

特约专栏

声表面波辅助亚铁磁 CoTb 薄膜中磁畴壁移动

郑文慧^{1,2}, 边肖南¹, 蔺涛¹, 曹洋³, 苏丹¹,
孙一铭¹, 杨德政³, 阎照文², 雷娜¹

(1. 北京航空航天大学集成电路科学与工程学院, 北京 100191)

(2. 北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191)

(3. 兰州大学磁学与磁性材料教育部重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 利用电压产生的动态应力——声表面波调控材料磁性, 具有高效率、低功耗和长传输距离等优点, 近年来成为自旋电子学领域研究的热点。亚铁磁材料因其较快的磁畴壁移动速率而备受关注, 因此, 探究声表面波辅助作用下亚铁磁体系中磁畴壁的移动, 对磁存储、磁逻辑等自旋电子器件的研究具有重要意义。以具有垂直磁各向异性的亚铁磁 CoTb 薄膜作为研究材料体系, 制备出声表面波与亚铁磁材料的耦合器件, 研究了声表面波对 CoTb 薄膜矫顽场以及磁畴壁移动的调控效应。实验表明, 在声表面波的辅助作用下 CoTb 薄膜的矫顽场减小了 10%。经分析确认, 磁畴成核场及磁畴壁传播场的减弱是矫顽场减小的主要原因。此外, 利用磁光克尔显微镜观测磁畴壁移动, 发现在声表面波的辅助下磁畴壁移动速率提高了约 76%, 达到 3683 $\mu\text{m/s}$ 。在亚铁磁材料体系中成功实现声表面波辅助磁畴壁的快速移动, 为未来低功耗自旋电子器件发展开辟了新的路径。

关键词: 声表面波; 亚铁磁; CoTb 薄膜; 矫顽场; 磁畴壁移动

中图分类号: O482.52⁺4 文献标识码: A 文章编号: 1674-3962(2021)10-0737-06

Surface Acoustic Wave Assisted Magnetic Domain Wall Motion in Ferrimagnetic CoTb Alloy

ZHENG Wenhui^{1,2}, BIAN Xiaonan¹, LIN Tao¹, CAO Yang³, SU Dan¹,
SUN Yiming¹, YANG Dezheng³, YAN Zhaowen², LEI Na¹

(1. School of Integrated Circuit Science & Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

(2. School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

(3. Key Laboratory for Magnetism and Magnetic Materials of the Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Voltage induced surface acoustic wave (SAW) is a hot research topic for manipulating magnetic properties in spintronics, due to its characteristics of high efficiency, low power consumption and long propagation distance. The ferrimagnet has attracted much attentions due to its fast magnetic domain wall (DW) motion. The study of its DW motion assisted by SAW is of great significance for the magnetic memory and DW logic devices. Here, we chose ferrimagnetic CoTb film with perpendicular magnetic anisotropy, and fabricated the coupled device of the SAW and Hall bar structure. The coercive fields and DW motion in CoTb film under SAW are explored by magneto-optical Kerr microscopy. We found the coercive fields reduced by 10% in CoTb film system, which is mainly originated from the reduction of the nucleation and propagation fields under the SAW. Furthermore, we observed the DW motion speed increased up to 76% with the assistance of the SAW, which reached 3683 $\mu\text{m/s}$. Our work has successfully realized the rapid DW motion driven by SAW in the ferrimagnetic system, which provides an alternative to the future low-consumption spintronic devices.

Key words: surface acoustic wave (SAW); ferrimagnetism; CoTb film; coercive field; domain wall motion

收稿日期: 2021-07-12 修回日期: 2021-10-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12074025); 兰州大学磁学与磁性材料教育部重点实验室开放课题资助项目(LZUMMM2020001)

第一作者: 郑文慧, 女, 1997年生, 硕士研究生

通讯作者: 雷娜, 女, 1981年生, 副教授, 博士生导师,

Email: na.lei@buaa.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202107016

1 前言

随着互联网、大数据和人工智能的爆炸式发展及应用,人们对信息存储容量和性能的要求日益提高,传统的存储器愈发难以满足需求。基于电子自旋属性的新型自旋存储器具有非易失性、高速度、低功耗等诸多优良特性,成为科研界和产业界关注的焦点。其中,2008年 Parkin 等^[1]提出的赛道结构自旋存储器(racetrack memory, RM)可以实现三维高集成度,具备高存储密度的优点,迅速成为自旋电子学研究的热点。赛道存储器中数据信息的传输是通过施加电流驱动磁畴壁移动而实现的,可以通过电流的自旋转移矩(spin-transfer torque, STT)^[2, 3]和自旋轨道矩(spin-orbit torque, SOT)^[4]两种不同的物理效应而实现。但电流驱动均伴随着焦耳热,由此带来的散热和能量耗散问题不可避免,极大地限制了电流驱动方式的应用。因此,探索并实现低功耗的磁畴壁驱动方式是赛道存储器发展的关键。

电压驱动磁畴壁移动被认为是一种高效且低功耗的数据传输方法^[5]。在铁电/铁磁复合多铁体系中,铁电层逆压电效应产生的应变传递给铁磁层,进而可以有效调控其磁畴壁移动。如将磁性纳米线与压电微米线相耦合,利用局域电压产生的局部应变,可以有效地钉扎磁畴壁^[6]。但静态应力仅可以控制磁畴壁的位置,难以高效驱动磁畴壁连续移动,而且在不同的器件位置需要分布大量的电触点,增加了器件制作的复杂性^[7]。为克服这些不足,近年来研究者们开始尝试使用动态应力——声表面波(surface acoustic wave, SAW)来操控磁性样品的磁化动力学行为。2010年, Davis 等^[8]发现 SAW 传输过程中产生的动态应力可以转动 Co 磁性纳米颗粒的磁化易轴方向,揭示了 SAW 在快速磁化翻转上应用的可能。2016年, Thevenard 等^[9, 10]在具有垂直磁各向异性的稀磁半导体(Ga, Mn)(As, P)中实现了 SAW 诱导的磁矩进动以及矫顽场的显著降低;之后又在具有面内磁各向异性的稀磁半导体中实现了由 SAW 辅助的零场磁化翻转^[11]。对于 SAW 驱动磁畴壁移动的研究, Dean 等^[12]通过仿真模拟验证了通过 SAW 调控磁纳米线中磁畴壁移动的可能性。近期实验在铁磁多层膜体系中已实现 SAW 辅助磁畴壁的移动,且远远大于纯磁场驱动下的磁畴壁速率^[13, 14]。

SAW 通过磁弹效应改变材料的磁矩取向^[15],因此材料的磁弹系数越大, SAW 驱动磁畴运动的效率将越高。有文章指出,稀土(rare-earth, RE)元素具有较大的轨道磁矩以及磁弹系数^[16],在其与过渡金属(transition metal,

TM)构成的 RE-TM 亚铁磁薄膜材料中,由于 RE 元素的贡献,该体系也具有高磁弹特性^[16, 17],预期具有高的 SAW 驱动效率。另一方面,在 RE-TM 亚铁磁薄膜中,过渡元素与 RE 元素的磁矩相互抵消^[18],在磁矩和角动量补偿点附近,该薄膜具有低磁化强度和快速的自旋动力学特性^[19, 20]。已有实验表明,在亚铁磁体系中电流驱动磁畴壁移动具有较高的效率^[21-24],且在其角动量补偿点附近获得最快 5.7 km/s 的磁畴壁移动速率^[23]。因此,基于 RE-TM 亚铁磁薄膜材料开展 SAW 驱动磁畴壁移动的研究,因其高磁弹系数、快速自旋动力学特性的显著优点,有望实现更高效率以及更快速率的磁畴壁移动。

本工作以一种具有垂直磁各向异性的 RE-TM 薄膜材料——CoTb 薄膜为研究对象,利用 SAW 驱动该亚铁磁性薄膜中的磁畴壁移动。通过系统地改变频率和幅值,研究 SAW 对 CoTb 薄膜矫顽场以及磁畴壁移动速率的调控效应。探究了 SAW 驱动亚铁磁畴壁移动的可能性,期望在亚铁磁体系下,实现低功耗且快速的磁畴壁驱动。

2 方法与原理

本工作利用磁控溅射在 128° Y-X LiNbO₃ 三方晶体衬底上生长具有垂直磁各向异性的 CoTb 亚铁磁性薄膜,结构为 LiNbO₃/Ta(3 nm)/Pt(3 nm)/CoTb(2 nm)/Pt(3 nm)。磁控溅射本底气压为 6.7×10^{-6} Pa,工作气压为 0.15 Pa,Co, Tb 生长功率分别为 60 和 18 W,经计算得到其组分为 Co_{86.6}Tb_{13.4}。Hall bar 及叉指电极(interdigital transducer, IDT)器件由光刻、氩离子束刻蚀等工艺制成,如图 1a 所示。IDT 的指宽 a 与指间距 b 均为 7 μm ,得到 SAW 的波长为 $\lambda = 2(a+b) = 28 \mu\text{m}$ 。每个 IDT 均有 40 对叉指,孔径长度 $w = 1820 \mu\text{m}$,两个 IDT 之间的距离为 3660 μm 。利用磁光克尔效应(magneto-optical Kerr effect, MOKE)测得 CoTb Hall bar 的磁滞回线,如图 1b 所示,其中横坐标 H_z 表示外加 z 方向的磁场。

当给一端 IDT 通入射频信号时,交叉排列的电极分别通入正负交替的电压,高速震荡的电场通过衬底的逆压电效应产生 SAW, SAW 沿 x 方向传播经过 Hall bar,并到达另一端电极,将声波信号转为电压信号输出。使用矢量网络分析仪(vector network analyzer, VNA)测得 SAW 的频谱如图 1c 所示, S_{11} 为反射频谱, S_{21} 为传输频谱。从图中可见 S_{11} 和 S_{21} 在中心频率 $f_0 = 141 \text{ MHz}$ 处有一个明显的谱峰,已知 SAW 波长 $\lambda = 28 \mu\text{m}$,可得其传播速率 $v = \lambda \cdot f_0 = 3948 \text{ m/s}$,这与 128° Y-X LiNbO₃ 晶体中 SAW 的传播速率相符合^[25],由此说明设计的 IDT 器件有效激发了 SAW 的产生^[13]。

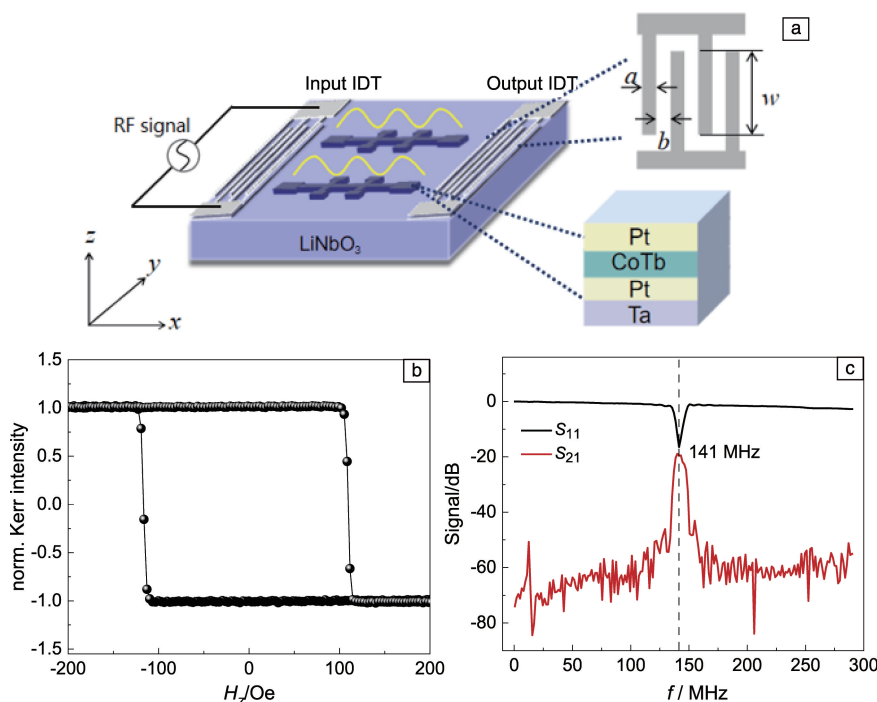


图 1 声表面波器件与 Hall bar 器件结构示意图, 薄膜材料结构为 Pt(3 nm)/CoTb(2 nm)/Pt(3 nm)/Ta(3 nm) (a); 通过磁光克尔效应测得的 CoTb Hall bar 磁滞回线(b); 声表面波的反射(S_{11})和传输(S_{21})频谱(c)

Fig. 1 Schematic diagram of surface acoustic wave and Hall bar device structure, the film material structure is Pt(3 nm)/CoTb(2 nm)/Pt(3 nm)/Ta(3 nm) (a); the hysteresis loop of the CoTb Hall bar measured by the magneto-optical Kerr effect (b); surface acoustic wave reflection (S_{11}) and transmission (S_{21}) spectrum (c)

3 结果与分析

利用 MOKE 测量了亚铁磁 CoTb 在施加 SAW 后磁滞回线的变化, 如图 2a 所示。在施加 SAW 的功率为 25 dBm(3.976 V)的情况下, CoTb 的矫顽场 H_c 降低, 其减小幅度依赖于 SAW 的频率, 如图 2b 所示。在 SAW 的中心频率 141 MHz 处的矫顽场变化量 $|\Delta H_c|$ 最大, 为 10.2 Oe。这种 SAW 调控矫顽场的效应在 FeGa^[26]、(Ga, Mn)(As, P)^[10] 以及 Co/Pt 多层膜^[13] 中均有发现, 而且在后两者中也呈现了类似的频率共振特性。其原因为, 在共振频率处, SAW 产生的动态应力降低了 CoTb 薄膜磁化翻转的能量势垒, 从而导致了矫顽场的减弱^[10]。矫顽场变化的极大值与 SAW 共振峰都出现在 141 MHz, 这种频谱变化趋势的一致性可以证明矫顽场的降低来源于 SAW, 而不是微波的寄生效应^[27, 28]。此外, 利用红外成像测温仪测量了 Hall bar 的温度变化, 其测量误差在 ± 2 °C 以内, 测得在 SAW 共振频率处 Hall bar 温度由室温(26.5 °C)升至 32 °C, 这对样品磁性的影响可以忽略不计。综上所述, 通过排除微波和热效应的影响, 可得知 SAW 是矫顽场降低的主要原因。

磁化翻转的微观过程包含磁畴的成核与磁畴壁传播。

为了研究 SAW 调控 CoTb 薄膜矫顽场的物理机理, 进一步分析了磁畴成核场 H_n 以及传播场 H_p 与施加射频信号电压值的关系。在图 2a 中标记了 H_p 、 H_n 在磁滞回线中选取点的位置, H_p 取自磁化强度为零时的磁场即 H_c , 为磁畴壁传播的平均场; H_n 取自磁化翻转的临界拐点, 即为磁畴的成核场。由图 2c 可知, 当施加于 IDT 的射频信号的幅值约为 0.6 V 时, H_n 出现显著减小, 后随幅值进一步增大而趋于平缓。因此, 仅当电压达到阈值后, 磁畴才可成核, 这一现象与文献报道结果相一致^[10]。而 H_p 在 SAW 达到应变阈值之后, 呈线性减小, 后趋于缓和。由此可以看到在 SAW 作用下, H_p 与 H_n 随电压的变化关系存在差异, 但都在达到阈值电压后随着电压的升高而持续减小。

通过磁畴观测进一步分析了 SAW 对磁化翻转微观过程的影响。在同一块磁性薄膜上, 加工了一系列不同尺寸的 IDT, 并用于磁畴的测量。如图 3 所示的器件, 使用 VNA 测得其中心频率为 130 MHz。磁畴的观察使用空间分辨率为 $0.195 \times 0.195 \mu\text{m}^2/\text{pixel}$ 的极向克尔显微镜。首先对样品进行正向饱和磁化, 后施加略大于样品成核场的反向脉冲磁场, 使磁畴壁保持蠕动行为。分别测量了在未加(图中左列)和外加 SAW(右列)条件下, 磁场驱动

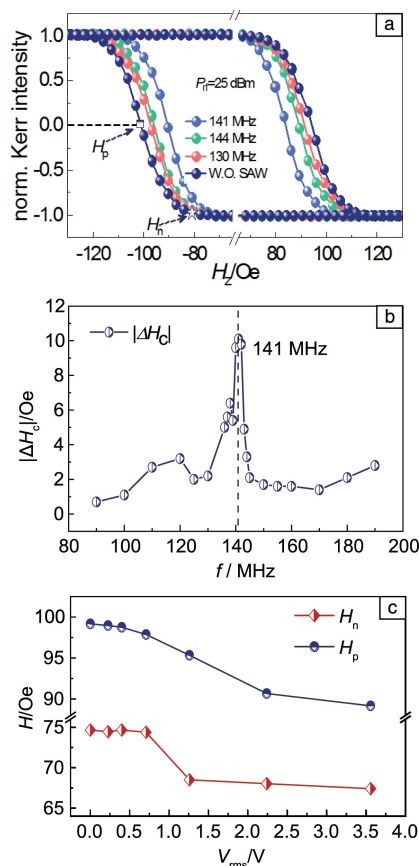


图 2 利用磁光克尔效应测得的在不同频率射频信号下 Hall bar 的磁滞回线, 叉指电极输入功率均为 25 dBm (3.976 V) (a); 矫顽场变化量绝对值 $|\Delta H_c|$ 随施加射频信号频率变化曲线 (b); 在实验得到的中心频率 (141 MHz) 下, 传播场 H_p 、成核场 H_n 随施加射频信号电压的变化 (c)

Fig. 2 The hysteresis loop of Hall bar measured by magneto-optical Kerr effect under different frequency radio-frequency signals, the power is 25 dBm (3.976 V) (a); the absolute value of the coercive field change $|\Delta H_c|$ varies with the applied radio-frequency signal frequency (b); under the experimental center frequency (141 MHz), the propagation field H_p and the nucleation field H_n vary with the applied radio-frequency signal voltage (c)

的磁畴壁移动, 如图 3 所示。图中用黄色虚线标记了磁畴壁所在位置, 其移动同 SAW 传播方向一致, 均沿 +x 方向。通过左右两列对比可见, 施加单一磁场脉冲, SAW 辅助下比单纯磁场驱动的磁畴壁移动距离更远。通过将磁畴壁移动的距离和时间进行线性拟合, 可得出在没有 SAW 辅助的情况下磁畴壁移动速率约为 2092 $\mu\text{m/s}$, SAW 辅助下的磁畴壁移动速率约为 3683 $\mu\text{m/s}$, 提高了约 76%。由此, SAW 可以显著提高 Co/Tb 薄膜的磁畴壁移动速率。

图 4a 为在 IDT 施加 25 dBm 射频功率, 施加不同频率 SAW 和未施加 SAW 的条件下, 磁畴壁移动距离 (L) 和

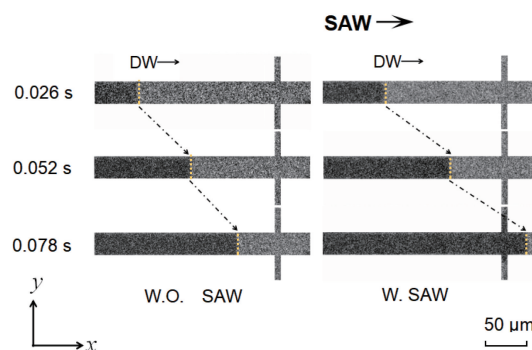


图 3 克尔显微镜下观测的未施加声表面波 (左) 与施加声表面波 (右) 下磁畴壁移动对比图。施加射频信号的功率为 25 dBm, 频率为 130 MHz, 垂直方向的脉冲磁场为 90 Oe, 脉宽为 26 ms。单个磁场脉冲下, 施加声表面波的磁畴壁移动距离约为 89 μm , 未施加声表面波的磁畴壁移动距离约为 57 μm

Fig. 3 Comparison of domain wall movement observed under a Kerr microscope without surface acoustic wave (left) and with surface acoustic wave (right). The power of the applied radio-frequency signal is 25 dBm, the frequency is 130 MHz, the pulse magnetic field in the vertical is 90 Oe, and the pulse width is 26 ms. Under a single magnetic field pulse, the domain wall movement distance with surface acoustic wave is about 89 μm , and the domain wall movement distance without surface acoustic wave is about 57 μm

时间 (t) 的关系, 如图 4c 所示, 进一步拟合可得到其移动速率。在有 SAW 辅助的情况下, 磁畴壁移动速率明显提高。将磁畴壁移动速率与 SAW 频率的关系绘制成曲线, 如图 4b 所示, 可知在 SAW 的中心频率处, 磁畴壁移动速率达到最大, 这与前文 SAW 降低 Co/Tb 薄膜矫顽场的行为相吻合。在 SAW 的中心频率下, 施加不同电压的射频信号, 得到如图 4d 所示电压和磁畴壁速率的关系, 经线性拟合后得到磁畴壁移动速率与电压成正比。结合 SAW 的应变幅值与射频信号的电压值成正比^[10], 可知 Co/Tb 薄膜磁畴壁移动速率同 SAW 的应变幅值成正比。此前, 在驻波中测得 Co/Pt 多层膜体系中矫顽场及磁畴壁移动速率同电压成正比^[13]。而在行波中, 对以成核为主的磁化翻转过程进行理论分析, 得出在 SAW 行波达到阈值功率后, (Ga, Mn)(As, P) 矫顽场的降低同 SAW 功率呈线性关系^[10]。本工作激发的是 SAW 行波, 得到的磁畴壁移动速率变化趋势同驻波下的实验结果相近, 对于此结果, 作者猜测是由于器件的反射在 IDT 之间产生了行驻波, 此猜想仍需进行进一步的实验验证。SAW 工作在中心频率且磁畴壁保持在蠕动行为时, 施加 25 dBm 射频信号, 由频谱估算得实际作用电压为 3.5 V, 由此得到最快磁畴壁移动速率为 3683 $\mu\text{m/s}$; 同样情况下, [Co/Pd]₂/Py 体系施加 15 dBm 射频信号, 电压约为 0.94 V, 最快磁畴壁移动速率为 172 $\mu\text{m/s}$ ^[14]; 而 Co/Pt

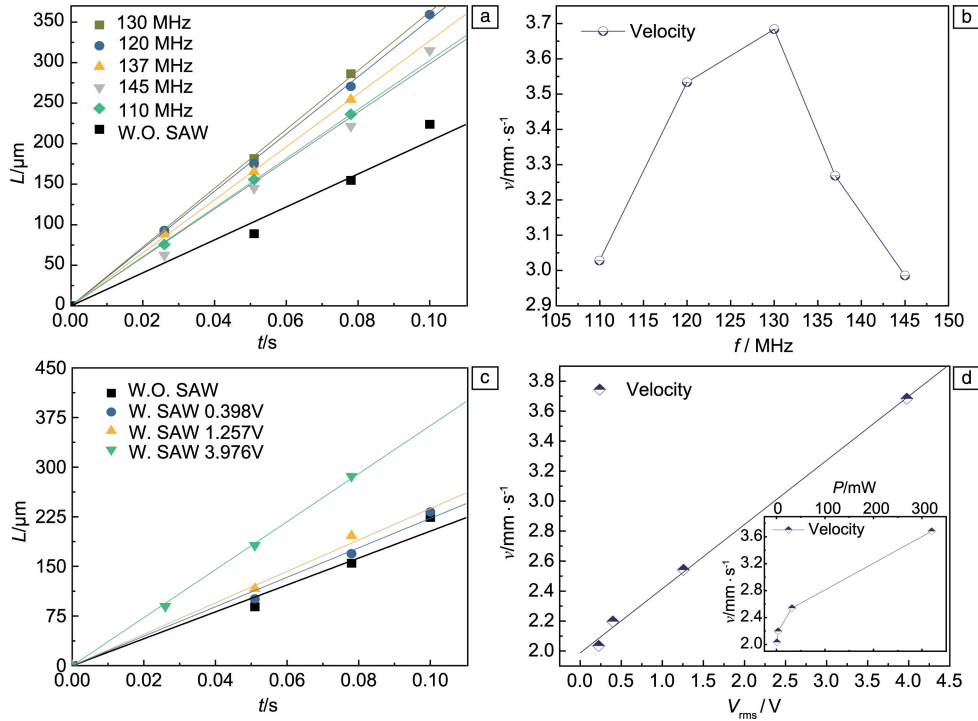


图 4 未施加声表面波以及施加各种不同频率声表面波 (25 dBm) 条件下, 磁畴壁移动距离与时间的关系 (a); 磁畴壁移动速率与声表面波频率的关系 (b); 未施加声表面波以及施加 130 MHz 不同电压的声表面波条件下, 磁畴壁移动距离和时间的关系 (c); 磁畴壁移动速率与施加射频电压的关系, 插图: 磁畴壁移动速率与施加射频功率的关系 (d)

Fig. 4 The relationship between the domain wall movement distance and time without surface acoustic wave and with various frequency surface acoustic wave (25 dBm) (a); the relationship between the domain wall speed and surface acoustic wave frequency (b); The relationship between the domain wall movement distance and time without surface acoustic wave and with different voltage surface acoustic wave in 130 MHz (c); the relationship between the speed of the domain wall and the applied radio-frequency voltage, insert; the relationship between the speed of the domain wall and the applied radio-frequency voltage (d)

多层膜体系施加 30 dBm 射频信号, 电压约为 5.12 V, 得到磁畴壁移动速率最快为 $50 \mu\text{m/s}$ ^[13]。与之相较, 本文 CoTb 薄膜体系中 SAW 辅助驱动磁畴壁的移动速率具有明显的优势。

利用 SAW 辅助 CoTb 薄膜的磁畴壁移动, 其物理原理为 SAW 产生动态应变调控材料体系的垂直磁各向异性。由于逆磁致伸缩效应, SAW 行驻波改变了 CoTb 薄膜的磁弹性能, 有效的磁弹性能 (U_{ME})^[8] 为:

$$U_{\text{ME}} = B_1 \varepsilon_{xx} a_x^2 + B_2 (\varepsilon_{xy} a_x a_y + \varepsilon_{xz} a_x a_z) \quad (1)$$

其中, $B_1 = B_2 = 24 \times 10^6 \text{ N/m}^2$, 为 CoTb 薄膜的磁弹系数 (magneto-elastic coefficient)^[16], a_i 为磁化强度的方向余弦, ε_{xy} 、 ε_{xz} 为切向应力, ε_{xx} 为纵向应力, 由于 CoTb 薄膜厚度为 4 nm, 远小于 SAW 的波长 λ , SAW 产生的切向应变作用贡献很小, 因此主要考虑纵向应变, 上式可以简化为^[13]:

$$U_{\text{ME}} = B_1 \varepsilon_{xx} a_x^2 \quad (2)$$

由此得到作用在磁畴壁上有效瞬时压力 (F_{ME}) 为^[29]:

$$F_{\text{ME}} = B_1 \frac{\partial \varepsilon_{xx}}{\partial x} \Delta \quad (3)$$

其中 Δ 为磁畴壁宽度。考虑在瞬时准静态下, 磁畴壁移动速率 $v_{\text{sta}} \propto \Delta$, $\Delta = \sqrt{A_{\text{ex}} K_u}$, A_{ex} 为交换常数, K_u 为面外单轴各向异性系数。本工作本征激发的为 SAW 行波, 因此, 还要考虑 SAW 行波作用的情况。在行波作用的情况下磁畴壁的能量 (σ) 是时变的, 即 $\sigma(t) = \sqrt{A_{\text{ex}} K_u(t)}$, $K_u(t) = B_1 (\varepsilon_0 + \varepsilon_{xx}(t))$, ε_0 和 ε_{xx} 分别为静态应变和 SAW 产生的动态应变^[10, 29]。由此 SAW 产生的纵向应变会导致 K_u 发生改变^[10, 30], 从而调控磁畴壁的移动。

4 结 论

本工作将声表面波 (SAW) 作用于亚铁磁性 CoTb 薄膜, 观测并确认了 SAW 降低 CoTb 薄膜矫顽场以及辅助驱动磁畴壁移动的作用, 且在 SAW 的中心频率处, 得到最快的磁畴壁移动速率为 $3683 \mu\text{m/s}$ 。此外, 在亚铁磁

体系下, 利用 SAW 辅助驱动的快速磁畴壁移动, 为实现低功耗目标的自旋存储器件提供了一种新的方案。在此基础上, 未来通过提高磁弹耦合系数改进 SAW 器件效能, 以及使用 SAW 驻波驱动等方式^[12], 有望进一步摒弃磁场的辅助, 实现 SAW 高效驱动磁畴壁移动。

参考文献 References

- [1] STUART S, PARKIN P, THMOAS L, *et al.* Science[J], 2008, 320(5873): 190–194.
- [2] HAYASHI M, THOMAS L, RETTNER C, *et al.* Physical Review Letters[J], 2007, 98(3): 037204.
- [3] MEIER G, BOLTE M, EISELT R, *et al.* Physical Review Letters[J], 2007, 98(18): 187202.
- [4] MIRON I M, MOORE T, SZAMBOLICS H, *et al.* Nature Materials[J], 2011, 10: 419–423.
- [5] SCHELLEKENS A J, BRINK A, FRANKEN J H, *et al.* Nature Communications[J], 2012, 3: 847.
- [6] LEI N, DEVOLDER T, AGNUS G, *et al.* Nature Communications[J], 2013, 4: 1378.
- [7] DEAN J, BRYAN M T, SCHREFL T, *et al.* Journal of Applied Physics[J], 2011, 109(10): 023915.
- [8] DAVIS S, BARUTH A, ADENWALLA S. Applied Physics Letters[J], 2010, 97(23): 232507.
- [9] THEVENARD L, CAMARA I S, MAJRAB M, *et al.* Physical Review B[J], 2016, 93(13): 134430.
- [10] THEVENARD L, CAMARA I S, PRIEUR J Y, *et al.* Physical Review B[J], 2016, 93(14): 140405.
- [11] CAMARA I S, DUQUESNE J Y, LEMÂÎTRE A, *et al.* Physical Review Applied[J], 2019, 11(1): 014045.
- [12] DEAN J, BRYAN M T, COOPER J D, *et al.* Applied Physics Letters[J], 2015, 107: 142405.
- [13] EDRINGTON W, SINGH U, DOMINGUEZ M A, *et al.* Applied Physics Letters[J], 2018, 112(5): 052402.
- [14] WEI Y, LI X, GAO R, *et al.* Journal of Magnetism and Magnetic Materials[J], 2020, 502: 166546.
- [15] FENG I, TACHIKI M, KRISCHER C, *et al.* Journal of Applied Physics[J], 1982, 53(1): 177–193.
- [16] BETZ J, MACKAY K, GIVORD D. Journal of Magnetism and Magnetic Materials[J], 1999, 207(1–3): 180–187.
- [17] TAKAHASHI T, SHIMAMORI T, MIYAZAKI T, *et al.* IEEE Transaction Journal on Magnetics in Japan[J], 1989, 4(11): 666–672.
- [18] BINDER M, WEBER A, MOSENDZ O, *et al.* Physical Review B[J], 2006, 74(13): 134404.
- [19] CAMPBELL I A. Journal of Physics F: Metal Physics[J], 1972, 2: 45–50.
- [20] STANCIU C D, KIMEL A V, HANSTEEN F, *et al.* Physical Review B[J], 2006, 73(22): 220402(R).
- [21] BLÄSING R, MA T P, YANG S H, *et al.* Nature Communications[J], 2018, 9: 4984.
- [22] SIDDIQUI S A, HAN J H, FINLEY J T, *et al.* Physical Review Letters[J], 2018, 121(5): 057701.
- [23] CAI K, ZHU Z, LEE J M, *et al.* Nature Electronics[J], 2020, 3: 37–42.
- [24] KIM K J, KIM S K, HIRATA Y, *et al.* Nature Materials[J], 2017, 16: 1187–1192.
- [25] 潘峰. 声表面波材料与器件[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 47.
- [25] PAN F. Surface Acoustic Wave Materials and Devices[M]. Beijing: Science Press, 2012: 47.
- [26] LI W, BUFORD B, JANDER A, *et al.* IEEE Transactions on Magnetics[J], 2014, 50(3): 3100704.
- [27] WOLTERS DORF G, BACK C H. Physical Review Letters[J], 2007, 99(22): 227207.
- [28] WANG Z, SUN K, TONG W, *et al.* Physical Review B[J], 2010, 81(6): 064402.
- [29] GOWTHAM P G, MORIYAMA T, RALPH D C, *et al.* Journal of Applied Physics[J], 2015, 118: 233910.
- [30] SHEPLEY P M, RUSHFORTH A W, WANG M, *et al.* Scientific Reports[J], 2015, 5: 7921.

(编辑 费蒙飞)