基于超快自旋电子学太赫兹发射源的研究与应用

孙 芸[1,2,3,4],张 帆[3],王航天[1],白中扬[1],孙 统[1],彭静宜[1],张 盈[1],刘永山[1,3],王梓力[1],李 竞[1],高 凡[1],赵兴科[1],谢巍然[1],田祺云[1],张 婕[1],许 涌[1,3],张 慧[1,2],温良恭[1,2,4],聂天晓[1,2,3,4],赵巍胜[1,2,3,4]

(1. 北京航空航天大学集成电路科学与工程学院费尔北京研究院,北京 100191; 2. 北京航空航天大学杭州创新研究院,浙江杭州 310051; 3. 北京航空航天大学合肥创新研究院,安徽合肥 230012; 4. 北京航空航天大学深圳研究院,广东深圳 518057)

摘 要: 太赫兹科学技术在生物传感、显微成像、无线通信、无损检测等领域展现出了巨大的研究潜力和应用价值. 然而,目前制约太赫兹技术快速发展的瓶颈之一在于缺乏高效率、高集成度、低功耗以及易调制的太赫兹发射源器件. 自旋太赫兹源基于铁磁层/非磁层异质结体系中的超快自旋-电荷转换产生太赫兹辐射,具有宽频带、低成本、易加工、高场强等优势,近年来吸引了许多国内外学者的研究兴趣. 本文首先对基于超快自旋动力学的太赫兹发射机理进行了简要介绍,分析并综述了其效率调控与优化的可行方案;并进一步针对自旋太赫兹的新型发射机理及研究应用前景进行了重点分析,新型发射包括基于不同手性及偏振态自旋太赫兹的发射及基于新材料体系的自旋太赫兹发射源探索,应用前景包括自旋太赫兹光谱技术、自旋太赫兹成像技术及自旋太赫兹发射-调控一体化技术等;最后总结全文,并对未来基于超快自旋电子学太赫兹发射源的改善、探索及应用,以及基于太赫兹电磁脉冲研究自旋电子学的微观机理做出了展望.

关键词: 太赫兹发射; 自旋电子学; 超快自旋动力学; 自旋太赫兹发射源; 太赫兹发射-调控一体化; 太赫兹通信

中图分类号: TN29;TN40 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2022)12-2854-20

电子学报 URL:http://www.ejournal.org.cn **DOI:**10.12263/DZXB.20221241

Research and Application of Spintronic Terahertz Emitter Based on Ultrafast Spintronics

SUN Yun[1,2,3,4], ZHANG Fan[3], WANG Hang-tian[1], BAI Zhong-yang[1], SUN Tong[1], PENG Jing-yi[1], ZHANG Ying[1], LIU Yong-shan[1,3], WANG Zi-li[1], LI Jing[1], GAO Fan[1], ZHAO Xing-ke[1], XIE Wei-ran[1], TIAN Qi-yun[1], ZHANG Jie[1], XU Yong[1,3], ZHANG Hui[1,2], WEN Liang-gong[1,2,4], NIE Tian-xiao[1,2,3,4], ZHAO Wei-sheng[1,2,3,4]

(1. *Fert Beijing Institute, School of Integrated Circuit Science and Engineering, Beihang University, Beijing* 100191, *China*;
2. *Hangzhou Innovation Institute, Beihang University, Hangzhou, Zhejiang* 310051, *China*;
3. *Hefei Innovation Research Institute, Beihang University, Hefei, Anhui* 230012, *China*;
4. *Shenzhen Institute of Beihang University, Shenzhen, Guangdong* 518057, *China*)

Abstract: Terahertz(THz) technology has shown great research potential and application value in biosensing, microscopic imaging, wireless communication, nondestructive testing and other fields. However, one of the bottlenecks restricting the rapid development of THz technology is the lack of high efficiency, high integration, low power consumption and easily modulated THz emitters. The THz radiation generated by spintronic terahertz emitter(STE) based on the ultrafast spin to charge conversion in ferromagnetic/non-magnetic heterostructure has the advantages of wide frequency band, low cost, easy fabrication and high field intensity, which has attracted the interest of many scholars at home and abroad in recent years. In this paper, the THz emission mechanism based on ultrafast spin dynamics are briefly introduced. And the feasible schemes to regulate and optimize its efficiency are further analyzed and reviewed. Furthermore, the new emission mechanisms and

收稿日期:2022-10-30;修回日期:2022-12-30;责任编辑:宋甲英
基金项目:国家自然科学基金(No.62274009,No.11904016,No.52003014,No.62105011);广东省粤深联合基金重点项目(No.2021B1515120012);工信部制造业高质量发展专项的产业链协同创新类项目(No.TC220A04A-78);北航合肥创新研究院项目(No.BHKX-19-01,No.BHKX-19-02)

application prospects of STE are analyzed. New emission mechanisms include the emission of spintronic THz with different chirality and polarization states, and the exploration of STE based on new-type materials. And application prospects include spintronic THz spectroscopy, spintronic THz imaging and spintronic THz emission-regulation integration technology. Finally, the paper is summarized, and the future improvement, exploration and application of ultrafast spintronic terahertz emission sources, as well as the microscopic mechanism of spintronics driven by terahertz electromagnetic pulse are prospected.

Key words: terahertz emission; spintronics; ultrafast spintronic dynamics; spintronic terahertz emitter; terahertz emission-regulation integration; terahertz communication

1 引言

太赫兹(Terahertz,THz)频段处在电磁波谱上的特殊位置,位于红外和微波之间,是宏观电子学与微观光子学的过渡频段. 太赫兹辐射提供了低光子能量(1 THz约4.1 meV)下光与物质相互作用的补充,包括分子旋转、晶格振动、电子输运、自旋进动等[1,2];与高频段紫外到X射线波段相比,太赫兹具有低能性,因此可以在无损的情况下进行生物检测;太赫兹频带宽、波长短、方向性好,适用于高速无线宽带通信;太赫兹在木材、塑料等非金属、非极性材料中具有高透性,在军事侦察、探测领域具有特殊优势. 因此,太赫兹科学技术不仅是开展基础研究的强有力手段,而且在无线通信、医学诊断、无损检测、军事安全等领域具有广泛的应用前景.

基于太赫兹技术的重要作用,探索和开发高效率、宽带宽、易集成的太赫兹发射源已成为太赫兹领域的研究热点之一. 近年来,随着飞秒激光技术的发展,基于激光泵浦的太赫兹发射源研究得到了广泛关注. 传统的太赫兹源主要依赖半导体材料、非线性晶体、等离子体等方式[3]. 半导体材料(如InGaAs)与飞秒激光作用产生太赫兹时,由于空间电荷效应和电场击穿,限制了产生太赫兹辐射的效率,且商用化的光电导天线价格昂贵;非线性晶体(如$LiNbO_3$)的太赫兹产生效率通常随着厚度的增加而增加,但厚度的增加往往会导致泵浦场和发射太赫兹场的相位不匹配,进而会降低太赫兹辐射的带宽[1];等离子体可以产生强场、宽谱的太赫兹波,但系统较为复杂[4]. 这些方法在成本、带宽、便携性等方面存在一定的不足,而基于超快自旋动力学过程产生太赫兹辐射的方法兼顾低成本、宽频带、高效率、易集成等优势,因此自旋太赫兹的发射逐渐引起了国内外学者的研究兴趣.

飞秒激光的发展也使其常用来探测磁性材料微观系统发生快速变化时的自旋动力学现象,进而形成了超快自旋电子学[5-7]. 超快自旋电子学促进了太赫兹领域的发展,尤其是在太赫兹发射方面. 2004年,法国Beaurepaire等人[8]发现用飞秒激光照射铁磁薄膜时,由于铁磁薄膜的超快退磁而产生了太赫兹电磁脉冲,但是由于磁性薄膜产生的太赫兹信号较弱,自旋太赫兹发射在较长时间内一直作为研究超快磁动力学过程中的一项辅助手段. 直到2013年,德国Kampfrath等人[9]报道了在磁性异质结材料Fe/Au和Fe/Ru中测得太赫兹电磁脉冲,他们发现通过逆自旋霍尔效应可以把超快自旋流转化为面内的超快电荷流,并辐射太赫兹波. 这一研究实现了利用磁性异质结控制自旋流并由此产生太赫兹脉冲,开启了自旋太赫兹源研究领域的大门. 自旋太赫兹发射源辐射出的频率在1~30 THz范围,没有任何光谱间隙,它几乎可以由任意波长的激光驱动,这与基于半导体材料的太赫兹源形成了鲜明的对比,且自旋太赫兹源稳定性高,损伤阈值高,可以大面积制备并方便进行微结构加工.

自旋太赫兹发射源的上述优点使其在太赫兹领域的研究和应用方面展现出巨大潜力. 本文围绕自旋太赫兹发射源的基本介绍、效率优化、新型发射机理及未来应用前景四个方面展开叙述,着重回顾并展望了当前自旋太赫兹发射方面的重点研究方向. 如图1所示,以自旋太赫兹发射为研究中心,着重对其效率优化、偏振调控、新型发射、光谱技术、成像技术、发射-调控一体化技术等方面分别进行综述,回顾研究背景,聚焦当下现状,展望未来热点.

2 基于超快自旋动力学的太赫兹发射

自旋太赫兹发射由一系列物理过程组成. 首先,飞秒激光泵浦铁磁层/非磁层异质结,激发铁磁层产生自旋向上和自旋向下电子的非平衡态;其次,由非平衡态产生的超快自旋流注入相邻的非磁层;再次,通过非磁层的自旋-轨道耦合作用,超快自旋流转换为瞬态电荷流;最后,亚皮秒量级时间尺度的瞬态电流在自由空间辐射为太赫兹脉冲.

利用飞秒激光激发铁磁薄膜能够产生太赫兹辐射,这一现象早在2004年就由Beaurepaire等人[8]报道. 他们发现利用飞秒激光使Ni薄膜超快退磁能够产生太赫兹辐射,他们引入了一个时变的磁偶极子,并用麦克斯韦方程进行了解释,指出产生的太赫兹脉冲与磁化的二阶导数成正比(d^2M/dt^2). 在这之前,Beaurepaire已经报道Ni的亚皮秒退磁过程,并给出了著名的三温度模型[10],指出超快退磁过程伴随着电子、自旋和晶格之间的热量交换. 虽然基于超快退磁产生的太赫兹辐射对揭示铁磁材料的超快自旋动力学具有重要意义,但

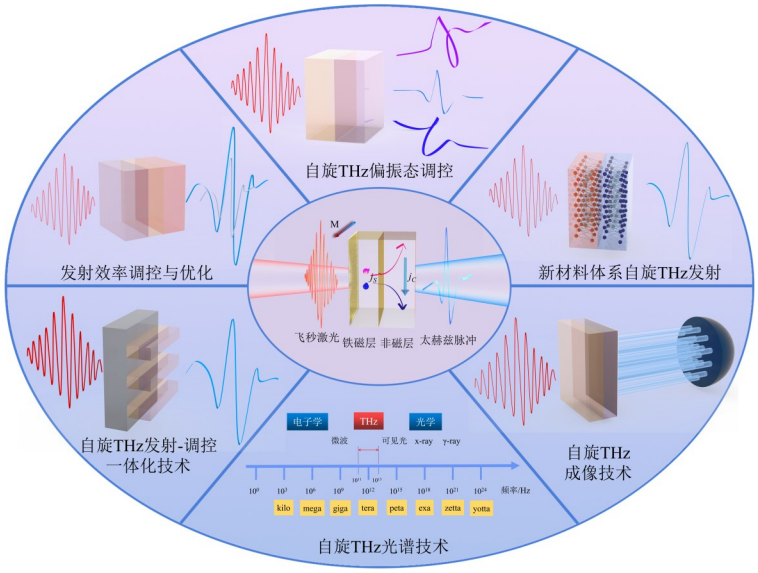


图1 自旋太赫兹发射源的示意图及其效率优化、新型发射及应用前景的研究框架

是由于这种磁偶极子太赫兹辐射并不是一种高效率的太赫兹辐射机制,所以磁性材料的太赫兹发射在较长时间内作为一种辅助研究手段而未受到广泛关注.

直到2013年,Kampfrath等人[9]提出了一种基于铁磁层/非磁层异质结的自旋太赫兹发射机制,飞秒激光将铁磁层中的电子激发到高于费米能级的能态,由于常见的3d金属(如Fe,Co和Ni)中自旋向上(多数)电子自由程和寿命显著高于自旋向下(少数)电子,因此铁磁层中产生自旋极化的超扩散电流j_S,净自旋流由铁磁层输运到非磁性金属层,由于非磁层自旋-轨道耦合作用的逆自旋霍尔效应,超快自旋流j_S可以有效地在铁磁/非磁界面转化为超快电荷流j_C,并产生太赫兹辐射,这一通过自旋-电荷转换(Spin to Charge Conversion,SCC)产生自旋太赫兹辐射的过程如图1中心示意图所示.Battiato等人[11~13]通过一系列研究指出,在3d铁磁体中观察到的超快退磁机制可以通过超扩散自旋输运模型解释,在飞秒激光的激发下,3d铁磁体中的电子从d带激发到高于费米能级的类sp带,进而产生非平衡态.由于激发产生的自旋向上(多数)和自旋向下(少数)电子在磁场作用下的电子寿命和运动速度不同,因此,自旋向上(多数)电子在传输过程中大多数注入非铁磁层中,并产生较强的自旋极化电流,铁磁薄膜由于大多数载流子从表面转移而发生较强的退磁过程.

由于通过自旋-电荷转换产生的太赫兹来源于电偶极子辐射,相比于超快退磁产生的太赫兹辐射,信号有了大幅提升,因此基于不同材料体系和发射机理的自旋太赫兹发射受到了广泛关注.自旋霍尔效应为通过非磁层的自旋-轨道耦合效应将电流转换为自旋流的过程,逆自旋霍尔效应作为其逆过程,通过将超快自旋流转换为超快电荷流产生自旋太赫兹辐射,因此,基于重金属、拓扑绝缘体、二维过渡金属二硫属化物和外尔半金属等材料的自旋-轨道耦合作用可以用于基于逆自旋霍尔效应的自旋太赫兹发射研究.

同时,拓扑绝缘体体系中存在强自旋-轨道相互作用,其表面态形成两个自旋分裂的能带并具有自旋-动量锁定特性,因此通过拓扑绝缘体特殊的表面态可以实现基于Edelstein效应的电荷流与自旋流的转化.Rojas-Sanchez等人[14]利用α-Sn/Ag/Fe体系实现了自旋-电荷转换,并将其归因于Edelstein效应的逆过程,即逆Edelstein效应[15].除拓扑绝缘体外,界面Rashba自旋-轨道耦合效应也表现出高效的自旋-电荷转换,由于自旋-轨道耦合以及空间反演对称性破缺,Rashba界面形成了两重简并的能带结构,其中自旋和动量是紧密关联的.Sanchez等人[16]利用自旋泵浦实验发现了NiFe/Ag/Bi能够实现自旋-电荷转换,自旋电荷转换来源于Bi/Ag界面的Rashba耦合.Zhou等人[17]和Jungfleisch等人[18]分别在Fe/Bi/Ag体系和CoFeB/Bi/Ag中发现了太赫兹辐射,并通过逆Rashba-Edelstein效应来解释整个过程,与逆自旋霍尔效应产生的太赫兹辐射相比,逆Rashba-Edelstein效应产生的太赫兹相位受Bi/Ag的生长顺序和激光的螺旋度控制.2021年,Shen等人[19]通过Fe/Ag/Bi/Py结构的自旋泵浦效应证明相较于逆Rashba-Edelstein效应来说,逆自旋霍尔效应是其主要的自旋-电荷转换机制;并进一步通过飞秒激光诱导Ag/Bi双层结构的太赫兹发射,发现其中没有逆Rashba-Edelstein效应的发射分量,该工作为区分Rashba电子态下的逆Rashba-Edelstein和逆自旋霍尔效应两种自旋-电荷转换机制提供了一种很好的借鉴方式.

除此之外,Zhang等人[20,21]发现某些铁磁薄膜仅依靠自身也能够产生较强的太赫兹辐射,通过改变激光入射方向,发现产生的太赫兹信号相位反转,这表明在单层的铁磁薄膜内可能也存在自旋-电荷转换,作者将其归因为铁磁材料的反常霍尔效应. 2021年,Liu等人[22]发现在常见的CoFeB薄膜中既存在超快退磁产生的磁偶极子太赫兹辐射,也会产生由反常霍尔效应引起的太赫兹辐射,通过将两分量分离发现二者对CoFeB厚度的依赖存在较大差异. 综上所述,自旋-电荷转换是产生自旋太赫兹发射的关键成因,对太赫兹发射效率有很大影响.

3　自旋太赫兹发射效率的调控与优化

与非线性电光晶体、光电导天线等标准太赫兹源相比,自旋太赫兹源在超带宽方面表现出了显著优势. Seifert等人[23]通过飞秒激光激发5.8 nm的W/CoFeB/Pt三层膜产生了无间隙覆盖1~30 THz范围的超短太赫兹电磁脉冲. 由于自旋太赫兹发射源结构简单、偏振可调、蕴藏多种物理机制,国内外研究组对其产生了极大的兴趣并提出了多种自旋太赫兹发射性能提升的优化方案.

自旋太赫兹发射源常用的两种SCC机制来源于逆自旋霍尔效应和逆Rashba-Edelstein效应. 因此,需要根据不同的机制考虑优化方案. 在基于逆自旋霍尔效应的铁磁层/非磁层异质结中,Torosyan等人[24]给出了自旋太赫兹辐射强度的影响因素及表法式如下:

$$E_{\mathrm{THz}} \propto \gamma_{\mathrm{NM}} \cdot \tan\left(\frac{d_{\mathrm{FM}}-d_0}{2\lambda_{\mathrm{pol}}}\right) \cdot \frac{1}{n_{\mathrm{air}}+n_{\mathrm{sub}}+Z_0\cdot(\sigma_{\mathrm{FM}}d_{\mathrm{FM}}+\sigma_{\mathrm{NM}}d_{\mathrm{NM}})} \cdot \exp\left(-\frac{(d_{\mathrm{FM}}+d_{\mathrm{NM}})}{s_{\mathrm{THz}}}\right) \tag{1}$$

其中,n_{air}和n_{sub}分别是太赫兹频率下的空气折射率及衬底折射率;σ_{FM}和σ_{NM}分别是铁磁层和非磁层的电导率;Z_0为真空阻抗;d_0为铁磁层薄膜界面的非磁性区域的厚度;λ_{pol}为铁磁层厚度超过d_0时的自旋极化饱和特征常量.

本节根据式(1)重点分析并提出一些优化自旋太赫兹发射性能的方案.

3.1　铁磁层/非磁层异质结优化

2016年,Seifert等人[23]研究了不同非磁层材料的太赫兹发射强度与自旋霍尔电导的关系,发现自旋霍尔角的大小、正负会影响太赫兹发射的强度与相位. 非磁层材料如Pt,W等被证实可以最大限度地增加太赫兹发射强度.

相较于$Co_{20}Fe_{60}B_{20}$,当铁磁层材料使用Fe,Co,Fe-Co合金或$Ni_{81}Fe_{19}$时,太赫兹信号强度变化相对较小. Seifert等人[23]提出$Co_{20}Fe_{60}B_{20}$(2 nm)/Pt(2 nm)异质结在铁磁层/非磁层双层结构发射中具有最佳性能,并通过改变异质结样品的总厚度进行性能优化. 实验中,随着样品总厚度d的减小,太赫兹脉冲辐射强度先增加后迅速减小. 在样品总厚度d=4 nm时,发射信号强度达到了峰值[25].

2018年,Torosyan等人[24]研究了Pt,Fe层厚度对自旋太赫兹发射的影响. 实验中,先保持Fe层厚度为12 nm,从0.25 nm至12 nm增加Pt层厚度. 以优化后的Pt层厚度来确定最优发射效率的Fe层厚度. 实验表明,产生太赫兹发射强度最佳的异质结结构为Pt(3 nm)/Fe(2 nm). 在研究太赫兹辐射与金属层厚度问题时,必须要考虑到法布里-佩罗(Fabry-Pérot)谐振腔效应[23]. 当腔长远小于实验波长时,腔内的反射回波会增强THz发射强度. 随着腔长的减小,太赫兹信号的发射强度变强;当腔长小于临界厚度时,腔表面的临界损耗会远大于金属层的吸收,太赫兹发射幅度随之急剧减小,这与实验结果是一致的.

3.2　优化自旋流输运

铁磁层/非磁层双层异质结太赫兹发射源只利用了前向光致自旋电流,即只有一半的自旋电流流入非磁层并由逆自旋霍尔效应转换为电荷电流. 2016年,Seifert等人[23]提出一种三层异质结构W/$Co_{40}Fe_{40}B_{20}$/Pt,充分利用了反向自旋电流. 由于Pt与W的自旋霍尔角符号相反,Pt层和W层中的自旋霍尔电流流向相同,辐射相位相同. 相比于$Co_{20}Fe_{60}B_{20}$/Pt双层异质结构,W/$Co_{40}Fe_{40}B_{20}$/Pt三层异质结构提升了近40%的太赫兹发射强度. 2020年,Zhang等人[21]提出了具有交换耦合合成反铁磁结构的自旋太赫兹发射源,其结构为Pt(2 nm)/CoFeB(4 nm)/Ru(0.8 nm)/CoFeB(3 nm)/Pt(2 nm). 当两层CoFeB磁化方向相反时,太赫兹发射峰值幅度几乎是同等厚度的CoFeB/Pt单层或双层自旋太赫兹源的两倍,并证明太赫兹信号强度与两个铁磁层的磁化矢量差成正比.

此外,晶化、界面粗糙度和界面混合等微观结构性能也明显影响自旋太赫兹发射源的性能. Sasaki等人[26]发现,300 ℃退火处理Ta(5 nm)/$Co_{20}Fe_{60}B_{20}$(t_{CFB})(t_{CFB}=4 nm,10 nm)可以将太赫兹发射强度提高1.5~6倍. 并将这种大幅度的增强归因于热自旋向上电子平均自由程的增加,退火后的$Co_{20}Fe_{60}B_{20}$晶化抑制了无序散射,使无序散射的λ增大到2~3 nm,导致了太赫兹发射强度的变化. Gao等人[27]在W/CoFeB体系中通过退火使太赫兹辐射强度相比于未退火处理前增加了3倍. 荷兰Li等人[28]证明了Co(10 nm)/Pt(3 nm)结构的太赫兹发射源灵敏地依赖界面粗糙度,并提出可以通过改变溅射过程中Ar原子的压力来控制粗糙度,进而控制自旋太赫兹源的发射性能.

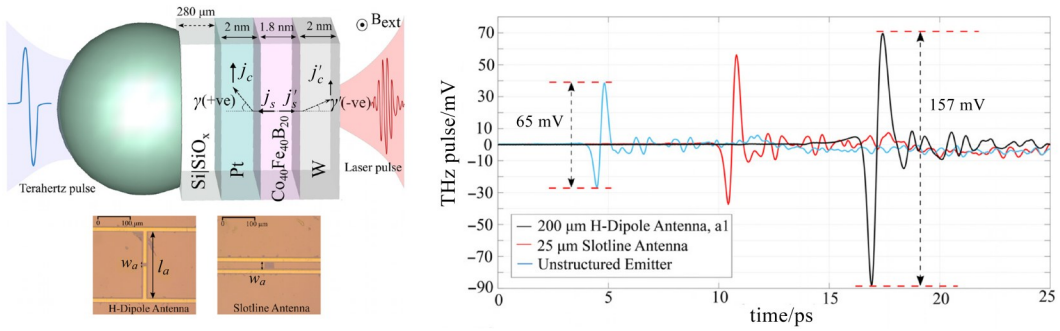
3.3 提高泵浦激光发射和吸收

为提升自旋太赫兹源发射的脉冲幅度，研究者们在入射泵浦激光方面进行了系统的优化工作．2017年，Seifert等人[29]在直径7.5 cm的大面积玻璃衬底上生长W/CoFeB/Pt三层膜异质结，并通过聚焦的飞秒激光对大面积自旋太赫兹源进行激发，所产生的太赫兹脉冲持续时间达到230 fs，峰值电场可达到300 kV/cm，并能实现1~10 THz的无隙太赫兹频谱，这对研究非线性太赫兹光谱及物质调控打下了良好的实验基础．

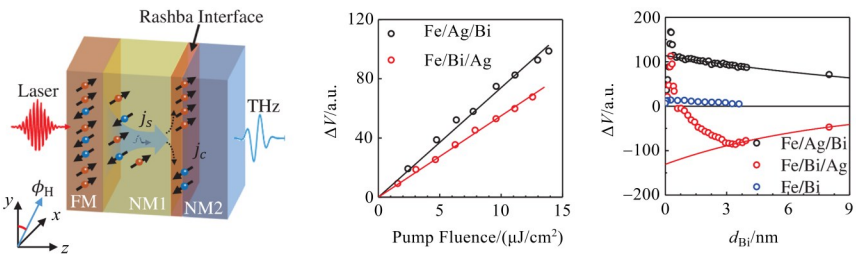
与此同时，由于纳米厚度的金属薄膜存在天然的光学限制，自旋太赫兹发射源对泵浦激光的吸收率不大于50%，因此增强薄膜对飞秒激光的吸收效率也非常重要．2018年，Feng等人[30]提出了一种以介质薄膜-金属薄膜为单元的周期性结构，其中介质薄膜为SiO_2薄膜，金属薄膜为W(1.8 nm)/Fe(1.8 nm)/Pt(1.8 nm)，飞秒激光在该结构中传输时发生多重散射和干涉，同时抑制金属薄膜对激光的反射和透射，从而增大金属薄膜对激光能量的吸收．相比于单周期异质结自旋太赫兹源，该周期性结构的太赫兹发射效率提升了1.7倍．最近，Liu等人[31]在W/CoFeB/Pt异质结表面设计了一种金纳米棒等离子体共振结构，通过集成该结构可以局部增强泵浦自旋太赫兹发射源的激光场强，从而有效提高太赫兹辐射性能，使其辐射强度提高到140%，这也证明了纳米光子技术可以有效提高太赫兹效率，并为开发功能性纳米太赫兹光自旋电子器件提供了新的思路．

3.4 增强太赫兹发射过程

除了优化材料对泵浦激光的吸收之外，通过将光学元件与自旋太赫兹发射源相结合也可以用来增强太赫兹脉冲的发射强度．2018年，Torosyan等人[24]首次提出在Fe/Pt异质结的衬底侧增加一个超半球硅透镜，可以抑制由全反射引起的太赫兹信号损失，并准直强发散的太赫兹脉冲，进而提升发射端的出射效率．2019年，在超半球硅透镜的基础上，Nandi等人[32]设计了一种偶极子天线来提高远场耦合的性能，如图2(*a*)所示，实验证明设计有200 μm偶极子天线的自旋太赫兹源的太赫兹峰值信号是普通异质结的2.42倍．与此同时，与寻找大的自旋霍尔角思路相反，Zhang等人[33]发现尽管Al的自旋霍尔角比Pt小两个数量级，但Co/Al异质结发射的太赫兹脉冲幅度接近典型异质结体系Co/Pt的三分之一，这也表明了具有小自旋霍尔角的轻金属在自旋太赫兹发射的材料研究上也具有一定的必要性．Zhou等人[17]从转换机理角度出发，设计了一种具有Rashba界面的Ag/Bi异质结，如图2(*b*)所示，通过分析Fe/Ag/Bi异质结构在光激发下太赫兹辐射的情况，证明了来自逆Rashba-Edelstein效应和逆自旋霍尔效应的太赫兹辐射可以相互叠加，故可在同一器件中利用这两种效应进一步提高发射效率．



(*a*) 通过增强天线提高自旋太赫兹发射的器件示意图及性能图[32]



(*b*) 通过两种自旋流电荷流转换效应叠加来增强自旋太赫兹发射效率[17]

图2 增强太赫兹发射过程

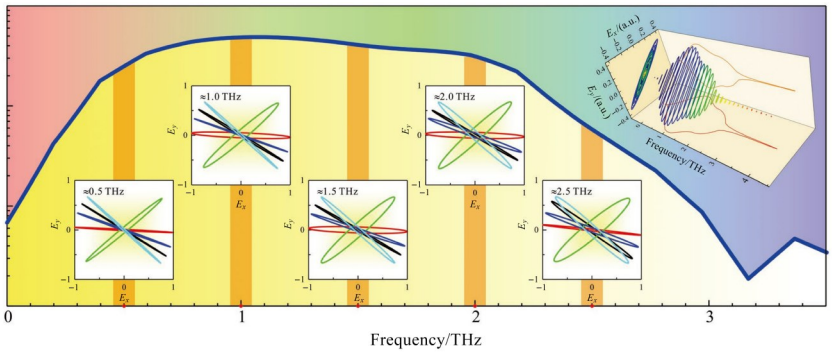
4　新型自旋太赫兹发射的机理研究

4.1　偏振态调控的自旋太赫兹发射源

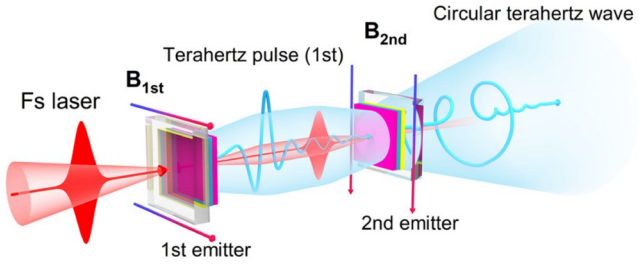
相较于其他太赫兹发射源,自旋太赫兹源所具有的优点之一是可调谐性强,其发射太赫兹波的线偏振方向与所施加的磁场垂直,因此具有良好的线偏振方向可控性. 与此同时,对于不同偏振态自旋太赫兹波的灵活调控同样吸引了众多研究者的研究兴趣,偏振态可调控的太赫兹波对于生物大分子传感、太赫兹通信、物质检测等应用领域具有重要的研究意义.

为得到圆偏振态的太赫兹脉冲,需要满足以下三个条件:在两个正交方向分别产生太赫兹电场分量,该分量的振幅保持基本一致,且两分量之间的相位差保持90°. 2018年,Qiu等人[34]提出通过集成铁磁异质结和大双折射率液晶可以实现自旋太赫兹偏振态的调控,在此过程中,可以通过改变外加磁场及电激励,控制液晶分子两正交方向的太赫兹寻常波与非寻常波之间的相位延迟,实现圆偏振与其他偏振态之间的转换.

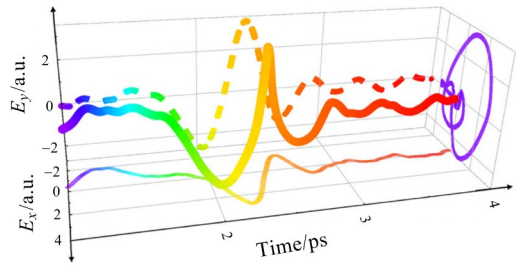
除了集成介质来实现相位差的设计外,还可以通过改变外加磁场来设计自旋太赫兹源的相位差. 2019年,Kong等人[35]表明,在自旋太赫兹源发射过程中,施加非均匀磁场可以设计太赫兹信号之间的相位差,如图3(*a*)所示,因此可以通过外加磁场产生并精准调控椭圆偏振的太赫兹波. Hibberd等人[36]使用类似的方法,证明通过向自旋太赫兹源施加特定的磁场模式,可以产生类四极的太赫兹偏振信号. Chen等人[37]通过级联两级自旋太赫兹发射源,改变外加磁场和光程差来设计两级太赫兹波束的振幅和相位差,实现对太赫兹波手性、方位角和椭圆率的操控,如图3(*b*)和图3(*c*)所示.



(*a*) 基于非均匀磁场实现宽频带椭圆自旋太赫兹的发射[35]



(*b*) 级联自旋太赫兹发射源示意图[37]



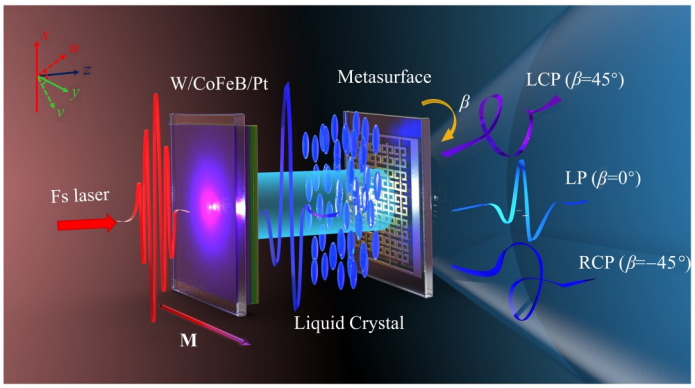
(*c*) 通过级联自旋太赫兹发射源的椭圆脉冲信号图[37]

图3　自旋太赫兹的发射

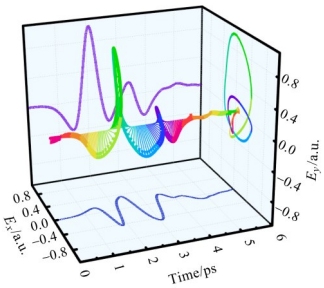
2018年,Wang等人[38]首次通过Bi_2Se_3/Co异质结研究了基于拓扑表面态的超快自旋注入和自旋-电荷转换. Zhao等人[39]进一步研究了飞秒激光驱动拓扑绝缘体Bi_2Te_3的太赫兹发射,基于线光生伏打效应(Linear Photogalvanic Effect,LPGE)产生了手性、椭圆率和主轴可控的太赫兹波. 在此研究基础上,Chen等人[40]提出基于Bi_2Te_3/Fe异质结的偏振可调自旋太赫兹源,通过调谐拓扑绝缘体LPGE产生的太赫兹分量与拓扑绝缘体/铁磁异质结产生的SCC分量的关系,实现椭圆偏振太赫兹波的发射与调控.

然而,实现宽带、高椭圆率的太赫兹偏振调控仍是当前研究的工作重点,超表面作为实现高效、高质量太赫兹调制和偏振调控的一种重要研究手段,同样被广泛应用于自旋太赫兹的调控. 2021年,Liu等人[41]通过将异质结薄膜加工为条纹图案的自旋超表面,实现了手性可调谐的有源自旋超表面太赫兹发射,通过调整外加磁场的方向,可以在1~5 THz实现椭圆率达到0.75的宽带手性太赫兹波发射. 最近,Sun等人[42]通过设计自旋太赫兹源、大折射率液晶、超表面集成器件,首次提出了一种基于Pancharatnam-Berry相位和外加电、磁

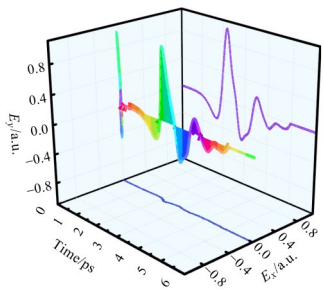
场调制的全偏振态宽带调控的自旋太赫兹源，如图4所示，该器件通过液晶和超表面设计相位互补元素，可以实现在0.60~0.99 THz圆-椭圆-线偏振的多方式灵活调控，宽带椭圆率达0.9以上．这对宽带圆偏振太赫兹发射源的设计提供了全新灵活的研究思路，有利于自旋太赫兹源的集成化、小型化、多功能化研究．



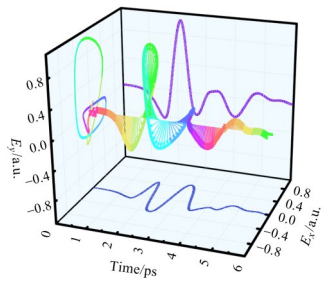
（a）自旋太赫兹源-液晶-超表面集成器件示意图（可以通过改变Pancharatnam-Berry相位或外加电磁场实现宽带偏振态及手性调控；保持外磁场方向沿y方向，旋转器件角度可以得到对应）



（b）左旋圆偏振



（c）线偏振



（d）右旋圆偏振的自旋太赫兹脉冲信号[42]

图4 磁场调制的全偏振态宽带调控的自旋太赫兹源

4.2 新材料体系的自旋太赫兹发射源

在自旋太赫兹发射的研究领域，磁有序材料可以在飞秒激光激发下通过超快退磁产生太赫兹脉冲，更进一步，通过自旋-电荷转换可以在铁磁多层结构中实现高效太赫兹辐射，开创了一种结合超快动力学与自旋电子学相结合的新型自旋太赫兹发射源．该发射方法相较于其他发射手段具有很大优势，如制备简单、破坏阈值高、频带覆盖范围宽等．近年来，基于新材料体系的新型自旋太赫兹发射得到了国内外研究者们的广泛关注，该研究旨在改善并提高自旋太赫兹源的发射性能，如带宽、效率、场强等．与此同时，新材料体系的发射研究往往伴随新的物理机理．

拓扑绝缘体（Topological Insulator，TI）是一种具有强自旋-轨道耦合作用的范德瓦尔斯材料．由于拓扑绝缘体表面的自旋-动量锁定特性可以实现高效的自旋-电荷转化，因此可以使用拓扑绝缘体材料代替非磁层构成高效的拓扑自旋太赫兹发射源．2018年，Wang等人[38]首次利用Bi_2Se_3/Co异质结实现了自旋太赫兹发射，实验结果显示，基于超快自旋-电荷转换的Bi_2Se_3/Co异质结发射效率远远超过纯Bi_2Se_3或Co薄膜，其中拓扑表面态起到至关重要的作用，而且Bi_2Se_3(10 nm)/Co(3 nm)的发射效率更是可以与商用的ZnTe晶体相媲美．有趣的是，由于拓扑绝缘体的空间反演对称性破缺，在飞秒激光照射时，线光生伏打效应可以在拓扑绝缘体表面引入转移电流，进而产生偏振依赖的太赫兹辐射[39]．因此，基于拓扑绝缘体异质结的太赫兹发射可以分为两部分：一个是由SCC诱导的自旋太赫兹，该分量由异质结界面处的自旋-电荷转换产生，仅与磁化强度矢量有关；另一个是在反演对称破缺表面上由LPGE引起的非线性太赫兹．由于自旋-电荷转换引起的太赫兹波与激光偏振无关，因此可以通过简单调整入射泵浦激光的偏振来合成SCC诱导和LPGE诱导的太赫兹波，进而实现任意手性的太赫兹发射．如4.1节所提到的，在2020年，Chen等人[40]使用分子束外延制备了Bi_2Te_3(10 nm)/Fe(3 nm)异质结构，并测量了线性偏振飞秒激光照射后的太赫兹响应，Bi_2Te_3/Fe异质结中产生的太赫兹幅度高于纯Bi_2Te_3或Fe薄膜，几乎与W/CoFeB/Pt三层相同水平．进而，作者通过调整入射激

光以保证基于SCC和LPGE发射的两个太赫兹分量正交且具有相同幅度,因此可以在Bi_2Te_3/Fe异质结中产生椭圆及圆偏振太赫兹波. 基于拓扑绝缘体的异质结发射为实现灵活的自旋太赫兹偏振态调控提供了一种简单、便捷的方法.

拓扑绝缘体在具有强自旋-轨道耦合特性的同时,也具有范德瓦尔斯材料的二维特性,即使在几纳米的尺度下,薄膜也能保持其基本特性不改变. 将其与二维铁磁薄膜,如Fe_3GeTe_2(FGT)等,结合制备为二维异质结,有望实现超低功耗和纳米集成的太赫兹器件. 2021年,Chen等人[43]使用分子束外延成功制备了Bi_2Te_3/Fe_3GeTe_2二维结构,并实现了世界上首个二维铁磁异质结的室温太赫兹发射. 对于纯FGT样品,当其厚度减小到二维尺度时,由于热扰动,自旋交换相互作用不再能够维持长程磁序. 然而,FGT/TI异质结构的居里温度可以提升至室温以上,这是由于TI和FGT之间的界面交换耦合增加了其中的自旋交换相互作用,使FGT/TI可以在室温下保持铁磁特性,进而可以在飞秒激光的激发下产生太赫兹波,如图5所示. 进一步地,作者研究了FGT和TI厚度对太赫兹波幅值的影响,通过FGT厚度依赖的实验,确定了二维异质结中的太赫兹辐射同样来源于界面的自旋-电荷转换效应. 然而,与重金属/铁磁异质结中逆自旋霍尔效应主导的自旋转换不同,在二维体系中自旋流的转化依赖拓扑绝缘体表面的逆Edelstein效应. 进一步地,TI厚度依赖的实验证明,正是因为TI和FGT之间的界面交换耦合作用增强了异质结的居里温度,为实现室温下二维太赫兹器件打下了基础. 二维异质结发射的太赫兹强度表现出强烈的界面依赖性,为实现超快超薄高频自旋光电子器件提供了独特的思路.

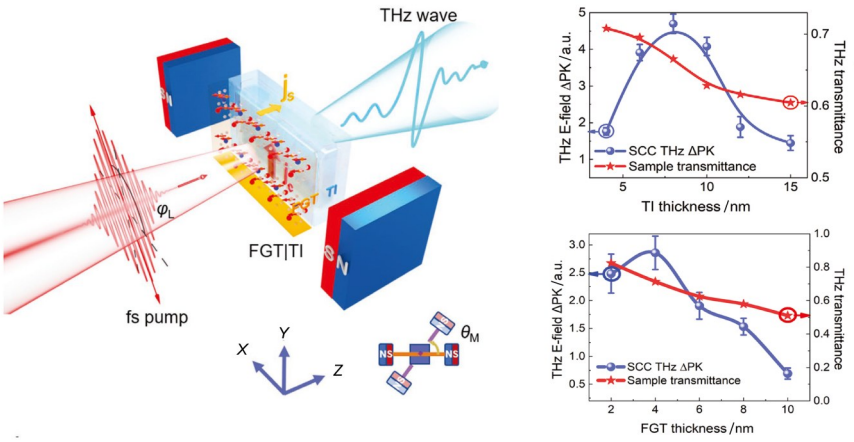


图5　FGT/TI异质结的飞秒激光激发和自旋太赫兹发射[43]

尽管以拓扑绝缘体为自旋-电荷转换层的异质结具有很强的自旋太赫兹发射能力,然而这种铁磁异质结无法脱离外部磁场独立工作. 最近,Wu等人[44]利用反铁磁$IrMn_3$作为自旋转换层,与CoFeB组成异质结,基于反铁磁与铁磁之间的交换偏置作用,可以使CoFeB磁矩在没有外场的条件下自发朝向同一方向,进而实现无场自旋太赫兹发射. 由于$IrMn_3$同时具有较高的自旋霍尔角,可以用于实现高效的自旋-电荷转换,因此,在飞秒激光激发后,$IrMn_3$/CoFeB异质结可以实现高效率的无场自旋太赫兹发射,如图6所示. 进一步地,他们在双层异质结的基础上进行了效率优化并制备了$IrMn_3$(1.8 nm)/CoFeB(2 nm)/W(1.8 nm)三层磁性异质结,证实了基于$IrMn_3$的反铁磁异质结可以用于制备高效的太赫兹发射器件,其发射强度超过同样实验条件下的Pt(1.8 nm)/CoFeB(2 nm)/W(1.8 nm)三层异质结.

5　自旋太赫兹源的应用前景

5.1　自旋太赫兹光谱技术

基于飞秒激光泵浦的自旋太赫兹发射源,由于其在一般情况下发射功率较低且电场强度较弱,无法直接通过非相干光电器件进行有效探测,因此可以通过典型的太赫兹时域光谱(Terahertz Time-Domain Spectroscopy,THz-TDS)技术进行相干检测实现信号的接收与探测. 太赫兹发射光谱(Terahertz Time Emission Spectroscopy,THz-TES)技术和非线性太赫兹时域光谱(Nonlinear Terahertz Time-Domain Spectroscopy, NL-THz-TDS)技术以THz-TDS技术为基础,用于不同应用领域的研究. THz-TES技术侧重于通过时域光谱研究太赫兹发射,通过分析自旋太赫兹发射光谱的振幅、相位、频谱以及偏振等信息,表征太赫兹源材料的发射机理及物理特性;而NL-THz-TDS技术则是通过强场太赫兹与物质的相互作用,研究材料的非线性太赫兹效应.

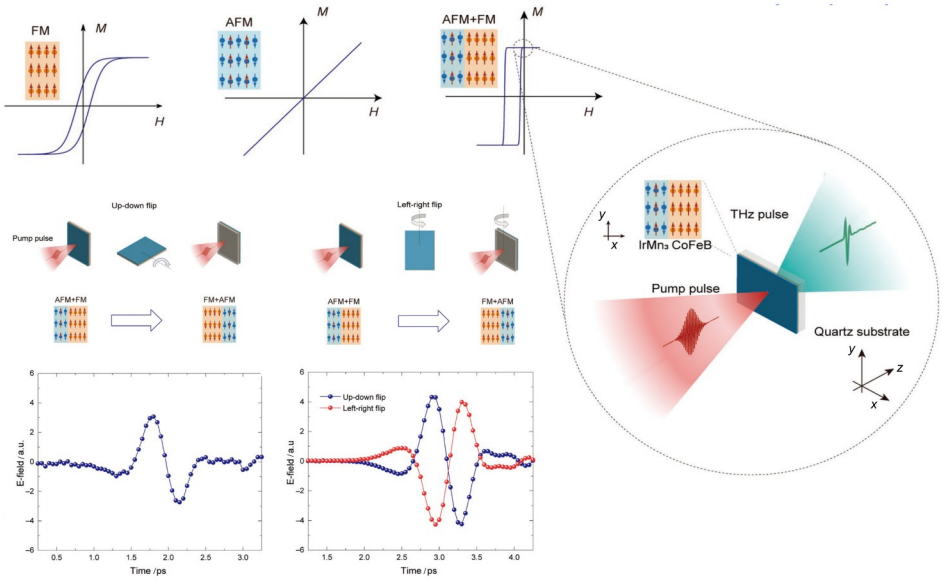


图6 I_rMn_3/CoFeB异质结的飞秒激光激发和无场太赫兹发射[44]

5.1.1 太赫兹时域光谱技术

太赫兹时域光谱技术能够同时探测脉冲的振幅和相位信息,并通过傅里叶变换得到相应的频谱信息. 其系统光路示意图如图7所示,该系统主要包括飞秒激光系统、自旋太赫兹发射源、光学延迟线、太赫兹探测器和传输光路等. 激光脉冲从激光器出射,经过分光镜后分成泵浦光和探测光,能量较大的一束为泵浦光,剩余一束为探测光. 在泵浦光所经过的光路中,泵浦光聚焦到自旋太赫兹源上并激发产生太赫兹脉冲,由于产生的太赫兹辐射具有发散角,所以通过镀金抛物镜进行光束校准后传输到探测器处;在探测光所经过的光路中,探测光经过多次镜面反射后,通过光学延迟系统与泵浦光共线传输通过探测器.

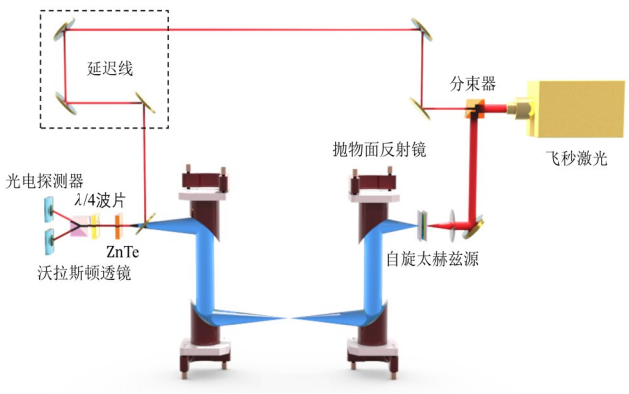


图7 自旋太赫兹时域光谱系统光路示意图

基于自旋太赫兹信号的探测常通过ZnTe晶体进行探测,其探测原理主要是利用非线性晶体的电光效应,其折射率在外加电场作用下发生变化,当光通过ZnTe晶体时,其偏振态特性随所加电场的特性而改变,可以得到被太赫兹波调制的飞秒激光脉冲偏振态的变化,并通过1/4波片、沃拉斯顿棱镜及光电二极管对偏振态进行探测. 其中,沃拉斯顿棱镜将耦合后的信号分解成强度相同但振动方向相互垂直的两束线性偏振光,并通过1/4波片和光电探测器对两束线性偏振光进行转换及探测,通过对其偏振及振幅信息进行光强差分析即可得到自旋太赫兹脉冲信号. THz-TDS技术对自旋太赫兹发射、调制、探测,以及自旋输运、太赫兹自旋动力学等具有重要的研究意义.

5.1.2 太赫兹发射光谱技术

太赫兹发射光谱技术最早可追溯至20世纪90年代,哥伦比亚大学最先用TES技术分析飞秒激光激发InP后产生的太赫兹幅值及相位,以此研究半导体表面的载流子迁移率、静态内场的强度和极性. 随着先进材料和太赫兹技术的发展,用于研究自旋太赫兹发射源的光谱技术正朝着两个方向发展.

一方面,THz-TES技术已成为一种灵敏无损的检测工具,它可用于研究以及表征半导体、二维及三维异质结等的材料特性,包括载流子的非平衡运输、材料的局部结晶度、载流子动力学、掺杂效应以及材料表面电位变化信息等[45-47]. 2017年,Kushnir等人[48]为了验证二维IV-VI单硫族化合物是多铁性的,能够产生显著的位移电流,通过THz-TES技术来激发GeS纳米片产生太赫兹脉冲来对材料的超快位移电流进行检测. 2020年,Bagsican等人[49]通过对单手性半导体碳纳米管薄膜进行激发,如图8(*a*)所示,研究了激子和载流子动量依赖的超快动力学.

另一方面,由于现有的太赫兹源发射强度仍有提升空间以及太赫兹频段仍存在许多空隙,因此寻找合适的材料是一个重要的研究方向. 如图8(*b*)所示,Li等人[50]利用时间分辨的TES技术构建了一个由$IrMn_3$/NiFe异质结组成的自旋太赫兹发射源,并通过电光采样的方法记录了与超快转换过程相关的太赫兹发射,定量分析了其中的自旋-电荷转换效率,为自旋太赫兹发射源提供了新的材料选择. 2022年,Cheng等人[51]通过TES技术对CoFeB/NiCu异质结的太赫兹发射进行了研究,该异质结发射的太赫兹脉冲峰值强度可达CoFeB/Pt的一半,其中太赫兹辐射是由NiCu中自旋-电荷转换产生的,这挖掘了以NiCu合金为代表的3d过渡元素合金作为自旋太赫兹发射源的巨大潜力,也证明了THz-TES技术是研究铁磁材料逆自旋霍尔效应或反常霍尔效应的有力工具.

在超快光载流子动力学及自旋动力学的研究上,THz-TES为研究者们提供了一种很好的研究材料内部特性的技术,其普遍程度没有THz-TDS强,原因之一在于THz-TES以发射的太赫兹信号对材料的超快光电流动力学进行了编码,但目前还不存在一种直接的反演程序能够将实验数据与材料内部的光电流动态联系起来,因此若要将TES技术与自旋电子学相结合并加以普及,未来对更多材料的研究还有很长的路要走.

5.1.3　非线性太赫兹时域光谱技术

从波长尺度来看,太赫兹波段位于电子学与光子学的交界处,其与物质的相互作用经历了从经典极限到量子极限的转变,因此,太赫兹范围内的非线性效应与可见光和红外范围内观察到的效应显著不同[52],非线性太赫兹光谱技术是通过脉冲能量足够大且场强足够高的太赫兹脉冲,激发物质在太赫兹范围内非线性效应的一种研究技术手段. 随着高效强场太赫兹源的快速发展,非线性太赫兹光谱已发展成为研究凝聚态物质的一种广泛应用的工具,该技术的出现也为较短红外波长的时间分辨光谱及微波范围的电子方法提供了补充[53].

目前使用的非线性太赫兹表征手段有两种:一种是非线性太赫兹时域光谱技术,其中透射太赫兹场以类似于标准THz-TDS的方式进行测量和分析,相比于THz-TDS,NL-THz-TDS需要场强更大的太赫兹源[54];另一种是多维太赫兹光谱,相比之下,它的调制方案会更加复杂[55].

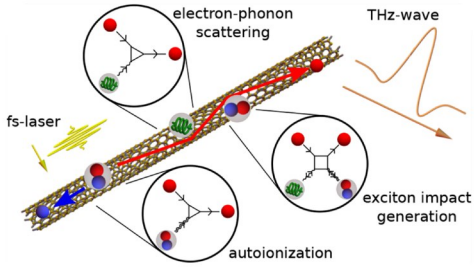
产生强场太赫兹的技术方法主要有波前倾斜技术、空气等离子体和自旋太赫兹源等. 2003年,Stepanov等人[56]使用具有倾斜脉冲前沿的超短激光脉冲,采用相位匹配光学整流的方法有效地产生了亚皮秒太赫兹脉冲,获得了能量为98 pJ、重复率为200 kHz的太赫兹脉冲. 此外,$LiNbO_3$中的波前倾斜太赫兹产生技术,可以产生以1 THz为中心的强场太赫兹脉冲[57~60]. 2017年,Seifert等人[29]通过5.5 mJ高能量的飞秒激光脉冲及直径7.5 cm大面积的自旋太赫兹发射源,经聚焦后激发出峰值电场强度可达300 kV/cm的太赫兹脉冲,如图8(*c*)所示,这种强场太赫兹脉冲可以驱动三阶非线性效应,如太赫兹-克尔效应.

自旋太赫兹源的发射效率通常与泵浦激光功率呈线性关系,并在高通量下呈现饱和状态,因此,过强的飞秒激光脉冲对异质结薄膜的泵浦存在光学损伤. 2021年,Kumar等人[61]研究了800 nm中心波长的飞秒激光脉冲对不同铁磁/非磁异质结的光学损伤阈值,其中石英衬底上Fe/Ta异质结的损伤阈值为85 GW/cm^2,对于(CoFeB,Fe)/(Pt,Ta)自旋异质结的平均损伤阈值在60 GW/cm^2. 随后,Kumar等人[62]使用不同中心波长的飞秒激光脉冲对Fe/Pt异质结的太赫兹发射效率和光学损伤阈值进行研究,与800 nm中心波长的飞秒激光脉冲泵浦相比,1 550 nm泵浦的平均光学损伤阈值约为前者的四倍,但两种中心波长泵浦的太赫兹发射效率几乎保持不变.

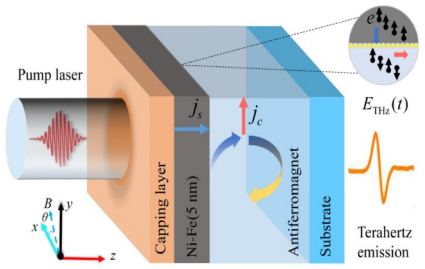
2020年,Müller等人[63]基于自旋太赫兹发射源提出了新颖的非线性光谱应用,他们使用8 fs泵浦脉冲激发自旋太赫兹源,产生了带宽超过20 THz的太赫兹脉冲,并耦合到扫描隧道显微镜(Scanning Tunneling Microscope,STM)的隧道结中,如图8(*d*)所示. 由于隧道电流具有对入射太赫兹电场的固有非线性响应,太赫兹脉冲会被整流,其产生的直流电流可以被低带宽STM检测到,自旋太赫兹源提供的宽太赫兹频谱可以进一步提取得到隧道结在1~15 THz范围内的太赫兹响应函数. 强场太赫兹的产生使非线性太赫兹光谱成为一种广泛的应用技术,研究者可以对多种材料进行非线性光谱分析,如半导体、有机化合物和生物相关材料等. 同时,作为强场太赫兹发射源之一,自旋太赫兹源相比于其他发射方式,具有大带宽、低成本、不易损伤、易于加工等优势,因此,基于自旋太赫兹源的非线性太赫兹光谱技术具有巨大的发展潜力和商业化应用优势.

5.2　自旋太赫兹成像技术

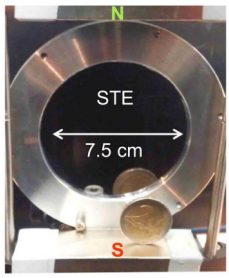
随着科学技术的发展,研究微纳米材料的基本特性需要更高分辨率和更高信噪比的显微设备作支撑,常见的光学显微镜受衍射极限的限制,难以实现高分辨[64]. 电子显微镜可以获得高的空间分辨率,但易损伤样品[65]. 同时,二者均无法识别样品成分且无法检测频谱. 太赫兹波具有光子能量低、绝缘材料穿透性好、金属反射性强等特点,是一种可突破衍射极限、低损伤、高分辨率的成像技术. 同时,诸多化学键的振动和转动频率位于太赫兹频段,这使太赫兹波具有高特异性的



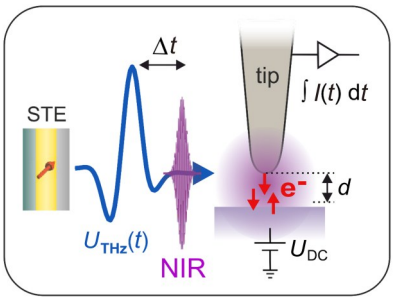
(a) 飞秒激光对于单手性碳纳米管薄膜激发示意图[49]



(b) I_rMn_3/Ni-Fe 异质结中超快自旋注入和转换发射太赫兹脉冲原理图[50]



(c) 通过 800 nm 中心波长、5 mJ 脉冲能量的飞秒激光脉冲激发时，大面积的自旋太赫兹源可以产生 300 kV/cm 的太赫兹脉冲[29]



(d) 太赫兹扫描隧道显微镜示意图[63]

图 8 太赫兹光谱技术

物质检测和识别能力. 因此，太赫兹显微成像在先进材料、纳米科技、生物医学和半导体工业领域具有重要应用价值.

5.2.1 自旋太赫兹发射显微成像系统

常规显微探测手段得到的是静态的原子形貌图像，不能反映物质的激子形成、俄歇复合等皮秒量级的动力学过程. 将太赫兹科学技术与扫描隧道显微镜相结合可以实现原子尺度单分子的超快动力学显微成像[66,67]. 如 5.1 节提到的，研究人员将自旋太赫兹源引入扫描隧道显微镜 STM 中，实现了原子级空间分辨率和亚皮秒时间分辨率[63]. 该系统工作原理如图 8(*d*)所示，飞秒激光垂直入射到自旋太赫兹源，激发出与近红外激光共线的太赫兹脉冲，通过将瞬时电场作用于扫描针尖和样品之间的空隙，实现利用隧穿电流的扫描成像. 此外，由于自旋太赫兹源的极化方向可由外部永磁铁实现控制，可通过外部磁场的调控改变成像的精度和范围[68]. 但是，目前基于自旋太赫兹源的扫描隧道显微成像系统受到多种因素的限制，包括样品和针尖制备困难、针尖的电容耦合效应和脉冲光引起的热膨胀效应等，仍需进一步研究探索实现系统的应用化. 太赫兹扫描隧道显微镜技术的高时空尺度分辨率使其在量子力学、生物传感、凝聚态物理等研究领域具有重要研究意义.

5.2.2 自旋太赫兹超衍射鬼成像

针对当前太赫兹成像的空间分辨率难以突破毫米量级，机械式扫描易产生干扰，缺少高密度、高性能的焦阵列探测器件等技术难题，Chen 等人[69]提出利用自旋太赫兹源，通过近场感知理论和鬼成像方法相结合的方式，实现了一种非扫描式的自旋太赫兹超衍射鬼成像(Ghost Spintronic Terahertz Emitter Array Microscope，GHOSTEAM)技术. 如图 9 所示，该系统采用 W/Fe/Pt 异质结作为自旋太赫兹源，通过选择微镜偏角接近的两个数字微镜实现激光脉冲的波前校正，在超衍射成像过程中，自旋太赫兹源被看作由多个相干发射“单元”所组成的“阵列”，每个“单元”可通过数字微镜控制的飞秒激光激发实现可重构的独立编码. 当成像目标置于自旋太赫兹源近场范围内，利用鬼成像技术，变化空间编码太赫兹脉冲便可实现对目标的自旋太赫兹超衍射成像. 同时，由于自旋太赫兹源基于逆自旋霍尔效应，满足太赫兹波电场与外加磁场相互垂直，因此，通过旋转外加磁场即可同步改变太赫兹脉冲的偏振方向，该系统实现的太赫兹图像空间分辨率可达 6 μm. 同时，由于自旋太赫兹源所产生的太赫兹脉冲具有相干性，通过结合飞行时间方法，该系统还可实现自旋太赫兹三维成像技术，这进一步拓宽了 GHOSTEAM 的应用场景.

5.3 自旋太赫兹发射-调控一体化技术

自旋太赫兹源的发射-调控一体化技术可以通过图案化自旋超表面发射源、同片集成的自旋超表面发射、天线耦合的自旋太赫兹发射源等多种方式来实现，不

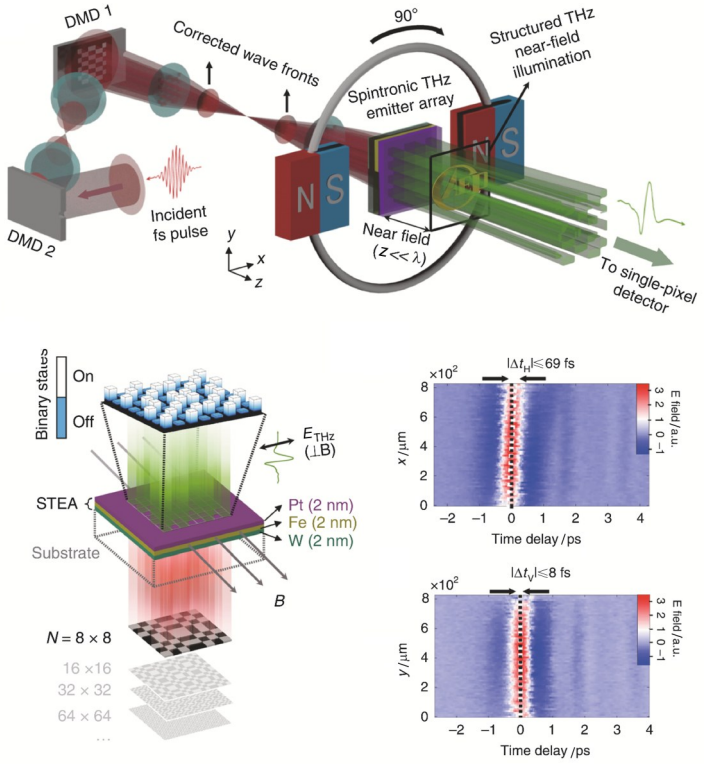


图9　GHOSTEAM 自旋太赫兹超衍射鬼成像技术[69]

同的超表面及天线侧重的功能和调控原理不同. 图案化自旋超表面侧重于光谱调控,包括中心频率、手性、椭圆率等频谱特征;同片集成的自旋超表面关注累积的发射和调控效果,用于探索高度集成化的近场太赫兹调制和生物传感;天线耦合的自旋太赫兹发射源侧重于提升发射功率及效率,实现更高功率的自旋太赫兹发射. 不同功能调控超表面的结合可以为实现多功能、集成化、灵活且高效的自旋太赫兹发射源提供新的思路和方案,助力自旋太赫兹的发展与应用.

5.3.1　图案化自旋超表面发射源

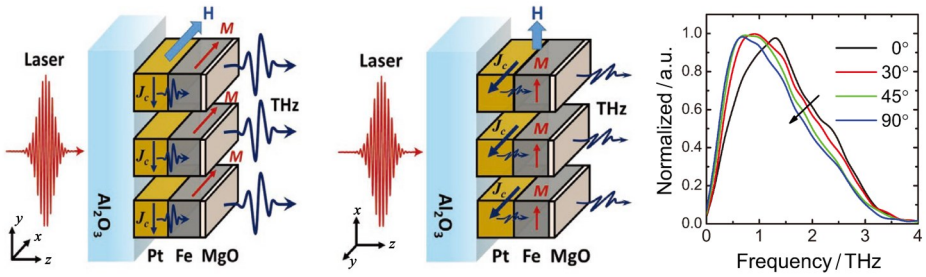
图案化自旋超表面发射源是近年来研究广泛的自旋太赫兹发射-调控一体化方案之一,主要通过将自旋薄膜条纹化、块状化等方式,构造可用于调控的微结构器件,并结合样品方位和磁场的夹角,实现对太赫兹波的光谱特性调控,包括幅度、频率、相位、手性、偏振和椭圆率等,在此基础上,通过结合不同材质的自旋薄膜,实现可编码调制的自旋电子学超表面.

2016 年,Yang 等人[70]通过条纹化 Fe/Pt 异质结薄膜,首次提出了条纹化的自旋超表面发射源,通过固定磁场并旋转样品方位角,可以观测到太赫兹波幅度的改变和中心频率的偏移,如图 10(*a*)所示. 基于此结构,Jin 等人[71]通过条纹化的 W/CoFe/Pt 结构,同样实现了幅度调制和中心频率偏移. Song 等人[72]通过改变块状的图案化铁磁异质结长度,实现了对太赫兹脉冲幅度、中心频率和带宽的有效控制,该结果证实了自旋太赫兹发射源经图案化后在频谱调制上的优势,充电电流限制效应或屏蔽电荷作用的重新构造,对集成化的太赫兹发射-调制一体化器件具有重要的启发. 同时,Lendinez 等人[73]制备了大尺寸和大间距的条纹化自旋超表面,证明了太赫兹电场幅度与异质结的覆盖率成正比,但当自旋结构薄膜尺寸较大时,由于充电电流限制效应作用减弱,磁场不足以克服图案化的各向异性,因此,未被完全磁化的自旋超表面调控性能减弱.

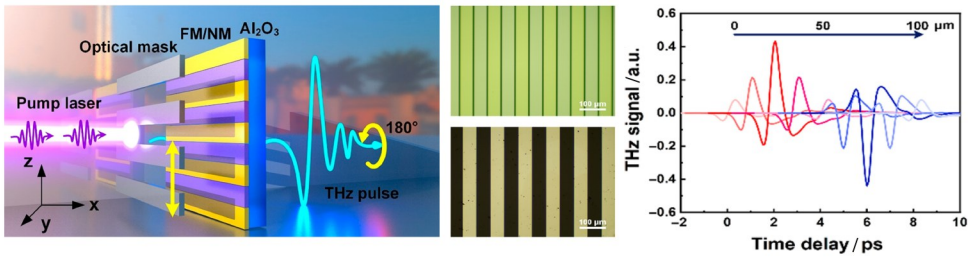
如 4.1 节所提到的,Liu 等人[41]通过条纹图案的自旋电子超表面,设计了手性可调谐的有源自旋超表面太赫兹发射源,并实现了手性的连续宽带调控,这对生成有效矢量控制的载波具有重要意义. 最近,Tong 等人[74]在图案化自旋太赫兹源的基础上,利用两种具有相反自旋霍尔角交替排列的条纹图案异质结(Co/Pt 和 Co/W),实现了空间调制的数字编码自旋超表面太赫兹源,如图 10(*b*)所示. 该工作通过光学掩膜与铁磁异质结间的光分布控制,切换了自旋太赫兹源的工作范围,引入数字编码位 0 和 1 表示相反的太赫兹辐射,这对通过自旋太赫兹源实现图案编码及波束控制提供了良好的研究基础,也有利于通过自旋太赫兹源实现更广泛的实际应用.

5.3.2　同片集成的自旋超表面发射源

同片集成的自旋超表面发射源是实现太赫兹发射-



(*a*) 条纹化的自旋超表面太赫兹源,通过改变外磁场和条纹的夹角,实现辐射的太赫兹波强度和峰值频率的改变[70]



(*b*) 自旋太赫兹编码超表面阵列源,通过光驱动具有相反自旋霍尔角的铁磁异质结实现太赫兹波的空间调制[74]

图10 图案化自旋超表面发射源

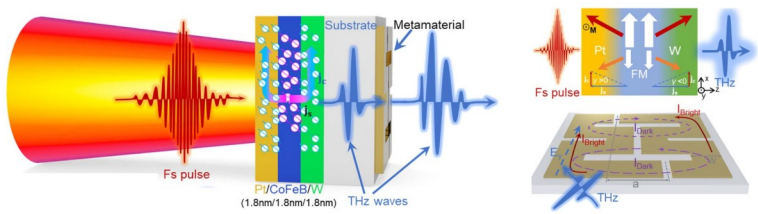
调控一体化的另外一种重要方式,主要形式为将自旋太赫兹源与同一方位或不同方位的超表面在同一衬底上相集成,可以实现与太赫兹发射-调控分离式工作近似相同的效果,但由于自旋太赫兹源易于集成的优势,同片集成自旋太赫兹源器件有利于太赫兹源的小型化、集成化发展.

2020 年,Liu 等人[75]通过 W/CoFe/Pt 铁磁异质结与超材料同片集成实现了高度集成化的自旋太赫兹发射源,并与一组分离式自旋源与超表面进行了比较,证明了自旋太赫兹源同片集成超表面的可行性,如图 11(*a*)所示. Bai 等人[76]将此器件进而应用于无标记太赫兹生物传感领域,首次实现了单片太赫兹发射源生物传感器,如图 11(*b*)所示. 该太赫兹传感器件与生物分析物之间显示出强烈的近场相互作用,实现了最大 0.16 THz 的红移和 15.68 的高灵敏度,可应用于高灵敏度下小尺寸空间分辨率的生物传感分析. 最近,Jin 等人[77]通过将双环超表面与柔性衬底上的级联铁磁异质结相结合,成功制备出一种可以控制太赫兹发射和光谱应用的柔性集成化自旋太赫兹超表面,如图 11(*c*)所示,证明了超表面结构的共振特性不受级联自旋太赫兹源环境的影响,并通过生物材料核黄素片进行了太赫兹光谱的表征与分析. 因此,同片集成的自旋超表面发射源为可重构、高灵活的超宽带太赫兹发射-调控一体化器件提供了一种全新的研究方案,这为通过自旋太赫兹源实现太赫兹生物传感、近场调控等应用提供了重要的参考.

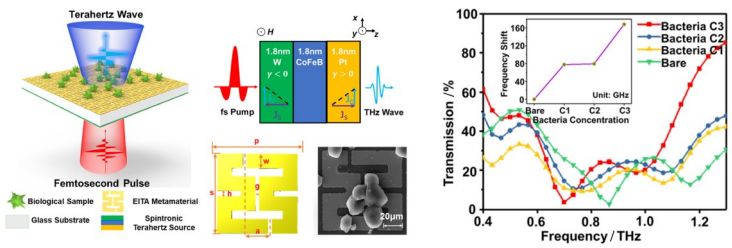
5.3.3 天线耦合的自旋太赫兹发射源

天线耦合的自旋太赫兹发射源结合了光电导天线太赫兹源和自旋太赫兹源的优势,通过将光电导天线发射的耦合增强应用于自旋太赫兹发射强度和功率的改善,在太赫兹通信、光谱等领域具有较高的应用价值. 2019 年,Nandi 等人[32]通过 1 560 nm 中心波长、90 fs 脉冲持续时间、100 MHz 重复频率的商业化光纤耦合飞秒激光器实现自旋太赫兹的泵浦,并应用 H 偶极子天线和槽型天线优化自旋太赫兹发射源的外部耦合和频率覆盖,与非结构化的发射源相比,其峰峰值和信号强度明显增强. 类似地,如图 12(*a*)所示,Talara 等人[78]通过在 MgO 衬底上制备空竹形的自旋太赫兹发射源,同样发现了明显的发射幅度增强现象. 此外,通过增大顶层金属的厚度,可以改进太赫兹信号到自由空间的外耦合,进而增强太赫兹发射. 最近,Hoppe 等人[79]通过在铁磁异质结两端连接共面波导,如图 12(*b*)所示,借助逆自旋霍尔效应研究超快电流脉冲,平面波导传导并导出铁磁异质结的太赫兹场,并由快速采样示波器探测传输的瞬态过程,证明了自旋双层体系中超快单级电流脉冲的产生,为构建片上太赫兹场控制方案提供了可能.

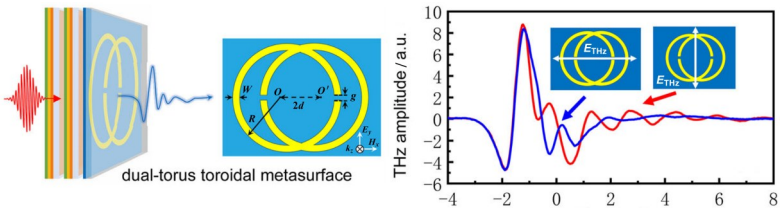
自旋太赫兹发射-调控一体化器件的研究对实现集成化、多功能和主动调控的太赫兹辐射具有重要的启发意义,并在光谱调制、偏振调节、编码调控等方面逐渐显示出潜在的应用价值,多种方案的交叉融合也促生出更多、更有效的太赫兹超表面功能拓展应用.



(*a*) 同片集成的自旋超表面太赫兹发射源,飞秒激光从左侧入射到三层异质结薄膜中,超表面集成在衬底的另一侧,实现对太赫兹波的近场调控[75]

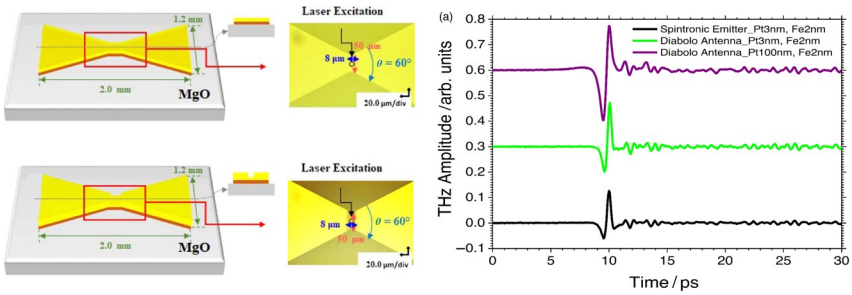


(*b*) 通过集成自旋超表面太赫兹发射源实现单片太赫兹生物传感器[76]

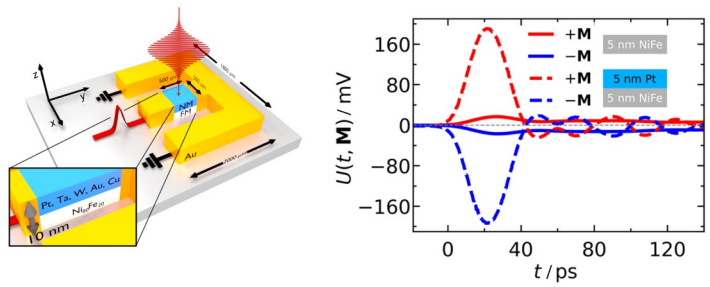


(*c*) 柔性自旋太赫兹发射源集成超表面结构的示意图,通过双环超表面实现对太赫兹波的调控[77]

图 11　同片集成的自旋超表面发射源



(*a*) 空竹形天线耦合自旋太赫兹发射源[78]



(*b*) 使用双层自旋异质结两端连接平面波导,实现片上超快太赫兹脉冲的测试[79]

图 12　天线耦合的自旋太赫兹发射源

6 总结与展望

本文综述了自旋太赫兹发射源的提出及其发展历程,并对未来自旋太赫兹源在效率提升、新机理研究及自旋太赫兹应用技术等方面的发展进行了展望. 当前针对自旋太赫兹源的部分研究仍聚焦于改善太赫兹信号的输出功率和发射效率,实现更高效、更全面的高功率发射源. 近几年,越来越多的研究者在自旋太赫兹异质结发射的研究基础上,通过研究基于拓扑材料、反铁磁材料等新型异质结材料的发射,探究新材料的微观机理及异质结的自旋输运等性质;同时,引入液晶、超表面、电磁场等调谐因素,实现振幅、相位、频率及偏振态等因素的主动调控也是当前自旋太赫兹源的研究重点. 此外,基于超快自旋电子学的太赫兹源具有大带宽、成本低、易于加工和集成等优势,有利于实现小型化、集成化、高效化及多功能化太赫兹器件的设计与发展,因此,在生物传感、材料表征、显微成像、太赫兹通信等领域实现广泛的研究应用也是近期及未来的研究重点.

拓扑绝缘体作为一种新型二维材料,具有较强的自旋-轨道耦合相互作用,被认为是实现未来超低功耗自旋电子器件和量子计算的重要材料. 拓扑绝缘体材料在飞秒激光泵浦下,可以由光生伏打效应产生超快光电流;同时,在拓扑绝缘体和铁磁异质结中,由于自旋-电荷转换效应可以产生超快自旋太赫兹电流,两种效应产生的太赫兹分量对实现基于新材料体系的多功能化、偏振可调的新型自旋太赫兹发射具有重要意义. 因此,基于拓扑材料、二维半导体材料、铁磁二维材料、反铁磁材料等新材料体系,实现新型自旋太赫兹发射对新机理研究、发射性能改善、多功能化拓展等方面具有重要影响.

太赫兹时域光谱技术提供了实现无热和无接触超快测量的可能性,为自旋电子学的基础研究提供了一种强大的定量工具. 该技术可以应用于研究自旋太赫兹电磁脉冲与准粒子(磁子、声子、等离激元等)以及带内电子跃迁的相互作用. 除了太赫兹发射光谱及非线性太赫兹时域光谱的应用外,太赫兹时域光谱技术还可以用于自旋电子学现象的太赫兹特性研究,通过该技术可以揭示太赫兹超短时间尺度上的非平衡态新现象,这对自旋电子学效应提供了新的研究视角. 因此,基于自旋电子学与超快太赫兹脉冲发射相结合的研究,除了用于研究自旋-电荷转换的发射过程外,还可以通过太赫兹脉冲信号进行太赫兹自旋电子学和磁学的相关研究,其主要目的是通过太赫兹脉冲对自旋动力学进行表征和激励,这对超快自旋动力学及超快磁学的拓展研究具有重要的研究意义.

最后,随着通信技术的快速发展和计算机处理容量的增强,对数据传输速率攀升的需求使太赫兹频段通信获得了极大关注. 高载波频率和大带宽使太赫兹技术在理想条件下可以提供Tbps的传输速率,可以实现超高速有线网络和个人无线设备之间的无缝互连,完成“最后一公里”信息传输. 自旋太赫兹发射源的发射特性与材料本身属性相关,这种物理基础使该类薄膜稳定度高、易于微纳加工且可调控性强;同时,自旋太赫兹源所具有的大带宽、无带隙特性,有利于实现超宽带、低功耗的数据传输;自旋太赫兹源本身特殊的异质结结构使其利用自旋轨道矩效应可以实现便捷的电调控,这使自旋太赫兹源可以与信息超表面相结合,通过相位调制及数字编码实现波束的灵活控制,实现基于自旋电子学的新型“智能超表面”器件. 这种小型化、集成化、多功能化的自旋太赫兹器件对通信感知一体化技术的发展具有重要的研究意义,有利于促进光电一体化自旋太赫兹器件的发展与应用.

参考文献

[1] SEIFERT T S, CHENG L, WEI Z X, et al. Spintronic sources of ultrashort terahertz electromagnetic pulses[J]. Applied Physics Letters, 2022, 120(18): 180401.

[2] KAMPFRATH T, TANAKA K, NELSON K A. Resonant and nonresonant control over matter and light by intense terahertz transients[J]. Nature Photonics, 2013, 7(9): 680-690.

[3] NEU J, SCHMUTTENMAER C A. Tutorial: An introduction to terahertz time domain spectroscopy (THz-TDS)[J]. Journal of Applied Physics, 2018, 124(23): 231101.

[4] 冯正, 王大承, 孙松, 等. 自旋太赫兹源: 性能、调控及其应用[J]. 物理学报, 2020, 69(20): 208705.
FENG Z, WANG D C, SUN S, et al. Spintronic terahertz emitter: Performance, manipulation, and applications[J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(20): 208705. (in Chinese)

[5] WANG C T, LIU Y M. Ultrafast optical manipulation of magnetic order in ferromagnetic materials[J]. Nano Convergence, 2020, 7(1): 35.

[6] MELNIKOV A, RAZDOLSKI I, WEHLING T O, et al. Ultrafast transport of laser-excited spin-polarized carriers in Au/Fe/MgO(001)[J]. Physical Review Letters, 2011, 107(7): 076601.

[7] SCHOLL A, BAUMGARTEN L, JACQUEMIN R, et al. Ultrafast spin dynamics of ferromagnetic thin films observed by fs spin-resolved two-photon photoemission[J]. Physical Review Letters, 1997, 79(25): 5146-5149.

[8] BEAUREPAIRE E, TURNER G M, HARREL S M, et al. Coherent terahertz emission from ferromagnetic films excited by femtosecond laser pulses[J]. Applied Physics Letters, 2004, 84(18): 3465-3467.

[9] KAMPFRATH T, BATTIATO M, MALDONADO P, et al. Terahertz spin current pulses controlled by magnetic heterostructures[J]. Nature Nanotechnology, 2013, 8(4): 256-260.

[10] BEAUREPAIRE E, MERLE J, DAUNOIS A, et al. Ultrafast spin dynamics in ferromagnetic nickel[J]. Physical Review Letters, 1996, 76(22): 4250-4253.

[11] BATTIATO M, CARVA K, OPPENEER P M. Superdiffusive spin transport as a mechanism of ultrafast demagnetization[J]. Physical Review Letters, 2010, 105(2): 027203.

[12] BATTIATO M, CARVA K, OPPENEER P M. Theory of laser-induced ultrafast superdiffusive spin transport in layered heterostructures[J]. Physical Review B, 2012, 86(2): 024404.

[13] BATTIATO M, HELD K. Ultrafast and gigantic spin injection in semiconductors[J]. Physical Review Letters, 2016, 116(19): 196601.

[14] ROJAS-SÁNCHEZ J C, OYARZÚN S, FU Y, et al. Spin to charge conversion at room temperature by spin pumping into a new type of topological insulator: α-Sn films [J]. Physical Review Letters, 2016, 116(9): 096602.

[15] SHEN K, VIGNALE G, RAIMONDI R. Microscopic theory of the inverse edelstein effect[J]. Physical Review Letters, 2014, 112(9): 096601.

[16] SÁNCHEZ J C R, VILA L, DESFONDS G, et al. Spin-to-charge conversion using Rashba coupling at the interface between non-magnetic materials[J]. Nature Communications, 2013, 4: 2944.

[17] ZHOU C, LIU Y P, WANG Z, et al. Broadband terahertz generation via the interface inverse rashba-edelstein effect [J]. Physical Review Letters, 2018, 121(8): 086801.

[18] JUNGFLEISCH M B, ZHANG Q, ZHANG W, et al. Control of terahertz emission by ultrafast spin-charge current conversion at rashba interfaces[J]. Physical Review Letters, 2018, 120(20): 207207.

[19] SHEN J H, FENG Z, XU P C, et al. Spin-to-charge conversion in Ag/Bi bilayer revisited[J]. Physical Review Letters, 2021, 126(19): 197201.

[20] ZHANG Q, LUO Z Y, LI H, et al. Terahertz emission from anomalous Hall effect in a single-layer ferromagnet [J]. Physical Review Applied, 2019, 12(5): 054027.

[21] ZHANG Q, YANG Y M, LUO Z Y, et al. Terahertz emission from an exchange-coupled synthetic antiferromagnet [J]. Physical Review Applied, 2020, 13(5): 054016.

[22] LIU Y S, CHENG H Y, XU Y, et al. Separation of emission mechanisms in spintronic terahertz emitters[J]. Physical Review B, 2021, 104(6): 064419.

[23] SEIFERT T, JAISWAL S, MARTENS U, et al. Efficient metallic spintronic emitters of ultrabroadband terahertz radiation[J]. Nature Photonics, 2016, 10(7): 483-488

[24] TOROSYAN G, KELLER S, SCHEUER L, et al. Optimized spintronic terahertz emitters based on epitaxial grown Fe/Pt layer structures[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 1311.

[25] SEIFERT T, MARTENS U, GÜNTHER S, et al. Terahertz spin currents and inverse spin Hall effect in thin-film heterostructures containing complex magnetic compounds[J]. SPIN, 2017, 7(3): 1740010.

[26] SASAKI Y, SUZUKI K Z, MIZUKAMI S. Annealing effect on laser pulse-induced THz wave emission in Ta/CoFeB/MgO films[J]. Applied Physics Letters, 2017, 111 (10): 102401.

[27] GAO Y, HE Y B, PANDEY C, et al. Enhanced spintronic terahertz emission in W/CoFeB heterostructures through annealing effect[C]//2019 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). Paris: IEEE, 2019: 1-3.

[28] LI G, MEDAPALLI R, MIKHAYLOVSKIY R V, et al. THz emission from Co/Pt bilayers with varied roughness, crystal structure, and interface intermixing[J]. Physical Review Materials, 2019, 3(8): 084415.

[29] SEIFERT T, JAISWAL S, SAJADI M, et al. Ultrabroadband single-cycle terahertz pulses with peak fields of $300\,\mathrm{kV\cdot cm^{-1}}$ from a metallic spintronic emitter[J]. Applied Physics Letters, 2017, 110(25): 252402.

[30] FENG Z, YU R, ZHOU Y, et al. Highly efficient spintronic terahertz emitter enabled by metal-dielectric photonic crystal[J]. Advanced Optical Materials, 2018, 6(23): 1800965.

[31] LIU S J, GUO F W, LI P Y, et al. Nanoplasmonic-enhanced spintronic terahertz emission[J]. Advanced Materials Interfaces, 2022, 9(2): 2101296.

[32] NANDI U, ABDELAZIZ M S, JAISWAL S, et al. Antenna-coupled spintronic terahertz emitters driven by a 1550 nm femtosecond laser oscillator[J]. Applied Physics

Letters, 2019, 115(2): 022405.

[33] ZHANG H, FENG Z, ZHANG J N, et al. Laser pulse induced efficient terahertz emission from Co/Al heterostructures[J]. Physical Review B, 2020, 102(2): 024435.

[34] QIU H S, WANG L, SHEN Z X, et al. Magnetically and electrically polarization-tunable THz emitter with integrated ferromagnetic heterostructure and large-birefringence liquid crystal[J]. Applied Physics Express, 2018, 11(9): 092101.

[35] KONG D Y, WU X J, WANG B, et al. Broadband spintronic terahertz emitter with magnetic-field manipulated polarizations[J]. Advanced Optical Materials, 2019, 7(20): 1900487.

[36] HIBBERD M T, LAKE D S, JOHANSSON N A B, et al. Magnetic-field tailoring of the terahertz polarization emitted from a spintronic source[J]. Applied Physics Letters, 2019, 114(3): 031101.

[37] CHEN X H, WU X J, SHAN S Y, et al. Generation and manipulation of chiral broadband terahertz waves from cascade spintronic terahertz emitters[J]. Applied Physics Letters, 2019, 115(22): 221104.

[38] WANG X B, CHENG L, ZHU D P, et al. Ultrafast spin-to-charge conversion at the surface of topological insulator thin films[J]. Advanced Materials(Deerfield Beach, Fla.), 2018, 30(52): 1802356.

[39] ZHAO H H, CHEN X H, OUYANG C, et al. Generation and manipulation of chiral terahertz waves in the three-dimensional topological insulator Bi_2Te_3[J]. Advanced Photonics, 2020, 2(6): 066003.

[40] CHEN X H, WANG H T, WANG C, et al. Efficient generation and arbitrary manipulation of chiral terahertz waves emitted from Bi_2Te_3-Fe heterostructures[J]. Advanced Photonics Research, 2021, 2(4): 2000099.

[41] LIU C Q, WANG S J, ZHANG S, et al. Active spintronic-metasurface terahertz emitters with tunable chirality[J]. Advanced Photonics, 2021, 3(5): 056002.

[42] SUN Y, XU Y, LI H L, et al. Flexible control of broadband polarization in a spintronic terahertz emitter integrated with liquid crystal and metasurface[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(28): 32646-32656.

[43] CHEN X H, WANG H T, LIU H J, et al. Generation and control of terahertz spin currents in topology-induced 2D ferromagnetic Fe_3GeTe_2|Bi_2Te_3 heterostructures[J]. Advanced Materials, 2022, 34(9): 2270067.

[44] WU X J, WANG H C, LIU H J, et al. Antiferromagnetic-ferromagnetic heterostructure-based field-free terahertz emitters[J]. Advanced Materials(Deerfield Beach, Fla.), 2022, 34(42): 2204373.

[45] LEITENSTORFER A, HUNSCHE S, SHAH J, et al. Femtosecond high-field transport in compound semiconductors [J]. Physical Review B, 2000, 61(24): 16642-16652.

[46] YAMAHARA K, MANNAN A, KAWAYAMA I, et al. Ultrafast spatiotemporal photocarrier dynamics near GaN surfaces studied by terahertz emission spectroscopy[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 14633.

[47] NAKANISHI H, NISHIMURA T, KAWAYAMA I, et al. Probing the surface potential of SiO_2/4H-SiC(0001) by terahertz emission spectroscopy[J]. Journal of Applied Physics, 2021, 130(11): 115305.

[48] KUSHNIR K, WANG M J, FITZGERALD P D, et al. Ultrafast zero-bias photocurrent in GeS nanosheets: Promise for photovoltaics[J]. ACS Energy Letters, 2017, 2(6): 1429-1434.

[49] BAGSICAN F R G, WAIS M, KOMATSU N, et al. Terahertz excitonics in carbon nanotubes: Exciton autoionization and multiplication[J]. Nano Letters, 2020, 20(5): 3098-3105.

[50] LI C, FANG B, ZHANG L K, et al. Terahertz generation via picosecond spin-to-charge conversion in Ir_{Mn3}/Ni-Fe heterojunction[J]. Physical Review Applied, 2021, 16(2): 024058.

[51] CHENG H, WANG Y K, HE H C, et al. Efficient and temperature-independent terahertz emission from CoFeB/NiCu heterostructures[J]. Physical Review B, 2022, 105(15): 155141.

[52] GANICHEV S, PRETTL W. Intense Terahertz Excitation of Semiconductors[M]. Oxford: Oxford University Press, 2005.

[53] HOFFMANN M C. Nonlinear Terahertz Spectroscopy [M]//Terahertz Spectroscopy and Imaging. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012: 355-388.

[54] HAFEZ H A, KOVALEV S, DEINERT J C, et al. Extremely efficient terahertz high-harmonic generation in graphene by hot Dirac fermions[J]. Nature, 2018, 561(7724): 507-511.

[55] KUEHN W, REIMANN K, WOERNER M, et al. Two-dimensional terahertz correlation spectra of electronic excitations in semiconductor quantum wells[J]. The Journal of Physical Chemistry. B, 2011, 115(18): 5448-5455.

[56] STEPANOV A G, HEBLING J, KUHL J. Efficient gener-

ation of subpicosecond terahertz radiation by phase-matched optical rectification using ultrashort laser pulses with tilted pulse fronts[J]. Applied Physics Letters, 2003, 83(15): 3000-3002.

[57] HEBLING J, ALMÁSI G, KOZMA I Z, et al. Velocity matching by pulse front tilting for large-area THz-pulse generation[J]. Optics Express, 2002, 10(21): 1161-1166.

[58] HEBLING J, STEPANOV A G, ALMÁSI G, et al. Tunable THz pulse generation by optical rectification of ultrashort laser pulses with tilted pulse fronts[J]. Applied Physics B, 2004, 78(5): 593-599.

[59] HEBLING J, YEH K L, HOFFMANN M C, et al. Generation of high-power terahertz pulses by tilted-pulse-front excitation and their application possibilities[J]. Josa B, 2008, 25(7): B6-B19.

[60] BLANCHARD F, SCHMIDT B E, ROPAGNOL X, et al. Terahertz pulse generation from bulk GaAs by a tilted-pulse-front excitation at 1.8 μm[J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(24): 241106.

[61] KUMAR S, NIVEDAN A, SINGH A, et al. Optical damage limit of efficient spintronic THz emitters[J]. iScience, 2021, 24(10): 103152.

[62] KUMAR S, KUMAR S. Ultrafast spintronic THz emitters and their optical damage limit[C]//2022 47th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves(IRMMW-THz). Delft: IEEE, 2022: 1-2.

[63] MÜLLER M, MARTÍN SABANÉS N, KAMPFRATH T, et al. Phase-resolved detection of ultrabroadband THz pulses inside a scanning tunneling microscope junction [J]. ACS Photonics, 2020, 7(8): 2046-2055.

[64] STELZER E H K. Beyond the diffraction limit[J]. Nature, 2002, 417(6891): 806-807.

[65] SMITH D J. Ultimate resolution in the electron microscope[J]. Materials Today, 2008, 11: 30-38.

[66] COCKER T L, PELLER D, YU P, et al. Tracking the ultrafast motion of a single molecule by femtosecond orbital imaging[J]. Nature, 2016, 539(7628): 263-267.

[67] PELLER D, KASTNER L Z, BUCHNER T, et al. Sub-cycle atomic-scale forces coherently control a single-molecule switch[J]. Nature, 2020, 585(7823): 58-62.

[68] CASTRO-CAMUS E, KOCH M, MITTLEMAN D M. Recent advances in terahertz imaging: 1999 to 2021[J]. Applied Physics B, 2022, 128(1): 12.

[69] CHEN S C, FENG Z, LI J, et al. Ghost spintronic THz-emitter-array microscope[J]. Light: Science & Applications, 2020, 9: 99.

[70] YANG D W, LIANG J H, ZHOU C, et al. Powerful and tunable THz emitters based on the Fe/Pt magnetic heterostructure[J]. Advanced Optical Materials, 2016, 4(12): 1944-1949.

[71] JIN Z M, ZHANG S N, ZHU W H, et al. Terahertz radiation modulated by confinement of picosecond current based on patterned ferromagnetic heterostructures[J]. Physica Status Solidi – Rapid Research Letters, 2019, 13 (9): 1900057.

[72] SONG B J, SONG Y N, ZHANG S N, et al. Controlling terahertz radiation with subwavelength blocky patterned CoFeB/Pt heterostructures[J]. Applied Physics Express, 2019, 12(12): 122003.

[73] LENDINEZ S, LI Y, WU W P, et al. Terahertz emission from magnetic thin film and patterned heterostructures [C]//Proceedings of SPIE Nanoscience + Engineering, Volume. 11090, Spintronics XII. San Diego: SPIE Press, 2019: 25-31.

[74] TONG M Y, HU Y Z, HE W B, et al. Light-driven spintronic heterostructures for coded terahertz emission[J]. ACS Nano, 2022, 16(5): 8294-8300.

[75] LIU Y S, BAI Z Y, XU Y, et al. Generation of tailored terahertz waves from monolithic integrated metamaterials onto spintronic terahertz emitters[J]. Nanotechnology, 2021, 32(10): 105201.

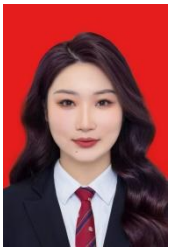
[76] BAI Z Y, LIU Y S, KONG R R, et al. Near-field terahertz sensing of HeLa cells and pseudomonas based on monolithic integrated metamaterials with a spintronic terahertz emitter[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12 (32): 35895-35902.

[77] JIN Z M, PENG Y, NI Y Y, et al. Cascaded amplification and manipulation of terahertz emission by flexible spintronic heterostructures[J]. Laser & Photonics Reviews, 2022, 16(9): 2100688.

[78] TALARA M, BULGAREVICH D S, TACHIOKA C, et al. Efficient terahertz wave generation of diabolo-shaped Fe/Pt spintronic antennas driven by a 780 nm pump beam[J]. Applied Physics Express, 2021, 14(4): 042008.

[79] HOPPE W, WEBER J, TIRPANCI S, et al. On-chip generation of ultrafast current pulses by nanolayered spintronic terahertz emitters[J]. ACS Applied Nano Materials, 2021, 4(7): 7454-7460.

作者简介



孙 芸 女,1997年2月出生于山东省烟台市. 现为北京航空航天大学集成电路科学与工程学院博士. 主要研究方向为自旋太赫兹发射与调控、太赫兹超快自旋动力学研究和二维自旋电子器件等.
E-mail: sunyun@buaa.edu.cn

张 帆 女,1990年2月出生于安徽省阜阳市. 现为北京航空航天大学合肥创新研究院特聘副研究员. 主要研究方向为自旋太赫兹.
E-mail: fanzhang@buaa.edu.cn

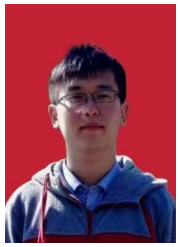
王航天 男,1995年4月出生于河南省开封市. 现为北京航空航天大学大学集成电路科学与工程学院博士. 主要研究方向为二维磁性材料及二维自旋太赫兹发射器.
E-mail: wanghangtian@buaa.edu.cn

白中扬 男,1994年12月出生于山东省日照市. 现为北京航空航天大学电子信息工程学院博士. 主要研究方向为太赫兹微纳器件及工艺.
E-mail: baizhongyang@buaa.edu.cn

孙 统 男,1995年5月出生于河南省南阳市. 现为北京航空航天大学集成电路科学与工程学院博士. 主要研究方向为太赫兹及其应用.
E-mail: suntong@buaa.edu.cn

彭静宜 女,2000年3月出生于天津市. 现为北京航空航天大学集成电路科学与工程学院硕士. 主要研究方向为太赫兹自旋电子学.
E-mail: PJY_122@buaa.edu.cn

张 盈 女,2000年5月出生于吉林省长春市. 现为北京航空航天大学集成电路科学与工程学院硕士. 主要研究方向为自旋太赫兹及其应用.
E-mail: zhang_ying@buaa.edu.cn



刘永山 男,1996年4月出生于山东省青岛市. 现为北京航空航天大学博士. 主要研究方向为自旋电子学与太赫兹.
E-mail: liuyongshan@buaa.edu.cn

王梓力 男,1999年9月出生于湖南省张家界市. 现为北京航空航天大学集成电路科学与工程学院硕士. 主要研究方向为自旋轨道矩无场翻转.
E-mail: zy2141118@buaa.edu.cn

李 竞 男,1998年8月出生于山东省潍坊市. 现为北京航空航天大学集成电路科学与工程学院博士. 主要研究方向为自旋电子学及其应用.
E-mail: bhwllj@buaa.edu.cn

高 凡 男,1998年1月出生于山东省德州市. 现为北京航空航天大学集成电路科学与工程学院博士. 主要研究方向为二维磁性材料的制备及应用.
E-mail: bhgaofan@buaa.edu.cn

赵兴科 男,1999年4月出生于河北省邯郸市. 现为北京航空航天大学集成电路科学与工程学院硕士. 主要研究方向为自旋电子学及其应用.
E-mail: zxk0104@buaa.edu.cn

谢魏然　男,1999年4月出生于山西省晋城市. 现为北京航空航天大学集成电路科学与工程学院硕士. 主要研究方向为自旋电子器件机理研究.

E-mail: xwr@buaa.edu.cn

田祺云　女,1998年03月出生于北京市. 现为北京航空航天大学集成电路学院硕士. 主要研究方向为自旋太赫兹源辐射的形状调控.

E-mail: tianqiyun1998@163.com

张　婕　女,1989年1月出生于天津市. 现为北京航空航天大学讲师. 主要研究方向为自旋电子材料与器件.

E-mail: zhangjie2019@buaa.edu.cn

许　涌　男,1987年6月出生于江苏省泰州市. 现为北京航空航天大学集成电路科学与工程学院讲师,北航合肥创新研究院微纳中心副主任. 主要研究方向为自旋电子学和超快磁学.

E-mail: yongxu@buaa.edu.cn

张　慧　女,1973年6月出生于陕西省西安市. 现为北京航空航天大学集成电路科学与工程学院研究员. 主要研究方向为物联网通信芯片.

E-mail: zhang_hui@buaa.edu.cn

温良恭　男,1981年7月出生于黑龙江省哈尔滨市. 现为北京航空航天大学集成电路科学与工程学院副教授. 主要研究方向为太赫兹器件及传感器.

E-mail: wenlg@buaa.edu.cn

聂天晓(通讯作者)　男,1985年5月出生于山东省临沂市. 现为北京航空航天大学集成电路科学与工程学院副院长、教授、博士生导师. 获北航卓越百人、青年拔尖人才、国家特聘青年专家等称号. 主要研究方向为新型超低功耗自旋场效应晶体管、磁随机存储器件、自旋太赫兹器件. 曾主持国家自然科学基金面上项目、国家重点研发课题项目等. 在*Nature Materials*, *Nature Nanotechnology*, *Nature Communications*, *ACS Nano*等国际著名期刊上共发表SCI论文70余篇,获国家专利30多项,Google scholar总引用3000余次,H因子23.

E-mail: nietianxiao@buaa.edu.cn

赵巍胜　男,1980年4月出生于山东省烟台市. 现为北京航空航天大学集成电路科学与工程学院教授、博士生导师,教育部长江学者,2021年科学探索奖获得者. 主要研究方向为自旋电子学、新型信息器件、非易失存储器等领域的交叉研究. 曾主持国家自然科学基金重大仪器项目、国家重大专项核高基研发计划项目等. 近五年以第一或通讯作者在*Nature Electronics*, *Proceedings of the IEEE*, *PRL*, *PNAS*等期刊及IEDM等顶级会议发表论文300余篇,H因子68,国际会议邀请报告(TMRC, NVMST, DATE等)120余次,专利150余项(产权转让或授权使用50余项).

E-mail: wszhao@buaa.edu.cn