

自旋晶体管——未来新型器件

王海 郑鹤

(首都师范大学物理系 北京 100037)

传统的半导体三极管(又称晶体三极管或晶体管)由两个PN结和三个电极构成,从结构上看有NPN和PNP两种基本类型.其工作原理是大家所熟知的.晶体管的成功研制极大的带动了半导体工业的发展.晶体管的应用已渗入到国民经济的各个领域.但半导体晶体管也存在着一些固有的不足.由于在晶体管中载流子的密度较低,如在室温下,Si的本征自由电子浓度约为 $n_i \approx 1.5 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$,即便掺入少量的P原子后,自由电子浓度为 $n_n \approx 2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$,一些高浓度掺杂的半导体中的载流子密度也仅为 $10^{18} \sim 10^{19} \text{cm}^{-3}$.半导体中的载流子对环境温度的变化敏感,受外界辐射影响大.现代计算机工业要求在尽可能小的面积上集成更多的元件,由于半导体的散热性能较差,当集成度高时,散热问题成了主要制约因素之一.所以人们并不满足于半导体晶体管,而希望能够找到更好的制作晶体管的机制和材料.半导体晶体管利用的是电荷具有正负两种不同状态的特性,而对于金属中的电子具有自旋向上和自旋向下的两个不同态,在磁性金属中由于极化作用使得这两个态的电子数量有很大的差异,我们是否可以利用电子的这一特性制造出全新概念的晶体管呢?

一、自旋晶体管的工作原理

电子既是电荷的载体,又是自旋的载体.半导体技术应用的是电子的电荷特性,我们是否能够利用电子的自旋特性呢?电子的自旋可分为自旋向上和自旋向下两种状态,如果创造某一条件,使得两种自旋态的电子有不同的流动模式,那么我们就有希望利用自旋特性操纵电子的输运过程了.

在铁磁金属中,由于交换劈裂,费米面处自旋向上与自旋向下的电子态密度不等,因而自

旋向上电子载流子数与自旋向下电子载流子数是不等的,故在电场的推动下,铁磁金属中的传导电子流必定是自旋极化的,即总传导电子体系的自旋不为零.按照量子力学,电子可分为两类,一类自旋平行于局域磁化强度,另一类自旋反平行于局域磁化强度.实验中验证了存在与自旋相关的散射过程,即对于两类自旋电子的散射强度不同.我们知道,金属中电阻的大小取决于电子所受到的散射的强弱.当电子流进入铁磁金属前其总自旋为零;进入铁磁金属后,一类电子(如自旋反平行于局域磁化强度的电子)受散射非常强,平均自由程短,有效电阻大,另一类电子(平行的)受到的散射很弱,具有长的平均自由程和低的有效电阻.随着电子在铁磁金属中的流动,电子流中两类电子的数量有了差异,总自旋不再为零,电子流发生了自旋极化.理想情况下,一类电子(平行的)的有效电阻无穷大,另一类电子(反平行的)的有效电阻很小.显然,引起这种结果的散射过程与电子的自旋密切相关,因此称之为自旋相关的散射.这也可以用来理解巨磁电阻效应.

在一般非磁金属中电子流的极化取向是各向同性的,也可以说,电子的自旋是无序分布的,或者理解为,对于不同自旋电子的散射强弱是一样的.电子被注入非磁金属后,与晶格频繁发生散射,电子的平均自由程一般不大.但人们发现,电子在经历许多次散射后,其自旋仍可保持不变,只有在磁性原子附近,通过交换作用,或者通过自旋-轨道耦合与杂质原子或缺陷发生相互作用时,电子才会改变自旋的方向.人们把自旋极化的电子在输运过程中保持它原有的自旋方向所经历的平均时间(或平均距离)称为自旋弛豫时间(自旋扩散长度).电子的自旋取向可以在很长的范围内保持不变,也就是说,它

有相当长的自旋弛豫时间和相当大的自旋扩散长度.实验表明,室温下 Ag, Au, Cu, Al 的自旋弛豫时间为 10ps~1ns,与之对应的自旋扩散长度可达 1~10 μ m(这远远超过了电子的平均自由程),而在低温(40K)下 Al 的自旋扩散长度竟可达 0.1mm,自旋弛豫时间为 10ns.可以想像,在非金属中不断注入自旋极化的电子必然造成在自旋扩散长度范围内出现自旋的积聚.这与传统的半导体晶体管的机制很类似.于是在 1993 年,约翰逊根据电子在非磁性金属中有较大的扩散长度,以及不同自旋取向的电子通过铁磁金属的难易程度不同等机制提出由一个铁磁金属发射极、一个厚度小于其自旋扩散长度的非金属基极和另一个铁磁金属接收极组成的“铁磁金属/非磁金属/铁磁金属”三明治结构,该结构具有双极性开关的特性,可以组成一种新型晶体管——自旋晶体管.

采用半导体晶体管中的符号,令 A 代表铁磁金属发射极, B 代表非磁金属基极, C 代表铁磁金属接收极.则如图 1 所示,假定铁磁金属发射极的磁化方向向上(多数自旋子带电子的自旋方向朝下).当发射极与基极有电流通过时,从基极流向发射极的电子受自旋相关散射原理的制约,与铁磁金属发射极的磁化方向一致的自旋朝上的电子容易通过发射极流回电极,而自旋朝下的电子则受到发射极的强散射,于是自旋朝下电子在基极中发生积聚.此时,若接收极处于开路状态(如图 1 所示),那么当其磁化方向向上时,基极中积聚的自旋向下的电子很难向其扩散,于是在接收极保持一个高电位(图 1a);当接收极磁化方向向下时,基极中积聚的自旋向下的电子很容易向其扩散,接收极处

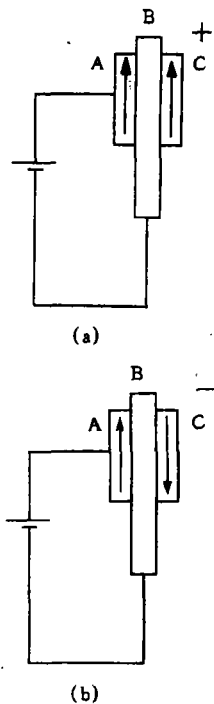


图 1 集电极开路

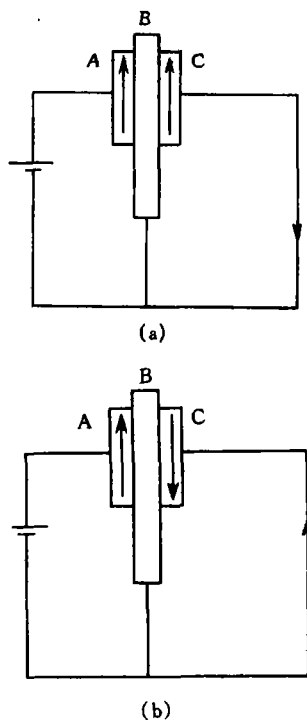


图 2 集电极闭合

于低电位(图 1b).若发射极与基极连通(如图 2 所示),那么对于前者将有电流从接收极流出(图 2a),对于后者则电流从基极流入接收极(图 2b).于是一种基于自旋极化输运特性的全金属晶体管——自旋晶体管便从此诞生了.应注意的是,所做的基极线度要小于电子的自旋扩散长度,以保证电子在基极中

运动时保持自旋不变.

自旋晶体管的发射极和接收极都是铁磁金属组成的,通过外磁场可以任意改变它的磁化方向.通过影响发射极和接收极的磁化方向和强度,就可以调整输出电流与电压的大小.通常发射极可采用矫顽力较大的材料制作,其磁化方向通过一个大的脉冲磁场固定于一个方向,并且在自旋晶体管的外面再设置一个线圈作为写线,其磁场可以改变接收极的磁化方向,这样我们就既可以将自旋晶体管制作成存储器件,也可以将其制成电流放大器.

作为存储元件,写线电流产生的磁场将接收极的磁化方向改变,从而将信息写入;读线信号由发射极电流提供,每个读脉冲将信息读出一次,读出的结果从接收极输出.将大量这样的存储元件按一定的方式排列,通过适当的伺服电路,可作成一种新型的随机存储器(RAM).其具有非破坏性读出(NDRO)信息、耐辐射及信息非易失性等特点,不需要刷新脉冲来维持信息.采用成熟的镀膜和光刻技术,很容易制备大面积的自旋三极管阵列.

作为电流放大器时,自旋晶体管发射极偏置电流是恒定的,写线电流为调制信号,通过它使接收极的磁化方向改变,从而使接收极的输出信号与写线电流的调制模式相似,在合适的几何形状下,可得到放大的信号.自旋晶体管电流放大器的频带宽度取决于接收极磁化方向的响应反转速度,因此这样的电流放大器可以以千兆赫的频率变化,而电流的放大倍数取决于偏置电流与写线电流的比值.由于可以通以较大电流,所以电流放大倍率较高.

此外,通过适当组合还可以用全金属自旋晶体管为基本元件组成各种逻辑电路和处理器;而且基于对半导体超晶格的认识,我们还可以制出超晶格的自旋晶体管;利用外磁场可以改变接收极的电流大小及方向的特点,制造出灵敏度极高的传感元件.

二、自旋晶体管的特性及应用展望

自旋晶体管具有半导体晶体管所不可比拟的特性.首先,金属的高电导率决定了它是一种低阻抗器件;第二,该器件用电流作为偏置,可用电压、亦可用电流作为输出;第三,非平衡磁化是它工作的内在动力,基极尺寸越小,非平衡磁化强度越大,其性能因而越强,故自旋晶管的性能随尺度的减小而增强;第四,由于磁性材料固有的磁滞,该器件具有记忆功能,且通过外磁场可任意设置发射极和接收极的磁化方向(它们的矫顽力通常不一样)从而设置其开关状态.第五,考察其 $I-V$ 特性发现输出信号与偏置电流呈正比,故自旋晶体管是一种线性器件,而半导体 P-N 结具有非线性的 $I-V$ 特性.第六,可在较大电流的情况下工作,可制成大功率的自旋晶体管.

显然金属自旋晶管的优势之一是小量化,因为其性能随着尺寸的减小而增强,不久的将来完全可制备出 100nm 量级(甚至更小)的元件,它的集成度要比普通半导体元器件高 100 倍;同时金属自旋晶体管由于全部为金属材料,功耗很低,若偏置电流为 0.1mA,其功耗一般仅为零点几个 μW ,而半导体元件功耗一般在 $20\mu\text{W}\sim 10\text{mW}$ 量级;半导体材料的散热特性较差,制约了半导体晶体管进一步集成化,同时必须加装散热系统使其降温,金属具有良好的散热特性,无需散热系统.但实验也表明,金属自旋晶体管响应时间在 1ns 量级,这比半导体晶体管高.

总之,全金属自旋晶体管与半导体晶体管相比,能耗低 10~20 倍,密度高 40~100 倍,而响应时间稍微慢了一些.由于金属材料具有丰富的载流子(金属的电子密度约为 $10^{22}\sim 10^{23}\text{cm}^{-3}$),随着技术的发展,甚至有可能制造出 10nm 的磁电子器件.此外,金属中的导电电子不象半导体的载流子那样对温度敏感,且耐辐射.如果计算机芯片采用自旋晶体管技术,就可以拥有集成度更高、功耗极低、功能更强劲、且更安全的全金属计算机了.目前笔记本电脑发展的一个重要制约因素是系统的散热问题,采用全金属计算机芯片,不必加装散热系统,因而可大大推动笔记本电脑的小型化和轻型化的进程.1993 年,约翰逊等提出,并在实验室条件下制成边长为 0.1mm 原型自旋晶体管.以此为开端就象当初人们利用电子的荷电性在半导体芯片上创造了今天的信息时代一样,以利用电子的自旋性制造的自旋晶体管为一个标志,人类将进入一个崭新的时代.

· 致作者 · 关于投稿的几点要求

1. 感谢广大作者对本刊的厚爱和支持,热忱欢迎广大新老作者踊跃投稿.

2. 来稿内容应符合本刊的报道范围和深度要求.表达上宜采用深入浅出、通俗易懂的语言,要符合科普文章的写作要求.

3. 来稿要求一式两份,用 20×20 稿纸誊写或打印,字迹工整清楚,公式、符号书写规范.

4. 文中有插图处画方框示意,插图绘制清楚,统一附在稿后.

5. 随稿请附英文题目和准确的通信地址及邮编,多作者情况请注明联系人.

《现代物理知识》编辑部