

太赫兹波段电磁超介质的应用及研究进展

丁佩¹ 梁二军²

(¹ 郑州航空工业管理学院数理系, 河南 郑州 450015
² 郑州大学物理工程学院材料物理教育部重点实验室, 河南 郑州 450052)

摘要 太赫兹波和电磁超介质是电磁学领域关注的热点。太赫兹波与电磁超介质相互作用可以实现对太赫兹波的操纵和调控,有望填补“太赫兹空白”。介绍了太赫兹波段电磁超介质的研究进展,包括电磁超介质电磁性能可调谐的实施途径,电磁超介质在太赫兹功能器件方面的应用(调制器/开关、传感器/探测器、滤波器、偏振元件和吸波器),太赫兹波段表面等离子体电磁超介质,非金属太赫兹电磁超介质的实现以及太赫兹电磁超介质的制备。对电磁超介质可能形成的太赫兹器件及其物理机制进行了充分的阐述,并基于研究现状提出一些今后的研究方向和发展前景。

关键词 电磁超介质;太赫兹;太赫兹器件;表面等离子体

中图分类号 O451 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.071602

Research Progress of Metamaterials for Terahertz Applications

Ding Pei¹ Liang Erjun²

(¹ Department of Mathematics and Physics, Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou, Henan 450015, China
² Key Laboratory of Materials Physics, Ministry of Education, School of Physical Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450052, China)

Abstract Both terahertz (THz) electromagnetic wave and metamaterials are hot topics in electromagnetics research. Metamaterials operating in the THz range have achieved great successes in filling in the so-called “THz gap” due to its ability to control and manipulate electromagnetic waves. A comprehensive introduction to the progress of metamaterials at THz frequencies is given including the tuning strategies of electromagnetic response in metamaterials, metamaterials-based THz functional devices such as modulators/switches, sensors/detectors, filters, polarimetric components, and absorbers etc., THz plasmonic metamaterials, nonmetallic structure to implement THz metamaterials as well as the advancements in fabricating THz metamaterials. It presents not only the metamaterials for THz applications but also their underlying mechanisms. Possible future directions in this field are also proposed.

Key words metamaterials; terahertz; THz functional devices; surface plasmon

OCIS codes 160.3918; 040.2235; 240.6680

1 引言

电磁超介质是具有天然媒质所不具备的超常物理性质的人工复合结构或复合媒质的统称,有效介电系数和有效磁导率同时为负的左手材料是其中最重要的一类电磁超介质^[1]。电磁超介质通常由尺寸在亚波长的结构单元周期排列组成,其电磁性能高度依赖单元的几何结构,因此人们可以通过对电磁超介质结构单元的“设计”,人工获得与自然媒质不同的具有超常物理性质的“新媒质”,在负折射、完美透镜、隐身等方面具有诱人的应用前景。通过优化结构和缩小尺寸,电磁超介质的工作频段已经从无线电、微波扩展到太赫兹、红外和可见光频段^[2]。电磁超介质的出现为经典电磁理论开辟了崭新的研究空间,为人们有效操控电磁波

收稿日期: 2010-09-06; **收到修改稿日期**: 2011-03-14; **网络出版日期**: 2011-05-20

基金项目: 国家自然科学基金(10974183)和航空科学基金(2008ZF55006,2009ZF55006)资助课题。

作者简介: 丁佩(1976—),女,博士,副教授,主要从事电磁超介质和等离子体等方面的研究。

E-mail: dingpei@zzia.edu.cn

提供了新的契机,是物理学和材料学领域共同关注的研究热点之一。

太赫兹波通常指频率在 0.1~10 THz(或波长在 0.03~3 mm)的电磁波。太赫兹波段处于微波毫米波与红外线光学之间,是电子学与光子学之间的过渡区。由于太赫兹在电磁波谱的特殊位置,科学研究和技术应用上的空白点很多,因此太赫兹波段也被称为“太赫兹空白”。太赫兹波具有优越的性能,在物理、化学和生命科学等基础研究学科以及医学成像、安全检查、产品检测、空间通信和武器制导等应用学科都具有重要的研究价值和应用前景,受到世界各国的关注^[3]。然而常规材料难于在太赫兹波段发生电磁响应,特别是磁响应,人们在研制太赫兹器件,实现对太赫兹波的探测和操纵时面临很多限制。长期以来,对太赫兹波产生、探测及调控的材料和器件研究一直是太赫兹科学和技术研究领域的重点。

电磁超介质的出现弥补了太赫兹波段电磁材料缺乏的缺憾。近几年,太赫兹波段电磁超介质的研究取得了重要的理论和实验成果,基于电磁超介质的性能优良的太赫兹开关、调制器、移相器、传感器、探测器、滤波器和吸波器等陆续出现,显示电磁超介质在太赫兹科学和技术发展中的巨大应用潜力。本文将对近年来太赫兹波段电磁超介质的最新研究现状,包括基于电磁超介质的太赫兹功能器件及实施途径、太赫兹波段等离子体电磁超介质、非金属材料实现太赫兹电磁超介质和太赫兹电磁超介质的制备等方面进行综述,并对未来的发展方向进行展望。

2 基于电磁超介质的太赫兹功能器件

电磁超介质通常由能发生电磁谐振的金属结构单元组成,金属开口谐振环(SRRs)经常作为“磁原子”来构筑电磁超介质。SRRs 中金属环和开口分别充当电感和电容,在外电场或外磁场的作用下激发 LC 共振,表现出很强的反磁性^[4]。现有的太赫兹电磁超介质功能器件往往利用基于 SRRs 变形的“电谐振器”结构,这类谐振器通常包含若干个环路,由于结构对称性,各个环路激发的 LC 振荡方向相反,磁响应相互抵消,仅对外电场有响应^[5]。

当电磁超介质的共振被激发时,其有效介电系数或磁导率发生强烈色散,使调控太赫兹波振幅、强度、相位和偏振等成为可能。目前,电磁超介质在太赫兹波段的应用研究主要集中在图 1 所示的几种功能器件方面。已有文献对基于电磁超介质的太赫兹调制器/开关和传感器/探测器进行较为详细的综述^[6],本文只对这方面的最新研究成果简要概括,重点放在太赫兹电磁超介质应用和研究的其他方面。

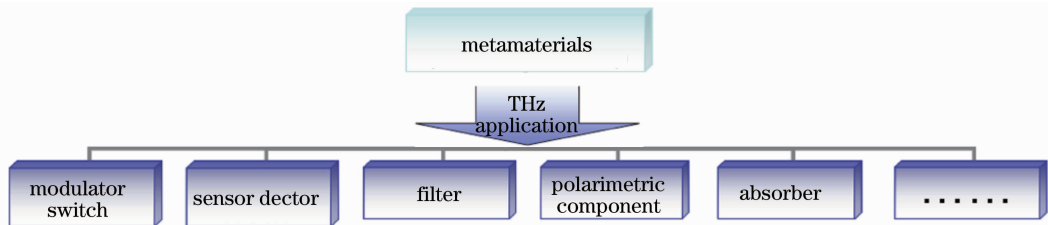


图 1 基于电磁超介质的太赫兹功能器件

Fig. 1 Metamaterials-based THz functional devices

2.1 调制器/开关

金属电磁超介质结构单元的形状和尺寸一旦固定,其电磁谐振就不再改变。控制太赫兹辐射的振幅、频率或相位的调制器或开关需要电磁超介质的电磁响应能够主动调控,这可以通过将 SRRs 谐振器制备在掺杂的半导体基底上或者直接将半导体材料引入电磁超介质结构,结合偏压^[7~12]或光^[13~19]激励来实现。机理是利用外场调控半导体的载流子浓度,改变传导率,影响 LC 等效回路电容,从而调节 SRR 电磁谐振,控制 THz 波传输。其中 H. T. Chen 等^[7~10,14,15]在基于电磁超介质的太赫兹调制器和开关方面做出了创新性的工作。他们报道的全固态太赫兹调相器在偏压由 0 增大 16 V 时,透射波强度变化 80%,相移变化 0.56 rad^[10];光控的频率捷变太赫兹电磁超介质对共振频率位置的调节幅度可以达到 20%^[15]。基于 H. T. Chen^[7]首次报道的太赫兹调制器,W. L. Chan 等^[11]进一步制备出包括 4 pixel×4 pixel 阵列的空间太赫兹调制器,每一个像素包括一个制备在半导体基底上的电谐振器阵列,并由独立的偏压进行控制,对透射 THz 波振幅的调制幅度达到 40%。最近,N. H. Shen 等^[19]在基于 SRRs 的电谐振器结构的外侧开口处插入光敏

半导体硅,如图 2 所示,实现了光激发下共振频率的蓝移(0.76~0.96 THz),频移幅度达到 26%。与 H. T. Chen 等^[15]的开关或调制器不同,这种结构实现频率调制利用光电导诱使的共振模式转换效应。

改变环境温度是调控电磁超介质电磁响应的另一条途径。H. Tao 等^[20]利用表面微加工技术,在平面开口谐振环阵列结构中引入双材料悬臂(SiN_x 和金),利用两种材料不同的热膨胀性能,用温度控制悬臂弯曲程度,改变 SRRs 所在平面与入射波方向的夹角,使透射波强度发生显著变化。此外,利用某些材料介电性质随温度显著变化的特性也可实现电磁性能温度可控的电磁超介质,例如 VO₂ 在热激励下能够由绝缘体转变为金属,用 VO₂ 构造的电磁超介质可以实现共振强度和频率的温度调制^[21,22]。

除了上面提到的光、电和温度等调控途径,外加磁场也可以实现对电磁超介质谐振强度和频率的调制,并在微波段获得实验证实^[23]。从应用角度考虑,电、光调控便于操作,更具有优势,尤其是电场调控,因此也最受重视。

2.2 传感器/探测器

一些化学材料或生物大分子的振动和旋转频率位于太赫兹波段,用太赫兹传感器或探测器可实现对物质的微量检测,比如对爆炸物、DNA 分子等的识别。基于电磁超介质的太赫兹传感器的工作原理通常是利用待测物引起电磁超介质周围空间介电性能变化,使 SRRs 电容改变,导致共振频率偏移。当 SRRs 的 LC 共振被激发时,开口区域往往伴随电磁场的显著增强,探测分子位于开口区域时,共振频移效果更明显。相比于单开口的 SRRs 激发 LC 共振探测微量物质^[24],双开口的不对称 SRRs 可以激发诱捕模,频率响应曲线具有陡峭的侧边,有望实现对化学和生物分子的高灵敏度探测^[25]。进一步优化太赫兹电磁超介质传感器的性能需要考虑以下因素:开口谐振环的结构、基底、分析物的成分和沉积情况、共振效应以及 THz 检测系统等^[26]。同样基于待测物引起的共振频移,具有孔阵列特征的电磁超介质结构不但具有滤波功能,可以实现光学异常透射效应,还可以作为太赫兹传感器使用^[27]。

此外,考虑到实际应用过程中,对物质的识别需要电磁超介质和探测物的多个特征频率相匹配,因此在太赫兹波段具有多个共振的电磁超介质受到人们的重视^[28~32]。理论和实验研究证实多共振电磁超介质可为太赫兹波段化学、生物及危险品检测提供一种新的方法^[31]。

2.3 滤波器

金属网栅和分布不同形状亚波长孔阵列的金属薄层都可作为太赫兹波段的带通滤波器^[33]。为了追求太赫兹波段的宽带传输,J. Han 等^[34]提出一种金属层分布有周期性正方形环状槽的“金属-电介质-金属”电磁超介质结构,如图 3(a)所示。结构的对称性使电磁波全角度入射都能实现滤波,传输通带的宽度和频率

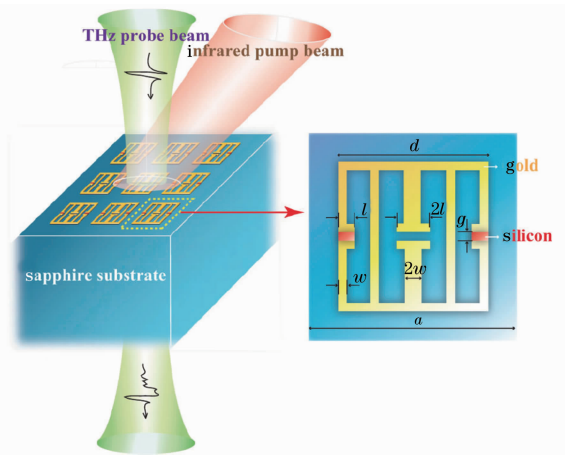


图 2 基于电磁超介质的宽带蓝移光开关示意图^[19]
Fig. 2 Schematic of the optically implemented broadband blueshift switch based on metamaterials^[19]

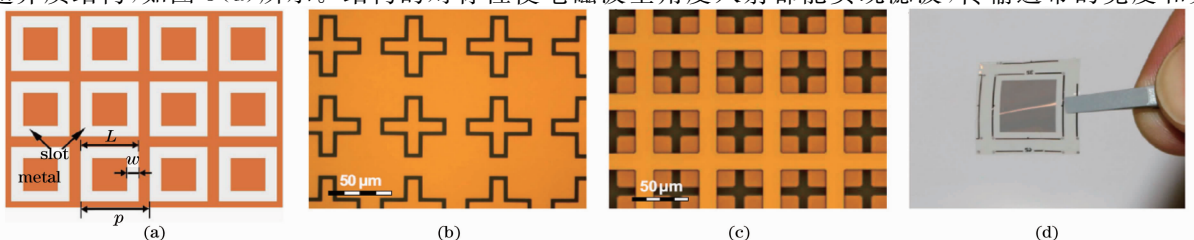


图 3 基于电磁超介质的太赫兹滤波器^[34,35]。(a)正方形环状槽“三明治”结构,(b)十字槽结构,(c)线-板结构,(d)电磁超介质薄膜

Fig. 3 Schematic of the THz bandpass filters based on metamaterials^[34,35]. (a) sandwich metal-dielectric-metal structure with square-loop-shaped slots, (b) cross-slot structure, (c) wire-and-plate structure, (d) metamaterial membrane

位置可以通过优化结构参数和电介质层的介电系数进行调节,模拟结果表明通带的宽度可以达到 0.5 THz。最近,O. Paul 等^[35]设计并制造了两种基于电磁超介质的太赫兹滤波器,分别为十字槽和线-板结构,如图 3(b),(c)所示。这种滤波器的制备采用多层技术,将金属结构埋入双苯环丁稀 (BCB) 薄膜中,实现了大面积、无支撑的柔性电磁超介质膜,如图 3(d)所示。结构的对称性降低了电磁性能对入射波偏振态的依赖。通过激发低损的“诱捕模”,传输通带的透射率超过 80%,而阻带的透射则受到明显抑制。

2.4 偏振元件

对太赫兹辐射操纵、控制和探测能力的提高不仅体现在对振幅、频率、相位进行调控,偏振控制也是一个重要的方面。许多生物大分子在太赫兹波段具有强吸收和谐振,并表现出强烈的二向色性,控制和探测分子的手性在生物医学研究领域也是十分重要的。然而目前,太赫兹波段的偏振调制或探测器件还十分有限,除了金属线栅偏振器,还没有改变太赫兹波偏振的商业器件。

手性电磁超介质不但可以实现负折射,也具有旋光性。手性电磁超介质的旋光性源自结构手性引起的圆双折射,其中的周期性手性结构单元可看作是宏观手性“分子”。可见光波段的研究已经证实,手性的二维金属光栅结构中,光与表面等离子体激元 (SPs) 在不同界面(空气与金属以及衬底与金属)之间的耦合不对称可以导致很强的电场矢量扭转,对旋光现象有明显的增强作用^[36]。在太赫兹波段,单层手性光栅结构难以引起明显的偏振效果,N. Kanda 等^[37]利用具有互补卍形(或卍形)手性图案的双层金属结构实现太赫兹波偏振旋转器,金属层的厚度仅为 100 nm,在 0.4 THz 和 1.2 THz,偏振方位角旋转 1.2° ,偏振面的旋转主要来自互补的金属结构之间电磁耦合的贡献。进一步,N. Kanda 等^[38]又将 100 nm 厚的单层金制卍(或卍)形结构制备在半导体(高电阻率 Si)薄膜上,实现对旋光性能的光调控,如图 4 所示,出射波相对入射波偏振旋转的幅度随着光抽运功率的增大而增大。手性电磁超介质还可以实现电磁波的不对称传输,比如用缺乏镜面对称的耦合 SRRs 阵列来构造对偏振和入射方向敏感的太赫兹波分束器^[39]。除了手性电磁超介质,R. Singh 等^[40]利用太赫兹时域光谱技术证实自身结构非手性的不对称双开口谐振环在电磁波倾斜入射时,也具有旋光和二向色性。这种效应来自电磁超介质平面相对入射波传播方向引起的外在手性。

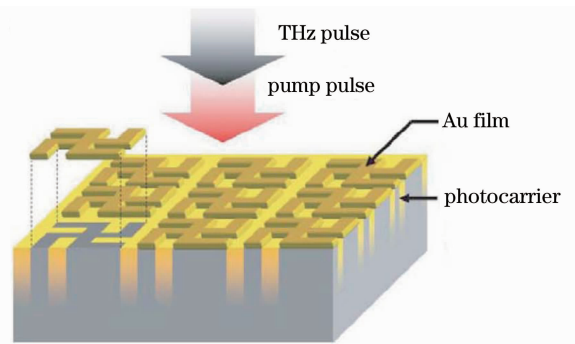


图 4 基于手性电磁超介质的光控太赫兹偏振旋转器示意图^[38]

Fig. 4 Schematic presentation of the chiral metamaterials with light-induced terahertz optical activity^[38]

典型的手性结构单元通常表现出四重对称,具有内在螺旋的性质。然而结构非螺旋,电磁性能依赖入射波偏振方向的平面非等方型电磁超介质也可以作为偏振器件使用。这类电磁超介质对偏振方向相互垂直的两列入射波具有不同的透射性能,表现出“双折射”。与石英晶体和向列型液晶相比,用电磁超介质可以实现结构紧凑(亚毫米)的平面太赫兹偏振器。例如,A. C. Strikwerda 等^[41]在聚酰亚胺基底上分别制备 SRR 电共振器和弯曲线形电磁超介质结构,如图 5(a),(b)所示。获得厚度仅为 $70 \mu\text{m}$ 和 $20 \mu\text{m}$ 的 $\lambda/4$ 波片,前者

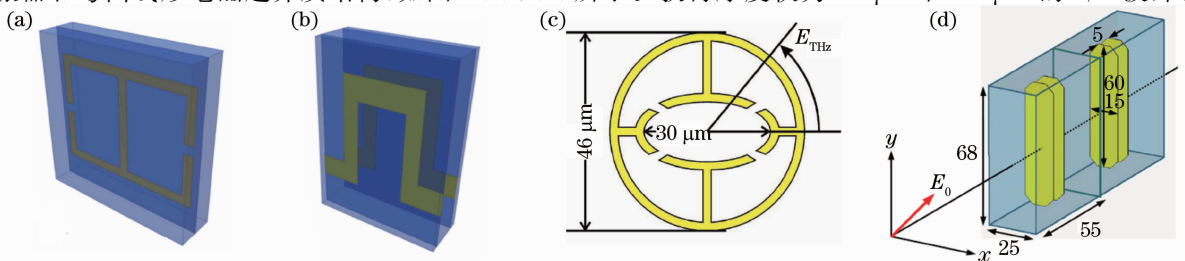


图 5 可用作波片的电磁超介质结构单元示意图。(a)开口谐振环^[41],(b)弯曲线形^[41],(c)椭圆形开口谐振环^[42],(d)断续线对(或双金属片型)金属结构^[43]

Fig. 5 Schematic of the unit cell of metamaterials for THz wave plates. (a) electric split-ring resonator^[41], (b) meanderline structure^[41], (c) elliptical split ring resonators^[42], (d) cut-wire pairs structure^[43]

在 626~660 GHz 的频率范围圆极化率超过 99%，后者在 615~743 GHz 圆极化率达到 99%。X. G. Peralta 等^[42]探测了基于开口谐振环变形结构的等方型和非等方型平面电磁超介质在不同偏振太赫兹波激发下的电磁响应，并利用模拟和解析模型提出了切实可行的、基于椭圆形开口谐振环的太赫兹波片和分束器设计，结构单元如图 5(c)所示。与前面采用电响应的电磁超介质不同，最近，P. Weis 等^[43]利用负折射率电磁超介质，即制备在 BCB 板上的“断续线对”铜制金属周期结构，如图 5(d)所示，设计并制作出高透射率的 $\lambda/4$ 和 $\lambda/2$ 波片，透射波强度分别超过 74%和 58%。“断续线对”金属结构对电场偏振方向互相垂直的线偏光具有符号相反(负和正)的折射率，表现出显著的“双折射”效应。采用类似的机制，不对称双十字架电磁超介质也是一种构造负折射率波片的可行结构^[44]。

2.5 吸波器

由于太赫兹波段缺乏具有强吸收的常规材料，用电磁超介质构筑太赫兹吸波器受到人们的关注。通过优化电磁超介质的结构，减小反射率，实现与空间的阻抗匹配，可能获得具有接近 100%吸收率的完美吸波器。2008 年，N. I. Landy 等^[45]首次证实工作在微波段的电磁超介质吸波器，它包含 SRRs 电共振器、金属线和两者间的电介质层，在 11.5 GHz 吸收率达到 88%。理论研究指出，强吸收主要源自 SRRs 共振器的 LC 共振；隔离层的作用是调节电磁超介质的阻抗，使入射电磁波尽可能地进入器件内部；金属线结构的作用是增加反射，利于两金属结构层之间电磁波的捕获和吸收，因此也可以用金属层代替^[46]。随后的吸波器设计，旨在追求更高的吸收率，对入射偏振或入射角度不敏感以及宽频带吸波等。

2008 年，H. Tao 等^[47]利用表面微加工技术在半绝缘 GaAs 基片上制备“双开口 SRRs-介质层-金属线”结构，如图 6(a)所示，电磁超介质层的厚度为 6 μm ，在共振频率 1.3 THz 处对入射波的吸收率达到 70%，对应吸收系数 2000 cm^{-1} 。接下来，H. Tao^[48]在柔性的聚酰亚胺基底上制备厚度为 16 μm 的“SRRs 电共振器-介质层-金属层”结构，如图 6(b)所示，在 1.6 THz 实现 97%的吸收率，并且对不同倾角入射的 TE 波和 TM 波都有良好的吸收能力。为了追求不依赖入射波偏振的全方位太赫兹波吸收器，N. I. Landy 等^[49]改进设计，提出四开口的 SRRs 和金属十字架等方形结构，如图 6(c)所示，实验证实在 1.145 THz，吸收率达到 77%。最近，D. Yu. Shchegolkov 等^[50]提出了结构更简单，更容易制备的“渔网型”太赫兹完美吸波器，由“金属层-电介质层-金属层”构成，其中一个金属层分布有矩形孔或十字形孔阵列，如图 6(d)所示，可以对某一极化方向或所有极化方向的太赫兹波完美吸收。此外，利用双共振的 SRRs 电谐振器，Q. Wen 等^[51]和 H. Tao 等^[52]分别实现了具有两个吸波带的太赫兹吸波器。具有多个吸收带的吸波器在光谱检测和相位成像等方面具有巨大的应用潜力。

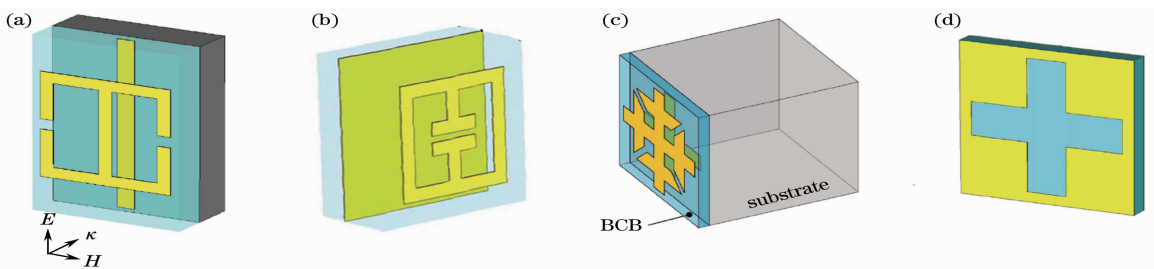


图 6 基于电磁超介质的太赫兹吸波器结构单元示意图。(a)“双开口 SRRs-介质层-金属线”结构^[47]，(b)“SRRs-介质层-金属层”结构^[48]，(c)“四开口 SRRs-介质层-金属十字架”结构^[49]，(d)“金属层-电介质层-金属层”结构^[50]

Fig. 6 Schematics of the unit cell of metamaterials for THz absorbers. (a) “SRRs-dielectric spacer-cut wire” structure^[47], (b) “SRRs-dielectric spacer-metallic layer” structure^[48], (c) “SRRs-dielectric spacer-metallic cross” structure^[49], (d) “metallic layer-dielectric spacer-metallic layer” structure^[50]

3 太赫兹等离子体电磁超介质

金属在太赫兹波段的性能接近理想导体，单一的金属表面无法激发表面等离子体激元，但是结构化的理想金属表面(例如分布有孔或沟槽的金属表面)支持“人造表面等离子体激元”^[53]。实际上，分布孔阵列的带通滤波器、线栅偏振器以及用金属线作为太赫兹波导等都和金属-绝缘体界面的太赫兹表面等离子体激元现

象有关。理论和实验表明,激光照射浅金属格栅状结构表面可以产生太赫兹辐射,太赫兹脉冲的产生源于格栅结构表面等离子体激元的激发以及光电子在表面等离子体激元消逝场中的有质动力加速,太赫兹波辐射强度可以和无机晶体 ZnTe 媲美^[54,55]。平面电磁超介质可以看作是具有二维亚波长周期图案的金属结构表面,通过对金属图案的设计,能够激发表面等离子体极化激元(SPPs)或表现出局域化的表面等离子体激元共振(LSPRs),作为太赫兹波段的等离子体器件,在太赫兹辐射产生^[56,57]、表面波导^[53,58,59]、传感^[60,61]、天线^[62,63]和透镜^[64]等方面获得应用。实验或模拟已经证实开口谐振环阵列结构^[58,59]以及开口谐振环阵列的反结构^[65]支持太赫兹表面波或表面等离子体激元。利用“三明治”磁负电磁超介质间隙区域激发的磁等离子体激元,A. Ishikawa 等^[66]提出一种新颖的亚波长太赫兹波导结构,有望实现突破衍射极限的太赫兹波约束和传导。

4 非金属电磁超介质

铜、金、银、铅和铝等都可以用来制备金属电磁超介质,不同金属的介电性能差异影响谐振强度。随着工作频段的增高,金属自身的欧姆损耗会越来越严重,导致电磁超介质结构单元谐振的 Q 值降低,损害其电磁性能。因此,降低电磁超介质的金属损耗是太赫兹、红外、可见光频段电磁超介质进一步应用亟待解决的关键问题。用非金属材料可有效避免欧姆损耗,是构造或实现电磁超介质的新途径。

相比金属,用半导体材料实现太赫兹电磁超介质具有显著优势。半导体在太赫兹波段的性能类似于光波段的金属,一些窄带隙半导体的介电系数具有负的实部和相对较小的虚部,利用半导体结构可以在太赫兹波段实现金属结构在光波段的表面等离子体激元光学性能。此外,半导体的介电性能高度依赖载流子的浓度和迁移率,可以通过外场(光、热、电和磁等)激发或注入载流子来控制半导体的介电性能,实现对电磁超介质电磁特性的灵活调控。比如,J. G. Han 等^[67,68]研究了半导体(InAs 或 InSb)开口谐振环结构的磁共振,模拟证实外磁场和温度对磁共振频率位置和强度的调制;Q. Bai 等^[69]模拟证实包含开口谐振环和断续线结构的半导体电磁超介质不仅具有电磁感应透明效应(EIT),而且可以在较大的频率范围实现透明窗口和慢波效应的温度调谐;理论研究还表明,用半导体 InSb 构筑的二聚物天线通过激发局域表面等离子体激元共振,可以在空隙处实现 $10^2 \sim 10^3$ 的场($|E|^2$)的增强,高于相同尺寸的金制天线,并且半导体天线的功能可以通过光、电以及温度场改变材料介电性质进行调制^[70]。

增益物质与电磁超介质的结合可以实现纳米激光器^[71]。最近,C. Walther 等^[72]用亚波长的 LC 谐振结构实现在 THz 波段的超小微腔激光器,将增益物质引入谐振器的电容区域,起到了补充损失,增强局域电场的效果。因此增益物质与金属、半导体结合构筑电磁超介质有可能实现新颖的太赫兹功能器件。电介质材料构筑电磁超介质主要基于米氏共振理论,电介质颗粒可以在不同频率激发磁共振和电共振模式,使电介质颗粒周期结构表现出宏观的磁化和极化效应。基于电介质电磁超介质的太赫兹隐身衣^[73]和磁负材料^[74,75]已有研究报道。

最近,利用高温超导材料 YBCO($YBa_2Cu_3O_7$)和 Nb,J. Q. Gu 等^[76,77]分别制备出基于 SRRs 结构的 THz 波段超导电磁超介质,证实温度和磁场对超导电磁超介质的共振具有极强的调制能力。在临界温度以下,超导电磁超介质表现出很强的共振。超导电磁超介质不但能够极大降低欧姆损耗,提高 Q 值,并且可以实现共振幅度和频率的外场调控,有望发展新颖的多功能器件^[76~78]。

5 太赫兹电磁超介质的制备

基于电磁超介质的太赫兹功能器件的实现与应用,离不开制备技术的发展。目前的太赫兹电磁超介质主要为制备在刚性基底(石英、硅、砷化镓等)上的平面结构,基于标准的微加工技术,需要洁净室技术和相应的光刻与金属沉积(或蚀刻)等步骤。然而,在太赫兹以及更高频段,结构灵活、可弯曲的电磁超介质在吸波器、偏振器件以及隐身方面的应用更有优势。最近,利用光刻、喷墨印刷以及微电子机械系统(MEMS)加工等技术,研究人员分别在帕利灵、聚酰亚胺和氮化硅薄层等柔韧、可弯曲基底上制备出金属开口谐振环或其变形结构,实现柔性电磁超介质^[79~82]。无基底、可独立支撑,且具有负折射率的金属箔状电磁超介质也已

经成为现实^[83,84]。最近, S. Waselikowski 等^[85] 利用集成电路制造过程中的自动引线接合法制备出具有手性的三维螺旋线圈形太赫兹电磁超介质。随着制备技术的发展, 实现具有各向同性电磁特性的三维太赫兹电磁超介质将是太赫兹电磁超介质制造研究领域追求的目标。

6 总结与展望

太赫兹波和电磁超介质都是电磁学领域关注的热点。电磁超介质为人们获得具有超常电磁性能的“新媒质”提供了一种全新的材料设计理念, 为人们操纵、控制电磁波提供了新的途径, 也为填补“太赫兹空白”提供了新的契机, 在太赫兹调制器、开关、偏振元件、吸波器、传感器、探测器和滤波器等方面表现出巨大的应用潜力。当前, 人们对太赫兹电磁超介质及其器件的研究还处于实验研究或理论探索阶段。虽然采用金属材料便于实现形状或图案各异的周期结构, 但欧姆损耗会影响金属电磁超介质的电磁谐振, 是限制电磁超介质在高频段应用的关键。这需从理论和实验上进一步研究金属电磁超介质特定电磁性能与其构造之间的关联, 优化设计, 降低损耗, 改进器件性能。除了传统的金属电磁超介质, 半导体、增益介质和超导材料等的加入为人们实现低损、电磁性能可调谐太赫兹电磁超介质提供了更大的选择和灵活性, 有可能产生新的效应或现象, 有望成为金属电磁超介质的替代品来构筑新颖的太赫兹功能器件, 是未来太赫兹电磁超介质研究需要重视的方面, 值得深入探索。此外, 鉴于表面等离子体激元的独特光学性能和巨大应用前景, 发展太赫兹波段等离子体电磁超介质将为新型太赫兹等离子体功能器件的实现提供新的材料和设计方法, 也是未来太赫兹电磁超介质发展的一个方向, 有很多工作可以开展, 比如太赫兹波段金属、半导体或具有金属/半导体复合结构的电磁超介质的表面等离子体激元激发、耦合以及相关效应的研究等。总之, 太赫兹波段电磁超介质的的发展离不开研究者对整个电磁超介质(从微波到可见光)研究领域的深入探索。从最初的负折射率、磁负和手性电磁超介质到正逐步发展的非线性、可控、增益、传感以及量子电磁超介质^[86], 电磁超介质在太赫兹波段的应用无疑将为太赫兹技术的发展提供新的机遇和动力。

参 考 文 献

- 1 R. Marqués, F. Martín, M. Sorolla. *Metamaterials with Negative Parameters: Theory, Design and Microwave Applications* [M]. New York: Sohn Wiley & Sons, Inc., 2008. 1~41
- 2 V. Shalaev. Optical negative-index metamaterials [J]. *Nat. Photonics*, 2007, **1**(1): 41~48
- 3 Liu Shenggang. Recent development of terahertz science and technology [J]. *China Basic Science*, 2006, **8**(1): 7~12
刘盛纲. 太赫兹科学技术的新发展 [J]. *中国基础科学*, 2006, **8**(1): 7~12
- 4 J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins *et al.*. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena [J]. *IEEE Trans. Microw. Theory.*, 1999, **47**(11): 2075~2084
- 5 W. J. Padilla, M. T. Aronsson, C. Highstrete *et al.*. Electrically resonant terahertz metamaterials: theoretical and experimental investigations [J]. *Phys. Rev. B*, 2007, **75**(4): 041102(R)
- 6 Fang Anle, Dai Xiaoyu, Ling Xiaohui *et al.*. Metamaterials at terahertz and their applications [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(5): 051601
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
- 7 H. T. Chen, W. J. Padilla, J. M. O. Zide *et al.*. Active terahertz metamaterial devices [J]. *Nature*, 2006, **444**(7119): 597~600
- 8 H. T. Chen, S. Palit, T. Tyler *et al.*. Hybrid metamaterials enable fast electrical modulation of freely propagating terahertz waves [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **93**(9): 091117
- 9 H. T. Chen, H. Lu, A. K. Azad *et al.*. Electronic control of extraordinary terahertz transmission through subwavelength metal hole arrays [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(11): 7641~7648
- 10 H. T. Chen, W. J. Padilla, M. J. Cich *et al.*. A metamaterial solid-state terahertz phase modulator [J]. *Nat. Photonics*, 2009, **3**(3): 148~151
- 11 W. L. Chan, H. T. Chen, A. J. Taylor *et al.*. A spatial light modulator for terahertz beams [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **94**(21): 213511
- 12 O. Paul, C. Imhof, B. Lagel *et al.*. Polarization-independent active metamaterial for high-frequency terahertz modulation [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(2): 819~827

- 13 W. J. Padilla, A. J. Taylor, C. Highstrete *et al.*. Dynamical electric and magnetic metamaterial response at terahertz frequencies [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **96**(10): 107401
- 14 H. T. Chen, W. J. Padilla, J. M. O. Zide *et al.*. Ultrafast optical switching of terahertz metamaterials fabricated on ErAs/GaAs nanoisland superlattices [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(12): 1620~1622
- 15 H. T. Chen, J. F. O'Hara, A. K. Azad *et al.*. Experimental demonstration of frequency-agile terahertz metamaterials [J]. *Nat. Photonics*, 2008, **2**(5): 295~298
- 16 N. H. Shen, M. Kafesaki, T. Koschny *et al.*. Broadband blueshift tunable metamaterials and dual-band switches [J]. *Phys. Rev. B*, 2009, **79**(16): 161102(R)
- 17 J. M. Manceau, N. H. Shen, M. Kafesaki *et al.*. Dynamic response of metamaterials in the terahertz regime; blueshift tunability and broadband phase modulation [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **96**(2): 021111
- 18 A. K. Azad, H. T. Chen, S. R. Kassarla *et al.*. Ultrafast optical control of terahertz surface plasmons in subwavelength hole arrays at room temperature [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **95**(1): 011105
- 19 N. H. Shen, M. Massaoiti, M. Gokkavas *et al.*. Optically implemented broadband blueshift switch in the terahertz regime [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2011, **106**(3): 037403
- 20 H. Tao, A. Strikwerda, K. Fan *et al.*. Reconfigurable terahertz metamaterials [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, **103**(14): 147401
- 21 Q. Y. Wen, H. W. Zhang, Q. H. Yang *et al.*. Terahertz metamaterials with VO₂ cut-wires for thermal tunability [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **97**(2): 021111
- 22 T. Driscoll, S. Palit, M. M. Qazilbash *et al.*. Dynamic tuning of an infrared hybrid-metamaterial resonance using vanadium dioxide [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **93**(2): 024101
- 23 F. Zhang, Q. Zhao, L. Kang *et al.*. Magnetic control of negative permeability metamaterials based on liquid crystals [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(19): 193104
- 24 T. Driscoll, G. O. Andreev, D. N. Basov *et al.*. Tuned permeability in terahertz split-ring resonators for devices and sensors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**(6): 062511
- 25 C. Debus, P. H. Bolivar. Frequency selective surfaces for high sensitivity terahertz sensing [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**(18): 184102
- 26 J. F. O'Hara, R. Singh, I. Brener *et al.*. Thin-film sensing with planar terahertz metamaterials: sensitivity and limitations [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(3): 1786~1795
- 27 F. Miyamaru, S. Hayashi, C. Otani *et al.*. Terahertz surface-wave resonant sensor with a metal hole array [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(8): 1118~1120
- 28 Y. Yuan, C. Bingham, T. Tyler *et al.*. A dual-resonant terahertz metamaterial based on single-particle electric-field-coupled resonators [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **93**(19): 191110
- 29 Y. Yuan, C. Bingham, T. Tyler *et al.*. Dual-band planar electric metamaterial in the terahertz regime [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(13): 9746~9752
- 30 M. Li, Z. C. Wen, J. X. Fu *et al.*. Composite metamaterials with dual-band magnetic resonances in the terahertz frequency regime [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2009, **42**(11): 115420
- 31 C. M. Bingham, H. Tao, X. L. Liu *et al.*. Planar wallpaper group metamaterials for novel terahertz applications [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(23): 18565~18575
- 32 Y. Ma, Q. Chen, A. Khalid *et al.*. Terahertz dual-band resonator on silicon [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(4): 469~471
- 33 J. W. Lee, M. A. Seo, D. J. Park *et al.*. Shape resonance omni-directional terahertz filters with near-unity transmittance [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(3): 1253~1259
- 34 J. Han, J. Gu, X. Lu *et al.*. Broadband resonant terahertz transmission in a composite metal-dielectric structure [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(19): 16527~16534
- 35 O. Paul, R. Beigang, M. Rahm. Highly selective terahertz bandpass filters based on trapped mode excitation [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(21): 18590~18595
- 36 K. Konishi, T. Sugimoto, B. Bai *et al.*. Effect of surface plasmon resonance on the optical activity of chiral metal nanogratings [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(15): 9575~9583
- 37 N. Kanda, K. Konishi, M. Kuwata-Gonokami. Terahertz wave polarization rotation with double layered metal grating of complimentary chiral patterns [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(18): 11117~11125
- 38 N. Kanda, K. Konishi, M. Kuwata-Gonokami. Light-induced terahertz optical activity [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(19): 3000~3002

- 39 R. Singh, E. Plum, C. Menzel *et al.*. Terahertz metamaterial with asymmetric transmission [J]. *Phys. Rev. B*, 2009, **80**(15): 153104
- 40 R. Singh, E. Plum, W. Zhang *et al.*. Highly tunable optical activity in planar achiral terahertz metamaterials [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(13): 13425~13430
- 41 A. C. Strikwerda, K. Fan, H. Tao *et al.*. Comparison of birefringent electric split-ring resonator and meanderline structures as quarter-wave plates at terahertz frequencies [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(1): 136~149
- 42 X. G. Peralta, E. I. Smirnova, A. K. Azad *et al.*. Metamaterials for THz polarimetric devices [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(2): 773~783
- 43 P. Weis, O. Paul, C. Imhof *et al.*. Strongly birefringent metamaterials as negative index terahertz wave plates [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **95**(17): 171104
- 44 C. Imhof, R. Zengerle. Strong birefringence in left-handed metallic metamaterials [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **280**(1): 213~216
- 45 N. I. Landy, S. Sajuyigbe, J. J. Mock *et al.*. Perfect metamaterial absorber [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, **100**(20): 207402
- 46 Q. Y. Wen, Y. S. Xie, H. W. Zhang *et al.*. Transmission line model and fields analysis of metamaterial absorber in the terahertz band [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(22): 20256~20265
- 47 H. Tao, N. I. Landy, C. M. Bingham *et al.*. A metamaterial absorber for the terahertz regime: design, fabrication and characterization [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(10): 7181~7188
- 48 H. Tao, C. M. Bingham, A. C. Strikwerda *et al.*. Highly flexible wide angle of incidence terahertz metamaterial absorber: design, fabrication, and characterization [J]. *Phys. Rev. B*, 2008, **78**(24): 241103(R)
- 49 N. I. Landy, C. M. Bingham, T. Tyler *et al.*. Design, theory, and measurement of a polarization-insensitive absorber for terahertz imaging [J]. *Phys. Rev. B*, 2009, **79**(12): 125104
- 50 D. Y. Shchegolkov, A. K. Azad, J. F. O'Hara *et al.*. Perfect subwavelength fishnetlike metamaterial-based film terahertz absorbers [J]. *Phys. Rev. B*, 2010, **82**: 205117
- 51 Q. Y. Wen, H. W. Zhang, Y. S. Xie *et al.*. Dual band terahertz metamaterial absorber: design, fabrication, and characterization [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **95**(24): 241111
- 52 H. Tao, C. M. Bingham, D. Pilon *et al.*. A dual band terahertz metamaterial absorber [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2010, **43**(22): 225102
- 53 J. B. Pendry, L. Martin-Moreno, F. J. Garcia-Vidal. Mimicking surface plasmons with structured surfaces [J]. *Science*, 2004, **305**(5685): 847~848
- 54 G. Welsh, N. Hunt, K. Wynne. Terahertz-pulse emission through laser excitation of surface plasmons in a metal grating [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, **98**(2): 026803
- 55 G. Welsh, K. Wynne. Generation of ultrafast terahertz radiation pulses on metallic nanostructured surfaces [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(4): 2470~2480
- 56 Y. Gao, M. Chen, C. Yang *et al.*. Analysis of terahertz generation via nanostructure enhanced plasmonic excitations [J]. *J. Appl. Phys.*, 2009, **106**(7): 074302
- 57 A. A. Zharov, R. E. Noskov, M. V. Tsarev. Plasmon-induced terahertz radiation generation due to symmetry breaking in a nonlinear metallic nanodimer [J]. *J. Appl. Phys.*, 2009, **106**(7): 073104
- 58 B. Reinhard, O. Paul, R. Beigang *et al.*. Experimental and numerical studies of terahertz surface waves on a thin metamaterial film [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(9): 1320~1322
- 59 G. Acuna, S. F. Heucke, F. Kuchler *et al.*. Surface plasmons in terahertz metamaterials [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(23): 18745~18751
- 60 C. R. Williams, S. R. Andrews, S. A. Maier *et al.*. Highly confined guiding of terahertz surface plasmon polaritons on structured metal surfaces [J]. *Nat. Photonics*, 2008, **2**(3): 175~179
- 61 X. C. Lu, W. L. Zhang. Terahertz localized plasmonic properties of subwavelength ring and coaxial geometries [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **94**(18): 181106
- 62 R. Singh, C. Rockstuhl, C. Menzel *et al.*. Spiral-type terahertz antennas and the manifestation of the Mushiake principle [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(12): 9971~9980
- 63 F. Miyamaru, Y. Saito, M. Takeda *et al.*. Emission of terahertz radiations from fractal antennas [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **95**: 221111
- 64 J. Lee, K. Lee, H. Park *et al.*. Tunable subwavelength focusing with dispersion-engineered metamaterials in the terahertz

- regime [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(13): 2254~2256
- 65 M. Navarro-Cia, M. Beruete, S. Agrafiotis *et al.*. Broadband spoof plasmons and subwavelength electromagnetic energy confinement on ultrathin metafilms [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(20): 18184~18195
- 66 A. Ishikawa, Z. Shuang, D. A. Genov *et al.*. Deep subwavelength terahertz waveguides using gap magnetic plasmon [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, **102**(4): 043904
- 67 J. G. Han, A. Lakhtakia, C. W. Qiu. Terahertz metamaterials with semiconductor split-ring resonators for magnetostatic tunability [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(19): 14390~14396
- 68 J. G. Han, A. Lakhtakia. Semiconductor split-ring resonators for thermally tunable terahertz metamaterials [J]. *J. Mod. Opt.*, 2009, **56**(4): 554~557
- 69 Q. Bai, C. Liu, J. Chen *et al.*. Tunable slow light in semiconductor metamaterial in a broad terahertz regime [J]. *J. Appl. Phys.*, 2010, **107**(9): 093104
- 70 V. Giannini, A. Berrier, S. A. Maier *et al.*. Scattering efficiency and near field enhancement of active semiconductor plasmonic antennas at terahertz frequencies [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(3): 2797~2807
- 71 N. I. Zheludev, S. L. Prosvirnin, N. Papasimakis *et al.*. Lasing spaser [J]. *Nat. Photonics*, 2008, **2**(6): 351~354
- 72 C. Walther, G. Scalari, M. Amanti *et al.*. Microcavity laser oscillating in a circuit-based resonator [J]. *Science*, 2010, **327**(5972): 1495
- 73 D. P. Gaillot, C. Croenne, D. Lippens. An all-dielectric route for terahertz cloaking [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(6): 3986~3992
- 74 H. Němec, P. Ku el, F. Kadlec *et al.*. Tunable terahertz metamaterials with negative permeability [J]. *Phys. Rev. B*, 2009, **79**(24): 241108
- 75 R. Yahiaoui, H. Němec, P. Ku el *et al.*. Broadband dielectric terahertz metamaterials with negative permeability [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(22): 3541~3543
- 76 J. Q. Gu, R. Singh, Z. Tian *et al.*. Terahertz superconductor metamaterial [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, **97**(7): 071102
- 77 B. B. Jin, C. H. Zhang, S. Engelbrecht *et al.*. Low loss and magnetic field-tunable superconducting terahertz metamaterial [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(16): 17504~17509
- 78 H. T. Chen, H. Yang, R. Singh *et al.*. Tuning the resonance in high-temperature superconducting terahertz metamaterials [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2010, **105**(24): 247402
- 79 X. Liu, S. MacNaughton, D. Shrekenhamer *et al.*. Metamaterials on parylene thin film substrates: design, fabrication, and characterization at terahertz frequency [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **96**(1): 011906
- 80 M. Walther, A. Ortner, H. Meier *et al.*. Terahertz metamaterials fabricated by inkjet printing [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **95**(25): 251107
- 81 H. Tao, A. C. Strikwerda, K. Fan *et al.*. Terahertz metamaterials on free-standing highly-flexible polyimide substrates [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2008, **41**(23): 232004
- 82 X. G. Peralta, M. C. Wanke, C. L. Arrington *et al.*. Large-area metamaterials on thin membranes for multilayer and curved applications at terahertz and higher frequencies [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **94**(16): 161113
- 83 H. O. Moser, L. K. Jian, H. S. Chen *et al.*. All-metal self-supported THz metamaterial-the meta-foil [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(26): 23914~23919
- 84 H. O. Moser, J. A. Kong, L. K. Jian *et al.*. Free-standing THz electromagnetic metamaterials [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(18): 13773~13780
- 85 S. Waselikowski, K. Kratt, V. Badilita *et al.*. Three-dimensional microcoils as terahertz metamaterial with electric and magnetic response [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **97**(26): 261105
- 86 N. Zheludev. The road ahead for metamaterials [J]. *Science*, 2010, **328**(5978): 582~583