

铁磁材料在太赫兹波段的研究进展

蒋霖坤 吴亮* 姚建铨

(天津大学精仪学院激光与光电子研究所, 天津 300072)

摘要 近年来,铁磁材料特别是铁磁性微纳材料在太赫兹波段的研究取得了许多具有重要应用前景的成果。介绍了太赫兹辐射在一些铁磁性微纳材料中的产生,以及一些铁磁性材料与太赫兹波相互作用的研究。其中包括:外加磁场和非磁性纳米涂层对于在 Co, Ni 等铁磁性微粒中传输的太赫兹脉冲衰减和延迟的影响,铁磁流体中的法拉第旋转,太赫兹脉冲磁场与晶体磁矩的相互作用和一些铁磁性薄膜在太赫兹波段的负折射率。此外,还介绍了两种由人工设计的铁磁性材料构成的磁控太赫兹功能器件。最后,对铁磁材料在太赫兹波段的应用前景进行了展望。

关键词 材料; 铁磁材料; 太赫兹; 脉冲; 磁场; 功能器件

中图分类号 O441.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP50.080022

Research Progress of Ferromagnetic Materials in Terahertz Wave Band

Jiang Linkun Wu Liang Yao Jianquan

(*Institute of Laser and Optoelectronics, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

Abstract The research on ferromagnetic materials, especially on ferromagnetic micro-nano materials in terahertz region, has made many achievements which have important potential applications. This article shows the research achievements of the terahertz emission in ferromagnetic thin films and ferromagnetic nanowires employing femtosecond laser pulses, and some ferromagnetic materials interaction with terahertz wave as well. These includes the influences of applied magnetic field and non-magnetic nano-coatings on the attenuation and time delay of terahertz wave transmitted through ferromagnetic particles such as Co and Ni, Faraday rotation in ferrofluid, the magnetic field of terahertz pulses interaction with magnetic moments and negative refraction index of some ferromagnetic thin films in terahertz region. Moreover, two kinds of terahertz functional devices controlled by magnetic field which are composed by artificially designed ferromagnetic materials are introduced. The prospect of the application of ferromagnetic materials in terahertz region is referred at last.

Key words materials; ferromagnetic material; terahertz; pulse; magnetic field; functional device

OCIS codes 160.3820; 160.3918; 040.2235; 240.6680; 320.5390

1 引言

铁磁材料是指在外部磁场的作用下磁化后,即使外部磁场消失,依然能保持其磁化的状态而具有磁性的材料。铁、钴、镍和它们的一些合金,稀土族金属以及一些氧化物都属于铁磁材料。这些材料具有明显而特殊的磁性:首先,它们都有很大的磁导率 μ ;其次,它们都有明显的磁滞效应。此外,物质的铁磁性现象存在一个称为居里温度的临界温度,在该温度之下铁磁性才会保持。高于居里温度时,由于受到热运动的干扰,原子磁矩的定向排列被破坏,使得铁磁性消失,物质转变为顺磁性。

太赫兹(THz)波是指频率在 0.1~10 THz 范围的电磁波,波长大概在 0.03~3 mm 范围,介于微波与

收稿日期: 2013-02-24; 收到修改稿日期: 2013-04-12; 网络出版日期: 2013-06-05

基金项目: 国家自然科学基金(61205096, 61271066)

作者简介: 蒋霖坤(1989—),男,硕士研究生,主要从事太赫兹科学技术及其应用方面的研究。

E-mail: jlk0817@sina.com

导师简介: 姚建铨(1939—),男,中国科学院院士,教授,博士生导师,主要从事太赫兹技术、非线性光学频率变换及全固态激光器等方面的研究。E-mail: jqyao@tju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: wuliang@tju.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

红外之间,处于宏观电子学向微观光子学的过渡阶段^[1-10]。由于具有光子能量低、脉冲宽度窄、频带宽等特点,太赫兹波在通信、医学成像、无损检测、安全检查等诸多领域具有广阔应用前景^[5-6]。

近年来,随着太赫兹波产生和探测技术的日趋成熟以及超快光学、半导体和微纳加工等技术的发展,铁磁材料特别是铁磁性微纳材料在太赫兹波段的研究取得了许多新的进展。本文从以下几个方面介绍这些进展:太赫兹波在铁磁材料中的产生,太赫兹波与铁磁材料的相互作用,基于人工铁磁材料的磁控太赫兹功能器件。

2 铁磁材料在太赫兹波段的研究新进展

2.1 太赫兹波在铁磁材料中的产生

超快激光技术的迅速发展为太赫兹脉冲的产生提供了稳定、可靠的激发光源,使太赫兹辐射的产生和应用得到了蓬勃发展^[4-5]。目前,基于超短脉冲激光产生太赫兹辐射主要有光整流法、利用光电导天线产生太赫兹辐射和在空气等离子体中产生太赫兹辐射等方法^[7]。近年来还出现了一些利用飞秒激光脉冲在铁磁性微纳材料中产生太赫兹辐射的新的方法。

2004年 Beaulieu 等^[11]利用钛宝石激光器产生的飞秒激光脉冲在铁磁薄膜中引起的超快退磁过程产生了太赫兹电磁脉冲。在此基础上,2012年 Shen 等^[12]利用类似的实验装置(如图1所示)在沿 x 方向磁化的铁磁性 FeNi 纳米薄膜中产生了沿 y 轴极化的太赫兹电磁脉冲。通过比较不同样品中产生的太赫兹脉冲振幅的峰值以及样品的吉尔伯特阻尼常数得出结论:铁磁薄膜的吉尔伯特阻尼越大,产生的太赫兹信号就越强。该实验结论同时还表明:自旋抽运理论在太赫兹波段可能仍然成立。

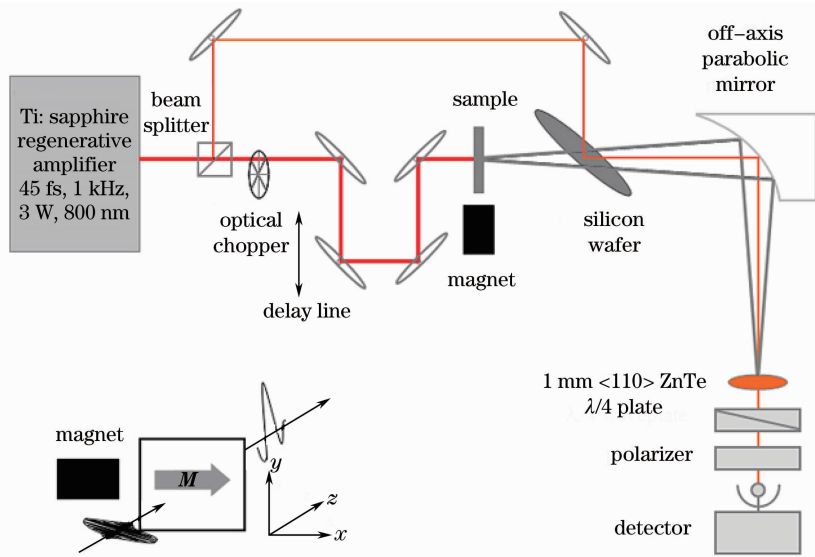


图1 铁磁薄膜中产生太赫兹脉冲的实验装置图^[12]

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental configuration for the emission of terahertz pulse in ferromagnetic thin film^[12]

利用类似图1的实验装置,2006年 Héroux 等^[13]用脉冲能量 $3 \mu\text{J}$ 的飞秒激光脉冲垂直入射厚度为 $0.35 \mu\text{m}$ 的 GaMnAs 薄膜,产生了能量转化效率为 5%、电场方向垂直于外加磁场的线性极化的太赫兹辐射(如图2插图所示),并分别研究了产生的太赫兹脉冲与外加磁场和温度的关系。实验结果显示,产生的太赫兹波形依赖于外加磁场方向。当外加磁场的方向反转时,产生的太赫兹波形随之发生反转,波形如图2所示。此外,随着样品温度升高,产生的太赫兹信号的峰值逐渐降低。当样品温度接近居里温度(约 110 K)时,产生的太赫兹信号峰值接近于 0。由此证实了太赫兹波的产生与 GaMnAs 材料

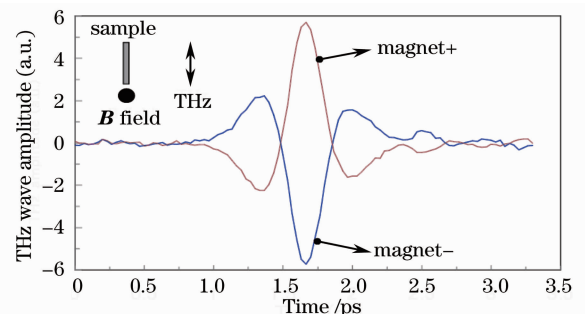


图2 太赫兹波的典型实验曲线^[13]

Fig. 2 Typical experimental curves of the THz emission^[13]

的铁磁性有直接关系。

目前,太赫兹波段表面等离子体光子学已成为国内外研究的一个热点,基于局域表面等离子激元共振的微纳结构半导体材料也有望成为高效的太赫兹辐射源^[14-18]。近年来已有一些利用飞秒激光脉冲在 Si、GaAs、InP 等半导体纳米材料中产生太赫兹辐射的报道^[16-18]。其中,2010 年 Kong 等^[16]在室温条件下利用飞秒激光入射硅基底上掺杂不同元素的铁磁性 GaAs 纳米线得到了太赫兹辐射,并通过对不同样品中产生的太赫兹脉冲进行比较,讨论了样品的铁磁性对产生的太赫兹波的影响。实验结果如图 3 所示,从图中可以看出:Mn 的掺杂不仅显著提高了产生的太赫兹波的强度,而且增加了频谱宽度。实验中所用不同掺杂的纳米线样品的磁化强度顺序为: $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.93}\text{Mn}_{0.02}\text{As}$, $\text{Ga}_{0.98}\text{Mn}_{0.02}\text{As}$, $\text{Ga}_{0.98}\text{Mn}_{0.02}\text{As}_{0.95}\text{Sb}_{0.05}$ 。由此得出结论:样品中产生的太赫兹脉冲的强度很强地依赖于样品的磁化强度。此外,他们将 Mn 的掺杂对于产生的太赫兹脉冲的影响归因于样品光导率的增加。

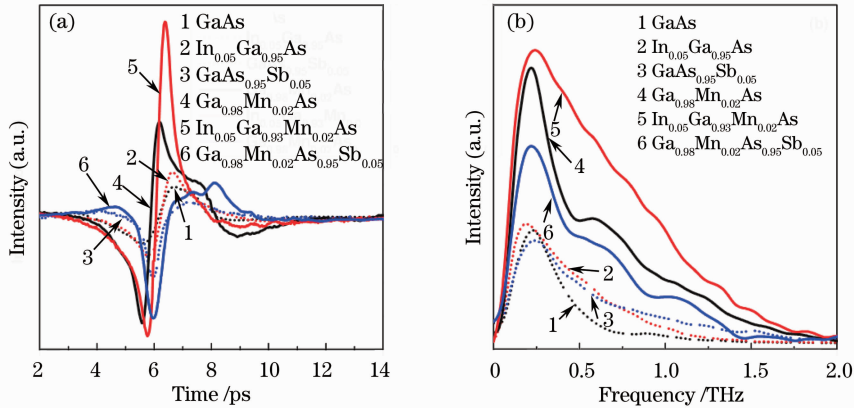


图 3 (a)产生的时域太赫兹波形;(b)相应的太赫兹频谱^[16]

Fig. 3 (a) Time-domain waveforms of terahertz radiations; (b) corresponding Fourier-transform frequency spectra^[16]

2.2 太赫兹波与铁磁材料的相互作用

2.2.1 太赫兹波在亚波长铁磁微粒中的传输

长期以来,有关对太赫兹波进行探测和调控的材料、器件的研究一直是太赫兹科学与技术研究领域的重点^[15]。但由于自然界中的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^[14-15,19]。然而,具有微纳结构的人工超材料的电磁特性由其亚波长等离子共振特性决定,其电磁响应能延伸至太赫兹波段^[14]。近年来,国内外已有很多关于具有金属微结构的人工超材料在太赫兹波段的研究成果^[6,14-15,19],但涉及铁磁性材料的相关研究仍然相对较少。其中,加拿大 Alberta 大学超快光学和纳米光子学实验室的研究人员对于外加磁场条件下,太赫兹波在亚波长人工铁磁微粒中的衰减和时间延迟等特性进行了一系列研究^[20-22]。

2006 年 Chau 等^[20]探究了外加磁场对于在稠密亚波长尺寸(约 $74 \mu\text{m}$)的铁磁性 Co 微粒体系中传输的极化太赫兹脉冲的影响。实验结果显示:太赫兹脉冲振幅的衰减和时间延迟很强烈地依赖于外加磁场方向。在外加磁场 $B=0.18\text{T}$ 条件下,当磁场方向与太赫兹脉冲的电场极化方向平行时,脉冲出现衰减和延迟;当二者垂直时,不会出现衰减和延迟。此外,衰减和延迟与样品的铁磁性有直接关系:如果将样品换成同样尺寸的非磁性 Cu 微粒,当磁场方向与太赫兹脉冲的电场极化方向平行时,仍然观测不到衰减和延迟。

在此基础之上,2007 年 Chau 等^[21]研究了纳米 Au 涂层(厚度约 45 nm)和外加磁场对于在 Co 微粒[如图 4(a)所示]体系中传输的极化太赫兹脉冲衰减的影响。在无外加磁场条件下,太赫兹脉冲的衰减随着 Au 层所占微粒表面积比例的增加而增加:当 Au 表面积比例从 0 增加至 77% 时,太赫兹脉冲的振幅衰减了约 91% [如图 4(b)所示]。如图 4(a)所示, θ 为太赫兹脉冲电场极化方向与外加磁场方向的夹角。当施加 $B=160 \text{ mT}$ 的外加磁场时,传输经 Co 和 Co/Au 微粒体系的归一化脉冲振幅(施加磁场与不施加磁场的透射脉冲振幅之比)均与 θ 呈现 $\cos^2\theta$ 的函数关系。

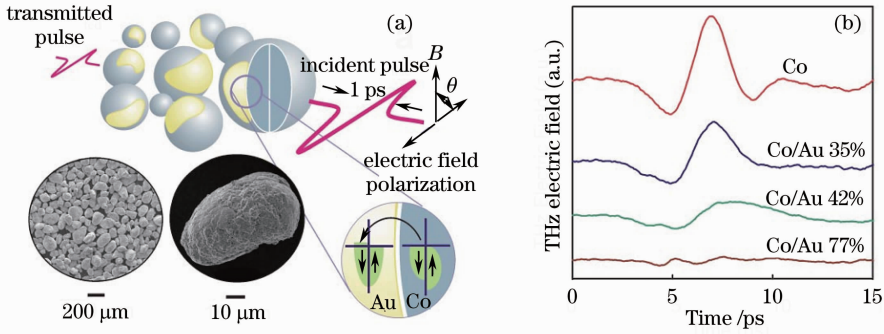


图 4 (a)极化太赫兹脉冲在涂有 Au 层的 Co 微粒体系中传输示意图,在双金属界面上自旋积累引起磁调制界面电阻;

(b)无外加磁场条件下,传输经 3 mm 厚具有不同比例 Au 涂层的 Co 微粒体系的时域太赫兹信号^[21]

Fig. 4 (a) Illustration of near-field dipole-dipole coupled transport across a chain of Co/Au bimetallic particles. Spin accumulation at the bimetallic interface gives rise to a magnetically modulated interface resistance; (b) time-domain THz transmission signals through 3 mm thick particle ensembles having varying Au coverage, in zero field^[21]

2012 年 Straatsma 等^[22]进一步研究了在更大范围内变化的外加磁场(0~500 mT)下,铁磁性 Ni 和 Co 微粒(尺寸分别约 146 μm 和 73 μm)上不同材料的非铁磁性涂层(Ag, Al, Au)对于极化太赫兹脉冲衰减和延迟的影响。如图 5 所示,在垂直于脉冲电场极化方向的外加磁场下,脉冲在所有样品中的衰减均出现磁滞现象,并且不同材料的非磁性涂层导致不同程度的额外衰减。其中, Au 涂层产生的额外衰减最大。例如,在 500 mT 外加磁场下,相对于经 Ni 微粒体系传输的脉冲振幅,经 Ni/Au 微粒体系的振幅衰减了约 52%。

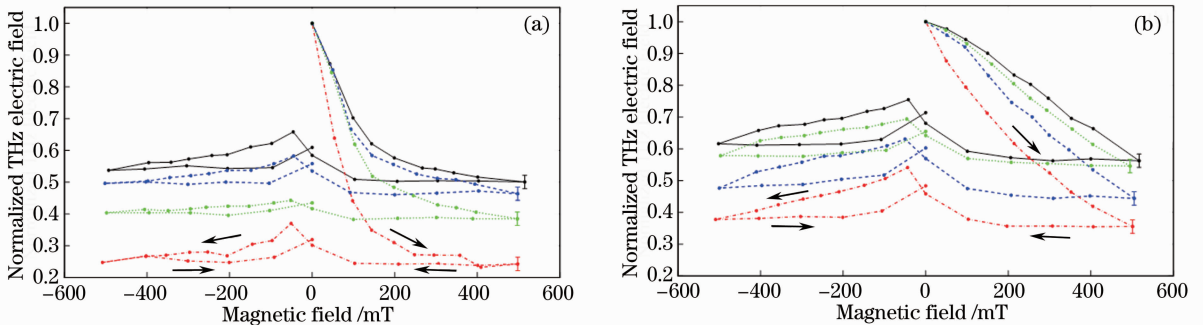


图 5 不同外加磁场下,传输经(a)Ni 和(b)Co 微粒体系归一化的太赫兹电场峰值振幅,其中:黑实线表示无涂层,

蓝虚线 Ag 涂层,绿虚线表示 Al 涂层,红虚线表示 Au 涂层。涂层厚度 45 nm,箭头指示了外加磁场大小的变化方向^[22]

Fig. 5 Peak amplitude of the THz electric field transmitted through the (a) Ni and (b) Co ensembles with no coating (black, solid), Ag coating (blue, dashed), Al coating (green, dotted), and Au coating (red, dashed-dotted), where each coating is 45 nm thick. The black arrows show the sweep direction of the magnetic field^[22]

2.2.2 铁磁流体中的法拉第旋转

铁磁流体(又称磁流体)是由磁性纳米微粒与某种液体基液混合而成的新型功能材料。由于该材料具有良好的磁光特性[如法拉第旋转(FR)、圆双色性、双折射效应],并且在太赫兹波段具有良好的透过性能,因而在太赫兹调制、太赫兹开关和太赫兹传感等领域有着重要的应用前景^[23-24]。2012 年 Shalaby 等^[24]研究了室温下沿外加磁场方向传输的极化太赫兹波在铁磁流体(由尺寸 10 nm 的 Fe_3O_4 微粒和碳氢化合物液体构成)中的法拉第旋转。在厚度 10 mm 的铁磁流体中,0.2~0.9 THz 频率范围内的电磁波在不同强度的外加磁场下显示出了不同程度的法拉第旋转,如图 6(a)所示。其中,在外加磁场为 30 mT 时法拉第旋转角高达 110 mrad。从图 6(b)中可以看出,太赫兹波的旋转角度与外加磁场强度成接近线性关系,并且旋转角度与频率关系很弱。此外,由于磁流体对于该波段电磁波的低吸收率,实验获得了高达 5~16 $\text{rad} \cdot \text{cm}/\text{T}$ 的磁光品质因数。

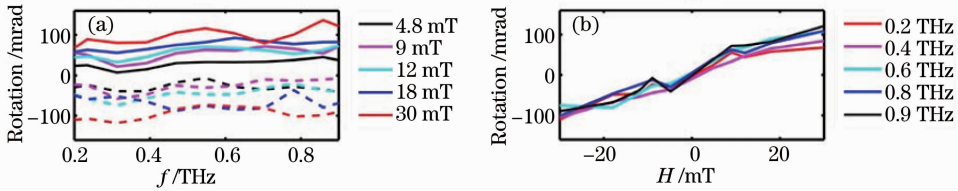


图6 (a)频谱范围0.2~0.9 THz,不同磁场强度 H 下测得的法拉第旋转角。

虚线显示了外加磁场方向相反时相应的旋转;(b)特定太赫兹频率下旋转角随外加磁场强度的变化曲线^[24]

Fig. 6 (a) FR measurements in the spectral range of 0.2~0.9 THz for different levels of applied magnetic field H . The dotted curves show the corresponding rotation when the external magnetic field direction is reversed; (b) FR measurements plotted against H for certain values of frequency^[24]

2.2.3 太赫兹脉冲磁场与晶体磁矩的相互作用

近年来,东京大学固体物理研究所特定频率太赫兹脉冲的磁场与晶体磁矩相互作用的研究中取得了新的进展^[25-26]。2010年 Nakajima 等^[25]在室温下观测了太赫兹脉冲磁场在铁磁材料 $\epsilon\text{-Ga}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_3$ 中引起的磁矩进动所辐射出的自由感应衰减(FID)信号。实验所用样品为 $\epsilon\text{-Ga}_{0.23}\text{Fe}_{1.77}\text{O}_3$ 微粒构成的圆形压片,磁化方向垂直于圆形表面。电场方向水平的太赫兹极化脉冲垂直入射 $\epsilon\text{-Ga}_{0.23}\text{Fe}_{1.77}\text{O}_3$ 压片表面。透射的太赫兹波电场不仅含有水平分量,而且出现了垂直分量。二者相位差接近 $\pi/2$ 。如图7所示,透过 $\epsilon\text{-Ga}_{0.23}\text{Fe}_{1.77}\text{O}_3$ 的太赫兹波水平和垂直极化分量的频谱在样品的铁磁共振频率 0.102 THz处分别出现了低谷和高峰。由此证明了铁磁共振频率的线极化的太赫兹波经样品透射后转化为近乎圆极化的 FID 信号。

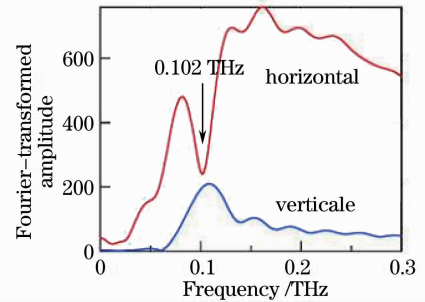


图7 透过 $\text{Ga}_{0.23}\text{Fe}_{1.77}\text{O}_3$ 的太赫兹波水平极化和垂直极化分量的频谱^[25]

Fig. 7 Fourier-transformed spectra of the waveforms transmitted through $\epsilon\text{-Ga}_{0.23}\text{Fe}_{1.77}\text{O}_3$ for horizontal and vertical components^[25]

同年, Yamaguchi 等^[26]在室温条件下用双半周期极化太赫兹脉冲实现了对单晶 YFeO_3 中磁矩自旋进动的连续控制。由于半周期太赫兹脉冲磁场引起 YFeO_3 晶体中磁矩绕 c 轴进动,因而辐射出 0.299 THz 的圆极化 FID 信号。图 8(a),(b)中 18~43 ps 的波形分别为 $\mathbf{E} \parallel b$ 和 $\mathbf{E} \parallel a$ 两种偏振的 FID 信号,二者相位差为 $\pi/2$ 。从图中可以看出,在不同时间间隔 Δt 加入第二个半周期脉冲可以引起不同强度的 FID。当 $\Delta t = 4.5T_F$ (T_F 为进动周期)时, $\mathbf{E} \parallel b$ 和 $\mathbf{E} \parallel a$ 两种偏振状态的 FID 均消失,表明进动停止;而当 Δt 是 T_F 整数倍时, FID 振幅是单脉冲激发的 2 倍[强度为 4 倍,如图 8(c)所示]。

2.2.4 铁磁材料在太赫兹波段的负折射率

介电常数和磁导率都为负值的负折射率材料(又称左手材料)现已成为国内外研究的热点。近年来的研究显示:一定的温度和外加磁场条件下,一些铁磁性薄膜对于铁磁共振频率附近的电磁波显示出负折射率。2005年 Pimenov 等^[27]发现:在温度 $T=10\text{ K}$ 条件下,当外加磁场强度约 3 T 时,由高温超导 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (YBCO) 薄层和铁磁性 $\text{La}_{0.89}\text{Sr}_{0.11}\text{MnO}_3$ (LSMO) 薄层交替堆叠形成的多层超晶格结构 LSMO/YBCO 对于 90 GHz 频率处的电磁波显示出负折射率。2007年 Pimenov 等^[28]用实验证明了在外加磁场条件下,频率接近铁磁共振频率的电磁波在铁磁性金属 $\text{La}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$ 中显示出负折射率。实验所用样品为沉积在 MgO 基底上的厚度 550 nm 的 $\text{La}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$ 薄膜。外加磁场 $\mu_0\mathbf{H}$ 方向平行于薄膜平面,与电磁波波矢 \mathbf{k} 垂直。从图 9 中可以看出,频率为 150 GHz 的电磁波的折射率 n 和吸收系数 κ 随外加磁场强度变化,并且在很大磁场强度范围内显示出负折射率。随着温度升高, $\text{La}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$ 的共振位置移动到更高磁场强度处,反映在图中即为曲线随温度变化而移动。

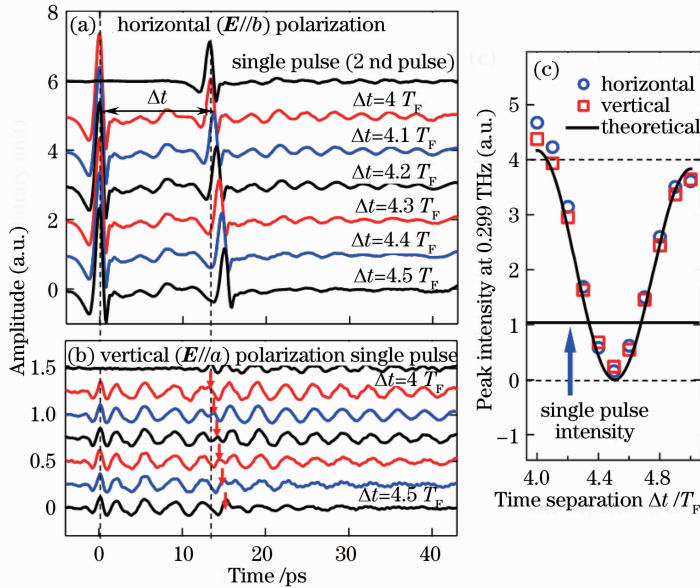


图 8 在 YFeO_3 中沿 c 轴传输的不同偏振的时域太赫兹波形, (a) $E//b$, (b) $E//a$ 。(c) 由 18~43 ps 时域波形的傅里叶变换得到的 0.299 THz 的归一化峰值强度^[26]

Fig. 8 Temporal waveforms of transmitted THz wave through c -cut plane parallel plate of YFeO_3 in (a) $E//b$ and (b) $E//a$ polarizations; (c) normalized intensity at 0.299 THz peak obtained by Fourier transformation of the temporal waveforms from 18 ps to 43 ps^[26]

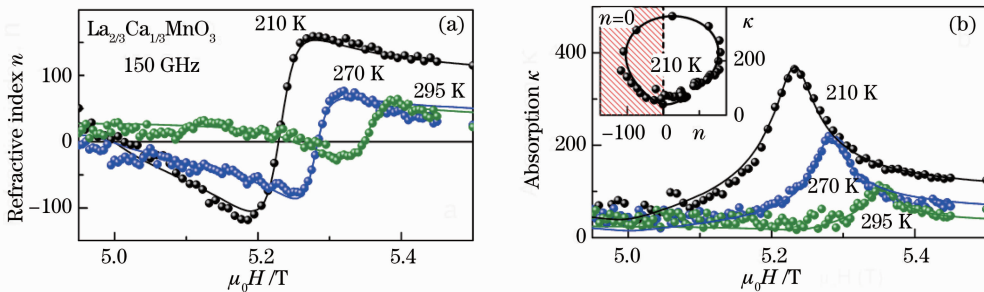


图 9 不同温度下, $\text{La}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$ 中频率为 150 GHz 的电磁波随磁场变化的 (a) 折射率和 (b) 吸收系数。(b) 中插图显示了 $T=210$ K 的负折射率^[28]

Fig. 9 Magnetic field dependence of (a) refractive index and (b) absorption coefficient of $\text{La}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$ at 150 GHz for different temperatures. The inset in (b) presents the refractive index at $T=210$ K on the complex scale^[28]

2.3 基于人工铁磁材料的磁控太赫兹功能器件

在太赫兹功能器件的实际应用中, 实现对其主动控制是至为关键的一步^[6]。目前主要有热、磁、电、光等方法对太赫兹功能器件进行主动控制。一些具有微纳结构的铁磁性人工材料由于能够与太赫兹波产生电磁响应, 并且磁导率等电磁特性受外加磁场调控, 因而在磁控太赫兹功能器件的研究中具有重要应用前景。

2009 年 Baron 等^[29]设计了一个由亚波长铁磁金属 (Co) 和电介质 (蓝宝石) 微粒混合而成的具有梯度折射率的人工材料。如图 10(b) 中插图所示, 通过将材料中 Co 微粒所占体积比例 (φ_M) 设置为从 0.67 到 1, 得到了一个线性的有效折射率梯度 (Co 比例大处折射率低)。通过施加平行于太赫兹电场的极化方向的外加磁场可以减小折射率梯度, 从而减小偏转角 θ 。不同强度的外加磁场对应着不同大小的 θ 。例如: 当 B 从 0 增加至 78 mT 时, 透过人工材料的太赫兹信号的偏转角 θ 从 5.7° 减小至 0.7° 。由此实现了通过外加磁场对太赫兹信号传输方向的控制。

国内的相关研究也取得了一定成果。2011 年南开大学的郭展等^[30]设计了一个晶格周期 $150 \mu\text{m}$ 的由

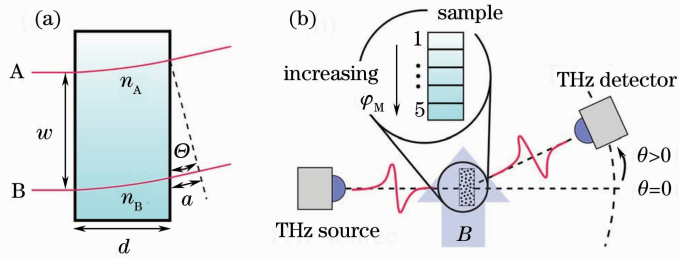


图 10 (a)人工材料中由于折射率梯度而引起的太赫兹信号传输方向的偏移。(b)实验装置图:太赫兹探测器可以放置在样品周围的任意角度 θ 。样品被等分为5个区域,其各自的 φ_M 沿箭头方向依次为0.67, 0.73, 0.81, 0.92, 1^[29]

Fig. 10 (a) Diagram of the deflection of terahertz rays passing through an artificial material that is induced by a refractive index gradient, (b) experimental configuration where the terahertz detector can be positioned to any angle around the sample.

The sample is comprised of 5 regions, and φ_M values of these regions are 0.67, 0.73, 0.81, 0.92 and 1, respectively^[29]

铁氧体柱构成的二维光子晶体波导。通过调节外加磁场大小来改变磁性材料磁导率,以改变光子晶体带隙,从而实现滤波和开关的功能。数值模拟结果显示,该结构可以实现0.8314~1.08542 THz的宽带连续可调谐滤波功能,并且在该频率范围内可实现开关功能。

3 结束语

近年来铁磁材料在太赫兹波段的研究取得了许多具有重要应用前景的成果。利用飞秒激光脉冲在铁磁性微纳材料中产生太赫兹辐射的研究成果不仅提供了新的产生太赫兹脉冲的方法,而且为超快自旋动力学的研究提供了新的线索。然而,要发展成为实用的太赫兹源,仍需克服目前超短脉冲产生太赫兹辐射普遍具有的转换效率低、不能连续调谐的缺点。亚波长铁磁微粒是一种能与太赫兹波产生电磁响应的人工材料。外加磁场和微粒上的非磁性纳米涂层对于在微粒中传输的太赫兹波的衰减和延迟等特性具有显著影响,因而该材料在磁控太赫兹功能器件的研究中具有重要的应用价值。由于具有良好的磁光特性,并且对于一定频率的太赫兹波具有高透射率,铁磁流体也是一种有应用前景的太赫兹材料。太赫兹脉冲磁场与晶体磁矩相互作用的研究成果为亚太赫兹波段的环形器、隔离器等功能器件的研究奠定了基础。基于铁磁性微纳材料的磁控太赫兹功能器件是未来发展的一个方向。但受到加工工艺的限制,一些有应用价值的人工材料目前仅停留在设计阶段。相信随着微纳加工等技术的进一步发展,将会出现更多具有实用价值的铁磁性微纳材料及相关太赫兹器件。

参 考 文 献

- Zhang Huaiwu. Research on terahertz science and technology in China[J]. China Basic Science, 2008, 10(1): 15–20.
张怀武. 我国太赫兹基础研究[J]. 中国基础科学, 2008, 10(1): 15–20.
- Wu Liang, Ling Furi, Liu Jinsong, *et al.*. Detection of gases with terahertz spectroscopy techniques[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2009, 46(7): 29–35.
吴亮, 凌福日, 刘劲松, 等. 太赫兹光谱技术在气体检测中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(7): 29–35.
- Yang Pengfei, Yao Jianquan, Bing Pibin, *et al.*. Source and characteristics of THz wave[J]. Laser & Infrared, 2011, 41(2): 125–131.
杨鹏飞, 姚建铨, 邴丕彬, 等. 太赫兹波及其常用源[J]. 激光与红外, 2011, 41(2): 125–131
- Cai He, Guo Xuejiao, He Ting, *et al.*. Terahertz wave and its new applications[J]. Chinese J Optics and Applied Optics, 2010, 3(3): 209–222.
蔡禾, 郭雪娇, 和挺, 等. 太赫兹技术及其应用研究进展[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(3): 209–222.
- Zhao Guozhong. Application and outlook of THz spectroscopy and imaging[J]. Modern Scientific Instruments, 2006, 16(2): 36–40.
赵国忠. 太赫兹光谱和成像应用及展望[J]. 现代科学仪器, 2006, 16(2): 36–40.
- He Mingxia, Li Jingyan, Liu Guanlin. Progress of terahertz active control functional devices[J]. J Electronic Measurement and Instrument, 2012, 26(7): 567–576.
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.
- Ye Quanyi, Yang Chun. Recent progress in THz sources based on photonics methods[J]. Chinese Optics, 2012, 5(1):

- 1—11.
- 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.
- 8 Ma Jianjun, Li Dehua, Zhou Wei, *et al.*. Progress of terahertz pulse shaping techniques[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(9): 090004.
- 马建军, 李德华, 周 薇, 等. 太赫兹脉冲整形技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(9): 090004.
- 9 Liu Lei, Li Xiao, Liu Tong, *et al.*. Progress of terahertz wave parametric oscillator[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(9): 090001.
- 刘 磊, 李 霄, 刘 通, 等. 太赫兹波参量振荡器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(9): 090001.
- 10 Gao Fei, Chen Liqun, Feng Guangzhi, *et al.*. Progress of flexible and low-loss terahertz waveguides[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(5): 050005.
- 高 飞, 陈立群, 冯广智, 等. 可弯曲的低损耗太赫兹波导研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(5): 050005.
- 11 E Beaufort, G M Turner, S M Harrel, *et al.*. Coherent terahertz emission from ferromagnetic films excited by femtosecond laser pulses[J]. Appl Phys Lett, 2004, 84(18): 3465—3467.
- 12 Jian Shen, Xin Fan, Zhiyuan Chen, *et al.*. Damping modulated terahertz emission of ferromagnetic films excited by ultrafast laser pulses[J]. Appl Phys Lett, 2012, 101(7): 072401.
- 13 J B Héroux, Y Ino, M Kuwata-Gonokami, *et al.*. Terahertz radiation emission from GaMnAs[J]. Appl Phys Lett, 2006, 88(22): 221110.
- 14 Wang Yue, Wang Xuan, He Xunjun, *et al.*. Progress in terahertz surface plasmonics[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(13): 137301.
- 王 玥, 王 暄, 贺训军, 等. 太赫兹波段表面等离子光子学研究进展[J]. 物理学报, 2012, 61(13): 137301.
- 15 Ding Pei, Liang Erjun. Research progress of metamaterials for terahertz applications[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(7): 071602.
- 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.
- 16 Kang J Kong, Chan S Jung, Gyeong B Jung, *et al.*. Room-temperature ferromagnetism and terahertz emission of Mn-doped InGaAs and GaAsSb nanowires[J]. Nanotechnology, 2010, 21(43): 435703.
- 17 G B Jung, Y J Cho, Y Myung, *et al.*. Geometry-dependent terahertz emission of silicon nanowires[J]. Opt Express, 2010, 18(16): 16353—16359.
- 18 M Reid, I V Cravetchi, R Fedosejevs. Enhanced terahertz emission from porous InP (111) membranes[J]. Appl Phys Lett, 2005, 86(2): 021904.
- 19 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.
- 20 K J Chau, A Y Elezzabi. Photonic anisotropic magnetoresistance in dense Co particle ensembles[J]. Phys Rev Lett, 2006, 96(3): 033903.
- 21 K J Chau, Mark Johnson, A Y Elezzabi. Electron-spin-dependent terahertz light transport in spintronic-plasmonic media [J]. Phys Rev Lett, 2007, 98(13): 133901.
- 22 C J E Straatsma, M Johnson, A Y Elezzabi. Terahertz spinplasmonics in random ensembles of Ni and Co microparticles[J]. Appl Phys Lett, 2012, 112(10): 103904.
- 23 Zhang Chunxiang, Yin Hairong, Liu Liying. Typical effects of magneto-optical materials and their applications[J]. J Magnetic Material and Devices, 2008, 39(3): 8—16.
- 章春香, 殷海荣, 刘立营. 磁光材料的典型效应及其应用[J]. 磁性材料及器件, 2008, 39(3): 8—16.
- 24 Mostafa Shalaby, Marco Peccianti, Yavuz Ozturket, *et al.*. Terahertz Faraday rotation in a magnetic liquid: high magneto-optical figure of merit and broadband operation in a ferrofluid[J]. Appl Phys Lett, 2012, 100(24): 241107.
- 25 M Nakajima, A Namai, S Ohkoshi, *et al.*. Ultrafast time domain demonstration of bulk magnetization precession at zero magnetic field ferromagnetic resonance induced by terahertz magnetic field [J]. Optics Express, 2010, 18 (17): 18260—18268.
- 26 Keita Yamaguchi, Makoto Nakajima, Tohru Suemoto. Coherent control of spin precession motion with impulsive magnetic fields of half-cycle terahertz radiation[J]. Phys Rev Lett, 2010, 105(23): 237201.
- 27 A Pimenov, A Loidl, P Przyslupski, *et al.*. Negative refraction in ferromagnet/superconductor superlattices[J]. Phys Rev Lett, 2005, 95(24): 247009.
- 28 A Pimenov, A Loidl, K Gehrke, *et al.*. Negative refraction observed in a metallic ferromagnet in the gigahertz frequency range[J]. Phys Rev Lett, 2007, 98(19): 197401.
- 29 C A Baron, A Y Elezzabi. A magnetically active terahertz plasmonic artificial material[J]. Appl Phys Lett, 2009, 94(7): 071115.
- 30 Guo Zhan, Fan Fei, Bai Jinjun, *et al.*. Magnetically tunable magnetic photonic crystal for terahertz switch and filter[J]. Acta Phys Sin, 2011, 60(7): 074218.
- 郭 展, 范 飞, 白晋军, 等. 基于磁光子晶体的磁控可调谐太赫兹[J]. 物理学报, 2011, 60(7): 074218.