

一种数据非易失性、多功能和可编程的自旋逻辑研究进展

韩秀峰 万蔡华

Recent progress of nonvolatile, multifunctional and programmable spin logic

Han Xiu-Feng Wan Cai-Hua

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 127201 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180906

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180906>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I12>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

新型 4d/5d 基超导体的结构和物性

Crystal structures and physical properties of novel 4d/5d based superconductors

物理学报.2018, 67(12): 127101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180767>

外加电场和 Al 组分对纤锌矿 AlGaN/GaN 量子阱中的电子 g 因子的影响

Effects of external electric field and Al content on g factor of wurtzite AlGaN/GaN quantum wells

物理学报.2018, 67(5): 057101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172213>

Al_{0.6}Ga_{0.4}N/GaN/Al_{0.3}Ga_{0.7}N/Al_{0.6}Ga_{0.4}N 量子阱中的 Rashba 自旋劈裂

Rashba spin splitting in the Al_{0.6}Ga_{0.4}N/GaN/Al_{0.3}Ga_{0.7}N/Al_{0.6}Ga_{0.4}N quantum well

物理学报.2016, 65(9): 097101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.097101>

强自旋轨道耦合化合物 Sr_{2-x}La_xIrO₄ 的掺杂和拉曼谱学

Doping and Raman scattering of strong spin-orbit-coupling compound Sr_{2-x}La_xIrO₄

物理学报.2015, 64(20): 207103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.207103>

金属表面 Rashba 自旋轨道耦合作用研究进展

Recent progress in Rashba spin orbit coupling on metal surface

物理学报.2015, 64(18): 187103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.187103>

一种数据非易失性、多功能和可编程的 自旋逻辑研究进展*

韩秀峰^{1)2)†} 万蔡华¹⁾²⁾

1)(中国科学院物理研究所, 北京凝聚态物理国家研究中心, 北京 100190)

2)(中国科学院大学物理科学学院, 北京 100049)

(2018年5月7日收到; 2018年5月14日收到修改稿)

自旋(磁)逻辑器件具有数据非易失性、CMOS电路兼容性、操作速度快等优点, 是开发计算存储相融合的非冯·诺依曼计算机架构的理想候选方案之一. 本文进一步演示基于自旋霍尔效应的自旋逻辑方案. 利用自旋霍尔效应不仅能够实现基本的布尔逻辑功能和数据存储功能, 还可以利用自旋轨道力矩磁矩翻转的对称性要求、偏置磁场要求等, 进一步实现自旋逻辑器件的可编程和多功能特性. 利用这些特点, 同一自旋霍尔逻辑器件可以实现“与”、“或”、“非”、“与非”、“或非”等功能. 因为这些特性, 基于自旋霍尔效应的自旋逻辑单元有望成为后续自旋逻辑器件和电路的核心器件, 推动后者的持续开发与广泛应用.

关键词: 自旋逻辑, 自旋霍尔效应, 可编程逻辑, 数据非易失性

PACS: 72.25.Ba, 75.47.-m, 77.80.Fm, 85.75.-d

DOI: 10.7498/aps.67.20180906

1 引言

在当今大数据时代, 每天产生超过2万亿字节的新数据. 这些海量数据在给人们带来前所未有的机遇和便利的同时, 也对数据的处理能力提出了严峻的挑战. 现代计算机处理数据的能力几乎完全取决于其中的逻辑单元, 而传统的解决方案, 即通过缩小逻辑单元的尺寸来提高器件的集成密度, 由于物理上和微加工工艺上的限制已经趋近于改进和提升的极限. 为此, 凝聚态物理、微电子和材料科学领域的工作者都在积极寻找可能替代现有晶体管的功能更强大的新型逻辑单元器件. 研制自旋逻辑(磁逻辑)器件就是其中一种非常有发展前景的候选方案之一.

磁信息存储与处理器件所具有的数据非易失性是实现“存储处理一体化”架构的理想内禀属性.

该架构可以克服现有计算机冯·诺依曼模式的瓶颈限制, 可以在很大程度上提高数据的处理效率. 基于磁性材料及其工作机理, 人们先后提出了多种方案, 包括: 基于单势垒磁性隧道结的磁场驱动型磁逻辑单元结构^[1]; 基于磁性量子点的磁场驱动型点格自动机磁逻辑^[2]; 基于磁畴壁运动的磁场驱动型磁逻辑^[3]; 基于自旋波传播的逻辑^[4]; 以及基于半导体的磁场驱动型逻辑^[5]等, 其中一些设计已经在实验上得到演示. 然而, 这些方案都很难与现有的互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)架构和磁随机存储器(magnetic random access memory, MRAM)相兼容, 并且无法与现有的半导体逻辑器件各项综合性能指标相比拟, 因而限制了其进一步的发展与应用. 另一方面, 除了减小逻辑单元的尺寸之外, 增加计算机速度的另一个可行方案是让单一逻辑单元可编程地实现多种逻辑功能, 而这对于现有的硅

* 国家重点研发计划(批准号: 2017YFA0206200)、国家重大科学仪器设备开发专项(批准号: 2011YQ120053)、国家自然科学基金(批准号: 11434014, 51620105004, 11674373)、中国科学院战略性先导科技专项(B类)(批准号: XDB07030200)、中国科学院国际合作项目(批准号: 112111KYSB20170090)和中国科学院前沿科学重点研究项目(批准号: QYZDJ-SSWSLH016)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xfhan@iphy.ac.cn

基逻辑器件是很难同时做到的. 因此, 一个关键科学问题是: 能否找到一种磁性逻辑单元, 使之既能结合数据非易失性和多功能特性, 同时又能兼容现有的 CMOS 架构和新型 MRAM.

基于磁性隧道结的磁逻辑器件, 恰好能满足 CMOS, MRAM 兼容性以及多功能可编程性的要求. 基于磁性隧道结的磁逻辑方案也经历了两代器件设计原理的发展. 第一种基于磁性隧道结单元和磁场驱动的设计方案是 Ney 等^[1]2003 年提出, 他们设想利用磁场进行逻辑处理, 并利用隧道结的高低阻态来实现数据读取. 通过不同的电流布线的安排, 该方案原理上可以实现可编程性, 但是因为驱动场是电流诱导的外加磁场, 功耗会很高, 且结构复杂, 因而很难具有实际操作和应用的. 第二种方案是将驱动方式变成自旋转移力矩^[6,7]. 相对于第一种磁场驱动方案而言, 它的优势是功耗可大幅降低且结构相对简单, 但因为脉冲驱动电流对隧道结存在潜在的损伤作用, 它的使用频次和寿命会受到限制. 因此, 如何开发低功耗、高速度、可近无限次读写的可编程多功能自旋逻辑器件, 成为自旋电子学领域, 特别是自旋逻辑研究领域的国际前沿难点课题.

自旋轨道力矩效应的发现^[8-10]使构造上述多功能可编程自旋逻辑器件成为可能. 首先自旋轨道力矩效应赋予电流高效操控磁矩的能力; 其次产生自旋轨道力矩的电流无需通过构造磁存储单元和自旋逻辑单元的磁性隧道结, 这极大地降低了磁性隧道结被击穿的风险, 从而保证了逻辑器件所需的极高可操作次数; 最后自旋轨道力矩对磁矩的翻转作用可受外界条件, 如偏置磁场、电场、电流的控制, 这为自旋逻辑器件的多功能化和可编程操作提供了丰富的实现手段. 基于这些潜在的优势, 我们开展了自旋轨道力矩在自旋逻辑器件方面的探索性研究工作.

2 自旋霍尔逻辑设计方案和器件实验

首先优化了两个磁性隧道结常用的垂直薄膜体系 Pt/Co/MgO 和 Ta/CoFeB/MgO, 然后利用紫外曝光技术和后续离子束刻蚀工艺, 将上述两种典型的磁性异质结构加工成十字状的霍尔条器件(图 1(a)). 随后利用锁相技术, 通过在霍尔条两路径同时施加脉冲电流的方式, 标定了这两个

体系的自旋轨道力矩产生效率、自旋轨道力矩的来源以及类场项 (field-like torque) 和类阻尼项力矩 (damping-like torque) 对磁矩翻转作用的影响(图 1(b)—(e)), 并利用宏自旋模型定性地解释了实验结果, 为后续自旋逻辑单元的研制阐明了工作原理^[11]. 同时, 利用反铁磁材料的交换偏置效应, 还能实现在零磁场条件下电流驱动的磁矩翻转^[12].

Zhang 等^[11]的研究结果已经显示, 在 Pt/Co/MgO 体系中, 类阻尼项远大于类场项, 而在 Ta/CoFeB/MgO 体系中这两类力矩项的大小可比拟. 在图 1 中, 因为 Pt/Co/MgO 体系的类场项可忽略, 因此偏置电流 (bias current) 对临界翻转电流 (I_C) 的影响是关于偏置电流偶对称的: 即无论偏置电流的极性是正或负, 偏置电流的增加均导致临界翻转电流的降低(图 1(b) 和图 1(c)). 但是对于类场项不能忽略的 Ta/CoFeB/MgO 体系, 偏置电流只有在极性合适的条件下, 才能显著降低临界翻转电流密度的大小(图 1(d) 和图 1(e)), 如当 $H_y = +100$ Oe 时, 正偏置电流才能显著降低 I_C .

之后, 进一步利用这种结构, 我们在实验上实现了两种基于自旋霍尔效应的电流驱动的自旋逻辑单元, 分别是“+”字型 and “×”字型自旋逻辑器件. 分类标准取决于偏置磁场与霍尔条电流支路的相对取向: “+”字型、“×”字型自旋逻辑器件分别对应磁场平行于电流支路、磁场与电流支路成 45° 配置的情形.

在第一种“+”字型自旋逻辑方案中, 两路脉冲电流作为两个逻辑输入端, 施加到霍尔条的同一支上. 不同大小的电流 24 mA 和 42 mA 分别作为 0 和 1 的逻辑输入. 一个磁场施加在与脉冲操作电流平行或反平行的方向上(图 2(a)). 逻辑输出取决于脉冲操作电流如何驱动磁性层垂直磁化状态的改变, 并由反常霍尔电阻 (R_{xy}) 给出, 大于和小于 $200 \text{ m}\Omega$ 的反常霍尔电阻分别对应 1 和 0 的逻辑输出. 根据体系在不同大小和方向的一个磁场下, 两路脉冲操作电流驱动磁性层垂直磁化状态翻转的响应行为, 在一个逻辑单元中可以实现五种逻辑功能 (“与”、“或”、“非”、“与非”和 “或非”) (图 2(b)—(f)). 通过改变磁场的大小和方向以及磁性层的初始磁化状态, 一个逻辑单元可以通过脉冲操作电流驱动磁性层垂直磁化状态的变化, 可在不同的逻辑功能之间实现切换, 从而实现可编程性^[13].

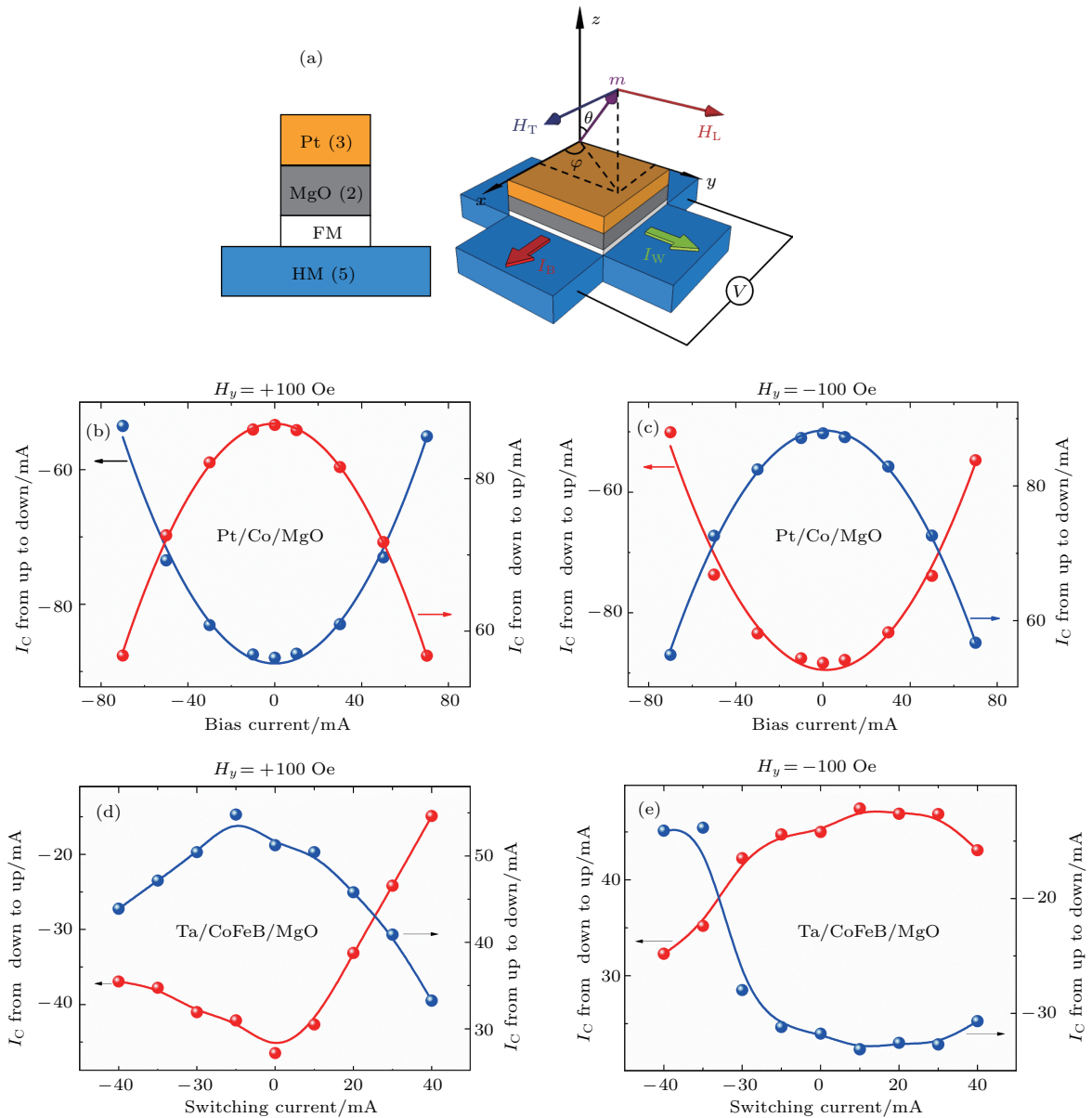


图1 (a) 样品和测量布置示意图, 其中FM代表磁性层, HM代表重金属层; (b)–(e) 临界翻转电流随偏置电流的依赖关系, 其中Pt/Co/MgO体系, 测试磁场为(b) $H_y = +100$ Oe (1 Oe = 79.5775 A/m) 和(c) $H_y = -100$ Oe; Ta/CoFeB/MgO体系, 测试磁场为(d) $H_y = +100$ Oe和(e) $H_y = -100$ Oe^[11]

Fig. 1. (a) Schematic diagram for the Hall devices and corresponding measurement setup; FM and HM are short for ferromagnetic layer and heavy metal layer, respectively; (b) and (c) bias current dependence of critical switching current at $H_y = +100$ Oe and -100 Oe, respectively, for Pt/Co/MgO system; (d) and (e) bias current dependence of the critical switching current at $H_y = +100$ Oe and -100 Oe, respectively, for Ta/CoFeB/MgO system^[11].

具体而言, 当 $H_x = 500$ Oe 时, 体系的临界翻转电流密度为 76 mA. 该逻辑单元处于“与”的逻辑状态. 在逻辑操作前, 先通过 $I_A = I_B = -42$ mA, 将磁矩初始磁化到“向下”的状态 (霍尔电阻小于 200 mΩ), 此时逻辑单元处于“0”的逻辑初始态. 在后续的逻辑操作过程中, 当 $I_A = I_B = 24$ mA 时 (对应于 $A = 0$ 和 $B = 0$ 的逻辑输入), $I_A + I_B < 76$ mA, 电流不足以将磁矩翻转到“向上”的状态. 因此当逻辑操作结束后, 磁矩依然

处于“向下”的状态, 逻辑输出“0”. 另外两种情况 $I_A = 24$ mA, $I_B = 42$ mA ($A = 0, B = 1$) 和 $I_A = 42$ mA, $I_B = 24$ mA ($A = 1, B = 0$) 的条件下, 器件将得到类似的逻辑输出“0”. 只有当 $I_A = I_B = 42$ mA 时 (对应于 $A = 1$ 和 $B = 1$ 的逻辑输入), $I_A + I_B > 76$ mA, 磁矩才能被翻转至“向上”的状态, 最终使得逻辑输出变成“1”. 因此这些磁矩翻转的规则, 在 $H_x = 500$ Oe 的条件下, 满足逻辑“与”门的要求 (图 2 (b)).

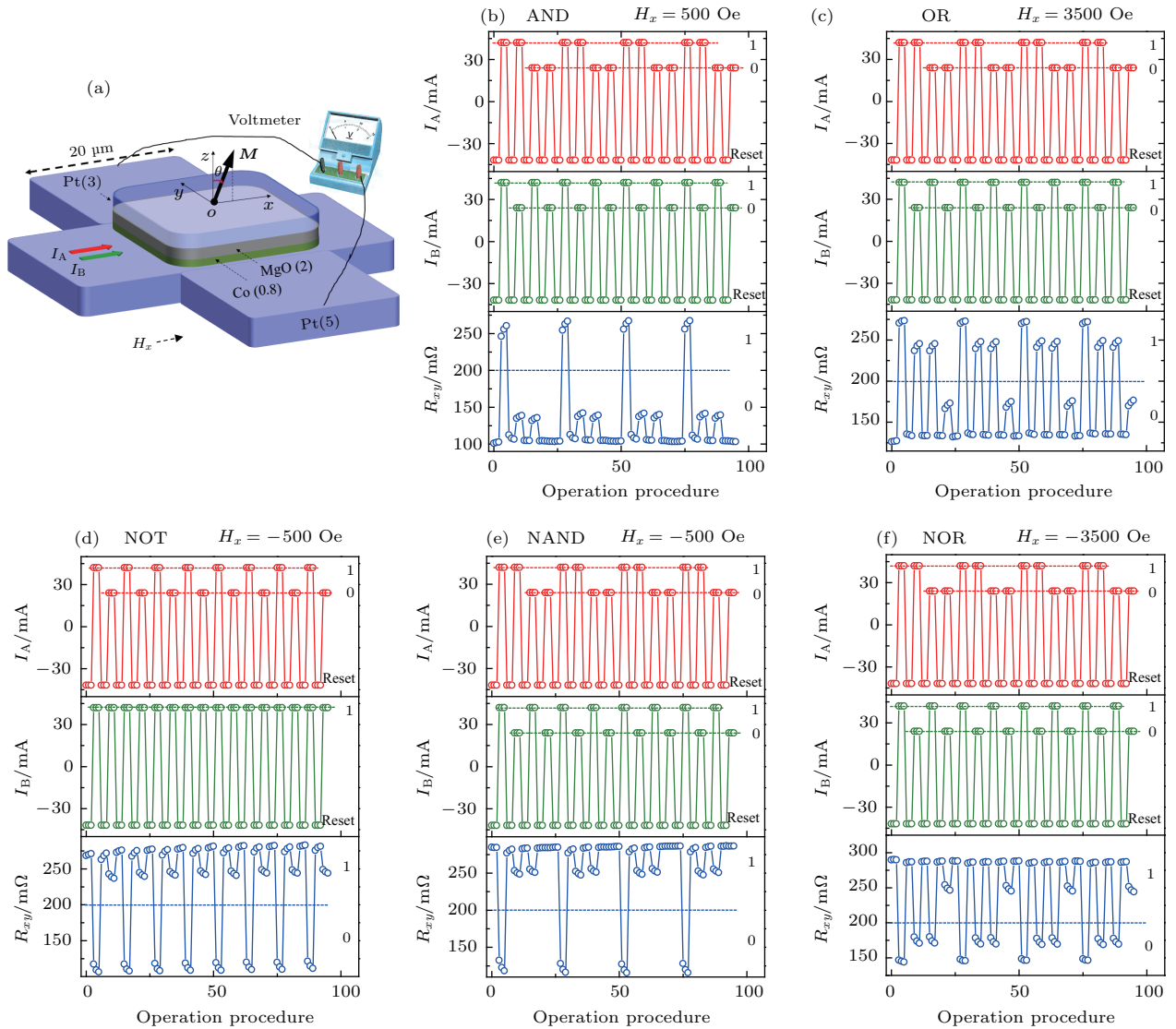


图2 (a) 第一种“+”字型自旋逻辑器件和测量布置示意图; 逻辑单元测试: (b) 与门; (c) 或门; (d) 非门; (e) 与非门; (f) 或非门^[13]
 Fig. 2. (a) Schematic diagram and its measurement setup for a “+” type spin logic device; (b) “AND”, (c) “OR”, (d) “NOT”, (e) “NAND” and (f) “NOR” gate realized by the “+” type spin logic device^[13].

当 $H_x = 3500\ \text{Oe}$ 时, 器件的临界翻转电流密度降低至 $60\ \text{mA}$. 此时, 唯有当 $I_A = I_B = 24\ \text{mA}$ 时 (对应于 $A=0$ 和 $B=0$ 的逻辑输入), 磁矩才能维持“向下”的状态, 输出逻辑“0”; 在其他三种情况下 $I_A + I_B$ 等于 $66\ \text{mA}$ 或者 $84\ \text{mA}$, 均大于 $60\ \text{mA}$, 因此磁矩将被翻转到“向上”的状态, 实现逻辑“1”的输出. 此时, 器件以“或”门的方式工作 (图 2(c)).

当磁场方向反向, 如从正变负, 根据自旋轨道力矩效应的特点, 电流翻转磁矩作用的方向也会发生逆转, 如文献 [12] 图 2 所示, 因此磁场的反向相当于一个额外的求逆操作. 此时和“与”门、“或”门完全相同的操作步骤, 将会导致截然相反的逻辑输出. “与”门变成“与非”门; “或”门变成“或非”门, 如图 2(e) 和图 2(f) 所示. 基于自旋霍尔效应的自

旋逻辑器件, 其优点在这个范例中得到淋漓尽致的体现: 自旋逻辑器件的可编程性可通过对自旋轨道力矩翻转作用的调控来获得.

在第二种“ \times ”字型自旋逻辑方案中, 作为逻辑输入的两路大小相等的脉冲电流分别施加到霍尔条相互正交的两臂上, 脉冲电流的 $+55\ \text{mA}$ 和 $-55\ \text{mA}$ 分别作为逻辑输入的 1 和 0, 自旋“向上”和“向下”分别作为逻辑输出 1 和 0, 一个磁场施加在两臂的角平分线上, 与电流支路成 45° 配置 (图 3(a)). 根据该自旋逻辑单元在不同方向磁场下, 对两路脉冲操作电流驱动磁性层垂直磁化状态变化的响应行为, 同样可以在逻辑单元中实现“与”、“或”、“非”、“与非”和“或非”这五种常见的逻辑功能, 并且通过改变偏置磁场的施加方向和系

统的初态, 还可实现该自旋逻辑器件的可编程性 (图 3 (b)—图 3 (f)).

该器件的自旋轨道力矩的磁矩翻转曲线如文献 [14] 中的图 2 所示. 针对“或”门而言, 首先利用 $I_A = I_B = +55$ mA 初始化磁矩. 此时偏置磁场 $H = 1200$ Oe. 因为两路电流密度的矢量合成方向与偏置磁场方向平行, 此时电流诱导的自旋轨道力矩可以将磁矩初始化到“向上”的状态, 使得初始逻辑状态为“1”. 当 $A = B = 1$ 时, 磁矩维持初始“向上”的“1”状态. 当 $A = 0, B = 1$ 或 $A = 1, B = 0$ 时, A, B 两路输入电流密度的合成方向与偏置磁场垂直. 此时, 电流产生的自旋轨道力矩不满足翻转磁矩所需的对称性要求, 因此磁矩不发生翻转. 磁矩依然维持在其初始“向上”的状态. 上述三种情况, 器件均输出逻辑“1”. 唯有当 $A = B = 0$, 或

者两路电流均沿 x 轴和 y 轴的负方向时, 合成的电流密度反平行于偏置磁场, 此时磁矩才能够从自旋“向上”的状态翻转至“向下”的状态, 从而逻辑输出“0”.

“与”门的实现与“或”门类似, 同样施加 $H = 1200$ Oe 的偏置磁场. 不过此时磁矩需要利用 $I_A = I_B = -55$ mA 的条件被初始化到“向下”的状态. 器件被初始化到“0”的状态. 当 $A = B = 0$ 或者 $A = 1, B = 0$ 或者 $A = 0, B = 1$ 时, 磁矩不发生翻转, 器件维持“0”的状态. 只有当 $A = B = 1$ 时, 合成电流方向与偏置磁场平行, 磁矩能够从“向下”翻转到“向上”的状态, 从而输出逻辑“1”. 此时的磁矩翻转特性刚好可以模拟逻辑“与”门的逻辑输入输出特点.

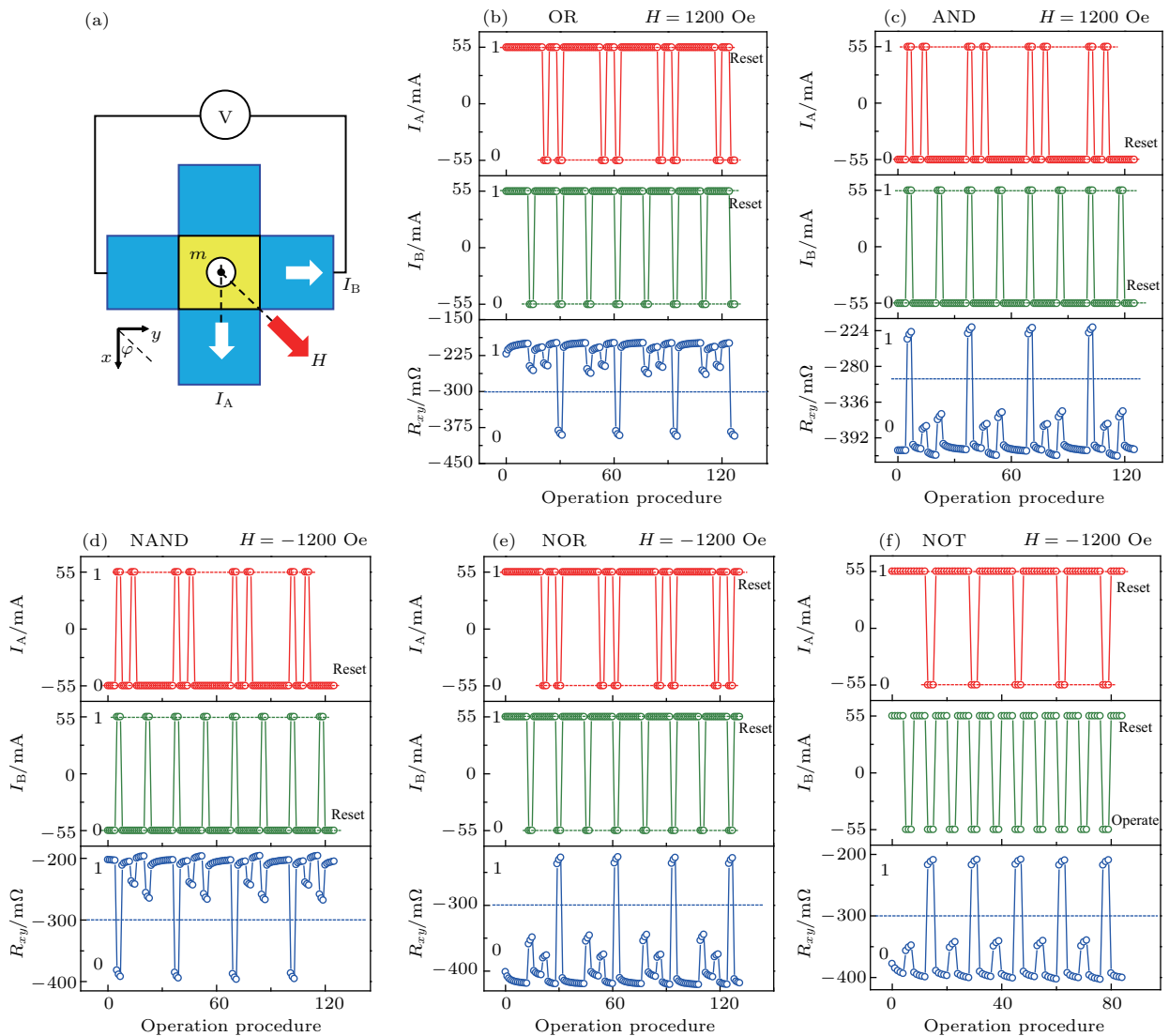


图 3 (a) 第二种“×”字型自旋逻辑器件和测量布置示意图; 逻辑单元测试: (b) 或门; (c) 与门; (d) 与非门; (e) 或非门; (f) 非门 [14]
 Fig. 3. (a) Schematic diagram and its measurement setup for a “×” type spin logic device; (b) “OR”, (c) “AND”, (d) “NAND”, (e) “NOR” and (f) “NOT” gate realized by the “×” type spin logic device [14].

表1 两种不同自旋逻辑方案的异同点对照表
Table 1. Comparison between two different spin logic devices.

类型	物理原理	逻辑实现原理	逻辑操作种类	特点
“+”字型	自旋霍尔效应	外加磁场调控临界翻转电流密度的大小	“与”、“或”、“非”、“与非”、“或非”	利用“多数门”原理、结构简单
“×”字型	自旋霍尔效应	自旋轨道力矩翻转所需的对称性要求	“与”、“或”、“非”、“与非”、“或非”	利用阵列结构, 易于扩展

与“+”字型自旋逻辑方案类似, 在“×”字型自旋逻辑器件中, 磁场的反向也相当于求逆操作, 因此当偏置磁场变成 -1200 Oe时, 和“与”门、“或”门类似的逻辑操作刚好可以给出“与非”门和“或非”门的逻辑输出规则, 从而实现不同逻辑门的可编程操作。

值得指出的是, 在第二种“×”字型自旋逻辑方案中, 我们利用了自旋霍尔效应翻转磁矩的对称性要求. 存储在逻辑单元的信息受到这种对称性保护, 使得单一的脉冲电流输入无法改变逻辑单元的状态. 一方面, 这使信息的逻辑运算处理和存储可靠性大大增加; 另一方面, 这个特性使得这种逻辑单元可以很方便地拓展成为可编程的逻辑阵列. 在这种逻辑阵列中, 逻辑单元可以被精确操控, 即只有两路脉冲电流都不为零的单元可以被逻辑(写入)操作, 其余的单元保持不变. 这种逻辑操作方案非常有利于自旋逻辑单元的阵列化。

两种自旋逻辑器件的特点如表1所列. 这两种自旋逻辑方案的实现均可为未来进一步实现16种布尔逻辑运算和更复杂的逻辑运算功能奠定原型器件设计和器件物理基础。

3 结论与展望

上述两种试验方案均已实现了数据的非易失性存储和单个逻辑单元的多功能可编程逻辑操作. 实现的逻辑操作包括“与”、“或”、“非”、“与非”和“或非”门. 同时器件的功耗还需要通过进一步寻找具有大自旋霍尔角的材料以及缩小器件尺寸来降低. 该器件在实际应用中, 不易通过反常霍尔电阻进行数据读出或级联, 因此还需要进一步通过磁性隧道结较大的隧穿磁电阻效应进行相关逻辑运算与存储操作, 以使该器件易于与现有CMOS电路和MRAM相兼容. 更重要的是, 现在展示的自旋逻辑器件还需要外加偏置磁场的辅助, 才能进行逻辑运算和可编程操作. 我们已经尝试了利用交换偏置^[12]或者交换耦合效应^[15]来替代外加偏置磁场, 从而可以构造出无需外加磁场辅助的新型自旋逻辑

器件, 并且通过合适的交换耦合磁性结构设计和自旋逻辑器件结构设计, 同样可以实现多功能和可编程的逻辑操作^[15].

上面两种方案均需一个外加偏置磁场来辅助实现布尔逻辑功能. 该偏置磁场也可利用层间交换耦合(interlayer exchange coupling, IEC)磁场替换, 如图4(a)所示. 这种结构包括面内各向异性磁化层(FM1)、间隔交换耦合层(IEC layer)、垂直各向异性磁化层(FM2)和两层由重金属构成的种子层(seed layer)和覆盖层(capping layer). 通过IEC, FM1会对FM2施加一个沿 x 方向的面内交换耦合场. 此时施加 x 方向的电流, 利用覆盖层对FM2的自旋轨道力矩, 便可以实现零外加磁场下的垂直磁矩翻转. 有意思的是, 当沿 y 方向施加电流时, 面内磁化层FM1也能感受到种子层的自旋轨道力矩而发生翻转. 通过控制FM1层的磁矩方向, Wang等^[15]可以控制FM2层所感受到的有效场的方向, 从而实现自旋霍尔逻辑器件的可编程性。

具体而言, 先沿 $-y$ 方向施加偏置电流 I_{Bias} , 使FM1磁矩朝左. 然后如“+”字型自旋逻辑器件原理——多数门原理, 沿 x 方向同时施加 I_A 和 I_B 作为逻辑输入, 控制FM2的磁矩方向, “向上”和“向下”分别对应逻辑输出1和0. 模拟结果如图4(b)所示, 满足“与”门的要求。

如果预先沿 $+y$ 方向施加 I_{Bias} , 使FM1磁矩朝右, 则FM2层感受到的面内有效场反向. 和上述“与”门完全相同的逻辑操作将产生“与非”门的效果. 通过控制FM1层的磁矩方向, 便可以实现“与”门和“与非”门的可编程操作. 关键是, 上述操作全在零磁场条件下完成, 已经接近自旋逻辑器件实际应用的场景。

综上所述, 基于纳米磁异质结构的自旋逻辑器件, 易于与现有的CMOS架构和MRAM器件相兼容, 具有低功耗、高速、操作次数近无限的优势, 它还具备丰富的功能和可编程操作的特性, 因此具有重要的科学和应用价值, 为发展计算-存储融合的新型计算架构提供了一种优良的备选方案。

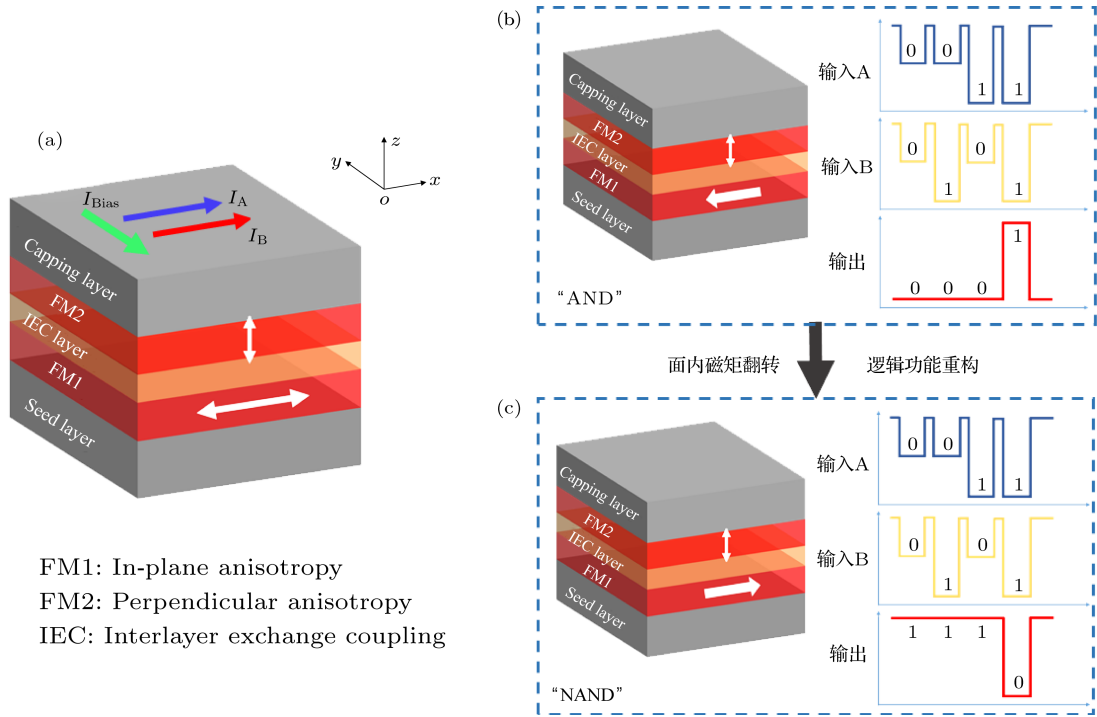


图4 基于IEC系统的自旋霍尔逻辑器件 (a) 薄膜结构示意图; 该器件工作在(b) “与”门和(c) “与非”门状态下的输入输出逻辑操作图; 可编程性可通过控制面内层FM1磁矩方向来实现, 而FM1层的磁矩方向由偏置电流来决定
 Fig. 4. Spin Hall logic device based on an interlayer-coupled system: (a) The stack structure of the system; (b) proposed “AND” and (c) “NAND” logic function of the device. Programmability is realized by controlling magnetization of the FM1 via bias current.

参考文献

[1] Ney A, Pampuch C, Koch R, Ploog K H 2003 *Nature* **425** 485
 [2] Imre A, Csaba G, Ji L, Orlov A, Bernstein G H, Porod W 2006 *Science* **311** 205
 [3] Allwood D A, Xiong G, Faulkner C C, Atkinson D, Petit D, Cowburn R P 2005 *Science* **309** 1688
 [4] Behin-Aein B, Datta D, Salahuddin S, Datta S 2010 *Nat. Nanotechnol.* **5** 266
 [5] Joo S J, Kim T, Shin S H, Lim J Y, Hong J, Song J D, Chang J, Lee H W, Rhie K, Han S H, Shin K H, Johnson M 2013 *Nature* **494** 72
 [6] Han X F, Wen Z C, Wang Y, Wang L, Wei H X 2008 *AAPPS Bull.* **18** 24
 [7] Yao X F, Harms J, Lyle A, Ebrahimi F, Zhang Y S, Wang J P 2012 *IEEE Trans. Nanotechnol.* **11** 120
 [8] Miron I M, Garello K, Gaudin G, Zermatten P J, Costache M V, Auffret S, Bandiera S, Rodmacq B, Schuhl A, Gambardella P 2011 *Nature* **476** 189
 [9] Liu L Q, Pai C F, Li Y, Tseng H W, Ralph D C, Buhrman R A 2012 *Science* **336** 555
 [10] Liu L Q, Lee O J, Gudmundsen T J, Ralph D C, Buhrman R A 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 096602
 [11] Zhang X, Wan C H, Yuan Z H, Zhang Q T, Wu H, Huang L, Kong W J, Fang C, Khan U, Han X F 2016 *Phys. Rev. B* **94** 174434
 [12] Kong W J, Ji Y R, Zhang X, Wu H, Zhang Q T, Yuan Z H, Wan C H, Han X F, Yu T, Fukuda K, Naganuma H, Tung M J 2016 *Appl. Phys. Lett.* **109** 132402
 [13] Wan C H, Zhang X, Yuan Z H, Fang C, Kong W J, Zhang Q T, Wu H, Khan U, Han X F 2017 *Adv. Electron. Mater.* **3** 1600282
 [14] Zhang X, Wan C H, Yuan Z H, Fang C, Kong W J, Wu H, Zhang Q T, Tao B S, Han X F 2017 *J. Magn. Magn. Mater.* **428** 401
 [15] Wang X, Wan C H, Kong W J, Zhang X, Xing Y W, Fang C, Tao B S, Yang W L, Huang L, Wu H, Irfan M, Han X F *Field-Free Programmable Spin Logics via Chirality Reversible Spin-Orbit Torque Switching* 2018 *Adv. Mater.* (Accepted)

Recent progress of nonvolatile, multifunctional and programmable spin logic*

Han Xiu-Feng^{1)2)†} Wan Cai-Hua¹⁾²⁾

1) (*Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

2) (*School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 7 May 2018; revised manuscript received 14 May 2018)

Abstract

Spin logic has advantages of nonvolatility, CMOS compatibility and fast speed, thus it has become a promising alternative solution to realizing non von Neumann computing architectures. Here in this paper we show two hopeful spin logic solutions based on spin Hall effect and spin orbit torques. First basic Boolean logic and storage functions are realized in a spin Hall logic device. Furthermore, utilizing symmetric requirements for magnetic fields and applied current, programmability of the spin logic device among 5 different Boolean logic functions, “AND”, “OR”, “NOT”, “NOR” and “NAND”, is even realized. The demonstration of programmable spin Hall logic can advance the birth and development of practical spin logic devices and circuits.

Keywords: spin logics, spin Hall effect, programmable logic, data nonvolatility

PACS: 72.25.Ba, 75.47.-m, 77.80.Fm, 85.75.-d

DOI: [10.7498/aps.67.20180906](https://doi.org/10.7498/aps.67.20180906)

* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2017YFA0206200), the Special Funds of the Major Scientific Instruments Equipment Development of China (Grant No. 2011YQ120053), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11434014, 51620105004, 11674373), the Strategic Priority Research Program (B) of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDB07030200), the International Partnership Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. 112111KYSB20170090), and the Key Research Program of Frontier Sciences, the Chinese Academy of Sciences (Grant No. QYZDJ-SSWSLH016).

† Corresponding author. E-mail: xfhan@iphy.ac.cn