

doi: 10.3788/lop47.051601

# 太赫兹超常材料及应用

方安乐 戴小玉 凌晓辉 文双春 范滇元

(湖南大学计算机与通信学院微纳光电器件及应用教育部重点实验室, 湖南 长沙 410082)

**摘要** 超常材料具有人工设计的结构, 并有自然材料所不具备的超常物理性质。超常材料的电磁响应灵活可调, 对太赫兹(THz)技术意义非凡。THz 超常材料的实现和迅速发展为太赫兹技术的发展和應用带来了新的机遇。总结了 THz 波段超常材料的研究进展, 包括 THz 波段超常材料的构造及制备、基于超常材料的 THz 波器件以及超常材料在 THz 波技术中的其他应用。

**关键词** 超常材料; 太赫兹(THz); 负折射; 光子晶体

中图分类号 O451 OCIS 160.3918 040.2235 文献标识码 A

## Metamaterials at Terahertz and Their Applications

Fang Anle Dai Xiaoyu Ling Xiaohui Wen Shuangchun Fan Dianyuan

(Key Laboratory of Micro/Nano Optoelectronic Devices, Ministry of Education, School of Computer and Communication, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

**Abstract** Metamaterials have artificially structured composite and novel electromagnetic properties not available in natural materials. The electromagnetic response of metamaterials can be tuned flexibly, and this is especially important for the terahertz (THz) technology. The realization and development of THz metamaterials provide an opportunity for the development and application of THz technology. The research progresses on the metamaterials at THz are summarized, including design, preparation, functional devices and other applications.

**Key words** metamaterial; terahertz(THz); negative refraction; photonic crystal

### 1 引言

超常材料指的是—些具有人工设计的结构, 并呈现出自然材料所不具备的超常物理性质的复合材料, 主要包括光子晶体、左手材料、超磁性材料等。从本质上讲, 超常材料更是一种新颖的材料设计思想, 这一思想的基础是通过在多种物理结构上的设计来突破某些表现自然规律的限制, 从而获得超常的材料功能。最奇特的超常材料是左手材料, 又称负折射率材料。负折射率超常材料的介电常数和磁导率都为负, 折射率取负值, 电磁波在这种材料中传播时, 其波矢、电场和磁场形成不同于传统右手关系的左手关系。左手材料最初在微波段实现, 得益于纳米制造技术和亚波长成像技术的发展, 最近, 实验上证实可以在红外和光学波段实现负折射。超常材料的应用研究在新型无线通信、光通信、雷达、超分辨率成像、电磁隐身技术等许多领域得到快速发展。

超常材料所展现出的新奇的电磁特性主要源自它的亚波长结构, 而不是材料的本征属性, 人们可以通过改变其微结构的形状、尺寸和排列方式来调控它对电磁波的响应强度和频谱范围。正是由于超常材料

收稿日期: 2009-05-06; 收到修改稿日期: 2009-08-08

作者简介: 方安乐(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事新型光子材料与光通信器件等方面的研究。

E-mail: chichister@163.com

导师简介: 文双春(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事非线性光学和光子学技术等方面的研究。

E-mail: scwen@hnu.cn

具有这种独特性质,为太赫兹(THz)技术的发展和應用提供了新的思路和手段。由于 THz 技术有着潜力巨大的应用前景,近些年来,人们为填补这一“THz 空白”做了大量的努力并取得了一些重要成果,如 THz 辐射的产生和探测、THz 量子级联激光器等。然而相对于 THz 辐射的产生和探测技术的飞速发展,如何操控 THz 波的技术却显得大大落后了,THz 器件的发展进步缓慢,如 THz 滤波、相位控制、开关和调制等。众所周知,自然界中很多材料在 THz 频段都没有电磁响应,长久以来,人们都无法找到一种合适的材料来制造相应的器件用以高效地控制 THz 波的传输。超常材料的实现和迅速发展为 THz 技术的发展和應用带来了新的机遇。本文总结了 THz 波段超常材料的国内外研究进展,包括 THz 波段超常材料的构造及制备、基于超常材料的 THz 波器件以及超常材料在 THz 波技术中的其他应用。

## 2 太赫兹波段超常材料研究进展

自然界中很多材料在 THz 频段都没有电磁响应,而且由于自然界中能显示磁响应和等离子体响应的常规材料远少于能显示电响应的材料,尤其在 THz 和光学频段更是稀少,所以磁共振响应与等离子体响应在 THz 或更高频段的实现将会极大地拓宽负折射率材料的研究领域并将影响 THz 波技术的研究与应用。

微波段超常材料的实现大大地激发了人们的研究热情并激励他们向 THz 波段进军。为寻求实现 THz 波段的电磁响应,2004 年, J. F. Lampin 等<sup>[1]</sup>通过传输线理论的分析 and 仿真,提出一种周期性光子结构,在 300 GHz 附近显示出左手特性。随后, T. J. Yen 等<sup>[2]</sup>提出了一种由非磁性材料构成的人造材料,该材料能在 0.6~1.8 THz 频率范围内实现磁响应。实验所用样品结构如图 1 所示。利用自排列微加工技术将开口环谐振器(SRRs)蚀刻在 400  $\mu\text{m}$  厚的石英基底上, SRRs 是由 3  $\mu\text{m}$  厚的铜组成。经大量模拟和分析可知,在这种结构中能够实现磁共振响应,共振频率在 0.8~1.4 THz 之间,与实验结果基本一致。而且随着 SRRs 的尺寸按比例缩放,共振频率单调平移。相应地,通过调节 SRR 结构单元的参数,可以调整磁响应的带宽。此后 H. O. Moser 等<sup>[3]</sup>根据 Pendry(潘德瑞)的理论制造出了第一块能在 THz 范围内实现电磁响应的超常材料,其基本结构单元是由镍制的短棒和开口环谐振腔组成,该实验采用微刻技术将这种 RSR(Rod-SRR-Rod)结构嵌入到塑料(AZ P4620)基底上,其单元尺寸大小为微米量级,图 2 所示为 2.1 mm $\times$ 2.1 mm 的阵列结构组合,通过远红外传输光谱分析可知,此种结构能在频率为 1~2.7 THz 范围内表现为电磁超常材料。

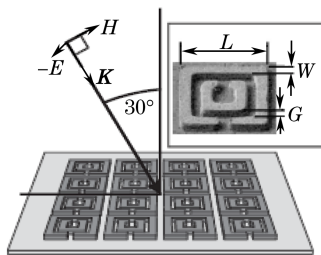


图1 具有 THz 磁响应的双 SRR 结构  
Fig.1 Structure of double SRRs with magnetic response at terahertz frequencies.

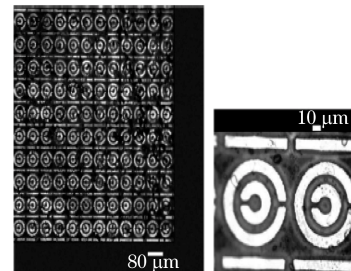


图2 基于镍制 RSR 结构,首次实现 THz 波段电磁响应的超常材料  
Fig.2 The first THz metamaterial based on Ni RSR structure

随着第一块 THz 波段电磁超常材料的实现,紧接着又出现了许多新奇的结构<sup>[4-8]</sup>,它们都是基于亚波长量级微结构的阵列组合,分别能在 THz 波段实现不同程度的电、磁响应,如图 3 所示。其中图 3(a)为传统的金属线与 SRRs 的复合结构<sup>[4]</sup>,其一个周期单元包括一个 SRR 和双层的 3 根金属线图案,其中内环内径为 43  $\mu\text{m}$ ,外径为 67.2  $\mu\text{m}$ 。外环内径为 80.7  $\mu\text{m}$ ,外径为 107.5  $\mu\text{m}$ 。缺口宽度为 7.2  $\mu\text{m}$ ,金属线宽为 26.9  $\mu\text{m}$ ,线间距为 53.7  $\mu\text{m}$ ,其沿 X, Y 方向的周期长度均为 262.7  $\mu\text{m}$ ,采用紫外光刻术将铜制的微结构单元刻在康宁玻璃基底上,这种复合型材料可在 0.1 THz 附近实现左手通带。图 3(b)为一种可在 1.0 THz 和 1.2 THz 附近实现双电谐振的超常材料<sup>[8]</sup>,其微结构单元为两种不同尺寸的对称型 SRR,格子周期  $a=112 \mu\text{m}$ ,  $b=60 \mu\text{m}$ , SRR 的几何参数为  $w_1=16 \mu\text{m}$ ,  $h_1=w_2=h_2=20 \mu\text{m}$ ,  $w=4 \mu\text{m}$ ,  $g=3 \mu\text{m}$ 。仿真材料分别采用不同厚度的钛、铂金和金,基底材料为 GaAs。图 3(c)为 6 对形状互补的微结构单元<sup>[5]</sup>,其外围尺寸都

是  $36\ \mu\text{m}$ ，晶格周期为  $50\ \mu\text{m}$ ，线宽  $4\ \mu\text{m}$ ，缺口宽度  $2\ \mu\text{m}$ ，采用传统的光刻技术以方形阵列的形式将这些微结构单元刻在  $625\ \mu\text{m}$  厚的 GaAs 基底上，样品材料为  $200\ \text{nm}$  厚的金薄膜和  $10\ \text{nm}$  厚的钛薄膜，引入钛层是为了提高界面粘性。实验采用 THz 时域光谱技术分析了这些结构对 THz 波传输的影响，结果表明，6 种原始的结构可在  $0.5\sim 1.0\ \text{THz}$  之间产生共振以限制 THz 波的传输，其透射系数仅为 10%；与之相反，在相同的频段 6 种互补性的结构确可通过共振来增强 THz 波的传输，其透射系数达到 90%。图 3(d) 中的微结构单元为 4 个金制 L 型谐振腔的组合<sup>[6]</sup>，其单元尺寸为纳米量级，这种结构可分别在  $3.7\ \mu\text{m}$  和  $5.25\ \mu\text{m}$  波段观测到负介电常数和负磁导率，其样品的制备亦采用传统的微纳光刻技术。尤其以美国波士顿学院的 W. J. Padilla 领衔的研究小组<sup>[9]</sup>所取得的成果最为显著，提出了一种以 GaAs 为基底的平面 SRRs 阵列结构，其实实验样品类似于图 1 的结构，铜制 SRRs 的厚度为  $3\ \mu\text{m}$ ，基底厚度为  $670\ \mu\text{m}$ ，SRR 的外部尺寸为  $36\ \mu\text{m}$ ，晶胞周期为  $50\ \mu\text{m}$ 。实验中用 THz 时域光谱技术分析了该结构的电磁响应，结果表明，在两种不同的偏振状态下，这种结构都能产生负的电响应。他们还首次提出利用光激发半导体基底中的自由载流子的方法来实现对电响应的动态控制，实验证实当受激载流子的密度达到  $4\times 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$  时，SSRs 的缺口将短路，导致电共振消失，这种结构可被用于实现 THz 开关。该小组随后又提出了一种能在  $500\ \text{GHz}\sim 1\ \text{THz}$  范围内实现电共振的超常材料<sup>[10]</sup>，其结构单元与图 3(c) 类似，它能实现负的电响应，且共振范围可调。相对于传统的 SSRs 结构，这种互补型微结构更加简化，容易构造，可应用于相关器件的开发。

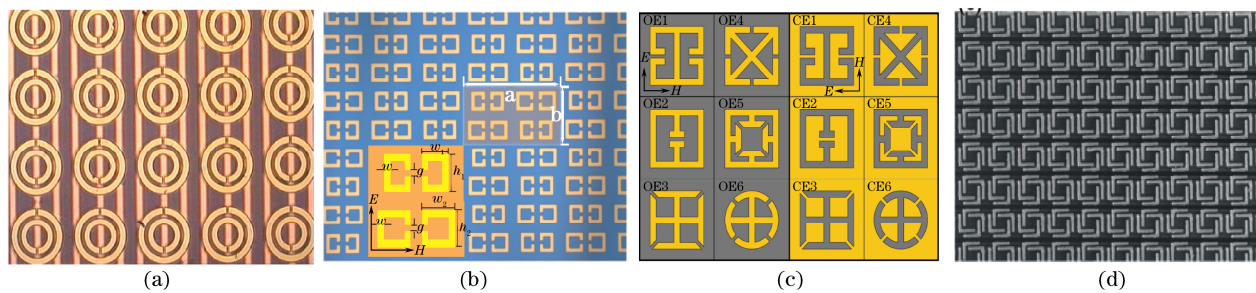


图 3 具有不同微结构的 THz 超常材料。(a)金属线与双 SRRs 结构；(b)二元的对称性 SRR 的复合共振结构；(c)各种具有互补性的微结构；(d) L 型谐振腔结构

Fig.3 Terahertz metamaterials with different microstructures. (a) the composite metamaterial sample; (b) the dual-symmetrical SRR sample; (c) unit cells and their complements; (d) the LSR structure

超常材料的共振特性会导致很强的色散，其响应的带宽非常窄，而且其实现电磁响应的中心频率主要由微结构单元的形状和尺寸决定。所以，用传统方法构造的超常材料往往只能在很窄的带宽内实现电磁响应并且其工作频率是固定的，即不具有可调性。早期对频率可调型超常材料的研究主要集中在微波波段，然而其设计方法仅仅是控制材料中一个或少数微结构单元的共振特性，显然这种方法并不适合 THz 或更高的频段。先前的研究表明，可将金属微结构单元结合某种天然材料(如半导体)构成复合型超常材料，这种复合型超常材料依然具有独特的被动特性(如负的电响应、梯度折射率等)且由微结构的形状和排列方式决定，并且可通过对天然材料响应的外部激励(如光电导性、非线性、增益等)来控制其整体的特性。例如，通过在半导体基底中载流子的注入或损耗来实现对振幅的控制。其本质都是通过控制微结构单元的电容来实现可调的。H. T. Chen 等<sup>[11]</sup>基于这种将光子学和半导体电子学相结合的新颖思想，利用微加工技术将金属微带结构刻在半导体基片上，构造出了频率灵敏的 THz 超常材料。其微结构单元主要为具有内部缺口的方形金属环，并且在缺口处刻蚀出 2 块硅制薄片，这样就可通过对载流子的光激发来控制其电导率，从而改变电容器的有效尺寸以控制其电容的大小。该实验将样品刻在硅-蓝宝石(SOS)晶片上，硅层厚度为  $600\ \text{nm}$ ，本征电导率大于  $100\ \Omega\cdot\text{cm}$ ，蓝宝石衬底的厚度为  $530\ \mu\text{m}$ ，采用印刷电路板技术通过电子束沉积将  $10\ \text{nm}$  厚的钛和  $200\ \text{nm}$  厚的金刻蚀在基底上(图 4)，利用光抽运 THz 探测技术(OPTP)对硅表面进行光激

发, 然后利用 THz 时域光谱技术对其进行表征, 该实验证实可通过外部光控制的方法在 20% 的幅度内调控其中心频率(图 5)。这种复合型超常材料可用于开发新型的 THz 器件, 可实施动态调控的陷波滤波器等。

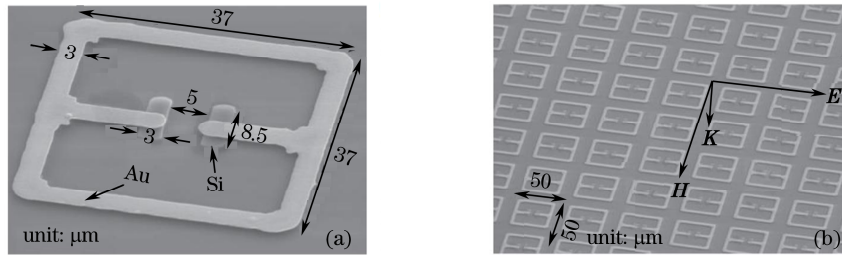


图 4 频率可调型 THz 超常材料。(a)微结构单元及其尺寸；(b)周期性阵列示意图

Fig.4 Frequency-tunable planar terahertz metamaterials. (a) an unit cell and its dimensions; (b) a periodically patterned square array

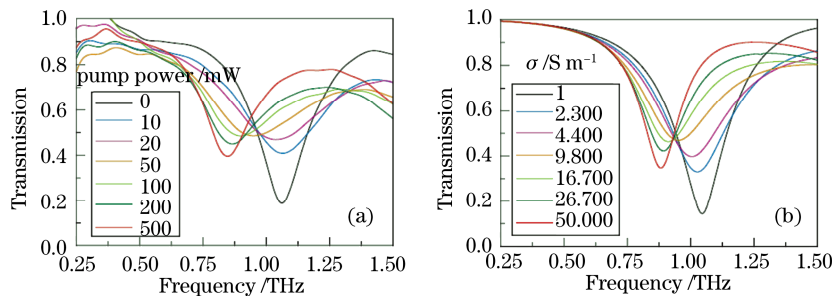


图 5 (a) 不同抽运功率下, 透射率随入射光频率变化的实验结果; (b) 基底电导率不同时, 透射率随入射光频率变化的仿真结果

Fig.5 (a) Experimental measurements of the transmitted THz- electric field amplitude via frequency as a function of pump power, (b) numerical simulations of the transmitted THz electric- field amplitude via frequency as function of silicon conductivity.

### 3 基于超常材料的 THz 波器件研究进展

操控 THz 波的传输一直是制约 THz 技术发展的一个关键因素, 其原因是能实现 THz 响应的天然材料极其稀少, 无法制造出相应的器件。THz 超常材料的实现将大大拓展传统 THz 技术的研究领域, 导致产生全新的操纵 THz 波的技术, 发展出许多新型的光电子器件<sup>[12-14]</sup>。2008 年, Hu Tao 等<sup>[15]</sup>提出了一种基于 THz 超常材料的吸收器, 其微结构为金属线和方形双开口环的组合, 单元尺寸为微米量级, 实验中将开口环沉积在聚酰亚胺薄膜上, 将金属线嵌入 GaAs 基底上, 然后将它们重叠形成一个双分子层单元, 这样就可以独立地调控它们的介电常数和磁导率, 使得吸收率达到最大。在 1.3 THz 频段该材料的吸收率可达到 70%, 并且它的一个微结构单元的吸收系数可达  $2000 \text{ cm}^{-1}$ 。这种器件具有小而轻的优点, 其相应带宽较窄, 因而在 THz 成像方面具有一定的应用价值。

THz 调制技术是 THz 通信系统的关键技术之一, 现有大多数的 THz 调制器都是基于半导体结构和电控结构的装置, 它们的缺点都是需要超低温的工作环境。也有些研究人员尝试用电磁波代替电流信号制造能在 THz 波段工作的新型信号调制器以提高传输速率, 但是, 总体来说, 目前的调制器处理速度无法超过用来控制它们的电子学线路的速度。2006 年, H. T. Chen 等<sup>[16]</sup>提出了一种基于超常材料的 THz 调制器, 它能够对 THz 辐射进行有效实时调控, 其实验样品如图 6 所示。利用微加工技术将金制的电共振环阵列雕刻在平板面积为  $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  的半导体基底上, 晶格周期为  $50 \mu\text{m}$ , 电共振环的几何尺寸具体为:  $A=36 \mu\text{m}$ ,  $G=52 \mu\text{m}$ ,  $D=10 \mu\text{m}$ ,  $W=54 \mu\text{m}$ 。这样就共同地形成了一个等效肖特基 (Schottky) 二极管, 加载一定的电压在基底和微带材料之间, 半绝缘的基底与金属共振环可共同等效为 LCR 共振电路模型, 如图 6(b) 所示, 其中虚线部分为可变电阻器, 相当于基底中自由载流子在缺口处的吸收损耗, 改变外置偏压的大小就可改变缺口处的载流子浓度, 从而实现对共振强度的调谐以控制 THz 波的传输。在反向偏压达到 16 V 的条件下,

在 0.72 THz 频段由于共振的增强使得 THz 波的透射强度下降了 50%，并且在 1.25 THz 的共振处，其透射强度也随着反向偏压的增大而减小，因此该装置可作为一个窄带 THz 调制器，并可在室温的环境下运行。这种新器件的性能超越了现有的电子太赫兹调制器，其效率相对于现有的 THz 调制器增加了一个数量级。相信可通过对该装置的微结构单元和基底参数进行优化，以降低器件的等效电容和电阻，从而实现对更高频 THz 波的调制。

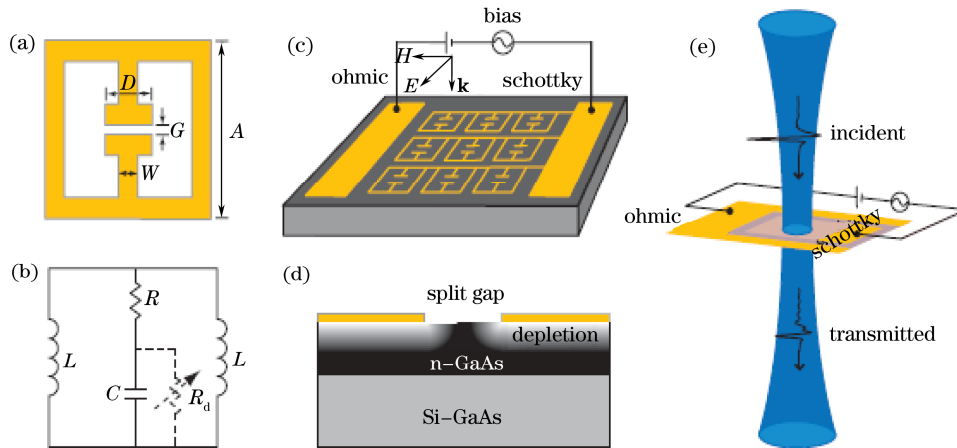


图 6 (a)单元的几何结构及尺寸；(b)微机构单元的等效电路图；(c)实验样品及原理示意图；(d)缺口附近的基底和势垒图，其灰度比表示自由载流子密度的大小；(e)器件的 THz 传输实验图  
Fig.6 (a)Geometry and dimensions of the element; (b) an equivalent circuit of the metamaterial element; (c) schematic and principle of the experiment sample; (d) diagram of the substrate and the depletion region near the split gap, where the grey scale indicates the free charge carrier density; (e) experimental configuration for THz transmission measurements through a fabricated device.

移相器也是一种在通信系统中非常重要的器件，在微波和光频段都有许多非常重要的应用，如相位阵列天线、高速马赫-曾德尔调节器等，然而这些器件的结构和配置都不能适用于 THz 波段。当前的 THz 移相器有的是基于半导体量子阱结构，但其工作环境要求极端低温；也有利用液晶材料来实现的，但是运行速度慢，效率低。为克服现有移相器的这些弱点，最近，H. T. Chen 等<sup>[17]</sup>提出了一种基于超常材料的固态相位调节器，该器件可在室温下运行，并可通过电控的方法在较窄的带宽内控制 THz 波的相位。此外，由于振幅调制和移相之间内在的因果关系，该器件还可作为一种宽带 THz 调制器高速地调制 THz 波。其设计思想和构造方法和他们先前的研究成果类似，将金属电谐振环通过金属线连接形成一个方形的阵列，然后将它们刻在 1  $\mu\text{m}$  厚的 n 型掺杂的外延生长的 GaAs 晶片上，其中镀金层厚度为 200  $\mu\text{m}$ ，线宽 4  $\mu\text{m}$ ，缺口间距 2  $\mu\text{m}$ ，单元外部尺寸 36  $\mu\text{m}$ ，晶格周期 50  $\mu\text{m}$ ，其结构如图 7 所示。

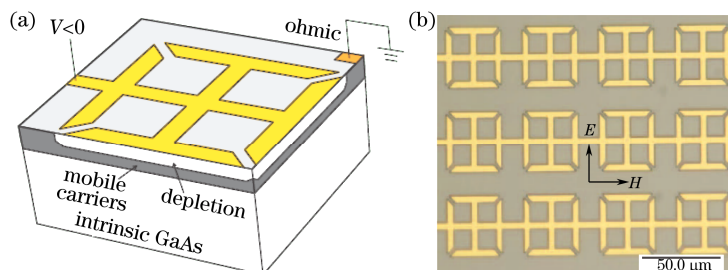


图 7 基于超常材料的 THz 相位调节器。(a) 结构单元及其横截面；(b) 器件有效面积显微图。垂直入射的 THz 波偏振方向如图所示  
Fig.7 Terahertz metamaterial phase shifter. (a) schematic of unit cell and its cross-section, (b) optical microscopic image of the active area of the device. The polarization direction of the normally incident terahertz radiation is also indicated

这种结构具有更高的振幅调制度，如图 7(a)所示，其中实线表示振幅不变时具有很大相移的频率，虚线表示具有最大振幅变化和最小相移的频率。在外加偏压为 16 V 的条件下，与不加偏压时相比较，在 0.81 THz 处 THz 波的振幅从 0.56 下降到 0.25，变化了 55%，相当于透射强度下降了 80%，在 1.7 THz

处振幅从 0.48 降到 0.30。而在两个共振频率之间，其传输振幅随着偏压的增加而增强。与此同时，该器件还可以在约  $\pi/6$  rad 范围内移动 THz 波的相位，如图 8(b)所示。同样在外加偏压 16 V 的条件下，在 0.89 THz 处 THz 波的相位由不加偏压时的 0.05 rad 移动到  $-0.51$  rad，相移达到了 0.56 rad，相当于 23 GHz 的带宽，其相移仅仅是用一个微结构单元就能达到，而基于该结构单元设计的多层结构的相移器可实现  $2\pi$  rad 的相移。由于这种器件具备了直接操控 THz 波的能力，因此可将它与不同的 THz 源组合，例如反相波振荡器或 THz 量子级联激光器，以形成具有各种功能的 THz 传输系统。

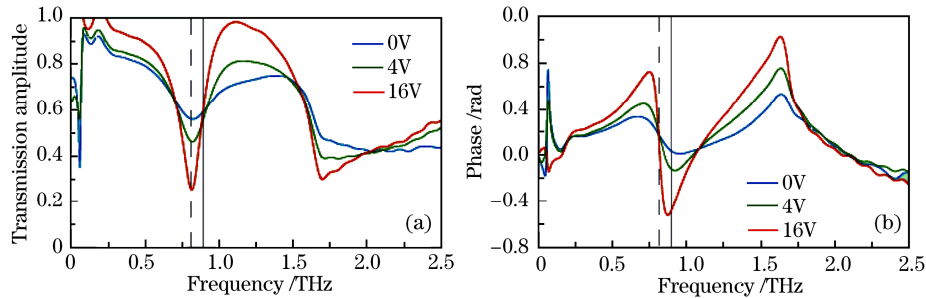


图 8 电控的 THz 传输谱。(a)传输振幅；(b)相位图

Fig.8 Electrically controllable terahertz transmission spectra. (a) transmission amplitude; (b) phase spectra

THz 滤波器也是 THz 技术中一项非常重要的功能器件，早在 2003 年，加州大学的 Wu Dongmin 等<sup>[18]</sup>提出了一种二维的金属线阵列结构，它可在 THz 频段实现电磁波的“电等离子体”响应，实验证实这种结构能在 THz 频段实现高通滤波。此外，利用光子晶体也可实现 THz 波段的超窄带低通滤波<sup>[19]</sup>。

从某种意义上讲，光子晶体也是一种超常材料，由于光子带隙的存在，人们可以通过设计带隙或增加缺陷，打破光子晶体结构的周期性来实现对各种波长光的调控。光子晶体有很多新奇的应用<sup>[20]</sup>，近年来，不少学者开始致力于构造和调控 THz 波段的光子晶体，并用来制作 THz 波导<sup>[21]</sup>、谐振腔<sup>[22]</sup>、滤波器<sup>[23]</sup>和开关<sup>[24]</sup>等功能器件。L. Fekete 等<sup>[25]</sup>用一维光子晶体构造出了一种 THz 调制器，它由 GaAs 和 Cr 层周期排列而成，并在其中引入一定程度的缺陷。实验证实了用 800 nm 的飞秒激光脉冲进行激发可快速地调制 THz 波，并可通过控制 THz 光子和自由载流子的寿命对其响应实施动态调控。利用光子晶体还可以构造 THz 量子级联激光器(QCLs)<sup>[26]</sup>，其结构如图 9 所示，将二维无缺陷光子晶体置入金属波导层，其中活性的柱状光子晶体提供所需的增益，由于光子晶体的色散是可以控制的，它可以在亚波长尺度上控制光的传输，因此通过它可以调控 QCLs 的输出频率，从而实现一个具有窄带宽、较高输出功率的 THz 辐射源，以适应 THz 技术的应用需求，诸如成像、检波、传感和光谱等。最近报道了基于二维光子晶体在 2.55~2.88 THz 段的半导体激光器<sup>[27]</sup>，将二维光子晶体构造在镀有金属层的砷化镓晶片上，并且光子晶体顶部也镀有金属层，在两层金属之间加一个电场(电抽运)，通过严格控制边界条件，能够得到可调的、单模的激光输出和角度极窄的远场发散图。

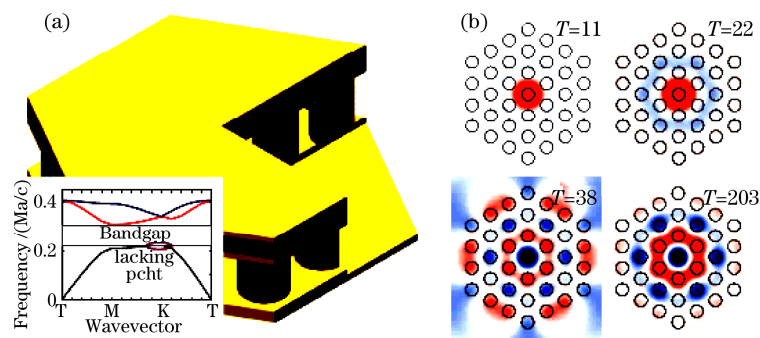


图 9 (a)器件示意图，插图为理想光子晶体的带隙分布；(b)模式随时间演变的 FDTD 仿真结果

Fig.9 (a) Schematic of the real device, the inset showing a calculated bandstructure of the ideal PhC; (b) FDTD-results of the mode evolution as a function of time

## 4 超常材料在 THz 波技术中的其他应用

2008 年, C. M. Bingham 等<sup>[28]</sup>提出的一种基于不同的微结构单元组合的平板 THz 超常材料, 其结构包含六边形和方形单元, 每种结构单元分别具有不同数量的缺口, 且缺口位置也不同。仿照固体物理中布拉维点阵的概念, 可将各种不同的微结构单元(亚格子)组合形成不同的格子(图 10), 格子的电磁特性由其组成单元的电磁特性决定, 将具有不同特性的格子分别周期性排列可得到具有不同宏观电磁响应的多元超常材料。他们提出了 2 种基于这些格子组成的超常材料, 共振频率大约为 0.5, 1.0 和 1.25 THz, 这与维生素 H 或 B7 分子的电磁共振谱一致。事实上维生素 H 分子被公认为一种极好的, 可在 THz 波段实行生物探测的基准分子。因此这种超常材料同样可作为一种 THz 波段的生物探测装置。另外, 由于这种新奇的多元共振微结构在其电容性的缺口处具有电场增强的非线性效应, 其非线性过程类似于表面增强拉曼散射效应, 也可应用于快速的“指纹”识别装置以及生物、医疗的探伤和电磁信号控制。

| MM<br>Sub | n=1 |     |     | n=2 |         |         | n=3 |     |
|-----------|-----|-----|-----|-----|---------|---------|-----|-----|
|           |     |     |     |     | + {<br> | + {<br> | +   | × 3 |
|           | pm  | pmm | p4m | cm  | cmm     | p4m     | p2  | pg  |

| MM<br>Sub | n=1 |     |    | n=2 |                |                | n=3   |       |
|-----------|-----|-----|----|-----|----------------|----------------|-------|-------|
|           |     |     |    |     | + or +  + or + | + or +  + or + | × 2 + | × 2 + |
|           | p6m | pmm | cm | pm  | pmm            | cm             | p3m1  | p1    |

图 10 基于晶体学平面群分类的二维 THz 超常材料的设计  
Fig.10 Group classification for two-dimensional metamaterial designs

THz 超常材料在生物传感方面也具有一定的应用价值。2007 年, T. Driscoll 等<sup>[29]</sup>提出了一种调控 THz 超常材料共振频率的方法, 采用的模型是一种传统的基于开口环的超常材料, 通过在各开口环附近额外地添加一些其他电介质材料来调控磁共振频率, 外加电介质使得 SRR 缺口处的电容发生改变, 因而共振频率也随之改变。由于开口环结构的共振频率对硅制纳米球颗粒非常敏感, 实验中将硅制纳米球颗粒的乙醇溶液滴在超常材料的表面, 测试结果发现其磁共振频率增加了 0.03 THz, 并且该调控方法具有可逆性, 可应用于构造相应的 THz 传感器件。

## 5 总结与展望

太赫兹超常材料的实现将加速推动太赫兹技术的发展, 可用来开发新型的太赫兹器件, 如滤波器、调制器、吸收器、开关及传感器等。相对于传统的器件, 这种新型的基于超常材料的太赫兹器件在性能和工作环境方面将更具优势。然而, 人们对 THz 超常材料及其器件的研究还处于初步的实验探索阶段, 还有大量的问题和困难需要去解决和克服。例如, 当前主要的研究对象为二维结构, 由于它们是各向异性的, 对电磁波的偏振方向和入射角度都有一定的要求, 使得它们的应用范围极其有限。因此, 设计和制备具有各向同性特性的三维超常材料将成为这个领域主要的研究方向之一。这种新型的人工微结构器件结构复杂, 单元尺寸非常小, 因而实际的制备过程相对困难, 对加工工艺和加工环境要求比较高。虽然现在已经可以通过微加工技术制作类似的结构, 如印刷电路板技术、激光刻蚀法等, 但使其形成产品从而真正应用于实际生活, 还有待于对其研究的继续深入和微纳加工制造技术的进一步发展。

此外, 目前产生 THz 波的方法和技术都存在着各种各样的缺陷, 采用非线性超常材料作为产生 THz 辐射源的材料将具有很多优势, 如二次谐波、三次谐波以及四波混频都可完美实现相位匹配, 实现高效的能量转换, 简化实验装置, 且通过四波混频的参量过程可以实现全透明, 实现高透射率, 具有可控的非线性系数等, 这些都是应用于 THz 波频段的非线性晶体的条件。因此, 探索用非线性超常材料实现 THz 辐射源的可行性, 通过研究非线性超常材料中的参量过程来研究产生 THz 辐射的新方法和新技术, 对超常材料和 THz 器件在将来的应用, 如天文、生物、医疗和国家安全等领域将具有非常重要的意义。

### 参 考 文 献

- 1 J. F. Lampin, T. Crwin, M. Penin *et al.*. Analysis of right- and left-handed dispersive transmission lines at terahertz frequencies [C]. *Novel Devices and Components, IEEE*, 2004
- 2 T. J. Yen, W. J. Padilla, N. Fang *et al.*. Terahertz magnetic response from artificial materials[J]. *Science*, 2004, **303**(5663): 1494~1496
- 3 H. O. Moser, B. D. F. Casse, O. Wilhelmi *et al.*. Terahertz response of a microfabricated rod-split-ring-resonator electromagnetic metamaterial[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **94**(6): 063901
- 4 M. Gokkavas, K. Guven, I. Bulu *et al.*. Experimental demonstration of a left-handed metamaterial operating at 100 GHz[J]. *Phys. Rev. B.*, 2006, **73**(19): 193103
- 5 H. -T. Chen, J. F. O'Hara, A. J. Taylor *et al.*. Complementary planar terahertz metamaterials[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(3): 1084~1095
- 6 W. Wu, Z. Yu, S.Y. Wang *et al.*. Midinfrared metamaterials fabricated by nanoimprint lithography[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(6): 063107
- 7 A. K. Azad, A. J. Taylor, E. Smirnova *et al.*. Characterization and analysis of terahertz metamaterials based on rectangular split-ring resonators[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(1): 011119
- 8 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
- 9 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
- 10 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)
- 11 H. T. Chen, J. F. O'Hara, A. K. Azad *et al.*. Experimental demonstration of frequency-agile terahertz metamaterials[J]. *Nature Photonics*, 2008, **2**(5): 295~298
- 12 M. Beruete, M. N. Cia, M. Sorolla *et al.*. Polarized left-handed extraordinary optical transmission of subterahertz waves[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(13): 8125~8134
- 13 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**(6): 1620~1622
- 14 A. Ishikawa, S. Zhang, D. A. Genov *et al.*. Deep subwavelength terahertz waveguides using gap magnetic plasmon[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, **102**(4): 043904
- 15 Hu 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
- 16 H-T Chen, W. J. Padilla, J. M. O. Zide *et al.*. Active terahertz metamaterial devices[J]. *Nature*, 2006, **444**(7119): 597~600
- 17 H-T Chen, W. J. Padilla, M. J. Cich *et al.*. A metamaterial solid-state terahertz phase modulator[J]. *Nature Photonics*, 2009, **3**(3): 148~151
- 18 Dongmin Wu, N. Fang, Cheng Sun *et al.*. Terahertz plasmonic high pass filter[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(1): 201~203
- 19 Xue Chaomin, Liu Jiansheng, Zheng Zheng *et al.*. Terahertz filters[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(1): 43~49  
薛超敏, 刘建胜, 郑 铮 等. THz滤波器[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(1): 43~49
- 20 Chen Linbai, Guo Zhenning, Lin Jieben. Research progress of photonic crystal light-emitting diode[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(4): 62~66  
陈林白, 郭震宁, 林介本. 光子晶体发光二极管的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(4): 62~66
- 21 Chunchen Lin, Caihua Chen, G. J. Schneider *et al.*. Wavelength scale terahertz two-dimensional photonic crystal waveguides[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(23): 5723~5728



- 22 A. L. Bingham, D. Grischkowsky, Terahertz two-dimensional high-Q photonic crystal waveguide cavities[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(4): 348~350
- 23 Yao Zhang, Zhangjian Li, Baojun Li. Multimode interference effect and self-imaging principle in two-dimensional silicon photonic crystal waveguides for terahertz waves[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(7): 2679~2689
- 24 Zhangjian Li, Yao Zhang, Baojun Li *et al.*. Terahertz photonic crystal switch in silicon based on self-imaging principle[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(9): 3887~3892
- 25 L. Fekete, F. Kadlec, H.Nemec *et al.*. Fast one-dimensional photonic crystal modulators for the terahertz range[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(14): 8898~8912
- 26 A. Benz, C. Deutsch, G. Fasching *et al.*. Active photonic crystal terahertz laser[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(2): 941~946
- 27 Y. Chassagneux, R. Colombelli, W. Mauneult *et al.*. Electrically pumped photonic-crystal terahertz lasers controlled by boundary conditions [J]. *Nature*, 2009, **457**(7226): 174~178
- 28 C. M. Bingham, Hu Tao, Xianliang Liu *et al.*. Planar wallpaper group metamaterials for novel terahertz applications[J]. *Opt. Express*, 2007, **16**(23): 18565~18575
- 29 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