

超构天线: 原理、器件与应用

马晓亮 李雄 郭迎辉 赵泽宇 罗先刚

Meta-antenna: principle, device and application

Ma Xiao-Liang Li Xiong Guo Ying-Hui Zhao Ze-Yu Luo Xian-Gang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 147802 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.147802

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.147802>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I14>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

复合结构螺旋超材料对光波前的高效调控

High-efficiency wavefront control with based on helical metamaterials

物理学报.2016, 65(21): 217802 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.217802>

宽入射角度偏振不敏感高效异常反射梯度超表面

Polarization-insensitive and broad-angle gradient metasurface with high-efficiency anomalous reflection

物理学报.2015, 64(23): 237802 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.237802>

工字形太赫兹超材料吸波体的传感特性研究

Study on sensing characteristics of I-shaped terahertz metamaterial absorber

物理学报.2015, 64(11): 117801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.117801>

用最小结构单元频率选择表面实现大入射角宽频带的透波材料

Wideband and large incident angle wave transparent material based on frequency selective surface with miniaturized elements

物理学报.2014, 63(13): 137803 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.137803>

基于加权实数编码遗传算法的超材料优化设计

Optimization of metamaterial based weighted real-coded genetic algorithm

物理学报.2014, 63(8): 087804 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.087804>

专题: 电磁波衍射极限

超构天线: 原理、器件与应用*

马晓亮 李雄 郭迎辉 赵泽宇 罗先刚†

(中国科学院光电技术研究所, 微细加工光学技术国家重点实验室, 成都 610209)

(2017年4月17日收到; 2017年5月14日收到修改稿)

自从电磁波被发现和应用以来, 利用各种材料或者结构调节电磁波的辐射行为、构造高性能的电磁辐射器件一直是研究人员的追求目标. 经过百余年的发展, 电磁辐射器件的方向性提高、带宽拓展等技术逐渐达到瓶颈. 受自然材料电磁特性的限制, 微带天线、喇叭天线等传统电磁辐射器件存在体积重量大、工作带宽窄、无法快速动态调控等缺陷, 难以满足日益发展的通信技术的需求. 近年来出现的亚波长结构可在深度亚波长尺度下调控电磁波的传输行为, 出现了多种奇异的电磁现象, 完善了传统的电磁学理论, 在一定程度上突破了传统材料电磁特性的限制, 形成全新的电磁辐射技术, 有效解决了传统天线存在的口径大、厚度高、带宽窄等难题, 促进了电磁学、光子学、材料学等领域的发展. 这种基于超构材料的新型天线可以被称为超构天线, 具有高方向性、低副瓣、超宽带、可重构等传统天线难以实现的功能. 本文主要回顾了近年来基于亚波长超构材料的超构天线技术的发展现状和取得的成果, 介绍了超构材料在亚波长尺度下对电磁波振幅、相位、偏振态等的衍射调控机理, 以及在此基础上形成的新型辐射器件, 例如相控阵天线、高方向性天线、低雷达散射截面天线, 基于亚波长结构的多种偏振调控器件及其在天线中的应用等. 在衍射极限尺度下, 这种亚波长结构的调控行为可有效提升电磁辐射器件的方向性、带宽, 并可重构天线的工作频率、偏振态等性能.

关键词: 亚波长结构, 超构材料, 超构天线, 衍射调控

PACS: 78.67.Pt, 43.35.Bf, 52.40.Fd, 42.25.Bs

DOI: 10.7498/aps.66.147802

1 引言

1886年, 赫兹在德国卡尔斯鲁厄工学院建立了世界上第一套实验室中的天线系统, 验证了电磁波用于无线传输的可能, 为信息传递方式的改变提供了理论和技术基础. 20世纪初, 古利莫·马可尼成功地将天线从实验原型样机应用于商业通信, 使人类社会正式进入无线通信时代. 经过一个世纪的发展, 无线通信技术已经成为人们日常生活必不可少的组成部分, 使人们探索世界的脚步越走越远, 也为人类探索宇宙深处提供了基本保证. 作为无线通信技术的核心, 天线等辐射器件的性能成为决定无线通信能力的关键因素之一. 经过百余年的发展, 人们设计和制造了多种不同结构和功能的天线, 包

括偶极子天线、微带天线、喇叭天线、螺旋线天线等; 天线的功能和工作频段也在不断拓展, 微波天线、太赫兹天线甚至光学天线都已经得到广泛应用.

随着现代通信技术、雷达探测技术等对定向通信、保密通信等的需求不断增加, 高方向性天线、波束扫描天线以及多频段、多偏振态天线等具有特殊功能的天线正在成为基础研究和工程应用的热点. 传统技术手段中, 天线方向性的提高依赖于天线口径的增大, 因此应用于雷达探测、远距离通信的天线体积和重量庞大, 不利于在空基、天基等系统中的应用. 近些年发展起来的相控阵天线技术, 通过在阵列单元中加载传输/接收(T/R)组件, 实现对天线辐射波束扫描和波束赋形. 然而T/R组件的体积和重量也较大, 成本较高. 受制于传统电磁学理论和自然界材料电磁特性的限制, 往往不得

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2013CBA01700)和国家自然科学基金(批准号: 61405201, 61675208)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lxg@ioe.ac.cn

不接受这种以牺牲体积和重量的方式获得天线方向性的提升以及波束扫描等能力; 而从硬件上来说, 传统技术手段难以实现工作频率、辐射偏振态等可动态调控的天线. 另外, 传统技术手段中, 对天线等辐射器件的隐身大多通过频率选择表面天线罩以及机械控制天线非工作状态时的转向等方式, 以降低辐射器件被雷达探测的概率, 但是这种方法难以兼顾天线正常工作状态下的隐身. 这也是辐射技术和隐身技术存在的难以解决的矛盾.

随着对电磁波衍射行为的深入研究, 人们发现在衍射极限尺寸下的深度亚波长结构中存在一些异常的衍射现象. 1998年, 法国 Louis Pasteur 大学的 Ebbesen 等^[1]发现, 电磁波通过由直径小于波长的小孔组成的阵列结构时, 其透射率明显高于传统基尔霍夫衍射理论得到的衍射场强度, 并将该现象称为异常透射现象 (extraordinary optical transmission, EOT). 通过对其物理本源的分析, 发现在光波照射下, 金属和介质的交界面处产生表面等离子体, 且表面等离子体在沿金属-介质界面传播以及二次辐射的过程中发生衍射, 衍射波在远场发生干涉, 形成了异常电磁透射现象. 在传统理论中, 电磁波在通过亚波长小孔后, 将发生全方向的衍射. 而通过在亚波长小孔周围设计一系列周期性的沟槽结构, 可大大压缩透射波的波束角度, 实现异常的定向辐射^[2]. 研究结果表明, 沟槽结构对表面波的衍射调控在这种异常定向辐射现象中起到了决定性的作用. 基于亚波长结构衍射调控性能的电磁辐射技术, 为逼近甚至突破传统电磁辐射器件的方向性与口径之间的依赖关系提供了新的技术途径.

上述具有代表性的异常衍射现象, 证明了亚波长结构中存在着某些特定的物理机理, 可以使电磁波在通过亚波长金属结构后, 表现出自然界的材料或者结构难以实现的调控作用, 为利用亚波长结构构造高效电磁辐射器件创造了可能性. 在上述亚波长结构现象和理论指导下, 研究人员提出了多种基于亚波长结构的新型电磁辐射理论, 并构造出一系列高性能电磁辐射器件, 包括宽带天线、小型化天线、超宽带偏振调控天线、可重构电磁辐射器件, 以及纳米尺寸的激光器等, 促进了电磁辐射技术的快速发展. 基于亚波长超构材料的新型天线具有传统天线器件难以实现的电磁功能, 因此也被称为超构天线 (meta-antenna)^[3,4].

本文对近年来发展迅速的亚波长结构辐射技术进行综述, 主要从以下几方面介绍了亚波长结构对电磁辐射性能的调控: 1) 亚波长超构材料及其在高方向性和低雷达散射截面 (radar scattering sections, RCS) 天线中的应用; 2) 相位调制型亚波长超构材料及相控阵天线技术; 3) 亚波长结构偏振调控技术及其在天线中的应用. 综述内容包括亚波长结构对电磁波的调控机理、调控方法和应用等方面, 并对亚波长结构的电磁辐射技术的发展趋势做了分析和展望.

2 基于超构材料的高性能天线辐射调控技术

相比于自然界存在的材料, 超构材料具有更加优异的电磁调控能力, 在电磁波的振幅、相位调控方面具有前所未有的灵活性, 并且其色散特性可人为设计, 为构造具有高方向性、低副瓣、宽频带等特性的高性能天线提供了技术基础. 本节主要介绍亚波长结构在提高天线的方向性、降低天线的 RCS 水平等方面的应用.

2.1 基于亚波长结构的高方向性天线

天线的方向性系数是表征天线定向辐射能力的一个重要指标, 是指天线在某一方向上辐射的能量与全向天线在该方向上的辐射能量的比值. 方向性越高, 说明在相同的辐射功率条件下, 天线信号的传输距离越远, 因此提高天线的方向性是天线领域研究人员的一个重要目标. 传统技术中, 天线方向性的提升主要通过增加天线的口径来实现, 进而导致天线的体积和重量相应增加, 不利于天线系统的集成化.

亚波长超构材料的出现为提高天线的方向性提供了全新的技术途径. 主要的技术方案包括在天线上加载光子晶体 (photonic crystal)^[5-9]、零折射率材料^[10-13], 以及构造法布里-珀罗共振腔等方式. 光子晶体是指由介电常数呈周期性分布的电介质组成的人工结构材料, 根据组成光子晶体的介质材料的排布方式, 可分为一维、二维和三维光子晶体. 图 1(a) 为二维光子晶体结构示意图, 其由周期性排布的介质棒组成, 在该结构中引入缺陷态, 可产生与自然界晶体的电子能带类似的光学带隙

(photonic band-gap) (图 1 (b)). 入射的电磁波将被局域在该缺陷态中传播, 从而实现对电磁波传播方向的定向调控. 通过人为设计光子晶体的介电常数分布, 构造所需频段的光子带隙, 可使处于带隙中的电磁波沿着人为设定的方向传播. 将这种光子晶体引入到传统天线设计中, 可以有效压缩天线的辐射方向角, 达到控制电磁辐射、构造高方向性天线的目的. 在图 1 (a) 所示的光子晶体中嵌入单极子天线, 光子晶体可将传统天线辐射的全向电磁波转换为沿单一方向辐射的定向电磁波, 天线的辐射

方向图见图 1 (c) [6]. 天线的 E 面和 H 面的半功率波束宽度都为 13° , 计算得到天线的方向性系数由 1.6 dB 增加到 23.9 dB.

加载一维光子晶体作为覆层的新型贴片天线结构如图 1 (d) 所示 [7]. 图 1 (e) 和图 1 (f) 分别为加载光子晶体覆层之前和之后的天线辐射方向图. 从图中可以看出, 加载光子晶体覆层结构后, 贴片天线的 E 面和 H 面的辐射波束与未加光子晶体覆层时相比得到了明显的压缩; 天线的方向性系数由 8 dB 提高到 20 dB.

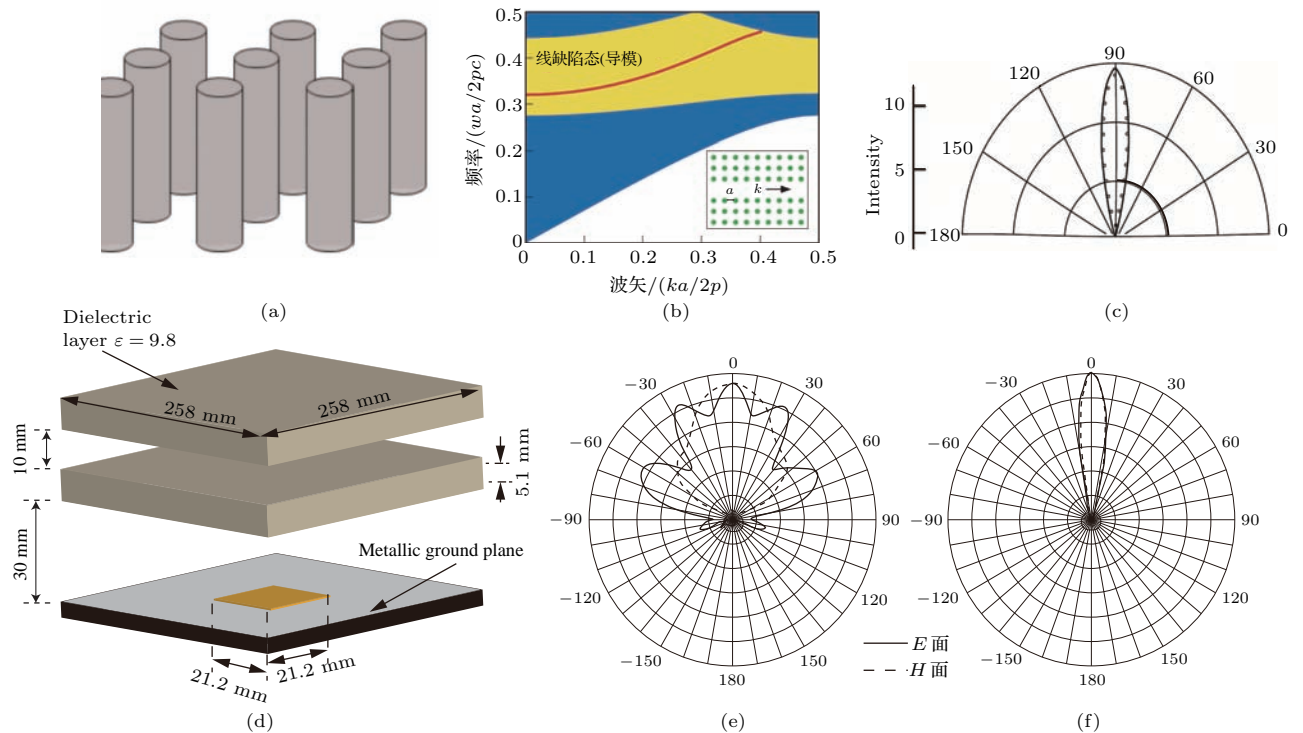


图 1 基于光子晶体的高方向性天线 (a) 典型的二维光子晶体结构示意图; (b) 光子晶体能带结构示意图; (c) 嵌入三维光子晶体的单极子天线辐射方向图 [6]; (d) 加载光子晶体覆层的贴片天线; (e), (f) 分别为未加载和加载光子晶体覆层时天线 E 面和 H 面的方向图 [7].

Fig. 1. High directivity antennas based on photonic crystals: (a) Scheme of the two-dimensional photonic crystal; (b) photonic band-gap of 2-D photonic crystal; (c) radiation pattern of monopole antenna inserted in 3-D photonic crystal [6]; (d) patch antenna with photonic crystal clad; (e), (f) are the radiation patterns of the patch without and with photonic crystal clad [7].

除了光子晶体之外, 具有近零折射率的亚波长超构材料也可用于构造高方向性天线. 根据斯涅耳定律可知, 当材料的折射率为零时, 对于任意的入射角, 折射角都等于零, 如图 2 (a) 所示. 然而自然界中折射率为零的材料是不存在的, 利用超构材料对电磁波的调控特性, 可以构造具有任意等效折射率的人工电磁媒质. Pendry 等提出合理利用电谐振结构 [14] 和磁谐振结构 [15], 可以构造出具有负折

射率特性的超构材料. 利用相似的原理, 可以构造折射率等于零或者接近零的超构材料.

在天线辐射面上覆盖零折射率材料后, 天线的辐射场将沿着材料的法线方向传播, 从而提高天线的方向性. 例如, 将传统的单极子天线嵌入具有零折射率的多层超构材料中, 如图 2 (b) 所示, 单极子天线的全向辐射特性会被零折射率材料调制为定向辐射. 加载零折射率材料后, 天线的 E

面和 H 面的半功率波束宽度分别为 8.9° 和 18.3° , 方向性系数由原来单极子天线的 1.64 dB 增加到 25.7 dB^[16], 如图 2(c) 所示. 零折射率超构材料还可以加载到传统的喇叭天线的辐射口径面上, 进一步提高喇叭天线的辐射性能. 图 2(d) 为加载了零折射率材料的喇叭天线结构示意图, 其中的零折射率材料由二维金属线“渔网结构”组成^[13]. 从图 2(e) 所示的天线远场方向图可以看出, 在零折射率超构材料的工作频率处, 加载了近零折射率亚波长结构的喇叭天线的辐射波束宽度变窄, 辐射方向性系数明显提高, 其方向性与口径之间的关系接近理论的衍射极限. 通过结构参数的合理设计, 这种二维渔网结构可在不同谐振频点处针对不同的偏振态具有零折射率. 将这种双工作频点和双偏振态的零折射率材料作为覆层加载到传统微带

天线上, 可构造高方向性的多功能天线, 如图 2(f) 所示^[17]. 图 2(g) 和图 2(h) 为该天线在高频谐振点处 y 偏振下的 E 面和 H 面辐射方向图. 从图中可以看出, 加载零折射率材料后, 天线的增益水平由原来的 6 dB 增加到 19 dB, 辐射性能得到显著提升. 图 2(i) 和图 2(h) 为具有梯度折射率分布的超构材料, 其单元结构由不同结构参数的矩形金属环组成, 其等效折射率变化范围覆盖 $1.2\text{--}3.7$, 且材料中心处的等效折射率最高, 沿径向递减^[11]. 测试结果显示, 该超构材料可在 65% 的工作带宽范围内将传统天线的增益提高 8 dB. 通过具有更高空间填充效率的分形几何结构构造零折射率超构材料, 可有效降低超材料单元的尺寸, 增加材料的均匀性, 提高超构材料等效电磁参数以及天线设计的准确性^[18].

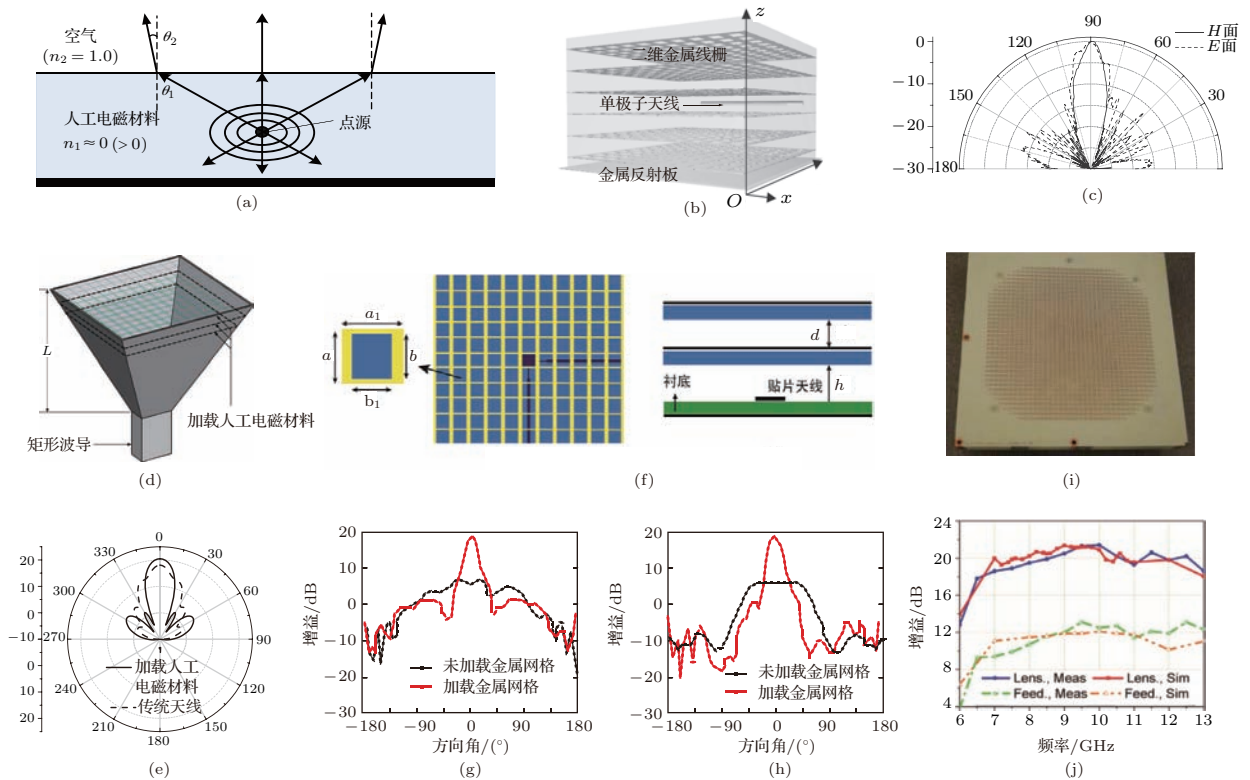


图 2 基于零折射率超构材料的高方向性天线 (a) 零折射率材料中的折射示意图; (b), (c) 分别为嵌入零折射率材料中的单极子天线及其辐射方向图^[16]; (d), (e) 加载零折射率超构材料的喇叭天线及其方向图^[13]; (f), (g), (h) 为加载零折射率材料的双偏振贴片天线及其 x 偏振和 y 偏振方向图^[17]; (i), (j) 基于梯度折射率超构材料的天线及其增益曲线^[11].

Fig. 2. High directivity antennas based on zero refractive index metamaterials: (a) Refraction in zero-index materials; (b) and (c) are the monopole antenna inserted in zero-index metamaterial and its radiation pattern^[16]; (d) and (e) are the horn antenna with zero-index metamaterial clad and its radiation pattern^[13]; (f)–(h) are respectively the dual polarization patch antenna with zero-index metamaterial clad and the radiation pattern of x -polarization and y -polarization^[17]; (i) and (j) are the antenna with gradient-index metamaterial cover and its gain spectra^[11].

除了上述两种调制天线辐射性能的亚波长结构之外, 还有基于部分反射表面^[19]、频率选择表面^[20-22]以及渐变折射率超构材料^[23,24]的新型平面天线, 前两者的原理是通过在超构材料与平面天线的接地板之间构造法布里-珀罗(F-P)谐振腔结构, 达到对电磁波的辐射方向进行调控的目的. 通过亚波长结构设计, 可以设计具有任意工作频段的反射表面, 此外还可通过人工磁导体等超构材料的反射相位调控性能实现对谐振腔高度的压缩, 从而降低天线整体的剖面高度.

通过零折射率超构材料和光子晶体的方法构造高方向性天线, 在降低天线口径尺寸等方面具有重要价值. 这种方法的主要缺陷在于其工作带宽一般较窄, 适用于偶极子天线、微带天线等方向性较低且工作频带较窄的天线. 而具有渐变折射率的超构材料, 可有效避免零折射率材料具有的窄带缺陷, 将其与传统天线技术相结合, 可在宽带范围内提高天线的辐射方向性.

2.2 基于亚波长结构的低 RCS 天线

随着电子对抗技术的发展, 各国对飞行器的隐身性能需求越来越迫切, 雷达探测与目标(尤其是飞行器)的隐身技术已成为电子对抗中最主要的对抗领域之一. 而随着飞行器 RCS 的不断减小, 机载天线系统对飞行系统 RCS 的贡献越来越大. 传统的电磁吸收材料不具有频率选择功能, 加载到天线上用以降低天线的 RCS 会同时降低天线的辐射性能, 从而导致天线的 RCS 缩减与辐射性能之间的矛盾. 超构材料的出现为解决这一矛盾提供了有效的技术途径. 通过传统天线结构中加载具有频率选择特性的电磁吸收结构, 可以在实现对外界入射的电磁波吸收的同时, 不影响天线本身的辐射性能, 从而提高天线的隐身能力. 实现天线 RCS 缩减的超构材料主要包括电磁吸收型结构和电磁散射型结构, 其中电磁吸收结构将入射的电磁波转换为表面波并且通过材料自身的阻抗特性转换为欧姆损耗等形式, 从而降低天线的反射波能量^[25,26]; 而电磁散射型超构材料是将入射的电磁波散射到非威胁方向, 降低天线在来波方向上的反射强度, 达到降低天线 RCS 的目的^[27,28].

图 3 给出了部分利用超构材料解决天线 RCS 降低和辐射性能之间矛盾的实例. 图 3(a)为利用

电磁吸收型亚波长结构实现天线 RCS 缩减并提高天线辐射增益的微带天线结构^[25]. 作为天线覆层的超构材料包含两层结构, 上表面为具有电磁吸收功能的亚波长方形金属环结构, 每个环形结构中加载了四个电阻, 调节结构的表面阻抗以实现宽带的电磁吸收. 材料的下表面为具有带通特性的部分反射表面, 其与天线的接地板形成 F-P 腔结构, 从而在谐振频点处提高天线的辐射增益. 加载亚波长结构后, 在 6—14 GHz 范围内天线的 RCS 水平降低了 4 dB (图 3(b)), 天线的增益在 11.4 GHz 处由 7 dB 增加到 13 dB, 大幅提升了天线的辐射性能和隐身能力, 同时实现了在工作频带范围内降低天线的 RCS(图 3(c)).

图 3(d)所示为基于散射调控型超构材料的低 RCS 天线^[27]. 在波导缝隙天线的出射面上加载二维相位调控型亚波长结构, 通过在二维方向上构造反射式相位梯度, 将入射的电磁波反射到其他方向, 从而降低天线正方向的 RCS. 天线的正向反射率如图 3(e)所示, 在 4.0—8.0 GHz 范围内大幅度降低了天线正向的反射率. 此外, 引入超构表面后, 天线的等效口径效率得以提升, 因此其增益水平在 5.4—5.9 GHz 范围内提升了 2 dB 以上. 图 3(g)为同时具有天线 RCS 缩减以及工作频率动态调控复合功能的新型微带天线^[28]. 天线的覆层材料与图 3(a)中的超构材料覆层相似, 为电磁吸收材料和部分反射表面双层结构的超构材料, 可实现天线 RCS 的缩减; 而在天线的接地板上加载反射相位可调控的超构表面, 该动态超构表面与覆层材料中的部分反射表面构成可动态调谐的 F-P 腔结构, 可动态调节天线的最大辐射增益对应的频率. 结果显示该天线在 7—14 GHz 范围内 RCS 得到明显缩减, 如图 3(h)所示, 同时天线的辐射增益峰值对应的频率可在 9—10 GHz 范围内动态调节.

除了上述的高方向性和低 RCS 天线之外, 亚波长超构材料在降低天线的副瓣、提高天线的工作带宽和降低天线的尺寸等方面也有明显的优势. 例如利用超构材料构造的软表面^[29], 加载到传统喇叭天线垂直于电场方向的内壁, 通过超构材料的宽带的阻抗匹配特性, 在超过一个倍频的宽带范围内降低天线的副瓣水平, 同时该超构材料的等效折射率的虚部极小, 带来的损耗可以忽略不计, 因此不会引入额外的电磁损耗. 此外, 亚波长结构材料的色散可调控特性在拓展传统窄带天线的工作带宽

方面也有重要应用价值^[30]。例如通过左右手复合材料构造的宽带微带圆极化天线, 可将传统微带天线的相对工作带宽拓展到45%以上^[31]。超构材料的等效电磁参数可人为设计的特性在降低天线的尺寸、构造小型化天线方面也取得了良好的应用效

果。例如利用高等效介电常数的超构材料作为天线的衬底材料, 可有效降低天线的尺寸^[32,33]; 基于超构材料构造的人工磁导体, 其反射相位与金属反射相位相比相差180°, 将该材料作为谐振腔的反射面, 可以大大降低谐振腔的高度^[19,34]。

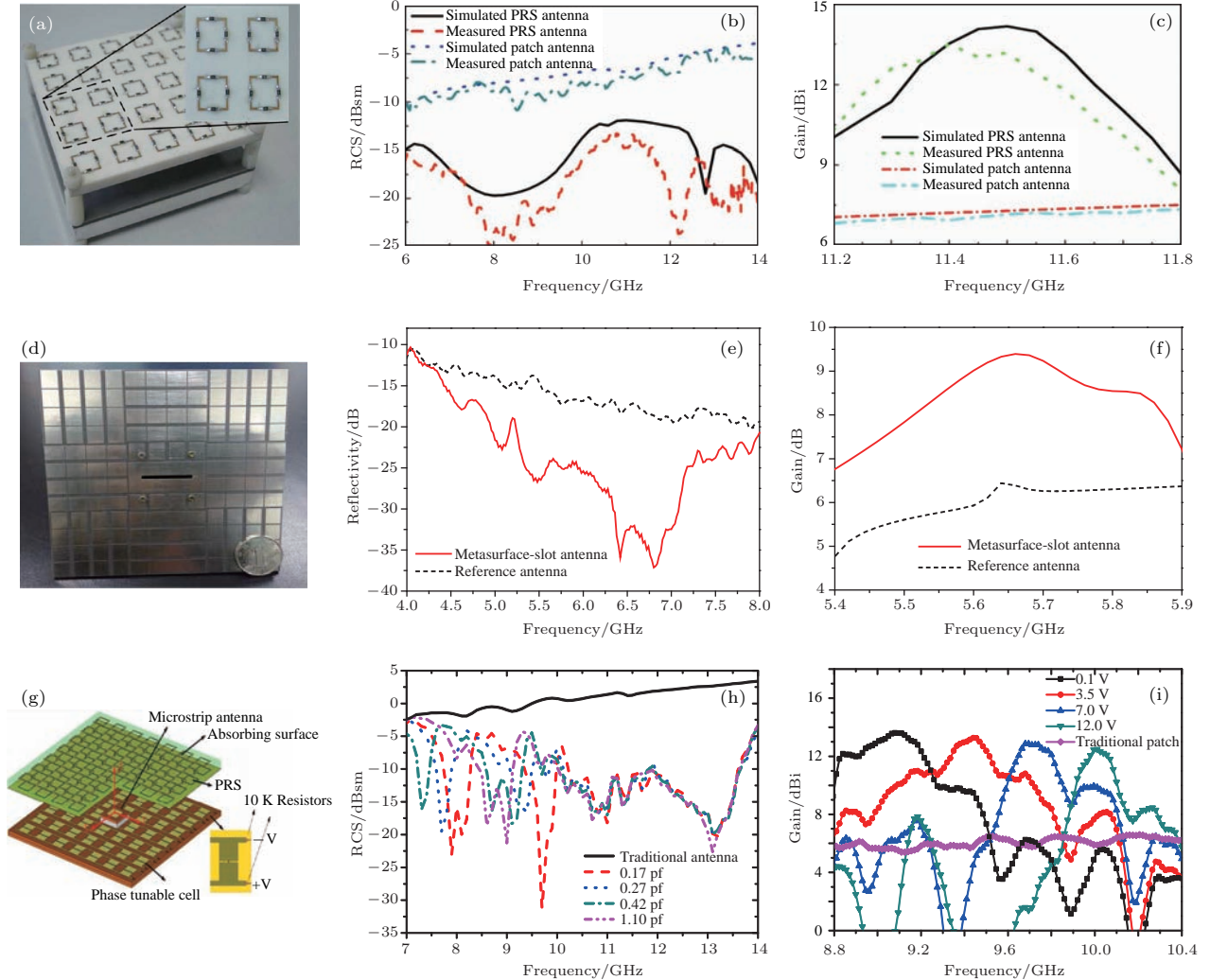


图3 基于亚波长超构材料的低RCS天线 (a) 基于电磁吸收型超构材料的低RCS天线; (b), (c) 分别为图(a)中天线的RCS曲线和增益曲线^[25]; (d) 基于电磁散射型超构材料的低RCS天线; (e), (f) 分别为天线的反射率和增益结果^[27]; (g) 可实现频率动态调控的低RCS天线; (h), (i) 分别为天线的RCS曲线和增益曲线^[28]

Fig. 3. Low RCS antenna based on metamaterials: (a) Low RCS antenna based on absorption metamaterial; (b) and (c) are respectively the spectra of RCS and gain^[25]; (d) low RCS antenna based on scattering metamaterial; (e) and (f) are the reflectivity and gain spectra^[27]; (g) frequency tunable low RCS antenna; (h) and (i) are the RCS and gain spectra^[28].

3 相位调制型超构材料及相控阵天线技术

电磁波在传播过程中, 其相位由介质材料的折射率 n 和传输距离 l 决定, 即 $\Delta\Phi = 2\pi nl/\lambda$, 其中 λ 为波长。可以看出, 传统光学技术中, 光学相位的

调控主要通过光程的累积来实现, 因此传统光学器件必须利用相当厚度的材料以及特定的面形实现对入射光波前的调控, 导致传统器件的体积和重量较大, 难以实现小型化和集成化。而在微波天线技术中, 相位调控也是构造高性能天线的必要技术。例如微带阵列天线技术中, 天线单元之间的相位匹配需要通过一定长度的金属微带线来实现。这种相

位调控方法使得阵列天线的设计较为复杂,天线的体积难以小型化.

亚波长超构材料的出现有效弥补了传统材料在电磁波相位调控方面的缺陷.通过超构材料单元中人为设计的亚波长结构,将入射的传播波转换为结构中的表面波,通过亚波长结构的传输相位或者谐振相位调控方式,甚至是这两种方式的结合,可有效调节表面波的相位,进而实现对辐射波相位的调控 [35-39].

3.1 超构材料相位调控原理

亚波长金属狭缝结构是实现传输型相位调控的有效方式,如图 4(a) 所示,通过调控金属狭缝的宽度,可有效调节电磁波的出射相位.这种相位调控方式主要工作在光波段,其本质是通过调节在金属-介质界面产生的表面等离子体的传播常数,从而实现对相位的调控.这种结构被广泛应用于光学超构材料器件中,包括平面光束偏折器件 [40-42]、平面透镜 [43-47] 等.

而在微波、毫米波等波段,难以在金属表面激发出表面等离子体,大多通过另一种方式调节电磁

波的相位,即构造等效谐振电路的方法 [35,36,48].通过构造出谐振型亚波长结构,将其等效为谐振电路形式,如图 4(b) 所示,结构中垂直于电场的金属缝隙可以等效为谐振电路中的电容,平行于电场的金属线可以等效为电路中的电感.根据麦克斯韦方程组,可以看出这种具有特定阻抗特性的人工表面结构可以有效调节电磁波的相位以及振幅.这种相位调控型亚波长超构材料的厚度远远小于波长,可以看作二维表面结构,也被称为超构表面 (metasurface).

在上述两种相位调控机理的基础上,可以通过将这两种相位调控方法有效结合,形成更加灵活的相位调控手段.除此之外,通过在亚波长结构中引入有源材料或者有源器件,可以实现对电磁波相位的动态调控.例如,在微波波段的亚波长结构中,加载 PIN 二极管或者变容二极管,可实现大范围的相位调控 [37,49,50].在太赫兹波段、红外波段甚至可见光波段,一些电磁参数可以动态调控的材料,例如 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST) [51,52]、石墨烯 [53-55]、半导体 [56-58] 等材料,被广泛应用于构造动态超构材料.

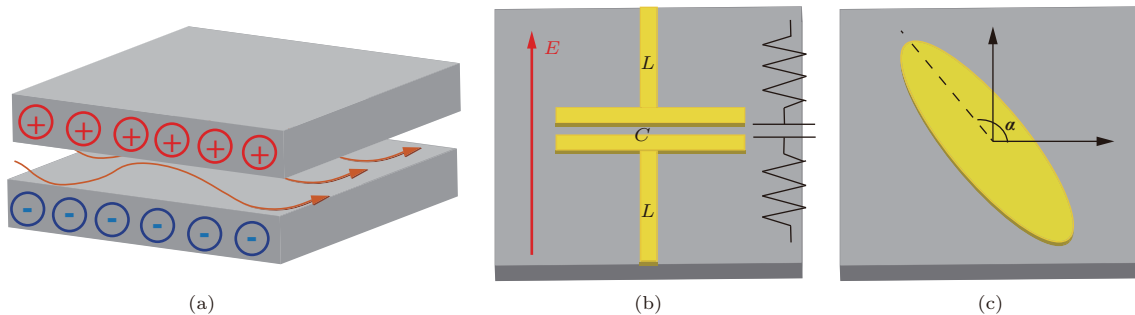


图 4 三种实现亚波长结构相位调控的方法 (a) 基于表面等离子体的传输相位调控; (b) 基于等效电路模型的谐振相位调控; (c) 几何相位调控

Fig. 4. Three methods for phase manipulation using metamaterial: (a) Propagating phase manipulation based on surface plasmon polariton (SPP); (b) resonant phase manipulation based on effective circuit model; (c) geometry phase manipulation.

此外,天线的概念也从微波波段延伸至光波段,产生了用于调控光波辐射的光天线 [59-61].这种光天线也是实现局域相位调控的有效方式,其基本原理是亚波长结构与光波相互作用过程中产生的几何相位 [62-66].Berry [67] 和 Anandan [68] 分别从量子力学和光波偏振转换的角度对几何相位进行了研究和阐述,得到了几何相位仅与系统演变的几何路径相关.如图 4(c) 所示的亚波长结构,在圆

偏振电磁波透过该结构时,出射场中的交叉分量的相位延迟等于结构与坐标轴的夹角 α 的 2 倍.

3.2 基于亚波长结构的波束偏折技术

控制电磁波的传播方向在光束控制、信息传输、电磁隐身等领域具有重要应用价值.传统技术手段中,电磁波传输方向的调控主要通过机械扫描的方式实现天线的波束在某个角度范围内连续扫

描. 但是这种机械伺服系统扫描速度较慢, 容易丢失目标, 且体积重量庞大. 而光波段, 机械转动装置也被用于激光雷达等光束扫描系统中. 此外, 透镜、棱镜、反射镜等器件是调控光束传播方向的典型器件, 然而受传统折射/反射定律的限制, 这些器件的厚度远大于波长, 且难以实现波束方向的动态调控. 亚波长超构材料的出现, 改写了传统的折射/反射定律, 为实现小型化、平面化的波束调控提供了有效技术途径.

3.2.1 微波波段波束偏折技术

根据阵列天线原理, 通过调节阵列天线中每个辐射单元的出射相位, 可以实现天线辐射方向的有效控制. 其基本原理如图 5 (a) 所示, 当相邻天线之间的相位差为 $\Delta\phi$ 时, 出射波束方向角

$\theta = \arcsin[-\Delta\phi/(kd)]$, 其中 k 为波矢, d 为相邻天线之间的间距.

构建亚波长相控阵天线的本质是设计具有相位调制功能的亚波长结构, 在出射平面上形成一定的相位梯度, 从而控制出射电磁场的传播方向. 研究人员提出了多种亚波长相位调制结构, 以实现平面辐射波束控制. 图 5 (b)—(d) 分别为几种典型的谐振式亚波长相位调制结构, 包括矩形缝隙谐振结构 [69,71]、环形缝隙结构 [36] 和工字型谐振结构 [70]. 通过调节这几种亚波长结构的缝隙部分的结构参数, 可以有效调节其谐振性能, 实现对出射电磁波相位的调控. 微波频段中, 常在上述几种谐振式亚波长结构中加载 PIN 二极管、变容二极管等元件, 可实现出射相位的动态调节.

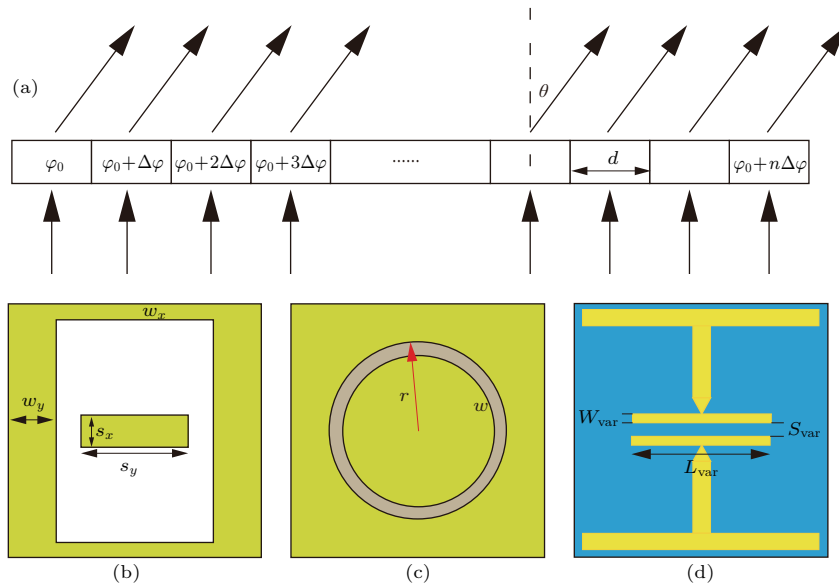


图 5 (a) 亚波长结构相控阵工作天线原理示意图; 典型的相位调制型亚波长结构; (b) 矩形缝隙谐振结构 [69]; (c) 环形缝隙谐振结构 [36]; (d) 工字型谐振结构 [70]

Fig. 5. (a) Scheme of the principle for phased array antennas; typical unit cells of metamaterial for phase manipulation, including (b) square slot structure [69], (c) ring slot structure [36], and (d) I-shape structure [70].

图 6 所示为几种典型的微波波段实现辐射方向调控的亚波长天线结构, 包括静态的波束偏折和动态波束扫描亚波长结构天线. 图 6 (a) 中的静态波束偏折亚波长结构 [37], 其单元由金属薄膜上的环形缝隙结构组成. 将具有不同环形缝隙半径和宽度的单元结构按照一定的相位梯度分布排列, 实现将正入射的平面波束偏转到偏离法向 17.5° 的方向, 其远场辐射场分布如图 6 (b) 所示. 这种通过单元结构几何参数的变化实现相位调节的方式构造的波束偏折器件, 仅能实现定向的辐射方向调控, 而

不能达到动态波束扫描的目的. 通过在单元结构中引入变容二极管、PIN 二极管等动态调控元件, 可以构造超构材料相控阵天线. 图 6 (c) 所示为基于变容二极管的动态超构材料相控阵天线 [72], 其由 6 层相位调控亚波长超构材料和微带天线阵列馈源组成. 通过控制每排单元结构中的二极管两端的电压值, 在超构材料的出射面上形成动态可调的相位梯度, 进而将馈源天线沿法线方向辐射的电磁波偏转到不同的角度, 波束偏转范围约为 30° .

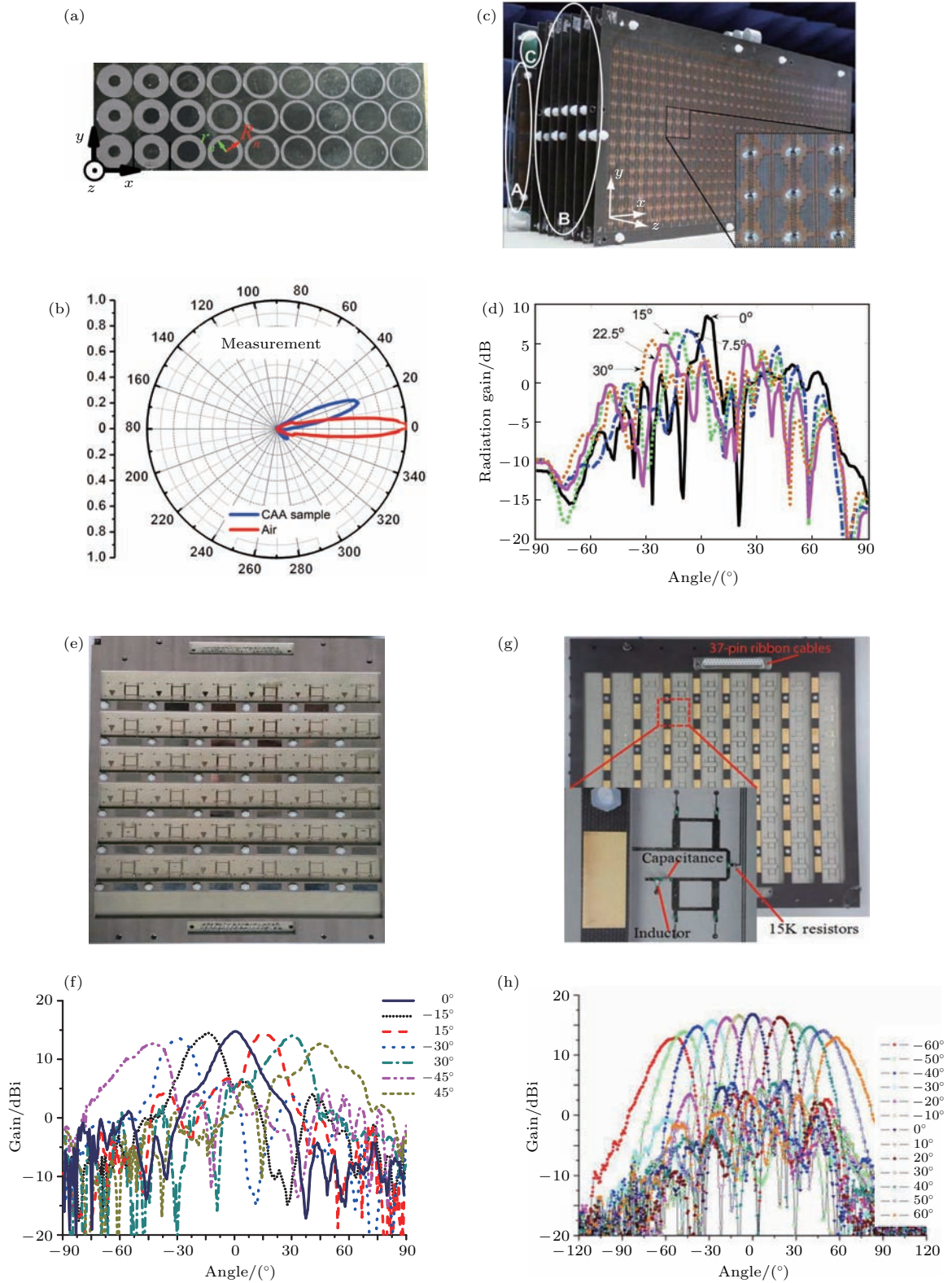


图6 基于亚波长相位调制型超构材料的相控阵天线 (a), (b) 分别为基于圆环形缝隙结构的波束偏折天线及其辐射方向图^[37]; (c), (d) 分别为加载变容二极管的超构材料相控阵天线及其辐射方向图^[72]; (e), (f) 分别为具有偏振调制功能的超构材料相控阵天线及其辐射方向图^[73]; (g), (h) 分别为具有偏振调制功能的二维超构材料相控阵天线及其辐射方向图^[50]

Fig. 6. Phased array antennas based on phase manipulating metamaterials: (a) and (b) are respectively the photo of beamsteering antenna based on the metamaterial with ring slot and its far-field radiation pattern^[37]; (c) and (d) are the phased array antenna based on the varactor loaded metamaterial and its radiation patterns^[72]; (e) and (f) are the photo and radiation patterns of phased array beamsteering antenna with polarization manipulation function^[73]; (g) and (h) are the photo and radiation patterns of phased array antenna with two-dimensional beamsteering and polarization manipulation functions^[50].

亚波长结构对电磁波的奇异调制特性在于其电磁调制能力与人工结构密切相关, 通过结构的合理设计以实现多种自然界的材料所不具有的复合功能. 在基于亚波长结构构造的相控阵天线中, 可以通过结构设计, 使其同时具有偏振调控^[50,74]、散射特性调控^[75]等能力. 图 6(e) 所示的亚波长结构相控阵天线^[73], 将相位调控结构与圆偏振辐射相结合, 在将馈源天线入射的线偏振电磁波转换为圆偏振电磁波的同时, 实现天线辐射波束在 $\pm 45^\circ$ 范围内动态扫描, 如图 6(f) 所示. 图 6(g) 为同时具有偏振动态调制功能的亚波长结构, 其单元结构为传输阵列 (transmitarray) 形式^[50]. 单元结构中加载变容二极管的移相电路可将辐射相位在 $0\text{--}360^\circ$ 范围内连续调控, 进而在二维方向上动态偏折天线的辐射波束; 而其出射面的微带天线中加载的 PIN 二极管可以有效调节天线辐射场的偏振态在左旋圆偏振、右旋圆偏振、水平线偏振和垂直线偏振四种状态之间动态切换. 图 6(h) 为天线在电场面上的远场方向图, 可以看出该天线具有 $\pm 60^\circ$ 的波束动态扫描功能.

3.2.2 可见光波段的波束偏折

从上述举例中可以看出微波波段的相位调控主要通过构造等效谐振电路以及加载电控元件的形式实现. 而在高频波段, 例如光波段、红外波段等, 入射光与亚波长结构中的金属部分发生耦合, 产生表面等离激元 (surface plasmon, SP), 通过结构与表面等离激元的相互作用是实现光波段相位调控的有效方式. 此外, 亚波长结构的尺寸为纳米量级, 没有对应尺寸的电控元件, 因此在该波长范围内大多通过电磁可调谐材料实现对电磁波相位的动态调节, 如石墨烯、半导体材料、相变材料等.

图 7 为光波段波束偏折器件结构图及其波束调控结果. 图 7(a) 为基于 SP 传播相位调制的波束偏折器件^[11], 其通过调节金属狭缝的宽度调控狭缝中 SP 的传播常数, 进而调节出射面的相位分布, 从而实现定向波束偏折, 其不同偏折角度对应的远场分布如图 7(b) 所示, 利用不同结构参数的亚波长狭缝合理组合, 分别实现了 30° 、 45° 、 60° 和 80° 的偏折. 这种平面相位调控器件突破了传统电磁学理论中折射定律对光学器件面形的限制, 改写了折射定律^[76]. 随后, 这种利用金属狭缝结构中 SP 传输相位调控结构被用于构造多种光学平面聚焦^[43]

和波束偏折器件^[44], 在实验上验证了该方法的可行性.

通常情况下, 这种相位调控存在较大的色散, 不能满足宽带的波束偏折的要求. 通过将结构的色散特性与材料的色散特性合理结合, 可有效改善该亚波长结构的色散特性^[42,77]. 图 7(c) 为基于亚波长金属狭缝结构的消色差波束偏折器件结构示意图, 利用亚波长结构的色散特性补偿了银材料在光波段的色散后, 该器件可以实现宽带的消色差波束偏折, 如图 7(d) 所示, 在 $1000\text{--}2000\text{ nm}$ 波长范围内, 正入射的光束被偏折到相同的方向, 偏折角为 20° .

图 7(e) 为基于相变材料 GST 的红外波段动态波束偏折器结构示意图^[51], 其在一维金属缝隙中加载相变材料 GST. GST 材料在温度变化条件下, 其结构会在晶态和非晶态之间转换, 对应的折射率也会发生连续变化. 因此在该波束偏折器不同部位加载一定的温度梯度, 可实现一维方向的折射率分布, 进而调节出射红外波的相位梯度. 在 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 波长处, 实现动态的波束扫描, 其波束偏折效果如图 7(f) 所示.

超构材料光学天线广泛采用偏振转换过程中产生的几何相位, 其通过旋转亚波长结构相对于法线的旋转角度, 即可实现对电磁波相位的调控, 而对材料的厚度无特定要求, 因此可用于构造多种平面器件, 实现对辐射光场的调控. 典型的几何相位光学天线结构包括 V 形结构^[62,78-84]、矩形/椭圆形结构^[85-89]、悬链线结构^[90-94] 等. 这些平面光学器件主要用于光束聚焦、波束偏折、轨道角动量 (orbital angular momentum, OAM) 的产生、光学全息器件等.

图 8 给出了几种典型的基于几何相位的光学天线结构及其对辐射光波的调控效果. 图 8(a) 和图 8(b) 所示为实现波束偏折的光学天线阵列结构, 其单元结构分别为 V 形金属结构^[62] 和其互补结构^[95], 通过设计 V 形结构的臂长和张角大小, 可以实现对出射相位的调节. 在该设计中, 只需设计具有 0° 、 45° 、 90° 和 135° 相位调制效果的单元结构, 而将这四种结构绕中心旋转 90° , 即可将原相位调控单元的出射相位增加 180° . 几何相位的局域相位调控能力赋予了这种亚波长结构器件具有复合电磁功能. 图 8(c) 是一种亚波长椭圆形金属结构的平面透镜, 根据其相位分布, 该透镜可以将入射的

圆偏振光转换为携带轨道角动量的光束,同时实现出射光束的聚焦^[86]. 2016年, Capasso等^[66]提出一种基于介质型几何相位调控亚波长结构的平面透镜,其单元结构由沉积在衬底上的矩形二氧化钛柱构成,如图8(d)所示. 与金属亚波长结构相比,

这种介质型几何相位亚波长结构在能量利用率上有明显的优势,但是其厚度远超过金属亚波长结构的厚度,因此对加工工艺要求较高. 该透镜在可见光波段实现了170倍的放大成像效果,且该透镜的能量利用率超过66%.

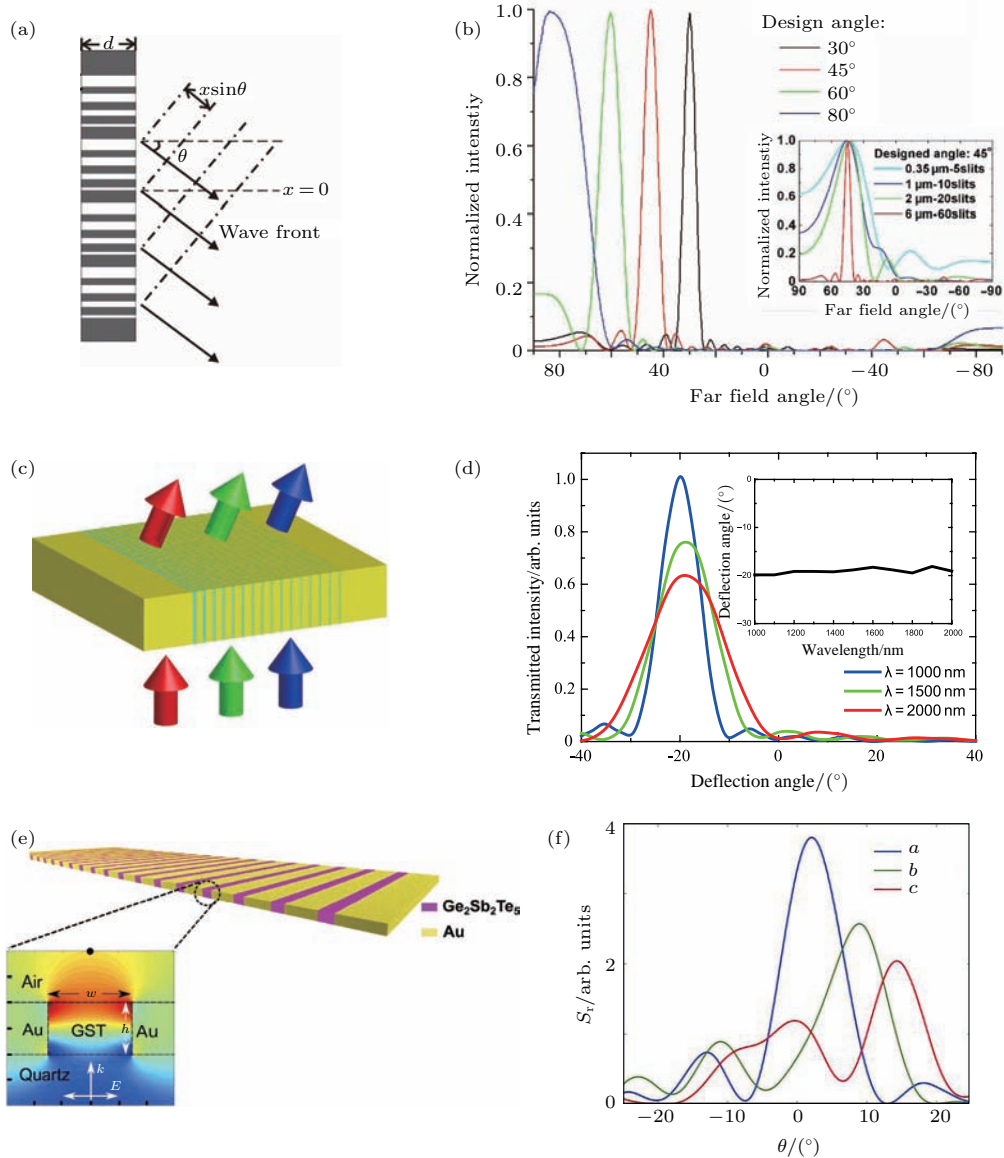


图7 光波段典型的波束偏折器件 (a) 基于金属狭缝结构中SP传播相位调控的波束偏折器和(b)波束偏折效果^[11]; (c) 消色差的波束偏折器和(d)不同波长的波束偏折角度^[42]; (e) 基于相变材料GST的红外动态波束偏折器和(f)动态波束偏折效果^[51]

Fig. 7. Typical beam deflector in light wave range: (a) Deflector based on the SP propagating phase manipulation in metallic slot and (b) its beam deflection effect^[11]; (c) achromatic beam deflector and (d) its beam deflection at different wavelength^[42]; (e) active beam deflector based on GST in infrared range and (f) the radiation patterns with different deflection angles^[51].

上述几何相位结构均为离散结构,得到的相位分布也是离散的,因此难以实现完美的辐射调控. 受自然界中悬链线力学结构的启发,本课题组提出了一种可以连续调节几何相位的亚波长结构,可将

几何相位在0—360°之间连续调控^[91,93]. 利用该结构构造的平面光学器件在辐射光场质量上有明显的提升. 图8(e)为由这种亚波长悬链线结构排布而成的轨道角动量光束激发器件,根据角向的相

位分布, 其可以产生携带不同拓扑荷数的轨道角动量光束. 入射的圆偏振光通过该器件后辐射的光场分布如图 8 (f) 所示, 仿真结果和测试结果均表明该器件可激发接近完美的 OAM 光束. 局域相位调控能力在计算全息器件上具有更为明显的优势. 其设计流程为: 首先通过点源法计算出产生任意全

息物体的二维相位分布, 然后利用不同旋转方向角的亚波长结构即可实现这种二维的相位分布, 在特定偏振光照射下, 该器件可形成所设计的全息光场. 图 8 (g) 为利用矩形缝隙结构构造的彩色全息器件, 可产生的彩色叶片和太阳神鸟(四川金沙遗址出土)的全息图(图 8 (h)) [96].

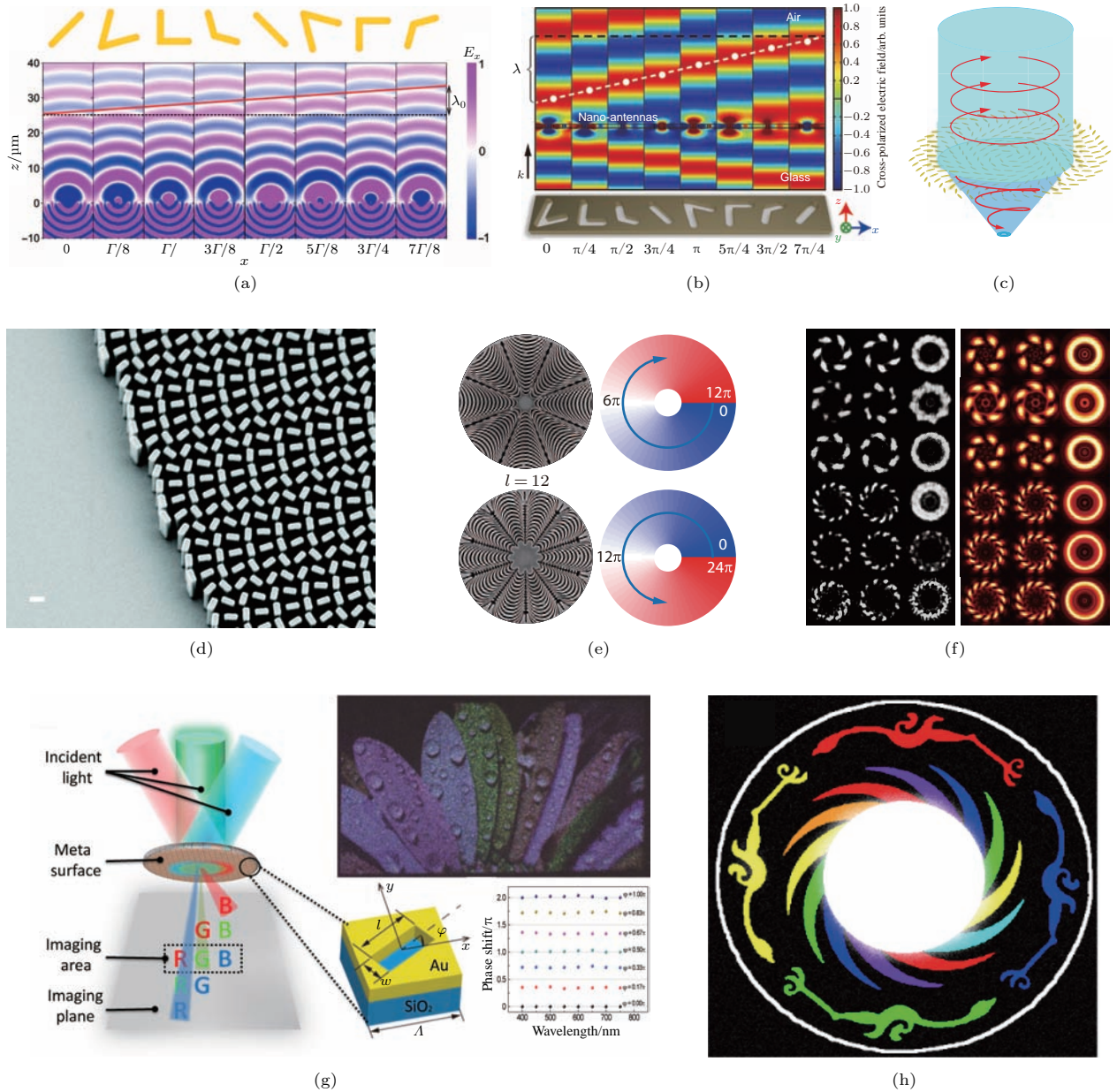


图 8 典型的几何相位亚波长结构 (a) 基于 V 形结构的几何相位调制亚波长结构 [62]; (b) 基于 V 形缝隙亚波长结构的光束偏折器件 [95]; (c) 同时实现轨道角动量光束激发和聚焦的平面透镜 [86]; (d) 基于介电型亚波长结构的平面透镜 [66]; (e), (f) 基于悬链线结构的完美 OAM 产生器及其辐射光场分布 [91]; (g), (h) 基于几何相位结构设计的三维彩色全息器件及其产生的全息图 [96]

Fig. 8. Typical metamaterials for geometric phase manipulation: (a) Geometric phase manipulation metamaterial based on V-shape structure [62]; (b) beam deflector based on the V-shape unit cell metamaterial [95]; (c) planar lens for orbital angular momentum generation and focusing [86]; (d) photo of planar lens based on dielectric metamaterial [66]; (e) and (f) are the perfect orbital angular momentum generator based on subwavelength catenary structure and the generated fields [91]; (g) and (h) are the three-dimensional holograph generator based on the geometric phase metamaterial and the radiated holograph [96].

随后,这种几何相位调控方法被拓展至太赫兹、微波等低频波段^[97],由于这种几何相位调控与器件的厚度无关,特别适用于构造超薄的电磁调控器件,获得了良好的应用效果.通过在结构中加载有源器件,还可构造可重构的亚波长超表面结构,实现对几何相位的动态调控^[98].已经有研究人员对上述超表面结构的相位调控原理、方法和应用进行了总结,可为超构表面相位调控器件的设计提供理论和技术指导^[99].

4 亚波长结构偏振调控技术及其在天线中的应用

亚波长结构对电磁辐射的强效调控能力还体现在对电磁波偏振态的调控作用中.电磁波的偏振态在通信领域具有重要的应用价值,利用电磁波的偏振态作为信息载体,即偏振位移键控技术,可以有效提高通信质量.此外,偏振调控在多通道通信(如卫星通信)、立体显示以及成像技术(偏振成像)中具有重要应用价值.

传统的电磁偏振调制技术主要利用偏振光栅、半波片、四分之一波片等器件,实现对入射的电磁波偏振态的筛选或转换.偏振调制过程中,材料的厚度至少需要满足 $(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2)d = \pm \frac{\pi}{4}, \pm \frac{\pi}{2}, \pi, \dots$,其中 \mathbf{k}_1 和 \mathbf{k}_2 分别为各向异性介质中寻常光(o光)和非常光(e光)的等效波矢.对于将线偏振波转换为圆偏振波的四分之一波片而言,理论上最薄的厚度为 $d = \lambda/[8(n_o - n_e)]$,其中 n_o 和 n_e 为o光和e光对应的折射率.但受限于自然界材料的折射率以及加工工艺的限制,实际的四分之一波片的厚度远远大于该理论极限值.并且由厚度与波长的对应关系可以看出,每个具有特性厚度的波片只对应一个中心工作波长,即这种波片不具有宽带调制特性.由于亚波长结构的衍射行为调制不受材料厚度的制约,具有构建超薄偏振调制材料的优势,因此利用亚波长结构对电磁波衍射行为的异常调制构造偏振调制材料,可以突破传统偏振调制手段对材料厚度的限制,并且可从本源上解决传统偏振调制材料工作带宽窄的问题.目前,国际上利用亚波长结构材料实现对电磁波偏振特性调制的研究热点主要围绕着实现圆偏振辐射、宽带偏振转换、多频点的偏振转换以及动态的偏振调制等方面.

现阶段研究的偏振调控亚波长结构主要可以分为各向异性结构和手性结构两大类^[36].其中各向异性结构类似于传统的双折射材料,其通过设计两个正交方向上的传输相位差异实现对出射电磁波偏振态的调节,如图9(a)所示.图9(b)为典型的各向异性的亚波长结构偏振调控器件,其单元结构由45°倾斜的周期性金属线结构组成.根据电场的合成原理, y 偏振入射电场分解成与金属微带垂直和平行的两个电场分量 E_{\perp}, E_{\parallel} .根据等效电路分析可知,在金属微带的垂直方向上的周期图形的等效电抗呈容性,而在平行方向上的周期图形的等效电抗呈感性.在容性和感性的电路中,电路的反射相位或透射相位符号相反.通过适当调整周期、金属线尺寸可以使得垂直和平行电场分量的反射或透射的幅相满足一定的相位差条件,可实现辐射电磁场的偏振态调控.例如 $\pm 90^\circ$ 和 180° 的相位差可分别实现圆偏振出射和交叉线偏振辐射.这种结构被广泛应用于构造各种频段的亚波长偏振调控材料^[100-108].利用亚波长结构构造偏振调控器件已经有较长的历史,早在1973年人们就提出利用亚波长曲折线结构实现对电磁波偏振特性的调控^[109],如图9(c)所示,而当时超构材料的概念尚未被提出.

与透射式偏振调控亚波长结构相比,反射式结构在能量利用率上具有明显的优势.绝大部分入射的正交偏振电磁波会被反射,因此在设计反射式偏振调控亚波长结构时,只需要对正交偏振的相位差值进行调节,因此更有利用拓展器件的响应带宽,突破传统电磁材料的限制.图9(d),图9(f)和图9(h)为几种典型的反射式宽带各向异性亚波长结构,其中图9(d)的单元为工字形结构^[101].当入射电场沿着 y 方向时,该结构可以视为串联的等效电感 L 以及等效电容 C ,其对应的表面阻抗可以表示为 $Z_y = j\omega L + 1/(j\omega C)$,其中电感来自于金属线,电容来自于平行金属贴片.当电场方向沿着 x 方向,该结构可透过全部入射电磁波,进而被背面的金属反射板全反射,其等效阻抗为无穷大.两个正交方向上的等效电磁参数的差异使出射电磁波之间产生 180° 相位差,且通过色散调控方法,该结构可实现宽带偏振调控.从图9(e)中的主偏振反射率曲线可以看出,在5.5—16.5 GHz范围内主偏振的反射系数小于15 dB,其偏振转换带宽达到100%.基于类似原理,Grady等^[106]提出了太赫兹

波段的各向异性偏振调控亚波长结构,如图9(f)所示.该亚波长结构在0.8—1.8 THz范围内将入射的线偏振电磁波转换为交叉线偏振波(图9(g)).通过二维方向上的色散调控,可以进一步增加亚波长偏振调制材料的工作带宽.如图9(h)所示的开口谐振

振环结构[110,114],其在二维正交方向上的阻抗特性可通过结构参数的设计实现宽带的匹配,使其在3.5—16.5 GHz范围内将入射的线偏振电磁波高效地转换为交叉线偏振波,能量利用率接近100%,工作带宽达到130%,如图9(i)所示.

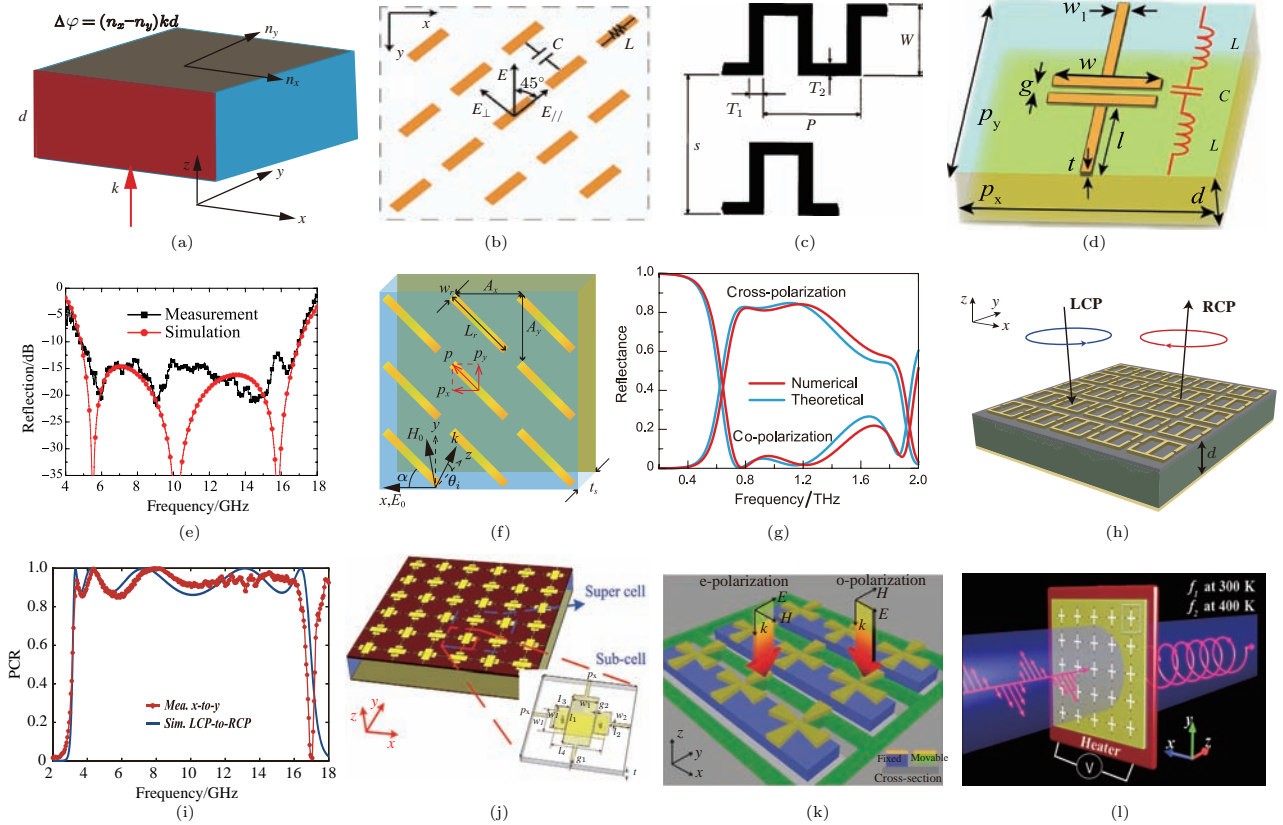


图9 各向异性亚波长结构偏振调控材料 (a)各向异性结构的偏振调制原理示意图;(b)金属线结构亚波长偏振调控材料结构示意图;(c)基于曲折线结构的偏振调控材料[109];(d),(e)分别为基于工字形的宽带偏振调控亚波长结构及主偏振反射曲线[101];(f),(g)分别为基于金属线结构的太赫兹偏振调控器件及主偏振和交叉偏振反射率曲线[106];(h),(i)分别为基于二维色散调控的超宽带偏振调控材料及其偏振转换效率曲线[110];(j)微波波段各向异性偏振动态调控亚波长结构材料[111];(k)基于微机械系统的偏振动态调控亚波长结构材料[112];(l)基于相变材料的太赫兹偏振动态调控亚波长结构材料[113]

Fig. 9. Anisotropic polarization manipulating metamaterials: (a) Principle of polarization manipulation of anisotropic structure; (b) scheme of polarization manipulation metamaterial based on parallel strips; (c) meander-line metamaterial [109]; (d) and (e) are respectively the I-shape metamaterial and its reflectivity spectra of co-polarization [101]; (f) and (g) are the terahertz metamaterial based on metal strips and its reflectance spectra of co- and cross-polarization [106]; (h) and (i) are the ultra broadband metamaterial for polarization manipulation with 2-D dispersion management and the spectrum of polarization conversion ratio [110]; (j) the active anisotropic metamaterial in microwave band [111]; (k) tunable metamaterial based on MEMS [112]; (l) terahertz reconfigurable metamaterial based on phase change material for polarization control [113].

为了满足偏振成像探测、保密通信等技术对电磁波多偏振态的需求,在静态的偏振调制亚波长结构的基础上,通过在亚波长单元中引入有源器件、材料或者微机械结构等,可动态调控亚波长结构的偏振调制性能[52,111—113,115—117].图9(j)为利用PIN二极管实现的微波波段偏振动态调控超构材料,通过调控单元结构中加载的二极管的工作状态,该超构材料可将入射的线偏振电磁波分别转

换为交叉线偏振波、左旋圆偏振波和右旋圆偏振波[111].通过微机械结构动态调节亚波长结构的结构形式,可以动态改变亚波长结构的各向异性,从而实现对电磁波偏振特性的动态调控.如图9(k)所示的亚波长结构[112],通过控制相邻悬臂的电压差值,可将图中亮色部分结构在各向同性的十字形结构和各向异性的T字形结构之间调节,从而动态调控其辐射电磁波的偏振态.图9(l)所示的亚波长

结构中加载了相变材料二氧化钒 (VO_2) [113], 通过外界温度的变化, 可调节相变材料的电阻率, 使其介电特性在介质相和金属相之间切换, 从而改变亚波长结构的各向异性特征, 将入射到该亚波长结构的线偏振电磁波分别转为左旋圆偏振波和右旋圆偏振波. 以上介绍的部分各向异性亚波长结构可用于构造圆偏振天线, 以降低传统圆偏振天线设计的难度. 将这些偏振调控超构材料与传统线偏振天线集成, 可构造出低损耗、低剖面的新型圆偏振天线, 可同时提高天线的方向性、增益以及降低天线的副瓣电平 [118–120].

除了各向异性亚波长结构之外, 手性亚波长结构近些年也被广泛用于偏振调控 [121–132]. 手性超

构材料指单元结构不具有轴对称特性, 即与自身的镜像结构无法通过平移、旋转等操作相重合. 由于其结构的不对称性, 电磁波在通过手性结构材料的过程中存在电场和磁场之间的耦合, 产生圆二向色性和旋光性等偏振调控特性. 与各向异性超构材料不同的是, 手性超构材料作用的基模为左旋圆偏振和右旋圆偏振, 如图 10 (a) 所示. 手性材料中左旋圆偏振波的折射率 n_L 和右旋圆偏振波的折射率 n_R 在谐振频点处存在差异, 且折射率实部的差异导致两种圆偏振波的辐射相位不同, 产生旋光性, 而折射率虚部的差异使两种圆偏振波的透过率存在差异, 即为圆二向色性的来源.

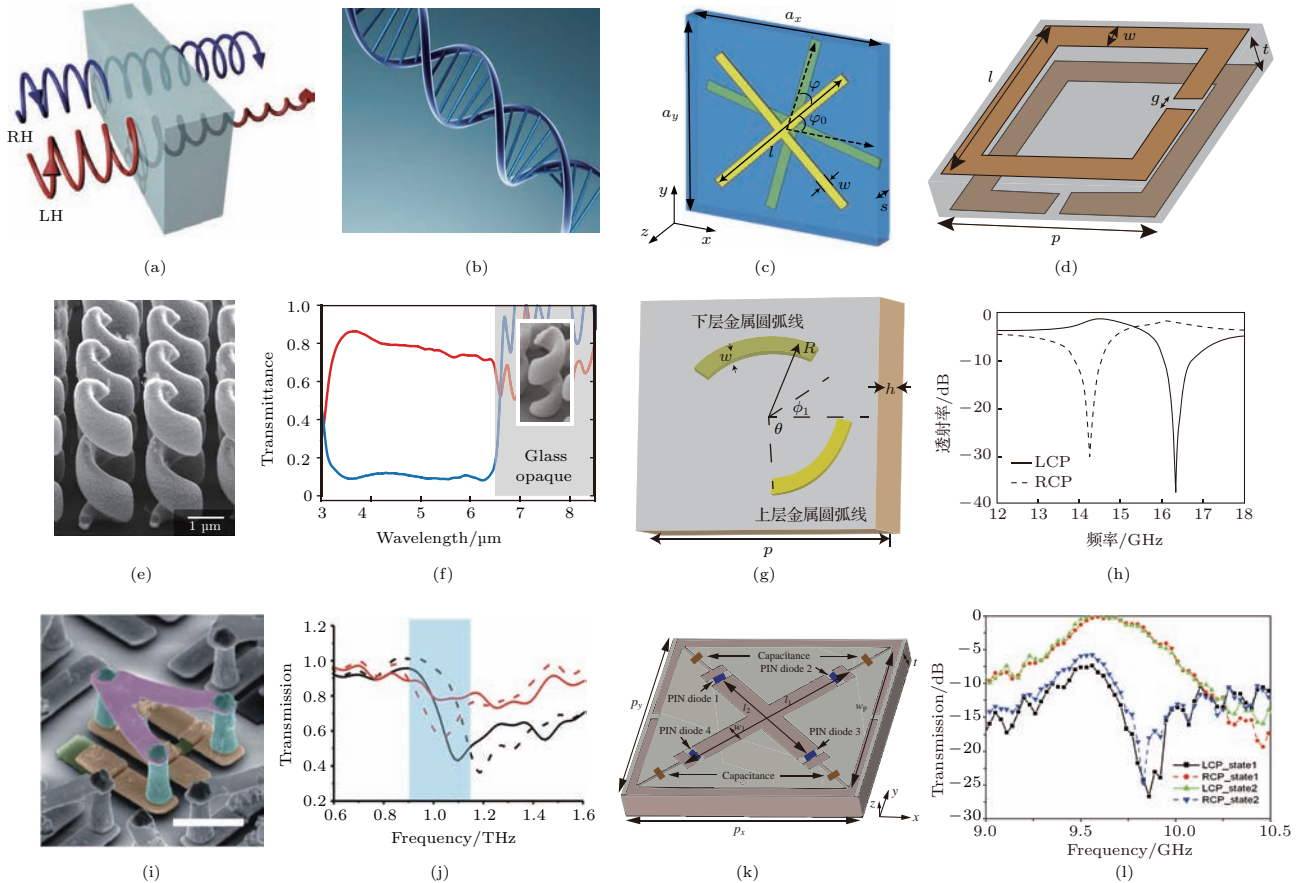


图 10 手性亚波长结构实现对电磁波的偏振调控 (a) 手性结构对圆偏振调控原理示意图 [56]; (b) DNA 分子为典型的自然界手性材料; (c) 双层十字形手性亚波长结构 [133]; (d) 双层开口谐振环型手性亚波长结构 [134]; (e), (f) 分别为螺旋线结构的太赫兹宽带手性亚波长结构及其圆偏振透射率 [122]; (g), (h) 分别为双层金属圆弧型手性亚波长结构及其圆偏振透射率曲线 [125]; (i), (j) 为基于半导体材料的动态手性亚波长结构及其圆偏振透射率曲线 [56]; (k), (l) 为微波波段动态手性亚波长结构及其不同工作状态下的圆偏振透射率曲线 [132].

Fig. 10. Chiral metamaterial for polarization control: (a) Principle of circular polarization manipulation in chiral materials [56]; (b) typical chiral material of DNA molecule; (c) chiral metamaterial of two-layer twisted cross structure [133]; (d) chiral metamaterial of two-layer twisted split rings [134]; (e) and (f) are the helix chiral metamaterial and its circular polarization transmission in terahertz band [122]; (g) and (h) are the chiral metamaterial with two-layer twisted arc structure and its circular polarization transmission [125]; (i) and (j) are the reconfigurable chiral metamaterial using semi-conductor and its circular polarization transmission spectra [56]; (k) and (l) are the active chiral metamaterial in microwave band and its circular polarization transmission spectra of different working states [132].

自然界中存在大量的手性结构,例如DNA分子(如图10(b)所示)、蛋白质分子、蔗糖溶液、石英晶体等,对手性材料的研究在生物分子探测、非线性光学等领域有重要价值.然而自然界存在的手性材料的手性因子均较弱,即电磁波在这些手性材料中电场和磁场之间的耦合作用极弱,难以满足实际的偏振调控需求.通过构造亚波长手性结构,可以有效增强材料的手性因子,降低对材料厚度的要求.图10(c)和图10(d)为典型的手性亚波长结构,分别为两层十字形^[133]和开口谐振环^[134]结构,通过将两层结构依次旋转一定角度形成手性.除了这两种结构之外,典型的手性亚波长结构还包括U形结构^[135-138]、万字形结构^[139-141]、多层金属线结构等^[142].

图10(e)为利用双光子工艺制备的周期性金属螺旋线结构,这种螺旋线结构具有天然的手性,且其旋向决定了其手性特征.该亚波长螺旋线手性结构可在近一个倍频程(3—6 μm)范围内表现出强烈的圆二向色性^[122].从图10(f)中的左旋圆偏振(红色曲线)和右旋圆偏振(蓝色曲线)的透射率曲线可以看出其宽带偏振调控效果.传统的手性亚波长结构大多具有高损耗、交叉偏振态透过率差值较小的缺陷.图10(g)所示的双层弧形金属线结构有效解决了上述问题,该结构有效结合了手性和各向异性,提高了能量利用率的同时明显增加了两种圆偏振电磁波在谐振频点处的透过率差值^[125].图10(h)中的圆偏振透过率曲线显示其交叉偏振比值大于25 dB,能量利用率大于-2.5 dB.此外,通过增加每一层结构中的弧形金属线的数量,可以成倍地增加亚波长结构的工作频点个数,为实现多频点的偏振调控提供了可行的技术途径^[126].这种具有多频点、低损耗特性的手性亚波长结构被拓展至可见光波段^[127],并用于非线性成像^[143].

与各向异性亚波长结构类似,手性亚波长结构也可以通过结构设计实现动态的偏振调控.但由于其结构的不对称性,构造动态手性亚波长结构的复杂度明显超过各向异性亚波长结构.图10(i)为Zhang等^[56]提出的三维手性亚波长结构,通过在结构中引入半导体材料,在不同光照强度条件下,半导体材料的电学性能分别表现为介质和金属特性,从而在等效结构上实现亚波长结构手性特性的

动态切换.其不同工作状态下的圆偏振波透射曲线如图10(j)所示,其中黑色曲线为没有光照条件下左旋(实线)和右旋(虚线)圆偏振透过率;红色曲线为光照条件下左旋(实线)和右旋(虚线)圆偏振透过率.显然通过光照强度的调控,可以动态调节亚波长结构的手性特征.图10(k)为微波波段的动态手性亚波长结构^[132],通过控制加载在矩形缝隙中的二极管的工作状态,不仅可以实现其结构在手性和各向同性之间切换,同时材料表现为手性结构时,其手性特征还可以在左手特征和右手特征之间切换,并且材料的损耗小于1.5 dB(如图10(l)所示),可以应用于微波通信系统中,实时调制出射电磁波的偏振状态.

由于手性亚波长结构中圆偏振电磁波的折射率与手性因子密切相关,Pendry^[144]提出通过设计具有大手性因子的亚波长结构,可构造出具有负折射率以及零折射率的手性亚波长结构.前面2.1节中已经介绍,具有近零折射率的亚波长结构可以有效提高天线的辐射方向性.因此手性亚波长结构也可以用于天线技术中,提高圆偏振天线的辐射性能^[145-147].

5 总 结

本文综述了基于亚波长结构对电磁波衍射行为调控的新型辐射技术,包括新型高方向性天线、低RCS天线、相控阵天线技术,基于亚波长结构的偏振调控技术等.从文中内容可以看出,亚波长结构的电磁调控能力在提高天线辐射性能、降低天线剖面 and 尺寸等方面具有明显的优势.我们将亚波长结构材料的种类、对天线性能的提升效果和对应的调控原理进行了总结,列于表1,但亚波长结构材料在天线中的应用并非仅有表中的形式.

除上述基于亚波长结构的电磁辐射调控技术之外,亚波长结构在红外辐射、可见光辐射等领域也有极大的应用价值.红外辐射器件在红外探测、热成像、热光伏、被动降温等领域具有广阔的应用前景,基于亚波长结构的新型热辐射器件可突破传统材料的限制,其辐射带宽、辐射效率等可大幅改善^[148-150].

表1 基于亚波长结构的超构天线归纳
Table 1. Collection of meta-antennas on a sub-wavelength scale.

超构天线类型	对应的超构材料类型	调控原理
高方向性天线	光子晶体, 零折射率超构材料	基于光子晶体电磁带隙特性对电磁波的定向传导; 零折射率材料的出射场沿着法线方向传播
低 RCS 天线	吸收和透射一体化超构材料, 散射和透射一体化超构材料	电磁吸收功能实现宽带 RCS 缩减, 窄带透射功能实现天线辐射
小型化天线	人工磁导体, 高等效电磁参数超构材料	人工磁导体反射相位为 0° , 可有效降低谐振腔高度; 高等效电磁参数的茶瓯材料作为衬底, 降低天线尺寸
相控阵天线	相位调制型超构材料	构造平面相位梯度, 实现天线波束动态偏折
圆偏振天线	各向异性和手性亚波长结构	将各向异性和手性超构材料作为覆层加载到传统天线中, 构造宽带、多频、多圆极化态天线

利用电磁波在亚波长尺度内的局域谐振作用, 可以极大地增强局域场的强度, 产生超越传统性能的电磁辐射器件, 例如表面等离子体激光器 [151–153], 量子级联激光器 [154] 等新型纳米尺度的激光光源. 这些基于表面等离子体的纳米激光器将亚波长纳米结构增益介质与谐振腔集成, 通过表面等离子体实现光场调控和激发. 利用表面等离子体的短波长特性以及局域场增强特性, 使光场能量集中在纳米线中心区域, 可突破传统光学衍射极限, 构造适用于片上系统的集成化光源. 上述新型电磁辐射技术体现了亚波长结构对电磁波衍射效应的调控能力, 为高性能电磁辐射器件的设计提供了全新的技术手段, 可有效解决传统技术对材料特性的依赖. 目前基于亚波长结构的电磁辐射器件在宽带、多功能化、小型化等方面仍存在部分难题尚未解决, 但是其相对于传统辐射技术的优势是不言而喻的, 可以预期这种新型的电磁辐射技术的应用前景将极为广阔.

参考文献

- [1] Ebbesen T W, Lezec H J, Ghaemi H F, Thio T, Wolff P A 1998 *Nature* **391** 667
- [2] Lezec H J, Degiron A, Devaux E, Linke R A, Martin-Moreno L, Garcia-Vidal F J, Ebbesen T W 2002 *Science* **297** 820
- [3] Smith A T, Simonson D, Charipar N A, Piqué A 2012 *J. Laser MicroNanoengin.* **7** 306
- [4] Tellechea A, Martini E, Gonzalez-Ovejero D, Faenzi M, Minatti G, Maci S 2015 *2015 9th Eur. Conf. Antennas Propag. EuCAP* p1
- [5] Temelkuran B, Bayindir M, Ozbay E, Biswas R, Sigalas M M, Tuttle G, Ho K M 2000 *J. Appl. Phys.* **87** 603
- [6] Caglayan H, Bulu I, Ozbay E 2005 *Opt. Express* **13** 7645
- [7] Thevenot M, Cheype C, Reineix A, Jecko B 1999 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **47** 2115
- [8] Leger L, Monediere T, Jecko B 2005 *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.* **15** 573
- [9] Bulu I, Caglayan H, Ozbay E 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 3263
- [10] Liberal I, Engheta N 2017 *Nat. Photon.* **11** 149
- [11] Erfani E, Niroom-Jazi M, Tatu S 2016 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **64** 1968
- [12] Wu S, Yi Y, Yu Z, Huang X, Yang H 2016 *J. Electromagn. Waves Appl.* **30** 1993
- [13] Wu Q, Pan P, Meng F Y, Li L W, Wu J 2007 *Appl. Phys. -Mater. Sci. Process.* **87** 151
- [14] Pendry J, Holden A, Stewart W, Youngs I 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4773
- [15] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, Stewart W J 1999 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **47** 2075
- [16] Enoch S, Tayeb G, Sabouroux P, Guerin N, Vincent P 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 213902
- [17] Huang C, Zhao Z, Wang W, Luo X 2009 *J. Infrared Millim. Terahertz Waves* **30** 700
- [18] Xu H X, Wang G M, Cai T 2014 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **62** 3141
- [19] Alireza F, Lotfollah S 2011 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **59** 4
- [20] Ranga Y, Matekovits L, Esselle K P, Weily A R 2011 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **10** 219
- [21] Lee D H, Lee Y J, Yeo J, Mittra R, Park W S 2007 *IET Microw. Antennas Propag.* **1** 248
- [22] Huang C, Zhao Z, Luo X 2010 *Microw. Opt. Technol. Lett.* **52** 160
- [23] Xu H X, Wang G M, Tao Z, Cai T 2014 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **62** 4823
- [24] Xu H X, Wang G M, Tao Z, Cui T J 2014 *Sci. Rep.* **4** 5744
- [25] Pan W, Huang C, Chen P, Ma X, Hu C, Luo X 2014 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **62** 945
- [26] Jiang H, Xue Z, Li W, Ren W, Cao M 2016 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **64** 4127
- [27] Zhao Y, Cao X, Gao J, Yao X, Liu X 2015 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **15** 290

- [28] Huang C, Pan W, Ma X, Luo X 2016 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **64** 1173
- [29] Lier E, Werner D H, Scarborough C P, Wu Q, Bossard J A 2011 *Nat. Mater.* **10** 216
- [30] Yu A, Yang F, Elsherbeni A 2008 *Prog. Electromagn. Res.* **78** 73
- [31] Zhao G, Jiao Y C, Yang X, Li C, Song Y 2009 *Microw. Opt. Technol. Lett.* **51** 1790
- [32] Bilotti F, Alu A, Vegni L 2008 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **56** 1640
- [33] Buell K, Mosallaei H, Sarabandi K 2006 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **54** 135
- [34] Feresidis A P, Goussetis G, Wang S, Vardaxoglou J C 2005 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **53** 209
- [35] Luo X 2015 *Sci. China: Phys. Mech. Astron.* **58** 594201
- [36] Luo X G 2016 *Sub-Wavelength Electromagnetics* (Vol.1) (Beijing: Science Press) pp210–213 (in Chinese) [罗先刚 2016 亚波长电磁学 (上册) (北京: 科学出版社) 第210—213页]
- [37] Wei Z, Cao Y, Su X, Gong Z, Long Y, Li H 2013 *Opt. Express* **21** 10739
- [38] Wang H, Deng Y, He J, Gao P, Yao N, Wang C, Zhao Z, Wang J, Jiang B, Luo X 2014 *J. Nanophoton.* **8** 083079
- [39] Jiang M, Chen Z N, Zhang Y, Hong W, Xuan X 2017 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **65** 464
- [40] Xu T, Wang C, Du C, Luo X 2008 *Opt. Express* **16** 4753
- [41] Xu T, Zhao Y, Gan D, Wang C, Du C, Luo X 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 101501
- [42] Li Y, Li X, Pu M, Zhao Z, Ma X, Wang Y, Luo X 2016 *Sci. Rep.* **6** 19885
- [43] Verslegers L, Catrysse P B, Yu Z, White J S, Barnard E S, Brongersma M L, Fan S 2009 *Nano Lett.* **9** 235
- [44] Verslegers L, Catrysse P B, Yu Z, Fan S 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 071112
- [45] Bohn B J, Schnell M, Kats M, Aieta F, Hillenbrand R, Capasso F 2015 *Nano Lett.* **15** 3851
- [46] Lin D, Fan P, Hasman E, Brongersma M L 2014 *Science* **345** 298
- [47] Arbabi A, Horie Y, Ball A J, Bagheri M, Faraon A 2015 *Nat. Commun.* **6** 7069
- [48] Xu H X, Tang S, Ma S, Luo W, Cai T, Sun S, He Q, Zhou L 2016 *Sci. Rep.* **6** 38255
- [49] Lau J Y, Hum S V 2012 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **60** 5679
- [50] Huang C, Pan W, Ma X, Zhao B, Cui J, Luo X 2015 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **63** 4801
- [51] Chen Y, Li X, Sonnefraud Y, Fernández-Domínguez A I, Luo X, Hong M, Maier S A 2015 *Sci. Rep.* **5** 8660
- [52] Sieber P E, Werner D H 2013 *Opt. Express* **21** 1087
- [53] Orazbayev B, Beruete M, Khromova I 2016 *Opt. Express* **24** 8848
- [54] Lee S H, Choi J, Kim H D, Choi H, Min B 2013 *Sci. Rep.* **3** 2135
- [55] Chen P Y, Farhat M, Askarpour A N, Tymchenko M, Alù A 2014 *J. Opt.* **16** 094008
- [56] Zhang S, Zhou J, Park Y S, Rho J, Singh R, Nam S, Azad A K, Chen H T, Yin X, Taylor A J, Zhang X 2012 *Nat. Commun.* **3** 942
- [57] Steinbusch T P, Tyagi H K, Schaafsma M C, Georgiou G, Rivas J G 2014 *Opt. Express* **22** 26559
- [58] Kwong D, Hosseini A, Zhang Y, Chen R T 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 051104
- [59] Schuller J A, Taubner T, Brongersma M L 2009 *Nat. Photon.* **3** 658
- [60] Bharadwaj P, Deutsch B, Novotny L 2009 *Adv. Opt. Photon.* **1** 438
- [61] Knight M W, Sobhani H, Nordlander P, Halas N J 2011 *Science* **332** 702
- [62] Yu N, Genevet P, Kats M A, Aieta F, Tetienne J P, Capasso F, Gaburro Z 2011 *Science* **334** 333
- [63] Aieta F, Genevet P, Kats M, Capasso F 2013 *Opt. Express* **21** 31530
- [64] Genevet P, Capasso F 2015 *Rep. Prog. Phys.* **78** 024401
- [65] Yu N, Capasso F 2014 *Nat. Mater.* **13** 139
- [66] Khorasaninejad M, Chen W T, Devlin R C, Oh J, Zhu A Y, Capasso F 2016 *Science* **352** 1190
- [67] Berry M V 1984 *Proc. R. Soc. Lond. Math. Phys. Eng. Sci.* **392** 45
- [68] Anandan J 1992 *Nature* **360** 307
- [69] Pfeiffer C, Grbic A 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 231116
- [70] Sazegar M, Zheng Y, Kohler C, Maune H, Nikfalazar M, Binder J R, Jakoby R 2012 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **60** 5690
- [71] Li Y B, Cai B G, Cheng Q, Cui T J 2016 *Adv. Funct. Mater.* **26** 29
- [72] Jiang T, Wang Z, Li D, Pan J, Zhang B, Huangfu J, Salamin Y, Li C, Ran L 2012 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **60** 170
- [73] Huang C, Pan W, Luo X 2016 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **64** 4471
- [74] Pan W, Huang C, Ma X, Jiang B, Luo X 2015 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **14** 167
- [75] Pan W, Huang C, Pu M, Ma X, Cui J, Zhao B, Luo X 2016 *Sci. Rep.* **6** 21462
- [76] Zhao Z Y, Pu M B, Wang Y Q, Luo X G 2017 *Opto-Elec. Eng.* **44** 129 (in Chinese) [赵泽宇, 蒲明博, 王彦钦, 罗先刚 2017 光电工程 **44** 129]
- [77] Aieta F, Kats M A, Genevet P, Capasso F 2015 *Science* **347** 1342
- [78] Yu N, Genevet P, Aieta F, Kats M A, Blanchard R, Aoust G, Tetienne J P, Gaburro Z, Capasso F 2013 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **19** 4700423
- [79] Gao X, Han X, Cao W P, Li H O, Ma H F, Cui T J 2015 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **63** 3522
- [80] Ni X, Emami N K, Kildishev A V, Boltasseva A, Shalaei V M 2012 *Science* **335** 427
- [81] Yu N, Aieta F, Genevet P, Kats M A, Gaburro Z, Capasso F 2012 *Nano Lett.* **12** 6328
- [82] Lin J, Wu S, Li X, Huang C, Luo X 2013 *Appl. Phys. Express* **6** 022004
- [83] Qin F, Ding L, Zhang L, Monticone F, Chum C C, Deng J, Mei S, Li Y, Teng J, Hong M, Zhang S, Alù A, Qiu C W 2016 *Sci. Adv.* **2** e1501168
- [84] Li J, Verellen N, Vercauteren D, Bearda T, Lagae L, Dorpe P V 2016 *Nano Lett.* **16** 4396

- [85] Yang Y, Wang W, Moitra P, Kravchenko I I, Briggs D P, Valentine J 2014 *Nano Lett.* **14** 1394
- [86] Ma X, Pu M, Li X, Huang C, Wang Y, Pan W, Zhao B, Cui J, Wang C, Zhao Z, Luo X 2015 *Sci. Rep.* **5** 10365
- [87] Arbabi A, Horie Y, Bagheri M, Faraon A 2015 *Nat. Nanotechnol.* **10** 937
- [88] Zhang Z, Luo J, Song M, Yu H 2015 *Appl. Phys. Lett.* **107** 241904
- [89] Zhao Z, Pu M, Gao H, Jin J, Li X, Ma X, Wang Y, Gao P, Luo X 2015 *Sci. Rep.* **5** 15781
- [90] Li X, Pu M, Zhao Z, Ma X, Jin J, Wang Y, Gao P, Luo X 2016 *Sci. Rep.* **6** 20524
- [91] Pu M, Li X, Ma X, Wang Y, Zhao Z, Wang C, Hu C, Gao P, Huang C, Ren H, Li X, Qin F, Gu M, Hong M, Luo X 2015 *Sci. Adv.* **1** e1500396
- [92] Wang Y, Pu M, Zhang Z, Li X, Ma X, Zhao Z, Luo X 2015 *Sci. Rep.* **5** 17733
- [93] Luo X, Pu M, Li X, Ma X 2017 *Light Sci. Appl.* **6** e16276
- [94] Li X, Pu M, Wang Y, Ma X, Li Y, Gao H, Zhao Z, Gao P, Wang C, Luo X 2016 *Adv. Opt. Mater.* **4** 659
- [95] Ni X, Ishii S, Kildishev A V, Shalaev V M 2013 *Light Sci. Appl.* **2** e72
- [96] Li X, Chen L, Li Y, Zhang X, Pu M, Zhao Z, Ma X, Wang Y, Hong M, Luo X 2016 *Sci. Adv.* **2** e1601102
- [97] Pu M, Zhao Z, Wang Y, Li X, Ma X, Hu C, Wang C, Huang C, Luo X 2015 *Sci. Rep.* **5** 9822
- [98] Xu H X, Wang G M, Cai T, Xiao J, Zhuang Y Q 2016 *Opt. Express* **24** 27836
- [99] Li X, Ma X L, Luo X G 2017 *Opto-Elec. Eng.* **44** 255 (in Chinese) [李雄, 马晓亮, 罗先刚 2017 光电工程 **44** 255]
- [100] Cong L, Xu N, Han J, Zhang W, Singh R 2015 *Adv. Mater.* **27** 6630
- [101] Pu M, Chen P, Wang Y, Zhao Z, Huang C, Wang C, Ma X, Luo X 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 131906
- [102] Shen B, Wang P, Polson R, Menon R 2014 *Optica* **1** 356
- [103] Ma H F, Wang G Z, Kong G S, Cui T J 2014 *Opt. Mater. Express* **4** 1717
- [104] Sun W, He Q, Hao J, Zhou L 2011 *Opt. Lett.* **36** 927
- [105] Wang Y, Pu M, Hu C, Zhao Z, Wang C, Luo X 2014 *Opt. Commun.* **319** 14
- [106] Grady N K, Heyes J E, Chowdhury D R, Zeng Y, Reiten M T, Azad A K, Taylor A J, Dalvit D A R, Chen H T 2013 *Science* **340** 1304
- [107] Ma X, Huang C, Pu M, Hu C, Feng Q, Luo X 2012 *Microw. Opt. Technol. Lett.* **54** 1770
- [108] Jiang Z H, Lin L, Ma D, Yun S, Werner D H, Liu Z, Mayer T S 2014 *Sci. Rep.* **4** 7511
- [109] Young L, Robinson L A, Hacking C 1973 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **21** 376
- [110] Guo Y, Wang Y, Pu M, Zhao Z, Wu X, Ma X, Wang C, Yan L, Luo X 2015 *Sci. Rep.* **5** 8434
- [111] Cui J, Huang C, Pan W, Pu M, Guo Y, Luo X 2016 *Sci. Rep.* **6** 30771
- [112] Zhu W M, Liu A Q, Bourouina T, Tsai D P, Teng J H, Zhang X H, Lo G Q, Kwong D L, Zheludev N I 2012 *Nat. Commun.* **3** 1274
- [113] Wang D, Zhang L, Gu Y, Mehmood M Q, Gong Y, Srivastava A, Jian L, Venkatesan T, Qiu C W, Hong M 2015 *Sci. Rep.* **5** 15020
- [114] Guo Y H, Pu M B, Ma X L, Li X, Luo X G 2017 *Opto-Elec. Eng.* **44** 3 (in Chinese) [郭迎辉, 蒲明博, 马晓亮, 李雄, 罗先刚 2017 光电工程 **44** 3]
- [115] Yi G, Huang C, Ma X, Pan W, Luo X 2014 *Microw. Opt. Technol. Lett.* **56** 1281
- [116] Wang D, Zhang L, Gong Y, Jian L, Venkatesan T, Qiu C W, Hong M 2016 *Photonics J. IEEE* **8** 5500308
- [117] Xu H X, Sun S L, Tang S W, Ma S J, He Q, Wang G M, Cai T, Li H P, Zhou L 2016 *Sci. Rep.* **6** 27503
- [118] Arnaud E, Chantalat R, Koubeissi M, Monediere T, Thevenot M, Jecko B 2009 *Proc. EuCAP* 3813
- [119] Arnaud E, Chantalat R, Koubeissi M, Monediere T, Rodes E, Thevenot M 2010 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **9** 215
- [120] Ren L, Jiao Y, Li F, Zhao J, Zhao G 2011 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **10** 407
- [121] Bai B, Svirko Y, Turunen J, Vallius T 2007 *Phys. Rev. A* **76** 023811
- [122] Gansel J K, Thiel M, Rill M S, Decker M, Bade K, Saile V, von Freymann G, Linden S, Wegener M 2009 *Science* **325** 1513
- [123] Gansel J K, Wegener M, Burger S, Linden S 2010 *Opt. Express* **18** 1059
- [124] Kaschke J, Wegener M 2015 *Opt. Lett.* **40** 3986
- [125] Ma X, Huang C, Pu M, Hu C, Feng Q, Luo X 2012 *Opt. Express* **20** 16050
- [126] Ma X, Huang C, Pu M, Wang Y, Zhao Z, Wang C, Luo X 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 161901
- [127] Cui Y, Kang L, Lan S, Rodrigues S, Cai W 2014 *Nano Lett.* **14** 1021
- [128] Li Y, Huang Q, Wang D C, Li X, Hong M H, Luo X G 2014 *Appl. Phys. A* **115** 57
- [129] Zhang S, Park Y S, Li J, Lu X, Zhang W, Zhang X 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 023901
- [130] Du L, Kou S S, Balaur E, Cadusch J J, Roberts A, Abbey B, Yuan X C, Tang D, Lin J 2015 *Nat. Commun.* **6** 10051
- [131] Zhao Y, Belkin M A, Alù A 2012 *Nat. Commun.* **3** 870
- [132] Ma X, Pan W, Huang C, Pu M, Wang Y, Zhao B, Cui J, Wang C, Luo X 2014 *Adv. Opt. Mater.* **2** 945
- [133] Soukoulis C M, Wegener M 2011 *Nat. Photonics* **5** 523
- [134] Huang C, Ma X, Pu M, Yi G, Wang Y, Luo X 2013 *Opt. Commun.* **291** 345
- [135] Mutlu M, Akosman A E, Serebryannikov A E, Ozbay E 2011 *Opt. Lett.* **36** 1653
- [136] Xiong X, Sun W H, Bao Y J, Wang M, Peng R W, Sun C, Lu X, Shao J, Li Z F, Ming N B 2010 *Phys. Rev. B* **81** 075119
- [137] Li Z, Zhao R, Koschny T, Kafesaki M, Alici K, Colak E, Caglayan H, Ozbays E, Soukoulis C 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 081901
- [138] Mutlu M, Akosman A E, Serebryannikov A E, Ozbay E 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 213905
- [139] Zarifi D, Soleimani M, Nayyeri V 2012 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **11** 334

- [140] Huang W X, Zhang Y, Tang X M, Cai L S, Zhao J W, Zhou L, Wang Q J, Huang C P, Zhu Y Y 2011 *Opt. Lett.* **36** 3359
- [141] Zhou J, Chowdhury D R, Zhao R, Azad A K, Chen H T, Soukoulis C M, Taylor A J, O'Hara J F 2012 *Phys. Rev. B* **86** 035448
- [142] Liu M, Powell D A, Shadrivov I V, Kivshar Y S 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 111114
- [143] Rodrigues S P, Lan S, Kang L, Cui Y, Cai W 2014 *Adv. Mater.* **26** 6157
- [144] Pendry J B 2004 *Science* **306** 1353
- [145] Hosseininejad S E, Komjani N, Zarifi D, Rajabi M 2012 *IEICE Electron. Express* **9** 117
- [146] Zarifi D, Oraizi H, Soleimani M 2012 *Prog. Electromagn. Res. Lett.* **123** 337
- [147] Ma X, Huang C, Pan W, Zhao B, Cui J, Luo X 2014 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **62** 2307
- [148] Raman A P, Anoma M A, Zhu L, Rephaeli E, Fan S 2014 *Nature* **515** 540
- [149] Hossain M M, Jia B, Gu M 2015 *Adv. Opt. Mater.* **3** 1047
- [150] Zhu L, Raman A P, Fan S 2015 *PNAS* **112** 12282
- [151] Oulton R F, Sorger V J, Genov D A, Pile D F P, Zhang X 2008 *Nat. Photon.* **2** 496
- [152] Noginov M A, Zhu G, Belgrave A M, Bakker R, Shalaev V M, Narimanov E E, Stout S, Herz E, Suteewong T, Wiesner U 2009 *Nature* **460** 1110
- [153] Oulton R F, Sorger V J, Zentgraf T, Ma R M, Gladden C, Dai L, Bartal G, Zhang X 2009 *Nature* **461** 629
- [154] Yu N, Fan J, Wang Q J, Pflugl C, Diehl L, Edamura T, Yamanishi M, Kan H, Capasso F 2008 *Nat. Photon.* **2** 564

SPECIAL ISSUE—Diffraction limit of electromagnetic waves

Meta-antenna: principle, device and application*

Ma Xiao-Liang Li Xiong Guo Ying-Hui Zhao Ze-Yu Luo Xian-Gang†

(State Key Laboratory of Optical Technologies on Nano-Fabrication and Micro-Engineering, Institute of Optics and Electronics,
Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

(Received 17 April 2017; revised manuscript received 14 May 2017)

Abstract

Since electromagnetic waves were discovered, effectively controlling them has been a goal and radiators with better characteristics have always been chased by researchers. However, limited by the electromagnetic properties of nature materials, traditional radiation technology is reaching its bottleneck. For example, traditional microwave antenna has the disadvantages of large volume, heavy weight, narrow operating frequency band, etc., and cannot satisfy the development requirement of modern communication systems. Therefore, the state-of-art radiation technology meets the challenge of minimizing the size and broadening the bandwidth of radiators, and constructing multi-functional and reconfigurable antennas. In recent years, metamaterials have aroused great interest due to the extraordinary diffraction manipulation on a subwavelength scale. Fruitful bizarre electromagnetic phenomena, such as negative refraction index, planar optics, perfect lens, etc. have been observed in metamaterials, and the corresponding theories improve the fundamental principle systems of electromagnetics. Based on these novel theories, a series of new radiators has been proposed, which has effectively overcome the difficulties in traditional radiation technology and broken through the limits of natural electromagnetic materials. The relating theory and technology may greatly promote the development of electromagnetics, optics, materials.

In this article, we mainly review the recent progress in the novel electromagnetic radiation technology based on metamaterials, which is named meta-antenna, including the principle of diffraction manipulation of metamaterial to control the amplitude, phase and polarization of the incident electromagnetic waves. Subsequently, a series of radiation devices is introduced, including the new phased array antenna on the concept of phase manipulating metamaterial, and the high directivity antenna based on zero refraction index metamaterial and photonic crystal, and the low RCS antenna simultaneously has the functions of gain enhancement and stealth ability. Besides, the polarization manipulation characteristics of metamaterial are also reviewed. The anisotropic and chiral metamaterials are analyzed, and several polarizers with broadband characteristics and reconfigurable ability are introduced. Furthermore, due to the importance as future radiation sources, nanolasers that work on a subwavelength scale are demonstrated. Finally, we point out the current problems and future trend of the radiation technology based on metamaterials.

Keywords: subwavelength, metamaterial, meta-antenna, diffraction manipulation

PACS: 78.67.Pt, 43.35.Bf, 52.40.Fd, 42.25.Bs

DOI: [10.7498/aps.66.147802](https://doi.org/10.7498/aps.66.147802)

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2013CBA01700) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61405201, 61675208).

† Corresponding author. E-mail: lxg@ioe.ac.cn