

铁磁异质结的远红外脉冲辐射及其光热调控研究*

褚欣博 金钻明[†] 吴旭 李婧楠 沈阳
王若愚 季秉煜 李章顺 彭滢(上海理工大学, 太赫兹技术创新研究院, 上海市现代光学系统重点实验室, 光学仪器与
系统教育部工程中心, 太赫兹光谱与影像技术协同创新中心, 上海 200093)

(2023 年 4 月 6 日收到; 2023 年 5 月 22 日收到修改稿)

飞秒激光脉冲辐照在 Pt/CoFe/Ta 铁磁异质结上, 导致铁磁层中磁化强度超快淬灭并产生瞬态自旋流. 自旋流向重金属层扩散, 基于逆自旋霍尔效应在重金属层中转换成瞬态电荷流, 产生宽带远红外脉冲辐射. 本文通过两方面实验, 研究飞秒激光的光热效应对铁磁异质结产生远红外辐射的调控. 首先, 通过改变外加磁场的大小和方向, 研究远红外辐射脉冲振幅-磁场的磁滞回线. 与振动样品磁力计测量的磁滞回线相比, 远红外辐射脉冲振幅-磁场的磁滞回线表现出更小的矫顽力. 增大抽运光的能量密度, 发现样品的矫顽力进一步下降. 其次, 对 Pt/CoFe/Ta 三层异质结进行正向磁化饱和后施加一个反向的小磁场, 实验发现当入射的激光能量密度超过 1.43 mJ/cm^2 时, 远红外辐射脉冲信号发生极性的反转. 上述两个实验结果不仅阐明飞秒激光脉冲的光热效应, 也为基于电子自旋的远红外辐射脉冲的调控提供新方法.

关键词: 光热效应, 磁滞回线, 远红外脉冲发射光谱, 远红外脉冲调控**PACS:** 78.47.D-, 42.72.Ai, 78.20.-e, 78.20.nb**DOI:** 10.7498/aps.72.20230543

1 引言

远红外波介于微波与红外线之间, 这一波段包括丰富的光与物质相互作用, 包括自由载流子输运、晶格振动、自旋进动等^[1,2]. 远红外波具有良好的穿透性、低损伤、指纹谱识别等特性, 是宏观电子学与微观光子学的过渡频段. 远红外技术在医学诊断、无损检测、高速无线通讯等领域具有广泛的应用前景^[3,4].

飞秒激光诱导超快退磁不仅为亚皮秒时间尺度上操纵电子自旋提供有效途径^[5-7], 而且为发展

未来太赫兹频率的信息技术开辟研究方向^[8,9]. 近年来, 基于超快自旋光电子学的研究, 以低成本和成熟的薄膜生长技术制备的铁磁 (FM)/重金属 (HM) 异质结构, 已经成为远红外相干辐射源研究领域的前沿之一^[10-13]. 基于电子自旋的远红外辐射源兼顾低成本、宽带宽、高效率等优势引起了国内外学者的研究兴趣^[14,15]. 基于电子自旋的远红外电磁辐射的物理机制主要包含以下物理过程. 首先, 当飞秒激光脉冲入射到 FM 层时, 激发 FM 层中的热电子. 该系统通过电子-电子、电子-声子和电子-磁子相互作用实现热平衡^[16]. 在达到热平衡之前, 热电子获得 10^6 m/s 量级的速度, 并在 FM 层内以超

* 国家自然科学基金 (批准号: 61975110, 61988102)、高等学校学科创新引智计划 (111 计划)(批准号: D18014)、上海市科技创新行动计划 (批准号: 22JC1400202)、上海市科委国际联合实验室项目 (批准号: 17590750300)、上海市科委重点项目 (批准号: YDZX20193100004960)、上海市科学技术委员会科技创新行动计划 (批准号: 21JC1402600)、上海市青年科技启明星计划 (批准号: 18QA1401700)、上海市教育委员会和上海市教育发展基金会“晨光计划”(批准号: 16CG45) 和上海高校青年东方学者计划 (批准号: QD2015020) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: physics_jzm@usst.edu.cn

扩散模式移动^[17]. 非平衡的自旋向上和自旋向下电子形成超快自旋流, 并注入相邻具有强自旋-轨道耦合效应的 HM 层中. 基于逆自旋霍尔效应 (ISHE), 进入 HM 层的超快自旋流将转变成瞬态电荷流, 从而产生远红外相干脉冲辐射^[10,18,19]. 在 ISHE 机制中, 远红外脉冲发射的强度依赖于自旋流-电荷流的转换效率. 近年来, Rashba 界面^[20–22]、二维杂化金属卤化物^[23] 和拓扑绝缘体^[24–27] 等材料或界面都已被实验证明可以实现自旋流-电荷流的高效转换, 从而辐射宽带远红外相干脉冲.

基于高灵敏、非破坏等优点, 超快远红外脉冲发射光谱技术已经成为研究半导体材料^[28–30]、低维异质结^[31–33]、拓扑量子材料^[34–37] 中载流子的非平衡输运、位移电流和注入电流等瞬态光电流的重要工具. 利用超快远红外脉冲发射光谱技术, 通过研究 Fe 纳米薄膜上不同的覆盖层, 实验上不仅可以区分磁偶极和电偶极诱导的远红外电磁脉冲发射, 而且可以获得铁磁性纳米薄膜时间分辨的磁化动力学过程^[38–40]. 进一步, 可以定量分析 FM/HM 异质结构远红外发射器中自旋流-电荷流的转换效率^[41–43]. 超快远红外脉冲发射光谱技术已经成为研究铁磁性薄膜及其异质结中的超快退磁、反常霍尔效应、逆自旋霍尔效应等的有力工具. 尽管有部分研究表明, 改变入射光的偏振态和光子能量^[43–47], 可以部分改变 FM/HM 异质结构的远红外脉冲辐射特性. 但是, 激光诱导的光热效应对远红外脉冲辐射特性的影响还没有得到深入研究. 最近的研究报道中, 飞秒激光诱导的 FM/HM 异质结构都处于正向或反向饱和磁化强度状态, 目的在于展示高效的远红外脉冲辐射及其外场调控能力^[48–50]. 对基于电子自旋的远红外波产生的物理机制而言, 飞秒激光放大器产生的毫焦级超短激光脉冲与处于不同磁化状态样品的相互作用仍有待研究.

本文采用超快远红外脉冲发射光谱研究了 Pt/CoFe/Ta 三层异质结中飞秒激光脉冲诱导的光热效应. 与振动样品磁力计测量的磁滞回线相比, 远红外辐射脉冲振幅-磁场的磁滞回线表现出更小的矫顽力. 进一步实验发现, Pt/CoFe/Ta 铁磁异质结发射的远红外波的相位随着激发光能量密度增大发生反转. 实验结果表明, 飞秒激光脉冲在样品内诱导退磁并产生自旋流的同时, 激光脉冲所沉积的热能使铁磁层的磁各向异性性能发生改变, 最终实现超快自旋流的光热反转. 本研究通过电

荷、自旋、超短光脉冲和热的相互作用, 为基于电子自旋的宽频远红外辐射特性的调控提供新的方法.

2 实验

图 1(a) 为 Pt/CoFe/Ta 三层异质结在飞秒激光激发下产生远红外相干辐射的示意图. 飞秒激光放大器输出激光能量为 1.55 eV、脉冲宽度为 120 fs、波长为 800 nm、重复频率为 1 kHz 的激光脉冲. 激光脉冲经过分束镜, 分成能量较大的抽运光和能量较小的探测光. 抽运光正入射到 Pt/CoFe/Ta 三层异质结样品上 (沿 z 轴), 产生远红外脉冲辐射. 保持激光光斑大小不变, 通过调节中性可调衰减片以改变抽运激光的功率, 从而增大或减小入射到样品表面的激光能量密度. 从 Pt/CoFe/Ta 三层异质结样品产生的远红外脉冲通过离轴抛物镜聚焦到 1 mm 厚的 $\langle 110 \rangle$ ZnTe 晶体上. 图 1(b) 描述通过非线性晶体的电光效应检测并记录远红外脉冲的时域波形. ZnTe 晶体的折射率在远红外脉冲的电场作用下发生变化, 因此经过 ZnTe 晶体的探测光脉冲偏振态随远红外波电场的时域波形而改变. 通过 $1/4$ 波片、沃拉斯顿棱镜和平衡桥光电探测器, 检测探测光的偏振态, 进而获得到远红外脉冲的时域波形. 所有实验均在室温下干燥空气下进行, 以防止空气中的水汽对远红外辐射脉冲的吸收.

在聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 柔性衬底上, 通过低成本、高成膜质量的直流磁控溅射方法, 在溅射系统中 (背底真空度小于 3×10^{-8} Torr (1 Torr = 1.33322×10^2 Pa)) 生长纳米级厚度的 Pt/CoFe/Ta 三层膜异质结. Pt, CoFe, Ta 各层的溅射速率分别为 1.08, 0.45 和 0.41 Å/s. 柔性 PET 衬底的厚度为 0.12 mm. 铁磁层 CoFe 和两侧的重金属 Pt 层 Ta 层的厚度均为 3 nm. Pt 和 Ta 层具有符号相反的自旋霍尔角, 导致 CoFe 层两侧的重金属层中的电荷流脉冲同向叠加, 见图 1(a) 插图. 实验中, 通过一个电磁铁产生沿 y 轴方向的磁场, 面内磁化样品. 通过调节电磁铁线圈中电流的大小和方向调节施加于样品上磁场的大小和方向 (变化范围为 ± 90 Oe), 来研究样品产生的远红外辐射强度随磁场的依赖关系. 此外, 通过振动样品磁强计 (VSM) 测试样品的磁性.

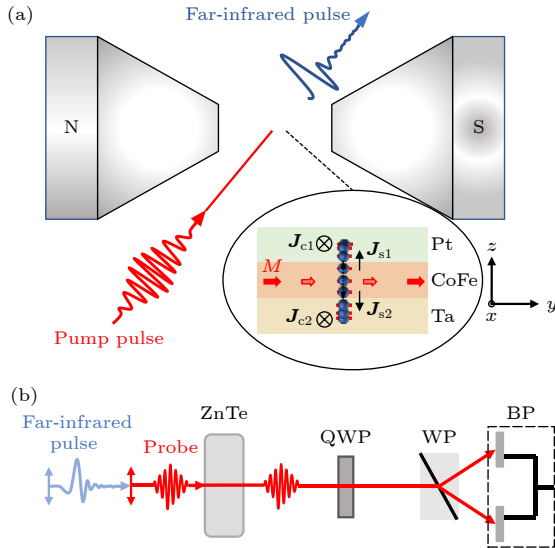


图 1 (a) 基于 Pt/CoFe/Ta 三层膜异质结的远红外脉冲辐射光谱示意图, 自旋流 J_{s1} 和 J_{s2} 分别从 CoFe 层注入到 Pt 和 Ta 层, J_{c1} 和 J_{c2} 分别为 Pt 和 Ta 层中由自旋流 J_{s1} 和 J_{s2} 转化成的电荷流, M 为磁化强度, CoFe 层中的红色实箭头表示退磁区域外的磁化强度, 红色虚箭头表示退磁区域内的磁化强度; (b) 光电取样远红外脉冲的探测系统示意图 (QWP 为 1/4 波片, WP 为沃拉斯顿棱镜, BP 为平衡光电探测器)

Fig. 1. (a) Schematic diagram of far-infrared pulse emission spectroscopy based on Pt/CoFe/Ta three-layer heterostructure. The spin currents J_{s1} and J_{s2} are injected from CoFe layer into both Pt and Ta layers; J_{c1} and J_{c2} are the charge currents converted from the spin currents J_{s1} and J_{s2} in Pt and Ta layers, respectively. M is the magnetization of the CoFe layer. The red solid arrow in the CoFe layer indicates the magnetization outside the demagnetization area, and the red dashed arrow indicates the magnetization within the demagnetization area. (b) Schematic diagram of electro-optical sampling system for probing the far-infrared pulse (QWP, quarter-wave plate; WP, Wollaston prism; BP, balanced photodetector).

3 结果与讨论

图 2(a) 给出了 PET 衬底上制备的 Pt/CoFe/Ta 三层膜异质结在激光辐照后所产生的远红外脉冲发射信号. 外加磁场 $H = \pm 90$ Oe ($1 \text{ Oe} = 10^3/(4\pi) \text{ A/m}$), 抽运光的能量密度为 1.22 mJ/cm^2 . 实验中, 反转了外加磁场的方向, 从 $+H$ 变为 $-H$, 可以看到远红外辐射脉冲的相位完全反转. 因此, 该远红外脉冲的产生起源于材料的磁性. 进一步观察到远红外发射脉冲的极性随 Pt/CoFe/Ta 三层膜异质结的翻转而反转, 这是由于自旋流注入重金属层的方向发生改变. 上述实验结果均符合逆自旋霍尔效应产生远红外辐射脉冲的主要物理机制^[10].

图 2(b) 是图 2(a) 归一化的傅里叶振幅谱结果. 样品所产生的远红外辐射脉冲的中心频率约为 0.4 THz , 频谱范围覆盖了 $0-2.5 \text{ THz}$, 基本符合远红外时域光谱的应用需求.

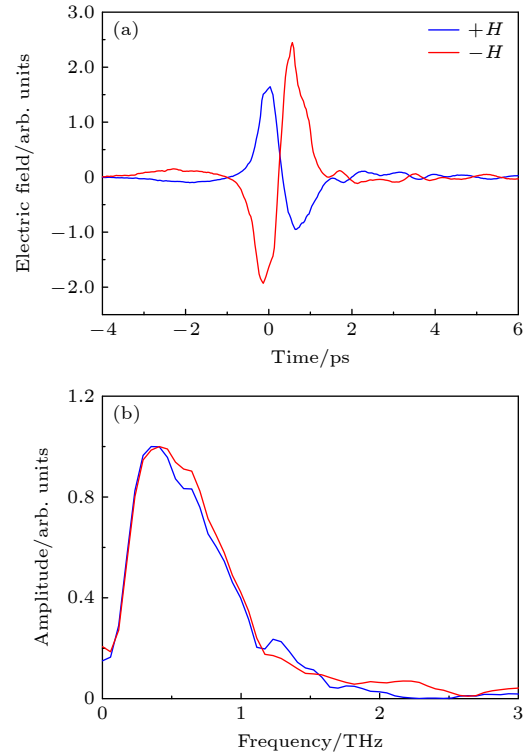


图 2 (a) 正/反向磁场下 Pt/CoFe/Ta 三层膜异质结的远红外脉冲发射信号; (b) 经傅里叶变化得到的归一化振幅谱
Fig. 2. (a) Far-infrared pulse emission of Pt/CoFe/Ta three-layer heterostructures under $\pm H$; (b) normalized far-infrared amplitude spectra by Fourier transform.

根据先前的研究, FM/HM 异质结远红外相干辐射的振幅与电荷流 j_c 成正比, $j_c = \gamma j_s \times M/|M|$ ^[10-12], 其中 γ 表示 HM 层的自旋霍尔角, 描述自旋流-电荷流的转换效率; M 为 FM 层的磁化矢量; 由于电子的自旋极化平行于样品的磁化矢量 M , 自旋流 j_s 与磁矩 M 成正比. 因此, 利用外加磁场控制 FM 层中 M 的大小和方向, 可以直接调控 j_s 的大小和方向, 从而调控远红外辐射脉冲的振幅和相位.

图 3(a) 为通过改变外加磁场的大小和方向, 研究样品的自旋极化特性对远红外辐射脉冲时域波形的影响. 实验中, 激光脉冲的能量密度为 1.22 mJ/cm^2 . 当外加面内磁场从 $+90 \text{ Oe}$ 变化到 -90 Oe , 再重新变化到 $+90 \text{ Oe}$, 实验获得的远红外脉冲的时域波形显著不同. 图 3(b) 为相应时域信号经傅里叶变换后得到的振幅谱. 为定量表示

Pt/CoFe/Ta 样品的远红外发射信号强度, 将远红外辐射脉冲的峰-谷间的强度差定义为远红外辐射脉冲的振幅. 图 3(c) 中的蓝色实心圆圈为抽运光能量密度为 1.22 mJ/cm^2 时, 远红外辐射脉冲的振幅与外加磁场的依赖关系. 可以看到, 远红外脉冲的振幅-磁场出现明显的磁滞回线现象. 随着外部磁场从 -90 Oe 变为零再变为 $+50 \text{ Oe}$, 远红外辐射脉冲的振幅变化较小, 极性保持不变. 当外加磁场超过 $+50 \text{ Oe}$ 时, 远红外辐射信号的极性发生反转, 远红外辐射脉冲的振幅随着磁场的增大而迅速增大. 当外加磁场达到 $+90 \text{ Oe}$ 时, 远红外辐射脉冲的振幅达到最大, 并不再发生大幅的变化. 当抽运

光的能量密度为 1.22 mJ/cm^2 时, 通过远红外辐射脉冲的振幅-磁滞回线得出的矫顽力约为 60 Oe .

图 3(c) 的绿色实线为 VSM 测量得到样品的 $M-H$ 磁滞回线, 外加磁场施加于样品平面内. 由于 CoFe 是铁磁材料, Pt/CoFe/Ta 样品的磁化强度 M 对外加磁场 H 的依赖关系表现为磁滞回线. 在无飞秒激光辐照时, 样品的矫顽力约为 90 Oe . 对比 $M-H$ 和远红外辐射振幅- H 的磁滞回线实验结果, 可以看出尽管曲线的形状相似, 通过超快远红外脉冲辐射光谱测得的远红外辐射振幅- H 磁滞回线获得的矫顽力约为 60 Oe 明显小于 VSM 测得的结果. 进一步, 将飞秒激光脉冲的能量密度

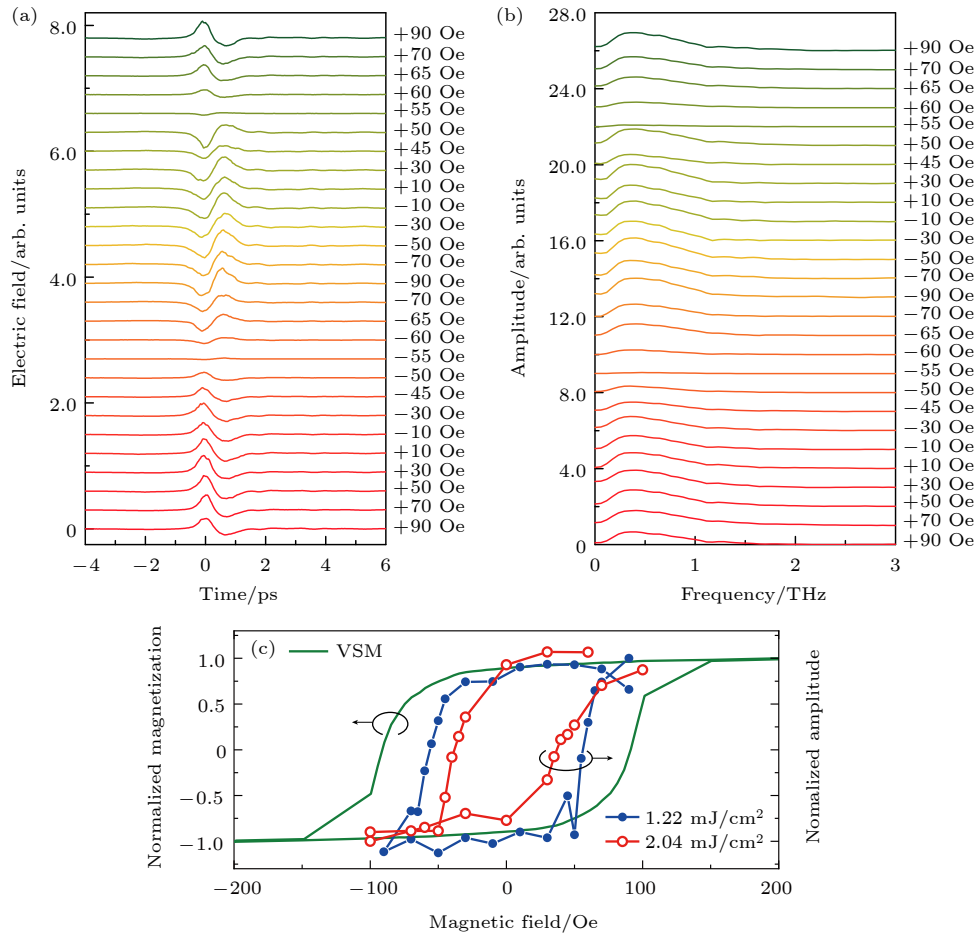


图 3 (a) 不同磁场下 Pt/CoFe/Ta 三层膜异质结的远红外发射脉冲时域信号, 为了清晰区分实验数据, 实验数据均垂直移动; (b) 对 (a) 图的时域信号进行傅里叶变化得到的振幅谱; (c) 两种抽运光能量密度下, 样品产生的远红外辐射脉冲振幅随外加磁场的变化曲线, 蓝色实心圆和红色空心圆分别代表抽运激光能量密度为 1.22 和 2.04 mJ/cm^2 时的实验结果, 绿色实线为 VSM 测量得到样品的磁滞回线

Fig. 3. (a) Time domain signals of far-infrared emission from Pt/CoFe/Ta three-layer heterostructures under different magnetic fields. For clarity, all experimental data are shifted vertically according to the H . (b) The frequency-domain spectra of Pt/CoFe/Ta with different H , as calculated by fast Fourier transform from (a). (c) The amplitudes of far-infrared emitted pulses as functions of the applied magnetic field, measured at two pump fluences. The blue solid circles and the red hollow circles represent the experimental results measured at 1.22 and 2.04 mJ/cm^2 , respectively. The green solid line is the magnetic hysteresis loop of the Pt/CoFe/Ta characterized by VSM.

增大到 2.04 mJ/cm^2 , 重复该样品的远红外辐射振幅- H 磁滞回线实验, 如图 3(c) 中的红色空心圆圈所示. 可以看出, 通过增大抽运激光脉冲的能量密度, 激光辐照下样品的矫顽力进一步减小至 40 Oe . 上述实验结果定性地表明, 增大抽运激光脉冲的能量密度对 Pt/CoFe/Ta 三层膜异质结的远红外辐射与调控有两方面的影响. 一方面, 从样品发射出的远红外脉冲振幅的增大可以明显看到, 从 FM 层注入到 HM 层的自旋流的强度随抽运激光脉冲能量密度的增大而增强. 另一方面, 随着抽运激光脉冲能量密度的增大, FM 层的矫顽力呈现减小的趋势, 表明飞秒激光的光热效应对样品的磁学性能具有显著的调控能力.

最后, 通过改变飞秒抽运脉冲的能量密度, 进一步证实了飞秒激光的光热效应对远红外辐射脉冲的调控. 为实现这个目标, 首先用 $+200 \text{ Oe}$ 的正向磁场使样品饱和磁化, 撤去该磁场后, 在样品面内施加 -60 Oe 的负向磁场, 该磁场的场强不足以

改变未辐照样品的磁化方向, 如图 4(a) 所示. 从低到高逐渐增大抽运激光脉冲的能量密度, 观察远红外辐射脉冲时域光谱的变化. 如图 4(b) 所示, 不同抽运激光脉冲的能量密度下远红外辐射脉冲的时域信号, 实验所用的激光能量密度小于样品的破坏阈值. 实验结果表明, 远红外辐射脉冲的时域波形随激光脉冲能量密度的增大, 发生显著的变化. 如图 4(c) 所示, 对时域信号进行傅里叶变化得到振幅谱, 没有观察到远红外辐射脉冲的频谱宽度与激发光能量密度之间显著的依赖关系.

图 4(d) 为远红外辐射脉冲的振幅 (蓝色实心圆) 随抽运激光脉冲能量密度的依赖关系. 当抽运激光脉冲能量密度小于 1.43 mJ/cm^2 , 远红外辐射脉冲的振幅随着激光脉冲能量密度的增大而增大. 当激光脉冲能量大于 1.43 mJ/cm^2 , Pt/CoFe/Ta 三层膜异质结发射的远红外波形发生剧烈的形变, 辐射脉冲的相位发生 π 相位反转. 当远红外辐射脉冲的相位反转后, 辐射脉冲的振幅随抽运光脉冲能

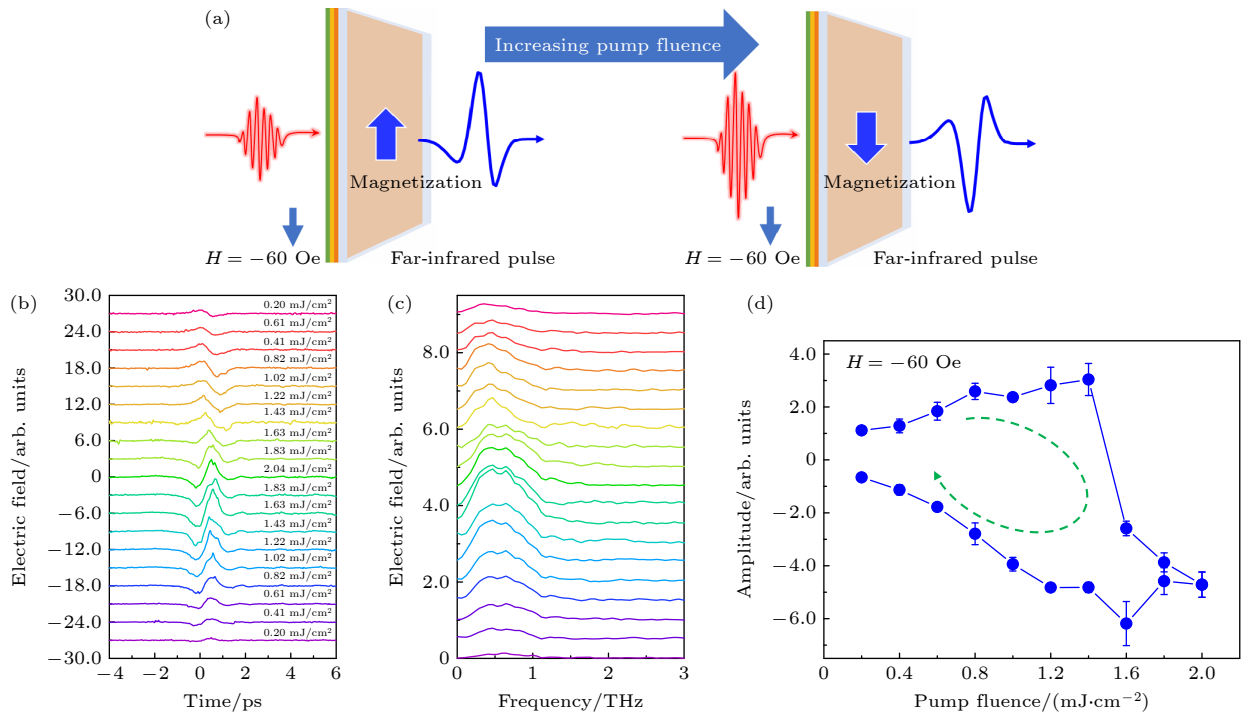


图 4 (a) 外加与样品磁化方向相反的小磁场时, 激光脉冲诱导 Pt/CoFe/Ta 异质结辐射远红外脉冲相位反转实验示意图; 不同抽运光能量密度下的远红外脉冲的 (b) 时域信号和 (c) 频域振幅谱, 抽运激光的能量密度改变范围为 $0.20\text{--}2.04 \text{ mJ/cm}^2$; (d) $H = -60 \text{ Oe}$ 时, 随着激光抽运能量密度的增大, 远红外辐射脉冲的振幅在 1.43 mJ/cm^2 时达到峰值, 当激光脉冲能量密度继续增大, 远红外辐射脉冲的相位发生反转

Fig. 4. (a) Schematic diagram of phase reversal of emitted far-infrared pulse generation when a small magnetic field opposite to the magnetization orientation of the sample is applied. (b) The time domain signal and (c) frequency-domain spectra measured under different pump fluences in a range of $0.20\text{--}2.04 \text{ mJ/cm}^2$. (d) The amplitude of far-infrared time-domain signal reaches the maximum at a pump fluence of 1.43 mJ/cm^2 . When the pump fluence is larger than 1.43 mJ/cm^2 , the far-infrared pulse experiences a phase reversal.

量密度的增大继续增大达到饱和值. 随后, 降低抽运激光脉冲的能量密度, 观察到辐射脉冲的振幅随之减小, 然而并不能恢复到初始相位. 当抽运激光脉冲的能量密度恢复到初始的 0.20 mJ/cm^2 后, 样品所辐射的远红外脉冲的时域波形与初始状态相比, 发生了 π 相位反转. 该实验结果表明, 利用激光的能量密度实现了远红外辐射脉冲的相位反转.

上述实验结果可以定性用图 5 物理图像来解释. 图 5(a) 描述了足够强的外加磁场作为驱动力, 实现了磁化矢量的翻转过程. 如图 5(b) 所示, 当飞秒激光脉冲激发 FM/HM 异质结后, 样品的温度升高, 温度的升高降低了磁性样品的两个稳定磁化状态之间的势垒 ΔU , 增大给定磁能下自旋翻转的概率. 当施加的外加磁场为 -60 Oe , 小于 1.43 mJ/cm^2 的激光能量密度提供的光热能不足以使自旋克服已经减小的 ΔU_1 . 当使用较高的激光能量密度大于 1.43 mJ/cm^2 时, 飞秒激光脉冲提供了足够高的光热能, 使得 Pt/CoFe/Ta 三层膜异质结两个磁化状态之间的势垒减小为 ΔU_2 . 此时, 外加磁场 (-60 Oe) 足以将该样品中 FM 层的磁化方向翻转转到与磁场一致的方向上, 因此所辐射的远红外脉冲发生了 π 相位反转. 实验结果同时表明, 利用远红外脉冲发射光谱对铁磁薄膜进行的磁滞回线和功率依赖实验, 可以作为一种研究铁磁材料在光磁记

录时的矫顽力和各向异性场的线性或非线性变化的有效方法.

4 总结

首先阐明了饱和磁化状态下, 飞秒激光诱导 Pt/CoFe/Ta 三层膜异质结的远红外脉冲发射物理机制. 接着开展了两方面实验研究飞秒激光的光热效应对磁性异质结产生远红外辐射的调控. 一方面, 通过改变外加磁场的大小和方向, 研究了远红外辐射脉冲振幅-磁场的磁滞回线. 与振动样品磁力计测量的磁滞回线相比, 远红外-磁场的磁滞回线表现出更小的矫顽力. 实验发现, 随抽运光的能量密度的增大, 矫顽力进一步下降. 实验结果表明, 飞秒激光脉冲与 Pt/CoFe/Ta 三层异质结相互作用时存在显著的光热效应. 另一方面, 对 Pt/CoFe/Ta 三层异质结进行正向磁化饱和后施加一个反向的小磁场, 发现当入射的激光能量密度超过 1.43 mJ/cm^2 时, 远红外辐射脉冲信号发生极性的反转. 该实验进一步验证激光的光热效应及其对远红外脉冲辐射的可调控性. 本文实验结果不仅阐明飞秒激光脉冲的光热效应在远红外脉冲辐射中的重要作用, 也为基于电子自旋的远红外辐射的调控提供新方法.

参考文献

- [1] Jin Z M, Guo Y Y, Ji B Y, Li Z S, Ma G H, Cao S X, Peng Y, Zhu Y M, Zhuang S L 2022 *Acta Photon. Sin.* **51** 0751410 (in Chinese) [金钻明, 郭颖钰, 季秉煜, 李章顺, 马国宏, 曹世勋, 彭滢, 朱亦鸣, 庄松林 2022 *光子学报* **51** 0751410]
- [2] Jin Z M, Ruan S Y, Li J G, Lin X, Ren W, Cao S X, Ma G H, Yao J Q 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 167501 (in Chinese) [金钻明, 阮舜逸, 李炬康, 林贤, 任伟, 曹世勋, 马国宏, 姚建铨 2019 *物理学报* **68** 167501]
- [3] Peng Y, Huang J, Luo J, Yang Z, Wang L, Wu X, Zang X, Yu C, Gu M, Hu Qing, Zhang X, Zhu Y, Zhuang S 2021 *PhotonX* **2** 12
- [4] Kürner T, Mittleman D M, Nagatsuma T 2022 *THz Communications: Paving the Way Towards Wireless Tbps* (Cham: Springer)
- [5] Beaupreire E, Merle J C, Daunois A, Bigot J Y 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4250
- [6] Scheid P, Remy Q, Lebegue S, Malinowski G, Mangin S 2022 *J. Magn. Magn. Mater.* **560** 169596
- [7] Tauchert S R, Volkov M, Ehberger D, Kazenwadel D, Evers M, Lange H, Donges A, Book A, Kreuzpaintner W, Nowak U, Baum P 2022 *Nature* **602** 73
- [8] Jin Z M, Tkach A, Casper F, Spetter V, Grimm H, Thomas A, Kampfrath T, Bonn M, Klau M, Turchinovich D 2015 *Nat. Phys.* **11** 761

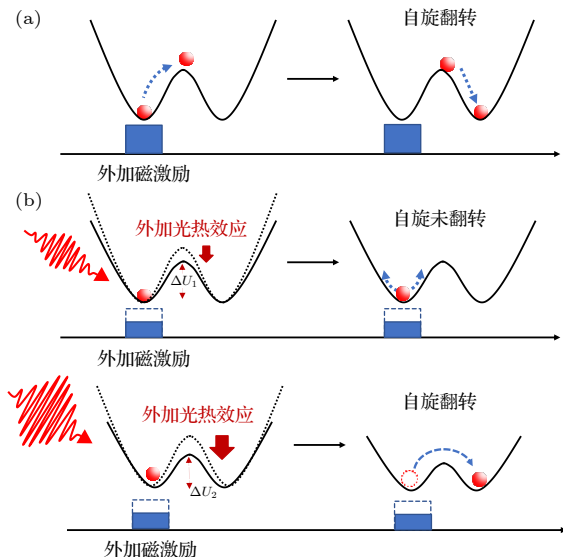


图 5 (a) 外加磁场驱动的自旋翻转; (b) 光热效应辅助磁场驱动自旋翻转示意图

Fig. 5. (a) Schematic diagram of spin switching induced by external magnetic field; (b) the photo-thermal assisted spin reversal by external magnetic field.

- [9] Huisman T J, Mikhaylovskiy R V, Tsukamoto A, Rasing T, Kimel A V 2015 *Phys. Rev. B* **92** 104419
- [10] Kampfrath T, Battiato M, Maldonado P, Eilers G, Notzold J, Mahrlein S, Zbarsky V, Freimuth F, Mokrousov Y, Blugel S, Wolf M, Radu I, Oppeneer P M, Munzenberg M 2013 *Nat. Nanotechnol.* **8** 03203
- [11] Huisman T J, Mikhaylovskiy R V, Costa J D, Freimuth F, Paz E, Ventura J, Freitas P P, Blugel S, Mokrousov Y, Rasing T, Kimel A V 2016 *Nat. Nanotechnol.* **11** 455
- [12] Chen M J, Mishra R, Wu Y, Lee K, Yang H 2018 *Adv. Opt. Mater.* **6** 1800430
- [13] Chen X H, Wu X J, Shan S Y, Guo F W, Kong D Y, Wang C, Nie T X, Pandey C, Wen L G, Zhao W S, Ruan C J, Miao J G, Li Y T, Wang L 2019 *Appl. Phys. Lett.* **115** 221104
- [14] Feng Z, Wang D C, Sun S, Tan W 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 208705 (in Chinese) [冯正, 王大承, 孙松, 谭为 2020 物理学报 **69** 208705]
- [15] Wang H T, Zhao H H, Wen L G, Wu X J, Nie T X, Zhao W S 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 200704 (in Chinese) [王航天, 赵海慧, 温良恭, 吴晓君, 聂天晓, 赵巍胜 2020 物理学报 **69** 200704]
- [16] Ji B Y, Jin Z M, Wu G J, Li J G, Wan C H, Han X F, Zhang Z Z, Ma G H, Peng Y, Zhu Y M 2023 *Appl. Phys. Lett.* **122** 111104
- [17] Battiato M, Carva K, Oppeneer P M 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 027203
- [18] Zhang S N, Jin Z M, Zhu Z D, Zhu W H, Zhang Z Z, Ma G H, Yao J Q 2018 *J. Phys. D Appl. Phys.* **51** 034001
- [19] Ni Y Y, Jin Z M, Song B J, Zhou X F, Chen H Y, Song C, Peng Y, Zhang C, Pan F, Ma G H, Zhu Y M, Zhuang S L 2021 *Phys. Status Solidi RRL*. **15** 2100290
- [20] Zhou C, Liu Y P, Wang Z, Ma S J, Jia M W, Wu R Q, Zhou L, Zhang W, Liu M K, Wu Y Z, Qi J 2018 *Phys. Rev. Lett.* **121** 086801
- [21] Jungfleisch M B, Zhang Q, Zhang W, Pearson J E, Schaller R D, Wen H D, Hoffmann A 2018 *Phys. Rev. Lett.* **120** 207207
- [22] Shen J H, Feng Z, Xu P C, Hou D Z, Gao Y, Jin X F 2021 *Phys. Rev. Lett.* **126** 197201
- [23] Cong K K, Vetter E, Yan L, Li Y, Zhang Q, Xiong Y Z, Qu H W, Schaller R D, Hoffmann A, Kemper A F, Yao Y X, Wang J G, You W, Wen H D, Zhang W, Sun D L 2021 *Nat. Commun.* **12** 5744
- [24] Wang X B, Cheng L, Zhu D P, Wu Y, Chen M J, Wang Y, Zhao D M, Boothroyd C B, Lam Y M, Zhu J X, Battiato M, Song J C W, Yang H, Chia E M 2018 *Adv. Mater.* **30** 1802356
- [25] Chen X H, Wang H T, Wang C, Ouyang C, Wei G S, Nie T X, Zhao W S, Miao J G, Li Y T, Wang L, Wu X J 2021 *Adv. Photonics Res.* **2** 2000099
- [26] Tong M, Hu Y, Wang Z, Zhou T, Xie X, Cheng X, Jiang T 2021 *Nano Lett.* **21** 60
- [27] Rongione E, Fragkos S, Baringthon L, Hawecker J, Xenogiannopoulou E, Tsipis P, Song C, Micica M, Mangeney J, Tignon J, Boulter T, Reyren N, Lebrun R, Le Fevre P, Dhillion S, Dimoulas A, Jaffres H, George M 2022 *Adv. Opt. Mater.* **10** 2102061
- [28] Huang Y Y, Yao Z H, He C, Zhu L P, Zhang L H, Bai J T, Xu X L 2019 *J. Phys. Condens. Matter* **31** 153001
- [29] Yang D X, Tonouchi M 2021 *J. Appl. Phys.* **130** 055701
- [30] Sotome M, Nakamura M, Morimoto T, Zhang Y, Guo G Y, Kawasaki M, Nagaosa N, Tokura Y, Ogawa N 2021 *Phys. Rev. B* **103** L24111
- [31] Mannan A, Yamahara K, Bagsican F R G, Serita K, Murakami H, Kawayama I, Higashiwaki M, Tonouchi M 2021 *J. Appl. Phys.* **129** 245702
- [32] Mannan A, Bagsican F R G, Yamahara K, Kawayama I, Murakami H, Bremers H, Rossow U, Hangleiter A, Turchinovich D, Tonouchi M 2021 *Adv. Opt. Mater.* **9** 2100258
- [33] Hamh S Y, Park S H, Jerng S K, Jeon J H, Chun S H, Lee J S 2016 *Phys. Rev. B* **94** 161405
- [34] Wei G S, Zhang H, Wu X J, Zhang H R, Wang C, Wang B, Wang L, Sun J R 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 090702 (in Chinese) [魏高帅, 张慧, 吴晓君, 张洪瑞, 王春, 王博, 汪力, 孙继荣 2022 物理学报 **71** 090702]
- [35] Tu C M, Chen Y C, Huang P, Chuang P Y, Lin M Y, Cheng C M, Lin J Y, Juang J Y, Wu K H, Huang J C A, Pong W F, Kobayashi T, Luo C W 2017 *Phys. Rev. B* **96** 195407
- [36] Seifert T S, Jaiswal S, Barker J, Weber S T, Razdolski I, Cramer J, Gueckstock O, Mahrlein S F, Nadvornik L, Watanabe S, Ciccarelli C, Melnikov A, Jakob G, Munzenberg M, Goennenwein S T B, Woltersdorf G, Rethfeld B, Brouwer P W, Wolf M, Klau M, Kampfrath T 2018 *Nat. Commun.* **9** 2899
- [37] Ruan S Y, Lin X, Chen H Y, Song B J, Dai Y, Yan X N, Jin Z M, Ma G H, Yao J Q 2021 *Appl. Phys. Lett.* **118** 011102
- [38] Zhang W T, Maldonado P, Jin Z M, Seifert T S, Arabski J, Schmerber G, Beaurepaire E, Bonn M, Kampfrath T, Oppeneer P M, Turchinovich D 2020 *Nat. Commun.* **11** 4247
- [39] Zhang W T, Turchinovich D 2021 *Opt. Express* **29** 24411
- [40] Beaurepaire E, Turner G M, Harrel S M, Beard M C, Bigot J Y, Schmittenmaier C A 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 3465
- [41] Seifert T, Jaiswal S, Martens U, Hannegan J, Braun L, Maldonado P, Freimuth F, Kronenberg A, Henrizi J, Radu I, Beaurepaire E, Mokrousov Y, Oppeneer P M, Jourdan M, Jakob G, Turchinovich D, Hayden L M, Wolf M, Munzenberg M, Klau M, Kampfrath T 2016 *Nat. Photonics* **10** 483
- [42] Jimenez-Cavero P, Gueckstock O, Nadvornik L, Lucas I, Seifert T S, Wolf M, Rouzegar R, Brouwer P W, Becker S, Jakob G, Klau M, Guo C Y, Wan C H, Han X F, Jin Z M, Zhao H, Wu D, Morellon L, Kampfrath T 2022 *Phys. Rev. B* **105** 184408
- [43] Li Z S, Jiang Y X, Jin Z M, Li Z Y, Lu X Y, Ye Z J, Pang J Y, Xu Y B, Peng Y 2022 *Nanomaterials* **12** 4267
- [44] Yao Z H, Fu H R, Du W Y, Huang Y Y, Lei Z, You C Y, Xu X L 2021 *Phys. Rev. B* **103** L201404
- [45] Jin Z M, Guo Y Y, Peng Y, Zhang Z Y, Pang J Y, Zhang Z Z, Liu F, Ye B, Jiang Y X, Ma G H, Zhang C, Balakin A V, Shkurinov A P, Zhu Y M, Zhuang S L 2023 *Adv. Phys. Res.* **2** 2200049
- [46] Agarwal P, Medwal R, Kumar A, Asada H, Fukuma Y, Rawat R S, Battiato M, Singh R 2021 *Adv. Funct. Mater.* **31** 2010453
- [47] Jiang Y X, Li Z S, Li Z Y, Jin Z M, Lu X Y, Xu Y B, Peng Y, Zhu Y M 2023 *Opt. Lett.* **48** 2054
- [48] Rouzegar R, Chekhov A L, Behovits Y, Serrano B R, Syskaki M A, Lambert C H, Engel D, Martens U, Münzenberg M, Wolf M, Jakob G, Kläui M, Seifert T S, Kampfrath T 2023 *Phys. Rev. Appl.* **19** 034018
- [49] Chaurasiya A, Li Z, Medwal R, Gupta S, Mohan J R, Fukuma Y, Asada H, Chia E M, Rawat R S 2022 *Adv. Opt. Mater.* **10** 2201929
- [50] Ishibashi K, Iihama S, Mizukami S 2023 *Phys. Rev. B* **107** 144413

Pulsed far-infrared radiation of ferromagnetic heterojunction and its photothermal regulation*

Chu Xin-Bo Jin Zuan-Ming[†] Wu Xu Li Jing-Nan Shen Yang

Wang Ruo-Yu Ji Bing-Yu Li Zhang-Shun Peng Yan

(Terahertz Technology Innovation Research Institute, Shanghai Key Lab of Modern Optical System, Engineering Research Center of Optical Instrument and System (Ministry of Education), Terahertz Spectrum and Imaging Cooperative Innovation Center, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

(Received 6 April 2023; revised manuscript received 22 May 2023)

Abstract

Under illumination of a femtosecond laser pulse on the Pt/CoFe/Ta trilayer heterostructure, an impulsive spin current can be generated in the ferromagnetic layer due to the ultrafast demagnetization. The spin current is super-diffusively transported and injected into the neighboring heavy metal layers, and is converted into the transversal charge current due to the spin-orbit coupling, which is named inverse spin Hall effect. The transient charge current on a time scale of sub-picosecond gives rise to the electromagnetic radiation in the far-infrared range to the free space. In this work, we demonstrate two kinds of experiments to investigate the modulation of far-infrared emission by photo-thermal effect, which is due to the thermal energy deposited by light pulses on a short timescales. First, the amplitude of the emitted far-infrared pulse as a function of an applied magnetic field is measured, which shows a far-infrared hysteresis behavior. The coercive field of the sample obtained by far-infrared hysteresis is smaller than that obtained by the M - H hysteresis through vibrating sample magnetometer. In addition, the coercive field decreases with pump laser fluence increasing. Second, the control of spin polarization on an ultrafast timescale in the presence of a small magnetic field applied oppositely to that of the magnetization of the ferromagnetic sample. The amplitude of far-infrared time-domain signal reaches a maximum value at a pump fluence of 1.43 mJ/cm². For the pump fluence larger than 1.43 mJ/cm², the far-infrared pulse experiences a phase reversal. After the reversal, a decrease of the laser pump fluence cannot restore the original phase of the far-infrared pulse. The above two experimental results not only elucidate the photothermal effect of femtosecond laser pulses, but also provide a new method for controlling the far-infrared radiation pulses based on ultrafast spintronics. These results demonstrate that far-infrared emission spectroscopy can be used as an ultrafast optical method to investigate magnetic properties, such as the coercive field and anisotropy field of the samples.

Keywords: photo-thermal effect, magnetic hysteresis loop, far-infrared pulse emission spectroscopy, far-infrared pulse modulation

PACS: 78.47.D-, 42.72.Ai, 78.20.-e, 78.20.nb

DOI: 10.7498/aps.72.20230543

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61975110, 61988102), the 111Project (Grant No. D18014), the Science and Technology Commission of Shanghai, China (Grant No. 22JC1400202), the International Joint Lab Program of the Science and Technology Commission of Shanghai, China (Grant No. 17590750300), the Key Project of the Science and Technology Commission Shanghai, China (Grant No. YDZX20193100004960), the Science and Technology Commission of Shanghai, China (Grant No. 21JC1402600), the Rising-Star Program of the Science and Technology Commission of Shanghai, China (Grant No. 18QA1401700), the Chenguang Project of Shanghai Educational Development Foundation, China (Grant No. 16CG45), and the Young Eastern Scholar Project of Shanghai Municipal Education Commission, China (Grant No. QD2015020).

[†] Corresponding author. E-mail: physics_jzm@usst.edu.cn

铁磁异质结的远红外脉冲辐射及其光热调控研究

褚欣博 金钻明 吴旭 李婧楠 沈阳 王若愚 季秉煜 李章顺 彭滢

Pulsed far-infrared radiation of ferromagnetic heterojunction and its photothermal regulation

Chu Xin-Bo Jin Zuan-Ming Wu Xu Li Jing-Nan Shen Yang Wang Ruo-Yu Ji Bing-Yu Li Zhang-Shun Peng Yan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 157801 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230543

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230543>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

中远红外非线性光学晶体研究进展

Research progress of mid- and far-infrared nonlinear optical crystals

物理学报. 2018, 67(24): 244203 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181591>

表面等离激元光热效应研究进展

Research progress of surface plasmons mediated photothermal effects

物理学报. 2019, 68(14): 144401 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190476>

基于飞秒锁模光纤激光脉冲基频光的差频产生红外光梳

Fiber-type difference frequency generation infrared optical frequency comb based on the femtosecond pulses generated by a mode-locked fiber laser

物理学报. 2018, 67(9): 094207 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172503>

基于力磁耦合效应的铁磁材料修正磁化模型

A modified model of magneto-mechanical effect on magnetization in ferromagnetic materials

物理学报. 2019, 68(18): 187501 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190765>

电致红外发射率动态调控器件研究进展

Research progress of infrared electrochromic devices

物理学报. 2021, 70(20): 204205 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210211>

纳秒脉冲激光诱导空气等离子体的近红外辐射特性

Near infrared characteristics of air plasma induced by nanosecond laser

物理学报. 2020, 69(2): 029502 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20190753>