

人工表面等离激元片上传输线及其应用

王雪东^{1,2}, 常鑫³, 何沛航^{1,4}, 姚大悦^{1,4}, 张浩驰^{1,3}

(1. 东南大学电磁空间科学与技术研究院, 南京, 210096; 2. 东南大学微电子学院, 南京, 210096;
3. 电子科技大学英才实验学院, 成都, 611731; 4. 东南大学毫米波全国重点实验室, 南京, 210096)

摘要 现代信息技术对芯片的集成度与功能多样性提出了越来越高的要求, 使得微带线、共面波导为代表的传统片上传输线在电磁模式与功能方面的短板日渐凸显。因此, 从物理底层寻找具有全新传输模式的传输线是突破当前芯片瓶颈的一条重要技术路径。人工表面等离激元传输线作为一种具有强场束缚性和灵活可调色散特性等优势的电磁超材料, 有望成为下一代芯片技术中的关键基础元件。文中介绍了人工表面等离激元片上传输线的基本构型、小型化设计以及可重构设计, 展现了人工表面等离激元片上传输线具有的极高自由度。然后介绍了基于人工表面等离激元片上传输线的片上去耦应用和信号调制应用研究进展, 展示了人工表面等离激元片上传输线巨大的应用潜力。

关键词 人工表面等离激元; 芯片; 片上去耦; 相位调制

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2023.06.002

中图分类号 TN822 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2023)06-0015-08

On-Chip Spoof Surface Plasmon Polariton Transmission Lines and Application

WANG Xuedong^{1,2}, CHANG Xin⁴, HE Peihang^{1,3}, YAO Dayue^{1,3}, ZHANG Haochi^{1,3}

(1. Institute of Electromagnetic Space, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. School of Microelectronics, Southeast University, Nanjing 210096, China;

3. Yingcai Honors College, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 611731, China;

4. The State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract Modern information technology puts forward higher and higher requirements for chip integration and functional diversity to make the weakness of electromagnetic mode and function of traditional on-chip transmission lines (TLs) represented by microstrip line and coplanar waveguide prominent day by day. Therefore, finding the TLs with new transmission modes is an important potential path to break the technical bottleneck of chips at the physical level. Being a kind of electromagnetic metamaterials possessing the advantages of strong field binding and flexible dispersion, the spoof surface plasmon polariton (SSPP) TLs are expected to perform as the key fundamental components to realize the next generation chip technology. The research progress of on-chip SSPP TLs and their application are introduced. Firstly, the basic configuration, miniaturization design and reconfigurable design of on-chip SSPP TLs are introduced, which demonstrates the extremely high degree of freedom of on-chip SSPP TLs. Then, the applications of on-chip

收稿日期: 2023-06-08

基金项目: 国家自然科学基金(62101122)

作者简介: 王雪东(1998—), 男, 黑龙江大庆人, 硕士生, 研究方向为电子信息。E-mail: 1518415785@qq.com

通信作者: 张浩驰(1991—), 男, 浙江嘉兴人, 副教授, 博士, 研究方向为电磁场与微波技术。E-mail: hc Zhang0118@seu.edu.cn

引用格式: 王雪东, 常鑫, 何沛航, 等. 人工表面等离激元片上传输线及其应用[J]. 空军工程大学学报, 2023, 24(6): 15-22. WANG Xuedong, CHANG Xin, HE Peihang, et al. On-Chip Spoof Surface Plasmon Polariton Transmission Lines and Application[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2023, 24(6): 15-22.

channel decoupling and signal modulation based on on-chip SSPP TL are introduced, which demonstrate the significant application potential of on-chip SSPP TL.

Key words spoof surface plasmons polariton; chip; on-chip channel decoupling; phase modulation

表面等离子激元 (surface plasmon polaritons, SPPs)^[1-6] 是一种沿着电介质和导体 (通常是金属) 交界面传播的光频段表面波模式。该模式是由被束缚在表面的光或其他电磁波与金属的自由电子相互作用形成的, 具有沿着分界面切线方向传播而在法线方向呈指数衰减的特性, 因此能够将电磁能量紧密地束缚在界面周围。表面等离子激元能够在亚波长尺度上对光进行产生、分布、调制和检测, 并对光子集成电路 (photonic integrated circuits, PIC) 技术^[8-10] 的发展产生了巨大的推动作用。然而, 当频率降低到远红外、太赫兹和微波波段时, 金属的性质更接近于理想电导体 (perfect electric conductors, PECs) 而不是具有负介电常数的等离子体, 所以无法支持表面等离子激元。为了解决该问题, Pendry 等^[11] 于 2004 年提出了通过在金属表面设计特殊的周期性结构以实现一种电磁超材料, 进而支持一种与表面等离子激元具有类似特性的模式, 即人工表面等离子激元 (spoof surface plasmon polaritons, SSPPs)。随后, 研究人员提出了一系列周期结构超材料来支持人工表面等离子激元, 如波纹金属表面^[12]、波纹金属线^[13]、周期缝表面^[14]、周期块^[15]、异质结构^[16] 和复杂结构金属表面^[17-18] 等。然而, 这些人工表面等离子激元超材料结构往往结构尺寸较大, 不便于与现代平面电路工艺 (如印制电路板工艺和芯片工艺) 集成。

2013 年, Shen 等^[19-20] 通过在电介质薄膜上打印金属条的方式实现了可共形的超薄人工表面等离子激元超材料。这种超材料可作为传输线应用在平面电路中^[21-23], 因此也被称为人工表面等离子激元传输线。它不仅具有与表面等离子激元相似的强场束缚性等物理特性, 还可以通过调整传输线结构参数以实现电磁波的灵活操控。随着陆续报道的基于印制电路板工艺的人工表面等离子激元滤波器^[24-25]、天线^[26-28]、放大器^[29]、耦合器^[30]、倍频器^[31]、传感网络^[32]、通信系统^[33] 等的器件与系统, 人工表面等离子激元片上传输线的研究也吸引了越来越多的关注。

1 人工表面等离子激元片上传输线

传输线作为微波电路最基本的元件, 在芯片内是必不可少的。但随着现代信息技术对芯片在集成度与功能多样性的要求越来越高, 以微带线、共面波导为代表的传统片上传输线在电磁模式与功能方面

的短板逐渐凸显。凭借着强场束缚性与灵活可调特性等方面的优势, 人工表面等离子激元传输线有望替代现有片上传输线, 突破传统芯片技术中的诸多技术瓶颈, 具有十分广阔的应用前景。

2015 年, Liang 等^[34] 首次提出一种基于 65 nm-CMOS 工艺的亚太赫兹波段人工表面等离子激元片上传输线, 如图 1(a) 所示, 左侧为人工表面等离子激元片上传输线阵列, 由周期排列的单边梳状传输线构成, 2 条传输线背对背排列。右侧为与之对比的 2 条传统片上微带线组成的传输线阵列。这种传输线是基于典型的人工表面等离子激元传输线构型实现的, 因此本文将其称为典型人工表面等离子激元片上传输线。其色散曲线主要通过改变梳状枝节的长度 h 调控。从图 1(b) 中可以看到, 梳状枝节的长度越大, 典型人工表面等离子激元片上传输线的色散曲线越远离微带线的色散曲线, 即具有越强的场束缚能力。这表示典型人工表面等离子激元片上传输线是以占据更大的芯片面积为代价以实现场束缚能力提高的。作为首次提出的人工表面等离子激元片上传输线, 该工作揭示了人工表面等离子激元应用在高集成度的通信系统中的巨大潜力。

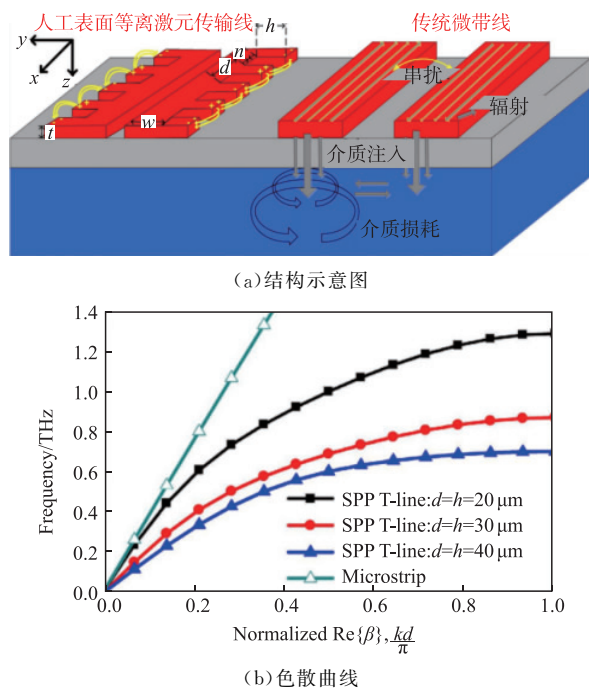


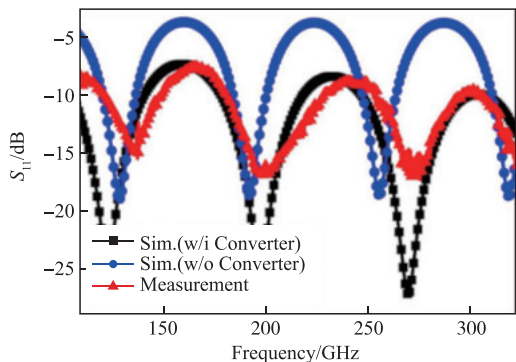
图1 典型人工表面等离子激元片上传输线

人工表面等离子激元片上传输线上的电磁波模式为人工表面等离子激元模式, 而芯片上的传统激励端口电磁波模式多为准横电磁波模式 (quasi-transverse electromagnetic, quasi-TEM) 模式。因此, 在

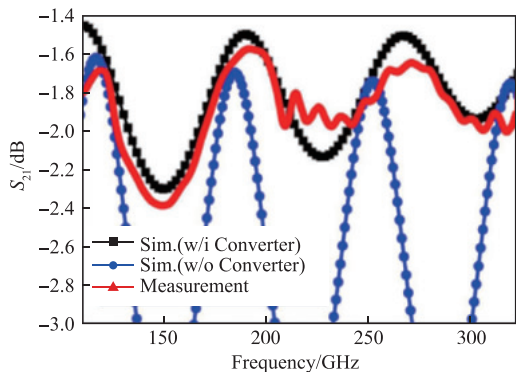
芯片上应用人工表面等离子激元模式,就需要设计高效的模式过渡结构。文献[35]提出了在 65 nm-CMOS 工艺下用线性渐变结构实现从接地共面波导到人工表面等离子激元片上传输线的过渡,如图 2(a)所示。通过调整图中 C_y 和 k 的值可以实现良好的匹配效果。仿真及测试结果见图 2(b),在 110~325 GHz 内回波损耗低于 -9 dB,插入损耗平均仅有 1.9 dB。从图中还可以看出,带有过渡结构的人工表面等离子激元片上传输线的传输效果相较不带过渡结构提升明显,进一步推进了人工表面等离子激元传输线在片上的应用。



(a) 人工表面等离子激元传输线和过渡结构示意图



(b) 仿真和实测的回波损耗

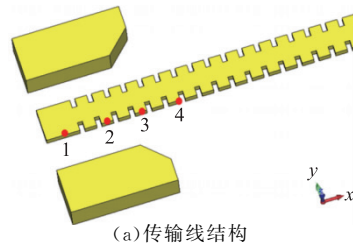


(c) 仿真和实测的传输系数

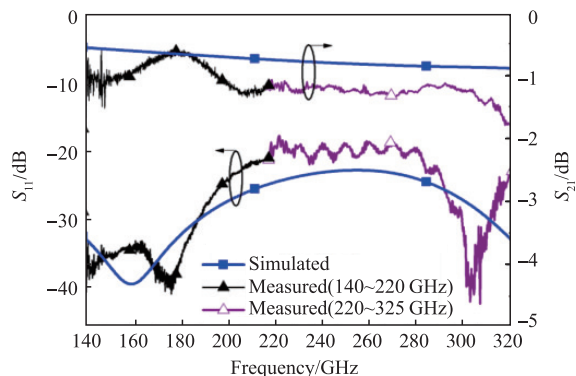
图2 人工表面等离子激元片上传输线的模式过渡结构及仿真和测试结果

文献[36]提出了一种基于 BiCMOS 工艺的对称排列梳状人工表面等离子激元片上传输线结构,并设计了一种接地共面波导到该传输线的过渡结构,如图 3(a)所示。该过渡结构同样实现了准横电磁波模式到人工表面等离子激元模式的良好转换。试验结果见图 3(b),测试可得 140~325 GHz 内的回波损耗优于 18.5 dB,平均插入损耗为 1.54 dB。尽管目前单边梳状结构的人工表面等离子激元传输线应用较多,但是对称梳状结构的人工表面等离子激元传输线损耗更小,所以研究对称结构的人工表面等离子

元传输线也有重要意义。



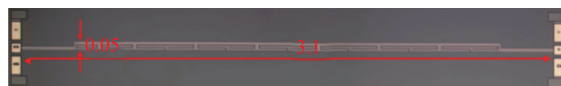
(a) 传输线结构



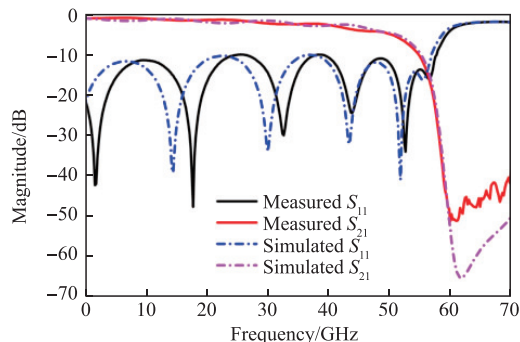
(b) 仿真和测试结果

图3 基于 BiCMOS 工艺的人工表面等离子激元传输线

文献[37]设计了一种基于 GaAs 工艺的小型化人工表面等离子激元传输线,见图 4(a)。利用这种结构可以进一步减小人工表面的等离子激元片上传输线的面积。通过调节最外层金属带的宽度,可以实现从微带线到人工表面的等离子激元片上传输线良好的匹配。这种过渡方法不用设计其他过渡结构,简化了设计过程。测试结果见图 4(b),传输线在 0~54 GHz 内可以实现良好的传输效果。该文献还报道了基于此结构设计的一款带通滤波器,如图 4(c)所示,其中心频率为 65 GHz,带宽为 50.5%,测试得通带内插入损耗在 1.4~2.0 dB 之间,回波损耗优于 11 dB。



(a) 传输线的结构



(b) 传输线仿真和实测的结果



(c) 基于此传输线的带通滤波器结构

图4 基于 GaAs 的小型化人工表面等离子激元片上传输线

文献[38]提出了另一种基于 $0.18\ \mu\text{m}$ -CMOS 小型化人工表面等离子元片上传输线,见图 5。其色散特性主要与曲形结构的数量 N 有关,而非传输线的宽度 w ,这意味着该传输线可以在保持尺寸不变的情况下实现场束缚性的增强,解决了典型人工表面等离子元片上传输线在场束缚能力增强与结构小型化方面的矛盾。仿真和测试结果见图 6(a),可以看到该小型化人工表面等离子元片上传输线在 $159\sim 220\ \text{GHz}$ 内具有平坦的通带。图 6(b)从左向右依次展示了微带线、典型双边梳状人工表面等离子元片上传输线和文献[38]提出的小型化人工表面等离子元片上传输线的场型分布。通过对比可以看到,微带线的场束缚性最弱,而得益于曲形结构对横向电磁波的抑制能力,文献[38]提出的小型化人工表面等离子元片上传输线所实现的场束缚性最强。此小型化结构进一步丰富了人工表面等离子元片上传输线构型的研究。

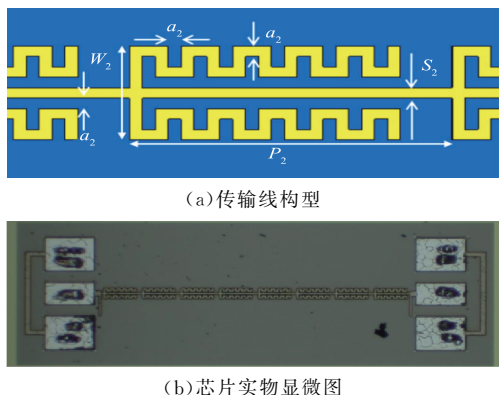
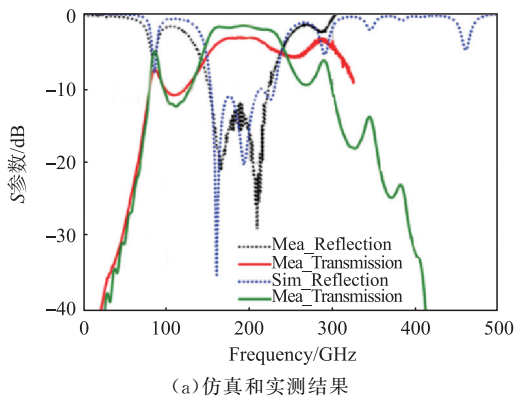
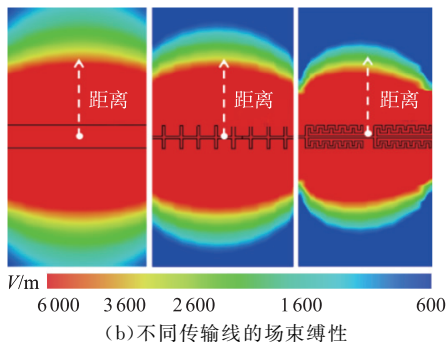


图 5 基于 $0.18\ \mu\text{m}$ -CMOS 的小型化人工表面等离子元片上传输线结构



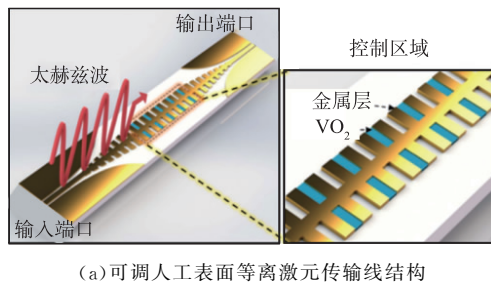
(a) 仿真和实测结果



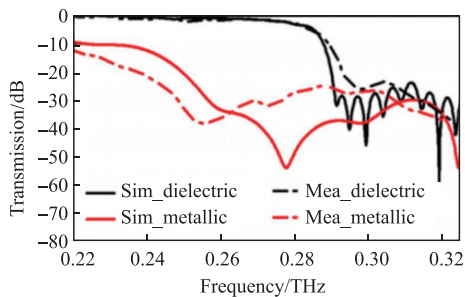
(b) 不同传输线的场束缚性

图 6 基于 $0.18\ \mu\text{m}$ -CMOS 的小型化人工表面等离子元片上传输线性能

通过设计不同的构型虽然可以实现调控人工表面等离子元片上传输线的性能,但是一旦传输线被加工制造完成,其电磁特性就会固定下来。在现代通信系统各项技术不断进步的背景下,芯片技术对可重构片上传输线的需求越来越迫切。文献[39]提出了一种可动态操控传输特性的人工表面等离子元片上传输线,其由双边梳状的对称金属条和其间注入的二氧化钒(vanadium dioxide, VO_2)构成,见图 7(a)。人工表面等离子元片上传输线两边的渐变共面波导为模式过渡结构,传输线的传输特性可随 VO_2 的相变而变化,具体来说,通过改变外界环境如温度、电场等来改变 VO_2 的电导率,可以重构整体传输线的性能。图 7(b)为这种可重构人工表面等离子元片上传输线的仿真和测试结果,表明其在 $0.22\sim 0.28\ \text{THz}$ 内的传输线特性可以被有效重构,其中传输系数的变化范围达到 $36\ \text{dB}$ 。



(a) 可调人工表面等离子元片上传输线结构



(b) VO_2 在不同状态时的传输系数仿真和测试结果

图 7 可调人工表面等离子元片上传输线

文献[40]也提出了一种基于 $0.25\ \mu\text{m}$ InP DHBT 工艺的可重构人工表面等离子元片上传输线,见图 8(a)。这种传输线的传输特性同样可随 VO_2 的相变而变。图 8(b)为该传输线的仿真结果,证明了通过改变 VO_2 的电导率可以动态调节人工表面等离子元片上传输线的插入损耗,实现传输线传输特性的重构。 VO_2 电导率分别为 $140\ \text{S/m}$ 和 $50\ 000\ \text{S/m}$ 时,传输线的插入损耗分别为 $3\ \text{dB}$ 和 $20\ \text{dB}$ 。此结构实现了人工表面等离子元片上传输线的可重构性,极大丰富了片上人工表面等离子元片上传输线的应用场景。

由此可见,人工表面等离子元片上传输线具有

强场束缚性与灵活可调特性等方面的优势,在小型化和可重构设计方面展现出了很高的自由度,为片上传输线提供了一种全新的选择,具有十分广阔的应用前景。

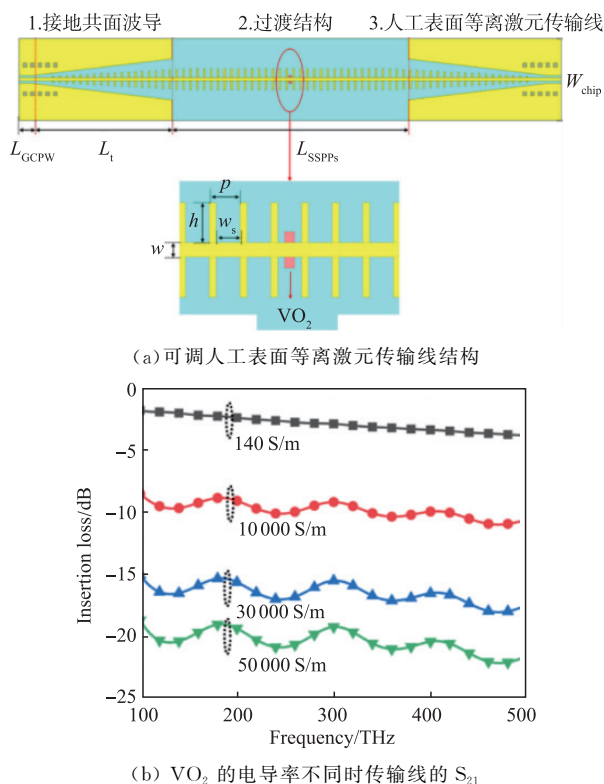


图8 可调人工表面等离子元片上传输线

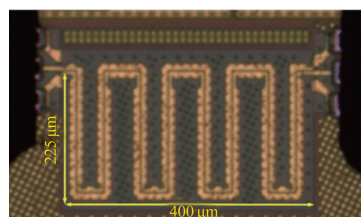
2 人工表面等离子元片上传输线的应用

未来的高性能计算机需要在存储器和微处理器内核之间进行高效的片上通信,对片对片互连带宽的需求将超过 10 TB/s ^[41]。虽然技术的不断发展使得芯片在工作频率和速度方面有所提高,但目前芯片技术中传统的微带线、共面波导等传输线本身的模式短板使得信道间电磁耦合较强,导致芯片内部串扰严重,整体系统信号完整性受限^[42]。因此,降低片上电磁耦合对芯片性能的影响已经成为目前芯片研究领域一个亟待解决的问题。人工表面等离子元片上传输线由于具有优异的场束缚特性,有望成为降低片上耦合、提高信号完整性的有效途径。

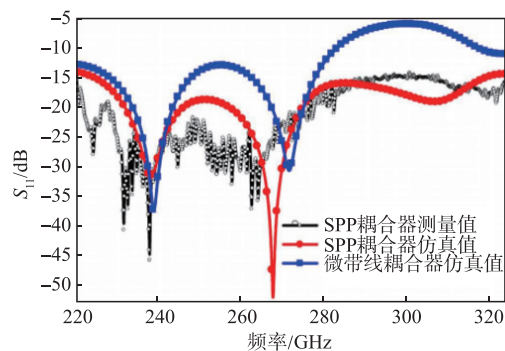
2015年,Liang等^[34]采用标准的65 nm-CMOS技术,首次报道了基于人工表面等离子元片上传输线的低耦合信道。如图9所示,2条人工表面等离子元片上传输线间距仅为 $2.4 \mu\text{m}$ 。测试结果表明,人工表面等离子元片上传输线的宽带反射系数低于 -14 dB ,串扰低于 -24 dB 。由此可见,相比于传统微带线,人工表面等离子元片上传输线所具有的强场束

缚特性可有效降低邻间信道之间的耦合。

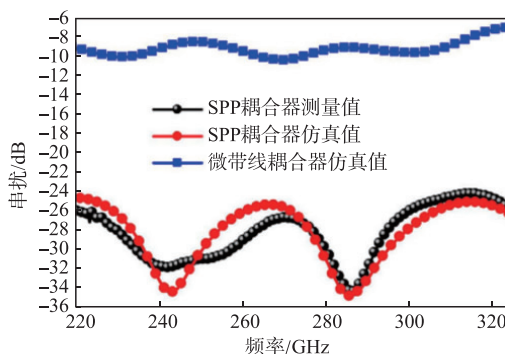
基于准横电磁波模式的输入/输出(input/output, I/O)互联具有较大的路径损耗和电磁耦合,电磁耦合使数据服务器功耗高,并很难做到密集的I/O互联。基于人工表面等离子元片上传输线的高速I/O通信可以显著降低电磁耦合。文献[43]提出了一种在140 GHz的基于65 nm-CMOS工艺的全集成人工表面等离子元片上I/O收发器,仿真结果表明:人工表面等离子元通道的串扰比为 -20 dB/mm ,耦合器的耦合因子为 -3.2 dB ,调制器的开关比为 23 dB ,相位噪声为 -118 dBc/Hz ,I/O收发器结构数据速率为 25 Gb/s 。人工表面等离子元互联结构的通道间距为 $2.4 \mu\text{m}$,当频率在 $220 \sim 325 \text{ GHz}$ 范围内时,传输线串扰比低于 -23 dB ,并且转换器将阻抗和动量从微带线平滑地转换为人工表面等离子元片上传输线,反射系数为 -8 dB 。由此可见,人工表面等离子元片上传输线展现出了优异的片上去耦能力,展现出了取代现有片上互连线的潜力。



(a) 基于片上人工表面等离子元传输线的65 nm耦合器显微图



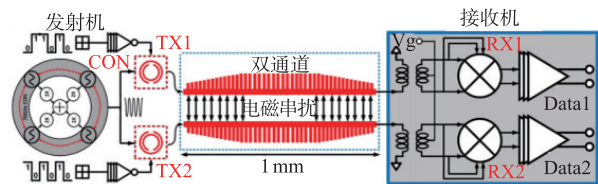
(b) 仿真和实测的反射系数结果



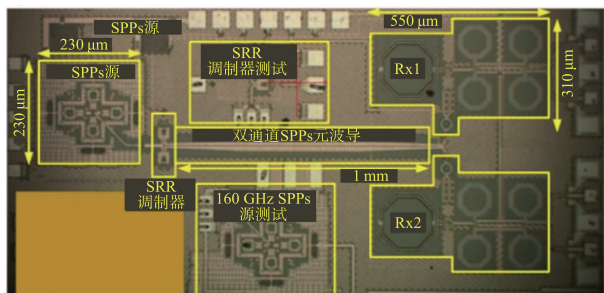
(c) 仿真和实测的线间串扰

图9 基于片上人工表面等离子元传输线的65 nm耦合器电子接口间的高频串扰问题推动了研究者对

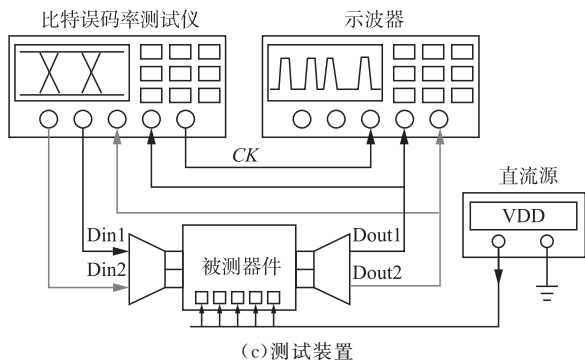
具有低损耗和低串扰的片上接口器件的研究,基于人工表面等离子激元的数据总线,带宽密度可达到 $1 \text{ Gb/s}/\mu\text{m}$,其中每个通道的数据传输速率大约 300 Gb/s ,而不引入显著的串扰^[44]。文献[45]利用人工表面等离子激元波导和裂环谐振器(split-ring resonator, SRR)分别构建了亚太赫兹低串扰硅通道和高开关比调制器,并利用上述器件制作了一种 140 GHz 下的基于 65 nm-CMOS 工艺的 I/O 中继器,该中继器由人工表面等离子激元片上传输线和裂环谐振器 2 个元器件构成,如图 10 所示,重驱动器实现了 2^7-1 和 $2^{31}-1$ 的 13.5 Gb/s/通道 的双通道 OOK 调制。测试结果显示,能量效率为 2.6 pJ/位/通道 ,比特误码率不超过 10^{-12} 。可见,所提出的基于人工表面等离子激元的 I/O 重驱动器具有良好的串扰抑制能力,在未来的高速计算机信息传输与片对片通信领域具有巨大的应用前景。



(a) 双通道次太赫兹 I/O 中继器原理图



(b) 中继器模具照片

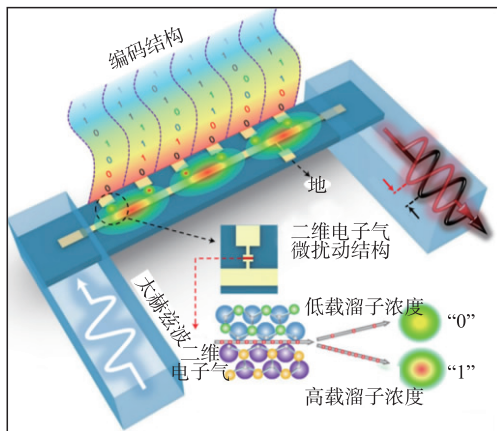


(c) 测试装置

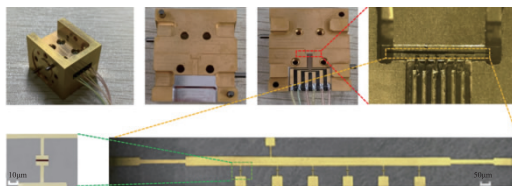
图 10 双通道次太赫兹 I/O 中继器

除基于强场束缚性的片上去耦应用外,人工表面等离子激元的灵活可调色散特性也可在片上信号调制方面得到应用。文献[46]通过在传输线上加载二维电子气微结构设计了一种类人工表面等离子激元传输线,实现了太赫兹信号的直接相位调制,如图 11 所示。该调制器能够对频率范围为 $0.26 \sim 0.27 \text{ THz}$ 的太赫兹导波施加平均误差仅为 0.36° 的相位

调制。在 0.265 THz 频点处,该调制器的平均插入损耗仅为 6.14 dB ,且幅度波动仅为 0.5 dB 。因此,该调制器能够提供近似理想的相位调制功能,在太赫兹集成系统中具有出色的可扩展性和兼容性。



(a) 示意图



(b) 芯片样品照片

图 11 基于人工表面等离子激元片上传输线的信号调制器

由此可见,人工表面等离子激元片上传输线的强场束缚性和灵活可调色散特性可以在片上电磁耦合抑制和相位调制中获得广泛的应用。

3 结语

本文介绍了人工表面等离子激元片上传输线及其在片上去耦和相位调制方面的应用。人工表面等离子激元片上传输线拥有强场束缚性与灵活可调特性的优势,为片上传输线提供了一种全新的选择。小型化人工表面等离子激元片上传输线和可重构人工表面等离子激元片上传输线,证明了人工表面等离子激元片上传输线丰富的设计自由度。然后总结了基于人工表面等离子激元片上传输线的片上去耦应用和信号调制应用研究进展。基于人工表面等离子激元片上传输线的强场束缚性,芯片信道间的电磁耦合可被有效抑制。基于人工表面等离子激元片上传输线的灵活可调色散特性,可以实现太赫兹信号的相位调制功能。

总的来说,人工表面等离子激元片上传输线独特的物理性质有利于突破一些传统芯片的技术瓶颈。针对人工表面等离子激元片上传输线及其应用的研究还处于起步阶段,人工表面等离子激元传输线的强场束缚性在高频下的表现还未进行充分的探索。另外,人工表面等离子激元的工程化应用程度还比较低,

未来亟需一套物理层上完整的理论体系来支撑人工表面等离激元传输线在工程上向进一步小型化、可重构、高集成度的方向发展。

参考文献

- [1] POLMAN A, ATWATER H A. Photonic Design Principles for Ultrahigh-Efficiency Photovoltaics [J]. *Nature Materials*, 2012, 11(3): 174-177.
- [2] HECHT B, BIELEFELDT H, NOVOTNY L, et al. Local Excitation, Scattering, and Interference of Surface Plasmons [J]. *Physical Review Letters*, 1996, 77(9): 1889-1892.
- [3] HOMOLA J, YEE S S, GAUGLITZ G. Surface Plasmon Resonance Sensors: Review [J]. *Sensors and Actuators Chemical*, 1999, 54(1-2): 3-15.
- [4] YOU X H, WANG C X, HUANG J, et al. Towards 6G Wireless Communication Networks: Vision, Enabling Technologies, and New Paradigm Shifts [J]. *Science China (Information Sciences)*, 2021, 64(1): 74.
- [5] WETZSTEIN G, OZCAN A, GIGAN S, et al. Inference in Spoof Intelligence with Deep Optics and Photonics [J]. *Nature*, 2020, 588(7836): 39-47.
- [6] WANG Z N, JIA X H, WU H J, et al. Towards Ultra-Long-Distance Distributed Fiber-Optic Sensing [C]// 2017 25th Optical Fiber Sensors Conference. Jeju, Korea (South): IEEE, 2017: 17012422.
- [7] ZIA R, SCHULLER J A, CHANDRAN A, et al. Plasmonics: the Next Chip-Scale Technology [J]. *Materials Today*, 2006, 9(7-8): 20-27.
- [8] MENG Y, CHEN Y Z, LU L H, et al. Optical Meta-Waveguides for Integrated Photonics and Beyond [J]. *Light-Science & Applications*, 2021, 10(1): 235.
- [9] BIAN Y S, ZHENG Z, LIU Y, et al. Hybrid Wedge Plasmon Polariton Waveguide with Good Fabrication-Error-Tolerance for Ultra-Deep-Subwavelength Mode Confinement [J]. *Optics Express*, 2011, 19(23): 22417-22422.
- [10] AIHARA T, SAKAI H, TAKEDA A, et al. Coherent Plasmonic Interconnection in Silicon-Based Electrical Circuit [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(10): 2139-2145.
- [11] PENDRY J B, MARTIN M L, GARCIA-VIDAL F J. Mimicking Surface Plasmons with Structured Surfaces [J]. *Science*, 2004, 305(5685): 847-848.
- [12] MAIER S A, ANDREWS S R, MARTIN M L, et al. Terahertz Surface Plasmon-polariton Propagation and Focusing on Periodically Corrugated Metal Wires [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97(17): 176805.
- [13] JULURI B K, LIN S C S, WALKER T R, et al. Propagation of Spoof Surface Plasmons in Structured Conductor Surfaces with Parabolic Gradient Index [J]. *Spoof Surface Plasmon Metamaterials*, 2009, 17(4): 2997-3006.
- [14] GAN Q Q, FU Z, DING Y J, et al. Ultrawide-bandwidth Slow-Light System Based on THz Plasmonic Graded Metallic Grating Structures [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(25): 256803.
- [15] PORS A, NIELSEN M G, ERIKSEN R L, et al. Broadband Focusing Flat Mirrors Based on Plasmonic Gradient Metasurfaces [J]. *Nano Letters*, 2013, 13(2): 829-834.
- [16] YU N F, GENEVE P, KATS M A, et al. Light Propagation with Phase Discontinuities: Generalized Laws of Reflection and Refraction [J]. *Science*, 2011, 334(6054): 333-337.
- [17] ZHANG H C, HE P H, LIU Z X, et al. Dispersion Analysis of Deep-Sub-Wavelength-Decorated Metallic Surface Using Field-Network Joint Solution [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(6): 2923-2933.
- [18] ZHANG H C, HE P H, GAO X X, et al. Loss Analysis of Plasmonic Metasurfaces Using Field-Network-Joint Method [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(5): 3521-3526.
- [19] SHEN X P, CUI T J, MARTINCANO D, et al. Conformal Surface Plasmons Propagating on Ultrathin and Flexible Films [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(1): 40-45.
- [20] SHEN X P, CUI T J. Planar Plasmonic Metamaterial on a Thin Film with Nearly Zero Thickness [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(21): 211909.
- [21] KIANINEJAD A, CHEN Z N, QIU C W. Full Modeling, Loss Reduction, and Mutual Coupling Control of Spoof Surface Plasmon-Based Meander Slow Wave Transmission Lines [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2018, 66(8): 3764-3772.
- [22] ZHANG H C, HE P H, TANG W X, et al. Planar Spoof SPP Transmission Lines Applications in Microwave Circuits [J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2019, 20(11): 73-91.
- [23] HE P H, FAN Y, ZHANG H C, et al. Characteristic Impedance Extraction of Spoof Surface Plasmon Polariton Waveguides [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2021, 54(38): 385102.
- [24] GUAN D F, YOU P, ZHANG Q F, et al. Hybrid Spoof Surface Plasmon Polariton and Substrate Integrated Waveguide Transmission Line and Its Application in Filter [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2017, 65(12): 4925-4932.

- [25] XU K D, GUO Y J, YANG Q, et al. On-Chip GaAs-Based Spoof Surface Plasmon Polaritons at Millimeter-Wave Regime [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2021, 33(5): 255-258.
- [26] KIANINEJAD A, CHEN Z N, QIU C W. A Single-Layered Spoof-Plasmon-Mode Leaky Wave Antenna With Consistent Gain [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(2): 681-687.
- [27] HAN Y J, GONG S H, WANG J F, et al. Shared-Aperture Antennas Based on Even and Odd-Mode Spoof Surface Plasmon Polaritons [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(4): 3254-3258.
- [28] HE P H, FAN Y, NIU L Y, et al. Analysis, Reduction, and Utilization of Loss in Reconfigurable Spoof Surface Plasmon Polaritons [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2023, 71(3): 945-955.
- [29] ZHANG H C, LIU S, SHEN X P, et al. Broadband Amplification of Spoof Surface Plasmon Polaritons at Microwave Frequencies [J]. Laser & Photonics Reviews, 2015, 9(1): 83-90.
- [30] LIU X Y, FENG Y J, CHEN K, et al. Planar Surface Plasmonic Waveguide Devices Based on Symmetric Corrugated Thin Film Structures [J]. Optics Express, 2014, 22(17): 20107-20116.
- [31] ZHANG H C, FAN Y F, GUO J, et al. Second-Harmonic Generation of Spoof Surface Plasmon Polaritons Using Nonlinear Plasmonic Metamaterials [J]. Acs Photonics, 2016, 3(1): 139-146.
- [32] TIAN X, LEE P M, TAN Y J, et al. Wireless Body Sensor Networks Based on Metamaterial Textiles [J]. Nature Electronics, 2019, 2(6): 243-251.
- [33] ZHANG H C, ZHANG L P, HE P H, et al. A Plasmonic Route for the Integrated Wireless Communication of Subdiffraction-Limited Signals [J]. Light-Science & Applications, 2020, 9(1): 113.
- [34] LIANG Y, YU H, ZHANG H C, et al. On-Chip Sub-Terahertz Surface Plasmonpolariton Transmission Lines in CMOS [J]. Scientific Report, 2015, 5: 14853.
- [35] LIANG Y, YU H, WEN J, et al. On-Chip Sub-Terahertz Surface Plasmon Polariton Transmission Lines with Mode Converter in CMOS [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 30063.
- [36] QI Z, LI X, ZHU H. Low-Loss BiCMOS Spoof Surface Plasmon Polariton Transmission Line in Sub-THz Regime [J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2018, 12(2): 254-258.
- [37] XU K D, GUO Y J, YANG Q, et al. On-Chip GaAs-Based Spoof Surface Plasmon Polaritons at Millimeter-Wave Regime [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2021, 33(5): 255-258.
- [38] HE P H, YAO D Y, ZHANG H C, et al. Ultra-Compact On-Chip Spoof Surface Plasmon Polariton Transmission Lines with Enhanced Field Confinements [J]. Journal of Physics: Photonics, 2022, 4(4): 044002.
- [39] ZHANG T, ZHANG Y, SHI Q, et al. On-Chip THz Dynamic Manipulation Based on Tunable Spoof Surface Plasmon Polaritons [J]. IEEE Electron Device Letters, 2019, 40(11): 1844-1847.
- [40] ZHU H L, ZHANG Y, HAODING M R, et al. Terahertz On-Chip Tunable Spoof Surface Plasmon Polaritons Transmission Lines Based on Vanadium Dioxide [C]// 2021 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP). Chongqing: IEEE, 2021: 21506970.
- [41] GU Q J. Sub-THz/THz Interconnect, Complement to Electrical and Optical Interconnects: Addressing Fundamental Challenges Related to Communication Distances [J]. IEEE Solid State Circuits Magazine, 2020, 12(4): 20-32.
- [42] 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, Salt Lake City, UT: IEEE, 2008: 10368951.
- [43] LIANG Y, YU H, FENG G Y, 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.
- [44] JOY S R, EREMENTCHOUK M, YU H, et al. Spoof Plasmon Interconnects-Communications beyond RC Limit [J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(1): 599-610.
- [45] LIANG Y, YU H, 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.
- [46] ZENG H, LIANG H, ZHANG Y, et al. High-Precision Digital Terahertz Phase Manipulation with in a Multichannel Field Perturbation Coding Chip [J]. Nature Photonics, 2021, 15: 751-757.

(编辑:徐楠楠)