

人工表面等离激元及其在微波频段的应用

汤文轩 张浩驰 崔铁军*

(东南大学毫米波国家重点实验室 南京 210096)

摘要: 在微波频段采用超薄锯齿状金属条带可实现人工表面等离激元,将电磁场能量束缚在亚波长区域内传播。该文分析了人工表面等离激元特有的高束缚、低损耗、可调控等优点,研究了人工表面等离激元波导作为一种新型的高性能传输线在微波电路中的应用价值和发展现状,探讨了这一技术的发展方向和前景。

关键词: 人工表面等离激元;微波;传输线;小型化;可调控

中图分类号: O441.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)01-0231-09

DOI: 10.11999/JEIT160692

Sp spoof Surface Plasmon Polariton and Its Applications to Microwave Frequencies

TANG Wenxuan ZHANG Haochi CUI Tiejun

(State Key Laboratory of Millimetre Waves, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Sp spoof Surface Plasmon Polariton (SSPP), which possesses extraordinary ability of sub-wavelength-scaled field confinement, can be realized by an ultrathin corrugated metallic strip at microwave frequencies. Advantages of SSPP such as the high confinement, low loss, and controllable dispersion properties are analyzed in this paper. SSPP waveguide, a novel high-performance transmission line, is studied for its great potentials in modern integrated circuits. A series of reported applications for microwave circuits/devices are reviewed. In the end, future development of this technique is discussed.

Key words: Sp spoof Surface Plasmon Polariton (SSPP); Microwave; Transmission line; Miniaturization; Controllable

1 引言

自然界中的表面等离激元(Surface Plasmon Polariton, SPP)存在于远红外以上的频段,是由外界电磁场与金属表面区域的自由电子相互作用形成的沿金属表面传播的电子疏密波^[1]。在金属与电介质分界面的一侧,在等离子体频率以下的频段范围内,金属的介电常数实部为负值;另一侧,电介质材料的介电常数为正值。根据电磁场边界条件,为了保证电位移矢量的法向分量连续,分界面上将出现表面极化电荷。表面电荷在与其共振频率相同的电磁场作用下发生集体振荡,显现出独特的电磁特性:沿着分界面导行的表面等离激元波可以将电磁能量束缚在很小的亚波长范围内进行传播;而在垂直于

分界面的方向,电磁场能量呈指数衰减^[2]。表面等离激元波的传输损耗主要来自于金属损耗。

表面等离激元独特的传播特性,使其成为实现全光集成、下一代更小、更快、更高效光子电路的重要希望^[3]。随着纳米加工和制备技术以及理论模拟分析手段的快速发展,人们对表面等离激元的机理和应用研究越来越广泛和深入,并迅速发展出一门新兴学科——等离激元光子学(Plasmonics)。近年来,越来越多的研究者希望将表面等离激元的优异性能应用到微波、毫米波频段小型化器件与电路的研发中。遗憾的是,由于金属的等离子体频率处于红外和光波段,在微波和毫米波频段,金属的行为更加接近理想导体而非电等离子体,所以在这些波段并不存在表面等离激元模式。

为了在微波、毫米波频段模拟光波段的表面等离激元,英国帝国理工学院 Pendry 爵士及合作者在金属表面上通过设计人工周期介质孔阵列结构(如图 1(a)所示),有效降低了人工金属表面的等离子体频率,从而构建出微波和毫米波频段的人工表面等离激元(Sp spoof SPP, 又称为 Designer SPP),其色

收稿日期: 2016-07-04; 改回日期: 2016-09-20; 网络出版: 2016-11-17

*通信作者: 崔铁军 tjcui@seu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61571117, 61631007, 61401089, 61302018, 61501112, 61501117), 国家仪器专项(2013YQ200647), 111创新引智计划(111-2-05)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61571117, 61631007, 61401089, 61302018, 61501112, 61501117), The National Instrumentation Program (2013YQ-200647), The 111 Project (111-2-05)

散曲线可以模拟光波段表面等离子激元的色散曲线,其物理特征和光波段表面等离子激元极其相似^[4]。相比于自然存在的表面等离子激元,人工表面等离子激元具有两个显著的优点:第一,由于结构化的表面等离子体频率远低于金属本身的等离子体频率,因此具有较小的损耗;第二,可以通过改变金属表面的结构参数来灵活控制人工表面等离子激元的色散特性,进而获得可调控、可重构、智能化的电路、器件或天线。这一开创性的工作于2004年在《科学》杂志上发表。此后,多种不同结构的人工表面等离子激元效应被相继报道,工作频率覆盖了微波、毫米波和太赫兹波段^[5-12]。例如图1(b)所示是一个工作在微波频段的3维梯形槽金属光栅结构的弯曲双向人工表面等离子激元分波器^[13],凹槽的宽度和周期尺寸远小于工作波长,电磁场能量被束缚在亚波长区域内传播。实验证明这一结构不仅具有分波功能,而且可以实现高效的弯曲传输。

上述文献中都采用了立体形式的结构引导人工表面等离子激元传播。为了满足现代通信系统对小型化、低剖面、高度集成电路/系统的需求,人们一直在探索人工表面等离子激元的平面导波结构^[14]。2013年,东南大学崔铁军教授等人^[15]提出了一种超薄厚度(接近于零厚度)的共形人工表面等离子激元结构,如图1(c)所示。这是一种印制在柔性超薄介质衬底上的褶皱金属条带,具有亚波长宽度,其厚度仅有工作波长的几百分之一,在与电磁表面波传输方向垂直的两个维度上电场都按指数规律衰减,实现了真正意义上的亚波长束缚传输。由这种超薄结构人

工表面等离子激元构成的功能器件可以突破衍射极限,把电磁波有效地局域在一个很小的亚波长区域内传播。从加工工艺而言,这是一种2维表面结构,它与传统的微带传输线类似(但不需要金属地),可采用现有的电路板加工技术(微波段)或平面光刻技术(太赫兹波段),加工方便,可实现极高集成度,易于与现有技术集成。更进一步,可以通过采用柔性电路板实现不规则表面共形,实现电磁表面波沿任意弯曲表面的高效传输。除了柔性可共形人工表面等离子激元结构之外,国内外研究人员还提出了多种平面导波结构,其中,背面有金属地的褶皱金属条带由于可以和传统微带线高度集成,也具有广泛的应用前景^[16-19]。这一技术被应用于65 nm CMOS片上系统中(见图1(d)),与传统微带传输线相对比,人工表面等离子激元传输线的线间串扰在220 GHz至325 GHz频段内可以降低19 dB。上述工作都展示了人工表面等离子激元波导作为一种新型的高性能传输线,其优异的物理性质可极大地提升现有微波器件与系统的性能。

本文将针对人工表面等离子激元结构的传输特性及其在微波段的应用进行讨论。首先分析人工表面等离子激元结构的色散特性和设计方法,然后介绍这一新型传输线在微波电路和器件中的应用现状,最后对其发展方向和前景进行探讨。

2 人工表面等离子激元(SSPP)的特性

2.1 人工表面等离子激元的色散特性

微波段人工表面等离子激元结构作为一种新型的

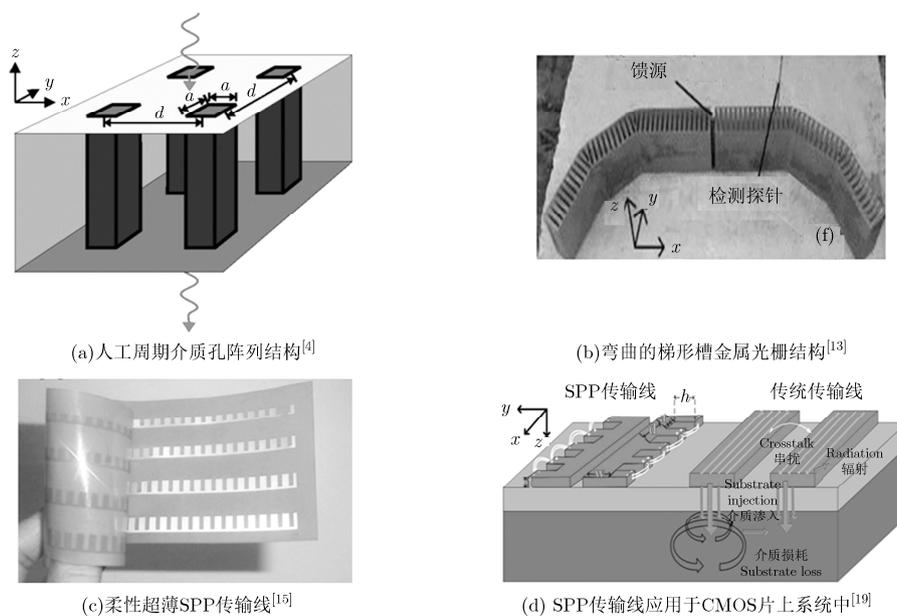


图1 几种人工表面等离子激元结构

波导传输线，由一系列亚波长金属凹槽单元实现，如图 2 所示，通常采用印制板电路工艺实现。根据表面等离子激元理论，横电(Transverse Electric, TE)模式的电磁波由于不存在垂直于分界面的电场分量，无法在分界面上感应出极化电荷，因此 SSPP 传输线只能工作在横磁(Transverse Magnetic, TM)模式。

根据波导传输线理论，人工表面等离子激元在传播方向(图 2 中 x 方向)上的波数 k_x 与空气中的波数 k_0 满足式(1)所示关系：

$$\alpha_T = \sqrt{k_x^2 - k_0^2} \quad (1)$$

其中 α_T 是横向(图 2 中 y, z 方向)衰减常数。由于人工表面等离子激元将电磁能量束缚在很小的亚波长范围内进行传播，横向电磁场能量呈指数衰减，因此 α_T 表征了传输线对电磁场的束缚能力：束缚能力越强的传输线，其 α_T 值越大，对应的 k_x 值也越大；束缚能力越弱的传输线，其 α_T 值越小，对应的 k_x 值也越小。

另一方面，传输线的衰减常数 α 定义为

$$\alpha = \frac{\text{单位长度的损耗功率}}{2 \times \text{传输功率}} \quad (2)$$

采用微扰近似计算方法，用不计损耗时导波的传输功率取代实际传输功率，则在输入功率相同的条件下，两种不同传输线的衰减常数比值(α_1/α_2)可以近似为^[20]

$$\alpha_1/\alpha_2 = \frac{\iint_{\Delta S} |\mathbf{E}_{01}|^2 dS}{\iint_{\Delta S} |\mathbf{E}_{02}|^2 dS} \quad (3)$$

其中 \mathbf{E}_{01} 和 \mathbf{E}_{02} 分别是两种传输线在无耗条件下的场分布， ΔS 是介质区域面积。式(3)表明，传输线的场局域性越强，在相同介质环境中的衰减常数 α 就越大，传输损耗越高。换句话说，损耗越高的传输线，其横向衰减常数 α_T 值越大，对应的波数 k_x 值也越大。

图 3 是利用本征模展开法分析得到的微波段人工表面等离子激元传输线色散曲线例图(假设在该频段金属无损耗)。人工表面等离子激元的色散曲线位于光线的右侧，在相同频率下，其波数 k_x 大于自由空间的光波数 k_0 。这一点与自然界中表面等离子激元特

性相吻合。对于介质背面附着金属地的 SSPP 传输线，其色散曲线全部位于空气中光线、介质中光线以及微带线色散曲线的右侧，表明该传输线相比于微带线在整个通带内对电磁波都具有更好的束缚能力，线间耦合更小、信号串扰更低。而另一种人工表面等离子激元传输线(背面无金属地的 SSPP 传输线)，其色散曲线全部位于空气中光线的右侧，与微带线的色散曲线在某频点相交(图 3 中虚线标出)。在虚线以上的频率，该 SSPP 传输线相比于微带线对电磁波具有更好的束缚能力；在虚线以下的频率，该传输线相比于微带线具有更低的能量损耗，传输效率更高。

与光波段表面等离子激元概念不同，人工表面等离子激元的一个重要特征是其色散特性可由其几何尺寸来调控，因此也被称为可设计的表面等离子激元。这一特性可以与新型人工电磁材料(Metamaterials)通过设计亚波长谐振单元阵列实现对材料电磁参数调控的特性相类比。作为一种新型平面波导，人工表面等离子激元传输线的色散曲线可以通过图 4(b)所示的金属凹槽的深度 d 、宽度 a 、周期长度 p 、介质基板厚度和电特性等参数进行调控，使其色散曲线在光线右侧按设计需求偏移，从而在大范围内调节波导的传播常数，在高束缚和低损耗两种模式中自由选择，有助于实现微波器件、电路和系统的小型化和智能化^[15, 20-22]。

2.2 人工表面等离子激元的高束缚特性

人工表面等离子激元提供的高束缚特性可以用于抑制传输线的邻间互耦，解决大规模电路中的信号完整性及邻间互耦问题与器件小型化之间的矛盾^[22-24]。为了充分发挥这一特性，在文献[23]中，研究者提出了一种新型双面结构的人工表面等离子激元传输线，相比于单面结构，电磁场被更紧密地束缚在亚波长结构之间，色散曲线进一步偏离光线(如图 4(c)所示)。该传输线一方面可突破传输低频电磁波的限制，另一方面可实现高度场局域化效果，在深度亚波长的间距(小于 3 %波长尺度)内实现了邻间波导之间的有效隔离，线间耦合比同尺寸传统微带线低 10 dB 以上，特殊频点小 4 个数量级以上。

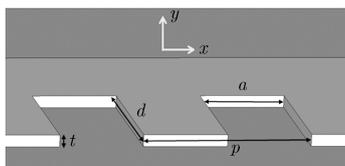


图 2 人工表面等离子激元结构示意图

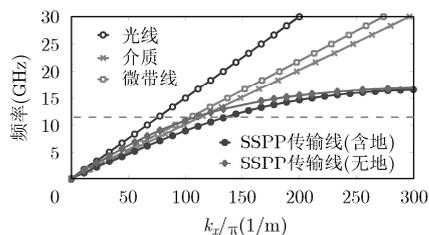


图 3 平面 SSPP 传输线在微波段的色散曲线分布例图

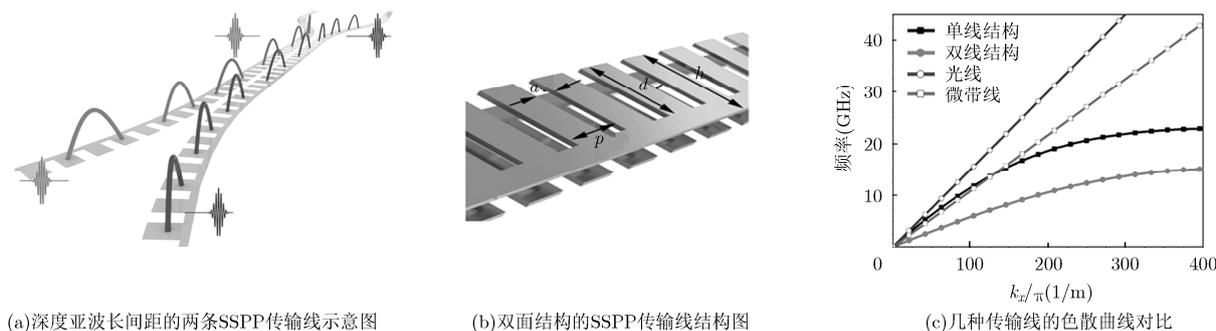


图 4 应用 SSPP 传输线突破信号完整性的挑战^[23]

由于在与电磁表面波传输方向垂直的两个维度上电场都按指数规律衰减，人工表面等离子体传输线间的低耦合特性也可以用于设计多层电路板以实现各类信号的大容量、高效率、低串扰传输。文献[24]对多层SSPP传输线(图5)的传输效率进行了探索性研究。经实验验证，通过结构弯曲和金属通孔过渡，可以在两层传输线之间实现信号的高效传输，在2.26~11.8 GHz频段内，200 mm距离的传输损耗小于1 dB。

2.3 人工表面等离子体的低损耗特性

另一方面，在场束缚能力较弱的频段内，人工表面等离子体传输线表现出低损耗的特性。这一特性也可用于解决现有微波传输线理论与技术中难以突破的损耗问题。文献[20]提供了一种获得较高传输系数的方案。通过调节人工表面等离子体结构参数，可以控制SSPP传输线色散曲线的分布，在需要的频段内获得较小的波数。例如，在图6(a)中，当亚波长凹槽深度 d 的取值变化时，SSPP传输线的色散曲线发生了显著偏移。当槽深 $d = 2$ mm 时，SSPP传输线的色散曲线在几乎整个通带内均位于微带线的左侧，显现出更低的场束缚性、更低的能量损耗和

更高的传输效率；在12.0 GHz以下，SSPP传输线相较于共面波导(CPW)显现出更高的传输效率。若改变槽深的取值，当 $d = 3$ mm 时，在11.4 GHz以下，SSPP传输线相较于微带线显现出更高的传输效率。图6(b)中的测量结果验证了在11.4 GHz以下，SSPP传输线的传输系数相较于微带线明显提高。采用这一方案，就可以灵活控制传输线的损耗特性，实现信号的高效传输。

2.4 人工表面等离子体波与传统导波的高效转换

表面等离子体的波数明显大于传统空间导波的波数，因此这种电磁波模式很难被自由空间波和传统导波模式直接激励。自然存在的表面等离子体通常采用棱镜和衍射光栅结构进行激发^[14]，而对于微波人工表面等离子体而言，常用的激励方式包括以下几种。

(1)采用低色散、低损耗的金属线作为激励。当圆柱金属线上的导波模是零阶TM模时，可以和人工表面等离子体的零阶TM模实现模式匹配^[25,26]。在微波频段，金属线可以用外伸的同轴线内导体来实现^[13,15]。但是这一激励方式效率较低，不适合工程应用。

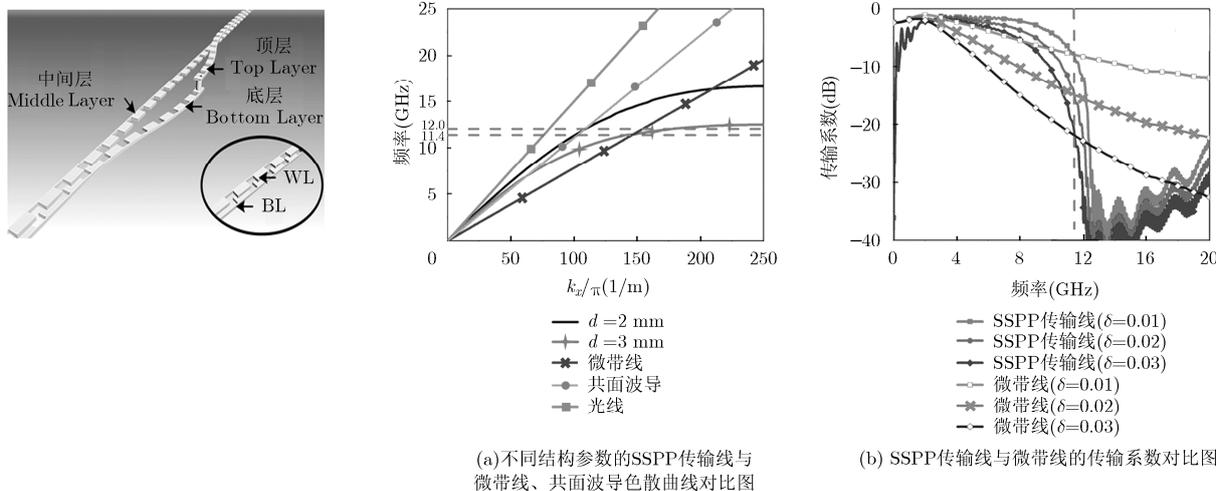


图 5 多层 SSPP 传输线设计示意图^[24]

图 6 调节人工表面等离子体结构参数实现高效传输^[20]

(2)利用具有梯度性质电磁参数的新型人工电磁表面(Metasurface)或新型人工电磁材料耦合器实现电磁波传播波和表面波的转换^[27-29]。这一激励方式效率较高,不足之处是转换部分占用较大空间,转换效率对入射波束极化与宽度较为敏感,转换过程中可能存在较大散射。

(3)对于SSPP传输线,简单紧凑的高效激励方式是这种新型平面波导能够被大范围施用于工程实践的前提。为了保证人工表面等离子激元的平面结构不变,可以采用共面波导作为传统传输线,通过特殊设计衰减地结构和渐变槽深结构(见图7示意图),实现波动量和波阻抗的宽带匹配,将信号由传统波导过渡到新型SSPP波导^[30]。对于带有金属地的SSPP传输线,也可以通过渐变槽深结构实现从传统微带线的过渡。

3 人工表面等离子激元在微波段的应用发展

如上文所述,人工表面等离子激元的低损耗特性可用于构造新一代微波电路中的高效传输线。另一方面,其独特的亚波长束缚能力所带来的低耦合和低折弯损耗特性,被寄予厚望用来克服传统技术无法突破的技术瓶颈,实现高集成、高效率的新型微波电路和系统。针对这一目标,国内外研究人员已经提出了多种结构形式,设计出一系列性能良好的表面等离子激元器件。此处仅对作者所在课题组发表的部分代表性工作进行介绍。

3.1 人工表面等离子激元无源器件研究

这一类微波器件利用了人工表面等离子激元的高束缚、低损耗特性,通过对亚波长结构参数进行优化设计,在需求频段实现对电磁波的有效控制,相比现有微波器件,具有结构更紧凑、性能更灵活可控等优点。目前报道的无源微波器件主要包括低互耦差分传输线^[22]、功率分配器^[15,31-34]、滤波器^[18,35-39]、耦合器^[40]、分频器^[41]、谐振腔^[21]等等。另外,一些采用人工表面等离子激元的无源天线也被相继报道^[33,42-44]。

由于人工表面等离子激元的色散特性可以通过亚波长结构参数进行调控,因此在设计功能器件时,

可以很容易实现高效的波数和阻抗匹配。图8(a)所示是一个Y型功率分配器。通过设计结构参数,单路和双路SSPP传输线的色散曲线在设计频段内基本一致,因此实现了低损耗的功率均分。实验结果显示,在6~12 GHz的宽频带内,两输出端口的输出能量几乎一致,传输系数都在-4 dB左右。人工表面等离子激元功分器也可以用于构架紧凑天线阵列馈电网络。例如,图8(b)中,区域I中的输入信号经过区域II所示功分网络,等幅同相地对区域III中的辐射单元进行馈电。区域III中的辐射单元具有渐变相位梯度,因此可以实现波束定向辐射。这一功分网络设计方案可用于更大规模人工表面等离子激元天线阵列中。

滤波器是无线通信及雷达系统中的重要组成部分,研制基于表面等离子激元的滤波器具有重要意义。图9(a)展示了一种宽带频率选择表面等离子激元,其功能表现为一种带通滤波器。该结构利用传统的共面波导进行馈电,利用槽深渐变的褶皱带线和开口金属地结构实现了从共面波导到表面等离子激元波导的高效转换,同时利用耦合带线实现带通功能。类似地,图9(b)和图9(c)中的另一个带通滤波器通过传统基片集成波导(SIW)进行馈电,在表面等离子激元波导和基片集成波导的截止频率之间形成通带。表面等离子激元滤波器的频率选择范围可由结构几何参数控制,具有设计简单、易于加工、柔韧度高、体积小、频率选择效果好等优点。

不同人工表面等离子激元结构对频率具有选择性,还可以用于设计频率分离器。文献[41]中,研究者在柔性印制电路板上周期性刻蚀深度交替出现的凹槽形成复合周期结构。模拟和实验结果证明,该结构能同时传输两个表面等离子激元模式,而且它们均对应单周期光栅结构的主模,其截止频率分别受深凹槽和浅凹槽的深度独立控制。这一设计方案极大方便了双带人工表面等离子激元波工作频率的控制。在此基础上设计的分频器(详见图10),采用复合周期光栅结构传输两个模式,复合周期光栅的另一端设计两个单周期分支,对复合周期结构中传输

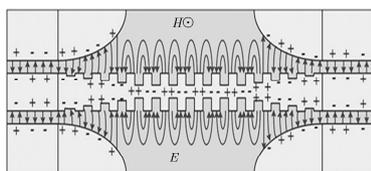
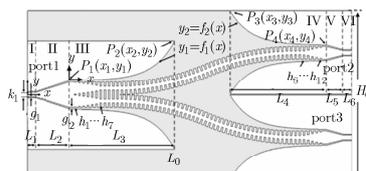
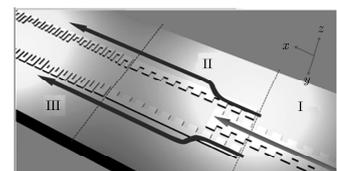


图7 实现共面波导与SSPP传输线的宽带高效匹配转换^[30]



(a)不同结构参数的SSPP传输线与微带线、共面波导线色散曲线对比图^[32]



(b)带有功分网络的人工表面等离子激元天线阵^[33]

图8 SSPP用于功分设计

的两个模式进行分离。实验测试结果表明,该结构具有良好的分频效果。

3.2 有源人工表面等离子器件

关于人工表面等离子有源器件的研究刚刚起步。目前已报道的工作主要包括:利用变容二极管或者偏压二极管芯片,实现电控可调的人工表面等离子器件,例如 SSPP 开关^[45,46];利用三极管芯片设计人工表面等离子功率放大器和二次倍频器等^[47,48]。

由于人工表面等离子结构参数对其色散特性具有重要影响,通过参数调节可以实现带内通/断切换。但是这一调控作用在设计过程中已经确定,因此无法实现器件的动态调控和重构。解决此问题的一个有效方案是在 SSPP 传输线中加载变容二极管以改变传输线的等效电容,从而达到通过电压控制 SSPP 传输特性的目的。文献^[46]报道了一个人工表面等离子波开关(图 11)。由于人工表面等离子波的能量高度集中在结构周围,对传输线附近的外部电磁场具有高度敏感性。当传输线周围存在处于谐振状态的开口环谐振器(SRR)时,绝大部分能量被吸收,人工表面等离子波无法传输。开口环谐振器结构中加载了压控变容二极管,通过电压控制 SRR 的谐振频率,可以实现人工表面等离子波的频率开关。

表面等离子波因为其显著的场局域与增强效应表现出很多奇异性,在光学和微波频段有很多潜在应用。但也正是因为这两个特点使得这种表面波模式对于介质和金属的损耗更为敏感。因此,如果将其作为传输电磁能量的媒介,则需对其进行损耗补偿。基于这一重要的物理背景,有效的宽带放大在表面等离子电路中显得尤为重要。文献^[47]报道了采用在微波领域已经很成熟的半导体芯片来进行表面等离子波放大的工作。由于单导体人工表面等离子无法方便地集成有源芯片,该设计中采用了双层人工表面等离子结构(见图 12),从而实现

了微波段表面等离子波的放大。

通过加载微波有源芯片还可以实现人工表面等离子非线性器件(图 13)。文献^[48]报道了通过在双层人工表面等离子结构中加入非线性器件,能够在较宽的频带范围内高效地激发人工表面等离子波的二次谐波。该二次谐波生成器件可作为人工表面等离子波倍频器。这种方案完全不同于光波段的方案,仅需要一个亚波长尺度的有源芯片便可实现具有增益补偿的二次谐波现象。

4 讨论与展望

人工表面等离子最为重要的特性就是提供了一种在亚波长尺度下调控其近场分布的方法与手段。本文讨论了这两个特点的重要应用价值:抑制传输线中的邻间互耦和构建低损耗传输线。这两个典型应用有望解决大规模集成电路中现存的诸多问题。

目前这一领域的大部分研究均局限于 SPP 相关理论与无源器件设计上。事实上,尽管国内外诸多学者对其进行了广泛深入的研究,但是这些研究是割裂的、非系统的。与之相关的成熟电路理论也尚未被提出。因此,可以说:“尽管这个领域的研究非常具有吸引力,但其依然具有很大的提升空间。”另一个重要的方面,由于上述提到的人工表面等离子结构几乎都是依赖于引入周期性的结构,而并不与任何一个自然坐标系重合,因此要得到一个可以解析的场解是十分困难的。所以想要得到相关的理论模型,等效电路法等电路理论反而是一种值得尝试的方法。相对于无源器件与结构设计,目前这方面的研究显得较为薄弱。由于缺少这种有效的电路模型,相关的设计主要依赖于仿真软件的尝试,因此对相关器件的快速综合带来了极大的困难,阻碍了其在工业应用中的推广。

对于微波器件而言,仅仅实现一系列无源器件是远远不够的。由于普通的无源器件,无法提供诸

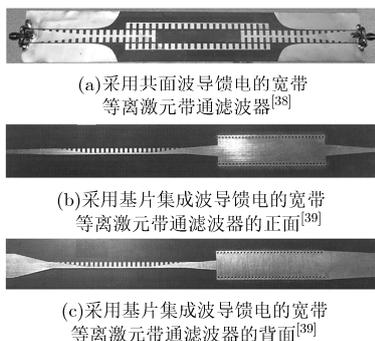


图9 SSPP用于滤波器设计

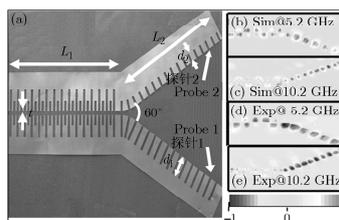


图10 超薄双波段表面等离子体波导和频率分离器^[41]

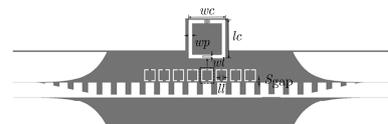
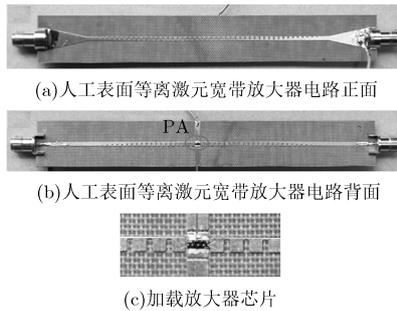


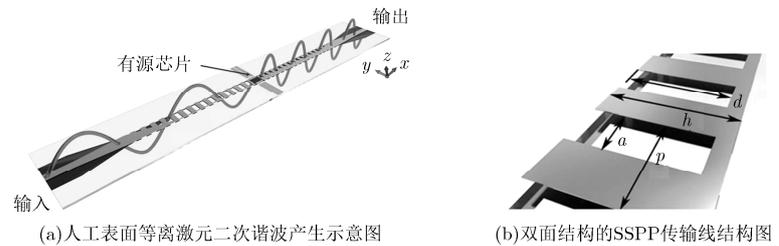
图11 人工表面等离子波开关示意图^[46]

图 12 人工表面等离子激元宽带放大器^[47]

如线性放大、显著的非线性以及非互易等特性，难以支撑起相关应用需求。由此看来，在人工表面等离子激元体系中引入有源器件是十分必要的。但是，与无源器件相比，关于有源器件的研究报道还十分稀少。最近，作者所在团队发表了两篇相关的报道，分别是有关人工表面等离子激元波的线性放大及二次谐波产生^[47,48]。这两篇文章均采用了微波中常用的未封装芯片，并使用邦定线将人工表面等离子激元的金属结构与有源芯片相互连接，从而形成有效的电通路以维持器件正常工作。但是这两个工作仅仅是非常初步的探索，尚未涉及很多有源设计中的关键技术，因此在这一方面仍然有很大的探索空间。

除了有源器件之外，更加重要的是，人工表面等离子激元技术可与现有相关技术互相结合与互相促进。相对于光波频段的表面等离子激元技术来说，由于微波频段存在功能强大的半导体芯片，因此其有源技术与光波段有着明显的不同。在光波段，往往需要借助大体积的光学增益材料或者非线性材料才能实现，并且这种光学方案具有限制。因为过大的正虚部和非线性项会导致材料中场模式的畸变，从而使得在其中传播的场型不再属于表面等离子激元模式。但是在微波频段，却不需要这样的担心，可以通过成熟的半导体芯片设计实现定制化的目的。

总而言之，作为一种新型的微波传输线，人工表面等离子激元传输线借鉴了光波段表面等离子激元在亚波长尺度操纵场分布的思想，通过简单的周期结构实现类似的场型。在传统微波技术中，其可以看作是微波慢波结构的一种。但时，值得强调的是，并非所有的传统微波慢波传输结构均是人工表面等离子激元结构。其主要区别是，人工表面等离子激元结构在分界面两边均呈现出指数调落型的场，而多数慢波结构存在导波模式。正是由于这个原因，通过人工表面等离子激元技术可以操纵横截面场分布，进而操纵电磁波的行为，按照需求构建出具有特殊性

图 13 人工表面等离子激元二次谐波的激发^[48]

质的传输线形式。因此，人工表面等离子激元波导作为一种新型的高性能传输线，其优异的物理性质可能极大地提升现有微波器件与系统的性能。

参 考 文 献

- [1] BARNES W L, DEREUX A, and EBBESEN T W. Surface plasmon subwavelength optics[J]. *Nature*, 2003, 424: 824–830. doi: 10.1038/nature01937.
- [2] MAIER S A. Plasmonics: Fundamentals and Applications[M]. New York: Springer, 2007, Chapter 1.
- [3] LIU N, WEN F, ZHAO Y, *et al.* Individual nanoantennas loaded with three-dimensional optical nanocircuits[J]. *Nano Letters*, 2013, 13(1): 142–147. doi: 10.1021/nl303689c.
- [4] PENDRY J B, MARTIN-MORENO L, and GARCIA-VIDAL F J. Mimicking surface plasmons with structured surfaces[J]. *Science*, 2004, 305(5685): 847–848. doi: 10.1126/science.1098999.
- [5] A. P. HIBBINS A P, EVANS B R, and SAMBLES J R. Experimental verification of designer surface plasmons[J]. *Science*, 2005, 308(5722): 670–672. doi: 10.1126/science.1109043.
- [6] GARCIA-VIDAL F J, MARTIN-MORENO L, and PENDRY J B. Surfaces with holes in them: new plasmonic metamaterials[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2005, 7(2): S97–S101. doi: 10.1088/1464-4258/7/2/013.
- [7] MAIER S A, ANDREWS S R, MARTIN-MORENO L, *et al.* Terahertz surface plasmon-polariton propagation and focusing on periodically corrugated metal wires[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97(17): 176805(1–4). doi: 10.1103/PhysRevLett.97.176805.
- [8] CHEN Yongyao, SONG Zhenming, LI Yanfeng, *et al.* Effective surface plasmon polaritons on the metal wire with arrays of subwavelength grooves[J]. *Optics Express*, 2006, 14(26): 13021–13029. doi: 10.1364/OE.14.013021.
- [9] WILLIAMS C R, ANDREW S R, MAIER S A, *et al.* Highly confined guiding of terahertz surface plasmon polaritons on structured metal surfaces[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(3):

- 175–179. doi: 10.1038/nphoton.2007.301.
- [10] GAN Qiaoqiang, FU Zhan, DING Yujie, *et al.* Ultrawide-bandwidth slow-light system based on THz plasmonic graded metallic grating structures[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(25): 256803(1–4). doi: 10.1103/PhysRevLett.100.256803.
- [11] MORENO E, RODRIGO S G, BOZHEVOLNYI S I, *et al.* Guiding and focusing of electromagnetic fields with wedge plasmon polaritons[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(2): 023901(1–4). doi: 10.1103/PhysRevLett.100.023901.
- [12] NAGPAL P, LINQUIST N C, Oh S H, *et al.* Ultrasoother patterned metals for plasmonics and metamaterials[J]. *Science*, 2009, 325(5940): 594–597. doi: 10.1126/science.1174655.
- [13] ZHOU Yongjin, JIANG Quan, and CUI Tiejun. Bidirectional bending splitter of designer surface plasmons[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(11): 111904(1–4). doi: 10.1063/1.3639277.
- [14] LOCKYEAR M J, HIBBINS A P, and SAMBLES J R. Microwave surface-plasmon-like modes on thin metamaterials[J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102(7): 073901(1–4). doi: 10.1103/PhysRevLett.102.073901.
- [15] SHEN Xiaopeng, CUI Tiejun, MARTIN-CANO D, *et al.* Conformal surface plasmons propagating on ultrathin and flexible films[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 2013, 110(1): 40–45. doi: 10.1073/pnas.1210417110.
- [16] WU J J. Subwavelength microwave guiding by periodically corrugated strip line[J]. *Progress In Electromagnetics Research*, 2010, 104: 113–123. doi: 10.2528/PIER10021202.
- [17] LIU Xiaoyong, FENG Yijun, ZHU Bo, *et al.* High-order modes of spoof surface plasmonic wave transmission on thin metal film structure[J]. *Optics Express*, 2013, 21(23): 3155–3165. doi: 10.1364/OE.21.031155.
- [18] ZHANG Wenxuan, ZHU Guiqiang, SUN Liguo, *et al.* Trapping of surface plasmon wave through gradient corrugated strip with underlayer ground and manipulating its propagation[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(2): 021104(1–6). doi: 10.1063/1.4905675.
- [19] LIANG Yuan, YU Hao, ZHANG Haochi, *et al.* On-chip sub-terahertz surface plasmon polariton transmission lines in CMOS[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 14853(1–13). doi: 10.1038/srep14853.
- [20] ZHANG Haochi, ZHANG Qian, LIU Junfeng, *et al.* Smaller-loss planar SPP transmission line than conventional microstrip in microwave frequencies[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 23396(1–10). doi: 10.1038/srep23396.
- [21] SHEN Xiaopeng, and CUI Tiejun. Planar plasmonic metamaterial on a thin film with nearly zero thickness[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(21): 211909(1–4). doi: 10.1063/1.4808350.
- [22] WU J J, HOU D J, LIU K X, *et al.* Differential microstrip lines with reduced crosstalk and common mode effect based on spoof surface plasmon polaritons[J]. *Optics Express*, 2014, 22(22): 26777–26787. doi: 10.1364/OE.22.026777.
- [23] ZHANG Haochi, CUI Tiejun, ZHANG Qian, *et al.* Breaking the challenge of signal integrity using time-domain spoof surface plasmon polaritons[J]. *ACS Photonics*, 2015, 2(9): 1333–1340. doi: 10.1021/acsp Photonics.5b00316.
- [24] PAN Baicao, ZHAO Jie, LIAO Zhen, *et al.* Multi-layer topological transmissions of spoof surface plasmon polaritons[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 22702(1–9). doi: 10.1038/srep22702.
- [25] WANG K L and MITTLEMAN D M. Metal wires for terahertz wave guiding[J]. *Nature*, 2004, 432(7015): 376–379. doi: 10.1038/nature03040.
- [26] WANG K L and MITTLEMAN D M. Dispersion of surface plasmon polaritons on metal wires in the terahertz frequency range[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(15): 157401(1–4). doi: 10.1103/PhysRevLett.96.157401.
- [27] SUN Shulin, HE Qiong, XIAO Shiyi, *et al.* Gradient-index meta-surfaces as a bridge linking propagating waves and surface waves[J]. *Nature Materials*, 2012, 11(5): 426–431. doi: 10.1038/NMAT3292.
- [28] WU Chenjun, CHENG Yongzhi, WANG Wenying, *et al.* Ultra-thin and polarization-independent phase gradient metasurface for high-efficiency spoof surface-plasmon-polariton coupling[J]. *Applied Physics Express*, 2015, 8(12): 122001(1–4). doi: 10.7567/APEX.8.122001.
- [29] SUN Wujiong, HE Qiong, SUN Shulin, *et al.* High-efficiency surface plasmon meta-couplers: Concept and microwave-regime realizations[J]. *Light-Science and Applications*, 2016, 5: e16003(1–6). doi: 10.1038/lsa.2016.3.
- [30] MA Huifeng, SHEN Xiaopeng, CHENG Qiang, *et al.* Broadband and high-efficiency conversion from guided waves to spoof surface plasmon polaritons[J]. *Laser and Photonics Reviews*, 2014, 8(1): 146–151. doi: 10.1002/lpor.201300118.
- [31] LIU Liangliang, LI Zhuo, XU Bingzheng, *et al.* High-efficiency transition between rectangular waveguide and domino plasmonic waveguide[J]. *AIP Advances*, 2015, 5(2): 027105(1–9). doi: 10.1063/1.4907879.
- [32] GAO Xi, ZHOU Liang, YU Xingyang, *et al.* Ultra-wideband surface plasmonic Y-splitter[J]. *Optics Express*, 2015, 23(18): 23270–23277. doi: 10.1364/OE.23.023270.
- [33] XU Junjun, YIN Jiayuan, ZHANG Haochi, *et al.* Compact feeding network for array radiations of spoof surface plasmon polaritons[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 22692(1–7). doi: 10.1038/srep22692.
- [34] ZHU Zhihong, GARCIA-ORTIZ C E, HAN Zhanghua, *et al.*

- Compact and broadband directional coupling and demultiplexing in dielectric-loaded surface plasmon polariton waveguides based on the multimode interference effect[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(6): 061108(1-5). doi: 10.1063/1.4817860.
- [35] XU Bingzheng, LI Zhuo, LIU Liangliang, *et al.* Tunable band-notched coplanar waveguide based on localized spoof surface plasmons[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(20): 4683-4686. doi: 10.1364/OL.40.004683.
- [36] GAO Xi, ZHOU Liang, LIAO Zhen, *et al.* An ultra-wideband surface plasmonic filter in microwave frequency[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(19): 191603(1-5). doi: 10.1063/1.4876962.
- [37] PAN Baicao, LIAO Zhen, ZHAO Jie, *et al.* Controlling rejections of spoof surface plasmon polaritons using metamaterial particles[J]. *Optics Express*, 2014, 22(11): 13940-13950. doi: 10.1364/OE.22.013940.
- [38] YIN Jiayuan, REN Jian, ZHANG Haochi, *et al.* Broadband frequency-selective spoof surface plasmon polaritons on ultrathin metallic structure[J]. *Scientific Reports*, 2014, 5: 8165(1-5). doi: 10.1038/srep08165.
- [39] ZHANG Qian, ZHANG Haochi, WU Han, *et al.* A hybrid circuit for spoof surface plasmons and spatial waveguide modes to reach controllable band-pass filters[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 16531(1-9). doi: 10.1038/srep16531.
- [40] LIU Xiaoyong, FENG Yijun, CHEN Ke, *et al.* Planar surface plasmonic waveguide devices based on symmetric corrugated thin film structures[J]. *Optics Express*, 2014, 22(17): 20107-20116. doi: 10.1364/OE.22.020107.
- [41] GAO Xi, SHI Jinhui, SHEN Xiaopeng, *et al.* Ultrathin dual-band surface plasmonic polariton waveguide and frequency splitter in microwave frequencies[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(15): 151912(1-4). doi: 10.1063/1.4802739.
- [42] BAI Xue, QU Shiwei, and YI Huan. Applications of spoof planar plasmonic waveguide to frequency-scanning circularly polarized patch array[J]. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 2014, 47(32): 325101(1-7). doi: 10.1088/0022-3727/47/32/325101.
- [43] WU Jinjei, WU Chienjang, SHEN Jianqi, *et al.* Properties of transmission and leaky modes in a plasmonic waveguide constructed by periodic subwavelength metallic hollow blocks [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 14461(1-10). doi: 10.1038/srep14461.
- [44] CAI Bengeng, LI Yunbo, MA Huifeng, *et al.* Leaky-wave radiations by modulating surface impedance on subwavelength corrugated metal structures[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 23974(1-7). doi: 10.1038/srep23974.
- [45] WAN Xiang, YIN Jiayuan, ZHANG Haochi, *et al.* Dynamic excitation of spoof surface plasmon polaritons[J]. *Applied Physics Letters*, 214, 105(8): 083502(1-4). doi: 10.1063/1.4894219.
- [46] XU Jie, ZHANG Haochi, TANG Wenxuan, *et al.* Transmission-spectrum-controllable spoof surface plasmon polaritons using tunable metamaterial particles[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(19): 191906(1-5). doi: 10.1063/1.4950701.
- [47] ZHANG Haochi, LIU Shuo, SHEN Xiaopeng, *et al.* Broadband amplification of spoof surface plasmon polaritons at microwave frequencies[J]. *Laser and Photonics Reviews*, 2015, 9(1): 83-90. doi: 10.1002/lpor.201400131.
- [48] ZHANG Haochi, FAN Yifeng, GUO Jian, *et al.* Second-harmonic generation of spoof surface plasmon polaritons using nonlinear plasmonic metamaterials[J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(1): 139-146. doi: 10.1021/acsp Photonics.5b00580.
- 汤文轩：女，1984年生，讲师，主要研究方向为新型人工电磁材料及人工表面等离子激元的理论和应用、微波电路和天线设计。
- 张浩驰：男，1991年生，博士生，研究方向为人工表面等离子激元的理论和应用、微波毫米波电路系统设计。
- 崔铁军：男，1965年生，教育部长江学者特聘教授，博士生导师，主要研究方向为新型人工电磁材料及人工表面等离子激元的理论和应用、计算电磁学及其快速算法、目标特性与目标识别。