

面向高密度磁随机存储器的 $B2\text{-CoGa(Pt)}/L1_0\text{-MnAl}$ 双层膜中高自旋轨道矩效率

孙宏利¹, 韩荣坤¹, 魏大海¹, 赵建华^{1,2*}

1. 中国科学院半导体研究所, 半导体芯片物理与技术全国重点实验室, 北京 100083

2. 杭州市北京航空航天大学国际创新研究院(北京航空航天大学国际创新学院), 自旋芯片与技术全国重点实验室, 杭州 311115

* 联系人, E-mail: jianhuazhao@buaa.edu.cn; jhzhao@semi.ac.cn

2024-12-01 收稿, 2025-01-24 修回, 2025-02-06 接受, 2025-02-07 网络版发表

中国科学院战略性先导科技专项(XDB44010100)、杭州市北京航空航天大学国际创新研究院科研启动经费(2024KQ01)和中国科学院稳定支持基础研究领域青年团队计划(YSBR-030)资助

摘要 Mn基二元合金 $L1_0\text{-MnAl}$ 具有垂直磁各向异性强、自旋极化率高和磁阻尼因子低等特点, 是研制高密度、高性能和低功耗磁随机存储器(magnetic random access memory, MRAM)的重要材料体系, 而 $B2\text{-CoGa}$ 合金则同时为外延生长在主流半导体GaAs上垂直磁各向异性 $L1_0\text{-MnAl}$ 薄膜提供了理想的缓冲层和自旋流来源. 本文报道了在 $B2\text{-CoGa}$ 缓冲层中掺杂重金属Pt可以显著提高 $L1_0\text{-MnAl}/(\text{CoGa})_{1-x}\text{Pt}_x$ 双层膜中的自旋轨道矩(spin-orbit torque, SOT)效率. 该双层膜在高达 $x=0.1$ 的掺杂范围内仍然保持着良好的垂直磁各向异性, 其磁矩实现翻转的临界电流密度可从 $4.63\times 10^7\text{ A/cm}^2$ 降低到 $2.59\times 10^7\text{ A/cm}^2$, 同时SOT效率从0.042提高到0.080. 这种增强归因于在保持 $(\text{CoGa})_{1-x}\text{Pt}_x$ 有效自旋霍尔电导率不变的情况下其电阻率的增加. 其中, $x=0.075$ 样品能够支持横向尺寸8.09 nm的磁性隧道结单元, 同时功耗可降低至原来的0.63. 这些结果为基于Mn基二元合金的MRAM研发提供了参考.

关键词 垂直磁各向异性, 自旋轨道矩, Mn基二元合金, 磁矩翻转, 分子束外延



赵建华 杭州市北京航空航天大学国际创新研究院教授, 自旋芯片与技术全国重点实验室首席科学家. 长期从事半导体实验物理研究, 在自旋电子学和低维半导体量子体系领域取得了系统的创新性成果. 曾获亚洲磁学联盟奖、中国物理学会黄昆物理奖、国家技术发明奖二等奖, 享受国务院政府特殊津贴. 科技部重大项目首席科学家. 现任国际纯

粹与应用物理学联合会(IUPAP)磁学专业委员会副主任、国际磁学与磁性材料顾问委员会委员、香港研究资助局物理科学组成员、中国物理学会女物理工作者委员会委员等学术职务.

磁随机存储器(magnetic random access memory, MRAM)兼具静态随机存取存储器(static random-access memory, SRAM)高速度、动态随机存取存储器(dynamic random access memory, DRAM)高密度和Flash

非易失性等优点, 存取速度快、功耗低、寿命长、抗辐照, 是一项颠覆性存储技术^[1,2]. 美国导弹、欧洲空客飞机A350等已采用MRAM搭建计算系统, 华为也将其在智能手表GT2中, 可续航2个星期. MRAM依照

引用格式: 孙宏利, 韩荣坤, 魏大海, 等. 面向高密度磁随机存储器的 $B2\text{-CoGa(Pt)}/L1_0\text{-MnAl}$ 双层膜中高自旋轨道矩效率. 科学通报, 2025, 70: 920–928
Sun H, Han R, Wei D, et al. Enhancement of spin-orbit torque efficiency in $B2\text{-CoGa(Pt)}/L1_0\text{-MnAl}$ bilayers for high-density MRAM (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 920–928, doi: [10.1360/TB-2024-1279](https://doi.org/10.1360/TB-2024-1279)

写入结构设计通常被分为三代. 第一代MRAM依靠磁场驱动隧道结磁性层的磁矩翻转, 实现数据写入的操作, 如嵌套型磁随机存储器(toggle-MRAM)^[3]. 自旋转移磁随机存储器(spin transfer torque, STT-MRAM)依靠极化电流自旋角动量对铁磁层的转移力矩效应来实现磁矩翻转, 被誉为第二代MRAM^[4]. 第三代MRAM是自旋轨道矩磁随机存储器(spin-orbit torque, SOT-MRAM), 依靠纯自旋流诱导邻近铁磁层磁矩翻转, 完成数据写入指令^[5]. 第一、二代MRAM已经商品化, 第三代MRAM基本处于实验室研发阶段. 目前商品化主流MRAM产品是垂直磁各向异性自旋转移磁随机存储器(p-STT-MRAM), 其核心材料结构为Ta/CoFeB/MgO多层膜组成的磁隧道结. 由于垂直磁各向异性来源于界面诱导, 隧道结在小尺寸下热稳定性变差, 难以兼容先进的半导体工艺节点. 最近, 日本东北大学Ohno课题组利用由[CoFeB/MgO]_N超晶格结构组成隧道结的自由层, 成功将隧道结尺寸微缩到10 nm以下, 但是该类器件核心堆垛结构需要几十层, 对商品化生产带来了很大挑战^[6].

与之相比, 四方相Mn基二元合金L1₀-MnGa和L1₀-MnAl的强垂直磁各向异性源自磁晶各向异性, 是一种稳定的体效应, 能够支持亚10 nm的隧道结. 此外, 这类材料还具有高自旋极化率和低磁阻因子等优点, 更利于研发高密度、高性能的MRAM. 过去10多年里, 日本东北大学Ando、Miyazaki课题组和本文作者赵建华课题组在基于垂直磁各向异性L1₀-MnGa和L1₀-MnAl铁磁薄膜的隧道结研制方面取得了长足进展^[7-10], 近几年还实现了无磁场下自旋轨道矩(spin-orbit torque, SOT)效应诱导垂直磁各向异性L1₀-MnGa、D₀2₂-Mn₃Ga和L1₀-MnAl薄膜的磁矩翻转, 将基于Mn基二元合金薄膜的MRAM研发进程推进了一大步^[11-14]. 本文将主要报道通过Pt掺杂来提高B2-CoGa/L1₀-MnAl双层膜中SOT效应诱导磁矩翻转效率方面的工作.

SOT效应的主要原理是通过自旋霍尔效应或界面Rashba-Edelstein效应产生的纯自旋流与铁磁材料局域磁矩发生相互作用并诱导磁矩翻转^[14-17], 提供了一种在微纳尺度通过自旋-电荷转换调控薄膜磁矩方向的有效全电学方法. 在重金属/铁磁材料双层膜中, 重金属层中自旋流可以通过两种有效的力矩影响近邻的铁磁层, 包括类场矩 τ_{DL} 和类阻尼矩 τ_{FL} , 其中前者通常主导铁磁层磁矩翻转. 当体自旋霍尔效应是 τ_{DL} 的主要来源时, 类阻尼SOT效率 ζ_{DL} 作为降低基于SOT效应的自旋

电子学器件中功耗的关键参数, 可以被描述为 $\zeta_{DL} = \sigma_{SH}^* \rho_{SCG}$ ^[18], ρ_{SCG} 为重金属层即自旋流发生层的电阻率. 一种常见提升 ζ_{DL} 的方法是在重金属层中引入一定量的杂质, 在有效自旋霍尔电导率 σ_{SH}^* 和电阻率 ρ_{SCG} 之间进行权衡, 比如Pt-SiN、Pt-Mn薄膜^[19,20]. 此外, 有研究表明 σ_{SH}^* 和 ρ_{SCG} 可以同时提升, 如Au-Pt、Pt-Cu和 β -W-Si等^[21-23].

与界面诱导垂直磁各向异性材料不同^[24], Mn基二元合金的垂直磁各向异性强烈依赖于晶体结构. 当传统的重金属被用作缓冲层时, 晶格失配问题将严重影响上层Mn基二元合金的垂直磁各向异性, 并限制其在SOT效应驱动的磁矩翻转在磁隧道结中的应用^[25]. 因此, 寻找一种能够同时作为晶格匹配缓冲层和自旋流发生层的合适材料变得尤为重要. B2-CoGa已经被证明是满足上述需求的理想材料^[26-29]. 在B2-CoGa/L1₀-MnGa双层膜体系中实现了SOT效应驱动的磁矩翻转, 其中B2-CoGa的内禀自旋霍尔效应是SOT效应的关键来源. 然而, 所报道B2-CoGa/L1₀-MnGa双层膜中的 ζ_{DL} 明显低于传统重金属的 ζ_{DL} , 这是由于B2-CoGa中的 σ_{SH}^* 较小^[11,29]. 此外, 关于B2-CoGa/L1₀-MnAl双层膜中SOT效应驱动磁矩翻转行为以及提升B2-CoGa中 ζ_{DL} 的相关研究仍然缺乏.

在本文中, 我们尝试在B2-CoGa合金中掺入Pt, 在保持上层L1₀-MnAl良好垂直磁各向异性的基础上调控其SOT效应驱动磁矩翻转行为. 我们系统地研究了外延生长的(CoGa)_{1-x}Pt_x/L1₀-MnAl双层膜中Pt浓度 x 依赖的结构、磁学性质和SOT效应驱动磁矩翻转行为. 该双层膜在0 $\leq x \leq 0.1$ 的Pt掺杂浓度范围内仍可以保持很好的垂直磁各向异性. 随后, 我们在双层膜中实现了SOT效应驱动的确定性磁矩翻转, 翻转行为和临界翻转电流密度均随Pt掺杂浓度 x 变化而出现显著变化. 我们进一步研究了不同面内辅助场下的SOT效应驱动磁矩翻转行为, 探索了Pt掺杂对电流驱动磁矩翻转行为的调控作用.

1 实验方法

我们利用一台双生长室分子束外延设备制备了Al(3)/L1₀-MnAl(2)/(CoGa)_{1-x}Pt_x(5)/GaAs多层膜结构, 括号中数字为薄膜厚度, 单位为nm. 首先, 在一个生长室中完成了半绝缘GaAs(001)衬底的脱氧处理, 并且外延生长了厚度为200 nm的GaAs缓冲层来平滑衬底表

面。随后,将样品在超高真空通道里转移至另一个生长室内进行金属多层膜的外延生长。我们生长了不同Pt掺杂浓度的 $(\text{CoGa})_{1-x}\text{Pt}_x$ 薄膜,厚度为5 nm, x 的变化范围为0~0.15。其中,Co和Ga元素是使用热蒸发源炉生长的,而对于Pt元素,由于其极高的熔点,采用电子束蒸发源炉来沉积。Pt的掺杂浓度通过晶振膜厚仪测量Co和Pt的相对生长速率确定。 $(\text{CoGa})_{1-x}\text{Pt}_x$ 层的生长温度为350℃,生长完成后保持温度不变,原位退火10 min,以保证高晶体结构质量。在完成 $(\text{CoGa})_{1-x}\text{Pt}_x$ 层的生长后,降低衬底温度至300℃,继续生长2 nm的 $L1_0\text{-MnAl}$ 单晶薄膜,完成后在该生长温度原位退火10 min。最后,将样品冷却至室温,在其上沉积厚度为3 nm的Al薄膜作为防氧化层。采用X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)和超导量子干涉仪(superconducting quantum interference devices, SQUID)对所有样品的晶体结构和磁性性质进行表征。将所有样品加工制备成长度为18 μm 、宽度为10 μm 的霍尔桥器件,用来研究反常霍尔效应(anomalous Hall effect, AHE)和SOT效应诱导的磁矩翻转。电学测量利用物理性质测量系统(physical property measurement system, PPMS)完成,结合使用了外部电表Keithley 6221电流源、2182A纳伏表和SR830锁相放大器。

2 结果与分析

图1(a), (b)分别展示了立方结构的B2-CoGa和四方结构的 $L1_0\text{-MnAl}$ 的晶体结构^[30,31]。二者之间相对较小的面内晶格失配使得B2-CoGa合金可以被用来优化上层MnAl薄膜的晶体质量。图1(c)为多层膜样品的层堆垛结构。XRD θ -2 θ 扫描图谱清晰显示了 $(\text{CoGa})_{1-x}\text{Pt}_x$ (002)和GaAs (004)的衍射峰(图1(d))。对于厚度为2 nm的 $L1_0\text{-MnAl}$ 层,由于其厚度太薄,很难得到可观的信号,因此我们仅研究 $(\text{CoGa})_{1-x}\text{Pt}_x$ 层的相关信息。对于未掺杂($x=0$)的样品,其晶格常数为2.95 Å,略微高于体材料中的晶格参数。随着 x 的增加, c 值首先从2.95 Å ($x=0$)缓慢增加到3.07 Å ($x=0.075$),随后快速增加至3.44 Å ($x=0.15$)。该现象表明在 x 超过0.075后,晶格趋向于快速发生弛豫。

图1(e)为所有样品的反常霍尔效应曲线。在 $0 \leq x \leq 0.1$ 的范围内,样品具有方形的AHE回线,表现出优良的PMA特征。然而,在 $x > 0.1$ 后,剩磁比(R_r/R_s)快速下降至0,这是因为缓冲层 $(\text{CoGa})_{1-x}\text{Pt}_x/L1_0\text{-MnAl}$ 随掺杂浓度增加,晶体质量发生变化,进而引发上层 $L1_0\text{-MnAl}$

中PMA退化。此外,我们还测量了 $(\text{CoGa})_{1-x}\text{Pt}_x$ 层,也就是自旋流来源层的电阻率值 ρ_{SCG} ,如图1(h)所示。实验中未掺杂CoGa的电阻率为175 $\mu\Omega\text{ cm}$,与他人结果一致^[29]。随着 x 从0增加到0.15, ρ_{SCG} 从175 $\mu\Omega\text{ cm}$ 增至719 $\mu\Omega\text{ cm}$ 。在通过电学方法测量多层膜的垂直磁各向异性场 H_K^{eff} 后,基于关系式 $K_u = M_s H_K^{\text{eff}} / 2 + 2\pi M_s^2$ 得到了所有样品的垂直磁各向异性常数 K_u 。如图1(i)所示, K_u 随着 x 的增加单调减少,从 $1.04 \times 10^7\text{ erg/cm}^3$ ($x=0$)降至0 ($x=0.15$)。通过 K_u 的逐渐变化可以确认,在 $0 \leq x \leq 0.075$ 的范围内,双层膜保持良好的晶体质量。

在表征了基本性质后,我们选择了 $0 \leq x \leq 0.1$ 范围内的样品来研究双层膜中SOT效应诱导的磁矩翻转行为。图2(a)为垂直磁化薄膜中的SOT效应诱导磁矩翻转机制示意图。首先,施加一系列持续时间为50 μs 的脉冲电流,同时在沿电流方向施加面内外部磁场 H_x 。随后,使用0.1 mA的检测电流测量样品的反常霍尔电阻 R_{AH} 变化。 H_x 的作用是打破双层膜系统的镜面对称性,实现确定性磁矩翻转。图2(b)展示了 $x=0.1$ 样品中的SOT效应诱导的确定性磁矩翻转。在 $H_x=+1000\text{ Oe}$ 时,当脉冲电流 I_{pulse} 从负值扫到正值时, $L1_0\text{-MnAl}$ 的磁矩由下向上反转;而当电流反向扫动时,磁矩又翻转回去,我们将其定义为逆时针翻转。当 H_x 的方向被反转时,逆时针翻转变为顺时针翻转。

考虑到并联电路的分流效应,我们仔细计算了双层膜的临界翻转电流密度 J_c ,其定义为反常霍尔电阻变化一半时的翻转电流密度值。图2(c)展示了在 $H_x=+1000\text{ Oe}$ 时不同Pt浓度的薄膜中的磁矩翻转行为。不同的Pt浓度下磁矩翻转曲线的形状、翻转比和临界翻转电流密度的变化显著。曲线形状的变化源于磁矩翻转的两种机制(畴壁传播和畴成核)的共同调制^[32]。图2(d), (e)总结了翻转比和临界翻转电流密度随 x 变化的情况。翻转比在65%~75%之间波动,并呈现出总体上升的趋势,如图2(d)所示。相关研究表明,热效应在B2-CoGa/ $L1_0\text{-MnGa}$ 双层膜的SOT诱导磁矩翻转中起着至关重要的作用。高电流密度导致的温度升高会影响垂直磁各向异性,从而降低磁畴的翻转比例^[33]。在我们的实验中,翻转比例提高的同时临界翻转电流密度降低,从 $4.63 \times 10^7\text{ A/cm}^2$ 降低至 $2.59 \times 10^7\text{ A/cm}^2$ (图2(e))。在SOT驱动的磁化翻转中,临界翻转电流密度与磁性材料的垂直磁各向异性呈正相关,因此器件的临界翻转电流密度减小与随着掺杂浓度提高 $L1_0\text{-MnAl}$ 的垂直磁各向异性性能下降有关。此外,Pt作为重金属元素掺杂可能

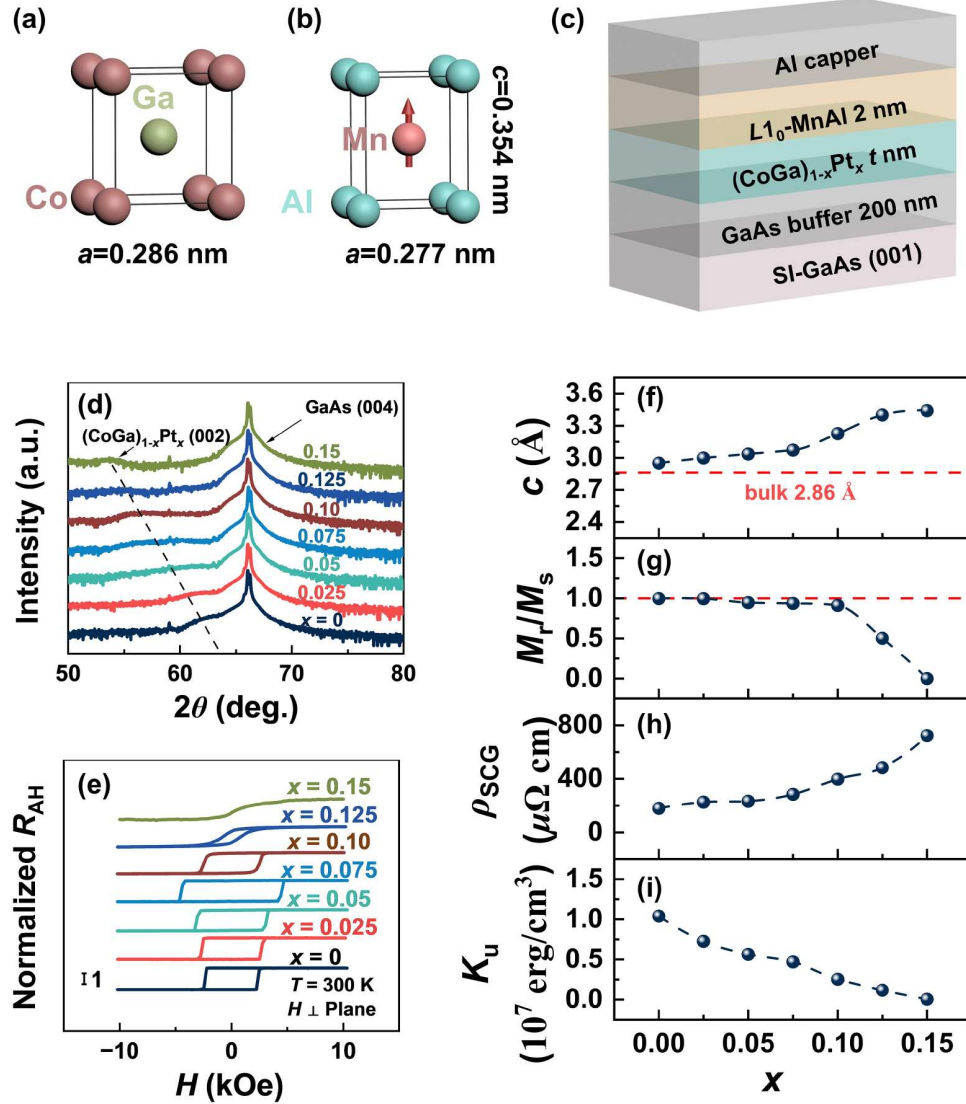


图 1 (网络版彩色)(CoGa)_{1-x}Pt_x/L1₀-MnAl双层膜的晶体结构与磁学性质. (a) B2-CoGa (a)和L1₀-MnAl (b)的晶体结构示意图. (c) 多层膜样品的层堆积结构. (d) 在GaAs基底上生长的厚度为5 nm的(CoGa)_{1-x}Pt_x层XRD谱图. (e) 所有样品的反常霍尔效应曲线. 所有样品的晶格常数 c (f)、剩磁比 M_r/M_s (g)、电阻率 ρ_{SCG} (h)和垂直磁各向异性 K_u (i)的组分依赖特性

Figure 1 (Color online) The crystal structure and magnetic properties of (CoGa)_{1-x}Pt_x/L1₀-MnAl bilayers. Diagrams of the crystalline structure of B2-CoGa (a) and L1₀-MnAl (b). (c) Layer stacking structure of the sample. (d) XRD patterns of 5 nm (CoGa)_{1-x}Pt_x layers grown on GaAs substrates. (e) AHE curves of all the samples. The x dependence curves of lattice constant c (f), remanence M_r/M_s (g), resistivity ρ_{SCG} (h), and perpendicular magnetic anisotropy energy K_u (i) of all the samples, respectively

提升(CoGa)_{1-x}Pt_x的 ζ_{DL} 效率, 从而导致临界翻转电流密度降低.

我们通过谐波霍尔测试定量研究了B2-CoGa(5)/L1₀-MnAl(2)/双层膜的SOT翻转效率 ζ_{DL} 和 ζ_{FL} . 测量示意图如图3(a)所示, 在基于典型的FM/SCG双层膜的霍尔器件中, 沿器件的 x 轴或 y 轴施加交变电流(频率为133.3 Hz)会产生电流依赖的SOT有效场, 包括类阻尼

有效场 H_{DL} 和类场有效场 H_{FL} . 随交变电流产生的有效场会对铁磁层的磁矩产生周期性的调制作用, 生成高阶的谐波信号. 通过测量一次和二次谐波霍尔信号 $V_{1\omega}$ 和 $V_{2\omega}$ 分别随沿 x 轴和 y 轴施加的外加磁场 H_x 和 H_y 的变化, 可以得到等效磁场 H_{DL} 和 H_{FL} :

$$H_{DL(FL)} = -2 \frac{\partial V_{2\omega}}{\partial H_{x(y)}} / \frac{\partial^2 V_{1\omega}}{\partial H_{x(y)}^2}. \quad (1)$$

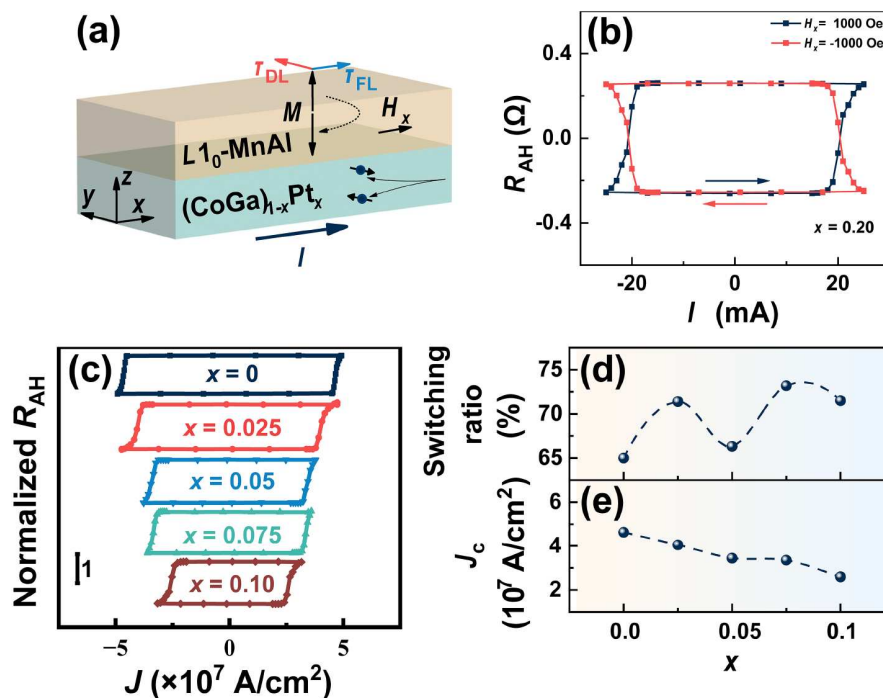


图2 (网络版彩色)(CoGa)_{1-x}Pt_x/L1₀-MnAl双层膜中SOT诱导的磁化翻转行为。(a) (CoGa)_{1-x}Pt_x/L1₀-MnAl双层膜中SOT效应的示意图。(b) (CoGa)_{0.9}Pt_{0.1}/L1₀-MnAl双层膜中的SOT效应诱导确定性磁矩翻转。(c) 不同x值样品的SOT效应诱导磁矩翻转曲线。翻转比(d)和临界电流密度J_c(e)随x的变化

Figure 2 (Color online) SOT-induced magnetization switching behavior in (CoGa)_{1-x}Pt_x/L1₀-MnAl bilayers. (a) Schematics of the SOT effect in (CoGa)_{1-x}Pt_x/L1₀-MnAl bilayer. (b) SOT-induced deterministic magnetization switching in (CoGa)_{0.9}Pt_{0.1}/L1₀-MnAl bilayer. (c) SOT-induced magnetization switching curves in all samples with different x. The switching ratio (d) and J_c (e) as a function of x

图3(b)展示了在正向磁化(+m_z)和负向磁化(-m_z)情况下二次谐波霍尔信号V_{1ω}随x方向面内磁场μ₀H_x的变化。V_{1ω}随H_x和H_y的变化是一致的,因此这里仅给出了V_{1ω}随μ₀H_x的变化。二次谐波霍尔信号V_{2ω}分别随H_x和H_y的变化情况如图3(c), (d)所示。可以看到,信号随面内外加磁场呈现出线性变化。根据式(1)拟合二次谐波霍尔信号曲线,得到了单位电流密度下的等效场大小,分别为μ₀H_{DL}=2.10 Oe/10⁶ A cm⁻²和μ₀H_{FL}=2.98 Oe/10⁶ A cm⁻²,如图3(e), (f)所示。在此基础上,我们根据式(2)进一步计算了SOT效率ζ_{DL}和ζ_{FL}:

$$\zeta_{DL(FL)} = \frac{2e\mu_0 H_{DL(FL)} M_s t_{FM}}{\hbar J_0} \quad (2)$$

其中, e代表电子电荷, ħ代表约化普朗克常数, t_{FM}代表铁磁层的厚度。经过计算, 得到ζ_{DL}=0.042±0.006和ζ_{FL}=0.059±0.002, 其中ζ_{DL}与在L1₀-MnGa/B2-CoGa双层膜中得到的数值相差不大, 但ζ_{FL}却远小于在L1₀-MnGa/B2-CoGa双层膜中得到的值^[28]。在之前的研究中, 人们

对比了L1₀-MnGa/B2-CoGa和CoFeB/B2-CoGa中的ζ_{FL}, 发现前者的ζ_{FL}显著大于后者, 将其归因于ζ_{FL}对界面能带匹配的敏感特性^[29]。我们推断类似的现象可能也是L1₀-MnAl/B2-CoGa和L1₀-MnGa/B2-CoGa之间不同的界面能带匹配特性导致的, 尚需后续进一步的理论研究。幸运的是, SOT效应驱动的确定性磁矩翻转行为是由B2-CoGa中内禀自旋霍尔效应引发的类阻尼力矩主导的。

现在我们讨论类阻尼自旋轨道矩效率显著增强的起源。通过获得的类阻尼SOT效率ζ_{DL}和ρ_{SCG}(图4(a), (b)), 结合关系ζ_{DL}=σ_{SH}×ρ_{SCG}, 能够得到有效的自旋霍尔电导率, 如图4(c)所示。与理论值2.86×10⁴ (ħ/2e) Ω⁻¹ m⁻¹相比, x=0样品的自旋霍尔电导率为2.40×10⁴ (ħ/2e) Ω⁻¹ m⁻¹, 因样品制备和测量误差而略有降低。在0≤x≤0.075范围内, 自旋霍尔电导率相对恒定, 表明样品具有良好的晶体质量。这一现象与上述晶格常数、电阻率和垂直磁各向异性常数K_u随x的逐渐变化趋势一致。然而, 当x=0.1时, 尽管样品仍保持良好的垂直磁各

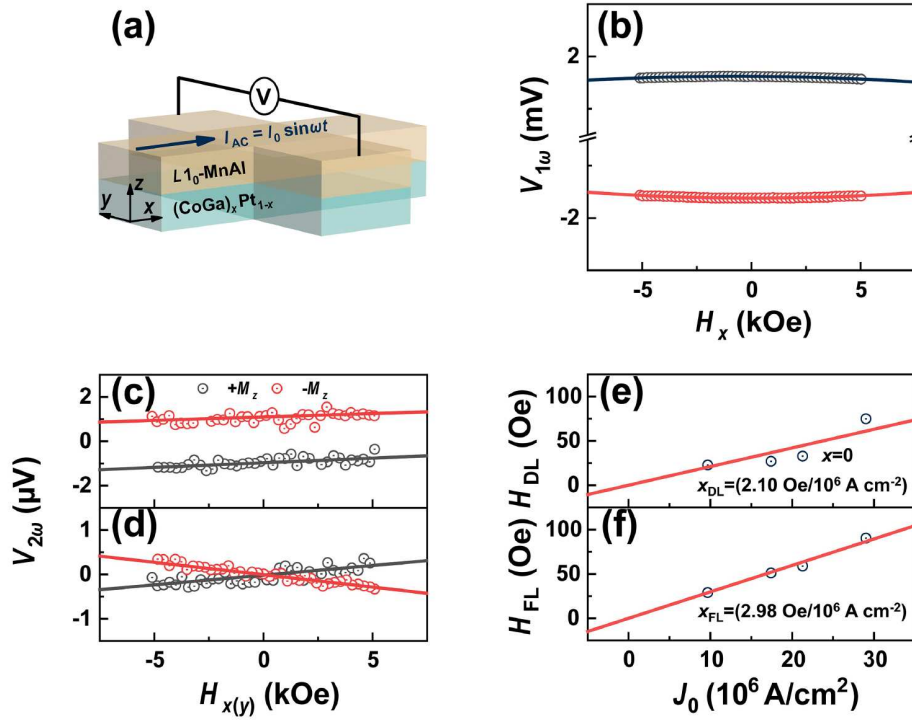


图 3 (网络版彩色)(CoGa)_{1-x}Pt_x/L10-MnAl双层膜中的自旋轨道矩效率. (a) 谐波霍尔测量示意图. (b) B2-CoGa(5)/L10-MnAl(2)双层膜中一次谐波信号 $V_{1\omega}$ 随 $\mu_0 H_x$ 的变化情况. 二次谐波信号 $V_{2\omega}$ 分别随 $\mu_0 H_x$ (c) 和 $\mu_0 H_y$ (d) 的变化情况. 双层膜中类阻尼有效场(e)和类场有效场(f)随电流密度的变化曲线

Figure 3 (Color online) SOT efficiency in (CoGa)_{1-x}Pt_x/L10-MnAl bilayers. (a) Schematic diagram of HHVR measurement. (b) The variation of the first order harmonic signal $V_{1\omega}$ with $\mu_0 H_x$ in B2-CoGa(5)/L10-MnAl(2) bilayer. The variations of the second order harmonic signal $V_{2\omega}$ with $\mu_0 H_x$ (c) and $\mu_0 H_y$ (d), respectively. H_{DL} (e) and H_{FL} (f) as a function of applied J

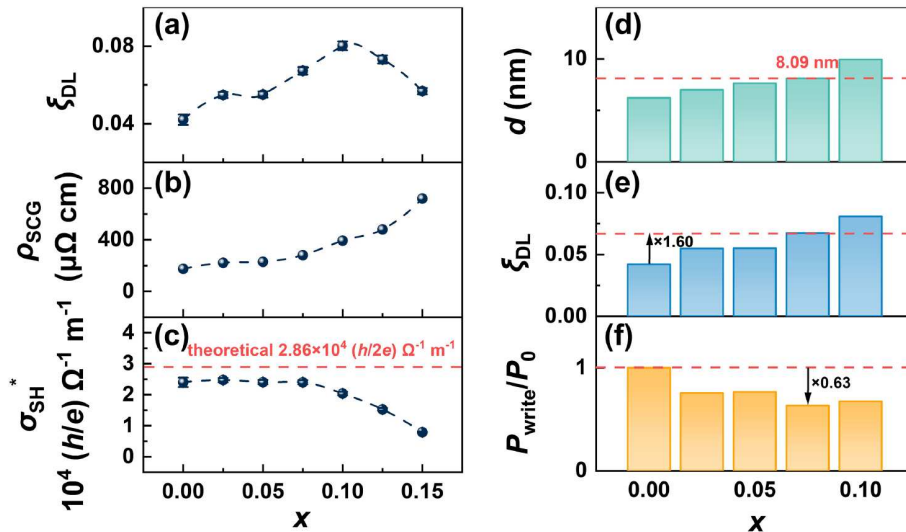


图 4 (网络版彩色)(CoGa)_{1-x}Pt_x/L10-MnAl双层膜实际应用特性随 x 的变化关系. 类阻尼SOT效率 ξ_{DL} (a)、电阻率 ρ_{SCG} (b)和自旋霍尔电导率 σ_{SH}^* (c)的 x 关系曲线. 器件最小横向尺寸 d (d)、类阻尼SOT效率 ξ_{DL} (e)和功耗比 P_{write}/P_0 (f)的 x 依赖关系

Figure 4 (Color online) The variation of practical application properties with x in (CoGa)_{1-x}Pt_x/L10-MnAl bilayers. The x dependence curves of the damping-like SOT efficiency ξ_{DL} (a), resistivity ρ_{SCG} (b), and spin Hall conductivity σ_{SH}^* (c), respectively. The x dependence curves of the minimum lateral dimension d (d), damping-like SOT efficiency ξ_{DL} (e), and power consumption ratio P_{write}/P_0 (f), respectively

向异性,但晶格常数、电阻率和垂直磁各向异性常数 K_u 的突变表明样品结构开始显著变化,导致自旋霍尔电导率的下降.在 $x>0.1$ 的情况下,晶体结构受到显著影响,导致界面粗糙度增加难以维持垂直磁各向异性,因此自旋霍尔电导率迅速下降.在我们的实验中,未观察到自旋霍尔电导率的显著增强.这是因为我们的双层膜质量强烈依赖于好的晶体结构,所以严重限制了掺杂浓度. Pt掺杂后, $(\text{CoGa})_{1-x}\text{Pt}_x$ 层的晶体质量下降,而掺杂的Pt在其中可能成为散射中心,造成 $(\text{CoGa})_{1-x}\text{Pt}_x$ 层的电阻率增大.但是由于掺杂的Pt作为重金属又增强了材料中的自旋轨道耦合效应,因此其有效自旋霍尔电导率却保持不变或仅发生小幅度变化,从而提高了SOT效应的效率.

随后,我们研究了在 $0\leq x\leq 0.1$ 范围内的样品在实际应用中的特性,该范围内 $L1_0\text{-MnAl}$ 可以保持良好的垂直磁各向异性.典型MRAM单元的临界横向尺寸 d 可以基于热稳定性条件 $K_u d^3/k_B T\geq 60$ 来确定.当 x 从0变为0.1时,源自磁晶各向异性的垂直磁各向异性以及超高垂直磁各向异性确保 $(\text{CoGa})_{1-x}\text{Pt}_x/L1_0\text{-MnAl}$ 双层膜支持横向尺寸从6.21 nm到9.94 nm的磁性隧道结单元(图4(d)).写入功耗 P_{write} 也是高性能MRAM设备的关键参数,我们使用 $P_{\text{write}}\propto [(1+s)/\zeta_{\text{DL}}]^2\rho_{\text{SGC}}$ 关系来计算

样品中的写入功耗 P_{write} .图4(f)展示了 P_{write}/P_0 随 x 的变化,其中 P_0 表示未掺杂样品的写入功耗.随着 x 的增加, P_{write} 的最小值为 P_0 的0.63.通过对获得的数据进行全面分析,我们得出结论: $x=0.075$ 的样品表现出最佳整体性能,其 ζ_{DL} 增加到1.60倍, P_{write} 降至原来的0.63,同时仍能支持最小横向尺寸 $d=8.09$ nm的MRAM单元.所有这些结果都表明, $(\text{CoGa})_{0.925}\text{Pt}_{0.075}/L1_0\text{-MnAl}$ 双层膜是高性能MRAM设备的潜在候选材料.

3 结论

我们通过在 $B2\text{-CoGa}$ 层中掺入重金属Pt原子显著提高了类阻尼型SOT效率 ζ_{DL} .样品在 $0<x<0.1$ 的Pt浓度范围内保持良好的垂直磁各向异性,在微米尺度的霍尔条形器件中实现了SOT效应诱导的确定性磁矩翻转,临界翻转电流密度从 4.63×10^7 A/cm²降低至 2.69×10^7 A/cm², ζ_{DL} 从0.042增加到0.080.后续分析表明, ζ_{DL} 的增强源于电阻率 ρ_{SGC} 的增加,同时自旋霍尔电导率基本保持不变.此外,我们证明了 $x=0.075$ 的样品能够将写入功率 P_{write} 降低至 $x=0$ 时的0.63,并支持横向尺寸为8.09 nm的MRAM单元.这些发现为基于 $L1_0\text{-MnAl}$ 的高密度、高性能和低功耗的磁存储器MRAM等自旋电子器件应用提供了有利的支持.

参考文献

- Gregg J F, Petej I, Jouguelet E, et al. Spin electronics a review. *J Phys D-Appl Phys*, 2002, 35: R121–R155
- Wang K L, Alzate J G, Khalili Amiri P. Low-power non-volatile spintronic memory: STT-RAM and beyond. *J Phys D-Appl Phys*, 2013, 46: 074003
- Engel B N, Akerman J, Butcher B, et al. A 4-Mb toggle MRAM based on a novel bit and switching method. *IEEE Trans Magn*, 2005, 41: 132–136
- Huai Y. Spin-transfer torque MRAM (STT-MRAM): challenges and prospects. *AAPPS Bull*, 2008, 18: 33–40
- Prenat G, Garello K, Langer J, et al. Ultra-fast and high-reliability SOT-MRAM: from cache replacement to normally-off computing. *IEEE Trans Multi-Scale Comp Syst*, 2015, 2: 49–60
- Igarashi J, Jinnai B, Watanabe K, et al. Single-nanometer CoFeB/MgO magnetic tunnel junctions with high-retention and high-speed capabilities. *npj Spintronics*, 2024, 2: 1
- Zhao X, Zhao J. Perpendicularly magnetized Mn_xGa -based magnetic tunnel junctions: materials, mechanisms, performances, and potential applications. *Adv Mater Inter*, 2022, 9: 2201606
- Suzuki K Z, Miura Y, Ranjbar R, et al. Perpendicular magnetic tunnel junctions with Mn-modified ultrathin MnGa layer. *Appl Phys Lett*, 2018, 112: 062402
- Mao S, Lu J, Wang H, et al. Observation of tunneling magnetoresistance effect in $L1_0\text{-MnAl/MgO/Co}_2\text{MnSi/MnAl}$ perpendicular magnetic tunnel junctions. *J Phys D-Appl Phys*, 2019, 52: 405002
- Suzuki K Z, Mizukami S. Tunnel magnetoresistance exceeding 100% in magnetic tunnel junctions using Mn-based tetragonal alloy electrodes with perpendicular magnetic anisotropy. *AIP Adv*, 2023, 13: 035225
- Zhao X P, Lu J, Mao S W, et al. Spin-orbit torque induced magnetization switching in ferrimagnetic Heusler alloy $D_{22}\text{-Mn}_3\text{Ga}$ with large perpendicular magnetic anisotropy. *Appl Phys Lett*, 2019, 115: 142405
- Sun H L, Han R K, Qin H R, et al. Current-induced magnetization switching behavior in perpendicular magnetized $L1_0\text{-MnAl/B2-CoGa}$ bilayer.

- [Chin Phys Lett](#), 2024, 41: 057503
- 13 Zhao X, Mao S, Wang H, et al. Antiferromagnet-mediated spin-orbit torque induced magnetization switching in perpendicularly magnetized $L1$ -MnGa. [Appl Phys Lett](#), 2021, 118: 092401
- 14 Feng T, Wang P, Wu D. Spin Hall magnetoresistance in metal/ferromagnetic insulator heterostructures (in Chinese). [Chin Sci Bull](#), 2022, 67: 2993–3004 [丰韬, 王鹏, 吴镭. 金属/铁磁绝缘体异质结中的自旋霍尔磁电阻. 科学通报, 2022, 67: 2993–3004]
- 15 Hirsch J E. Spin Hall effect. [Phys Rev Lett](#), 1999, 83: 1834–1837
- 16 Zhang S. Spin Hall effect in the presence of spin diffusion. [Phys Rev Lett](#), 2000, 85: 393–396
- 17 Edelstein V M. Spin polarization of conduction electrons induced by electric current in two-dimensional asymmetric electron systems. [Solid State Commun](#), 1990, 73: 233–235
- 18 Zhu L, Ralph D C, Buhrman R A. Maximizing spin-orbit torque generated by the spin Hall effect of Pt. [Appl Phys Rev](#), 2021, 8: 031308
- 19 Lin X, Li J, Zhu L, et al. Strong enhancement of spin-orbit torques in ferrimagnetic $\text{Pt}_x(\text{Si}_3\text{N}_4)_{1-x}/\text{CoTb}$ bilayers by Si_3N_4 doping. [Phys Rev B](#), 2022, 106: L140407
- 20 Xie Z, Zhao Z, Sun Y, et al. Manipulation of spin-orbit torque and Dzyaloshinskii-Moriya interaction by varying Mn concentration in Pt1-Mn /Co bilayer. [J Magn Magn Mater](#), 2023, 585: 171141
- 21 Zhu L, Ralph D C, Buhrman R A. Highly efficient spin-current generation by the spin Hall effect in $\text{Au}_{1-x}\text{Pt}_x$. [Phys Rev Appl](#), 2018, 10: 031001
- 22 Hu C, Pai C. Benchmarking of spin-orbit torque switching efficiency in Pt alloys. [Adv Quantum Tech](#), 2020, 3: 2000024
- 23 Kim T, Nguyen Q A T, Won Kim G, et al. Enhanced spin-orbit torque efficiency with low resistivity in perpendicularly magnetized heterostructures consisting of Si-alloyed β -W layers. [Appl Surf Sci](#), 2023, 609: 155352
- 24 Nozaki T, Yamamoto T, Tamaru S, et al. Enhancement in the interfacial perpendicular magnetic anisotropy and the voltage-controlled magnetic anisotropy by heavy metal doping at the Fe/MgO interface. [APL Mater](#), 2018, 6: 026101
- 25 Lu J, Li W, Liu J, et al. Voltage-gated spin-orbit torque switching in IrMn-based perpendicular magnetic tunnel junctions. [Appl Phys Lett](#), 2023, 122: 012402
- 26 Oshima D, Kato T, Iwata S. Highly (001) oriented MnAl thin film fabricated on CoGa buffer layer. [AIP Adv](#), 2020, 10: 025012
- 27 Suzuki K Z, Ranjbar R, Sugihara A, et al. Room temperature growth of ultrathin ordered MnGa films on a CoGa buffer layer. [Jpn J Appl Phys](#), 2015, 55: 010305
- 28 Takikawa M, Suzuki K Z, Ranjbar R, et al. In-plane current-induced magnetization switching in CoGa/MnGa/MgO films. [Appl Phys Express](#), 2017, 10: 073004
- 29 Lau Y C, Lee H, Qu G, et al. Spin Hall effect from hybridized $3d-4p$ orbitals. [Phys Rev B](#), 2019, 99: 064410
- 30 Sands T, Harbison J P, Leadbeater M L, et al. Epitaxial ferromagnetic τ -MnAl films on GaAs. [Appl Phys Lett](#), 1990, 57: 2609–2611
- 31 Meisel M W, Zhou W S, Owers-Bradley J R, et al. Magnetic properties of CoGa alloys and the transition from spin glass to ferromagnetism. [J Phys F-Met Phys](#), 1982, 12: 317–331
- 32 Zhao X, Sun H, Tong S, et al. Manipulation of perpendicular magnetic anisotropy and spin-orbit torque switching behavior in ferrimagnetic $D0_{22}$ - Mn_3Ga based multilayers. [Appl Phys Lett](#), 2023, 123: 042407
- 33 Bai Z, Cai Y, Shen L, et al. Magnetic and transport properties of $\text{Mn}_{3-x}\text{Ga}/\text{MgO}/\text{Mn}_{3-x}\text{Ga}$ magnetic tunnel junctions: a first-principles study. [Appl Phys Lett](#), 2012, 100: 022408

Summary for “面向高密度磁随机存储器的 $B2\text{-CoGa(Pt)/L1}_0\text{-MnAl}$ 双层膜中高自旋轨道矩效率”

Enhancement of spin-orbit torque efficiency in $B2\text{-CoGa(Pt)/L1}_0\text{-MnAl}$ bilayers for high-density MRAM

Hongli Sun¹, Rongkun Han¹, Dahai Wei¹ & Jianhua Zhao^{1,2*}

¹ State Key Laboratory of Semiconductor Physics and Chip Technologies, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China

² National Key Laboratory of Spintronics, Hangzhou International Innovation Institute, Beihang University, Hangzhou 311115, China

* Corresponding author, E-mail: jianhuazhao@buaa.edu.cn; jhzhao@semi.ac.cn

Magnetic random-access memory (MRAM) has emerged as a leading candidate for next-generation storage technology, offering high speed, high density, non-volatility, low power consumption, and radiation resistance. MRAM has evolved through three generations: field-driven toggle MRAM, spin-transfer torque (STT)-MRAM, and the experimental spin-orbit torque (SOT)-MRAM. The current commercial MRAM products primarily rely on STT-MRAM, which is based on Ta/CoFeB/MgO multilayers with the interfacial perpendicular magnetic anisotropy (PMA). However, STT-MRAM performance deteriorates at sub-10 nm size due to thermal instability. In contrast, the tetragonal Mn-based binary alloys exhibit stable bulk PMA and enhanced properties for sub-10 nm tunnel junction devices. Previous research has demonstrated the potential of these alloys for high-density MRAM, with magnetization switching achieved via SOT without the need for external magnetic fields. Among Mn-based binary alloys, $L1_0\text{-MnAl}$ stands out due to its strong PMA, high spin polarization, and low magnetic damping, making it a promising material for next-generation MRAM. On the other side, the $B2\text{-CoGa}$ alloy serves as both an ideal buffer layer and a spin current source for the epitaxial growth of PMA $L1_0\text{-MnAl}$ thin films on GaAs substrates. Our study demonstrates that doping $B2\text{-CoGa}$ with Pt significantly enhances the SOT efficiency in $(\text{CoGa})_{1-x}\text{Pt}_x/L1_0\text{-MnAl}$ bilayers while preserving the excellent PMA properties of $L1_0\text{-MnAl}$.

Experimental results show that Pt doping up to $x = 0.1$ keeps the PMA characteristics while simultaneously reducing the critical current density required for magnetization switching from $4.63 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ to $2.59 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$. SOT efficiency increases from 0.042 to 0.080. This enhancement is attributed to the increased resistivity of the $(\text{CoGa})_{1-x}\text{Pt}_x$ layer, which does not compromise its effective spin Hall conductivity. The optimized bilayer, with $x = 0.075$, supports magnetic tunnel junctions with lateral size as small as 8.09 nm, reducing power consumption by 37%. The SOT effect utilizes spin currents generated by phenomena such as the spin Hall effect to switch local magnetization in adjacent ferromagnetic layers. The damping-like SOT efficiency (ξ_{DL}), a crucial parameter for reducing device power consumption, is influenced by both spin Hall conductivity and resistivity of the material. The introduction of Pt impurities into $(\text{CoGa})_{1-x}\text{Pt}_x$ bilayers optimizes this balance, significantly enhancing ξ_{DL} . Compared to traditional heavy metals used as buffer layers, the $(\text{CoGa})_{1-x}\text{Pt}_x$ layer provides better lattice matching with Mn-based binary alloys, preserving their crystalline quality and PMA. This work systematically investigates the structural, magnetic, and SOT-driven magnetization switching properties of epitaxially grown $(\text{CoGa})_{1-x}\text{Pt}_x/L1_0\text{-MnAl}$ bilayers, focusing on the dependence of magnetization switching on Pt concentration. Deterministic SOT-induced switching is achieved for $x \leq 0.1$, with optimal PMA and SOT performance observed at $x = 0.075$. These results demonstrate the feasibility of incorporating Pt-doped CoGa layers into MRAM designs to enhance performance and scalability. This study provides valuable insights into improving SOT efficiency in Mn-based MRAM structures by incorporating Pt-doped CoGa buffer layers. These findings contribute to the development of high-density, high-performance MRAM devices with reduced power consumption.

perpendicular magnetic anisotropy, spin-orbit torque, Mn-based binary alloys, magnetization switching, molecular-beam epitaxy

doi: [10.1360/TB-2024-1279](https://doi.org/10.1360/TB-2024-1279)