

基于铁磁金属纳米点接触结构的全金属逻辑电路*

杨海方 徐鹏 唐令 李俊杰 夏钊 顾长志†

(中国科学院物理研究所 北京凝聚态物理国家实验室 北京 100190)

摘要 电流在铁磁金属中可以用来驱动磁畴壁,从而可以进行信息的读写.然而,具体如何在器件中实现并不清楚.文章作者利用纳米加工技术制作出铁磁金属纳米点接触结构和逻辑电路,并对纳米结构中畴壁的输运性质和逻辑电路特性进行了研究.发现了铁磁纳米点接触结构在电流驱动下存在的高阻态及低阻态,通过设计不同形状的点接触结构,用电学测量方法验证了畴壁在自旋极化电流作用下的移动方向与电流方向的关系.并基于电流控制点接触电阻变化的结果,制作出能够实现逻辑“非”功能的全金属逻辑电路,实现了电路的电信号驱动和利用电信号的检测功能.

关键词 畴壁电阻,自旋电子输运,纳米点接触,全金属逻辑电路

An all-metallic logic gate based on a ferromagnetic metal nanocontact

YANG Hai-Fang XU Peng TANG Ling LI Jun-Jie XIA Ke GU Chang-Zhi†

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

Abstract The domain wall in ferromagnetic materials can be driven by an electric current, and the information written and read out through the current. However, how to realize such functions in realistic devices is not clear yet. Using electron beam lithography and the lift-off technique we have successfully fabricated ferromagnetic metal nanocontacts and all-metallic logical gates, and have studied the spin-dependent electron transport properties of the nanocontacts as well as the performance of the gates. The domain wall can be pinned at the contact position and pushed away by the reflection of spin-polarized electrons, with the direction of the domain wall motion determined by the specific structural design. Based on our analysis of the properties of the nanocontact domain wall we have designed and fabricated an all-metallic logic gate, which can perform a logical NOT operation very well.

Keywords domain wall magnetoresistance, spin electron transport, nanocontact structure, all-metallic logic gate

1 引言

自旋电子学由于其丰富的物理内涵和广泛的应用前景,在信息技术领域受到高度重视,成为近年来凝聚态物理研究的热点领域.随着纳米技术的发展,磁性材料纳米器件所表现的优异特性可以使我们得到更快的信息处理速度和更高的信息存储密度,并由此推动了自旋电子学的快速发展.自旋电子学的目的就是在以电荷为信息载体的基础上,增加了电

子的不同自旋作为信息的载体,这对整个信息产业的发展具有深远的意义.自旋电子器件不仅在信息存储方面占有优势,而且还可以应用在逻辑信号处理方面^[1-10].目前有两类自旋逻辑器件,一类是磁性半导体自旋逻辑器件,另一类是磁性金属自旋逻辑

* 国家自然科学基金(批准号 90406024-1)、国家重点基础研究发展计划(批准号 2006CB933000,2006AA03Z402)、中国科学院知识创新工程资助项目

2008-03-24 收到

† 通讯联系人. Email: xzgu@aphy.iphy.ac.cn

辑器件. 由于半导体材料中的载流子浓度比较低, 很难得到高的电流密度, 多数情况下要求较低的工作温度, 而且需要利用磁光克尔显微镜或磁力显微镜作为探测工具, 这些都大大限制了半导体自旋器件的进一步的研究和应用. 而金属具有高的载流子浓度, 且金属的电阻比半导体小几个数量级, 能大幅度地减小电路本身的能量损耗, 更有利于电信号的传输, 而且磁性金属器件大部分都可以在室温下进行工作, 因此用磁性金属制作的金属自旋逻辑器件越来越受到关注. 如英国 Cowburn 小组利用坡莫合金纳米线设计并制作出一种基于畴壁运动的逻辑器件^[11, 12], 纳米线中的畴壁在外加磁场驱动下沿着纳米线移动, 改变磁化方向, 实现了对于 Kerr 磁信号的逻辑运算. 但是这种结构需要用磁场作为驱动信号, 并且要用磁光克尔显微镜来探测信号, 因此离实际应用还有很长一段距离.

目前, 已经出现的自旋逻辑器件有电驱动-磁检测、磁驱动-电检测或者磁驱动-光检测, 都有一定的局限性. 因为现今的信息技术都是建立在利用电信号的基础上, 所以实现电驱动和电检测的自旋逻辑器件对自旋电子学在信息技术领域的应用具有重要意义. 而自旋极化电流诱导磁化翻转这一效应^[13-15], 打开了磁场与电场之间的一条新的联系通道. 不需要外加磁场, 仅用电流就可操纵材料的磁化状态, 这克服了磁场难以屏蔽的困难, 为自旋逻辑器件高度集成和信号高可靠性处理提供了可能. 本文中我们研究了因瓦合金铁磁金属纳米点接触结构对畴壁的钉扎作用及自旋极化电流与被钉扎畴壁的相互作用机制, 利用铁磁纳米点接触结构在外加电场下存在的高阻态及低阻态, 制作出具有逻辑“非”功能的全金属逻辑电路, 并对电路的性能进行了测试, 实现了电路的电驱动-电检测功能.

2 实验方法

磁性金属纳米点接触结构是利用电子束曝光、金属镀膜及溶脱工艺制备完成: 首先在 SiO_2 基片上利用双层胶(950PMMA/495PMMA)技术曝光得到具有底切(Under-cut)剖面结构的点接触结构的光刻胶图形; 再采用磁控溅射的方法沉积 30nm 的因瓦合金, 然后将样品放入丙酮溶液中进行光刻胶的剥离, 得到所需要的磁性金属的点接触结构, 最后再采用同样的方法, 利用套刻工艺制备 Au 测量电极. 电子束曝光电压采用 10keV, 曝光后的样品采用 MI-

BK IPA(1:3)显影液显影 40s, 定影采用 IPA 清洗 30s, 再用干燥氮气吹干. 金属沉积在磁控溅射系统内完成, 为了防止铁磁金属的氧化, 沉积铁磁薄膜后再沉积 2nm 左右的金. 为了增加金属的粘附力, 沉积电极 Au 层时采用 10nm 的 Ti 做过渡层. 图 1 为我们制得的因瓦合金纳米点接触及测试电极的 SEM 照片. 点接触的电流-电压($I-V$)特性是在室温、无外加磁场的条件下, 采用四电极法测量. 在恒定温度并且没有外加磁场的条件下, 能够避免霍尔效应及热效应的影响, 从而有利于我们分析畴壁对电子的散射作用. 通过纳米点接触结构的电流和两端的电压分别采用皮安表(Keithley6485)和纳伏表(Keithley2182A)测量得到.

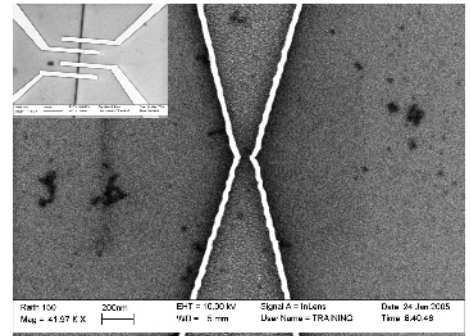


图 1 因瓦合金纳米点接触结构及测试电极的 SEM 照片

3 结果与讨论

3.1 畴壁磁电阻的测定

我们分别对点接触宽度为 20 nm、50 nm、100 nm、150 nm、200 nm、250 nm 和 300nm 的因瓦合金纳米点接触的电阻-电压($R-V$)特性进行了测量, 图 2 给出了宽度分别为 100 nm 及 300 nm 的因瓦合金点接触的 $R-V$ 曲线. 从测量结果我们发现, 当点接触宽度小于 250nm 时, 测量得到的电阻会在一定的电压下出现明显的变化, 并且随着点接触宽度的增加, 变化值变小; 而在宽度为 300 nm 的点接触的测试结果中没有出现这种电阻变化的现象. 点接触结构的本质是在金属线上人工制造的一个缺陷, 如果点接触的宽度足够的小, 由于铁磁金属的自发磁化, 在缺陷处便会形成一个畴壁^[16], 即磁畴的畴壁被钉扎在点接触的位置. 另一方面, 因瓦合金纳米线在地磁的作用下, 会因为自发磁化形成两极, 因此通过纳米线的电流可以认为是自旋极化的电流. 由于畴壁两边电子的自旋极化方向相反, 当自旋极化电

流通过被钉扎的畴壁的时候,自旋电子将受到与其自旋方向相反的电子的散射.随着电流密度的增大,畴壁最终被自旋极化电子“推离”点接触的位置,即点接触位置实现了磁矩翻转,因而产生了上面观测到的电阻变化.随着点接触宽度的增加,在点接触位置的畴壁密度会下降,畴壁对电子的散射效果会降低,所以畴壁电阻也就随之减小.而当接触宽度为300nm或大于300nm时,增加的畴壁能将大于静磁能的减少,所以在接触位置将不会有畴壁的钉扎,从而也就观测不到电阻的跳变现象.因此,这种电阻的变化是由于电流引起的磁畴壁的运动,并将其推离点接触位置造成的,电阻的变化值就是畴壁磁电阻的大小.

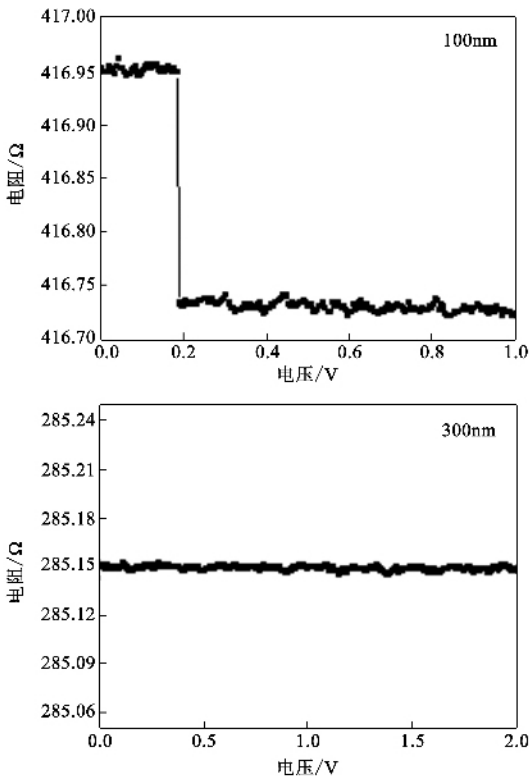


图2 点接触宽度为100nm及300nm时的R-V曲线

图3给出了引起电阻变化时的临界电流与点接触宽度的关系,临界电流随着点接触宽度的增加而增大,且临界的电流密度为一个常数,约为 $1.8 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$. Gan等人^[17]用磁力显微镜直接观察体相材料中电流引起畴壁运动时的电流密度为 $2.5 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$,与我们的结果在同一数量级.由此可以确定我们制作的在一定宽度范围内的纳米点接触结构能够钉扎住一个畴壁,畴壁对自旋极化电子产生散射作用,随着通过点接触的电流密度的增加,畴壁会被自旋极化电子推离点接触位置,从而产生畴壁

磁电阻.我们进一步研究了当电压降低时畴壁磁电阻的变化情况,如图4所示.从图4我们可以看出,当电压低于临界值的时候,电阻重新跳回到高阻态,即随着电压的升降,点接触结构的电阻可以在低阻态及高阻态两个状态之间进行切换,因此可以利用电压来控制点接触结构的电阻态.

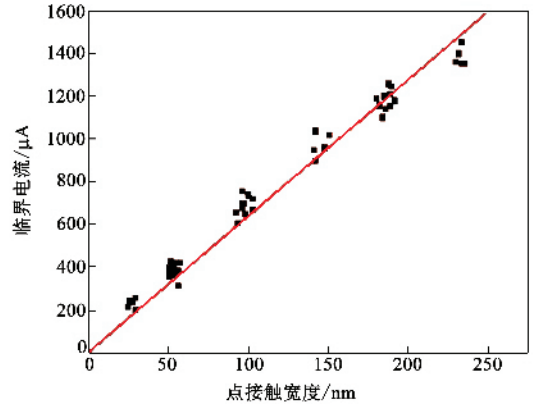


图3 不同宽度点接触发生电阻突变时的电流强度

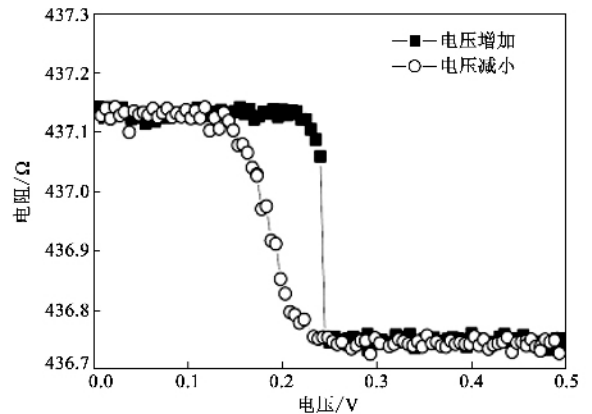


图4 宽度为50nm的因瓦合金点接触结构电阻随电压升降的R-V回线

3.2 畴壁在自旋极化电流作用下的移动方向

由于因瓦合金纳米点接触结构的尺度较小,且该合金为软磁体,因此采用磁力显微镜直接观察畴壁的运动状态很难实现.我们在研究中发现,当点接触的对顶角由小变大时,电测量得到的R-V曲线的形状将发生变化,正是基于此点特征,我们制作了不同对顶角的因瓦合金点接触结构来研究电阻变化的过程.利用电测量的方法确定了纳米点接触结构中畴壁的运动方向与自旋极化电流方向的关系.图5给出了几种不同形状点接触的扫描电镜照片和R-V曲线.

图5(a)为由两个较大对顶角形成点接触的结构

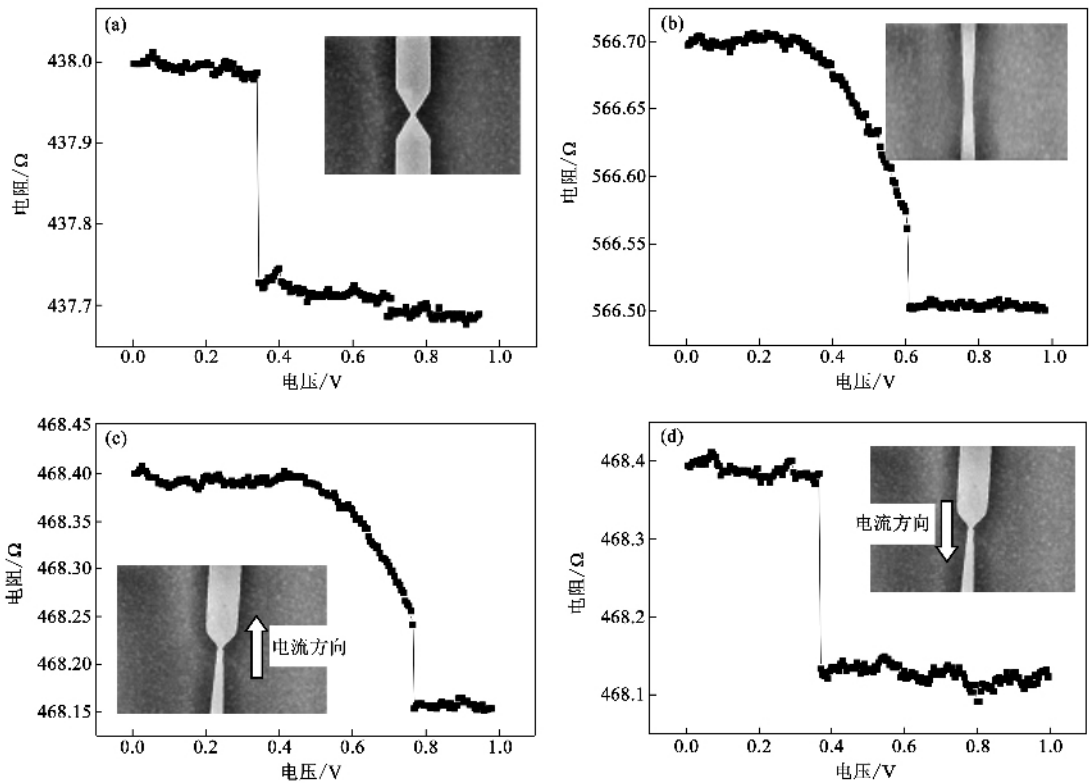


图5 不同形状的因瓦合金纳米点接触结构的 $R-V$ 曲线

构,接触位置附近纳米线的宽度变化很明显,最细的位置宽度为 135 nm,在恒定室温和无外加磁场的条件下进行 $R-V$ 测量.结果显示,当点接触两端电压增大到约 0.35 V 时,电阻突然下降,而且改变测试电流的方向,仍然会出现同样的结果.图 5(b)给出的是两个较小对顶角形成点接触的结构,并且接触位置附近纳米线的宽度是平缓变化的,最细的位置宽度为 150 nm.当点接触两端电压增大到约 0.32 V 时,电阻开始下降,但是下降的速度很平缓;当电压增大到 0.5 V 时,电阻才出现突变.改变测试电流的方向,我们可以得到同样的结果.

图 5(c)和图 5(d)给出了由较大对顶角对接较小对顶角形成的点接触结构,最细的位置宽度为 135 nm.当测试电流方向从小角一侧流向大角一侧时(图 5(c)),点接触两端电压增大到约 0.4 V,电阻开始缓慢下降,电压达到 0.48 V 时,电阻出现突变, $R-V$ 曲线形状与图 5(b)相似;当测试电流方向从大角一侧流向小角一侧时(图 5(d)),点接触两端电压增大到约 0.4 V,点接触电阻突然下降, $R-V$ 曲线形状与图 5(a)相似. $R-V$ 曲线中的电阻变化是自旋极化电流将畴壁推离点接触位置而引起的,因此对比图 5 中的测量结果,我们可以得出:图

5(c)中点接触位置钉扎的畴壁是从点接触结构中小角一侧被推离钉扎位置,因此电阻会出现一段缓慢变化的过程;而图 5(d)中点接触位置钉扎的畴壁是从点接触结构中大角一侧被推离钉扎位置,从而使电阻的变化很突然.这说明畴壁的移动方向与自旋极化电流方向相反,即与自旋极化电子移动的方向相同,这与此前的一些用磁力显微镜观察到的结果相符合,即畴壁的运动方向与载流子的运动方向一致^[18-20].这是首次用电测量的结果确定了畴壁的运动方向,是纳米结构物性测量的相关实验方法上的一个突破.

3.3 基于铁磁金属纳米点接触结构逻辑非门电路的实现

基于上面的研究结果,我们发现,铁磁金属纳米点接触结构能够在点接触位置钉扎住一个磁畴,自旋极化电流可以驱动畴壁的运动,从而使点接触电阻在高电阻态与低电阻态之间进行转换.如果配合一个具有固定电阻的金属纳米线作为参考电阻与之相比较,将点接触结构和金属纳米线串联之后联入电源两端,点接触结构和纳米线之间的连接点的电势会因为点接触电阻的改变而发生变化,电势的高

低可以定义为逻辑信号,代表二进制信息的“0”和“1”。由此,我们利用铁磁纳米点接触结构设计并实现了非门逻辑电路,并对其电路特性进行了测试^[21]。

图6给出了我们利用宽度为50nm的因瓦合金点接触结构及其纳米线得到的非门逻辑电路的SEM图及等效电路图。我们将宽度为50nm的点接触结构与宽度为400nm的纳米线串联,纳米线的长度由点接触的电阻决定,纳米线的电阻 R 的大小与点接触低电阻态的电阻大小相同,恒流源提供一稳定的电流 I_{ab} ,其大小要使通过点接触的电密度接近并小于引起畴壁移动的临界电流密度。当输入端 V_{cd} 没有电压信号输入的时候,即输入信号为“0”时,此时点接触处于高电阻态,其电阻值大于纳米线的电阻 R ,那么输出端 V_{ef} 两端会有电位差,我们定义其为信号“1”;当输入端 V_{cd} 有电压信号输入的时候,即输入信号为“1”时,通过点接触的电密度会增大并超过畴壁移动的临界电流,点接触会转变为低电阻态,其电阻值等于纳米线的电阻 R ,这时候输出端 V_{ef} 会变为零,即输出信号为“0”。随着输入端 V_{cd} 电信号的变化,点接触结构的电阻在高电阻态和低电阻态之间来回转换,从而使逻辑“非”的功能得以实现。为了检测该电路工作稳定性及可靠性,我们在恒定室温条件下进行了持续测试,在10分钟内测试电路连续工作200次循环,如图7所示。由图可见,输出信号一直随输入信号变化,实现了稳定、可靠的逻辑“非”操作。

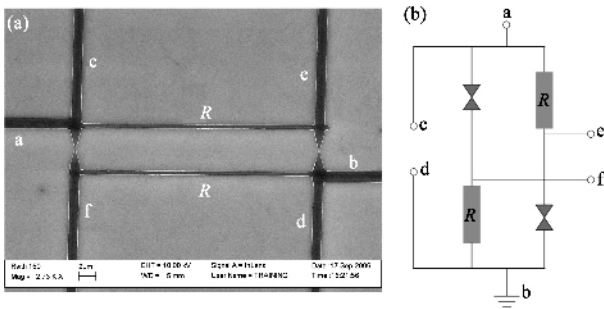


图6 基于畴壁运动引起点接触电阻变化的逻辑非门电路
(a)SEM照片 (b)等效电路

该逻辑电路的逻辑运算功能主要是依赖于点接触位置畴壁的运动,所以该电路的运算速度将由畴壁本征的振动频率决定。在交变电流作用下,畴壁会发生共振现象,通过研究畴壁的共振现象,便可以得到畴壁有效质量及本征振动频率等信息。我们在点接触结构两端,施加交变电场,观测点接触结构的交

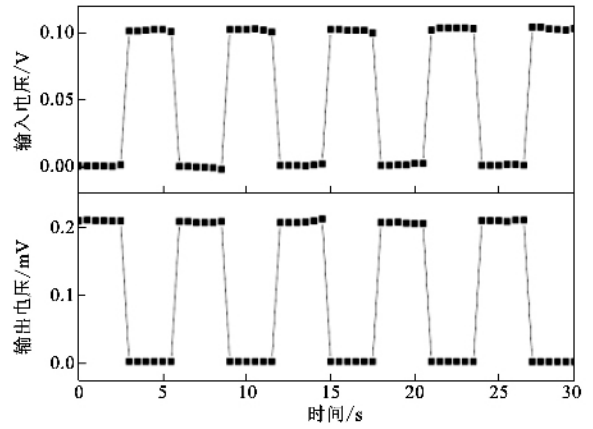


图7 基于铁磁金属纳米点接触结构的逻辑非门电路工作循环测试结果

流电阻,当交变电场的频率与畴壁的本征振动频率一致时,畴壁会吸收电场能量引起共振,从而引起点接触交流电阻的增大。图8给出了我们对点接触宽度为50nm的因瓦合金样品的测试结果。从图中可以看出,电阻-频率($R-f$)曲线上出现了明显的共振峰,这是点接触结构中的畴壁与交变电压共振造成的,其共振频率为 7.5 ± 0.1 MHz。因此,我们利用宽度为50nm的点接触结构制备的逻辑非门电路的最大逻辑运算速度可以达到 7.5 ± 0.1 MHz。另外,该逻辑电路由全金属构成,所以电路自身的能耗较小,其能量的主要消耗方式为热损失 $P=VI$,由我们的实验数据: $V=0.24$ V、 $I=5.1 \times 10^{-4}$ A,我们可以得到该逻辑电路的能耗仅为 1.2×10^{-4} W,远低于Si电路的能耗。

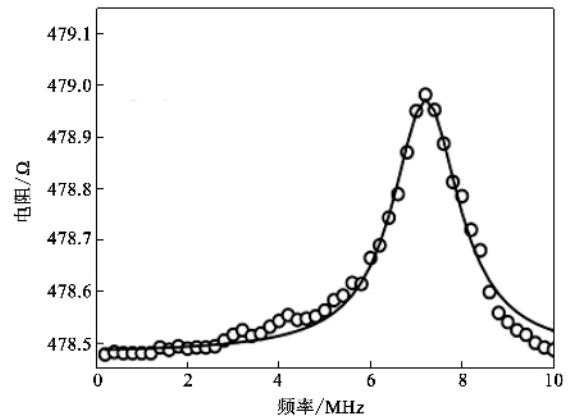


图8 宽度为50nm的点接触的交流电阻与频率的关系曲线

另外,在逻辑电路制作过程中,金属纳米结构、电路布线、输入输出信号的电极及引入工作电压的电极,只需要一次电子束曝光及沉积过程就可以完成,完全适合现今的半导体平面工艺,与CMOS电路

工艺完全兼容,并且该方法制作的电路以全金属结构实现,由于金属材料优异的电导特性使得这种电路能够实现比现今的半导体电路更细的线宽和更高的载流子密度,具有集成度高、成本低、兼容性好和抗干扰能力强等特点,并能够在磁性材料的居里温度(600℃)以下正常工作,显示出作为未来纳米电子器件与电路的巨大潜力。

4 结论

本文对铁磁金属因瓦合金的纳米点接触结构的运输性质进行了研究,发现铁磁金属纳米点接触位置可以钉扎磁畴,当通过点接触位置的电流密度增大时,畴壁被推离点接触的位置,从而引起电阻的下降,而当电流密度减小时,电阻可以回复到原来的高阻态。通过设计不同形状的点接触结构,用电学测量方法验证了畴壁的运动方向与自旋极化电流方向相反。最后,我们利用铁磁金属纳米点接触结构的设计和制作,得到了室温下可以稳定工作的全金属磁逻辑“非门”电路,具有电驱动-电检测的特点。

参考文献

- [1] Prinz G A. *Science*, 1998, 282 : 1660
 [2] Wolf S A, Awschalom D D, Buhrman R A *et al.* *Science*, 2001, 294 : 1488
 [3] Dietl T, Ohno H, Matsukura F *et al.* *Science*, 2000, 287 : 1019
 [4] Ohno Y, Young D K, Beschoten B *et al.* *Nature*, 1999, 402 :

790

- [5] Katine J A, Albert F J, Buhrman R A *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2000, 84 : 3149
 [6] Kiselev S I, Sankey J C, Krivorotov I N *et al.* *Nature*, 2003, 425 : 380
 [7] Rippard W H, Pufall M R, Kaka S *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2004, 92 : 02720
 [8] Cowburn R P, Welland M E. *Science*, 2000, 287 : 1466
 [9] Amlani I, Orlov A O, Toth G *et al.* *Science*, 1999, 284 : 289
 [10] Ney A, Pampuch C, Koch R *et al.* *Nature*, 2003, 425 : 485
 [11] Allwood D A, Xiong G, Faulkner C C *et al.* *Science*, 2005, 309 : 1688
 [12] Allwood D A, Xiong G, Cooke M D *et al.* *Science*, 2002, 296 : 2003
 [13] Saitoh E, Miyajima H, Yamaoka T *et al.* *Nature*, 2004, 432 : 203
 [14] Gen Tataru, Hiroshi Kohno. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, 92 : 086601
 [15] Chiba D, Sto Y, Kita T *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2004, 93 : 216602
 [16] Lepadatu S, Xu Y B. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, 92 : 127201
 [17] Gan L, Chung S H, Ashensbach K H *et al.* *IEEE. Trans. Magn.*, 2000, 36 : 3047
 [18] Yamaguchi A, Ono T, Nasu S *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2004, 92 : 077205
 [19] Kläui M, Jubert P O, Allenspach R *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2005, 95 : 026601
 [20] Yamanouchi M, Chiba D, Matsukura F *et al.* *Nature*, 2004, 428 : 539
 [21] Xu P, Xia K, Gu C Z *et al.* *Nature Nanotechnology*, 2008, 3 : 97

· 封面故事 ·

玫瑰眼 (The Rosette Eye)

——大质量恒星周围电离氢区前期形成及演化重要过渡阶段的发现

一个由中英德美多国天文学家组成的工作小组近期在距离太阳系 5000 光年的玫瑰巨分子云核心大质量星形成区域发现了一个处于早期演化阶段的罕见的年轻大质量恒星系统。据估算,中心星体的质量大约为 20 个太阳质量。观测表明,该大质量星在其形成的吸积塌缩过程中产生的强大紫外辐射正以大张角电离星风的形式从恒星的两极喷射而出,在近红外宽带和分子氢发射线窄带成像中表现为一个沙漏状的双极电离氢区。而更为奇特的是,在沙漏状电离氢区的外围区域分别形成了一个弓型结构的静态壳层,这表明大质量年轻星的形成过程正处于一个非常重要的由中心塌缩阶段向球对称结构电离氢区演化的中间过渡阶段,也就是少见的沙漏状电离氢区阶段。在实测上,由于现行的大质量恒星形成区样本较少,加上大质量恒星区往往深埋于巨分子云致密区而很难被观测到。同时,较强的近红外色余表明该大质量年轻星周围很可能依然存在吸积盘或尘埃环,沙漏状电离氢区的出现则表明中心年轻星体很可能尚处于吸积塌缩阶段或者大质量星形成的较早期演化阶段,因此该发现也从侧面印证了至少 20 个太阳质量的恒星是可以通过吸积的方式形成的。玫瑰眼的发现及相关研究成果已被本领域国际顶尖杂志《天体物理快报》接收发表(*ApJ Letters*, 2008(679) : 101)。

(国家天文台 李金增)