

自旋极化的电流

——2007 年度诺贝尔物理学奖评述

赖武彦[†]

(中国科学院物理研究所 北京 100080)

摘要 2007 年诺贝尔物理学奖授予法国物理学家阿尔贝·费尔(Albert Fert)和德国物理学家彼得·格伦贝格(Peter Grünberg),以表彰他们发现了巨磁电阻(giant magnetoresistance , GMR)效应. 这是在铁磁和非磁薄膜交替组成的人工超晶格中观察到的. GMR 现象起源于载流子自旋与材料磁性的相互作用. 该效应的应用革新了硬盘中读取数据的技术,使硬盘技术在过去十年得到飞速发展;另一方面,GMR 效应的发现是新的自旋电子学的开端. 通过电子自旋的量子效应,人们可以期待更多的发现和创新技术.

关键词 巨磁电阻,硬盘,自旋极化电流,隧穿磁电阻,自旋电子学

Spin-polarized currents

——the 2007 Nobel prize in physics

LAI Wu-Yan[†]

(Institute of Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080 , China)

Abstract The 2007 Nobel Prize in Physics has been awarded to Albert Fert (Université Paris-Sud , Orsay , France) and Peter Grünberg (Forschungszentrum Jülich , Germany) for the discovery of giant magnetoresistance (GMR). This phenomenon is observed in artificial superlattice thin-film materials composed of alternate ferromagnetic and nonmagnetic layers. It is a quantum spin-dependent effect that arises from the interaction between the spin of the carrier and the magnetic properties of the material. The applications of GMR have revolutionized the techniques for retrieving data from hard disk drives , which have seen unprecedented advances over the past ten years. Moreover , the discovery in 1988 of the GMR effect heralded the beginning of the new field of spintronics. Still more discoveries and innovative technology related to the quantum effects of the electron spin may be expected.

Keywords giant magnetoresistance , hard disk drive , spin-polarized currents , tunneling magnetoresistance , spintronics .

今年的诺贝尔物理学奖颁发给了巨磁电阻(giant magnetoresistance ,简称 GMR)效应的发现者,法国物理学家阿尔贝·费尔(Albert Fert)和德国物理学家彼得·格伦贝格(Peter Grünberg)。

瑞典诺贝尔奖委员会说明:“这是一次好奇心导致的发现,但其随后的应用却是革命性的,因为它使计算机硬盘的容量从几百兆、几千兆,一跃而提高几百倍,达到几百 G 乃至上千 G”。计算机硬盘容量的飞跃对于计算机本身以及信息在网络上的传递至

关重要. 硬盘存储密度得以提升的同时,其体积也随之减小. 目前,个人多媒体播放器的容量已高达 200Gbits,即使用来看高清晰电影,这个存储空间也绰绰有余. 全球级的硬盘厂商日立、富士通、希捷科技(Seagate technology)等,最近纷纷宣布推出存储量接近 1Tbits(为 1000Gbits)的硬盘. 这足以收录多达几百小时的高清晰电视内容.

2007 - 11 - 15 收到

[†] Email :wylai@aphy. iphy. ac. cn

瑞典诺贝尔奖委员会还指出：“巨磁电阻效应的发现打开了一扇通向新技术世界的大门——自旋电子学。这里，将同时利用电子的电荷以及自旋这两个特性。”GMR 作为新的自旋电子学的开端具有深远的科学意义。电子除了电荷以外，还具有自旋角动量。这一重大发现已经过去 80 多年了。过去处理自旋的方式着重于在外磁场或磁体中自旋矢量取向的变化；自旋是局域在固体原子上的。另一方面，传统的电子学是以电子电荷移动为基础的。在主流电子学中，电子自旋往往被忽略了。但是，新的巨磁电阻效应表明，电子自旋对于电流的影响非常强烈。所以，电子的电荷与自旋角动量两者都可能载运信息。这就是新的自旋电子学（spintronics）的主旨。我们期待着它将为科学和技术带来更广阔的应用前景。

1 巨磁电阻效应的发现和振荡的交换作用

人们早就知道过渡金属铁、钴、镍能够出现铁磁性有序状态。量子力学出现后，德国科学家海森伯（W. Heisenberg，1932 年诺贝尔奖得主）明确提出铁磁性有序状态源于铁磁性原子磁矩之间的量子力学交换作用。这个交换作用是短程的，称为直接交换作用。后来发现很多的过渡金属和稀土金属的化合物具有反铁磁（或亚铁磁）有序状态。化合物中的氧离子（或其他非金属离子）作为中介，将最近的磁性原子的磁矩耦合起来。这是间接交换作用。法国科学家奈尔（L. E. F. Neel）因为系统地研究反铁磁性而获得 1970 年诺贝尔奖。另外，在稀土金属中也出现了磁有序，不过相变温度较低。其中原子的固有磁矩来自 4f 电子壳层。但是，相邻稀土原子的距离却远大于 4f 电子壳层直径。所以，稀土金属中的传导电子担当了中介，将相邻的稀土原子磁矩耦合起来。这就是著名的 RKKY 型间接交换作用。直接交换作用的特征长度为 1—3Å；间接交换作用可以长达 10Å 以上。注意到，10Å 已经是实验室中人工微结构材料可以实现的尺度。所以 1970 年代之后，科学家就探索人工微结构中的磁性交换作用。1988 年，科学家上述的“好奇心导致了”巨磁电阻的发现。

实际上，多年以来，德国尤利希（Jülich）科研中心的物理学家彼得·格伦贝格一直致力于研究铁磁性金属薄膜上表面和界面的磁有序状态。研究对象是一个三明治结构的薄膜：两层厚度约 10nm 的铁

层之间夹有厚度为 1nm 的铬层。选择这个材料系统并不是偶然的。首先，金属铁和铬都是周期表上相近的元素，具有类似的电子壳层，容易实现两者的电子状态匹配。其次，金属铁和铬的晶格对称性和晶格常数相同，它们之间晶格结构也是匹配的。显然，这两类匹配非常有利于基本物理过程的探索。但是，很长时间以来制成的三明治薄膜都是多晶体。格伦贝格和很多研究者一样，并没有特别的发现。直到 1986 年，他采用了分子束外延（MBE）方法制备的薄膜。样品成分还是铁—铬—铁三层膜（三明治结构），不过样品已经是结构完整的单晶^[1]。在此金属三层膜上利用光散射以获得铁磁矩集体运动（自旋波）的信息。实验中逐步减小薄膜上的外磁场，直到取消外磁场。他们发现：在铬层厚度为 8Å 的铁—铬—铁三明治中，两边的两个铁磁层磁矩从彼此平行（较强磁场下）转变为反平行（弱磁场下）。换言之，对于非铁磁层铬的某个特定厚度（这里是 8Å），没有外磁场时，两边铁磁层磁矩是反平行的，见图 1。这个新现象成为随后巨磁电阻（GMR）效应出现的前提。

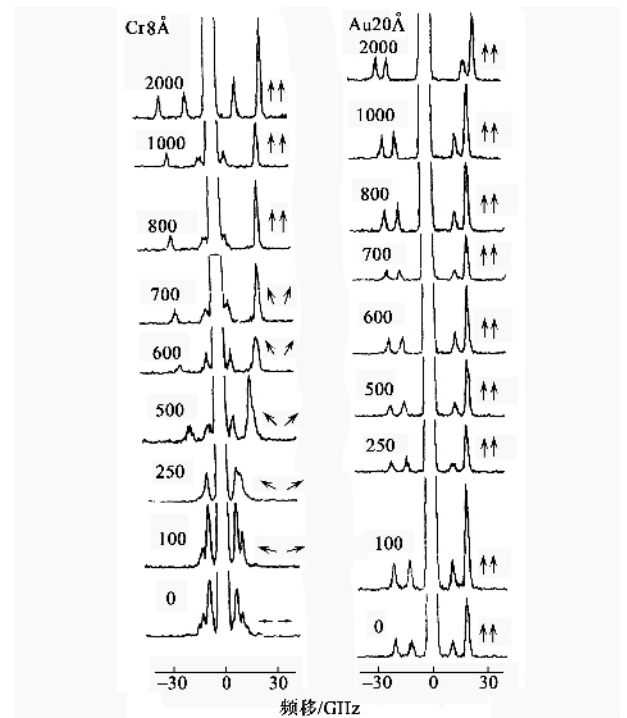


图 1 薄膜三明治结构的光散射谱（左边图示铁—铬—铁样品中的铬层厚度为 8Å，右边图示铁—金—铁样品中的金层厚度为 20Å。外磁场沿着铁的易磁化轴。图中数字表示外磁场强度，单位是 Oe。图中的箭头表示从实验分析得到的两个铁层磁矩的方向）

既然磁场可以将三明治两个铁磁层磁矩在彼此平行与反平行之间转换，相应的物理性质会有什么

变化?格伦贝格接下来发现:两个磁矩反平行时对应高电阻状态;平行时对应低电阻状态.这个电阻的差别高达 10%^[2].物理学界知道,150 年前(1857 年),著名英国物理学家开尔文勋爵在铁磁性金属中,就测量到磁场引起的电阻变化.其变化率在 3% 到 5% 之间^[3].格伦贝格将新的 10% 变化率结果写成论文,投稿的日期是 1988 年 5 月,发表日期却是第二年 3 月.与此同时,他申请了将这种效应和材料应用于硬盘磁头的专利.专利获利颇丰则是后话.当时的申请需要一定的胆识.因为铁-铬-铁三明治上出现大磁电阻效应所需磁场高达上千奥斯特(Oe),远高于硬盘上磁比特单元能够提供的磁场.但日后不断改进的结构和材料,却成就了物理学中的又一段佳话.

另一方面,1988 年巴黎南大学(Orsay)固体物理实验室物理学家阿尔贝·费尔的小组将铁、铬薄膜交替制成几十个周期的铁-铬超晶格,也称为周期性多层膜.他们发现:当改变磁场强度时,超晶格薄膜的电阻下降近一半,即磁电阻比率达到 50%.他们称这个前所未有的电阻巨大变化现象为巨磁电阻(giant magnetoresistance,简称 GMR),并且恰当地指出,GMR 现象物理机制的渊源是莫特(英国物理学家 N. F. Mott,1977 年诺贝尔物理学奖得主)早年提出的“两电流模型”^[4].显然,周期性多层膜可以被看成是若干个格伦贝格三明治的重叠,所以,德国和法国的两个独立发现实际上是同一个物理现象.

人们自然要问:在其他过渡金属中,这个奇特的现象是否也存在?IBM 公司 Almaden 研究中心的斯图尔特·帕金(S. S. P. Parkin)给出了肯定的回答^[5].1990 年,他首次报道:除了 Fe/Cr 超晶格,还有 Co/Ru 和 Co/Cr 超晶格也具有巨磁电阻效应.更令人惊讶的是,随着非磁层厚度增加,上述超晶格的磁电阻值振荡下降,见图 3.他写道^{[5]b}“在 3 种不同的金属超晶格结构中,随着非磁层厚度的变化,磁电阻和交换耦合值出现了振荡现象,表明是这类系统的普遍现象.可能的解释就是,铁磁层之间的交换作用是 RKKY 类型的.中介就是 Cr 和 Ru 中自旋极化电子”.在随后的几年,帕金和世界范围的科学家在过渡金属超晶格和金属多层膜中,找到了 20 种左右具有巨磁电阻振荡现象的不同体系.在本节开始时我们指出过,在自然界中,稀土金属中的交换作用是 RKKY 类型.现在,在人工结构中,帕金也找到了 RKKY 交换耦合.

帕金的发现在技术层面上特别重要.首先,他的

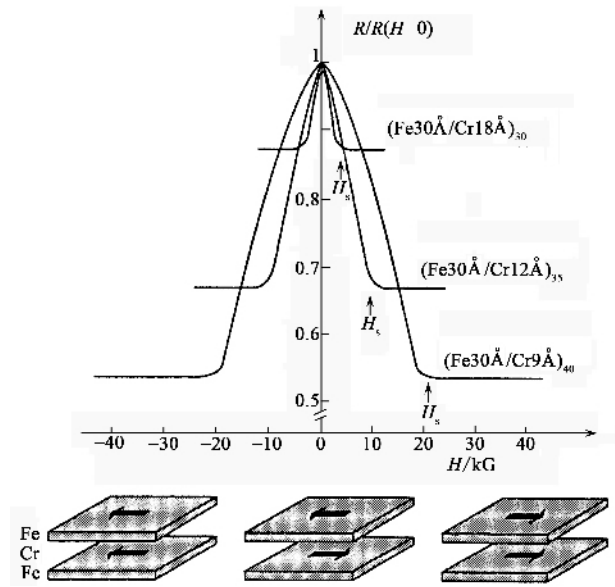


图 2 3 个 Fe/Cr 超晶格在 4.2K 低温下的磁电阻实验曲线(括号内标记单层膜厚度,括号外是超晶格的周期数,下方示意图表示外磁场下两个铁层磁矩的相对取向)

结果为寻找更多的 GMR 材料开辟了广阔空间.最后人们的确找到了适合硬盘的 GMR 材料.另外,帕金采用较普通磁控溅射技术,代替过分精密的 MBE 方法制备薄膜.目前这已经成为工业生产多层膜的标准.磁控溅射技术克服了物理发现与产业化之间的障碍.但是,诺贝尔奖颁奖名单中没有他.

2 自旋极化电流

何谓电子的自旋极化?实验证明,电子的自旋具有两种可能的取向.在绝大多数材料中,这两种自旋取向的电子数目没有差别.但是,量子力学的交换作用导致某些元素(如过渡金属铁、钴、镍)的 d 壳层中,两种自旋取向的电子数目不同.这个差别就是这些原子固有磁矩的来源(铁磁金属中轨道角动量淬灭),这被称为 d 壳层电子的自旋极化.

用电子能带的表述更方便.因为电子的向上自旋和向下自旋数目不同,可以将能带再分成向上自旋子带(majority)和向下自旋子带(minority).以金属钴为例:在 3d 能带中,向上自旋子带平均每个原子占有 5 个电子,空穴数为零;向下自旋子带平均占有 3.3 个电子,空穴数为 1.7.而 s 电子的两个自旋子带上平均占有电子数几乎相等,都是 0.35.

过渡金属中的电导与费米能级上电子状态有关.费米能级上有两类电子:一类是巡游性强的 s 电子,它的能带宽,有效质量接近自由电子;另一类是

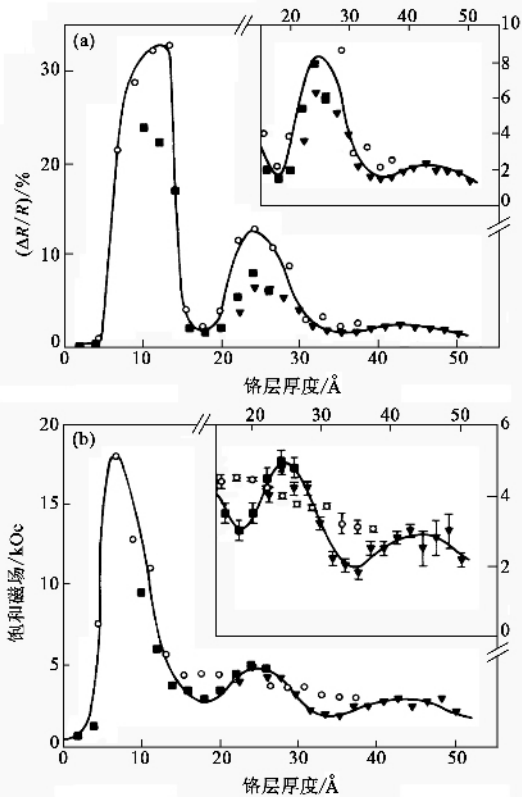


图3 (a)饱和磁电阻和铬层厚度的关系 (b)饱和磁场与铬层厚度的关系。测量温度为 4.2K, 在 Fe/Cr 超晶格中, Fe 的厚度为 2nm。▼, ■表示样品的周期为 30, 镀膜温度为 40°C。○表示样品的周期为 20, 镀膜温度为 125°C

比较局域的 d 电子, 其能带窄, 有效质量大于自由电子, 所以, 电流主要由 s 电子传递。但是, s 电子态密度远小于 d 电子。因此, s-s 电子间散射过程可以忽略, s-d 电子间散射过程才是主导的机制。注意到铁磁金属 d 电子的两种自旋取向的电子数目不同。散射过程必须保证自旋守恒, s-d 电子散射过程就与电子间自旋的相对取向有关, 这个过程称为自旋极化的电子输运过程。

以上就是 1936 年 N. F. Mott 提出的过渡金属电子输运的物理模型^[6]。在他与 H. Jones 合著的名著“*The Theory of the Properties of Metals and Alloys*”中, 写道: “我们对过渡金属的电导率有了如下认识: 电流由 s 电子传递, 其有效质量近乎于自由电子。然而电阻则取决于电子从 s 带跃迁到 d 带的散射过程。因为跃迁几率与终态态密度成正比, 而局域性的 d 带在 Fermi 面上态密度是很大的, 这就是过渡金属电阻率高的原因。”他还指出: “这种 s-d 散射率取决于 s 电子与 d 电子自旋的相对取向”。52 年后, A. Fert 在发现 GMR 效应的论文^[4]中, 引述了 Mott 理论来解释他所观察到的现象。十多年来, 大量

事实证明, Mott 理论就是巨磁电阻和相关效应的物理基础。

首先, 在较低温度下(即远离居里温度), 电子自旋弛豫长度(即移动中电子自旋方向保持不变的距离)远远大于平均自由程。因此, 在讨论电子输运过程(电阻行为)时, 假定散射过程中移动的电子自旋方向保持不变是合理的。于是将电子按照自旋取向(向上或向下)分成两类处理, 这就是所谓的“两电流模型”。总电流是两类自旋电流之和; 总电阻是两类自旋电流的并联电阻。其次, 为了具体讨论 s-d 散射的自旋相关现象, 可以假定传导电子(s)与局域电子(d)自旋彼此反平行时的散射强度, 远大于平行时的散射强度, 如图 4 所示。

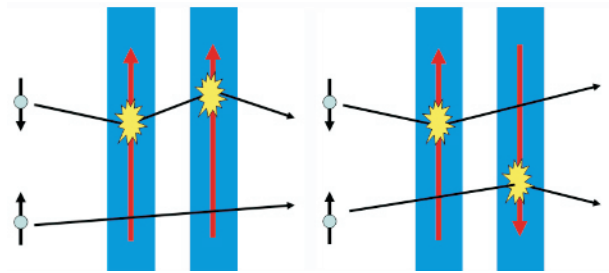


图4 铁磁-非磁-铁磁三明治中的传导电子散射过程示意图 (长的箭头表示铁的同域自旋, 短的箭头表示传导电子的自旋)

当相邻铁磁层平行时(图 4 左边), 向上自旋 s 电子与局域 d 电子的自旋彼此平行, 几乎不受到散射, 但是向下自旋 s 电子与局域 d 电子的自旋彼此反平行, 在两层中均受到强烈散射。这样, 作为并联电路的总电阻就近似于较小的分路电阻(有时称为短路电阻), 这是低电阻状态。当相邻铁磁层反平行时(图 4 右边), 向上自旋的 s 电子, 虽然在左边铁磁层几乎没有受到散射, 但是在右边铁磁层就受到强烈散射。向下自旋的 s 电子的境遇类似。这样, 作为并联电路的总电阻就等于其中分路电阻的一半, 这是高电阻状态。如果两个自旋相关的散射率的差别越大, 那么两种自旋状态的电阻差别就越大。巨磁电阻效应就是这种情况。

Mott 的上述推测可以说明很多物理现象。1975 年, 法国 Rennes 大学的 Julliere^[7]采用铁/半导体锗/钴三层膜, 两个铁磁膜形成电极。测量电子通过半导体位垒 Ge 的隧穿电流。他发现, 铁磁电极的磁矩平行和反平行状态对应的电导相差 14%(低温 4.2K)。这就是最早的隧穿磁电阻(tunneling magnetoresistance, 简称 TMR)效应。20 年后, 1995 年日本科学家宫崎照宣报道了在室温下隧穿磁电导的相对变

化达到 18%。同年美国 MIT 研究组也报道了类似结果^[8]。这是继 GMR 效应之后重大的进展。

3 硬盘的高速发展

硬盘怎样工作？计算机采用二进制（0 和 1）处理信息。凡是具有两个物理状态的体系，都可以用作存储器。最有效的当数由 IBM 公司的约翰逊（Reynold Johnson）发明的硬盘系统，至今已有 50 年。计算机的硬盘由磁盘片和磁头两部分组成。前者存储信息，后者写入和读出信息。磁盘片上的涂敷层含有大量微小细长的磁性颗粒。每个颗粒都是一个具有南北两极的小磁铁。从半导体芯片处理器输出的“0”或者“1”电脉冲，通过记录磁头将盘片某个局部磁化。即该局部的若干磁性颗粒排列成了极性的指向相反的两个状态之一（与电脉冲一一对应）。这是记录过程。这些被磁化（即被记录）了的小磁铁组带有的弱磁场也具有两类不同方向。传统的读出磁头是一个线圈。读出的原理是：用这个读出线圈扫过某一个已记录的磁位（即被输入信号磁化的微细磁性颗粒组）附近，目的是切割该小磁铁组所带的弱磁场，从而在线圈中产生感生电动势。这个被“读出”的感生电动势也有正或负，对应于“0”或者“1”。感生电动势的强度正比于线圈内磁通量的变化速率。随着记录密度提高，在同样尺寸的磁盘片上，比特长度（即微细磁性颗粒组的体积）就要相应减小。于是，磁颗粒组产生的磁通量降低，磁通量变化的绝对值也下降。为了得到足够强度的“读出”信号，只能提高磁通量的变化速率。这就要求硬盘提高旋转速度。这样一来，读出磁头与盘片间相对速度过快，造成读出磁头探测被记录信息的动作相当于“走马看花”，误码率大大增加。

为什么 GMR 能够解决高密度存储的难题？GMR 磁头的“读出”原理并不是电磁感应效应，而是磁电阻效应：被磁化（记录信息）的微细磁颗粒组所带的弱磁场，直接导致读出磁头元件的电阻变化。这个过程与磁头和硬盘之间的相对速度无关。幸运的是，在非常薄的磁性层制作的磁头元件中，GMR 效应为其提供了“巨大”的电阻变化率。

技术方面的优点也很明显。为实现高密度存储，应该保证在硬盘当中具有极小的磁颗粒、极小的磁头、极小的磁盘片与磁头的间隙。以面密度为每平方英寸 100Gbits 的商品硬盘为例，其中一个比特的长度只有 40nm，GMR 磁头的工作层厚度可以小到

3nm，自重极轻的 GMR 磁头与磁盘面的间隙为 10nm，满足上述高密度存储的条件。这些都是感应线圈读出磁头根本无法做到的。

应该说，1988 年格伦贝格在 GMR 效应发现之初申请专利时，为驱动铁-铬-铁三明治所需的磁场高达上千奥斯特，远高于硬盘上已被记录的磁单元提供的磁场。换言之，即当时的 GMR 三明治和多层膜的磁场灵敏度都不够高。注意到帕金的发现，随着非磁性层厚度的增加，相邻铁磁层间耦合场大幅度下降，但 GMR 值下降幅度较小。在镍铁-铜-镍铁三明治结构中，选择适当的非磁性层的厚度，铁磁层间的耦合场下降到几乎为零；但是，GMR 比率只是稍有下降。如此一来，磁场灵敏度大为提高。还是在 IBM 公司 Almaden 研究中心，狄尼和帕金等人根据这个思路发明了所谓“自旋阀（spin valve）”结构，充分发挥了巨磁电阻在弱磁场下变化巨大这一特点^[9]。时至今日，自旋阀结构仍被广泛采用。

在自旋阀结构中（见图 5），上面的铁磁层磁矩极易转动，被称为自由铁磁层。磁矩极易转动的原因是它与下面铁磁层距离较远（2.6—2.9nm），所以相互之间的耦合场几乎为零。下面的铁磁层与较厚的反铁磁金属薄膜层（如 FeMn，PtMn，IrMn 等）相邻，两者的磁矩之间通过界面交换作用耦合在一起。也就是说，下面铁磁层磁矩被反铁磁层磁矩“钉扎”了。这个等效的钉扎磁场约为几百高斯，远大于硬盘上写入的磁单元提供的磁场。在读出信号过程中，下面的铁磁层磁矩不能转动。工作时，硬盘上记录（写入）的磁比特的正方向或反方向弱磁场，很容易驱动上面自由铁磁层磁矩转动，下面的被钉扎铁磁层的磁矩不动，从而实现了两个铁磁层磁矩的彼此平行或反平行状态，得到低的或高的磁电阻（以及相应的电压信号）。

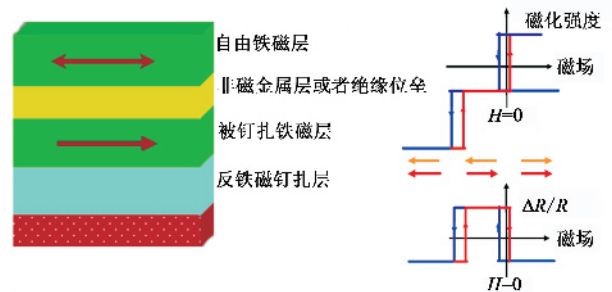


图 5 左边是自旋阀结构的示意图（铁磁层之间采用非金属材料时，称为 GMR 自旋阀，采用非磁绝缘层时称为 TMR 自旋阀）；右边给出磁化强度和磁电阻的特征

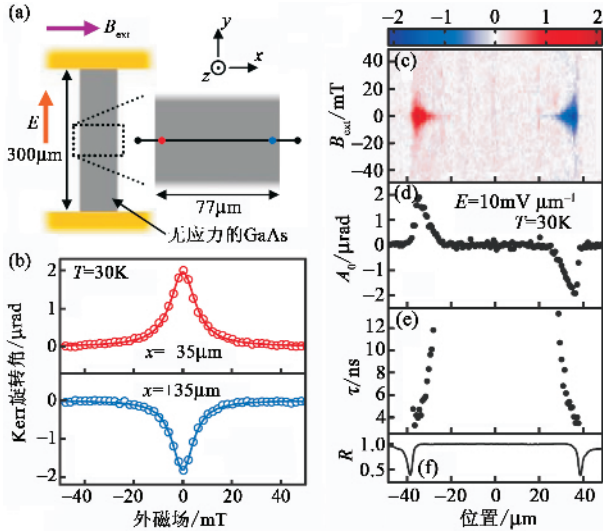


图6 砷化镓(GaAs)上的自旋霍尔效应(温度为30K)(a)GaAs样品实验几何示意图(b)曲线是Kerr旋转角作为外磁场的函数,其中上半图是样品左端的正Kerr旋转角(即 $x = -35\mu\text{m}$ 处),下半图是样品右端的负Kerr旋转角(即 $x = +35\mu\text{m}$ 处);(c)Kerr旋转角作为位置和外磁场的函数(d)和(e)分别是Kerr旋转角的峰值和自旋寿命与位置的关系(f)反射率的位置分布

4 自旋电子学

巨磁电阻效应发现之后,探索性能更好的GMR材料就成为焦点.科学家期待在新材料(主要为人工结构)中发现新的物理现象.虽然,GMR和TMR,在物理、材料和器件方面已经取得巨大成功,不足之处还是明显的.突出的两点是:第一,常用的铁磁材料的自旋极化率较低;第二,金属中电子的平均自由程较短(几十纳米).

怎样提高铁磁材料自旋极化率?能否将GMR的效率进一步提高?目前,研究者关注一类称为“半金属磁体”(half-metallic magnets)的材料.这种材料的理想电子状态是:Fermi能级从一个自旋子带中通过,对另一个自旋子带而言,Fermi能级则处在能隙中.结果是,前一种自旋电子处于巡游金属态,而另一种自旋电子则处于局域性绝缘态,此时自旋极化率达到最大.当然,这种材料的其他性质是否合适尚待进一步研究.其次,怎样增大电子的平均自由程?能否将GMR物理推广到电阻以外的领域?为此,很多人在探索兼具铁磁性和半导体性的材料,因为后者的平均自由程很高.实际结果尚不乐观.为了得到室温铁磁性材料,电子的浓度要尽量高.但是,作为半导体就会造成迁移率大大降低.显然,两个重要物理特性之间存在矛盾.

巨磁电阻效应最为特别的是,电子自旋取向对于电流的影响非常强烈.但是,无论GMR还是TMR都属于电阻类的性质.那么,自旋对于电子输运过程的影响是否仅仅限于电阻?是否可以如电子电荷一样传递信息?过去,在主流电子学中,自旋往往被忽略了.2001年,自旋电子学(spintronics)这一概念被正式提出^[10].其内容包括,载运信息的电子自旋怎样被注入器件、在其中传输、放大、振荡、控制和最后检出.类似于半导体电子学中的电荷.

研究者期望净自旋电流的振幅和位相,能够较容易地被电压或磁场控制.问题是选择什么材料和什么物理途径来实现这些功能?以目前的技术水平而言,制备的各种薄膜电子器件的功能结区的尺寸(记为 D)一般在 $0.1\mu\text{m}$ 至 $1\mu\text{m}$ 范围.半导体中电子的平均自由程(λ)范围在 $1\mu\text{m}$ 至 $10\mu\text{m}$.这种情况下有 $D < \lambda$,电子在器件中的行为表现为弹道型.用它很容易做成弹道型器件,例如放大、振荡、操纵和检测器件.可是,在金属中电子的平均自由程(λ)范围在 30nm 至 60nm .这种情况下有 $D > \lambda$,电子在器件中的行为是扩散型的.以磁性金属为主的器件,显然是扩散型的.并不能完成信号被放大、振荡、操纵等功能.我们当然希望电子在器件中的行为表现为弹道型,这才是名副其实的电子学.所以,单纯的磁性金属不可能制成晶体管之类的器件.可是,寻找铁磁和半导体性共存材料的任务还有长路要走.目前,一种做法是:以铁磁金属为自旋极化的电流源,将其“注入”到半导体中.然后进行放大、处理和.可惜的是,铁磁-半导体界面的自旋翻转散射损失了载流子(电子)的大部分自旋极化度.

目前,最被看好的是所谓“自旋霍尔效应”.理论物理学家指出^[11]:很多半导体的载流子都具有自旋-轨道耦合作用.如果在该半导体上施加纵向电场,将会在该样品上产生横向自旋流.即向上自旋和向下自旋的电子,会分别沿横向朝相反的方向流动.这个流动就导致在横向积累具有不同取向自旋的电子.自旋霍尔效应诱导出的自旋电子流或许可用作自旋注入.因为自旋电子流是从半导体内部产生的,并不存在界面电导率不匹配的问题.

Kato等人^[12]在半导体薄膜上实现了一个自旋霍尔效应(图6).实验对象是一个半导体二维电子系统.在样品的长方向通过电流,然后利用克尔旋转(Kerr rotation)效应探测效果.当一束偏振激光照射到薄膜上某个位置,如果该位置存在“自旋极化”(即自旋有序),偏振面就会旋转.旋转的角度取决

于自旋与偏振方向的夹角. 施加一个变化的外磁场, 以改变自旋方向, 克尔旋转角就会跟着改变. 这个磁场仅仅为了便于效应的显示而已. 接着, 移动入射激光束斑到薄膜的下一个位置继续测量. 实验发现, 在样品的两个边缘($-35\mu\text{m}$ 和 $+35\mu\text{m}$ 处), 克尔旋转角数值很大, 且符号相反. 表明薄膜样品的横向上, 一边积累了自旋向上的电子; 另一边积累了自旋向下的电子. 这就是自旋霍尔效应.

参 考 文 献

[1] Grünberg P, Schreiber R, Pang Y *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1986 61 :2442
 [2] Binasch G, Grünberg P *et al.* Phys. Rev. B, 1989 39 4828
 [3] Thomson W. Proc. Roy. Soc. , 1857 8 546
 [4] Baibich M N, Broto J M, Fert A *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1988 ,61 2472

[5] Parkin S S P, More N, Roche K P. Phys. Rev. Lett. , 1990 , 64 2304
 [6] Mott N. Proc. Roy. Soc. , 1936, A153 : 699 ; Mott N F, Jones H. The Theory of the Properties of Metals and Alloys. London :Oxford University Press , 1936[中译本 :Mott N F, Jones H 著, 付正元, 马元德译. 金属与合金性质的理论. 北京 :科学出版社, 1958]
 [7] Julliere M. Phys. Lett. , 1975 54 A :225
 [8] Miyazaki T *et al.* J. Magn. Magn. Mater. , 1995 , 151 : 403
 Moodera J S *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1995 , 74 :3273
 [9] Diény B *et al.* Phys. Rev. B , 1991 , 43 1297
 [10] Wolf S A *et al.* Science , 2001 294 1488
 [11] Murakami S, Nagaosa N, Zhang S C. Science , 2003 , 301 : 1348 ; Jairo S, Dimitrie C, Niu Q *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2004 , 92 , 126603
 [12] Kato Y K, Myers R C, Gossard A C *et al.* Science , 2004 , 306 :1910

· 书评和书讯 ·

科学出版社物理类新书推荐

书名	作(译)者	定价	出版日期
高磁场超导磁体科学	王秋良	(估)68.00	2008年1月
聚变能及其应用	邱励俭	96.00	2007年12月
飞艇技术	G. A. 库利 J. D. 吉勒特 著/王生 译	80.00	2007年12月
拉曼 布里渊散射(第二版)	程光照	98.00	2007年12月
现代物理学前沿选讲	黄祖洽	36.00	2007年9月
碳纳米管的原子模拟和连续体描述	韩强 姚小虎	42.00	2007年9月
半导体的检测与分析(第二版)	许振嘉	98.00	2007年8月
薄膜结构 X 射线表征	麦振洪等	40.00	2007年7月
电磁波述论	盛新庆	38.00	2007年7月
大气声学	杨训仁 陈宇	52.00	2007年6月
d 波超导体	向涛	48.00	2007年5月
场论中的路径积分导引(影印)	U. Mosel	45.00	2007年4月
表面物理原理(影印)	F. Bechstedt	58.00	2007年4月
半导体光学(第三版)(影印)	C. F. Klingshim	118.00	2007年4月
自组织纳米材料(影印)	Motonari Adachi D. J. Lockwood	56.00	2007年4月
远程通信中的非线性光学(影印)	T. Schneider	68.00	2007年4月
物理学中的拓扑和几何(影印)	E. Bick F. D. Steffen	65.00	2007年4月
量子光学——降噪 囚禁离子, 量子路径和退相干(影印)	M. Orszag	58.00	2007年4月
光学与激光——光纤与光波导(第五版)(影印)	M. Young	79.00	2007年4月
飞秒激光脉冲——原理及实验(第二版)(影印)	C. Rulliere	68.00	2007年4月
薄膜材料——应力、缺陷的形成和表面演化	卢磊	86.00	2007年1月
亚稳金属材料	胡壮麒	160.00	2006年12月
高等原子分子物理学(第二版)	徐克尊	54.00	2006年9月
半导体异质结物理(第二版)	虞丽生	52.00	2006年5月

凡购书者免邮费, 请按以下方式联系我们:

电 话 010-64017957 64033515 电子信箱: mlhukai@yahoo.com.cn yandeping@cspg.net

通讯地址 北京东黄城根北街16号 科学出版社 100717 联系人: 胡凯 鄢德平

主页 <http://www.sciencep.com>