

垂直磁各向异性 $L1_0$ - $Mn_{1.67}$ Ga 超薄膜分子束外延生长与磁性研究

肖嘉星 鲁军 朱礼军 赵建华

Perpendicular magnetic properties of ultrathin $L1_0$ - $Mn_{1.67}$ Ga films grown by molecular-beam epitaxy

Xiao Jia-Xing Lu Jun Zhu Li-Jun Zhao Jian-Hua

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 118105 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.118105

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.118105>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I11>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

功能化扶手椅型石墨烯纳米带异质结的磁器件特性

Magnetic device properties for a heterojunction based on functionalized armchair-edged graphene nanoribbons

物理学报.2016, 65(11): 118501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.118501>

基于钴和坡莫合金纳米磁体的全自旋逻辑器件开关特性研究

Switching characteristics of all spin logic devices based on Co and Permalloy nanomagnet

物理学报.2016, 65(9): 098501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.098501>

界面铁掺杂锯齿形石墨烯纳米带的自旋输运性能

Spin transport properties for iron-doped zigzag-graphene nanoribbons interface

物理学报.2016, 65(6): 068503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.068503>

$LaTiO_3(110)$ 薄膜分子束外延生长的精确控制和表面截止层的研究

Precise control of $LaTiO_3(110)$ film growth by molecular beam epitaxy and surface termination of the polar film

物理学报.2015, 64(7): 078103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.078103>

分子束外延制备的垂直易磁化 $MnAl$ 薄膜结构和磁性

Structural characterization and magnetic properties of perpendicularly magnetized $MnAl$ films grown by molecular-beam epitaxy

物理学报.2013, 62(17): 178103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.178103>

垂直磁各向异性 $L1_0$ - $Mn_{1.67}Ga$ 超薄膜分子束外延生长与磁性研究*

肖嘉星 鲁军[†] 朱礼军 赵建华[‡]

(中国科学院半导体研究所, 半导体超晶格国家重点实验室, 北京 100083)

(2016年1月23日收到; 2016年3月1日收到修改稿)

具有超强垂直磁各向异性的 $L1_0$ - Mn_xGa 薄膜由于其与半导体材料结构及工艺的高度兼容性而受到广泛关注, 其超高垂直磁各向异性能和极低的磁阻尼因子预示着 $L1_0$ - Mn_xGa 薄膜在高热稳定性自旋电子学器件中将发挥重要作用. 而 $L1_0$ - Mn_xGa 超薄膜对于降低 $L1_0$ - Mn_xGa 基垂直磁各向异性隧道结中的磁矩翻转临界电流密度有着重要的意义. 本文采用分子束外延的方法, 在半导体 GaAs 衬底上成功制备出了一系列不同厚度的 $L1_0$ - $Mn_{1.67}Ga$ 薄膜, 厚度范围为 1—5 nm. 生长过程中反射式高能电子衍射原位检测以及 X 射线衍射结果均表明了其良好的单晶相. 磁性测量结果表明, 厚度在 1 nm 以上的 $L1_0$ - $Mn_{1.67}Ga$ 薄膜均可以保持垂直磁各向异性特征, 厚度为 5 nm 的 $L1_0$ - $Mn_{1.67}Ga$ 薄膜的垂直磁各向异性能可达到 14.7 Merg/cm^3 . 这些结果为基于 $L1_0$ - $Mn_{1.67}Ga$ 的垂直磁各向异性隧道结在自旋转移扭矩驱动的磁随机存储器等低功耗器件的集成及应用提供了重要的实验支持.

关键词: 分子束外延, 自旋电子学, 磁各向异性, 超薄膜

PACS: 81.15.Hi, 85.75.-d, 75.30.Gw, 68.37.-d

DOI: 10.7498/aps.65.118105

1 引言

兼具高垂直磁各向异性能 K_u 、高矫顽力 H_c 以及极低磁阻尼因子的 $L1_0$ - Mn_xGa 薄膜在高热稳定性自旋电子学器件以及超高密度垂直磁记录方面有着非常广泛的应用前景^[1-10]. 由于能够与半导体材料 GaAs 在结构及工艺上兼容, $L1_0$ - Mn_xGa 薄膜可以用来制备高密度的自旋场效应晶体管^[11,12]、自旋霍尔晶体管^[13]、自旋发光晶体管^[14,15]以及横向自旋阀等^[16]垂直磁各向异性铁磁金属/半导体异质结构构建的新型自旋电子学功能器件, 并且可以方便地与微电子和光电子芯片进行集成. 近年来, 通过改变 $L1_0$ - Mn_xGa 与势垒层 MgO 之间的插层, 以 $L1_0$ - Mn_xGa 薄膜为铁磁电极

制备的垂直磁各向异性隧道结 (p-MTJs) 得到了高达 120% 的隧穿磁电阻值 (tunneling magnetic resistance, TMR)^[17], 为基于 $L1_0$ - Mn_xGa 薄膜的 p-MTJs 在自旋转移扭矩 (spin transfer torque, STT) 驱动的 Gbit 级磁随机存储器 (magnetic random access memory, MRAM) 以及高功率微波振荡器 (oscillator) 中的集成应用提供了必要的条件^[18-21]. 然而, 为了将 $L1_0$ - Mn_xGa 基 p-MTJs 集成在上述器件中并得到较小的临界电流密度, 必须使用具有垂直磁各向异性的 $L1_0$ - Mn_xGa 超薄膜 (厚度一般小于 5 nm) 作为自由层^[22], 这对于衬底的选择、缓冲层的制备以及生长条件的控制均有严格的要求. 所以, 尽管科研人员已经对 $L1_0$ - Mn_xGa 材料进行了广泛的研究, 但均是基于厚度为几十纳米的薄膜体系^[6,7,23], 关于具备垂直磁各向异性的 $L1_0$ - Mn_xGa

* 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2014AA032904)、国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2015CB921500) 和国家自然科学基金重点项目 (批准号: 61334006, 11304307) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: hujun@semi.ac.cn;

[‡] 通信作者. E-mail: jhzhao@red.semi.ac.cn

超薄膜的报道还很少, 并且主要集中在MgO衬底上, 通过添加Cr缓冲层来调节MgO衬底与 $L1_0$ - Mn_xGa 之间的晶格失配^[24-26]. 这种方法的缺点是随着厚度的减小, $L1_0$ - Mn_xGa 薄膜的垂直磁各向异性会降低, 在厚度小于5 nm时已经无法保持薄膜的垂直磁各向异性. 近日, 有报道在MgO衬底上采用Cr/CoGa作为缓冲层制备出了具有垂直磁各向异性的 $L1_0$ - Mn_xGa 超薄膜^[27], 其垂直磁各向异性可以维持到1 nm, 但是在制备的过程中Cr缓冲层及CoGa缓冲层必须分别在500 °C和700 °C下的高温下进行退火, 而且MgO衬底的使用会增加其与半导体芯片的工艺集成难度. 然而, 目前关于 $L1_0$ - Mn_xGa 超薄膜在半导体衬底GaAs上的报道还很少, 仅有Tanaka等^[28]在GaAs衬底上制备出具有垂直磁各向异性的超薄 $L1_0$ - Mn_xGa /NiGa超晶格结构, 而在半导体衬底GaAs上制备具有垂直磁各向异性的单层 $L1_0$ - Mn_xGa 超薄膜还未见报道.

本文利用双生长室分子束外延设备(VG80), 在半导体衬底GaAs(001)上生长了一系列厚度为1—5 nm的 $L1_0$ - Mn_xGa 单晶薄膜, 生长时原位反射式高能电子衍射(reflection high-energy electron diffraction, RHEED)图像显示出了明亮的条纹, 表明所生长的 $L1_0$ - Mn_xGa 薄膜为二维生长模式, 具有良好的单晶结构. 超导量子干涉仪(superconducting quantum interference device, SQUID)的测试结果显示所制备的不同厚度的 $L1_0$ - Mn_xGa 薄

膜均具有很高的垂直磁各向异性, 这为基于 $L1_0$ - Mn_xGa 的p-MTJs在STT-MRAM等低功耗器件的集成及应用提供了重要的实验支持.

2 实验过程

利用双生长室分子束外延设备(VG80)在GaAs(001)衬底上制备了一系列厚1—5 nm的MnGa薄膜, 样品结构为Al/MnGa/GaAs/GaAs(001)衬底, 如图1(a)所示. 首先利用分子束外延系统的第一生长室在GaAs(001)衬底上外延150 nm的GaAs缓冲层使其表面平滑, 真空度为 2×10^{-5} Pa. 然后通过高真空的中间预处理室将样品传输到第二生长室, 其真空度可以达到 1×10^{-7} Pa. 在沉积MnGa薄膜的过程中, 为了避免MnGa与GaAs的界面反应及相互扩散导致第二相的形成, 首先在衬底温度为30 °C时沉积了厚度为3—5个原子层的MnGa种子层. 在MnGa种子层的沉积过程中, RHEED图像由原来GaAs衬底的明亮细长的条纹逐渐变成晕状, 说明MnGa种子层在低温状态下为非晶态. 然后在250 °C原位退火5 min, RHEED图像由晕状逐渐变成连续的条纹, 说明非晶的MnGa种子层逐渐晶化. 待RHEED条纹完全连续后, 继续在250 °C的衬底温度下外延生长不同厚度的MnGa薄膜, 生长过程中其厚度及组分比分别由沉积时间及Mn与Ga的原子束流比来控制. 生长完成后, 通过X射线光电子

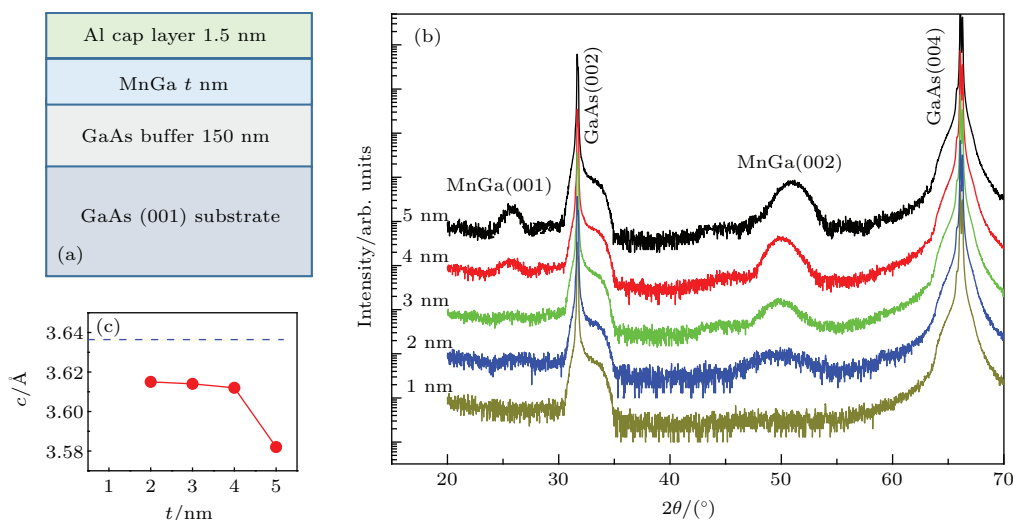


图1 (网刊彩色)(a) 样品结构示意图; (b) 不同厚度 $L1_0$ - $Mn_{1.67}Ga$ 薄膜X射线 θ - 2θ 衍射图样; (c) 不同厚度 $L1_0$ - $Mn_{1.67}Ga$ 薄膜面外晶格参数 c , 其中蓝色虚线为 $L1_0$ - $Mn_{1.6}Ga$ 块体的面外晶格参数

Fig. 1. (color online) (a) Schematic diagram of $L1_0$ - $Mn_{1.67}Ga$ samples; (b) XRD θ - 2θ patterns of $L1_0$ - $Mn_{1.67}Ga$ films with different thickness; (c) lattice parameters c of $L1_0$ - $Mn_{1.67}Ga$ films, the blue dash line presents the c value of $L1_0$ - $Mn_{1.6}Ga$ bulk.

能谱(XPS)标定其组分为Mn : Ga = 62.62 : 37.38, 对应的晶体相为MnGa的 $L1_0$ 相, 也即 $L1_0$ -Mn_{1.67}Ga, 并通过椭偏仪及扫描电镜来确定其生长厚度. 然后, 在低温下沉积大约1.5 nm的Al保护层, 防止其表面氧化. 由于低温种子层的隔离, 该方法有效地抑制了界面反应与相互扩散的影响, 有利于制备出纯相的 $L1_0$ -Mn_{1.67}Ga薄膜. 最后, 通过X射线衍射(XRD)研究样品的晶体结构, 并利用SQUID测量其磁性质.

3 结果与讨论

图1(b)给出了不同厚度 $L1_0$ -Mn_{1.67}Ga薄膜的XRD图谱, 可以看到在整个范围内只有衬底GaAs (002)与GaAs (004)的衍射峰以及MnGa (001)与MnGa (002)衍射峰, 说明所生长的 $L1_0$ -Mn_{1.67}Ga薄膜 c 轴垂直于薄膜表面, 具有很好的(001)取向. 同时, 在XRD图谱中没有看到任何杂峰, 意味着使用这种两步生长法可以有效地避免互扩散以及界面反应, 有利于形成具备高晶体质量的 $L1_0$ -Mn_{1.67}Ga薄膜. 从XRD图谱中可以看到, 厚度在2 nm以上的 $L1_0$ -Mn_{1.67}Ga薄膜均可以看

到明显的 $L1_0$ -MnGa (002)衍射峰, 厚度为4 nm及5 nm的薄膜甚至可以看到 $L1_0$ -MnGa (001)的超晶格衍射峰, 说明该系列不同厚度的 $L1_0$ -Mn_{1.67}Ga薄膜具有较高的有序度. 然而, 在XRD衍射图谱中没有观察到1 nm厚 $L1_0$ -Mn_{1.67}Ga薄膜的衍射峰, 可能是由于其衍射峰较弱或者峰宽较大从而利用普通的Cu靶X射线衍射仪难以观察到. 利用XRD衍射数据计算出 $L1_0$ -Mn_{1.67}Ga薄膜面外晶格参数 c 值在3.58—3.61 Å之间轻微地变化, 这个数值相比于 $L1_0$ -Mn_{1.6}Ga块体的 c 值3.633 Å有所减小^[29], 如图1(c)所示. 可能的原因是 $L1_0$ -Mn_{1.67}Ga薄膜与GaAs衬底间的张应力加剧了MnGa薄膜的四方畸变, 进而导致 c 轴变短, 类似的减小也在其他 $L1_0$ -Mn_xGa薄膜中有报道^[6].

图2是不同厚度 $L1_0$ -Mn_{1.67}Ga在垂直平面方向的室温磁滞回线(M - H 曲线)以及矫顽力、饱和磁化强度和剩磁比等基本磁性质. 可以看出所有的薄膜均具有垂直磁各向异性, 且随着其厚度的增加, $L1_0$ -Mn_{1.67}Ga薄膜的剩余磁化强度与饱和磁化强度的比值(剩磁比)逐渐增大. 当 $L1_0$ -Mn_{1.67}Ga厚度为5 nm时其磁滞回线的形状接近矩形, 剩磁比接近于1, 说明了其超高的垂直磁各向异性.

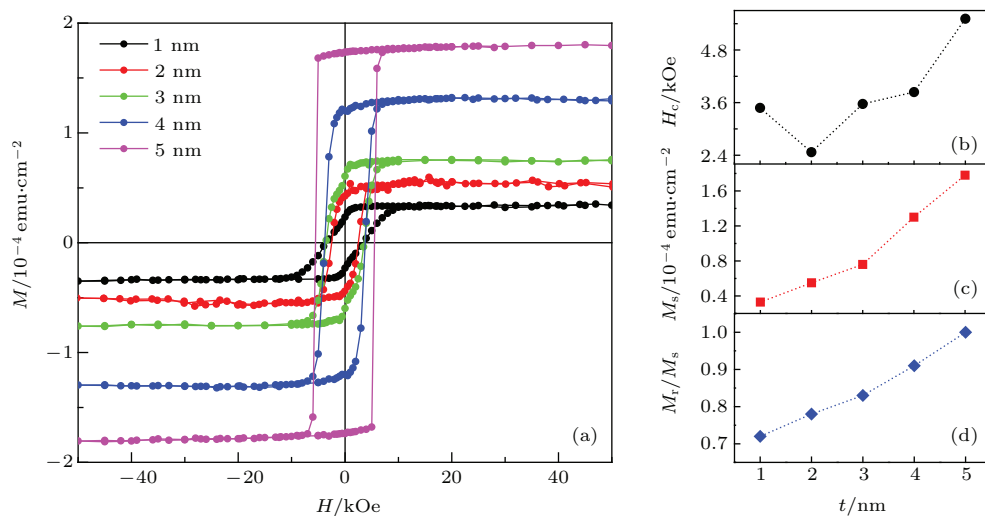


图2 (网刊彩色) 不同厚度 $L1_0$ -Mn_{1.67}Ga在垂直平面方向的室温磁滞回线(a), 矫顽力 H_c (b), 饱和磁化强度 M_s (c)和剩磁比 M_r/M_s (d)

Fig. 2. (color online) (a) Out-of-plane M - H loops for Al/ $L1_0$ -Mn_{1.67}Ga/GaAs with different MnGa thickness t and t dependence of (b) coercivity H_c , (c) saturation magnetization M_s , (d) the ratio of remnant magnetization and saturation magnetization M_r/M_s .

为了计算其垂直磁各向异性性能 K_u , 我们测量了不同厚度(2, 3, 4和5 nm)的 $L1_0$ -Mn_{1.67}Ga样品的面内及面外的 M - H 曲线, 如图3所示. 可以看出, 所有的薄膜在垂直方向都具有非常明

显的磁滞现象, 然而面内几乎没有磁滞, 且饱和场均超过30 kOe, 这一结果也再次证明了 $L1_0$ -Mn_{1.67}Ga薄膜的超高垂直磁各向异性. 通过公式 $K_u = K^{eff} + 2\pi M_s^2$, 定量计算了不同厚度 $L1_0$ -

$Mn_{1.67}Ga$ 薄膜的垂直磁各向异性性能 K_u , 其中 K_u^{eff} 为有效垂直磁各向异性常数, 可以由图 3 所示的垂直和面内磁化曲线包围的面积求得, $2\pi M_s^2$ 为由形状各向异性引起的退磁能, 其具体计算结果标注在图 3 中. 可以看出 K_u 值随着 $L1_0-Mn_{1.67}Ga$ 薄膜厚度的减小而减小, 同时计算结果表明薄至 2 nm 的 $L1_0-Mn_{1.67}Ga$ 仍具有高达 8.58 $Merg/cm^3$ 的 K_u 值. 由于厚度为 1 nm 的 $L1_0-Mn_{1.67}Ga$ 薄膜的面内 $M-H$ 曲线信噪比较差, 这里没有给出, 但

是其饱和场同样大于 30 kOe, 通过大致估算其 K_u 值同样在 $Merg/cm^3$ 的量级. 所以, 尽管该系列的 $L1_0-Mn_{1.67}Ga$ 薄膜样品在厚度逐渐减小的过程中其 K_u 值会逐渐减小, 但是厚度为 1 nm 的 $L1_0-Mn_{1.67}Ga$ 薄膜仍可以保持很好的垂直磁各向异性. 而 K_u 值的减小可能是由于 $L1_0-MnGa$ 薄膜与 GaAs 之间的张应力引起的, 类似的现象在 $D0_{22}-MnGa$ 中也有过报道 [24–26].

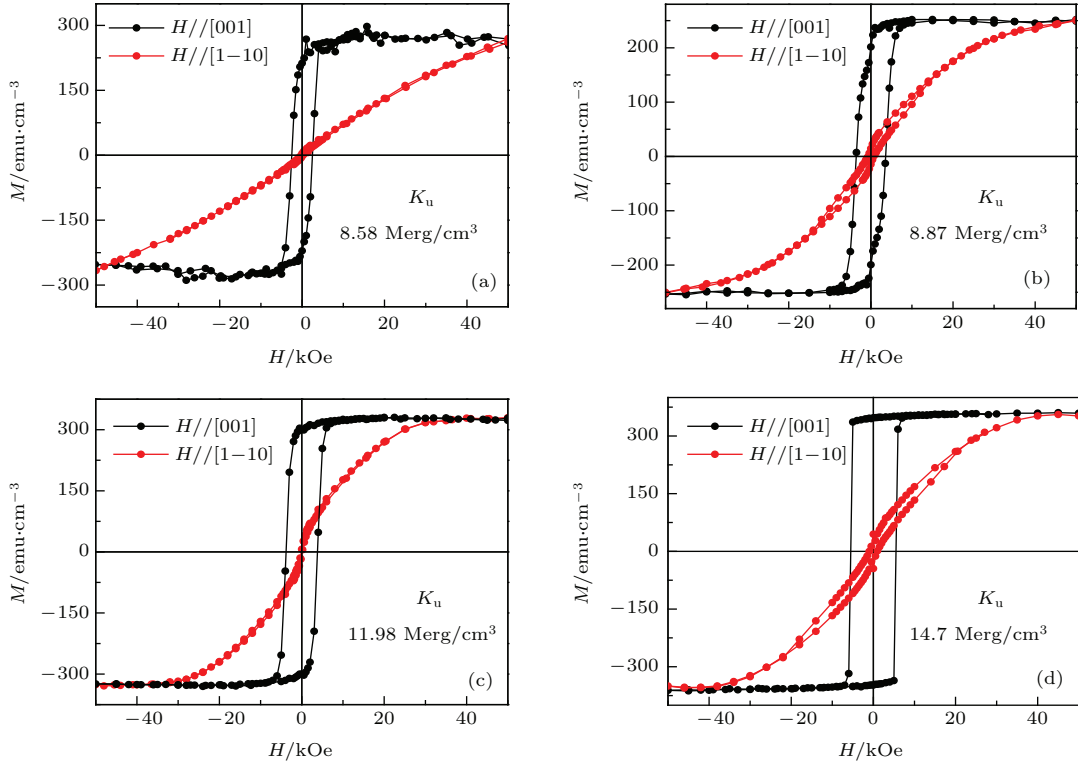


图 3 (网刊彩色) 不同厚度 $L1_0-Mn_{1.67}Ga$ 薄膜的面内 (红色圆点) 及面外 (黑色圆点) 磁滞回线, 其中 $L1_0-Mn_{1.67}Ga$ 薄膜的厚度分别为 2 nm (a), 3 nm (b), 4 nm (c), 5 nm (d)

Fig. 3. (color online) In-plane (red dots) and out-of-plane (black dots) $M-H$ loops for $Al/L1_0-MnGa/GaAs$ with thickness t_{MnGa} (a) 2 nm, (b) 3 nm, (c) 4 nm and (d) 5 nm.

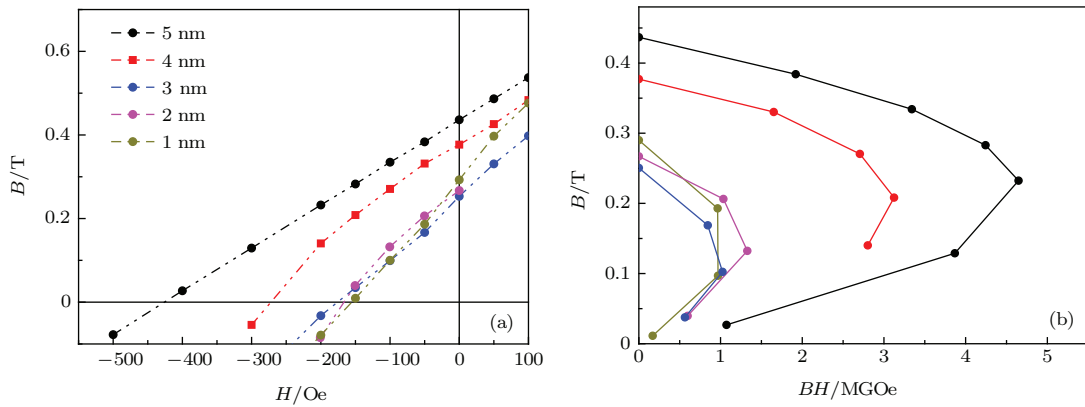


图 4 (网刊彩色) 不同厚度 $L1_0-Mn_{1.67}Ga$ 样品的线性退磁曲线 (a) 及磁能积 (b)

Fig. 4. (color online) (a) Linear demagnetization curve, (b) $B-H$ curve for $L1_0-Mn_{1.67}Ga$ films with different MnGa thickness.

图4给出了不同厚度 $L1_0$ - $Mn_{1.67}Ga$ 样品的退磁曲线以及磁能积(BH)曲线,可以看出厚度为5 nm的 $L1_0$ - $Mn_{1.67}Ga$ 薄膜具有非常好的线性退磁曲线以及很高的最大磁能积4.66 MGOe,说明即使是超薄的 $L1_0$ - $Mn_{1.67}Ga$ 薄膜也有类似于较厚 $L1_0$ - $Mn_{1.5}Ga$ 薄膜一样的高磁能积^[6].考虑到其不含任何的贵金属及稀土元素,这使得 $L1_0$ - $Mn_{1.67}Ga$ 薄膜成为极具竞争力的永磁体备选材料.

4 结 论

利用双生长室分子束外延设备在GaAs (001)单晶衬底上制备出厚度为1—5 nm的超薄 $L1_0$ - $Mn_{1.67}Ga$ 薄膜.生长过程中反射式高能电子衍射原位检测以及X射线衍射结果均表明了其良好的外延单晶结构.同时,所有 $L1_0$ - $Mn_{1.67}Ga$ 薄膜均具有超高的垂直磁各向异性,5 nm的 $L1_0$ - $Mn_{1.67}Ga$ 薄膜的垂直磁各向异性可以达到14.7 Merg/cm³,这对基于 $L1_0$ - $MnGa$ 的p-MTJs在STT-MRAM等低功耗自旋功能器件的应用具有重要的意义.

参考文献

- [1] Nie S H, Zhu L J, Pan D, Lu J, Zhao J H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 178103 (in Chinese) [聂帅华, 朱礼军, 潘东, 鲁军, 赵建华 2013 物理学报 **62** 178103]
- [2] Wang H, Yang F J, Xue S X, Cao X, Wang J A, Gu H S, Zhao Z Q 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1415 (in Chinese) [王浩, 杨傅军, 薛双喜, 曹歆, 王君安, 顾豪爽, 赵子强 2005 物理学报 **54** 1415]
- [3] Mizukami S, Kubota T, Wu F, Zhang X, Miyazaki T, Naganuma H, Oogane M, Sakuma A, Ando Y 2012 *Phys. Rev. B* **85** 014416
- [4] Zhu Y, Cai J W 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 393 (in Chinese) [竺云, 蔡建旺 2005 物理学报 **54** 393]
- [5] Balke B, Fecher G H, Winterlik J, Felser C 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 152504
- [6] Zhu L J, Nie S H, Meng K K, Pan D, Zhao J H, Zheng H Z 2012 *Adv. Mater.* **24** 4547
- [7] Wu F, Mizukami S, Watanabe D, Naganuma H, Oogane M, Ando Y, Miyazaki T 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 122503
- [8] Mizukami S, Wu F, Sakuma A, Walowski J, Watanabe D, Kubota T, Zhang X, Naganuma H, Oogane M, Ando Y, Miyazaki T 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 117201
- [9] Winterlik J, Balke B, Fecher G H, Felser C, Alves M C M, Bernardi F, Morais J 2008 *Phys. Rev. B* **77** 054406
- [10] Bai Z Q, Cai Y Q, Shen L, Yang M, Ko V, Han G C, Feng Y P 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 022408
- [11] Datta S, Das B 1990 *Appl. Phys. Lett.* **56** 665
- [12] Hyun Cheol Koo J H K, Eom J, Chang J, Han S H, Johnson M 2009 *Science* **325** 1515
- [13] Jörg Wunderlich B G P, Irvine A C, Zárbo L P, Rozkotová E, Nemeč P, Novák V, Sinova J, Jungwirth T 2010 *Science* **330** 1801
- [14] Kohda M, Kita T, Ohno Y, Matsukura F, Ohno H 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 012103
- [15] Ohno Y, Young D K, Beschoten B, Matsukura F, Ohno H, Awschalom D D 1999 *Nature* **402** 790
- [16] Lou X H, Ademann C, Crooker S A, Garlid E S, Zhang J J, Madhukar Reddy K S, Flexner S D, Palmström C J, Crowell P A 2007 *Nature Phys.* **3** 197
- [17] Ma Q L, Mizukami S, Kubota T, Zhang X M, Ando Y, Miyazaki T 2014 *Phys. Rev. Lett.* **112** 157202
- [18] Mangin S, Ravelosona D, Katine J A, Carey M J, Terris B D, Fullerton E E 2006 *Nature Mater.* **5** 210
- [19] Ikeda S, Miura K, Yamamoto H, Mizunuma K, Gan H D, Endo M, Kanai S, Hayakawa J, Matsukura F, Ohno H 2010 *Nature Mater.* **9** 721
- [20] Mancoff F B, Dunn J H, Clemens B M, White R L 2000 *Appl. Phys. Lett.* **77** 1879
- [21] Houssameddine D, Ebels U, Delaet B, Rodmacq B, Frastra I, Ponthenier F, Brunet M, Thirion C, Michel J P, Prejbeanu-Buda L, Cyrille M C, Redon O, Dieny B 2007 *Nature Mater.* **6** 441
- [22] Sun J Z 2000 *Phys. Rev. B* **62** 570
- [23] Krishnan K M 1992 *Appl. Phys. Lett.* **61** 2365
- [24] Wu F, Mizukami S, Watanabe D, Sajitha E P, Naganuma H, Oogane M, Ando Y, Miyazaki T 2010 *IEEE Trans. Magn.* **46** 1863
- [25] Köhler A, Knez I, Ebke D, Felser C, Parkin S S P 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 162406
- [26] Zheng Y H, Han G C, Lu H, Teo K L 2014 *J. Appl. Phys.* **115** 043902
- [27] Suzuki K Z, Ranjbar R, Sugihara A, Miyazaki T, Mizukami S 2016 *Jpn. J. Appl. Phys.* **55** 010305
- [28] Tanaka M, Harbison J P, Sands T, Philips B, Cheeks T L, de Boeck J, Florez L T, Keramidias V G 1993 *Appl. Phys. Lett.* **63** 696
- [29] Huh Y, Kharel P, Shah V R, Li X Z, Skomski R, Sellmyer D J 2013 *J. Appl. Phys.* **114** 013906

Perpendicular magnetic properties of ultrathin $L1_0$ -Mn_{1.67}Ga films grown by molecular-beam epitaxy*

Xiao Jia-Xing Lu Jun[†] Zhu Li-Jun Zhao Jian-Hua[‡]

(State Key Laboratory of Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

(Received 23 January 2016; revised manuscript received 1 March 2016)

Abstract

Materials with large perpendicular magnetic anisotropies (PMAs) have drawn great attention because of their potential applications in advanced spintronic devices such as spin-transfer-torque magnetic random access memory (STT-MRAM) and ultrahigh-density perpendicular magnetic recording. To date, a large variety of PMA materials have been investigated, such as $L1_0$ -ordered FePt, CoPt granular films, Co/(Pt,Pd,Ni) multilayers, ultra-thin CoFeB alloys and perpendicularly magnetized Co₂FeAl films. Among the various kinds of materials with PMA, MnGa film with $L1_0$ -structure has received the most attention because it has large PMA ($K_u \sim 10^7$ erg/cm³), ultralow Gilbert damping constant (0.008) and theoretically predicted high spin polarization (more than 70%). All these properties make $L1_0$ -ordered MnGa a good candidate for spintronic devices such as STT-MRAM and spin-torque oscillators. Meanwhile, from the viewpoint of STT related spintronic device, it is necessary to fabricate ultrathin perpendicularly magnetized $L1_0$ -Mn_xGa films to lower the critical current for magnetization reversal. However, up to now, in the main researches the ultrathin $L1_0$ -Mn_xGa films have been grown on MgO substrates, which makes it difficult to integrate the MnGa-based magnetic tunnel junctions into the semiconductor manufacturing process.

In this work, ultrathin $L1_0$ -Mn_{1.67}Ga films with different thickness values (1–5 nm) are grown on traditional GaAs (001) substrates by a molecule-beam epitaxy system. During the deposition, *in situ* streaky surface reconstruction patterns are observed from reflection high-energy electron diffraction, which implies high crystalline quality of the $L1_0$ -Mn_{1.67}Ga film. Only MnGa superlattice (001) and MnGa fundamental (002) peaks can be observed in the X-ray diffraction patterns in a range from 20° to 70°, which means that the $L1_0$ -Mn_{1.67}Ga film is a good single-crystalline with c-axis along the normal direction. The magnetic properties of these films are measured by superconductor quantum interference device magnetometer in a field range of ±5 T. The perpendicular M - H curves are almost square, while the in-plane curves are nearly hysteresis-free, each with a remnant magnetization (M_r) of around zero, which clearly evidences the PMA of the ultrathin $L1_0$ -Mn_{1.67}Ga film. Moreover, as the thickness of $L1_0$ -Mn_{1.67}Ga film decreases from 5 nm to 1 nm, the ratio of M_r/M_s also decreases from 1 to 0.72, which indicates that the PMA loses as thickness decreases. We also estimate the perpendicular anisotropy constant (K_u) from the relation $K_u = K^{\text{eff}} + 2\pi M_s^2$, and the maximum K_u of 14.7 Merg/cm³ is obtained for the 5 nm MnGa film. Although the K_u decreases with thickness decreasing, a K_u value of 8.58 Merg/cm³ is observed in a 2 nm thick film. The obtained results are important for developing the $L1_0$ -MnGa-based spin-transfer torque Gbit class magnetic random access memory.

Keywords: molecular-beam epitaxy, spintronics, magnetic anisotropy, ultrathin films

PACS: 81.15.Hi, 85.75.-d, 75.30.Gw, 68.37.-d

DOI: 10.7498/aps.65.118105

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2014AA032904), the National Basic Research Program of China (Grant No. 2015CB921500) and the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61334006, 11304307).

† Corresponding author. E-mail: lujun@semi.ac.cn;

‡ Corresponding author. E-mail: jhzhao@red.semi.ac.cn