

未来世界由超材料建构

祝叶华

《科技导报》编辑部, 北京 100081

摘要 超材料是一种特殊的人工复合材料或结构,通过对材料的关键物理尺寸进行结构上的有序设计,可以使其获得自然界材料所不具备的超常规物理性质。左手材料、光子晶体等超材料在隐身、天线领域有广泛的研究和应用。本文综述超材料的特殊性能及在军事、民用等领域的应用情况。

关键词 超材料;左手材料;光子晶体

近年来,超材料因其独特的设计理念和应用前景,逐渐引起全世界的关注。通过材料设计,超材料可以展现全新的物理现象,其颠覆性的设计思路,可以提升传统材料性能,突破资源稀缺的瓶颈。超材料的产生让人类的思维突破传统思维的框架,不再受限于自然材料参数和功能的限制(图1)。目前,超材料已在部分领域发挥和拓展了其功能,未来超材料还会继续渗透到更多不曾预料的领域,给人类社会带来巨大改变。

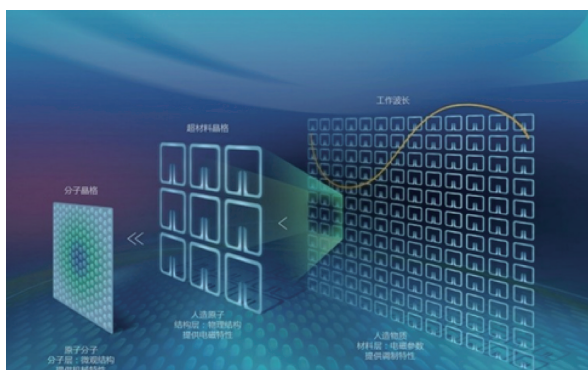


图1 超材料物质原理(图片来源:新材料在线)

1 超材料的发展

“超材料(metamaterial)”是一类具有自然界材料所不具备的超越材料本身物理性质的等效均匀复合材料或人工复合结构^[1]。metamaterial,其中拉丁语词根“meta-”表示“超出、另类”等含义,本质上讲,超材料是依据新颖的材料设计思

路,突破多种材料的物理结构表现出来的自然规律的限制,获得自然界材料所不具备的超常的物理性质的材料(图2)。从“超材料”的定义看,目前广泛研究的超材料主要有左手材料、光子晶体、电超材料、磁超材料等。

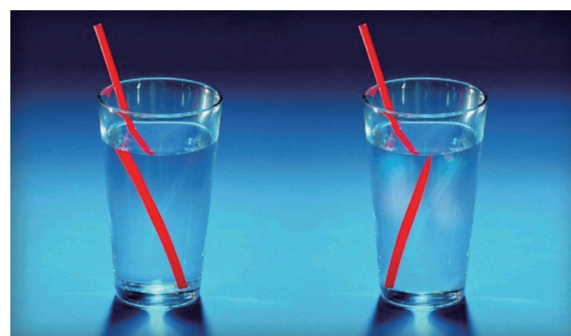


图2 向“错误”的地方弯曲的筷子:左侧为正常的水,右侧则为假象的透明负折射率液体材料(图片来源www.extremetech.com)

1.1 超材料特性

在自然界中,介电常数 ϵ 和磁导率 μ 是电磁学中描述媒质的2个基本物理量,通常情况下 ϵ 和 μ 都是正数,这类材料遵循右手螺旋定律。但在1968年,苏联理论物理学家Victor Veselego提出了一个大胆猜想:如果 ϵ 和 μ 都为负数的话,那材料就遵循左手螺旋定律,这与电磁学的自然规律相背,对应的材料被称为左手材料。除此之外,根据媒质的不同,材料还包括电负材料和磁负材料(图3)。

收稿日期:2016-09-10;修回日期:2016-09-21

作者简介:祝叶华,博士,研究方向为水环境治理,电子邮箱:zhuyehua@cast.org.cn

引用格式:祝叶华.未来世界由超材料建构[J].科技导报,2016,34(18):14-26;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2016.18.001

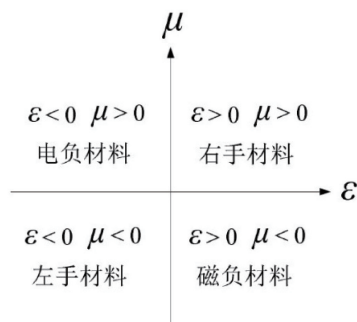
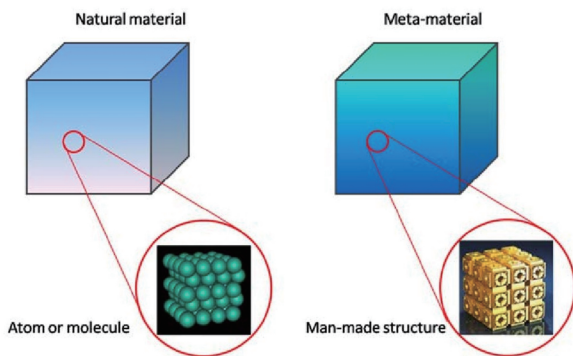


图3 媒质空间划分

超材料的基本设计思路是以某种具有特殊功能的人工结构为基础,来设计材料关键物理尺度的结构,进而得到不受自然规律限制的天然材料不具有的超常功能性材料。超材料通过原子的有序排列和有序调节,使得晶体材料显示出一些无定型态所不具备的物理特征,这类似于自然界中存在的晶体结构物质。超材料也可以理解为人为通过各种层次的有序结构实现对各种物理量的调制,从而获得自然界中在该层次上无序或无结构的材料所不具备的物理性质的材料(图4为超材料与自然材料对比)^[3]。



自然界中的材料由原子、分子构成,而超材料则由不同的共振结构单元人为构成

图4 自然材料与超材料构成对比

目前自然界中大部分媒质属于右手材料,等离子体和铁氧体等是少数具有电负材料和磁负材料特性的物质。左手材料是最早提出的一种超材料,至今还未在自然界中被发现。

1.2 超材料的发展

1967年,左手材料被提出之后,由于无法进行实验验证,因此 Veselago 的猜想没有得到科学界的重视。直到20世纪90年代中后期,英国物理学家 John B. Pendry 提出,一种材料除了拥有均匀的块体,还可以具有部分细小的单元,也就是说,这些细小的单元可能具有负介电常数和负磁导率,很有可能会产生材料本身不可能出现的效应。在 Pendry 的基础

上,美国科学家 Smith 从实验室层面完成了这些细小结构单元的负折射,在实验室中成功将左手材料制造出来^[4]。图5所示是世界上第一块磁导率和介电常数为负数的人工材料,这是左手材料里程碑式的成果。自此,metamaterial 与具有负折射的“左手材料”才逐渐引起了科学界的关注。

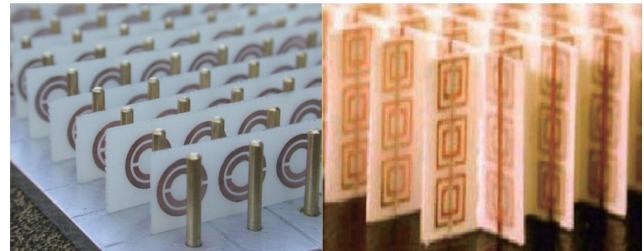


图5 世界上第一块人工左手材料(一维和二维)

左手材料的某些物理特性完全不同于常规材料。左手材料在电磁波某些频段会产生负磁导率和负介电常数,以至于使电磁波朝着与能量完全相反的方向传播,具有逆多普勒效应、逆 Cerenkov 辐射效应、逆 Snell 折射效应和“完美透镜”等特殊的电磁特性。目前,左手材料的制备技术涵盖了传输线及成型、谐振贴片型、颗粒复合型、薄膜层合型和渔网型等5种类别。凭借左手材料的特意属性以及制备技术的不断更新,左手超材料在隐身、雷达、成像、传感器以及天线领域都有巨大的应用前景。

2002年,复合左右手结构的左手材料被提出,这种材料由传输线结构来实现。研究人员提出的传输线左手材料在普通的传输线基础上加载了串联电容和并联电感而形成的传输线表现出后波特性的材料。与金属谐振环相比,这种材料具有损耗低、带宽大和结构连续等优点,并且极容易与其他器件相结合使用。这种复合左右手材料在微波领域有广泛的应用,如天线、谐振器、移相器和耦合器等^[5]。不过目前要想实现改种材料的三维设计还非常困难。

2003年,左手材料凭借其“负折射”特性入选《Science》年度十大科技进展;2006年,其再次凭借“隐身斗篷”成功跻身《Science》年度十大科技进展;2007年,左手材料的革命性的设计理念,再次助其入选材料学领域权威期刊《Materials Today》评选的过去50年材料学领域的10大进展。10年间,左手材料呈现爆炸式快速发展,在2010年,左手材料再次被《Science》评选为20世纪前10年的十大科技突破之一。

1987年,由美国科学家根据不同的研究角度,提出了光子晶体和光子带隙的概念。这类材料在光的波长尺度具有周期介电结构的特性。与左手材料最初遇到的“冷遇”不同的是,光子晶体的提出给光子技术带来了广阔的应用前景,国际上掀起了光子晶体研究热潮。1998年和1999年,与光子晶体相关的研究两度被《Science》评为当年世界上“十大科学进展”,同时也被《Science》预测为未来六大研究热点之一。

2006年,《Science》又一次将光子晶体评为未来的自然科学领域热点。

声学超材料是近年来超材料研发领域的又一热点。目前对于声学超材料还没有统一的定义,概括来讲,声学超材料就是指一些具有天然材料所不具备的超常声学特性,如负体积模量和负质量密度)的工程材料^[6]。2014年,Li等^[7]研究了埋入水中的软硅胶散射体结构,结果显示其周期性的结构具有双负(double negative)参数特性即等效的负体积模量和等效的负质量密度,具体他们首次提出了声学超材料的概念。这种材料可以针对不同的声学应用,通过特定的方式弯曲声波的传播轨迹。声学超材料的特性通常是由特定的结构而非材料组成来实现其特性。除此之外,负折射率材料,超磁性材料也逐渐研究发展起来。

1.3 超材料研究热点

超材料概念的提出,给光学、电子学、声学等研究领域带来了广泛的影响,并且其在移动通信、卫星通信、医学成像和超声波成像方面有极大的应用潜能。在军事领域,超材料同样应用潜能巨大。在目前以信息战、电子战为主要作战方式的现代战争条件下,精致制导武器对作战单位产生极大威胁,利用超材料会极大提到作战单位战场的生存能力,有望降低武器装备被敌方探测到的可能。图6^[8]为科学家预测的超材料未来发展趋势。

目前,超材料的应用研究热点有以下几种:

- 1) 研发称实现完美隐身的“隐身斗篷”;
- 2) 依托超材料谐振损耗特性制造超材料吸波体;
- 3) 在微波电路或天线中应用超材料来提高其性能。



图6 超材料的未来

2 超材料的应用

超材料技术已经慢慢渗入多个领域。在航空航天、国防、民用科学技术领域超材料都有很好的切入点,也对这些

领域带来强烈的冲击和影响。美国国防部将超材料列为“六大颠覆性基础研究领域”之首,专门启动了关于超材料的研究计划。中国也在“863计划”、“973计划”、国家自然科学基金、新材料重大专项等项目中对超材料研究予以立项支持。

2.1 电磁超材料

电磁超材料可以用于隐身衣、电磁黑洞、慢波结构等元器件的制作。其中,隐身衣主要应用于军事领域;电磁黑洞主要应用于太阳能电池,红外热成像,飞机、导弹、舰艇、卫星等领域;慢波结构主要应用于太阳能发电、高分辨红外热成像技术、光缓存、深亚波长光波导等领域。

2.1.1 隐身衣

隐身衣是一种以开口谐振环为单元结构、非均匀方式排列成圆环结构的超材料,是近年来出镜率最高的超材料应用在科幻电影《哈利波特》中,隐身衣也是一大亮点(图7)。

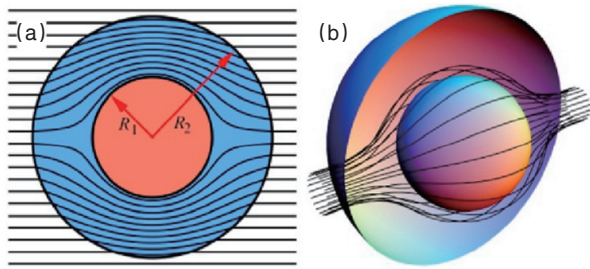


图7 哈利波特的隐身衣(图片来源:百度图库)

电磁超材料是迄今为止超材料技术研究最为集中的方向。电磁波的传输介质会对其传播性质产生影响,在不同介质中,同一频率的电磁波会有不同的现象。之前的研究,因为不存在负折射率材料,所以无法按照设计要求调节介质的电磁参数来达到对电磁波传播的控制。超材料将隐身技术带入了新的技术领域:超越让电磁波反射和吸收的隐身手段,通过制备超材料覆盖物,引导被覆盖物阻挡电磁波绕着其走,达到隐身目的。

2006年,Pendry等^[9]和Leonhardt等^[10]分别在《Science》上撰文发表关于设计电磁隐身衣的新方法。他们指出,具有特定磁导率和介电常数分布的超材料可以控制电磁波传播,并干扰电磁波的传播轨迹,使其发生弯曲。利用电磁超材料制备的套型装置,可以使放置在期内部的物体“隐身”,不被外界探测到,这种装置被称为电磁隐身衣(electromagnetic cloak),或者称为超材料隐身套。图8为二维、三维隐身衣示意^[9]。

Pendry最早提出的隐身衣属于“封闭式”隐身衣的范畴。利用坐标变化理论设计隐身衣,引导电磁波绕过目标物体之后返回原始的传播轨迹,给观察者造成一种物体不存在的假象,达到隐身目的。但“封闭式”隐身衣在实际研发中,面临一个大的问题,即这是一种通过坐标变化理论设计的三



“隐身衣”原理:探测波(电磁波、光波或者机械波)从外界进入“隐身衣”内部时,探测波会绕过“隐身衣”所覆盖的物体继续沿着入射方向进行传播,就像被覆盖的物体不存在一样,在这个过程中,探测波没有任何反射和损耗

图8 二维、三维隐身衣示意

维隐身衣,利用改变电磁参数达到光线弯曲的效果,但在计算过程中,要求电磁参数是非均匀各向异性的。在Pendry提出利用变换光学理论制备电磁隐身衣后,2006年,杜克大学Schurig等^[11]对材料的参数进行了简化,该研究采用SRR结构为基本单元演绎了二维TE波弱化隐身衣的隐身效果,制造出微波频段隐身柱。但这种隐身衣仅仅限制在微波频段(图9)。

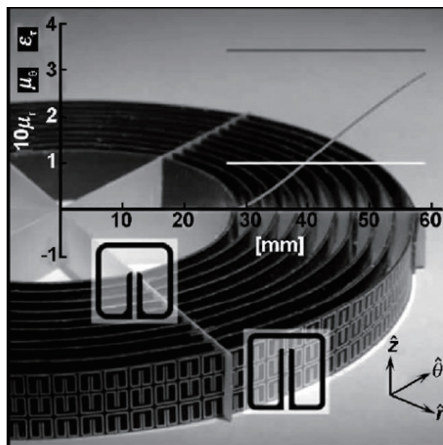


图9 Schurig等提出的隐身圆柱

2006年,Schurig等^[11]首次实验验证了世界上首个超材料隐身衣。他们在两个平行的金属板中间放置了包围着超材料隐身衣的金属铜柱,将入射电磁波从平行金属板的一端导入,并测量金属板内如空间各店的电磁场分布情况,据此验证了工作频率为8.5 GHz的超材料隐身衣可以引导电磁波并有效减小金属铜柱的散射场(图10)。图10中,(a)是理想情况下,由连续的介质参数构成的隐身衣的散射场仿真图;(b)是将连续的介质参数离散后得到的散射场仿真图;(c)是金属柱体的散射场仿真图;(d)是金属柱体加载隐身以后的散射场测量图。通过对比(c)和(d)可以看出,隐身衣可以大大减小金属柱体的散射程度,并且从隐身衣外部无法探测到隐身衣内部物体的信息,金热实现了金属柱体的完美隐身。

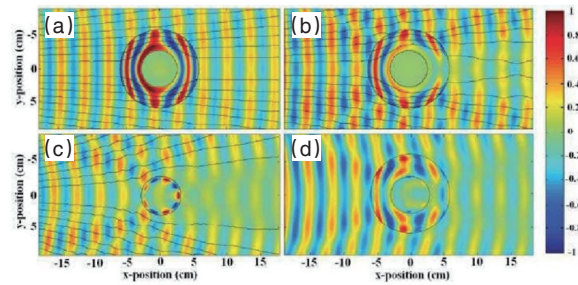


图10 超材料隐身衣仿真及实验结果

依据与Schurig同样的设计理论,Cai等^[12]提出二维TM波弱化隐身斗篷概念,利用内含针状纳米金属椭圆为电介质为基本单元,设计了在光波段发挥作用的隐身衣。而为了克服“封闭式”隐身衣非均匀各向异性的限制,Huang等^[13]利用均匀物质封层结构控制参数的各向异性,提出了二维TM波弱化隐身衣,与Cai等设计的隐身衣不同的是,这种TM波弱化隐身衣外边界不匹配真空的阻抗,这样会引起较大的散射。Ruan等^[14]采用近似理想情况模型进行求解,避免了设计坐标变换时隐身衣参数奇异性的问题。Yan等^[15]进一步证实,如果采用简化材料参数的方法,利用均匀各向同性材料设计制造的隐身衣不能达到完美的隐身效果。

Jiang等^[16]改变设计理论,通过高阶的坐标变换得到新型的TM波弱化隐身衣,克服了隐身衣边界与真空阻抗不匹配的问题。这一问题解决后,各种类型的隐身衣被大量研究。

除此之外,利用变换光学还可以设计3种不同拓扑结构的隐身斗篷:1)将目标物体压缩为零维的点;2)将目标物体压缩为一维线;3)将目标物体压缩为二维面。将目标物体压缩为零维的点和一维的线都是可以技术实现的。但对于第三种情况,将目标物体压缩为二维的平面,散射非常大。如果在计算过程中,一个导体面上方覆盖另一个体积更大的导体面,那被覆盖的体积较小的导体面就能成功隐身,无法被探测到。隐身地毯就是基于第三种情况进行设计的。

目前多国科研人员都展开了对隐身地毯的研究。隐身地毯相对于“封闭式”隐身衣而言,可以通过变换合适的坐标,减小隐身斗篷的各向异性,从而可以拓宽隐身衣的隐身带宽。隐身地毯的材料参数没有奇点,可以做到各向同性,降低了设计难度。

2008年,Li等^[17]首次提出了隐身地毯的结构,如图11和图12所示。由图12可以看出,在有隐身地毯存在的情况下,

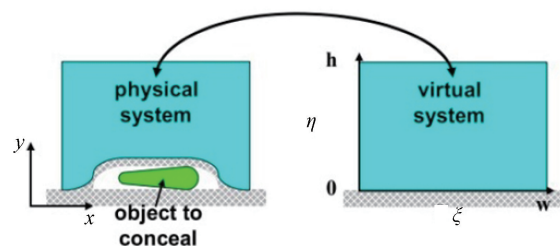


图11 隐身地毯示意图

目标物体的外部反射电场与光入射到导体平面的反射电场几乎没有区别,物体做到了完美隐身,无法被探测到。但如果目标物体暴露在外,没有隐身地毯覆盖的,那么其反射电场与光入射到导体平面的反射电场就有明显的区别,物体很容易被探测到。

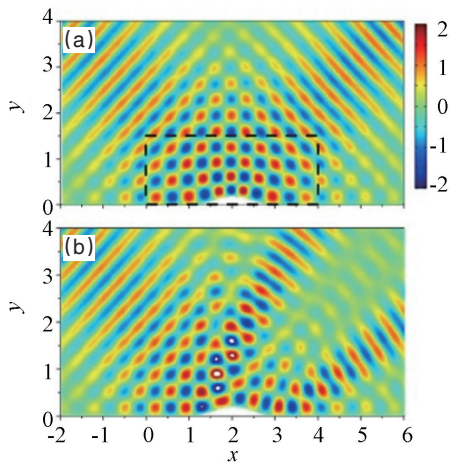


图 12 高斯光束从左侧 45°射向隐身地毯时,斗篷周围的电场分布(a)和没有隐身地毯时的电场分布情况(b)
(横、纵坐标的单位均为微米)

2009年,Valentine^[18]首次在实验上获得了1400~1800 m波长范围内的光隐身地毯,但这一隐身地毯的隐身频宽非常短,因此如果实现大尺寸物体在光频率范围内的隐身成为研究的热点。

Liu等^[19]设计了一种宽频带平面隐身地毯,这种平面地毯可以消除外界干扰,使处于地毯下方的物体完美隐身。Yu等^[20]依托嵌入式光学变换的思路,提出了平板隐身地毯的概念。随后,Xu等^[21]通过变换隐身衣的坐标,设计了参数均匀各向异性材料的隐身地毯,这在一定程度上降低了隐身地毯的制作难度,并得到了一种隐身波段为红外波段的隐身地毯。2009年,Cui等^[22]首次制备了三维、宽频带、低损耗的微波隐身地毯。从各个角度观察隐身地毯可见,在其上产生的反射电场与入射到导体面上的反射电场没有区别。

2009年,Lai等^[23]基于互补介质理论,提出了在将一个与被隐藏目标相对应的“反物质”镶嵌入具有负折射率的斗篷壳中制成的隐身衣。这种隐身衣是根据坐标变换和相位补偿理论提出的,因此也叫做相位补偿隐身衣。以往的隐身衣虽然可以实现隐身的效果,但同时也导致了外部环境 with 目标物体的隔绝。外部隐身衣打破了这种限制,实现了对隐身衣外部目标物体的隐身。

Han等^[24]设计了一种二维菱形外部隐身衣,其材料参数特征为均匀各向异性,在TE波和TM波照射下,可表现出良好的隐身特性。Yang、杨成福等^[25-26]推导了任意截面外隐身衣的相位补偿介质材料参数,研究了任意截面的外部隐身衣,并对这一隐身衣进行了全波仿真验证。不过由于这种隐

身衣的材料参数是各向异性的,所以不易实现。同时,相位补偿隐身衣还具有其他局限性,即隐身衣与目标是连成一体的,并且其隐身效果依赖于隐藏目标的形状和材料。所以当隐藏目标物体改变后,隐身衣也需要进行相应的改变。据此,Han等^[27]研究提出了分布式外部隐身衣,利用图形折叠法在一定程度上改变了相位补偿隐身衣的缺点。这种隐身衣隐藏外部任意形状和材料时不受嵌入反物质的限制,并且可以利用重新移动和定位外引申义系统来改变隐身的区域。

目前,超材料隐身衣正朝着更轻、更薄、更加不可见的方向发展(图13~图14)。

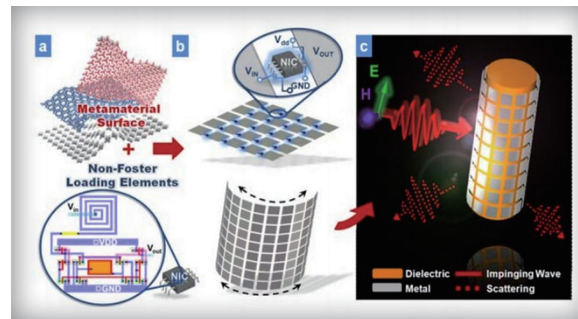


图 13 更轻、更薄、更加不可见的新型隐形斗篷
(图片来源:www.extremetech.com)



图 14 第一个三维可见光隐身斗篷
(图片来源:www.extremetech.com)

在军事领域,尤其是在航空航天隐身领域,“隐身衣”的重要作用正逐渐体现出来。精确打击系统和先进侦查系统的出现,使得近空防御领域出现了“发现即被消灭”的战略认识,采用隐身效果更好地新型材料,可以使对方的探测、侦查、制导系统失效,从而更好地隐蔽自己^[28]。传统的隐身技术已经不能满足这种要求,各种新材料的出现是隐身技术发展的及时雨。超材料在隐身技术领域的应用,使得研究人员将研发重点从单纯的吸波研究扩展到控制电磁波的绕射,进而达到更好隐身的目的。

超材料制备的新型隐身衣与传统隐身衣相比,有明显的区别。雷达吸波材料技术、有源对消技术、无源对消技术和外形隐身技术是4中主要的传统隐身技术。外形隐身技术和

雷达吸波材料技术是比较常用的传统隐身技术。吸波材料的隐身原理是隐身材料吸收雷达波能量进行隐身;外形隐身设计原理是利用合适的外形设计将接收的雷达波能量反射到其他方向上,进而减少雷达散射截面上产生的威胁。美国、德国、俄罗斯、英国、新加坡和中国等国均在超材料隐身装置领域有其优势研究和新技术。尤其在军事领域,各国对超材料技术的竞争更加激烈。

美国B2(图15)隐身战略轰炸机和F117A隐身战斗机(图16)是美国典型的采用外形隐身为主、吸波材料为辅的隐身设计方案^[29]。



图15 B2隐身战略轰炸机(图片来源:百度图库)



图16 F117A隐身战斗机(图片来源:百度图库)

美国的F35战斗机(图17)和俄罗斯的第五代战机PAK FA(T-50)(图18)在隐身性能上不相上下,不过为了确保战机的操控性、速度、武器载荷、航程和隐身等综合性能,俄罗



图17 美国F35隐身战斗机(图片来源:百度图库)



图18 俄罗斯T-50战机(图片来源:新材料在线)

斯的第五代战机PAK FA(T-50)使用了超材料来增加其在电磁和光波波段的隐身特性^[30]。

传统的隐身技术中,以增加其他方向上散射截面为代价,即目标物体无法消除入射电磁波产生的干扰,这会引起不同程度的散射效应和阴影,增大目标物体被探测设备(主动或被动)发现的可能性。所以隐身效果更好的新型隐身材料迫切需要被研发出来。

2.1.2 智能蒙皮

以超材料技术为基础,产生了一种全新的给予超材料的隐身蒙皮技术。隐身蒙皮将电磁隐身性能的超材料技术与具有常规机械、物理性能的蒙皮技术融合,充分发挥各自的优势。隐身蒙皮可以完全取代现有装备的蒙皮,在不改变现有装备外形特征和不影响现有装备动力学性能的情况下,使得装备具有隐身性能。

1985年,美国空军首次提出了“智能蒙皮”技术的概念。与此同时,20世纪80年代末,法国也开始研发“智能蒙皮”天线系统。智能蒙皮有其独特的优势:即采用光纤和传感器技术来代替普通的电缆连接技术,即节省了飞机内部空间,又减轻了飞机重量,简化了飞机的设计。同时,智能蒙皮还可以提高飞机对自身飞行状态的感知,以及对外部环境进行实时监控。更甚者,智能蒙皮还会大大提高飞机的隐身能力。

为了降低隐身战斗机的雷达反射面,隐身战斗机在结果中采用特殊的外形和特殊的材料,一方面可以通过外形将雷达波反射到特定角度,从而避免它们返回到雷达接收机(图19)。另一方面,在机身外部涂抹雷达吸波材料来吸收雷达波能量,尽可能减少雷达被反射强度。隐身战斗机就是利用上述两者相结合,才可以几乎实现隐身的目的,不被发现。但目前的一些新技术,已经逐渐开始解密这种隐身模式,如特高频雷达的出现,可以极高的分辨率来搜索飞机,从而削弱隐身飞机的优势。

2015年11月,华中科技大学的研究人员在《应用物理》发表论文报道,将“有源频率选择吸收表面”技术用于吸收特高频(UHF)波段雷达波的技术。这一技术被认为可以用于制造隐身战斗机智能蒙皮,它可以根据敌方雷达的探测频率调节自身对雷达波的吸收率,从而大大降低雷达反射面积,可能让现有只能吸收固定波段电波的隐身涂层技术彻底过时,图20为智能蒙皮样品及其工作原理。



目前歼-20采用的仍是传统隐身涂层技术,只能吸收特定波段的雷达波,与美国F-22、F-35的涂层技术属同一代产品

图19 歼-20(图片来源:观察者)

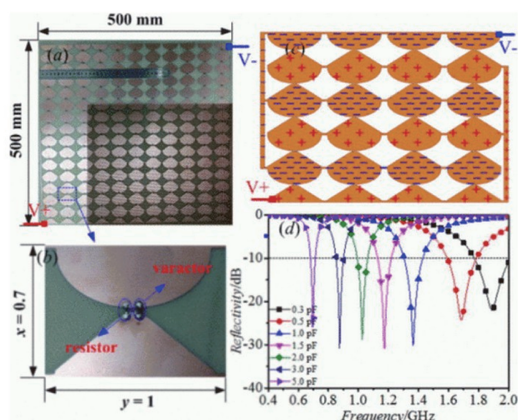


图20 智能隐身蒙皮样品的照片和工作原理
(图片来源:《应用物理》)

其实,有源波段选择技术并不止可以被运用在隐身智能蒙皮技术上,它还可以用于制造飞机的雷达罩,或者天线等,利用其可以智能化调整吸波频率的特性实现多种特殊功能,这对于实现无线电设备的小型化、多用途化、智能化具有极大的意义,是目前世界各国争相研究的前沿性技术^[31]。

除此之外,在汽车行业,智能蒙皮也逐渐受到重视。BMW和Toyota等汽车生产商已经启动了电磁超材料的研发。Toyota研发中心在之前的报道中称,智能电磁超材料预期将在车载雷达扫描系统、电动马达用新型磁性材料、移动通信天线和电磁兼容中使用的高新能吸收与屏蔽材料中得到大力推广。美国杜克大学的科研人员研发了一种无需镜头就可以拍照的超材料图像传感器。这一技术有望代替传统摄像机应用在智能车辆蒙皮上^[32]。

在“智能+”社会,将人类从繁琐的驾驶活动中解放出来,是智能汽车研发的初衷。要想使驾驶者的双手和大脑可得放松,首先就要给智能汽车配备一双“智能眼睛”。通过“智能眼睛”感知行车周围环境,进而做到自适应巡航、自动紧急制动、自动泊车等一系列智能车行为(图21^[33])。超材料雷达

被设计者研发来实现这一愿望。

传统的透镜需要特定形状使光线聚焦,而超材料透镜在完全平坦的情况下就能达到同样效果。同样,通过将金属微结构印制在柔性基底上就可以制备超材料薄膜,覆有多层薄膜的电路板能够引导雷达波束。通过对线路某些部分加不同电压可以主动控制波束,还可以达到移相器的作用。超材料雷达根据不同环境对波束进行不同调制,可以提高探测距离和对探测物的敏感性;可以规避周围信号干扰,为行车安全提供更有力的保障(图22);可以通过强化雷达信号和定向性来增强对环境的适应性,提高探测的稳定性。总的来说,超材料技术的加入使得车载雷达具有更远的辨识距离、辨识角度、更高的分辨率以及更强的抗干扰能力,能够满足智能交通时代对无线通信高速数据传输、大容量、高安全性、高抗干扰能力以及低延时性的要求(图23)^[34-35]。

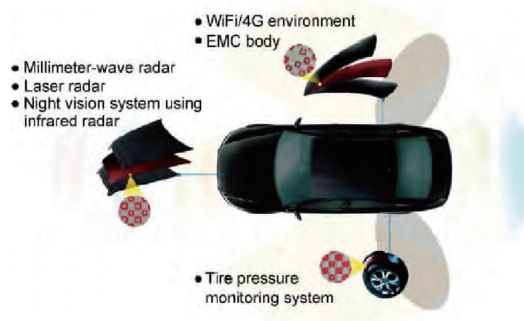


图21 超材料在汽车工业领域的的应用

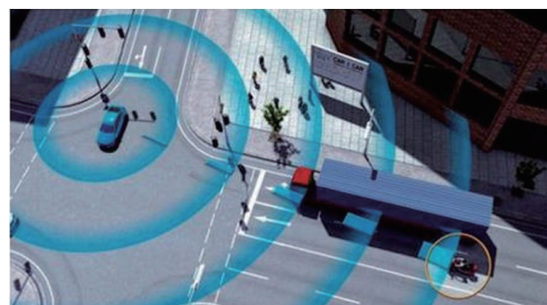


图22 智能汽车的“超材料雷达”
(图片来源:百度图库)



图23 汽车超材料智能结构可实现路面状态感知、红外行人探测与紧急自动制动(图片来源:百度图库)

2.1.3 电磁黑洞

“电磁黑洞”是一种能够全向捕捉电磁波的电磁超材料，能引导电磁波在壳层内螺旋式地行进，直至被有耗内核完全吸收，使基于引力场的黑洞很难在实验室里模拟和验证的难题迎刃而解。这一现象的发现，不仅将为太阳能利用技术增加新的途径，产生全新的光热太阳能电池，还能应用于红外热成像技术，大幅度提高红外信号探测能力，因而在飞机、导弹、舰船、卫星等方面获得广泛的应用。电磁黑洞主要应用于太阳能电池，红外热成像，飞机、导弹、舰艇、卫星等领域。

澳大利亚国立大学和美国加州大学伯克利分校合作研发出一种属于一种属性奇特的纳米超材料，该材料被加热时能以不同寻常的方式发光。这一成果有望推动太阳能电池产业的革命，带来能把辐射热转化成电能的热光伏电池，在黑暗中收集热量来发电。新型超材料有着纳米级的微结构，由黄金和氟化镁组成，能向特定方向发出辐射，还能改变形状发出特殊的光，而常规材料只能以全方位、广泛红外光波的形式发热。因此用这种材料制作匹配热光伏电池的发射器极为理想。该材料的非凡表现来自其新奇的物理属性，它的磁性呈双曲线形分布，表示电磁辐射以不同方向传播。的超材料克服了一些技术障碍，有助打开热光伏电池的潜能，预计能使热光伏电池的效率超过传统太阳能电池的2倍^[36]。

2013年，美国普渡大学研究人员设想利用模拟宇宙黑洞的性质，制造人造黑洞。宇宙黑洞的强引力能弯曲周围的时空，导致附近的任何物质或放射物沿着被扭曲的时空，呈螺旋式旋转着进入黑洞深处。

中国科研人员将这一设计付诸实践。东南大学的科学家崔铁军和陈强，制造了一个在微波频率下工作的“黑洞”。这个人造“电磁黑洞”由谐振和非谐振型的超材料构成，外形上由60个带有复杂结构电路板的镀铜同轴环构成，每一层都是交替模式，应用电磁波在非均匀介质中的传播轨迹类比物质在引力场下弯曲空间中的运动轨迹，以此模拟黑洞的部分特性(图24)^[37]。



图24 人造“电磁黑洞”(图片来源:《New Scientist》)

2.2 光学超材料

用于制作光学透镜的超材料，可以制作不受衍射极限限制的透镜、高定向性透镜以及高分辨能力的平板型光学透

镜，其中不受衍射极限限制的透镜主要应用于微量污染物质探测、医学诊断成像、单分子探测等领域，高定向性透镜主要应用于透镜天线、小型化相控阵天线、超分辨率成像系统等领域，高分辨能力的平板型光学透镜主要应用于集成电路的光学引导原件等领域。

2.2.1 光学透镜

超材料透镜是超材料的另一重要应用之一，它的出现给光学成像领域带来了革新性的突破，图25展示了用于成像的超材料。

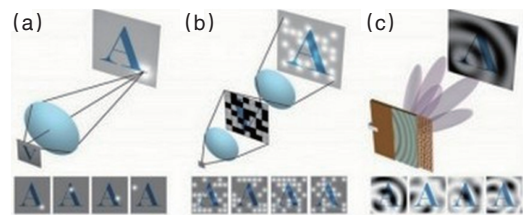


图25 代替传统成像工具的超材料

(图片来源:www.extremetech.com)

传统的阿贝成像受到衍射极限的约束限制，使得光学器件无法对尺度小于半个工作光波长的物体成像，超透镜打破了这种限制。2000年，Pendry在理论上提出了负折射材料可以用于制作超透镜的想法，并证明了当介质的介电常数为负数时，电磁波中的倏逝波成分会被放大，而倏逝波成分中部分携带的信息就可以在负折射率介质材料中传播，常规介质中的倏逝波就会衰减。

由负折射材料制备的平板具有成像的功能，所以在近场的情况下，物体发射出的光线会经负折射率平板前后界面2次折射后重新汇聚在一起，进而实现成像(图26)^[38]。

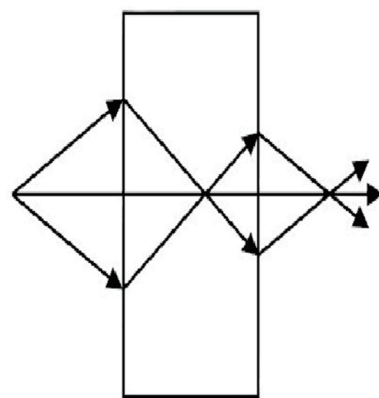


图26 负折射率平板超透镜成像示意

超透镜的成像分辨率远大于传统透镜，因而受到了广泛关注。2005年，Fang等^[39]在实验上证实了金属在其等离子共振频率下会呈现负介电常数，所以金属薄板在特定波段可以制作成超透镜，银薄板是目前常用的金属板。随后各种超透镜的设计层出不穷，超透镜制作材料也从最初的金属材料扩

展到半导体和复合材料。但平板形超透镜多为近场超透镜,只能在近场区域成像,不能传播到远场,为了实现远场成像,研究人员利用曲面结构的超材料来设计成像,并不仅达到了远场成像的目的,还对成像起到了放大的作用^[40]。

在生物领域,常规显微镜只能看到细胞内相对较大的结构,对于更加精细的部分无法探测到。利用分辨率较高的近场扫描显微镜可以观测到亚波长尺寸的微小部分,但是还无法实时观测。为了更直观的探测微观世界,科研人员在常规显微镜中嵌入超透镜,即大幅度提高了显微镜分辨率,又实现了实时观测的目的,对生物医学发展大有帮助^[41]。2016年,英国班戈大学电子工程系的王增波和中国复旦大学材料系的武利民等合作在《Science Advances》在线发表的文章中报道,利用常见的二氧化钛纳米粒子制备一种固态半球超级透镜,能把光学显微镜的分辨率提高4到5倍,大幅突破常规光学显微镜的极限分辨率(图27)^[42]。

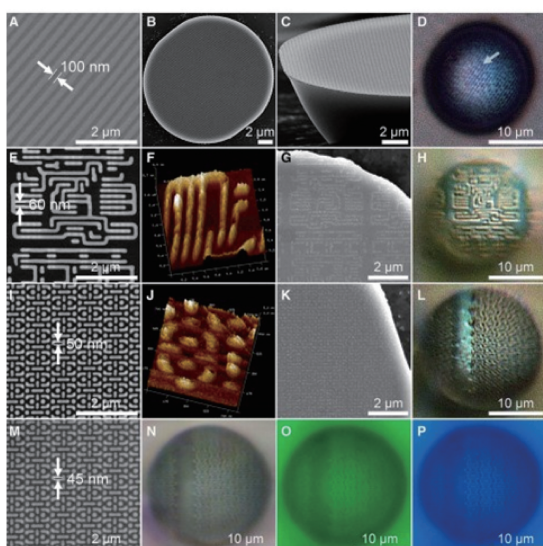


图27 超材料显微镜对不同样品表面纳米图案的超分辨率光学显微成像(图片来源:《Science Advances》)

由杜克大学研究人员研发了“超级透镜”设备,研究者利用特殊材料制造了一个可以聚焦磁场的“超级透镜”。这种“超级透镜”可以在一段距离内聚集低能量电磁波,形成有效电流传输,能够将线圈产生的磁场“平移”一英尺,进而使一英尺外的接收端产生感应电流。使发射器和接收器之间进行无线电传输的发展向前迈进一大步(图28)。

2.2.2 超材料天线

超材料在通信领域,尤其是在新型天线研究应用广泛。宽带无线通信技术对天线技术提出越来越严格的要求。传统微带天线辐射效率低、带宽窄等限制因素的存在,使得其不能满足超宽带通信的应用需求,电磁超材料为天线设计注入了新的设计理念。

超材料的引入,对提高天线增益、缩小天线尺、实现天线

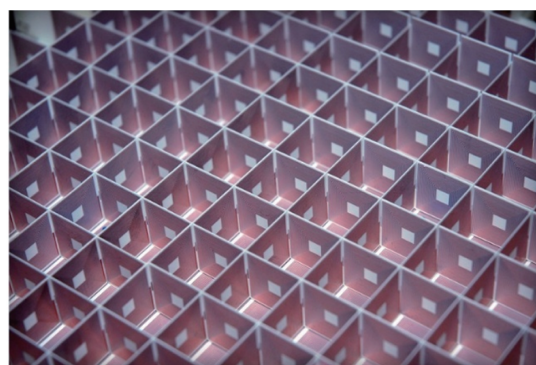


图28 杜克大学研发的超材料完美透镜(图片来源:www.extremetech.com)

的波束指向可变都大有帮助。近年来,国内外科研人员将超材料应用在天线领域,取得了许多突破性的进展。获得了众多科研成果:多功能天线、无线波长天线、漏波天线阵、微带天线、高方向性天线以及正在地板上利用多种形状制备而成的时域天线和低剖面天线。

Ziolkowski等^[43]从原理上验证了可以利用左手材料的相位补偿原理改变天线的匹配负载和提高天线的辐射效率等。如图29所示,将电小天线包围在左手材料层中,这样可以将电小天线的辐射阻抗由容性变为感性,这种设计方法相当于将阻抗匹配网络增加在天线周围^[4]。根据下图的设计理念,如果将左手材料层设计合理的话,就可以提高天线辐射效率,这可以为解决小天线的低辐射率问题,提供了可行性方案。

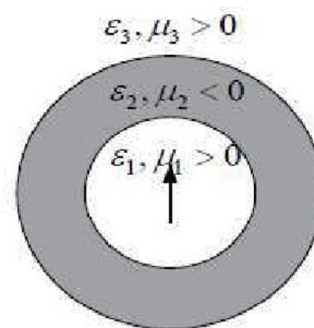
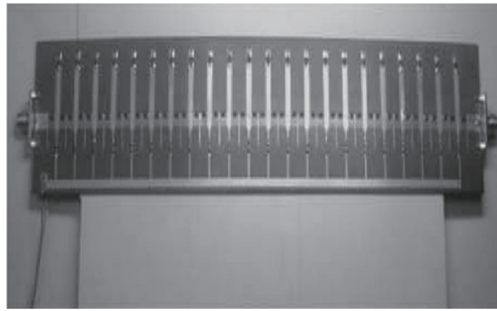


图29 高效率电小天线

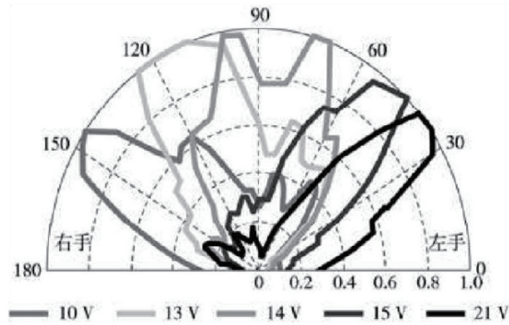
利用传统方法实现天线小型化的方法主要有:在微带天线上加载电容或者电感、增加基板的介电常数、采用分形结构和曲流技术等。传统方法制备小型化天线面临着许多挑战,例如天线的设计方案要同时满足方向性提高、尺寸减少、后瓣或者旁瓣得到抑制和增加带宽等。超材料的引入可以逐渐解决这些面临的挑战。Ntaikos等^[44]利用负磁导率超材料环制成了单极子多频带微带天线。Lizuka等^[45]研究设计了左手偶极子天线。

利用复合左/右手传输类的超材料可以构成名为漏波天线的新型天线。当电磁波沿着行波结构传播时,电磁波会沿着行波结构不断向外辐射漏波,这种产生漏波的结构就是漏波天线。漏波天线含有波束随频率扫描、主波瓣窄、结构紧凑、工作带宽、容易制造和成本低的优点。传统材料制备的漏波天线的扫描角度范围为 90° 左右,不利于实际应用和推广。利用复合左/右手传输线制造的漏波天线有“背射-端射”

频率扫描特征,可以拓宽天线的扫描角度到 -90° 到 $+90^\circ$ 。除此之外,超材料漏波天线可以仅通过2条简单的传输线就可以实现馈电,结构简单、高效。图30为超材料漏波天线结构图^[46]。如图30(a)中所示,将变容二极管引入超材料单元结构中,可以改变传输线的色散特性,进而得到压控波束的扫描漏波天线。如图30(b)中所示,这种天线可以实现 180° 范围内的扫描^[47]。



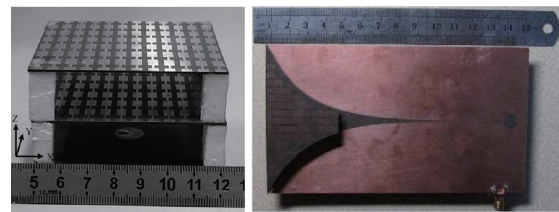
(a) 天线结构



(b) 波束扫描特性

图30 超材料漏波天线结果

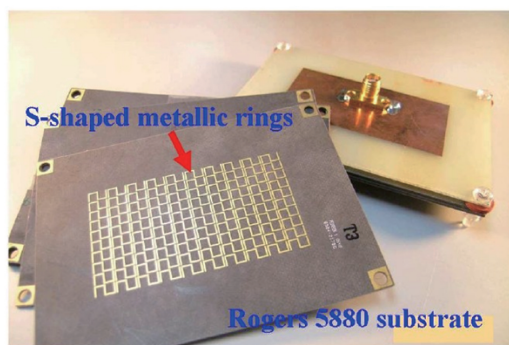
根据超材料的折射率可以从正道负变化的特性, Enoch等^[48]设想当超材料的折射率为零或者接近零时,就可以用超材料使电磁波产生汇聚效果。借助这种汇聚效果,将超材料加在天线辐射方向的前端,就可以大大提高天线的增益。目前常用的方法是,将折射率为零的超材料介质板放在天线的辐射方向上,如Zhou等^[49]提出了基于零折射率高增益的微带贴片天线的设想。(图31(a))。但这种天线由于折射率为零或者接近零,其带宽非常小,这也会使得依此设计的天线的增益只能在有限宽度内提高其增益。崔铁军等^[50]为了实现超材料加载天线的平面化、减少天线体积和增加高增益的带宽设计出一种图31(b)式的Vivaldi天线。他们将一对折射率接近零的超材料放置在Vivaldi天线开口的前方,实验发现,Vivaldi天线的方向性和增益明显提高。



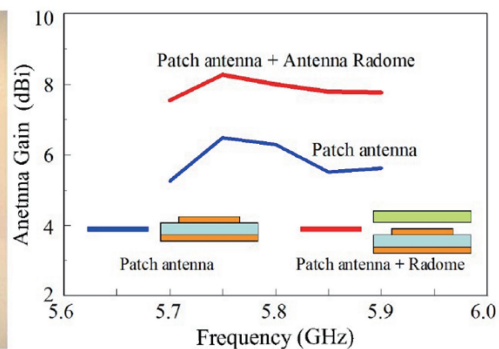
(a) 在天线上方 (b) 在天线前方

图31 Vivaldi天线加载超材料

Wu等^[51]也提出了一种带有超材料天线罩的贴片天线WIMAX,这种天线罩是一块印有S形超材料结构的Rogers5880介质板。图32为WIMAX贴片天线,图32(a)中的贴片天线上添加了超材料天线罩,由图32(b)的增益对比结果可见,天线的增益平均增高了2 dB。



(a) 单元结构



(b) 增益对比

图32 S形超材料天线罩和天线增益对比

3 超材料研发的进展

近10年来,超材料基础研究领域发展迅速,超材料的应用也逐渐覆盖了军事、民用等多个领域,各国竞相加大对超材料领域的研究投入。

3.1 国际进展

在超材料基础研究领域,美国、德国、新加坡和英国有绝对的优势。其中,美国杜克大学的Smith研究团队、德国斯图加特大学Giessen团队和新加坡南洋理工大学Singh团队做了深入的研究。在新型人工分子和原子设计方面,美国加州大学伯克利分校张翔团队、英国伦敦大学帝国理工学院Maier团队、德国耶拿大学Lederer团队在理论结构设计和实验论证方面做了大量研究,并相继提出了不同类型的谐振结构模式。美国宾夕法尼亚大学和英国南安普顿大学从现有的线性无源系统出发,对电磁超材料进行了可行性调研;而在新型传感型超材料方面,德国达姆施塔特工业大学的Jakoby等和美国德州大学奥斯汀分校的Alu团队分别研究了电磁场局域增强及其对周围环境的介电性敏感等特性。

在超材料关键技术领域方面,主要研究机构分别来自新加坡、美国、俄罗斯和英国等欧美国家。同时,欧美等国在超材料产品的工业应用领域优势依旧。拥有超材料技术公司、分形天线公司、Kymeta公司、Kyocera无限公司等。另外还有大型的航空航天和国防承包商包括波音公司、洛克德马丁公司、三星公司和雷神公司^[32]。

3.2 国内进展

目前,超材料的研究团队和机构多转向海内外的华人研究团队,例如:清华大学、南京大学、香港科技大学、复旦大学以及美国加州伯克利分校的张翔团队,美国东北大学的Liu团队、佐治亚理工学院的Cai研究团队等。现阶段,中国的超材料领域基础研究和关键技术几乎与世界同步。

浙江大学在光波和超低频超材料领域取得了一系列有影响的成果,发展出了基于慢波来设计超薄、宽吸收角度的完美吸波材料,提出了超材料在成像、隐身、磁共振成像和静磁场增强方面的应用。

东南大学研究了均匀和非均匀超材料对电磁波的调控作用,提出了电磁黑洞和新型超材料隐身器件,发展出了雷达幻觉器件、远场超分辨率成像透镜、新型天线罩、极化转换器新型超材料器件。

清华大学研究介质基和本征型超材料,提出了通过超材料与自然材料融合构造新型功能材料思想,发展出了基于磁共振、极性晶格共振、稀土离子电磁偶极跃迁以及Mie谐振的超常电磁介质超材料。

除此之外,东南大学的崔铁军团队(侧重微波超材料研究)、复旦大学黄吉平团队(将光学隐身的理念推广到热学领域并提出热学隐身衣设计原理)在超材料研究领域都获得了突破性的研究成果^[32]。

中国对超材料的科学研发和产业化也逐渐走在世界前列。国家设立了“863计划”、“973计划”、国家自然科学基金、

新材料重大专项等项目对超材料进行大量研究。深圳光启在国际上首开超材料工业化的先河,率先在国际上推进了超材料的产业化,并形成了以超材料技术为核心的光启创新技术专利池。目前该院拥有70%以上的国际超材料应用方面的专利,并且在智能隐身材料、超传感材料和智能通信系统等领域已有产业化成果。同时,深圳光启研究院在国际上率先推进了超材料产业化,研发出超材料平板式卫星天线,在22个省市进行了测试,并在北京、天津等地得到了实际应用。

2015年,中国正式发布了超材料领域的国家标准《电磁超材料术语》,并将于2016年10月1日起实施。《电磁超材料术语》中规定了电磁超材料的类别、设计、功能、基材以及应用等相关方面的术语和定义。这是全球第一份超材料领域的国家标准,也将对中国超材料技术与行业发展提供科学准确的技术支持,同时为其他国家超材料领域研究提供一定的参考和指导。

4 结论

超材料是目前国际学术界研究的热点领域,许多科研工作者在这一领域投入了大量的精力。推动超材料技术不断向前发展,在已有的电磁超材料、光学超材料的基础上,发展新型超材料,克服传统材料的物质结构限制,是未来发展的主流方向。

超常的物理特性使得超材料的应用前景十分广泛,其应用范围覆盖了工业、军事、生活等各个方面。特别是电磁超材料,对未来的通信、光电子/微电子、先进制造产业以及隐身、探测、核磁、强磁场、太阳能及微波能利用等技术将产生深远的影响。

近年来,超材料研究发展迅速,在军事、民用等领域也逐渐获得喜人成绩,不过距离产业化应用还有很长一段路,有待从以下几个方面进行进一步挖掘和研究:

1) 拓宽超材料的工作频率和方向。目前,超材料的工作频率还只限定在红外层次,并且大多数负折射率材料只能在某些角度上实现负折射。尤其是对隐身装置而言,拓宽工作波段和各向同性的特性,对实现超完美隐身有很大助益。

2) 朝着产业化发展迈进。技术的研发最终都要回归应用,超材料目前还处于实验室到产品中试阶段。并且现阶段实验室还很难做到三维超材料的研发,因此如何实现大规模制造大体积超材料是实现超材料广泛应用的前提。

3) 智能超材料功能的设计和性能的优化及相关模拟仿真方法有待加强。

4) 不同超材料中间相互作用的研究相对来说还属于空白领域。

全球“工业4.0”进程持续深化、“智能+”应用领域不断扩大,对于处在超材料应用领先地位的中国高校和企业来说,应力争在未来一些战略新兴产业及人工智能革命领域引领世界潮流。

参考文献 (References)

- [1] 陈曦. 超材料的电磁特性与应用研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
Chen Xi. Research on the electromagnetic characters and applications of metamaterial[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013.
- [2] 张辉. 超常介质的电磁特性及其应用研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2009.
Zhang Hui. Investigation on matamaterials and its application[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009.
- [3] 徐亚东. 用超材料操控波导中电磁波的传播[D]. 苏州: 苏州大学, 2014.
Xu Yadong. Manipulating the propagations of electromagnetic waves inside waveguide by employing metamaterials[D]. Suzhou: Suzhou University, 2014.
- [4] Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. *Science*, 2001, 292(5514): 77-79.
- [5] Eleftheriades G V, Iyer A K, Kremer P C. Planar negative refractive index media using periodically L-C loaded transmission lines[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2002, 50(12): 2702-2712.
- [6] Cui T J, Smith D R, Liu R P. *Metamaterials: theory, design, and application* [M]. New York: Springer, 2010: 1-4.
- [7] Li J, Chan C T. Double-negative acoustic metamaterial[J]. *Physical Review E*, 2004, 70(5): 055602.
- [8] Chen H Y, Chan C T, Liu S Y, et al. A simple route to a tunable electromagnetic gateway[J/OL]. *New Journal of Physics*, 2009, 11 [2016-09-24]. <http://iopscience.iop.org/1367-2630/11/8/083012>.
- [9] Pendry J B, Schurig D, Smith D R. Controlling electromagnetic fields [J]. *Science*, 2006, 312: 1780-1782.
- [10] Leonhardt U. Optical Conformal Mapping[J]. *Science*, 2006, 312: 1777-1780.
- [11] Schurig J J, Mock B J, Justice S A, et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies[J]. *Science*, 2006, 314(10):977-980.
- [12] Cai W, Chettiar U K, Kildishev A V, et al. Optical cloaking with metamaterials[J]. *Nature photonics*, 2007, 1(4): 224-227.
- [13] Huang Y, Feng Y, Jiang T. Electromagnetic cloaking by layer structures of homogeneous isotropic materls[J]. *Optics express*, 2007, 15 (18): 11133.
- [14] Ruan Z C, Yan M, Neff C W, et al. Ideal cylindrical cloak: perfect but sensitive to tiny perturbations[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99 (11): 113903.
- [15] Yan M, Ruan Z C, Qiu M. Cylindrical invisibility cloak with simplified material parameters is inherently visible[J]. *Physical Review E*, 2007, 99: 233901.
- [16] Jiang W X, Cui T J, Yu G X, et al. Arbitrarily elliptical-cylindrical invisible cloaking[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2008, 41 (8): 085504.
- [17] Li J, Pendry J B. Hiding under the carpet: A new strategy for cloaking [J]. 2008, 101(20): 203901.
- [18] Valentine J, Li J, Zentgraf T, et al. An optical clock made of dielectrics[J]. *Nature Materials*, 2009, 8, 568-571.
- [19] Liu R, Ji C, Mock J J, et al. Broadband ground-plane cloak[J]. *Science*, 2009, 323(5912): 366-369.
- [20] Yu G X, Jiang W X, Cui T J. Invisible slab cloaks via embedded optical transformation[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94: 041904.
- [21] Xu X F, Feng Y J, Hao Y, et al. Infrared carpet cloak designed with uniform silicon grating structure[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95 (18): 184102.
- [22] Ma H F, Cui T J. Three-dimensional broadband ground-plane cloak made of metamaterials[J/OL]. *Nature Communications*, 2010, 1 [2016-09-24]. <http://www.nature.com/ncomms/journal/v1/n3/full/ncomms1023.html>. DOI: 10.1038/ncomms1023.
- [23] Lai Y, Chen H Y, Zhang Z Q, et al. Complementary media invisibility cloak that cloaks objects at a distance outside the cloaking shell[J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102(9): 093901.
- [24] Han T C, Tang X H, Xiao F. External cloak with homogeneous material[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009, 42(23): 235403.
- [25] Yang C F, Yang J, et al. An external clock with arbitrary cross section based on complementary medium and coordinate transformation[J]. *Optics Express*, 2011, 19(2):1147.
- [26] 杨成福. 电磁坐标变换及其应用研究[D]. 昆明: 云南大学, 2010.
Yang Chengfu. Application research of electromagnetic coordinate transformation[D]. Kunming: Yunnan University, 2010.
- [27] Han T C, Qiu C W, Tang X H. Distributed external cloak without embedded antiobjects[J]. *Optics Express*, 2010, 35(15): 2642.
- [28] 许卫锴, 卢少微, 马克明, 等. 超材料在隐身领域的研究及应用进展 [J]. *功能材料*, 2014, 45(4): 4017-4026.
Xu Weikai, Lu Shaowei, Ma Keming, et al. Research and application progress in the field of stealth based on metamaterials[J]. *Journal of Functional Materials*, 2014, 45(4): 4017-4026.
- [29] 王金金, 左翔, 赵选科, 等. 隐身斗篷概述及其光学理论研究[J]. *信息技术*, 2015, 44(5): 139-142.
Wang Jinjin, Zuo Xiang, Zhao Xuanke, et al. Overview of electromagnetic invisibility cloak[J]. *Machine Building & Automation*, 2015, 44 (5): 139-142.
- [30] 来自未来的“魔法材料”: 隐身超材料[EB/OL]. (2015-04-07). http://www.360doc.com/content/15/0407/20/22754003_461371947.shtml.
- [31] 中国新智能蒙皮技术或已实用 比F-22更先进[EB/OL]. (2015-11-17). <http://war.163.com/15/1117/08/B8K0L0K1000140VF.html>.
- [32] 于相龙, 周济. 智能超材料研究与进展[J]. *材料工程*, 2016, 44(7): 119-128.
Yu Xianglong, Zhou Ji. Research advance in smart matamaterials[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2016, 44(7): 119-128.
- [33] 刘若鹏, 季春霖, 赵治亚. 超材料: 重新塑造与重新思考[J]. *工程*, 2015, 1(2): 179-184.
- [34] 超材料雷达: 让智能车辆拥有一双“好眼睛”[EB/OL]. (2015-07-08). <http://hk.stock.hexun.com/2015-07-08/177381833.html>.
- [35] 太赫兹超材料助力车联网 智能汽车有望成为“变形金刚”[EB/OL]. (2015-04-14). <http://finance.jrj.com.cn/2015/04/14/141619097646.shtml>.
- [36] 新奇纳米超材料助推太阳能电池革命[EB/OL]. (2016-04-20). <http://tech.163.com/16/0420/09/BL3795840009405H.html>.
- [37] 中国科学家首次制造人造电磁黑洞[EB/OL]. (2013-12-16). http://tech.ifeng.com/discovery/detail_2013_12/16/32155457_0.shtml.
- [38] Ramakrishna A S, Pendry J B. Imaging the near field[J]. *Journal of Modern Optics*. 2003, 50(9): 1419-1430.
- [39] Fang N, Lee H, Sun C, et al. Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens[J]. *Science*, 2005, 308(5721): 534-537.
- [40] Xiong Y, Liu Z, Sun C, et al. Two-dimensional imaging by far-field superlens at visible wavelengths[J]. *Nano Letters*. 2007, 7(11): 3360-3365.

- [41] Taubner T, Korobkin D, Urzhumov Y, et al. Near-field microscopy through a SiC superlens[J]. *Science*, 2006, 313(5793): 1595.
- [42] Fan W, Yan B, Wang Z B, et al. Three-dimensional all-dielectric metamaterial solid immersion lens for subwavelength imaging at visible frequencies[J/OL]. *Science Advances*, 2016, 2(8) [2016-09-24]. <http://advances.sciencemag.org/content/2/8/e1600901>. Doi:10.1126/sciadv.1600901.
- [43] Ziolkowski R W, Kipple A D. Application of double negative materials to increase the power radiated by electrically small antennas[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2003, 51(10), 2626-2640.
- [44] Ntaikos D K, Bourgis N K, Yioultsis T V. Metamaterial-Based electrically small multiband planar monopole antennas[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2011, 10: 963-966
- [45] Lizuka H, Hall P. A Left-Handed Dipole Concept[C]. 2006 IEEE International Workshop on Antenna Technology Small Antennas and Novel Metamaterials, New York, 2006, 396-399.
- [46] Andrea A, Filiberto B, Nader E, et al. Theory and simulations of a conformal omni-directional subwavelength metamaterial leaky-wave antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2007, 55(6), 1698-1708.
- [47] Justin E, Viktor P A, Ildar S, et al. Nonlocal effects in effective-medium response of layered metamaterials[J/OL]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90 [2016-09-24]. <http://dx.doi.org/10.1063/1.2737935>. DOI: 10.1063/1.2737935.
- [48] Enoch S, Tayeb G, Sabouroux P, et al. A metamaterial for directive emission[J]. *Physical Review Letters*. 2002, 89 (21): 213902.
- [49] Zhou H, Pei Z, Qu S, et al. A novel high-directivity microstrip patch antenna based on Zero-index metamaterial[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2009, 8: 538-541.
- [50] Zhou B, Cui T J. Directivity enhancement to vivaldi antennas using compactly anisotropic zero-index metamaterials[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2011, 10: 326-329.
- [51] Wu C Y, Yeh S H, Lu T H. Planar high gain antenna for 5.8-GHz WiMAX operation [C]/IEEE Region 10 Conference, 1-3.
- [52] 刘佳. 超材料在光学传输方面的应用研究[D]. 南京航空航天大学, 2014.
- Liu Jia. Application of matamaterials in optical transmission[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.

Metamaterials to build the future

ZHU Yehua

Editorial Department of *Science and Technology Review*, Beijing 100081, China

Abstract Metamaterial is a special kind of artificial composite materials or structures. Through orderly design the key physical size of the structure, we can design our own “atoms” to create the special material with unprecedented effective properties that have not yet been found in nature. Metamaterial like left-hand materials and photonic crystal have a wide range of applications in military and civil field. This paper reviewed the research progress and application of metamaterial.

Keywords metamaterial; left-hand materials; photonic crystal

(责任编辑 陈广仁)