物医药应用

太赫兹生物传感器已成为研究生物分子的一

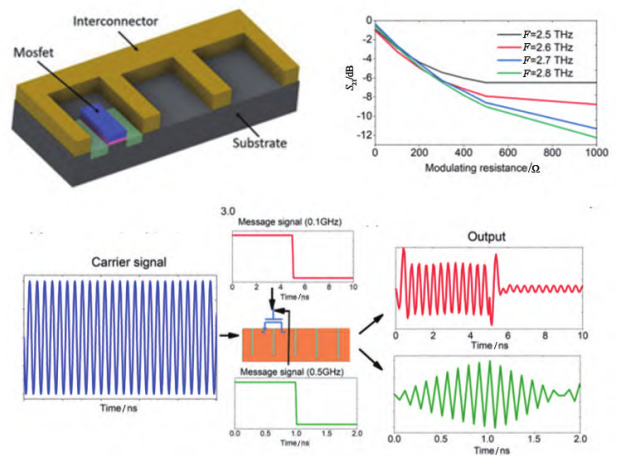


图 15 基于片上通道电导调制的人工表面等离激元互连调制

种有效途径。但是,这些传感器在太赫兹频率下仍存在灵敏度较低的问题。生物传感器要求具备高灵敏度、结构紧凑、易于制造、低成本等特点。因此设计一种能够满足上述优点的生物传感器很有必要。近年来基于超材料和人工表面等离激元的传感器在生物传感领域引起了极大的兴趣。基于超材料的生物传感器具有实时检测生物分子相互作用和低成本的优势,人工表面等离激元可以使局部电场增强,因此基于超材料和人工表面等离激元的传感器比传统传感器具有更高的灵敏度和更低的成本。

2022 年, Bhati 等^[40]提出一种基于人工表面等离激元的太赫兹超材料传感器(图 16)。在透射谱

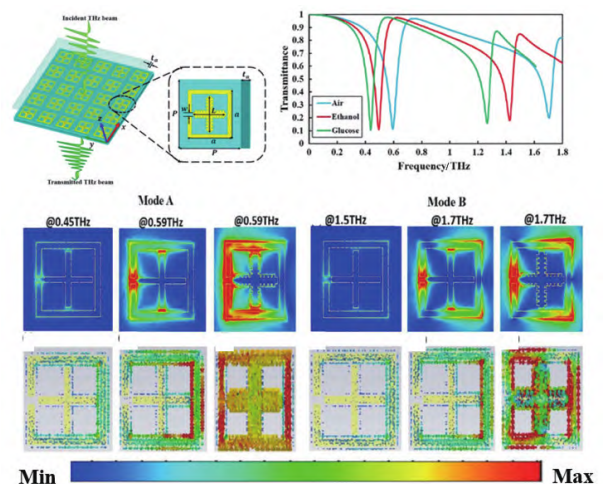


图 16 基于人工表面等离激元的太赫兹超材料传感器

中获得了频率为 0.59 THz(A 模)和 1.7 THz(B 模)的 2 个共振。该团队研究了乙醇和葡萄糖传感的超表面,在 2 种谐振模式下都具有显著的高灵敏度。该器件结构紧凑,易于实现,可作为高效的太赫兹生物传感器。

Sarkar 等^[41]设计了一种基于环形人工表面等离激元的超材料激发太赫兹传感器(图 17)。根据外部生物材料的介电常数的变化,该结构在 0.7~2 THz 的频率范围内,频率变化表现出 3 种不同的模式。这种传感器灵敏度可达 550 GHz/RIU, 优值为 5.5。基于人工表面等离激元的环形传感器为太赫兹生物化学传感应用提供了一种新思路。

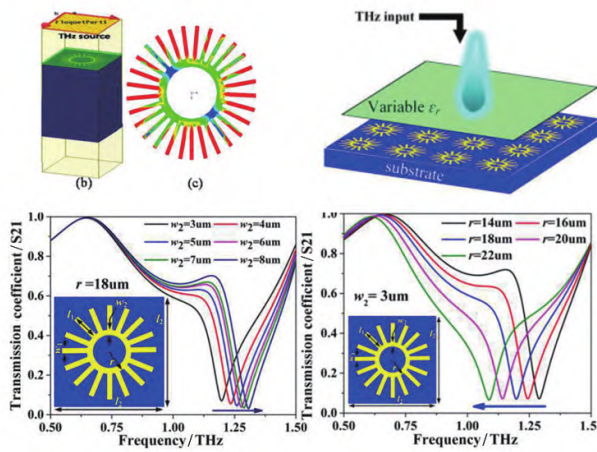


图 17 基于环形人工表面等离激元的太赫兹超材料传感器

微小分子太赫兹指纹吸收光谱的灵敏检测是生物分析中必不可少的技术。然而,由于太赫兹波长与生物分子尺寸之间存在较大的不匹配,导致光谱响应较弱,使得传统的太赫兹光谱测量极具挑战性。Yao 等^[42]提出一种宽带可调谐的金属人工表面等离激元太赫兹生物传感器(图 18),用于检测微小的生物分子,该传感器利用奥托棱镜结构的衰减全反射和在沟槽金属上的人工表面等离激元电场的增强效应,能够有效识别分子太赫兹指纹。仿真结果表明,等离激元共振可选择性地将分析物对 2 种振动模式的吸收提高 10 倍,并可通过扫描入射角在宽波段内进行指纹识别。这项工作为分子指纹在微量分析物生化传感领域的高灵敏度识别提

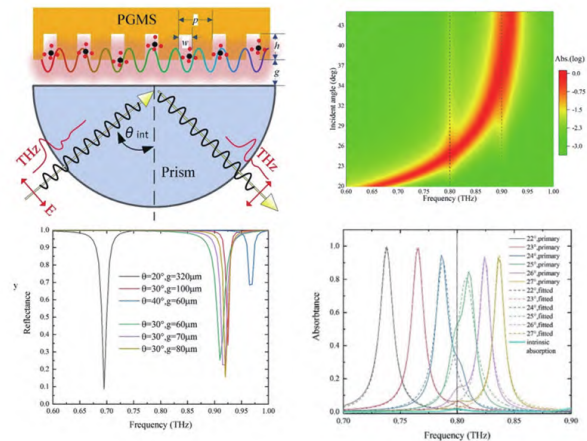


图 18 用于微小分子太赫兹指纹吸收光谱检测的宽带可调谐金属人工表面等离激元太赫兹生物传感器

供了有效的方法。

传统的太赫兹吸收光谱测量通常需要至少数百毫克的材料,才能使太赫兹波与样品之间产生足够的相互作用,样品的体积还受到太赫兹源的功率、水蒸气的吸收和探测器灵敏度的影响。太赫兹介质波导具有采样体积小、相互作用长度长、信噪比高等优点,所以有学者利用介质波导和超表面的局域电场来提高太赫兹吸收光谱测量的灵敏度。Li 等^[43]提出了一种通过在单层金属面中复用人工表面等离激元超表面来增强太赫兹指纹光谱吸收的方法(图 19)。通过测量发现,在 0.46~0.60 THz 范围内,0.1 μm 乳糖薄膜样品的吸收增强系数可达到 104 倍左右。该设计为在化学、有机或生物医

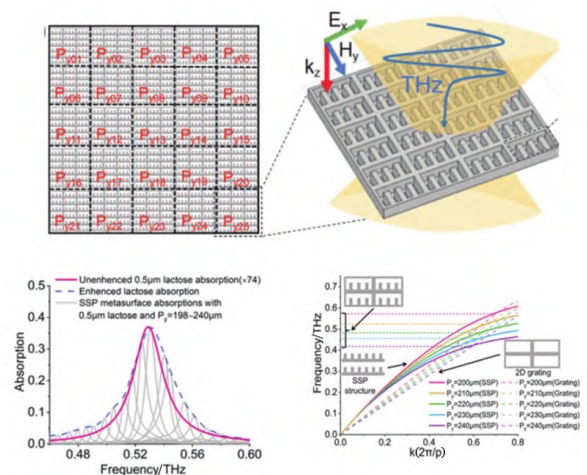


图 19 用于增强太赫兹吸收的人工表面等离激元超表面

学材料检测中实现宽带太赫兹光谱增强提供了一种灵活的方法。

6 结论

2022年,人工表面等离子激元在太赫兹系统中进一步发挥出了巨大的作用,本文围绕太赫兹人工表面等离子激元的无源器件、有源器件、传感器、太赫兹人工表面等离子激元通信以及生物医药方面的应用展开了论述。太赫兹表面等离子激元的强场约束性、高集成度、定制化等特性,可以很好的与相关太赫兹器件或材料进行结合,应用在太赫兹通讯、传感、成像和检测领域中。随着这几年太赫兹科学技术的飞速发展,人工表面等离子激元和太赫兹技术结合的研究也引起了国际上的广泛关注,学者们进行了很多相关的研究,也取得了瞩目的成果。然而由于太赫兹的特殊频段,很多成果虽然具有诱人的应用前景,但是因为加工工艺的限制,目前大多数提出的人工表面等离子激元还无法实现大批量制备。未来太赫兹人工表面等离子激元技术还有很大的发展空间,例如太赫兹成像、光谱学和生物传感等其他领域。随着6G时代的到来,太赫兹人工表面等离子激元技术必将迎来更好的发展。

参考文献(References)

- [1] 梁美彦,任竹云,张存林. 太赫兹空间探测技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(18): 180004.
- [2] 冯伟,韦舒婷,曹俊诚. 6G技术发展愿景与太赫兹通信[J]. 物理学报, 2021, 70(24): 244303.
- [3] van der Valk N C J, Planken P C M. Electro-optic detection of subwavelength terahertz spot sizes in the near field of a metal tip[J]. Applied Physics Letters, 2002, 81(9): 1558-1560.
- [4] Planken P C M, van der Valk N C J. Spot-size reduction in terahertz apertureless near-field imaging[J]. Optics letters, 2004, 29(19): 2306-2308.
- [5] Chen H T, Kersting R, Cho G C. Terahertz imaging with nanometer resolution[J]. Applied Physics Letters, 2003, 83(15): 3009-3011.
- [6] Zhu W, Agrawal A, Nahata A. Planar plasmonic terahertz guided-wave devices[J]. Optics Express, 2008, 16(9): 6216-6226.
- [7] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology[J]. Nature photonics, 2007, 1(2): 97-105.
- [8] Vaswani C, Mootz M, Sundahl C, et al. Terahertz second-harmonic generation from lightwave acceleration of symmetry-breaking nonlinear supercurrents[J]. Physical Review Letters, 2020, 124(20): 207003.
- [9] Nakamura S, Katsumi K, Terai H, et al. Nonreciprocal terahertz second-harmonic generation in superconducting nbn under supercurrent injection[J]. Physical Review Letters, 2020, 125(9): 097004.
- [10] Maier S A, Atwater H A. Plasmonics: Localization and guiding of electromagnetic energy in metal/dielectric structures[J]. Journal of applied physics, 2005, 98(1): 10.
- [11] Hibbins A P, Evans B R, Sambles J R. Experimental verification of designer surface plasmons[J]. Science, 2005, 308(5722): 670-672.
- [12] Zhang H C, Liu S, Shen X, et al. Broadband amplification of spoof surface plasmon polaritons at microwave frequencies[J]. Laser & Photonics Reviews, 2015, 9(1): 83-90.
- [13] Yin J Y, Ren J, Zhang H C, et al. Broadband frequency-selective spoof surface plasmon polaritons on ultrathin metallic structure[J]. Scientific Reports, 2015, 5(1): 1-5.
- [14] Yin J Y, Ren J, Zhang H C, et al. Capacitive-coupled series spoof surface plasmon polaritons[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 1-8.
- [15] Gao X, Zhou L, Cui T J. Odd-mode surface plasmon polaritons supported by complementary plasmonic metamaterial[J]. Scientific Reports, 2015, 5(1): 1-5.
- [16] Garcia-Vidal F J, Fernández-Domínguez A I, Martín-Moreno L, et al. Spoof surface plasmon photonics[J]. Reviews of Modern Physics, 2022, 94(2): 025004.
- [17] Martín-Cano D, Nesterov M L, Fernandez-Dominguez A I, et al. Domino plasmons for subwavelength terahertz circuitry[J]. Optics Express, 2010, 18(2): 754-764.
- [18] Pendry J B, Martín-Moreno L, Garcia-Vidal F J. Mimicking surface plasmons with structured surfaces[J]. Science, 2004, 305(5685): 847-848.
- [19] Shen X, Cui T J, Martín-Cano D, et al. Conformal surface plasmons propagating on ultrathin and flexible films[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2013, 110(1): 40-45.
- [20] Jiang T, Shen L, Wu J J, et al. Realization of tightly confined channel plasmon polaritons at low frequencies[J].

- Applied Physics Letters, 2011, 99(26): 261103.
- [21] Zhang Y, Lu Y, Yuan M, et al. Rotated pillars for functional integrated on-chip terahertz spoof surface plasmon polariton devices[J]. *Advanced Optical Materials*, 2022: 2102561.
- [22] Li H, Li Y, Yuan M, et al. Terahertz spoof surface plasmonic demultiplexer based on band-stop waveguide units[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(22): 21–27.
- [23] Le Zhang Q, Chen B J, Shum K M, et al. Miniaturized spoof surface plasmon polaritons load for planar terahertz circuit application on thick substrate[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2022, 69(3): 1049–1053.
- [24] Zhu H, Zhang Y, Ye L, et al. Compact terahertz on-chip filter with broadband rejection based on spoof surface plasmon polaritons[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2022, 43(6): 970–973.
- [25] Yan S, Wang J, Kong X, et al. A terahertz band-pass filter based on coplanar-waveguide and spoof surface plasmon polaritons[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2022, 34(7): 375–378.
- [26] Wang C, Zhang Z, Zhang Y, et al. Enhancing directivity of terahertz photoconductive antennas using spoof surface plasmon structure[J]. *New Journal of Physics*, 2022, 24(7): 073046.
- [27] Feng M, Zhang B, Ling H, et al. Active metal-graphene hybrid terahertz surface plasmon polaritons[J]. *Nanophotonics*, 2022, 11(14): 3331–3338.
- [28] Hlali A, Houaneb Z, Zairi H. A terahertz tunable attenuator based on hybrid metal-graphene structure on spoof surface plasmon polaritons waveguide[J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2022, 644: 414208.
- [29] Wang S, Chen K, Zhao J, et al. Tunable non-diffraction spoof surface plasmon polaritons with liquid crystal terahertz metasurface[C]//2021 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP). Piscataway: IEEE, 2021: 136–138.
- [30] Yan D, Li X, Ma C, et al. Terahertz refractive index sensing based on gradient metasurface coupled confined spoof surface plasmon polaritons mode[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(1): 324–329.
- [31] Kumari A, Singh S P, Tiwari N K, et al. Design of a differential spoof surface plasmon sensor for dielectric sensing and defect detection[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(4): 3188–3195.
- [32] Fu J H, Wu W J, Wang D W, et al. High-sensitivity microfluidic sensor based on quarter-mode interdigitated spoof plasmons[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(24): 23888–23895.
- [33] Chang M F, Cong J, Kaplan A, et al. CMP network-on-chip overlaid with multi-band RF-interconnect[C]//2008 IEEE 14th International Symposium on High Performance Computer Architecture. Piscataway: IEEE, 2008: 191–202.
- [34] Liang Y, Yu H, Zhao J, et al. An energy efficient and low cross-talk CMOS sub-THz I/O with surface-wave modulator and interconnect[C]//2015 IEEE/ACM International Symposium on Low Power Electronics and Design (ISLPED). Piscataway: IEEE, 2015: 110–115.
- [35] Liang Y, Yu H, Feng G, et al. An energy-efficient and low-crosstalk sub-THz I/O by surface plasmonic polariton interconnect in CMOS[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2017, 65(8): 2762–2774.
- [36] Liang Y, Yu H, Wang H, et al. Towards integrated metadevices for terahertz silicon plasmonics: A review of recent progress[J]. *Chip*, 2022: 100030.
- [37] Liang Y, Boon C C, Zhang H C, et al. A 13.5 Gb/s 140 GHz silicon redriver exploiting metadevices for short-range OOK communications[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2022, 70(1): 239–253.
- [38] Blessan T M, Venkateswaran C, Yogesh N. All-optical terahertz logic gates based on coupled surface plasmon polariton sub-wavelength waveguiding in bulk Dirac semimetal[J]. *Optik*, 2022, 257: 168795.
- [39] Imtiaz N, Nayem S H, Joy S R, et al. On-chip channel conductance based modulation of spoof surface plasmon polariton interconnects[C]//CLEO: Science and Innovations, Optica Publishing Group, 2022: 34.
- [40] Bhati R, Jewariya M, Malik A K. Spoof surface plasmon-based terahertz metasensor for glucose and ethanol[J]. *Applied Physics A*, 2022, 128(9): 1–8.
- [41] Sarkar A, Banna G M H U, Unluturk B, et al. Dual-mode annular spoof surface plasmon polariton based thz compact bio-sensors with increased sensitivity and bandwidth[C]//2022 IEEE Sensors. Piscataway: IEEE, 2022: 1–4.
- [42] Yao H, Zhang W, Liu W, et al. Resolved terahertz spectroscopy of tiny molecules employing tunable spoof plasmons in an otto prism configuration[J]. *Journal of Op-*

tics, 2022, 24(4): 045301.
[43] Li X J, Yang J, Yan D X, et al. Highly enhanced trace amount terahertz fingerprint spectroscopy by multiplex-

ing surface spoof plasmon metasurfaces in a single layer [J]. Optics Communications, 2022, 525: 128777.

Review of terahertz spoof surface plasmon technology hotspots in 2022

SI Liming^{1,2,3}, DONG Fanghui^{1,2,3}, DONG Lin^{1,2}, ZHANG Qingle^{1,2}, LÜ Xin^{1,2,3}

1. School of Integrated Circuits and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China
2. Beijing Key Laboratory of Millimeter Wave and Terahertz Technology, Beijing 100081, China
3. Yangtze River Delta Research Institute of Beijing University of Technology, Jiaxing 314019, China

Abstract Due to the higher requirements of high throughput and large bandwidth for 6G wireless communication and space situational awareness (SSA) systems, terahertz technology has gradually become a research hotspot in worldwide academic and industrial fields. Spoof surface plasmon polaritons have strong field confinement in sub-wavelength region and nonlinear dispersion characteristics for the transmitted electromagnetic waves, bringing new opportunities for the realization of terahertz functional devices and system applications. In 2022, terahertz spoof surface plasmon polaritons received considerable attention in the development of passive devices, active devices, sensors, 6G communication and biomedical systems. This paper reviews the hotspots of terahertz spoof surface plasmon technology in 2022.

Keywords terahertz; spoof surface plasmon; sensor; signal communication ●



(责任编辑 徐丽娇)