

# 基于磁性隧道结技术的新型准自旋场效应晶体管

温振超 韩秀峰<sup>†</sup>

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

近年来,自旋晶体管作为具有强大功能的未来集成电路的组成部分已得到相当多的关注.实现自旋晶体管,至关重要是提高半导体中自旋注入和自旋检测的效率.然而,这并非容易,因为在实际中的铁磁/半导体界面存在很多问题.例如:界面层的形成、费米能级钉扎和电导率不匹配等等.到目前为止,这些界面问题的最终解决方案仍处于研究阶段.近年来,随着氧化镁(MgO)单晶势垒制备技术的发展,磁性隧道结材料的研究有了巨大的突破和进展;同时,半金属铁磁电极 Heusler 合金的使用也对磁性隧道结制备技术产生了重大影响.目前研究发现,具有 Heusler 合金铁磁电极和 MgO 势垒的磁性隧道结,在室温下展现出了超过 300% 的隧穿磁电阻(TMR)比值.这就为自旋场效应晶体管的研制和操作以及非易失性功能逻辑电路的应用提供了契机.最近,日本东京工业大学 Yusuke Shuto 等研究人员第一次研制成功一个准自旋场效应晶体管(PS-MOSFET),并且实现了利用磁性隧道结的高低电阻状态来控制自旋晶体管的操作.

这种基于磁性隧道结技术的准自旋场效应管单元的结构,是在普通场效应晶体管(MOSFET)的源极上集成磁性隧道结,并由磁性隧道结的电阻态来反馈源极与栅极之间的电压.这样,准自旋场效应晶体管

就具备利用磁性隧道结的电阻状态来控制晶体管高低电流的能力.另外,当漏极电流超过一定临界电流时,磁性隧道结中自旋极化电流诱导的磁化翻转(CIMS)或自旋转移矩效应(STT)也可以被应用到该结构中;并且通过施加栅极电压可以使该准自旋场效应晶体管的运作模式和自旋转移矩模式相互独立.因此,这种准自旋场效应晶体管能够产生自旋晶体管的功能,再进一步结合近几年发展起来的磁性隧道结制备技术,有望发展出一种实现自旋晶体管的新途径.

研究人员通过发展自旋阀磁性隧道结与背栅场效应晶体管的集成技术,制备了准自旋场效应晶体管,如图 1 所示.背栅场效应晶体管的背栅结构使用硅绝缘体衬底(SOI),其中绝缘层和硅层分别作为栅极的介电材料和电极.然后利用图形化的 SiO<sub>2</sub> 制成的掩模来制备该晶体管的源极和漏极以及沟道,随后进行热掺杂,使 n 型施主磷进入源极和漏极的区域.背栅的物理沟道长度和宽度分别是 2 μm 和 110 μm.进一步,在场效应晶体管源极中的具有原子量级平坦的 SiO<sub>2</sub> 层上,制备具有半金属 Co<sub>2</sub>FeAl 合金的铁磁电极和 MgO 势垒的自旋阀型磁性隧道结.制备方法如下:首先,利用射频溅射沉积 Ru(7)/IrMn(12)/CoFe(3)/MgO(1.5)/Co<sub>2</sub>FeAl(20)/MgO(10 nm)多层膜,然后将此样

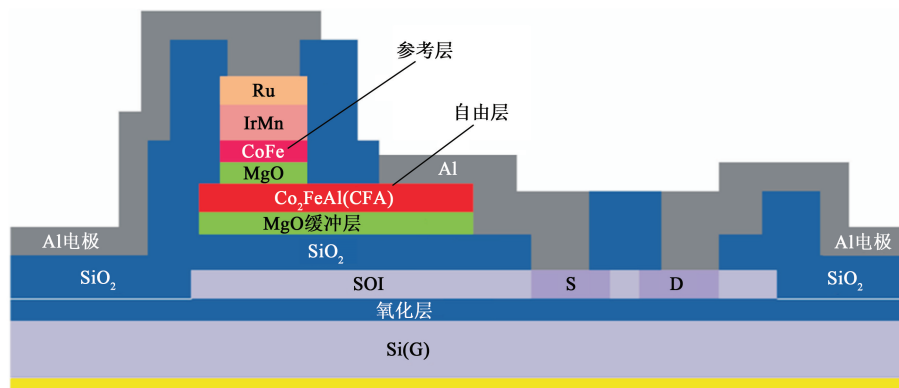


图 1 基于自旋阀磁性隧道结与背栅场效应晶体管技术的新型准自旋场效应晶体管(摘自 Applied Physics Express, 2010, 3: 013003)

2010-04-01 收到

<sup>†</sup> 通讯联系人. Email: xlfhan@aphy. iphy. ac. cn

品在 300°C 进行磁场热处理,以致  $\text{Co}_2\text{FeAl}$  薄膜出现高度(001)取向的结构,最后利用紫外光刻技术将磁性多层膜制备成  $15 \times 50 \mu\text{m}^2$  矩形的磁性隧道结. 该磁性隧道结具有明显的交换偏置隧穿磁电阻行为和 71% 磁电阻比值,偏压依赖关系显示,其磁电阻比值减小到一半时的特征电压为 0.64V. 准自旋场效应管的输出特性曲线清楚地显示了耗尽型场效应管的行为,并且当磁性隧道结的钉扎层和自由层的磁矩相互平行时,漏极电流在整个线性区和饱和区均大于反平行时的漏极电流,这表明准自旋场效应管成功地具有自旋晶体管的功能. 另外漏极电流的磁场依赖关系与磁电阻变化趋势一致,这反映了集成于源极上的磁性隧道结磁电阻的变化. 定义磁电阻比值为  $\gamma_{\text{mc}} = (I_{\text{p}} - I_{\text{ap}}) / I_{\text{p}}$ ,其中  $I_{\text{p}}$  和  $I_{\text{ap}}$  分别是当磁性隧道结的钉扎层与自由层平行和反平行时的漏极电流. 当漏极电压  $V_{\text{D}} = 0.1\text{V}$  和栅极电压  $V_{\text{G}} = 2\text{V}$  时,磁电阻比值是 38.4%. 应当指出的是,磁电阻比值受到栅极漏电流的影响,该准自旋场效

应晶体的最大磁电流比值可以达到约 45%. 进一步改进工艺,减小栅极漏电流,可以期望进一步提高磁电流比值. 在低漏极电压和高栅压条件下产生的磁电流比值,在非易失性静态随机存储器(NV-SRAM)和非易失性双稳态多谐振荡器电路(NV-FF)中有重要应用. 进一步改进材料结构和制备工艺,提高集成的磁性隧道结的磁电阻比值以及减小晶体管栅极漏电流,将是未来研究的重点.

这种基于自旋电子学中磁性隧道结技术的准自旋场效应晶体管器件,成功地实现了自旋晶体管的一部分功能,具有随机读写速度快以及低功耗等优点,是下一代具有非易失性的可编程逻辑功能器件以及具有记忆功能的非易失性大规模集成电路发展过程中一个标志性的工作.

(温振超、韩秀峰 编译自 Applied Physics Express, 2010, 3: 013003)



• 物理新闻和动态 •

## 超冷费米原子气的状态方程

理解强相互作用粒子系统的行为是当今凝聚态物理学家所面临的挑战之一. 中子星是一类典型的量子多体系统. 当中子间的相互作用达到量子力学允许的最大的有效值时,其中所有的物质将共享同样的热力学特性;这样的状态被称为单一性极限(unitary limit). 许多理论物理学家认为, $^6\text{Li}$  超冷费米原子气是研究原子间强相互作用的极佳对象. 最近,来自法国巴黎 Kastler Brossel 实验室的 Nascimbène 等,在 Feshbach 共振磁场( $B = 834\text{G}$ )附近,研究了双组分 $^6\text{Li}$  原子气(组分 1 和 2 分别指 $^6\text{Li}$  原子的两个最低自旋态)的超低温热力学特性. 通过巧妙的实验设计,研究者使 $^6\text{Li}$  超冷费米原子气达到了单一性极限. 这就是说,整个样品的热力学特性可以用一个普适的状态方程描述,并且方程独立于原子间相互作用的细节.

在原子气简谐捕获势的环境下,普适方程描述压力  $P$  和温度以及气体局域密度的依赖关系. 按照普适方程,可以画出 $^6\text{Li}$  费米原子气的相图(注:由于样品是被简谐势阱捕获的双组分 $^6\text{Li}$  原子气,样品的相是空间变化的),它大致分为 4 个区:(1) $^6\text{Li}$  费米原子间弱相互作用—较高温区(费米原子液体,正常态);(2)弱相互作用—低温区: $^6\text{Li}$  费米原子结成 Cooper 对,同时进入 Bardeen—Cooper—Schrieffer (BCS) 超流态. 正如金属超导体的情况,Cooper 对间相互作用也弱;(3)强相互作用—较高温区(玻色分子液体,正常态):原本相互作用很弱的 $^6\text{Li}$  费米原子,通过调节外部环境,大大增强了其间的相互作用,以致于两个 $^6\text{Li}$  费米原子结合成空间局域的玻色分子;(4)强相互作用—低温区:超流态通过玻色分子系统的降温得以实现. 正如: $^4\text{He}$  超流或玻色原子气的玻色—爱因斯坦凝聚的情况.

研究者通过调节磁场逐步增强原子间的相互作用,重点研究了原子气的状态从(1)区至(3)区的渡越. 他们发现:在渡越过程中,原子气的状态非常接近于费米液体相,与此前许多理论家的预言很不同. 理论家曾预言:当超冷费米原子气逼近单一性极限(unitary limit)时,在正常态,样品应是“非费米液体相”,例如,在高温超导体中看到的赝能隙相. 对此,Nascimbène 等以完美的实验给出了否定的回答. 有专家评论说,Nascimbène 等关于单一性费米原子气状态方程的工作是量子仿真研究的杰出案例,研究者针对特定的样品提供了有价值的定性或定量信息,而这是理论工作者难以做到的.

(戴闻 编译自 Nature,463:1029 ;1057)