

自旋——21 世纪信息的新载体

Spin——A New Carrier of Information in the 21st Century

朱 涛

(中国科学院物理研究所磁学国家重点实验室 北京 100080)

电子既是电荷的载体, 同时又是自旋的载体。以研究、控制和应用半导体中数目不等的电子和空穴(或多数载流子和少数载流子)的输运特性为主要内容的微电子学是 20 世纪人类的文明和发展的最重要的推动力之一。众所周知, 在这里电子的输运过程仅利用它的荷电性由电场来控制, 自旋状态并没有被考虑。但是, 从上个世纪 90 年代以来, 科学家发现人类同样可以利用电子的自旋来操纵它的输运过程, 这正是磁学研究的最新前沿——自旋电子学所要研究的主要内容。进入 21 世纪, 越来越多的利用自旋电子学制造的相关器件正一步步走入人们的日常生活, 有理由相信自旋将会像电荷一样在 21 世纪里造福人类。

自旋电子学是以研究介观和微观尺度范围内自旋极化电子的输运特性(包括自旋极化、自旋相关的散射与自旋弛豫)以及基于它的这些独特性质而设计、开发的在新的输运机理下工作的功能器件为主要内容的一门新的交叉学科。

一、自旋极化输运的物理机制

对于普通非磁金属, 电子的自旋是简并的, 所以不存在净磁矩, 而费密面附近的电子态对于自旋向上和向下当然也是完全一样的, 因而输运过程中电子流具有同样数量的自旋向上和向下, 即是自旋非极化的。不过, 对于铁磁过渡金属来说, 其 3d 电子在费密面附近将具有非常大的态密度, 倘若继续保持自旋简并, 基态能量非常高。为了降低系统的能量, 可将自旋向上的子带与自旋向下的子带发生相对位移, 这样不同自旋子带之间的交换作用能大大减小了, 系统的能量得以下降。以上由于交换作用而使自旋向上的子带与自旋向下的子带发生相对位移的现象被人们称为“交换劈裂”。交换劈裂形成的自旋向上的子带(多数自旋)和自旋向下的子带(少数自旋)中占据电子总数之差正比于它的磁矩。铁磁过渡金属自发磁化的这一能带模型是由 20 世纪 30 年代 Stoner、Slater 和 Mott 等人开创性的工

作奠定的。从铁磁过渡金属的能带结构, 还可以看到由于交换劈裂, 费密面处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, 必定不同于普通非磁金属, 是部分自旋极化的。这就是铁磁金属中自旋极化的起源, 也是自旋电子学的研究基础。下面介绍的几种常见的磁电阻效应亦源于此。

另一方面, 对于普通非磁金属, 电子的散射主要是自旋简并的 s 电子之间的散射(铜和贵金属金、银等自旋简并的 d 带大都处于费密面以下, 亦属于 s 金属), 电子的平均自由程较大, 由 Drude 定理 $\sigma = ne^2\tau/m$ 可以非常容易地估计出金属良导体的电子平均自由程为 100Å 左右。而铁磁金属铁、钴和镍不同于普通金属的 s 电子散射, 由于在费密面处同时存在电子和态密度很大的 d 电子, 在输运过程中, 传导电子要经受比 s 电子散射强烈得多的 s-d 散射, 因而这里传导电子的平均自由程要小得多, 更有意思的是, 由于自旋向上的 3d 子带(多数自旋)与自旋向下的 3d 子带(少数自旋)在费密面处的态密度不等, 散射的大小对不同自旋的传导电子将不一样, 所以自旋向上的电子的平均自由程($\lambda^{\uparrow}$)与自旋向下的电子的平均自由程($\lambda^{\downarrow}$)也不一样。Mott 早在 1936 年就提出了以上自旋相关的散射的理论, 1993 年 IBM 公司的 Gurney 等人首次直接测量了铁、钴、坡莫合金的自旋向上和向下电子的平均自由程, 其结果是钴: $\lambda^{\uparrow} = 55\text{Å}$, $\lambda^{\downarrow} = 6\text{Å}$; 坡莫合金: $\lambda^{\uparrow} = 46\text{Å}$, $\lambda^{\downarrow} = 6\text{Å}$ 。这一点对于巨磁电阻效应是至关重要的。

二、几种常见的磁电阻效应

1. 各向异性磁电阻效应 (AMR) 铁磁金属输运特性受磁场影响的现象人们早在 100 多年前就作过相当仔细的观测, Thomson 于 1857 年就发现了各向异性磁电阻效应 (AMR), 即磁场方向(也就是磁化方向)平行于电流方向的电阻率 $P_{\parallel}$ 与磁场方向垂直于电流方向的电阻率 ρ 发生变化的效应。低温 5K 时铁、钴的各向异性磁电阻值约为 1%, 而坡莫

合金($\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$)为15%;室温下坡莫合金薄膜的各向异性磁电阻值仍有2.5%。各向异性磁电阻效应尽管数值不大,但它在磁电子学发展的过程中都扮演着不可或缺的历史角色,目前市场上几乎所有的实用磁电阻器件都还是各向异性磁电阻材料的产品。当然,各向异性磁电阻效应在室温下毕竟还是太小。磁电阻器件的输出信号与磁电阻值成正比例关系。数值比各向异性磁电阻值大一个数量级以上的巨磁电阻效应的发现,真正标志着自旋电子学的诞生。

2. 磁性多层膜的巨磁电阻效应(GMR) 上世纪80年代以来,金属超晶格薄膜成为人们十分感兴趣的研究前沿。1988年Baibich等人在(100) Fe/ Cr/ Fe₃层膜和(Fe/ Cr)超晶格中发现当Cr层的厚度为9Å时,在4.2K下20kOe的外磁场可以克服反铁磁层间耦合而使相邻Fe层磁矩方向平行排列,而此时电流方向平行于膜面的电阻率则下降至不加外磁场(即相邻Fe层磁化矢量反平行排列)时的一半,即电阻值随磁场的变化的磁电阻值高达100%,故命名为巨磁电阻效应(GMR)。在随后的几年中,陆续发现在由各种铁磁层(Fe、Ni、Co及其合金)和非磁层(包括3d、4d以及5d非磁金属)交替生长而构成的磁性多层膜中,许多都具有巨磁电阻效应,其中尤以多晶(Co/ Cu)多层膜的磁电阻效应最为突出,在低温4.2K和室温时的GMR值分别为130%和70%,所加饱和磁场约为10kOe。不同于各向异性磁电阻效应,磁性金属多层膜的巨磁电阻效应与磁场的方向无关,它仅依赖于相邻铁磁层的磁矩的相对取向。当相邻铁磁层的磁矩反铁磁耦合时,在一个铁磁层中受散射较弱的电子进入另一铁磁层后必定遭受较强的散射,即所有电子都遭受较强的散射;而当相邻铁磁层的磁矩在磁场的作用下趋于平行时,自旋向上的电子在所有铁磁层中均受到较弱的散射,相当于自旋向上的电子构成了短路状态,这就是著名的基于Mott的二流体模型对巨磁电阻效应的简单解释。

但是,在通常的磁性多层膜中存在较强的层间交换耦合,巨磁电阻效应必须在非常高的饱和外磁场(通常10至20kOe)才能达到,因此这样的磁性金属多层膜的磁电阻灵敏度非常小,于是科学家提出一种称为自旋阀的结构,即通过各种人为方式使不存在交换耦合(或交换耦合很小)的相邻铁磁层的磁矩在一定的磁场下从平行排列到反平行排列或从反平行排列到平行排列来获得巨磁电阻效应。在自旋阀中,被非磁层分开的两铁磁层之一通常用反铁磁层(如FeMn、IrMn、NiO等)通过交互作用钉扎。由于铁磁层之间没有或仅有非常小的交换耦合,未被钉扎的低矫顽力的铁磁层在较小磁场的作用下,其磁矩能够比较自由地反转,这样便在较小的磁场

下使系统的电阻变化很大,从而使其磁电阻的灵敏度提高。目前,巨磁电阻效应的应用设计大都采用自旋阀结构。

3. 隧道磁电阻效应(TMR) 1975年Slonczewski提出磁隧道结(MTJ)的设想。他认为,对“磁性金属/非磁绝缘体/磁性金属”(FM/I/FM)的隧道结来说,其隧道电导必然与两电极的磁化方向平行时的电导有所差别。随后,Julliere即发现了Fe/Ge/Co隧道结的隧道电导与两铁磁层磁化矢量的相对方向有关,变化的大小称为隧道磁电阻,在4.2K时约为14%,理论上决定于两铁磁层的自旋极化率,即定量表征铁磁金属中费密面处自旋向上与自旋向下的电子态密度不同程度。1994年以后对“铁磁金属/非磁绝缘体/铁磁金属”磁隧道结的研究有了突飞猛进的发展,例如在Fe/Al₂O₃/Fe和CoFe/Al₂O₃/Co组成的三明治结构中发现其隧道磁电阻值在室温下可达18%;1995年在G₂Al₂O₃颗粒膜中同样发现了类似的隧道磁电阻效应。目前隧道磁电阻的研究已开始进入实用化阶段,在大隧道磁电阻值(室温可达50%)和低结电阻(室温下为1kΩ·μm²量级)的研究中都取得了长足的进步,使得以磁隧道结为基础的MRAM和磁盘读写头即将进入实用阶段。

4. 庞磁电阻效应(CMR) 庞磁电阻效应是1994年在类钙钛矿氧化物中发现的。对这类金属氧化物铁磁体来说,如掺杂二价离子的类钙钛矿La-Ca-Mn-O、CrO₂等,电子可以经过氧离子在相邻的磁性阳离子之间进行跳跃。这样的跳跃电子的磁矩由于受洪特规则的限制在每个阳离子位必须与其局域磁矩平行排列,因而居里温度以下铁磁性与金属性并存,而在居里温度以上则是绝缘体性。因此在居里温度附近,当外磁场变化时就会表现出超大的磁电阻效应。目前对于这类金属氧化物铁磁体的庞磁电阻效应的理论机制还不清楚,仍是当前磁学,乃至凝聚态物理研究的前沿。另外,这类金属氧化物铁磁体的导带完全由一种自旋的电子组成,因而又称为半金属材料。在理想状态下输运过程中的电子流是完全自旋极化的,这些完全极化的半金属铁磁体是实现更大的隧道磁电阻效应的重要候选材料。

三、自旋电子器件的实例

自从各种磁电阻效应发现以来,科学家就逐步利用这一效应在电路中产生随磁场变化的高、低电位,从而实现电路控制或信息记录,可用于磁传感器、读出磁头和磁随机存取存储器。比如,利用磁电阻效应的位移传感器可用于数控机床、非接触开关;角度传感器可用于汽车测速与控速及旋转编码器等。所有这类磁电阻传感器具有灵敏度高、功耗

小、体积小、可靠性高、耐恶劣环境能力强等一系列优点。1971 年 Hunt 提出可以利用铁磁金属的各向异性磁电阻 (AMR) 效应来制作磁盘系统的读出磁头, 在随后的 20 多年里, 这样一个数值不大的磁电阻效应 (坡莫合金薄膜的各向异性磁电阻值室温时仅为 2.5% 左右) 却对计算机磁存储技术产生了深刻的影响。1994 年 IBM 公司宣布利用 GMR 研制成硬磁盘读出磁头的原型, 将磁盘系统的记录密度提高 17 倍, 达 $10^{10}\text{bit}/\text{in}^2$ 数量级, 超越现有光盘的记录密度, 是计算机电子工业的重大突破, 目前已广泛用于数十 G 的大容量的硬盘中。

从超高密度磁盘读出磁头的制作, 到磁随机存取存储器 (MRAM) 的研制, 直至全金属自旋晶体管和全金属计算机的探索, 自旋电子学就是在这样的研究热潮中迅速地丰富着它的内涵, 同时不断地拓展它的应用。下面将以 MRAM 和自旋晶体管为例, 介绍两种有着诱人发展前途的自旋电子器件。

1. 磁随机存取存储器 (MRAM) 简单地说, MRAM 是利用磁性材料的不同的磁化状态存储信息 (如同所有磁记录方式一样), 同时通过磁电阻效应读出该信息的一种新型随机存储器。磁随机存储器由于磁性材料所固有的特点使之具有非破坏性读出信息、耐辐射及信息非易失性等许多新特点。由于起初各向异性磁电阻值较小, 最早的 MRAM 速度慢、密度低, 无法与半导体 DRAM 相比拟, 巨磁电阻效应的发现使之有了坚实的后盾并使之立刻得以神速发展。还有 MRAM 的制作工艺可以沿用成熟的半导体集成电路制作工艺, MRAM 将在未来电子学的发展中, 尤其在一些特殊领域, 如军事领域中发挥其独特的作用。

早期的 MRAM 通常是由一系列基本的 MRAM 单元按一定的方式排列, 在字线 (Word line) 和感线 (Sense line) 同时作用于某一个存储单元才完成对此单元的读或写过程。比如 1994 年 Brown 和 Pohn 以 GMR 材料为记录单元的 MRAM 设计就是一例。该器件设计的详细结构及工作原理参见文献 [1], 其读操作时间为 250ns; 写操作时间为 100ns, 即写速度及面密度都差不多可与同期的半导体材料的 DRAM 相比拟。1995 年 IBM 公司的 Tang 等人提出了自旋阀型 (反铁磁材料钉扎型) 的随机存储器单元, 其开关速度在亚纳秒 (10^{-10}sec) 数量级, 这样的 MRAM 在性能和密度方面将均可与静态随机存取存储器 (SRAM) 相比拟。目前以 MTJ 为记录单元的 MRAM 设计表现出更突出的性能, 下面就以 Motorola 公司的最新 MRAM 设计为例, 对 MRAM 的读写原理作一简介^[2]。

如图 1 所示, 该设计是由一个 MTJ 和一个 CMOS 管组成一个记录单元, 由字线 (Word line)、读线 (Bit line) 和写线 (Digital line) 控制电流来控制信

息的读写过程。图 2 所示为该设计的读写模式 (Read mode)。当读取 MTJ 中自由层中的记录信息时, 由字线和读线共同作用进行读操作。此时字线提供一个 CMOS 的“开”通路, 与读线构成一个回路, 因此由 MTJ 的两个可能的电阻值就决定了流入 CMOS 的电流信号的大或小, 从而就可以读出对应于二进制信号“0”或“1”。在信息写入时, 则由“字”、“读”、“写”3 根控制电流线同时作用下才能实现。其中, 字线和读线用来寻址 (即确认记录单元), 此时第三根写线提供的“有”或“无”两种电流状态就决定了施加在记录单元上的磁场的大或小, 设计中使得当写线“有”电流通过时, 由“读”、“写”两线提供的一个叠加磁场稍大于 MTJ 的开关场, 从而能够翻转 MTJ 中自由层的磁矩, 达到信息改写的目的。值得注意的是, 这样的设计可以保证当写线中“无”电流通过时, 读线电流提供的磁场只有 MTJ 的开关场的一半, 因而能够确保读操作不会改变 MTJ 中自由层的磁矩 (即保证读操作中信息的安全)。另外, 在该设计中, 当字线不接通, 即 CMOS 处于“关”状态, 由“读”和“写”两根控制电流线同时作用可以完成信息按程序进行操作 (program mode)。美国 Motorola 公司最近设计的 MRAM 的寻址时间是 14ns、读写操作循环是 35ns、读写功耗为 24mW (工作电压为 3V 和 20MHz)。目前该公司已可以制造 256K 的 MTJ 型 MRAM, 其各项性能指标相对 GMR 型 MRAM 又有很大提高。

2. 自旋晶体管 20 世纪 80 年代 Johnson 通过铁磁金属将自旋极化的电子流不断地注入非磁金属中, 使非磁金属在自旋扩散长度范围内出现自旋积聚, 产生非平衡磁化, 导致非磁金属自旋向上和自旋向下子带的化学势产生相对位移, 于是与之相接的另一铁磁体如果是开路状态, 则必须调整其费密面以便与非磁金属相同自旋子带的化学势相平衡, 由此即将非磁金属中的这一非平衡磁化转变成电信号。这一精巧设计的实验首次成功地直接测量了自旋极化的电子在非磁金属中的自旋弛豫时间。据此 Johnson 于 1993 年还提出了“铁磁金属/非磁金属/铁磁金属”三明治结构具有双极性开关的特性, 可视作一种新型的全金属自旋晶体管, 并且还设计制作了这种自旋晶体管的雏形。自旋晶体管具有以下新特点。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, 可用电压或可用电流作为输出。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, 故自旋晶体管的性能随其尺度的减小而增强。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

(下转第 6 页)

同行专家参与重大项目从酝酿到立项的全程评估制度,这有利于选准具有国际科学前沿和创新性的课题,提高立项评估的公正性。

6. 重视科学研究基地的建设

科学研究基地是承担重要研究任务、吸引和培养优秀人才、开展国内外学术活动的实体。高水平的科研基地是产生原始性创新成果的温床。英国剑桥大学的卡文迪什实验室曾有 25 人次获得诺贝尔奖、德国的马普学会 17 人次获得诺贝尔奖,他们都是从事科学研究的基地的代表。因此,我国基础研究的原始性创新能力要得到提高,就需重视研究基地的建设。改善基础研究的条件和环境,建设一批具有国际影响和竞争力的基础研究基地,包括研究院所(基础性)、重点大学、科学研究中心、实验室、大科学工程、野外科学观测实验台站等,逐步形成符合我国国情的基地建设体系。

7. 鼓励自由探索与思想创新,营造良好的学术环境

宽松的学术环境是原始性创新发展的条件。在基础研究中,我们尤其要重视自由探索与思想创新。20 世纪,绝大部分诺贝尔奖获得者都是由于自由探索结果而获奖。例如青霉素、半导体和 DNA 双螺旋结构的发现,曾分别获 1945、1956 和 1962 年诺贝尔奖。这些研究成果在人类文明的发展中产生了历史性的巨大影响,而这一切都源于科学家的自由探索。因此,我国基础研究领域要鼓励科学家自由探索,鼓励提出创新性学术思想,为科学家创造一个宽松的学术环境,这将有助于我国基础研究原始性创新能力的提高。

8. 加强国际合作,提高我国基础研究的原始性创新能力

国际化是当代基础研究的显著特征之一。基础

研究在科学前沿全方位的拓展以及在纵向的学科分化与深入的同时,学科及领域之间的交叉、融合和相互渗透不断加强,跨地区和全球性的科学问题(如环境、资源)成为科学研究的热点,出现了许多规模巨大的大科学研究和大科学工程,以往那种单靠科学家个人探索和“小作坊”式的工作方式已不能适应当代基础研究发展的需要,必须由不同学科、不同专业和不同文化背景的科学家的广泛合作与交流,才能保持持久的创新活力和取得科学前沿的突破。

国际合作对于提高我国基础研究的原始性创新能力具有重要意义。通过广泛而深入的国际合作,鼓励科学家加入到国际科学前沿俱乐部,可以使我国充分利用国外先进的技术、信息和设备,使国内研究人员从选题到出成果尽快置身于世界科学技术的发展前沿,分享国际科学界的研究经验和成果,从而推动我国的基础研究在更多的领域进入国际前沿,实现跨越式的发展。多元化、全方位的国际合作必将加快我国基础研究原始创新能力的提高。

参考文献

- [1] 彭以祺. 关于我国基础研究若干问题的思考. 中国基础科学, 2000(8)
- [2] 李斌. 大力推动原始性科技创新. www.xinhuanet.com, 2001-11-01
- [3] 21 世纪展望. 中国科技国际竞争力. 科技日报, 2000-02-25
- [4] 王光荣, 金振蓉. 中国科技期刊亟须打造国际品牌. 光明日报, 2002-02-07
- [5] 刘继安. 沉重的空缺. 中国教育报, 2002-3-1
- [6] 王柯敏. 对“十五”学科建设的几点思考. 中国高等教育, 2001(9)

(责任编辑 王宏章)

(上接第 24 页)

通常不一样)从而设置其开关状态。最后,自旋晶体管是一种线性器件(半导体 p-n 结具有非线性的 FV 特性),输出信号与偏置电流成正比。

全金属自旋晶体管与半导体 Si 器件相比,其速度慢 5~10 倍,但能耗低 10~20 倍、密度高 40~100 倍。事实上,由于金属材料具有丰富的载流子(高掺杂浓度半导体的载流子密度为 $10^{18} \sim 10^{19} \text{cm}^{-3}$, 金属的电子密度为 $10^{22} \sim 10^{23} \text{cm}^{-3}$),反而可以用来制造出 10 纳米尺度的电子器件。除此以外,金属的导电电子不像半导体的载流子那样对温度敏感,且耐辐射,加上磁性材料固有的磁滞,自旋晶体管具有记忆功能,不需能量便能长久保存信息。尽管自旋晶体管有许许多多的优点,但从 Johnson 制作的边长为 0.1mm 原型到真正纳米尺度的器件,人们还有一段很长的路要走。

综上所述,人类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,自旋极化输运将给人类带来的也许又是一片广阔的天地,它给予人类以梦想和希望,同时也给人类带来更多、更大的挑战。事实上,人类对于自旋极化输运的了解目前还处在一个非常肤浅的阶段,对新出现的各种新现象、新效应的理解基本上还是一种半经典唯象理论,但是目前包括美国海军实验室在内的一些国际一流的实验室及 IBM 等跨国大公司都开始了这方面的研究工作。这预示着作为磁学和微电子学的一门新的交叉学科,自旋电子学将无论在基础研究还是在应用开发上都将是凝聚态物理学工作者和电子工程技术人员大显身手的新领域。

参考文献

- [1] 蔡建旺, 赵见高, 詹文山, 沈保根. 物理学进展, 1997, (17) 119
- [2] S. A. Wolf et al., Science 294, 2001, 1488

(责任编辑 肖庆山)