

文章编号: 2095-4980(2016)04-0502-06

基于自旋电子学的太赫兹波产生方法

冯 正^{a,b}, 谭 为^{a,b}, 成彬彬^{a,b}, 邓贤进^{a,b}

(中国工程物理研究院 a.电子工程研究所; b.微系统与太赫兹研究中心, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 自旋电子学的某些物理现象, 如交换型磁振子、反铁磁共振、超快自旋动力学等, 其特征频率刚好处于太赫兹频段。利用相应的自旋电子学现象和原理, 研究人员发现和建立了若干新型的太赫兹波产生方法, 为新型太赫兹源的实现和发展提供指导方向。这些新型产生方法有: a) 自旋注入产生太赫兹波; b) 基于反铁磁共振的太赫兹波产生; c) 基于超快自旋动力学的太赫兹波产生。理论及实验结果表明, 基于自旋电子学的太赫兹产生方法具有较大的潜力, 有望推动太赫兹技术的发展。

关键词: 太赫兹波; 自旋电子学; 自旋注入; 磁振子; 反铁磁共振; 超快自旋动力学

中图分类号: TN4; O469

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201604.0502

THz wave generation methods based on spintronics

FENG Zheng^{a,b}, TAN Wei^{a,b}, CHENG Binbin^{a,b}, DENG Xianjin^{a,b}

(a.Institute of Electronic Engineering; b.Microsystem and Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: Spintronics is an exciting discipline that involves the study of active control and manipulation of spin degrees of freedom in solid-state systems, the study of spin transport and invention of novel spin-based devices. Some physical phenomena in spintronics, such as exchange magnon, antiferromagnetic resonance, ultrafast spin dynamics, present characteristic frequencies in the THz range. Utilizing the physical principles, the researchers have found and developed several novel THz wave generation methods which give instructions to develop novel THz sources. The methods include: a) THz wave generation based on spin injection; b) THz wave generation based on antiferromagnetic resonance; c) THz wave generation based on ultrafast spin dynamics. THz wave generation methods based on spintronics have great potential which may promote the progress of THz technology.

Key words: THz wave; spintronics; spin injection; magnon; antiferromagnetic resonance; ultrafast spin dynamics

太赫兹(THz)波是指频率从 0.1 THz 到 10 THz, 介于毫米波与红外光之间的电磁波。太赫兹波具有许多独特性质, 比如透射性、安全性、很强的光谱分辨本领等, 这些性质赋予太赫兹波广泛的应用前景, 包括太赫兹雷达和通信、光谱和成像、无损探伤、安全检测等方面。近年来, 基于电子学、光学以及超快光电子学的太赫兹源和探测手段, 已经基本填补电磁波谱中的“太赫兹空隙”, 使得太赫兹科学和技术得以飞速发展^[1]。然而, 太赫兹应用对高效、高功率、低成本、室温工作的太赫兹源依然具有强烈的需求。因此在现有源的基础上改进, 或基于新的物理原理发展满足上述要求的太赫兹源具有重要意义。自旋电子学是指控制和操纵电子自旋, 研究其输运性质及构建新颖器件的一门学科^[2-3]。自旋电子学的某些物理现象, 如交换型磁振子^[4-5]、反铁磁共振^[6-10]和超快自旋动力学^[11]等, 其特征频率刚好处于太赫兹频段; 这使得太赫兹与自旋电子学相结合, 形成了太赫兹自旋电子学这一新兴交叉学科, 推动了 2 个学科的发展。利用相应的自旋电子学现象和原理, 研究人员发现和建立了若干新型的太赫兹波产生方法, 主要有: a) 自旋注入产生太赫兹波^[5]; b) 基于反铁磁共振的太赫兹波产生^[6-9]; c) 基于超快自旋动力学的太赫兹波产生^[11]。下面分别介绍这 3 类方法的原理、研究现状、存在问题及发展趋势。

收稿日期: 2015-06-03; 修回日期: 2015-07-21

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(11504345); 中国工程物理研究院微系统与太赫兹研究中心专项资助项目(MT2015-11-04); 中国工程物理研究院成都基地团队培育专项资助项目(PY2014-5-1)

1 自旋注入产生太赫兹波

磁振子(Magnon)是磁性材料中自旋波的元激发,分为偶极型和交换型,其频率从微波(偶极型)到太赫兹(交换型)频段^[4]。美国的 2 位前苏联科学家 B G Tankhilevich 和 Y Korenblit 在理论上提出一种基于自旋注入激发磁振子从而产生太赫兹波的方法^[5]。这种方法的原则和过程见图 1:向完全自旋极化的磁性材料(半金属磁体或铁磁半导体)注入自旋极化电流,其极化方向与磁性材料的自旋取向相反,注入电子从自旋向下子带跃迁到自旋向上子带,释放出交换型磁振子,其频率刚好处于太赫兹频段;2 个频率相同、波矢相反的磁振子由于相互作用,湮灭成一个两倍频的光子;当注入的电流密度超过阈值时,由交换能隙决定的某一太赫兹频率的磁振子发生雪崩效应,大量磁振子湮灭,从而产生高功率的连续太赫兹波。

基于以上原理和方法, B G Tankhilevich 和 Y Korenblit 提出实现太赫兹波发射的原理型器件结构,即磁振子太赫兹源,申请了一系列专利^[12-16]。理论预测磁振子太赫兹源具有以下众多优点: a) 功率高, mW 量级以上; b) 可室温工作; c) 器件简单便携,可大批量生产降低成本; d) 输出连续波,带宽窄(<1 GHz, 可到 1 MHz); e) 通过材料的选择可覆盖整个太赫兹频段; f) 通过外部参数(磁场、电场、静压力等)可调控太赫兹波的频率。他们给出了一些备选材料,如 EuO 和 Co₂FeSi 等,并计算获得 EuO 产生的太赫兹波的频率为 0.54 THz;他们也推导出发射的太赫兹波频率随外加磁场大小呈线性变化,1 T 的磁场可使频率改变 0.056 THz。

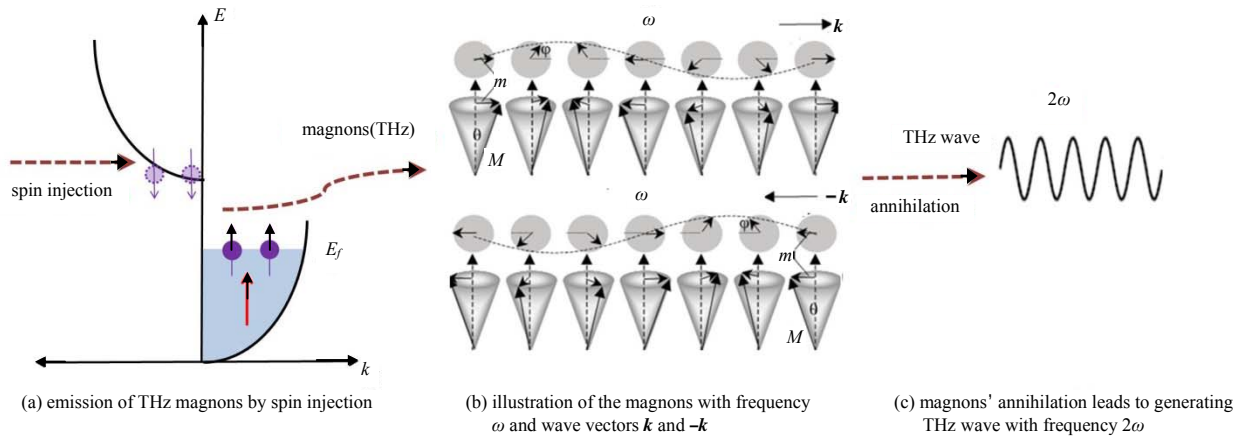


Fig.1 Principle and progress of THz wave generation by spin injection
图1 自旋注入激发磁振子产生太赫兹波的原理和过程

以上都为理论工作, B G Tankhilevich 和 Y Korenblit 没有开展实验研究,在他们文章里提到 Y V Gulayev 等人的实验^[17-19]:利用点接触结构向铁镍合金薄膜注入自旋极化相反的电子,测量到太赫兹波功率,见图 2。此实验表明自旋注入可产生太赫兹波,但产生机理存在争议。Y V Gulayev 等人用自旋翻转跃迁发射太赫兹波解释他们的实验结果;而 B G Tankhilevich 和 Y Korenblit 认为铁镍合金不存在交换能隙,可能的机理是他们提出的磁振子产生湮灭发射太赫兹波。在后续的实验中, Y V Gulayev 等人向半金属磁性薄膜 Fe₃O₄ 注入自旋极化相反的电流,也测量到太赫兹波功率,且功率更大,阈值电流更小(阈值电流为铁镍合金的 1/3,功率约提升一个数量级)^[20],这与磁振子产生湮灭机制更吻合;然而太赫兹波向各个角度发射,无角度择优取向性。因此需要进一步实验研究自旋注入产生太赫兹波,明晰其产生机理,为获得高功率定向发射的连续波太赫兹源提供理论和实验基础。

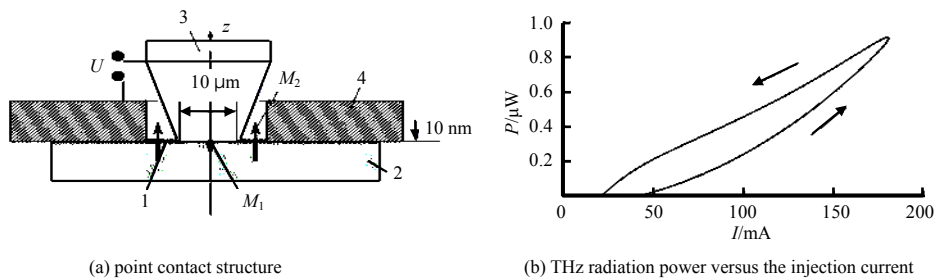


Fig.2 Spin injection THz wave generation based on point contact structure^[14]
图2 基于点接触结构的自旋注入产生太赫兹波^[14]

2 基于反铁磁共振的太赫兹波产生

磁性材料主要分为铁磁材料、反铁磁材料和亚铁磁材料等。铁磁材料在某一频率微波的激发下,磁化强度矢量围绕有效磁场进动,并对微波产生吸收,这种现象称为铁磁共振。反铁磁材料也存在共振现象,即反铁磁共振,其共振频率刚好处于太赫兹频段,如 NiO, MnO 和 MnF₂ 的反铁磁共振频率分别为 1 THz^[6], 0.83 THz^[8] 和 0.25 THz^[21]。利用太赫兹波激发反铁磁共振时,磁性次格子的磁化强度矢量 M_1 和 M_2 围绕易轴进动,并吸收太赫兹波,见图 3(a)。这个过程存在逆过程,即利用其他方式激发反铁磁共振,会产生与共振频率相同的太赫兹波。其原理为: M_1 和 M_2 进动时,可看作一个等效的磁偶极子 $m(t)$ 以共振频率振荡;由经典电磁场理论可知,磁偶极子振荡产生电磁波;由于振荡频率处于太赫兹频段,产生的电磁波为太赫兹波。激发反铁磁共振的其他方式主要有自旋极化电流和飞秒激光脉冲,分别见图 3(b)和图 3(c)。

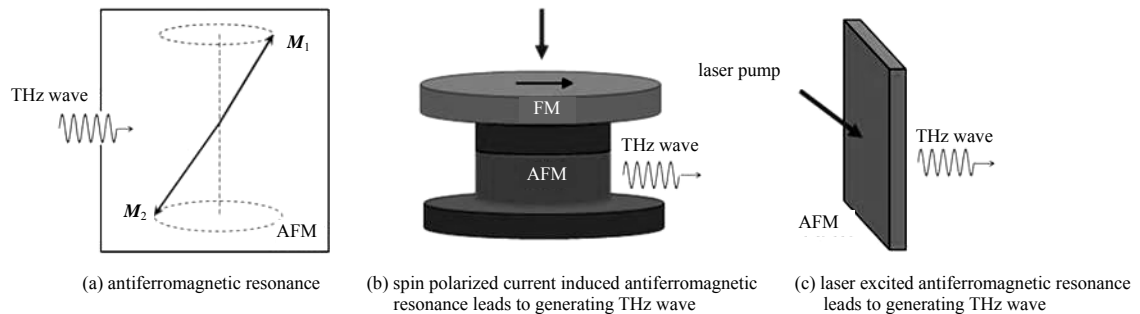


Fig.3 THz wave generation based on antiferromagnetic resonance
图3 基于反铁磁共振的太赫兹波产生

自旋极化电流激发反铁磁共振基于自旋转移矩效应。1996年, Slonczewski^[22]和 Berger^[23]通过理论计算预测出,当自旋极化电流流过铁磁薄膜时,自旋角动量将从极化电子转移到铁磁薄膜磁矩,从而对磁矩产生自旋矩,引起磁矩的不平衡,使之发生转动、进动甚至翻转,此效应称为自旋转移矩效应。自旋极化电流与铁磁薄膜的自旋转移矩效应,理论和实验已有大量研究^[24];自旋极化电流与反铁磁薄膜之间也存在自旋转移矩效应,最近的实验证实了这一点^[25-26]。基于自旋转移矩激发磁矩进动(铁磁共振),研究人员在实验上观测到微波的产生^[27],目前的研究水平为频率 0.3 GHz~20 GHz,功率接近 1 μ W;同理自旋转移矩也可以激发反铁磁共振,从而产生太赫兹波,见图 3(b)。但后者只限于理论工作^[7,9-10],还未在实验上证实;实验上实现此效应是一项有挑战性的工作,对基础研究和构建太赫兹振荡器具有重大意义。

飞秒激光脉冲激发反铁磁共振从而产生太赫兹波,已经被实验所证实。Nishitani 等人^[6]利用图 4(c)的装置进行实验,将线极化的飞秒激光脉冲照射到反铁磁材料 NiO 单晶样品上,通过 ZnTe 自由空间电光采样技术测量产生的太赫兹波;图 4(a)为测量获得的太赫兹波时域波形,波形呈周期性振荡形式;对时域波形进行傅里叶变换得到其频谱,其振荡频率为 1 THz,见图 4(b)。1 THz 刚好是 NiO 的反铁磁共振频率,这说明太赫兹波的产生来源于反铁磁共振。用飞秒激光脉冲照射反铁磁 MnO 单晶,也观测到太赫兹波产生,频率为 0.83 THz,与其反铁磁共振频率对应^[8]。

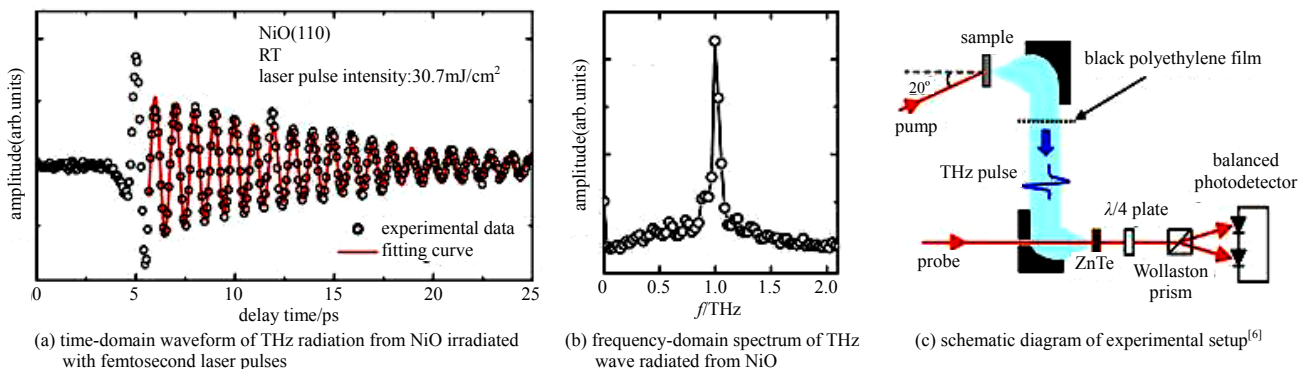


Fig.4 THz wave generation based on femtosecond laser pulse induced antiferromagnetic resonance
图4 基于飞秒激光脉冲激发反铁磁共振的太赫兹波产生

3 基于超快自旋动力学的太赫兹波产生

宽带太赫兹波在时域光谱和医学成像等方面具有重要应用,现有的产生方法主要是利用飞秒激光脉冲照射非线性晶体和光电导天线等。基于超快自旋动力学过程, Kampfrath 等人发现了一种新的宽带太赫兹波产生方法^[11]。他们利用飞秒激光脉冲照射到铁磁/非磁异质双层薄膜上,如 Fe/Au 和 Fe/Ru, 获得了太赫兹脉冲,即宽带太赫兹波,见图 5(a)。

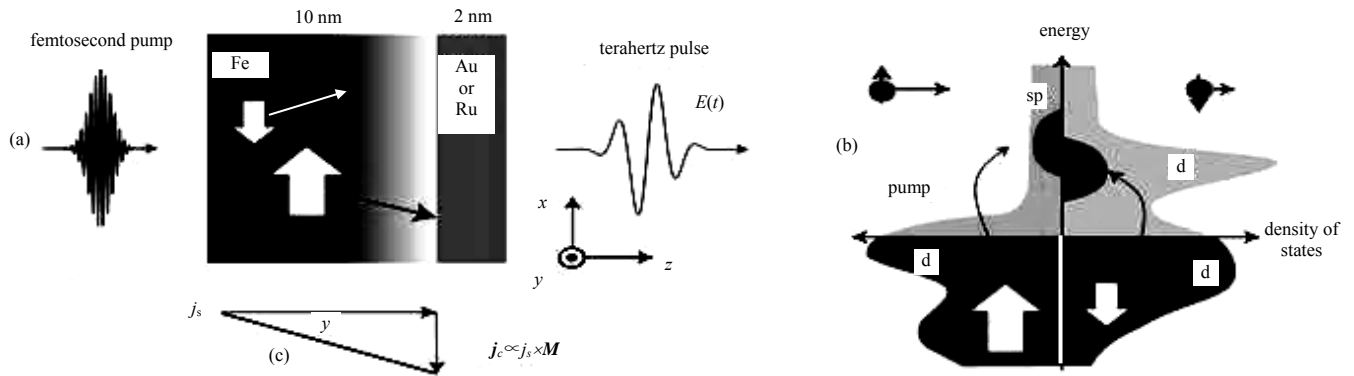


Fig.5 THz pulse generation based on FM/NM bilayer (a) THz pulse emission from Fe/Au or Fe/Ru bilayer excited by femtosecond laser pulses (b) transition process of spin up and spin down electrons in Fe layer excited by laser pump (c) inverse spin Hall effect: spin current j_s is converted into a charge current j_c ^[11].

图5 基于铁磁/非磁双层薄膜的太赫兹脉冲产生

这种新方法的原理为:当飞秒激光脉冲照射到 Fe/Au 或 Fe/Ru 双层薄膜上时, Fe 层吸收光能量使电子从费米面下 d 带跃迁到费米面以上的能带,产生非平衡的电子分布;受激发的自旋向上电子呈现 sp 电子特性,而向下电子呈现 d 电子特性,故向上电子的运动速度比向下快 5 倍,见图 5(b);结果产生从 Fe 层到相邻非磁层 (Au 或 Ru) 的瞬时自旋极化传输,即瞬时的自旋流;由于反自旋霍尔效应^[28],自旋向上和向下电子被散射到相反方向,注入非磁层的瞬时自旋流转变成瞬时的电荷流,见图 5(c),从而辐射出宽带太赫兹脉冲。图 6(a)分别显示受激发的 Fe/Ru 和 Fe/Au 产生的宽带太赫兹时域波形,波形随着 Fe 层磁化强度反向而相反,说明反自旋霍尔效应参与产生过程;图 6(b)为对应时域波形的傅里叶变换频谱,由于电子在 Ru 和 Au 中的弛豫过程不同,呈现出不同的带宽。

由上可知,铁磁/非磁双层薄膜是潜在的宽带太赫兹波发生器,具有易制备,价格低廉等优点,带宽可通过选择不同的铁磁/非磁组合进行调节。实验中的 Fe(10 nm)/Au(2 nm)样品的发射效率只有 300 μm 厚的 ZnTe 晶体(标准发生器)的 1%;但相信通过优化铁磁/非磁结构,如选择自旋霍尔角更大的非磁薄膜^[29]、改变薄膜厚度等,可使发射效率成量级地提高,达到甚至超过 ZnTe 晶体的效率。

4 结论

本文对基于自旋电子学的 3 种新型太赫兹波产生方法及其特点和发展现状进行了分析和综述。自旋注入可激发太赫兹磁振子,磁振子湮灭产生连续太赫兹波,这种理论提出的方法已有初步实验显示具有可行性,但需进一步的实验验证;用飞秒激光脉冲、极化电流等方式可激发反铁磁共振,磁偶极子振荡辐射出共振频率的太赫兹波,前一种方式已观测到,后一种方式可构造太赫兹振荡器,实验实现具有重大意义和挑战性;飞秒激光脉冲照射铁磁/非磁异质双层膜,激发超快自旋流从铁磁层进入非磁层,超快自旋流由于反自旋霍尔效应转变成瞬时电荷流,

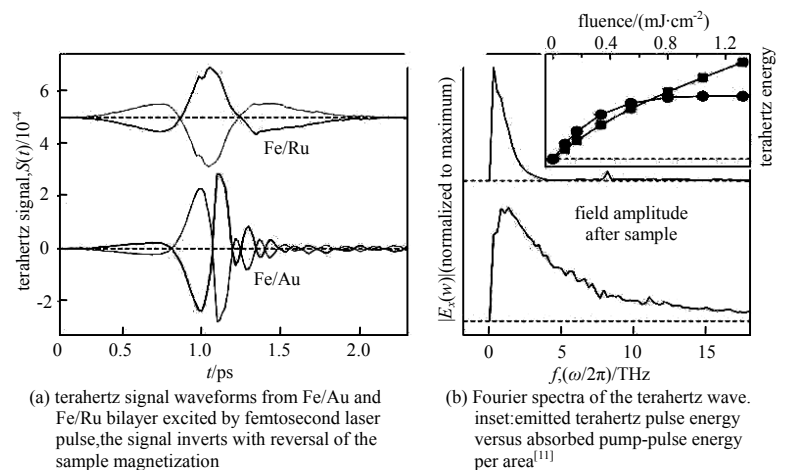


Fig.6 THz pulse waveforms and their Fourier spectra from FM/NM bilayer

图6 铁磁/非磁双层薄膜产生的太赫兹脉冲波形及其傅里叶变换频谱

从而产生宽带太赫兹脉冲, 以此可获得易制备、价格低廉且带宽可调的宽带太赫兹波发生器, 但需进一步研究如何提高发射效率。这3种方法既能产生连续太赫兹波, 又可产生宽带太赫兹波, 将为新型太赫兹源的实现和发展提供思路和途径。

参考文献:

- [1] 许景周,张希成. 太赫兹科学技术和应用[M]. 北京:北京大学出版社, 2007. (XU Jingzhou,ZHANG Xicheng. Terahertz Science and Technology and Its Applications[M]. Beijing:Beijing University Press, 2007.)
- [2] BADER S D,PARKIN S S P. Spintronics[J]. Annual Review of Condensed Matter Physics, 2010,1(1):71–88.
- [3] Žutić I,FABIAN J,SARMA S D. Spintronics:Fundamentals and applications[J]. Reviews of Modern Physics, 2004,76(2):323–410.
- [4] LENK B,ULRICH H,GARBS F,et al. The building blocks of magnonics[J]. Physics Reports, 2011,507(4/5):107–136.
- [5] TANKHILEVICH B G,KORENBLIT Y. Novel spintronic device:terahertz magnon-photon laser[J]. Journal of Physics:Conference Series, 2011,263(1):012004.
- [6] NISHITANI J,KOZUKI K,NAGASHIMA T,et al. Terahertz radiation from coherent antiferromagnetic magnons excited by femtosecond laser pulses[J]. Applied Physics Letters, 2010,96(22):221906.
- [7] CHENG R,XIAO J,NIU Q,et al. Spin pumping and spin-transfer torques in antiferromagnets[J]. Physical Review Letters, 2014,113(5):057601.
- [8] NISHITANI J,NAGASHIMA T,HANGYO M. Terahertz radiation from antiferromagnetic MnO excited by optical laser pulses[J]. Applied Physics Letters, 2013,103(8):081907.
- [9] GOMONAY H V,LOKTEV V. Spin transfer and current-induced switching in antiferromagnets[J]. Physical Review B, 2010, 81(14):144427.
- [10] GOMONAY H,LOKTEV V. Spin torque antiferromagnetic nanooscillator in the presence of magnetic noise[J]. Condensed Matter Physics, 2012,15(4):43703.
- [11] KAMPFRATH T,BATTIATO M,MALDONADO P,et al. Terahertz spin current pulses controlled by magnetic heterostructures[J]. Nature Nanotechnology, 2013,8(4):256–260.
- [12] KORENBLIT Y,TANKHILEVICH B G. US Patent 7430074. Generation of terahertz waves[S]. 2008.
- [13] KORENBLIT Y,TANKHILEVICH B G. US Patent 7440178. Tunable generation of terahertz radiation[S]. 2008.
- [14] KORENBLIT Y,TANKHILEVICH B G. US Patent 7471449. Method and apparatus for generating Terahertz radiation with magnon gain medium and magnon mirror[S]. 2008.
- [15] KORENBLIT Y,TANKHILEVICH B G. US Patent 7508578. Magnon laser[S]. 2009.
- [16] KORENBLIT Y,TANKHILEVICH B G. US Patent 7706056. Modulation of terahertz radiation[S]. 2010.
- [17] GULAYEV Y V,ZILBERMAN P E,CHIGAREV S G,et al. Spin-polarized current in a rod-to-film structure[J]. Journal of Communications Technology and Electronics, 2010,55(10):1132–1136.
- [18] GULAYEV Y V,ZILBERMAN P E,MALIKOV I V,et al. Current induced spin injection and terahertz radiation in ferromagnetic junctions[J]. Doklady Physics, 2011,56(5):265–267.
- [19] GULAYEV Y V,ZILBERMAN P E,MALIKOV I V,et al. Spin injection terahertz radiation in magnetic junctions[J]. JETP Letters, 2011,93:259–262.
- [20] GULAYEV Y V,CHIGAREV S G,MALIKOV I V,et al. Efficiency of the terahertz spin-injection emitter[J]. Journal of Communications Technology and Electronics, 2011,56(11):1363–1366.
- [21] ROSS M P. Spin dynamics in an antiferromagnet[D]. [S.l.]:Technische Universität München, 2013.
- [22] SŁONCZEWSKI J C. Current-driven excitation of magnetic multilayers[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1996, 159(1/2):L1–L7.
- [23] BERGER L. Emission of spin waves by a magnetic multilayer traversed by a current[J]. Physical Review B, 1996,54(13):9353–9360.
- [24] RALPH D C,STILES M D. Spin transfer torques[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2008,320(7):1190–1216.
- [25] WEI W,SHARMA A,NUNEZ A S,et al. Changing exchange bias in spin valves with an electric current[J]. Physical Review Letters, 2007,98(11):116603.
- [26] URAZHIDIN S,ANTHONY N. Effect of polarized current on the magnetic state of an antiferromagnet[J]. Physical Review Letters, 2007,99(4):046602.
- [27] KISELEV S I,SANKEY J C,KRIVOROTOV I N,et al. Microwave oscillations of a nanomagnet driven by a spin-polarized current[J]. Nature, 2003,425(6956):380–383.

- [28] SAITOH E,UEDA M,MIYAJIMA H,et al. Conversion of spin current into charge current at room temperature:Inverse spin-Hall effect[J]. Applied Physics Letters, 2006,88(18):182509.
- [29] FENG Zheng,HU Jian,SUN Liang,et al. Spin Hall angle quantification from spin pumping and microwave photoresistance[J]. Physical Review B, 2012,85(21):214423.

作者简介:



冯 正(1986-),男,四川省泸州市人,博士,副研究员,主要研究方向为太赫兹自旋电子学.email:fengzheng@caep.cn.

谭 为(1985-),男,长沙市人,博士,副研究员,主要研究方向为太赫兹微纳器件.

成彬彬(1980-),男,湖北省随州市人,博士,副研究员,主要研究方向为太赫兹雷达与成像技术.

邓贤进(1973-),男,四川省安岳县人,硕士,研究员,主要研究方向为太赫兹应用技术和系统.

(上接第 501 页)

- [9] 谢云宇,胡昌华,师彪,等. 超分辨率重建技术及其在太赫兹图像中的应用[J]. 系统仿真技术, 2013,9(4):306-309. (XIE Yunyu,HU Changhua,SHI Biao,et al. Super-resolution reconstruction technology and its application in the terahertz images[J]. System Simulation Technology, 2013,9(4):306-309.)
- [10] 李琦,夏志伟,丁胜晖,等. 采用非局部均值的连续太赫兹图像去噪处理[J]. 红外与激光工程, 2012,41(2):517-522. (LI Qi,XIA Zhiwei,DING Shenghui,et al. Continuous terahertz image denoising processing using nonlocal means[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012,41(2):517-522.)
- [11] GASTAL E S L,OLIVEIRA M M. Adaptive manifolds for real-time high-dimensional filtering[J]. ACM Transactions on Graphics, 2012,31(4):1-13.
- [12] WANG Z,BOVIK A C,SHEIKH H R,et al. Image quality assessment:from error visibility to structural similarity[J]. IEEE Transaction on Image Processing, 2004,13(4):600-612.

作者简介:



朱书进(1988-),男,浙江省温州市人,在读博士研究生,主要研究方向为毫米波超分辨率处理. email:zsj0577@163.com.

李跃华(1959-),男,江苏省宿迁市人,教授,博士生导师,主要研究方向为毫米波近程探测系统设计、精确探测、成像与目标识别.