

太赫兹波段超材料的制作、设计及应用

潘学聪¹, 姚泽瀚², 徐新龙^{1,2*}, 汪力¹

(1. 中国科学院 物理研究所 北京凝聚态物理国家实验室, 北京 100190;

2. 西北大学 光子学与光子技术研究所

光电技术与功能材料国家重点实验室培育基地, 陕西 西安 710069)

摘要: 本文从制作方法、结构设计和材料选择几方面综述了超材料在太赫兹波段的电磁响应特性和潜在应用。首先, 介绍了获得不同维度、具有特异电磁响应以及结构可调超材料的各种微加工制作方法, 进而分析和讨论了超材料的电磁响应特性。文中指出, 结构设计可以控制超材料的电磁响应特性, 如各向异性、双各向异性、偏振调制、多频响应、宽带响应、不对称透射、旋光性和超吸收等。超材料的电磁响应依赖于周围微环境的介电性质, 因而可用于制作对环境敏感的传感器件。此外, 电光、磁光、相变、温度敏感等功能材料的引入可以获得光场、电场、磁场、温度等主动控制的太赫兹功能器件。最后, 简单介绍了超材料在太赫兹波段进一步发展所面临的机遇和挑战。

关键词: 超材料; 太赫兹技术; 结构设计; 调制; 偏振

中图分类号: O441; TB34 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20130603.0283

Fabrication, design and application of THz metamaterials

PAN Xue-cong¹, YAO Ze-han², XU Xin-long^{1,2*}, WANG Li¹

(1. *Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*

2. *State Key Laboratory Incubation Base of Photoelectric Technology and Functional Materials, Institute of Photonics & Photon-Technology, Northwest University, Xi'an 710069, China)*

* *Corresponding author, E-mail: xlxuphy@nwu.edu.cn*

Abstract: In this paper, the electromagnetic responses and potential applications of THz metamaterials are reviewed through the focus on fabrication, unit structure design, and material selection, respectively. It describes different kinds of fabrication technologies for obtaining metamaterials with special electromagnetic responses such as magnetic resonance and reconfigurable tunability, which is helpful for further understanding of electromagnetic resonances in metamaterials. The paper analyzes the electromagnetic response characteristics in detail and points out that the unit structure design can be used to obtain desired electromagnetic characteristics, such as anisotropy, bianisotropy, polarization modulation, multiband response, broadband response, asymmetric transmission, optical activity, and perfect absorption, etc. The dependence of electromagnetic responses upon surrounding dielectrics can be used not only to control resonant frequency by a proper substrate

收稿日期: 2013-02-17; 修订日期: 2013-04-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 10834015; No. 61077082); 陕西省科技新星资助项目 (No. 2012KJXX-27); 陕西省光电技术与功能材料省部共建国家重点实验室培育基地基金资助项目 (No. ZS12018)

selection, but also for sensing applications. Furthermore, the introduction of functional materials with controllable dielectric properties by external optical field, electrical field, magnetic field and temperature has the potential to achieve tunable metamaterials, which is highly desirable for THz functional devices. Finally, the opportunities and challenges for further developments of THz metamaterials are briefly introduced.

Key words: metamaterials; THz technology; structure design; modulation; polarization

1 引言

通过对自然材料的裁剪、加工和设计,从而实现电子、光子以及其他一些元激发准粒子的人为调控,一直是光电科学研究的重点。超材料(metamaterials),也被称为特异性材料,正是在这样的背景下提出来的。在广义上,超材料是一种人工设计加工的复合材料,该材料特异的物理性质不仅取决于组成材料的本征性质,还要由亚波长结构决定^[1],而且这些奇特的物理性质,往往不能通过现有自然材料的本征物理性质获得。例如目前电磁超材料具有负折射率、旋光性、类双折射、类电磁感应透明(EIT,也被称为超材料诱导透明)、不对称透射、超吸收等奇特的物理性质,这些奇特的电磁性质与亚波长单元结构和单元排列方式密切相关。超材料的研究遵循“结构-组分-功能”的三角关系,可以通过结构的设计和尺寸的调整来获得不同波段、不同物理性质的响应特性;也可以通过对单元格以及基底材料组分的选择,实现特定的被动式及主动式的光电功能。随着微纳加工工艺的日益简化和普及,超材料的相关研究覆盖了从微波到可见光波段,吸引了越来越多的科研工作者。

太赫兹(THz)辐射的频率为0.1~10 THz,在电磁波谱中位于微波与红外之间,处于电子学到光子学的过渡区域^[2]。有效的THz源和探测器的缺乏导致了THz技术的研究相对于其他波段要落后得多,曾被称为THz空隙(THz gap)^[3-4]。而基于超快激光的THz时域光谱技术的发展,推动了THz技术的快速发展。THz辐射的光子能量很低,不会对被测物质产生损伤,可进行无损探测;对大多数介电物质是透明的,可进行透射成像;能够同时测量THz电场的振幅和相位,从而进一步直接获得样品的复折射率^[5]、复介电常数

以及复电导率,并可以实现飞秒时间分辨的动力学分析;很多凝聚态体系的声子和其他元激发,以及许多生物大分子的振动和转动能级都处于THz波段,因而,可以通过特征共振对物质进行探测和指纹分辨。

但是,目前THz波段的功能器件相对较少,限制了THz技术的进一步发展。超材料能够对THz波的振幅、相位、偏振以及传播实现灵活多样的控制,从而提供了一种实现THz功能器件的有效途径。另一方面,THz时域光谱技术能够同时探测电场的振幅和相位,能够更加全面地测量超材料的电磁响应特性,因此,THz技术和超材料的发展是相辅相成的。

超材料最初提出是为了实现负折射率,通过基于开口环谐振器(SRRs)的单元结构设计,可以获得负介电常数^[6]和负磁导率^[7]。随着研究的深入,超材料单元结构的设计越来越多样化,更多的响应特性及关联参数逐渐被发现,如基本组成材料的性质和结构参数的影响^[8-11]以及传感器的实现^[12-15];各向异性超材料的偏振依赖性及其对电磁波振幅、相位和偏振态的调制,偏振元件的实现^[16];本征半导体^[17-22]、掺杂半导体^[23-24]、超导材料^[25]、绝缘体-金属相变材料^[26-27]、热敏材料^[28]和铁电材料^[29-30]的引入而实现的光开关、调制器;不同结构的组合或者多层结构超材料实现的双频、多频和宽频共振响应^[31-37],吸收体^[38-40],以及类EIT现象^[41-44]的发现;制作工艺提高实现的微机械调制的可重构超材料^[45-47]等。这些都显示了超材料实现THz波控制和THz功能器件的巨大潜力。

目前,国内外关于THz波段超材料的综述多数侧重于超材料在实现THz波段可调功能器件中的应用^[48-51],特别是可调THz功能器件的实现以及基本的电磁响应特性和负折射率性质^[52]。本文从制作工艺、结构设计和材料选择几个方面

对超材料的基本性质和潜在应用的最新发展进行了综述,并进一步展现超材料的设计和加工与其功能实现之间的依赖关系,期望能够促进基于超材料的 THz 功能器件的研究。

2 制作方法

微纳加工技术的发展为超材料的制备提供了便利,也进一步促进了超材料的发展,可以加深对超材料电磁响应特性的理解。图 1 给出了几种 THz 波段超材料的加工方法及其制作流程。这里的光刻技术(lithography)包含了广义的光刻加工工艺,如薄膜沉积、金属结构和非金属结构的制作技术等。多次曝光光刻工艺可以制作三维超材料,而结合微机电系统(MEMS)概念的主动控制超材料的制作可能同时需要用到多层金属及非金属结构的套刻技术,从而实现结构可随外加激励动态变化的可调谐超材料。模板沉积技术直接通过金属沉积来形成超材料结构,不需要光刻胶的辅助,虽然简化了制备程序,提高了制备质量,但是沉积过程会造成模板的污染。打印方法和光纤拉丝方法不需要制作掩模板或者模板,简化了制作过程,但是,其最小制作尺寸受到限制,光纤拉丝方法同时限制了单元结构的设计。下面结合实例分别从平面超材料、三维超材料以及主动可调超材料等方面对太赫兹超材料的最新加工技术进行阐述。

2.1 平面金属超材料加工方法

到目前为止,研究最多的是平面超材料,即制作在电介质或者半导体基底上的准二维亚波长金属结构,通常采用光刻的加工方法。如图 1 所示,金属结构的光刻一般是在坚模后进行金属沉积,再通过去胶获得所需的金属结构。光刻技术的曝光可以选用多种光源,如紫外光、X 射线、电子束、离子束、质子束等。不同的光源需要选择不同的光刻胶,并且会有不同的曝光深度,对应着不同的金属沉积方法。紫外曝光获得的金属层厚度一般在 100 nm 量级,而质子束直写与电镀技术^[53]相结合可使金属层的厚度在 10 微米左右。光刻技术可以获得几微米的金属线宽度,并且样品均匀性较好,但是制作过程较复杂。模板沉积技术也

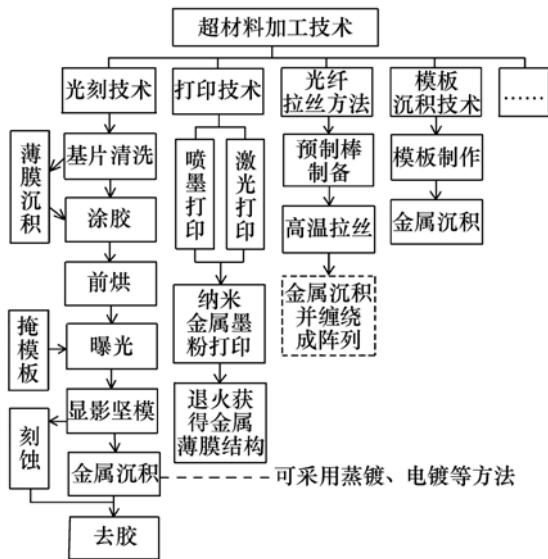


图 1 THz 波段超材料的加工技术

Fig. 1 Fabrication technologies for THz metamaterials

能获得高质量的超材料,金属通过模板的孔结构直接沉积在基底上,不需要光刻工艺,从而避免了化学污染^[26],但是模板的制作仍然需要采用光刻加工方法。喷墨打印^[54]和激光打印^[55]不需要制作掩模板或模板,很大程度地简化了超材料的制作过程,但是最小的金属线宽度受到了限制。喷墨打印需要多次打印获取所需的金属层厚度,喷墨的不均匀性会导致超材料共振的加宽;激光打印可以改善喷墨的不均匀性,一次获得微米量级厚度的超材料。

2.2 三维超材料加工技术

多层光刻技术是目前制作三维超材料的主要方法,可以通过电介质和金属结构的交替堆叠、套刻来实现^[56]。这种方法的制作过程复杂,一般只能制作有限几层来获得特定的响应性质,主要用于宽带响应超材料和基于超材料的吸收体的制备。另一方面,采用柔性基底,将平面超材料卷成三维形状^[57]也是获得三维超材料的一种方法。

光刻技术中采用电镀可以获得较厚的金属层,在此基础上采用多层电镀,或者电镀与其他金属沉积技术相结合的多次曝光光刻技术可以使单元结构竖立在基底平面上。如图 2 所示,非手性的 SRRs 分别制作在刚性和柔性基底上,在只有磁场激励的情况下,观察到了很强的磁响应^[58]。

这说明具有二维周期的三维超材料就能获得明显的磁响应,为研究超材料的电磁响应特性提供了一种新的方法。多层电镀还可以用于制作三维手性结构,从而实现线偏振电磁波的偏振转换和旋光性^[59]。

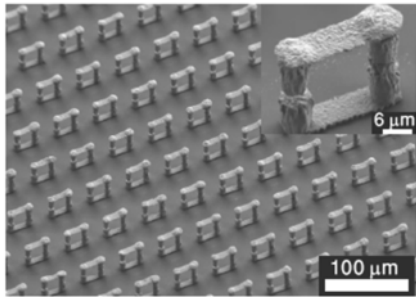


图2 电镀技术制作竖立的超材料^[58]

Fig. 2 Out-of-plane metamaterials fabricated using electroplating technique

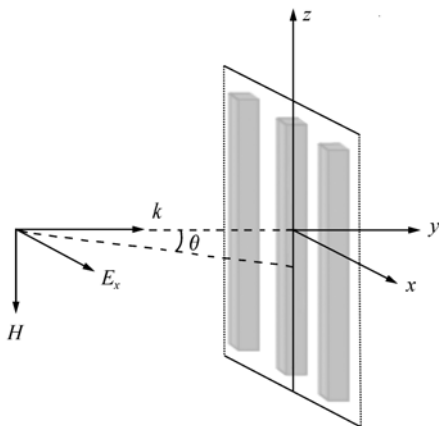


图3 光纤拉丝方法制作超材料^[61]

Fig. 3 Metamaterials fabricated by fiber drawing

类比光子晶体光纤的制作^[60],光纤拉丝方法也可以用于制作三维超材料。在制作过程中,可以将金属成分预埋在预制棒中,也可以在纤芯拉丝后再进行金属沉积并缠绕成阵列。以金属沉积方法为例^[61],如图3所示,利用直流磁控溅射沉积系统,在100 μm宽的聚合物方柱的3面沉积了250 nm厚的银涂层,形成了横截面为U形结构的超材料。在磁场激励下,观察到了明显的磁响应。然而,纵向的连续性导致了空间色散效应,即磁共振频率与入射角相关。利用激光消融方法破坏纵向的连续性,形成亚波长周期阵列,可以有

效抑制空间色散。与光刻相比,光纤拉丝方法限制了结构设计的灵活性。同时,光纤拉丝的最小尺寸限制了这种方法向高频的扩展。

三维超材料的制作技术已经取得了一定的进展,但是对于大多数三维超材料来说,传播方向的尺度还属于亚波长范围,大尺度三维材料的加工还面临着巨大的挑战。

2.3 主动可调超材料加工方法

主动可调超材料制作通常会涉及非金属结构的光刻。与金属结构的光刻不同,非金属结构的光刻通常要在涂胶前进行薄膜沉积或者选择带有薄膜的基底,如硅-蓝宝石(SOS,蓝宝石上外延硅),并在坚模后通过刻蚀获得所需结构。在刻蚀过程中,光刻胶起到了保护的作用,所得结构与光刻胶的形状相同。不同的材料可以选择不同的沉积方法,如分子束外延生长、磁控溅射、脉冲激光沉积、溶胶凝胶法、离子束沉积等;而常用的刻蚀方法是反应离子刻蚀和湿法化学刻蚀。有的可调超材料只需要通过在基底和金属结构之间沉积薄膜即可实现超材料电磁响应特性的主动控制。

MEMS也被称为微机械或微系统。MEMS加工技术不仅包含表面加工技术,还包含体加工技术,如硅基底的刻蚀^[46]。与其他可调超材料不同,MEMS的引入可以实现超材料结构的动态控制。例如,由热膨胀系数不同的氮化硅和金属组成的悬臂支架可以通过环境温度控制单元结构与阵列平面的相对取向来实现对磁响应和电响应的共振强度的调谐^[28];覆盖着磁性材料的柔性悬臂在外加磁场的控制下发生不同程度的形变,可以实现对超材料共振频率的调制^[62]。最近,用MEMS方法实现了超材料晶格排列或者单元结构不同组成部分之间距离的动态调制^[45-47],使超材料的共振响应随着耦合的改变发生变化,是研究超材料单元结构之间和单元结构内部耦合的重要方法。以不对称的SRRs为例^[47],如图4所示,超材料由两部分组成,一部分制作在固定的基底上,另一部分制作在与静电梳齿微驱动器相连的可移动支撑架上,支撑架的位移与驱动电压的平方成正比,通过驱动电压控制不对称SRRs之间的距离,从而实现超材料结构的重组。这种方法除了

可以实现共振频率的动态调制和超材料偏振相关性的改变,还可以实现超材料单元结构内部耦合引起的其他效应的动态调制,如类 EIT 现象^[43-44]。

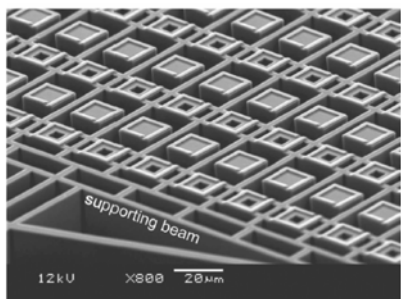


图4 微机械可重组超材料^[47]

Fig. 4 Micromachined reconfigurable metamaterials

3 结构设计

3.1 平面结构

超材料的亚波长结构和单元结构的排列方式对其电磁响应的实现起着重要的作用。亚波长结构的设计灵活多样,图5给出了一些平面结构^[22,33-36,40-44,63],中间为基本结构,四周为实现多频共振、宽频共振和类 EIT 响应的组合结构。

超材料基本结构包含金属线、线对、十字结构、渔网结构、矩形环、SRRs 等^[52]。其中,SRRs 是最常用的结构,并可以作为基本单元组成复杂的结构来获得特定的电磁响应。SRRs 本身也有不同的结构形式^[52,64],不同的对称性使其具有不同的电磁响应特性。最常用的是双环 SRRs 和简单的单环 SRRs。图5给出的基本结构分别为金属线、十字结构、矩形环、双环 SRRs、单环 SRRs、电 SRRs(eSRRs)和各向同性的 SRRs。双环 SRRs 的提出是为了获得负的磁导率,入射电磁场垂直于 SRRs 平面的磁场或者平行于开口所在边的电场都可以激发环形电流振荡,该响应可以等效为电感 L 和电容 C 形成的 LC 共振。环形电流振荡还可以等效为垂直于 SRRs 平面的磁偶极子,磁偶极子辐射与入射电磁波的相位延迟导致了 SRRs 的反磁性,从而产生了负的等效磁导率^[65]。同时,SRRs 中电场分量和磁场分量之间的耦合使

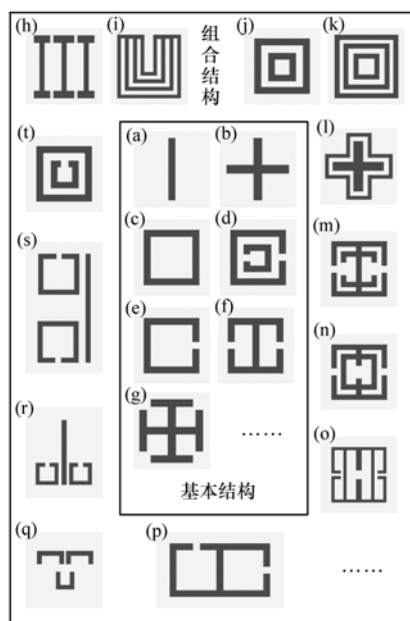


图5 THz 超材料的一些单元结构

Fig. 5 Some unit structures of THz metamaterials

SRRs 具有双各向异性,因此 SRRs 中等效介质的描述需要引入电磁场耦合参数^[66]。即使在正入射的情况下,该电磁场耦合参数也会对超材料的电磁响应产生影响^[67]。简单的单环 SRRs 也有相同的性质。通过对称性的增强可以消除这种电磁耦合,这种对称的 SRRs 通常被称为 eSRRs,但是这并不意味着 eSRRs 不存在磁响应,例如,通过 THz 波的斜入射,观察到了对称 eSRRs 随入射角增大而增强的磁响应^[68]。

不同形状和尺寸结构的组合,如不同 SRRs 的组合、十字环与十字结构的组合、多个矩形环的组合、I 形结构的组合、矩形环与 SRRs 的组合、金属短线与 SRRs 的组合等,是实现多频^[31-34]响应、宽带^[35-36]响应和类 EIT 现象^[41-44]的重要方法。结构的组合有交叉排列和嵌套两种方式。交叉排列设计简单,但通常会限制组成结构的密度,同时不同结构之间的耦合较弱;嵌套结构增强了不同共振模式之间的耦合。共振模式之间的相互作用可以调制超材料的电磁响应。平面超材料实现的宽带响应一般要求不同结构共振频率的差值较小,这就在一定程度上限制了共振带宽。如图5(h)中的 I 形组合结构,中间结构的水平臂长度与两侧结构不同,不同频率的共振模式叠加可以实

现宽带响应。随着两侧结构水平臂的长度逐渐减小,不同模式共振频率的差值增大,超材料逐渐表现出多频共振的性质^[36]。多共振模式的叠加可以在一定频率范围内减小这种限制,进一步扩展超材料宽带响应的共振线宽。类 EIT 现象也可以看作是一种多频共振,但是一般的多频共振的超材料由共振频率不同的结构组成,而类 EIT 现象中超材料共振一般由共振频率相同、共振线宽不同的结构组成。另外,相同结构组成的超材料,如图 5(p),通过不同激励方式也可以实现类 EIT 现象^[41]。当入射电磁波的电场沿水平方向时,直接激发左侧 SRRs 中的 LC 共振,然后通过电磁耦合,左侧 SRRs 激发右侧 SRRs 中的 LC 共振,产生反对称和对称两个 LC 共振模式。超材料中的类 EIT 现象主要有直接激发和间接激发两种方式。前者是指电磁场同时激发共振线宽不同的两个模式,共振频率处的相消干涉导致了透明窗口的出现,如图 5(q)和 5(t)所示的结构;后者是指电磁场直接激发“亮模”,再通过“亮模”与“暗模”的电磁耦合激发“暗模”,如图 5(p)、5(r)和 5(s)所示的结构。超材料中类 EIT 现象的透明窗口具有较大的群速度,是实现慢光的一种重要方法。另外,通过不同结构相对位置的改变^[43-44]或外部激励^[22],可以改变结构之间的耦合情况,实现类 EIT 现象的调制。

3.2 三维结构

三维加工技术的发展推动了三维超材料的研究进展,如前面提到的超材料的磁响应和旋光性。目前,最常用的三维加工技术是多层光刻技术。多层金属结构的超材料可以通过不同共振频率的单元结构实现多频和宽带的电磁响应^[37];通过双层结构可以抑制带通滤波器旁瓣,提高频率选择性^[69];通过相同结构的层间耦合可以激发新的共振模式并可以通过结构的相对取向控制耦合模式的共振频率^[70];通过不同结构的层间相互作用还可以在共振频率实现超吸收^[38-40];通过改变传播方向的结构对称性可以实现线偏振电磁波的不对称透射^[71]和旋光性^[72],同时可以控制透射电磁波的偏振态。在可见光波段,不同相对取向的多层金属结构实现了圆偏振片^[73]。

吸收体可以实现 THz 波的超吸收,可用于

THz 波的探测和成像。吸收体一般由两层金属构成,中间用电介质层隔开,主要有两种不同的设计方法,如图 6 所示,一种是两层间由两种不同的金属结构组成,另一种是由一层金属结构和一层金属薄膜构成。前者可以通过结构设计获得双向超吸收^[38],后者设计简单,并且对 THz 波有更好的调制,使透射为零,因此,后者得到了更广泛的应用。同时,由于后者的共振性质主要由金属结构决定,通过对金属结构的优化可以改善吸收体的入射偏振依赖性^[49],或者实现多频和宽带吸收^[36,40],增强了设计的灵活性。此外,由多层金属结构和金属层组成的吸收体也可以实现宽带吸收^[39]。对于吸收体的物理机制,目前有不同的说法。最早提出的是阻抗匹配理论,即入射电磁波在吸收体的两层金属上激发出反向的电流振荡,形成磁偶极子,从而改变吸收体的等效磁导率,使其波阻抗与空气的波阻抗相匹配,减小反射。但是,最近有研究发现金属层之间的磁响应可以忽略,也就是说吸收体的超吸收与层间耦合无关,并提出了改进的法布里-珀罗(FP)共振模型和多次反射干涉理论,由退耦合模型获得界面处的复反射系数和复透射系数后,可以定量描述吸收体的反射^[20]。金属和电介质的损耗对吸收强度起着重要的作用^[38],但是到目前为止,这种新理论还没有关于组成材料的损耗对实现超吸收影响的讨论。

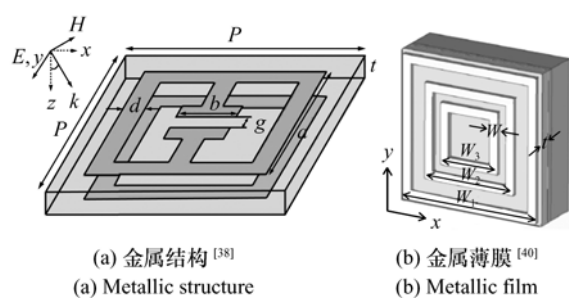


图6 吸收体不同的底层设计方法

Fig. 6 Absorbers with different designs of bottom layer

3.3 结构对称性

超材料结构的对称性对其电磁响应起着重要的作用^[74],不同的结构对称性可以实现超材料的各向异性、旋光性、不对称透射性以及电磁波偏

振态的控制等。

当电磁波的偏振态改变时,琼斯矩阵可以更好地描述超材料的电磁响应特性,超材料的透射响应和反射响应可以分别用透射矩阵和反射矩阵来表示。目前的 THz 时域光谱系统利用线栅偏振片可以较容易地获得超材料以线偏振为基的琼斯矩阵,因此,实验中一般进行线偏振 THz 波的测量。通过坐标变换,可以将以线偏振为基的琼斯矩阵转化成以圆偏振为基的琼斯矩阵。琼斯矩阵可用于分析超材料的偏振转换(非对角矩阵元)、本征偏振态、旋光性和圆二向色性(圆偏振琼斯矩阵的对角矩阵元之间的关系)、不对称透射(非对角矩阵元之间的关系)等电磁响应,还可以用于分析电磁波的偏振态。超材料的线偏振琼斯矩阵会随着电磁波入射偏振与超材料的相对取向发生变化,并且新的琼斯矩阵与原矩阵之间存在对应的关系。因此,利用对称变换,可以分析琼斯矩阵元之间的相互关系,从而进一步分析超材料的对称性对其电磁响应的影响^[74]。例如,对于正入射的电磁波,平面手性超材料在基底效应可以忽略的情况下是三维非手性的,线偏振琼斯矩阵的非对角元相等,不具有旋光性和圆二向色性,但是可以观察到圆偏振 THz 波的不对称透射^[75]。图 7 给出了圆偏振电磁波不对称透射的示意图,以右旋圆偏振(RCP)波为例,对于不同方向入射的 RCP 波,其直接透射分量相同,而偏振转换分量(耦合出的左旋圆偏振波)不同,导致了总透射率的不同,从而实现了圆偏振波的不对称透射。同时,平面超材料不能实现正入射线偏振电磁波的不对称透射,必须通过三维手性超材料来实现。由双层金属结构组成的手性超材料,当两层金属结构具有 180° 旋转对称性且不存在 90° 旋转对称性时,可以只实现线偏振电磁波的不对称透射,而不存在圆偏振电磁波的不对称透射,并且线偏振电磁波的不对称透射强度与入射偏振方向相关^[71]。虽然正入射情况下,平面超材料不存在旋光性和圆二向色性,但是,双各向异性的平面非手性超材料在斜入射的情况下具有旋光性和圆二向色性,这与斜入射引起的电磁耦合相关,被称为外部手性^[76],也就是说入射波矢和平面非手性超材料组成的等效结构具有三维手性。因此,在分析

超材料对称性时,入射波矢方向也应考虑在内。

各向异性超材料和手性超材料都可以改变电磁波的偏振态,当入射电磁波为线偏振时,就会耦合出垂直入射偏振方向的电磁波分量(琼斯矩阵的非对角元),即偏振转换效应。一般情况下,各向异性引起的偏振转换分量是与入射偏振方向相关的,而各向同性(90° 旋转对称性)的三维手性超材料引起的偏振转换是与入射偏振方向无关的,同时,本征偏振态为圆偏振^[72]。另外,各向异性超材料还可以通过改变入射偏振与超材料的相对取向调制透射电磁波的振幅和相位。超材料对电磁波偏振态的调制是实现 THz 波片的一种可行方法^[16,49]。

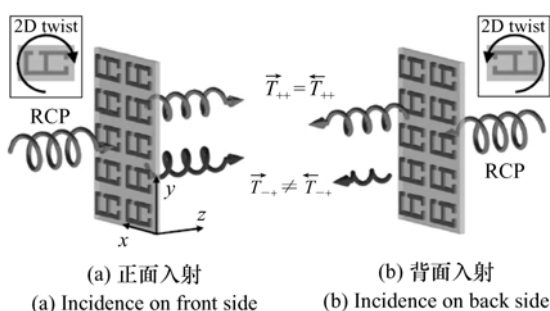


图 7 平面手性超材料中圆偏振波的不对称透射^[75]

Fig. 7 Asymmetric transmission of a circularly polarized wave in a planar chiral metamaterials

4 组成材料

4.1 基本组成与传感器

超材料一般由制作在电介质或者半导体基底上的亚波长金属结构组成。金属的电导率会对超材料的共振强度产生影响,导电性越好(同时对应着较大的介电常数实部与虚部的比值),共振越强;另外,金属厚度在一定范围内的增加也会使共振加强,并且不同的金属,厚度依赖关系不同^[10]。

基底材料可以是刚性的,也可以是柔性的;为了获得较强的透射响应,基底的吸收越小越好。基底的存在会导致共振红移,基底的介电常数越大,超材料共振频率越低^[8]。当基底的厚度远远小于波长时,基底厚度也会对超材料的共振频率

产生影响,厚度增大引起共振红移。此时,可把基底和空气看作等效基底,厚度增大使等效基底的介电常数增大,从而导致共振红移。由于超材料的共振响应与周围介质的介电常数密切相关,将待测物质覆盖在超材料上,利用共振红移可以作为物质微量探测的传感器,可用于生物和化学分子的高灵敏探测,也可用于各向异性物质取向的探测^[77]。这种方法不仅可以分辨不同类型的物质^[12],还可以分辨样品的厚度和混合样品的混合比例^[78]。结构设计、基底选择和探测设置的优化可以提高超材料的探测灵敏度。可通过结构设计实现高品质因子共振和强局域场分布,从而有利于探测介电常数的微小变化和减小样品用量^[52]。由于基底和被测物质都会引起超材料的共振红移,因此减小基底的相对贡献,如采用低介电常数^[13]和厚度较小^[9]的基底,可以提高探测灵敏度。当被测物质局部覆盖超材料时,采用近场激发、远场探测的方法可以提高探测灵敏度,并可以分辨出不同的样品尺寸^[14],这种探测方法可以有效减小被测物质的用量。对超材料进行功能化处理后,可以将探测分子连接到超材料上,如图 8 所示,不同浓度的链亲和素琼脂糖(SA)连接在功能化的 SRRs 上,可以进行生物分子的特异性识别^[15]。

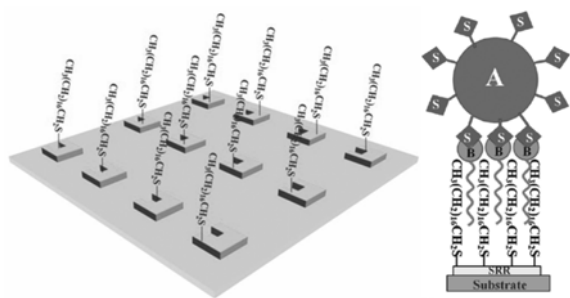


图 8 功能化超材料及其在特定生物分子识别中应用的示意图

Fig. 8 Functionalized metamaterials for specific bio-sensing

4.2 组成材料的选择与可调超材料

介电性质在外加激励下可调的材料,如半导体、超导材料、热敏材料、相变材料、铁电材料等,与金属共同组成亚波长结构,或者作为金属结构的基底,可以实现可调超材料。有些材料甚至可

以代替金属制作成非金属超材料^[79]。

半导体可通过光、电和温度激励来控制载流子的浓度,从而改变其介电性质,在制作可调超材料中得到了广泛的应用。其中,研究最多的是光激励。光激励产生光生载流子,光生载流子的浓度可通过激励光的功率^[17]或者激励光与入射 THz 波的相对延迟时间^[80]来控制。光敏半导体作为基底,可以通过光激励控制超材料的共振强度,实现 THz 波透射的动态调制,可用作超快光开关。光生载流子同时导致了非共振频域 THz 波透射的减小,因此,对共振频域的 THz 透射起了双重作用^[80],基底反射的增强使透射减小,而共振强度的减弱使透射增加。一般情况下,随着激励光能量密度的增加,超材料的共振强度逐渐减小直至共振消失。但是,最近有研究发现,当入射光的能量密度足够大时,出现了新的共振模式,可能是由光诱导瞬态光栅的一阶衍射引起的^[19]。另一方面,由于半导体基底上覆盖着金属结构,光激励产生的自由载流子会存在瞬态的空间分布。这样,平面手性结构和光生载流子就形成了等效的三维手性结构,可以产生较强的旋光性^[21],即光诱导旋光性。随着光生载流子的扩散,光诱导旋光性会逐渐消失。半导体还可以作为结构的一部分,与金属共同组成超材料,不加激励光时,半导体在结构中基本不起作用;加入激励光会使半导体结构(基底一般选用不受激励光影响的材料)逐渐金属化,从而导致超材料的等效结构改变,实现了超材料电磁性质灵活多样的调制,如光激励可以导致共振频率的红移和蓝移甚至是多种半导体材料在不同激光激励下的多模式光调制^[63]、类 EIT 的强度调制^[21]、三维结构的手性开关^[59]等。图 9 以三维手性开关为例说明了半导体通过光激励对有效结构的改变^[59]。在金属结构中引入半导体硅来改变单个结构的对称性,加激励光之前(黑线),半导体硅对超材料电磁响应特性的影响可以忽略,圆二向色性在一定频率范围内(图中的阴影区域)为正,激励光的加入在硅中激发出大量的光生载流子,使其具有金属的性质,改变了单元结构中不同组成部分对圆二向色性贡献的相对大小,从而导致圆二向色性和旋光性的反转。半导体既然可以作为结构的一部分,

也可以代替金属制作成半导体超材料,通过光激励实现其电磁响应的调制。

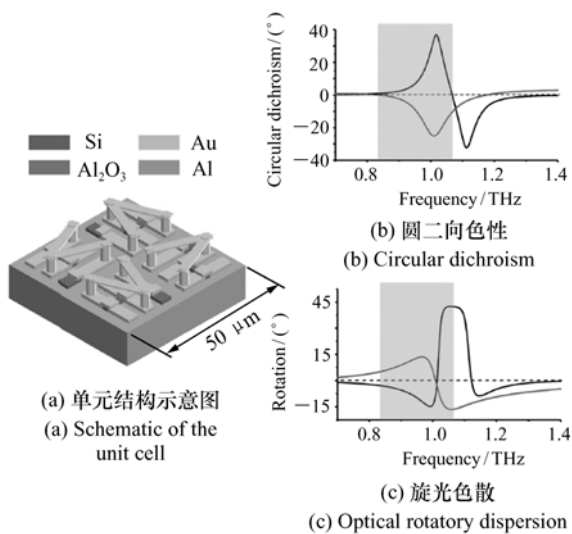


图 9 光诱导手性开关^[59]

Fig. 9 Photoinduced handedness switching

电激励一般是在金属结构和基底之间加入一层掺杂半导体薄膜,并将金属结构单元用金属线相连,这样就形成了一个等效的肖特基二极管,如图 10 所示^[23]。没有外加偏压时,导电基底将结构的开口短路,共振很弱;外加偏压会消耗掺杂半导体中的自由载流子,从而使超材料的共振加强。将这种电激励超材料做成独立控制的阵列结构,可以实现空间调制器^[24]。另外,有些半导体在 THz 波段具有类似金属的性质,介电常数(实部为负)可以用德鲁德模型(Drude model)来描述,这种半导体代替金属可以实现半导体超材料^[49]。半导体的本征载流子浓度随温度减小而降低,从而使其金属性变弱,可以观察到半导体超材料中温度降低导致的共振减弱和红移。利用半导体介电常数的温度相关性,与金属共同组成超材料还可以实现超材料共振频率的宽带调制^[81]。另外,外加静磁场会导致半导体与磁场强度相关的介电常数的各向异性,进而改变半导体超材料的共振频率和强度。目前,对于半导体超材料的温度和磁场调制,相关报道都是关于理论分析和数值模拟的,还没有实验测量的报道。

超导材料代替金属,可以在 THz 波段实现超导超材料^[82]。在转变温度附近,随着温度的增

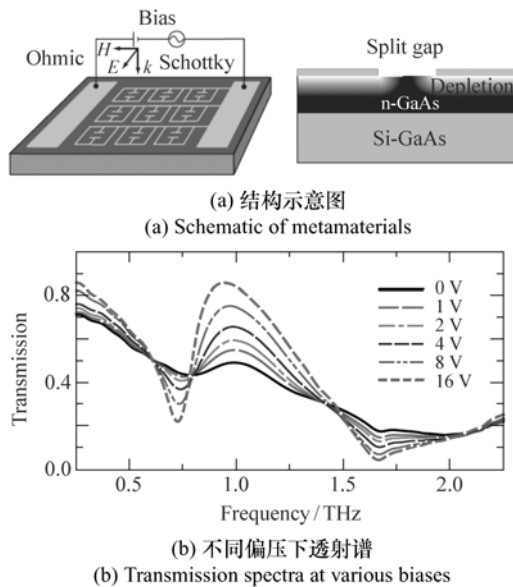


图 10 电激励超材料^[23]

Fig. 10 Metamaterials with electric excitation

加,超导材料由超导态转变为正常态。在转变温度以下,外加静磁场也会破坏超导态,使超导材料逐渐转变为正常态,因此,温度和静磁场都能调制超导材料的介电性质,从而控制超导超材料的电磁共振响应,实现温控或磁控开关。另一方面,超导材料的超导态是频率相关的,存在一个特征频率,高于特征频率时,超导态被破坏,因此,超导超材料的实现是有频域限制的^[25]。

相变材料的引入是实现可调超材料的一种重要方法。二氧化钒(VO_2)是一种重要的绝缘体-金属相变(IMT)材料^[79],可以通过温度、电、光等方法来激发相变。 VO_2 薄膜可以与支撑材料共同组成基底,在太赫兹波段也可以代替金属实现可调非金属超材料。 VO_2 具有高度的滞回效应,也就是说在升温 and 降温的过程中,相同温度下的介电性质不同,因此具有存储效应^[27]。利用这种存储效应, VO_2 作为基底的一部分,在电激励下实现了空间调制。在外加偏压下,产生的电流对 VO_2 进行局部加热使其发生相变,滞回效应在一定程度上保持了 VO_2 介电性质的改变,因此,导致了超材料的共振减弱和红移。在此基础上,电接触位置的合理选取可以实现电流的梯度分布,从而使 VO_2 的相变发生空间分布,实现对 THz 波的空间调制。如图 11 所示^[27],当电接触位于超材料的

一侧时,远离接触点的位置电激励效应逐渐减弱,共振加强并且蓝移。最近发现 THz 强场也可以激发 VO_2 的相变,因此在金属结构和基底之间加入 VO_2 薄膜,不需要外部激励的情况下,也可以实现 THz 电磁强场的调制。同时由于超材料的局域场加强,适当的选择入射 THz 的电场强度,可以实现 VO_2 的局域相变,从而改变超材料的偏振相关电磁响应特性,例如由各向同性转变为各向异性^[26]。

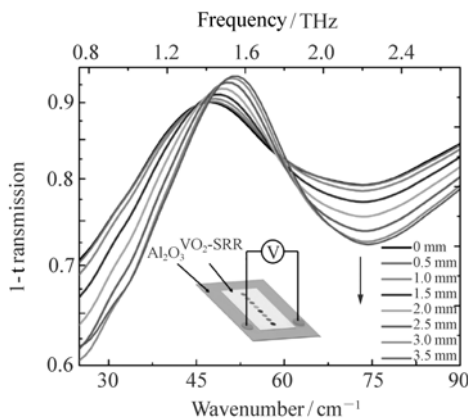


图 11 超材料的空间调制^[27]

Fig. 11 Metamaterials for spatial gradient control

外加直流电场和温度都能调制铁电材料的介电性质^[79]。与半导体、超导材料和 IMT 材料性质不同,铁电材料主要表现为电介电性质随外部激励的改变,可以产生共振频率较强的调制。以钛酸锶(STO)为例,STO 的介电常数很大,STO 实现的非金属超材料的共振响应是基于位移电流的等效磁响应^[29];STO 有很强的介电常数调制度,介电损耗却很小,因此以 STO 晶体为基底的超材料,在温度降低时,共振频率明显红移,共振强度几乎不变^[30]。

5 结束语

微加工技术和 THz 技术的发展,促进了对

THz 波段超材料电磁特性的实验研究,这些研究面的应用。超材料既可以调制 THz 波的振幅、相位和偏振态,也可以实现不同传输方向 THz 波的不对称透射,为 THz 波的传输控制提供了一种有效途径。虽然超材料的电磁响应一般是窄带的,但优化结构设计可以扩展响应带宽,外部激励可以调制电磁响应的频率范围,从而扩展超材料的应用范围。最近发展的利用 MEMS 技术制作的三维超材料还实现了对材料结构的动态控制,可以调制超材料的对称性及结构之间的耦合;如果将其与外部激励下性质可调的材料相结合,实现材料和结构的双重调制,有望进一步增加基于超材料的 THz 器件的功能。

超材料在 THz 波段的发展也面临着巨大的机遇和挑战。对于竖立在基底上的三维超材料,目前只有磁共振和手性结构旋光性的报道,尚无在电场与磁场共振同时存在时,特别是电场和磁场激发不同共振模式的情况下,超材料电磁响应的相关报道。高质量超材料的快速简单制作,特别是三维超材料的实现,需要加工工艺的进一步提高。结构对称性对超材料电磁性质的实现起着重要的作用,琼斯矩阵在一定程度上描述了超材料的响应特性,并可以进行旋光性、不对称透射等性质的预测。对琼斯矩阵与结构对称性之间关系的深入了解有利于指导超材料的结构设计而获得特定的电磁响应。介电性质随外加激励变化的材料在实现可调超材料中起着重要作用,新材料的发现可以增加可调超材料设计的灵活性。超材料的近场响应一般通过数值模拟获得,THz 近场探测的进一步发展有利于加深对电磁响应特性的理解,目前超材料的近场应用还处于初级阶段。

总之,THz 超材料未来的发展离不开加工工艺的提高、结构设计的优化、新材料的探索、对超材料电磁响应的深入了解以及新的电磁特异响应的研究。

参考文献:

- [1] CAI W S, SHALAEV V M. *Optical Metamaterials: Fundamentals and Applications* [M]. New York: Springer-Verlag, 2010.
- [2] LEE Y S. *Principles of Terahertz Science and Technology* [M]. New York: Springer-Verlag, 2009.
- [3] 叶全意, 杨春. 光子学太赫兹源研究进展 [J]. 中国光学, 2012, 5(1): 1-11.

- YE Q Y, YANG CH. Recent progress in THz sources based on photonics methods[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(1): 1-11. (in Chinese)
- [4] 张会, 张卫宇, 徐旺, 等. THz 波段光子晶体带隙影响因素研究[J]. *发光学报*, 2012, 33(8): 883-887.
ZHANG H, ZHANG W Y, XU W, *et al.*. Study on the influencing factors of photonic crystal's band gaps in THz waveband [J]. *Chinese J. Luminescence*, 2012, 33(8): 883-887. (in Chinese)
- [5] 罗志伟, 古新安, 朱韦臻, 等. 掺碲硒化镓晶体在太赫兹波段的光学特性[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(2): 354-359.
LUO ZH W, GU X A, ZHU W CH, *et al.*. Optical properties of GaSe: S crystals in terahertz frequency range[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2): 354-359. (in Chinese)
- [6] PENDRY J B, HOLDEN A J, STEWART W J, *et al.*. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, 76(25): 4773-4776.
- [7] PENDRY J B, HOLDEN A J, ROBBINS D J, *et al.*. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena[J]. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 1999, 47(11): 2075-2084.
- [8] XIA X X, SUN Y M, YANG H F, *et al.*. The influences of substrate and metal properties on the magnetic response of metamaterials at terahertz region[J]. *J. Appl. Phys.*, 2008, 104(3): 033505.
- [9] CHIAM S Y, SINGH R, ZHANG W L, *et al.*. Controlling metamaterial resonances via dielectric and aspect ratio effects [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 97(19): 191906.
- [10] SINGH R, AZAD A K, O'HARA J F, *et al.*. Effect of metal permittivity on resonant properties of terahertz metamaterials [J]. *Opt. Lett.*, 2008, 33(13): 1506-1508.
- [11] SINGH R, SMIRNOVA E, TAYLOR A J, *et al.*. Optically thin terahertz metamaterials[J]. *Opt. Express*, 2008, 16(9): 6537-6543.
- [12] SUN Y M, XIA X X, FENG H, *et al.*. Modulated terahertz responses of split ring resonators by nanometer thick liquid layers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 92(22): 221101.
- [13] TAO H, STRIKWERDA A C, LIU M K, *et al.*. Performance enhancement of terahertz metamaterials on ultrathin substrates for sensing applications[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 97(26): 261909.
- [14] WITHAYACHUMNANKUL W, LIN H, SERITA K, *et al.*. Sub-diffraction thin-film sensing with planar terahertz metamaterials[J]. *Opt. Express*, 2012, 20(3): 3345-3352.
- [15] WU X J, QUAN B G, PAN X C, *et al.*. Alkanethiol-functionalized terahertz metamaterial as label-free, highly-sensitive and specific biosensor[J]. *Biosens. Bioelectron.*, 2013, 42: 626-631.
- [16] PERALTA X G, SMIRNOVA E I, AZAD A K, *et al.*. Metamaterials for THz polarimetric devices[J]. *Opt. Express*, 2009, 17(2): 773-783.
- [17] PADILLA W J, TAYLOR A J, HIGHSTRETE C, *et al.*. Dynamical electric and magnetic metamaterial response at terahertz frequencies[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, 96(10): 107401.
- [18] GU J Q, SINGH R, AZAD A K, *et al.*. An active hybrid plasmonic metamaterial[J]. *Opt. Mater. Express*, 2012, 2(1): 31-37.
- [19] CHATZAKIS I, LUO L, WANG J, *et al.*. Reversible modulation and ultrafast dynamics of terahertz resonances in strongly photoexcited metamaterials[J]. *Phys. Rev. B*, 2012, 86(12): 125110.
- [20] SHEN X P, CUI T J. Photoexcited broadband redshift switch and strength modulation of terahertz metamaterial absorber [J]. *J. Opt.*, 2012, 14(11): 114012.
- [21] KANDA N, KONISHI K, KUWATA-GONOKAMI M. Dynamics of photo-induced terahertz optical activity in metal chiral gratings[J]. *Opt. Lett.*, 2012, 37(17): 3510-3512.
- [22] GU J Q, SINGH R, LIU X J, *et al.*. Active control of electromagnetically induced transparency analogue in terahertz metamaterials[J]. *Nat. Commun.*, 2012, 3: 1151.
- [23] CHEN H T, PADILLA W J, ZIDE J M O, *et al.*. Active terahertz metamaterial devices[J]. *Nature*, 2006, 444(7119): 597-600.
- [24] CHAN W L, CHEN H T, TAYLOR A J, *et al.*. A spatial light modulator for terahertz beams[J]. *Appl. Phys. Lett.*,

- 2009,94(21):213511.
- [25] WU J B, JIN B B, XUE Y H, *et al.*. Tuning of superconducting niobium nitride terahertz metamaterials[J]. *Opt. Express*, 2011, 19(13):12021-12026.
- [26] LIU M, HWANG H Y, TAO H, *et al.*. Terahertz-field-induced insulator-to-metal transition in vanadium dioxide metamaterial[J]. *Nature*, 2012, 487(7407):345-348.
- [27] GOLDFLAM M D, DRISCOLL T, CHAPLER B, *et al.*. Reconfigurable gradient index using VO₂ memory metamaterials[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, 99(4):044103.
- [28] TAO H, STRIKWERDA A, FAN K, *et al.*. Reconfigurable Terahertz metamaterials[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, 103(14):147401.
- [29] NEMEC H, KU? EL P, KADLEC F, *et al.*. Tunable terahertz metamaterials with negative permeability[J]. *Phys. Rev. B*, 2009, 79(24):241108.
- [30] SINGH R, AZAD A K, JIA Q X, *et al.*. Thermal tunability in terahertz metamaterials fabricated on strontium titanate single-crystal substrates[J]. *Opt. Lett.*, 2011, 36(7):1230-1232.
- [31] YUAN Y, BINGHAM C, TYLER T, *et al.*. Dual-band planar electric metamaterial in the terahertz regime[J]. *Opt. Express*, 2008, 16(13):9746-9752.
- [32] ZHANG Y X, QIAO S, HUANG W, *et al.*. Asymmetric single-particle triple-resonant metamaterial in terahertz band[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, 99(7):073111.
- [33] MA Y, CHEN Q, KHALID A, *et al.*. Terahertz dual-band resonator on silicon[J]. *Opt. Lett.*, 2010, 35(4):469-471.
- [34] HUSSAIN S, MIN WOO J, JANG J-H. Dual-band terahertz metamaterials based on nested split ring resonators[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 101(9):091103.
- [35] CHOWDHURY D R, SINGH R, REITEN M, *et al.*. A broadband planar terahertz metamaterial with nested structure[J]. *Opt. Express*, 2011, 19(17):15817-15823.
- [36] HUANG L, CHOWDHURY D R, RAMANI S, *et al.*. Experimental demonstration of terahertz metamaterial absorbers with a broad and flat high absorption band[J]. *Opt. Lett.*, 2012, 37(2):154-156.
- [37] HAN N R, CHEN Z C, LIM C S, *et al.*. Broadband multi-layer terahertz metamaterials fabrication and characterization on flexible substrates[J]. *Opt. Express*, 2011, 19(8):6990-6998.
- [38] HU C, LI X, FENG Q, *et al.*. Introducing dipole-like resonance into magnetic resonance to realize simultaneous drop in transmission and reflection at terahertz frequency[J]. *J. Appl. Phys.*, 2010, 108(5):053103.
- [39] GRANT J, MA Y, SAHA S, *et al.*. Polarization insensitive, broadband terahertz metamaterial absorber[J]. *Opt. Lett.*, 2011, 36(17):3476-3478.
- [40] SHEN X, YANG Y, ZANG Y, *et al.*. Triple-band terahertz metamaterial absorber: Design, experiment, and physical interpretation[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 101(15):154102.
- [41] SINGH R, ROCKSTUHL C, LEDERER F, *et al.*. Coupling between a dark and a bright eigenmode in a terahertz metamaterial[J]. *Phys. Rev. B*, 2009, 79(8):085111.
- [42] CHIAM S-Y, SINGH R, ROCKSTUHL C, *et al.*. Analogue of electromagnetically induced transparency in a terahertz metamaterial[J]. *Phys. Rev. B*, 2009, 80(15):153103.
- [43] LIU X J, GU J Q, SINGH R, *et al.*. Electromagnetically induced transparency in terahertz plasmonic metamaterials via dual excitation pathways of the dark mode[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 100(13):131101.
- [44] LI Z Y, MA Y F, HUANG R, *et al.*. Manipulating the plasmon-induced transparency in terahertz metamaterials[J]. *Opt. Express*, 2011, 19(9):8912-8919.
- [45] ZHU W M, LIU A Q, BOUROUINA T, *et al.*. Microelectromechanical Maltese-cross metamaterial with tunable terahertz anisotropy[J]. *Nat. Commun.*, 2012, 3:1274.
- [46] LIU A Q, ZHU W M, TSAI D P, *et al.*. Micromachined tunable metamaterials; a review[J]. *J. Opt.*, 2012, 14(11):114009.
- [47] FU Y H, LIU A Q, ZHU W M, *et al.*. A micromachined reconfigurable metamaterial via reconfiguration of asymmetric

- split-ring resonators[J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2011, 21(18):3589-3594.
- [48] 方安乐,戴小玉,凌晓辉,等. 太赫兹超常材料及应用[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(5):051601.
FANG A L, DAI X Y, LING X H, *et al.*. Metamaterials at terahertz and their applications[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(5):051601. (in Chinese)
- [49] 丁佩,梁二军. 太赫兹波段电磁超介质的应用及研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(7):071602.
DING P, LIANG E J. Research progress of metamaterials for terahertz applications[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(7):071602. (in Chinese)
- [50] 何明霞,李净延,刘冠林. 太赫兹可控功能器件的研究进展[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(7):567-576.
HE M X, LI J Y, LIU G L. Progress of terahertz active control functional devices[J]. *J. Electronic Measurement and Instrument*, 2012, 26(7):567-576. (in Chinese)
- [51] TAO H, PADILLA W J, ZHANG X, *et al.*. Recent progress in electromagnetic metamaterial devices for Terahertz applications[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant*, 2011, 17(1):92-101.
- [52] WITHAYACHUMNANKUL W, ABBOTT D. Metamaterials in the Terahertz regime[J]. *IEEE Photonics J.*, 2009, 1(2):99-118.
- [53] CHIAM S-Y, SINGH R, GU J, *et al.*. Increased frequency shifts in high aspect ratio terahertz split ring resonators[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, 94(6):064102.
- [54] WALTHER M, ORTNER A, MEIER H, *et al.*. Terahertz metamaterials fabricated by inkjet printing[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, 95(25):251107.
- [55] KIM H, MELINGER J S, KHACHATRIAN A, *et al.*. Fabrication of terahertz metamaterials by laser printing[J]. *Opt. Lett.*, 2010, 35(23):4039-4041.
- [56] MIYAMARU F, KUBODA S, TAIMA K, *et al.*. Three-dimensional bulk metamaterials operating in the terahertz range [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 96(8):081105.
- [57] ZAICHUN C, RAHMANI M, YANDONG G, *et al.*. Realization of variable three-dimensional Terahertz metamaterial tubes for passive resonance tunability[J]. *Adv. Mater.*, 2012, 24(23):OP143-OP147.
- [58] FAN K B, STRIKWERDA A C, TAO H, *et al.*. Stand-up magnetic metamaterials at terahertz frequencies[J]. *Opt. Express*, 2011, 19(13):12619-12627.
- [59] ZHANG S, ZHOU J F, PARK Y S, *et al.*. Photoinduced handedness switching in terahertz chiral metamolecules [J]. *Nat. Commun.*, 2012, 3:942.
- [60] ARISMAR CERQUEIRA S. Recent progress and novel applications of photonic crystal fibers[J]. *Rep. Prog. Phys.*, 2010, 73(2):024401.
- [61] TUNIZ A, POPE B, WANG A, *et al.*. Spatial dispersion in three-dimensional drawn magnetic metamaterials[J]. *Opt. Express*, 2012, 20(11):11924-11935.
- [62] OZBEY B, AKTAS O. Continuously tunable terahertz metamaterial employing magnetically actuated cantilevers[J]. *Opt. Express*, 2011, 19(7):5741-5752.
- [63] KAFESAKI M, SHEN N H, TZORTZAKIS S, *et al.*. Optically switchable and tunable terahertz metamaterials through photoconductivity[J]. *J. Opt.*, 2012, 14(11):114008.
- [64] PADILLA W, ARONSSON M, HIGHSTRETE C, *et al.*. Electrically resonant terahertz metamaterials: theoretical and experimental investigations[J]. *Phys. Rev. B*, 2007, 75(4):041102.
- [65] YEN T J. Terahertz magnetic response from artificial materials[J]. *Science*, 2004, 303(5663):1494-1496.
- [66] MARQUES R, MEDINA F, RAFII-EL-IDRISSI R. Role of bianisotropy in negative permeability and left-handed metamaterials[J]. *Phys. Rev. B*, 2002, 65(14):144440.
- [67] XU X L, QUAN B G, GU C Z, *et al.*. Bianisotropic response of microfabricated metamaterials in the terahertz region[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2006, 23(6):1174-1180.
- [68] DRISCOLL T, ANDREEV G O, BASOV D N, *et al.*. Quantitative investigation of a terahertz artificial magnetic resonance using oblique angle spectroscopy[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 90(9):092508.

- [69] ZHU Y H, VEGESNA S, KURYATKOV V, *et al.*. Terahertz bandpass filters using double-stacked metamaterial layers [J]. *Opt. Lett.*, 2012, 37(3):296-298.
- [70] REITEN M T, ROY CHOWDHURY D, ZHOU J, *et al.*. Resonance tuning behavior in closely spaced inhomogeneous bilayer metamaterials [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, 98(13):131105.
- [71] HUANG C, FENG Y J, ZHAO J M, *et al.*. Asymmetric electromagnetic wave transmission of linear polarization via polarization conversion through chiral metamaterial structures [J]. *Phys. Rev. B*, 2012, 85(19):195131.
- [72] KENANAKIS G, ZHAO R, STAVRINIDIS A, *et al.*. Flexible chiral metamaterials in the terahertz regime: a comparative study of various designs [J]. *Opt. Mater. Express*, 2012, 2(12):1702-1712.
- [73] ZHAO Y, BELKIN M A, AL A. Twisted optical metamaterials for planarized ultrathin broadband circular polarizers [J]. *Nat. Commun.*, 2012, 3:870.
- [74] MENZEL C, ROCKSTUHL C, LEDERER F. Advanced Jones calculus for the classification of periodic metamaterials [J]. *Phys. Rev. A*, 2010, 82(5):053811.
- [75] SINGH R, PLUM E, MENZEL C, *et al.*. Terahertz metamaterial with asymmetric transmission [J]. *Phys. Rev. B*, 2009, 80(15):153104.
- [76] SINGH R, PLUM E, ZHANG W L, *et al.*. Highly tunable optical activity in planar achiral terahertz metamaterials [J]. *Opt. Express*, 2010, 18(13):13425-13430.
- [77] WOO J H, CHOI E, KANG B, *et al.*. Anisotropic change in THz resonance of planar metamaterials by liquid crystal and carbon nanotube [J]. *Opt. Express*, 2012, 20(14):15440-15451.
- [78] REINHARD B, SCHMITT K M, WOLLRAB V, *et al.*. Metamaterial near-field sensor for deep-subwavelength thickness measurements and sensitive refractometry in the terahertz frequency range [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 100(22):221101.
- [79] VENDIK O G, ODI M A, KHOLODNYAK D V, *et al.*. Tunable metamaterials for controlling THz radiation [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2012, 2(5):538-549.
- [80] ZHOU Q L, SHI Y L, WANG A H, *et al.*. Ultrafast optical modulation of terahertz metamaterials [J]. *J. Opt.*, 2011, 13(12):125102.
- [81] LI W, KUANG D F, FAN F, *et al.*. Subwavelength B-shaped metallic hole array terahertz filter with InSb bar as thermally tunable structure [J]. *Appl. Optics*, 2012, 51(29):7098-7102.
- [82] ZHELUDEV N I, KIVSHAR Y S. From metamaterials to metadevices [J]. *Nat. Mater.*, 2012, 11(11):917-924.

作者简介:



潘学聪(1983—),女,河北肃宁人,博士研究生,2006年于河北大学获得学士学位,主要从事超材料在太赫兹波段电磁响应的研究。E-mail: panxuecong06@mails.gucas.ac.cn



徐新龙(1976—),男,江苏南通人,博士,教授,博士生导师,2000年、2003年于首都师范大学分别获得学士、硕士学位,2006年于中国科学院物理研究所获得博士学位,主要从事超材料,纳米材料的光电性质以及太赫兹光电技术等方面的研究。E-mail: xlxuphy@nwu.edu.cn



姚泽瀚(1990—),男,广州汕头人,硕士研究生,2012年于广东工业大学获得学士学位,主要从事超材料的设计、制备及应用等方面的研究。E-mail: bluenceyezi@gmail.com



汪力(1956—),男,安徽芜湖人,博士,研究员,博士生导师,1982年于安徽师范大学获得学士学位,1989年于中国科学院物理研究所获得博士学位,主要从事激光物理、太赫兹波与物质相互作用等方面的研究。E-mail: wangli@aphy.iphy.ac.cn