

## 电流驱动下磁畴壁快速运动的研究

在 2011 年第 7 期出版的 *Physics Today* 杂志上刊登了一篇关于自旋极化电流驱动磁畴壁运动的文章,介绍了该领域的最新进展. 现对该文主要内容摘译如下:

磁体具有净磁矩,但这并不意味着所有的非配对自旋指向同一方向. 通常情况下,多个具有不同磁矩方向的磁畴同时存在,磁畴之间的过渡区称为畴壁. 畴壁并非是静止不动的,外加磁场可以驱动畴壁运动,使一部分磁畴扩张,而另一部分磁畴收缩. 畴壁还可以被自旋极化电流驱动,当电子从一个磁畴穿越到其相邻的磁畴时,电子与畴壁会交换自旋转移力矩;电子的自旋向一个方向偏转,而畴壁的自旋向相反方向偏转,尽管畴壁自旋偏转角度很小. 电流中大量电子的集体作用可以驱动畴壁.

利用电流驱动畴壁是一种通过改变纳米线的磁矩分布从而实现向磁性随机存取器中写入信息的方法. 同时,它还可以作为一种推动三维磁性存储器中磁性比特序列的有效方法<sup>[1]</sup>. 该方法在实际器件应用中要求畴壁可以在微小电流驱动下快速和稳定地运动. 然而,最适于畴壁高速移动的磁性材料中也最容易出现畴壁移动速度上的沃克崩溃(Walker breakdown),这是一种紊流导致的畴壁非稳定状态,畴壁运动速度因此而减慢. 最近,法国 Spintec 实验室的科学家 Gaudin 和 Miron 等人找到了一种方法避开沃克崩溃<sup>[2]</sup>,他们并没有对磁体本身做改变,而是通过改变磁体的封装方式实现了畴壁在电流驱动下快速和稳定地运动.

### 布洛赫畴壁

在宏观尺度的磁体中,单个磁畴的磁矩方向可能指向任何一个方向;当磁体的尺寸缩小时,热力学条件决定了磁矩方向的择优取向. 在磁性纳米线中,磁矩方向沿着纳米线的轴线方向,以达到能量极小;相邻磁畴中的磁矩采取头对头的排列方式. 尽管这种纳米线中的畴壁可以在电流的驱动下发生移动,但是它们通常会比较宽,而且难以移动,从而限制了一条纳米线中可以存储的比特数量以及操纵比特时所能达到的精度.

最近,研究人员开始在中层膜纳米结构中间包裹具有强各向异性的片状纳米线,在这种纳米线中,磁矩方向与片状纳米线表面垂直,相邻磁畴以布洛赫畴壁相间隔(见图 1(a)). 布洛赫畴壁的优点在于它的宽度很小,并且研究人员预测,相对于沿轴向磁化的纳米线中的畴壁,布洛赫畴壁更容易被驱动. 一个简单的模型可以帮助我们理解电流驱动布洛赫畴壁移动的过程:假设传导电子自旋方向时刻与局域磁场方向相同,根据角动量守恒原理,电子在通过逆时针布洛赫畴壁时会对畴壁施加顺时针力矩,反之亦然. 这种效应可以推动布洛赫畴壁前进. 当然,实际情形比较复杂,顺时针和逆时针的布洛赫畴壁能量相同,因此在纳米线样品中,两种构型的布洛赫畴壁同时存在. 当驱动电流增加时,布洛

赫畴壁在两种构型之间反复转换,在消耗掉驱动电流所携带的能量的同时,并不会驱动布洛赫畴壁前进. 这是一种沃克崩溃,即不稳定的畴壁状态使电流驱动磁畴运动进入驱动效率低的紊流区域.

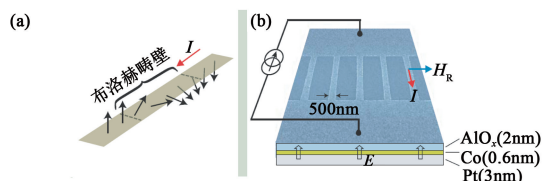


图 1 布洛赫畴壁的示意图 (a)片状的具有强各向异性的磁性纳米线中,磁矩垂直于纳米线向上或向下的磁畴被磁矩螺旋分布的布洛赫畴壁分隔<sup>[4]</sup>; (b)500nm 宽的钴纳米线中的布洛赫畴壁在大电流密度的驱动下保持形态稳定

### 保持畴壁形态稳定

当 Gaudin 等人在几年前开始研究畴壁运动的实验时,他们本以为会在高电流密度下观察到沃克崩溃的信号. 然而在早期的实验中,他们甚至没有观察到铂金属覆盖的钴纳米线中畴壁的移动. 接下来他们尝试了一种不同的结构:钴纳米线位于三明治结构的中间,其上下两侧分别为金属铂和氧化铝. 令研究人员意想不到的是,铁磁性金属钴中的布洛赫畴壁在脉冲电流的驱动下以 100m/s 的速度快速移动,远高于在这之前的实验结果<sup>[3]</sup>. Miron 等人回忆说,“我们当时并不理解这种现象,在这么大的电流密度下,畴壁运动应该在湍流区”. 在这个课题组最近的实验中,观察到畴壁的运动速度高达 400m/s,而且没有沃克崩溃的迹象.

最近,研究人员相信他们对其中的物理有了一定的理解. 他们认为,金属铂、金属钴和氧化铝构成的三明治结构中存在结构反演不对称性,从而产生了一个方向垂直于纳米线平面的电场  $E$ . 由于 Rashba 自旋轨道耦合效应,电子感受到一个有效磁场  $H_R$ (见图 1(b)),从而使畴壁中电子的磁矩倾向于沿着  $H_R$  的方向偏转. 这种偏转使得顺时针和逆时针布洛赫畴壁能量不再相同,因此在电流的驱动下,布洛赫畴壁不再在两种构型之间反复转换,而是采取与有效磁场  $H_R$  相同方向的能量最低的构型.

后继的实验看上去可以证实上面的理论. 研究人员使用外加磁场改变布洛赫畴壁的初始状态. 如果畴壁初始状态的自旋方向与  $H_R$  方向相反,畴壁对脉冲电流的响应就会很迟缓,这说明只有在畴壁与  $H_R$  方向相同时,电流才可以有效地驱动畴壁.

### 未解决的问题

Gaudin 等人还不能给出一个细致的纳米线中电流驱动畴壁移动的解释. 比如,虽然畴壁存在于只有 0.6nm 厚的钴

本栏目是经美国物理联合会(AIP)授权,与 *Physics Today* 合作的项目

纳米线中,但是更厚的金属铂更可能提供低电阻通道. Miron 等人并不清楚电流在钴层和铂层之间是怎样分配的,很有可能所有的电流都从铂层中通过. 这并不一定是坏事,因为这意味着单位电流密度驱动的畴壁移动速度比研究人员观察到的要快. 更让人感到疑惑的是,简化的模型预测布洛赫畴壁的运动方向与电子移动的方向相同;尽管研究人员观察到了均一的可重复的畴壁移动,畴壁的运动方向却与电子运动的方向相反. Gaudin 等人希望通过多次实验确认畴壁的反常运动方向. 畴壁的运动方向看起来很奇怪,但并不是不可理解的,实际上,其他的课题组也观察到了相同的畴壁运动行为. 研究人员驱动畴壁移动时使用的电流密度为  $3 \times 10^8 \text{ A/cm}^2$ ,比市场应用的目标还要高一个量级. 没有了沃克崩溃的干扰,该研究组可以集中精力去探索合适的铁磁性材料.

IBM Almaden 研究中心的 Stuart Parkin 等人认为这个工作是一个重要的进展. 他们说:“这个工作说明畴壁的运动可以比我们想象的还要稳定,因此基于畴壁的存储器有望能够实现”.

#### 参考文献

- [ 1 ] Parkin S S P, Hayashi M, Thomas L. *Science*, 2008, 320:190
- [ 2 ] Miron I M *et al.* *Nat. Mater.*, 2011, 10:419
- [ 3 ] Moore T A *et al.* *App. Phys. Lett.*, 2008, 93:262504
- [ 4 ] Miron I M *et al.* *Nat. Mater.*, 2010, 9:230

(中国科学院物理研究所 韩秀峰 王云鹏 编译自 Ashley G. Smart, *Physics Today*, 2011, (7):18, 原文详见 <http://ptonline.aip.org>)