

自旋电子学和计算机硬件产业*

赖武彦

(中国科学院物理研究所 北京 100080)

摘要 1988年发现的巨磁电阻(GMR)效应,是基于自旋的新电子学的开始.文章介绍观察效应的物理基础,以及这些效应和材料在信息存储上的应用.GMR硬盘(HDD)已经形成了数十亿美元的工业;其后发现的室温隧道磁电阻(TMR)效应已用于制造新的磁随机存储器(MRAM),它正在开创另一个数十亿美元的工业.自旋电子学研究的物理对象是自旋向上和自旋向下的载流子,而传统半导体电子学的对象是电荷为正和电荷为负的载流子,即空穴和电子.电子自旋特性进入半导体电子学,为新的器件创造了机会.为了成功地将电子自旋结合到半导体微电子技术中去,需要解决磁性原子自旋极化状态的控制,以及自旋极化载流子电流的有效注入、传输、控制、操纵和检测.评述了基于电子自旋的新器件原理、新材料的探索以及自旋相干态的光学操纵.

关键词 巨磁电阻 隧道磁电阻 自旋电子学 自旋相干态

SPINTRONICS AND THE COMPUTER HARDWARE INDUSTRY

LAI Wu-Yan

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

Abstract The discovery in 1988 of the giant magnetoresistive(GMR) effect is considered the beginning of the new, spin-based electronics. The physical basis for the observed effects is presented, and the initial successful applications of these phenomena and materials for information storage are reviewed. GMR read-head sensors have already created a multibillion dollar industry and magnetic random access memories using the tunneling magnetoresistive(TMR) effect will soon start another multibillion dollar industry. Spintronics is based on the up or down spin of the carriers rather than on electrons or holes as in traditional semiconductor electronics. This offers opportunities for a new generation of devices combining standard microelectronics. To successfully incorporate spins into existing semiconductor technology, one has to resolve technical issues such as efficient injection, transport, control and manipulation, and the detection of spin polarization as well as spin-polarized currents. The current state-of-the-art of spin-based devices, efforts in new materials fabrication, and optical spin coherent state manipulation are reviewed.

Key words giant magnetoresistance, tunneling magnetoresistance, spintronics, spin coherent state

物理学特别是凝聚态物理学中的基础研究,常常可以在工程和产业上产生重要的结果.1947年12月,在Bell实验室观察到的Ge晶体管效应就是一例.仅仅5年后(1952年),第一个商业性晶体管就诞生了.最后,发展为现代半导体电子工业.

从发现到商品化快速转化的最新的例子就是所谓的巨磁电阻(GMR)效应^[1].自从1988年观察到这个效应,也是5年多的时间,第一个商品化的GMR产品就问世了^[2].过去十年中,计算机硬盘(HDD)存储的面密度从不足100Mb/in²猛升到10Gb/in²以上,就是得益于此项技术.其年增长率平均60%,也达到了18个月翻一番的速度.长期以来,先进的半导体超大规模集成(VLSI)技术使计算机内存芯片位数

以摩尔定律增长.然而,进展迟缓的外存储部分相形见绌.在网络时代成为了严重阻碍.可喜的是,磁电阻特别是巨磁电阻,一举改变了局面^[3].

美国国家科学技术咨询会在1999年9月发表的“纳米技术研究指导书”中,将GMR效应和材料的应用描写成为技术产业化的一个范例:“仅仅十年,基于磁性纳米多层膜的GMR效应,从基础研究的发现到计算机读出磁头,作为关键器件显示了在硬盘中的重要性.而硬盘市场在1998年就达到了340亿美元.”

* 国家自然科学基金(批准号:19890310)资助项目
2002-03-04收到

GMR 是在磁性多层膜中观察到的量子力学效应^[4]. 这种多层膜是由铁磁层和非磁层交叠而成, 其中单层厚度仅为 1—3nm. 铁磁层中有方向一致的磁矩. 当不同铁磁层的磁矩之间彼此平行, 载流子自旋相关的散射截面极小, 材料呈现低电阻; 当不同铁磁层的磁矩之间彼此反平行, 载流子自旋相关的散射截面极大, 材料呈现高电阻. 室温下, 差别可以从 10% 到 90%, 故称巨大的磁致电阻效应, 简称巨磁电阻(GMR)(图 1). 推向技术应用的关键是, 用很低的外部磁场控制多层膜磁矩相对取向的变化, 以获得较大的电阻变化率, 即很高的磁场灵敏度. 计算机处理的信息脉冲在硬盘上存储的单元, 是两种取向的磁化区域. 这些磁化单元产生两种不同方向的弱磁场, 作用在 GMR 磁头传感器上, 引起电阻变化完成信息的读出. 过去, 人们用电磁感应模式来读出硬盘上的信息单元. 为了得到足够的感应电势, 必须要求硬盘上的读道宽度不能太窄、比特长度不能太短、磁盘转速不能太低. 采用磁电阻效应读出模式后, 这些限制被突破了. 从而, 硬盘存储的面密度得以大幅度增长.

目前上市的 GMR 硬盘磁头传感层厚为 $0.006\mu\text{m}$, 盘上读道宽为 $0.68\mu\text{m}$, 获得的面密度为 $10\text{Gb}/\text{in}^2$. 预计三年内上市的 GMR 硬盘磁头传感层厚为 $0.003\mu\text{m}$; 盘上读道宽为 $0.21\mu\text{m}$, 获得的面密度将达到 $100\text{Gb}/\text{in}^2$. 这样的密度已经适应目前网络通讯的发展, 技术上也还有发展的余地.

1 电子自旋极化的运输过程

固体中费米面附近的“自旋向上”和“自旋向下”的电子数目可以不相等. 此时, 在外场作用下电子的运输过程表现为与自旋取向相关. 通常这种情形出现在铁磁金属中. 其中, Fermi 面附近很高的电子状态密度造成两种自旋电子的子能带相对位移(交换分裂), 以降低总能量, 从而形成不同自旋子能带的填充不相同. 这是材料具有净磁矩的原因. 铁磁金属因此得名. 同样理由(很高的电子状态密度), 铁磁金属中的传导电子(s 电子)与局域的 d 电子的散射过程成为电导的主要机制. 由于两种自旋的子能带交换分裂, 造成 Fermi 面上“自旋向上”和“自旋向下”的电子的数目和未占据的空态数也不同. 所以, 上述 s-d 散射过程就与电子自旋的相对取向有关. 称为自旋极化的电子运输过程.

1936 年, N. F. Mott 基于上述认识, 提出了过渡金属电子的理论^[6]. 他在与 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^[1]中, 就引述 Mott 理论来解释他观察到的现象, 如图 2(a) 所示. 十多年来, 大量事实证明, Mott 理论就是自旋电子学的理论基础.

铁磁金属中 Fermi 面附近的“自旋向上”和“自旋向下”的电子的数目不同这一推测, 可以导出很多合理的物理结论. 但是, 直接的实验证明直到 1975 年才获得重要进展. 法国 Rennes 大学的 M. Julliere^[7] 采用 Fe/Ge/Co 三层膜, 测量两个铁磁膜电极之间电子通过半导体 Ge 的隧穿电流. 物理过程的讨论如图 2(b) 所示. 为了简化, 假定 Fermi 面上仅有一种自旋子带的电子. 隧穿的原则是, 从第一个膜的 Fermi 面

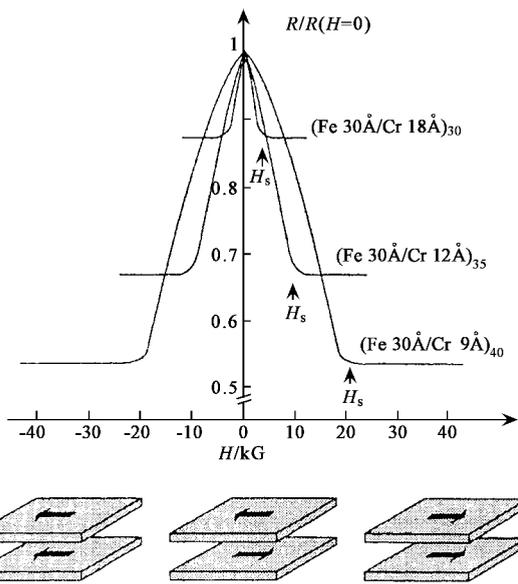


图 1 反铁磁耦合的 Fe/Cr 多层膜中温度 4.2K 时磁电阻与磁场关系^[1]

通过网络系统传输动态、静态图像以及数据资料等, 其信息量大得惊人. 这需要半导体芯片容量和速度持续扩大, 以及硬盘密度相应提高. 估计五至十年内, GMR 仍可胜任这种发展对硬盘提出的要求^[5]. 理由如下: 最初的磁电阻读出磁头传感层厚度为 $0.08\mu\text{m}$, 硬盘上的记录比特长度为 $0.12\mu\text{m}$, 盘上读道宽为 $1.33\mu\text{m}$, 获得的存储面密度为 $2.6\text{Gb}/\text{in}^2$.

上出发的某种自旋状态的电子,能否达到第二个膜的 Fermi 面上,取决于这种电子的自旋状态是否与第二个膜自旋子带上自旋状态相同.当两个铁磁膜磁化矢量彼此平行时[图 2(b)之下部],两个膜中自旋子带中的“自旋向下”部分容许隧穿过程发生.当两个铁磁层的磁化反平行时[图 2(b)之上部],由于结区两侧 Fermi 面上自旋状态不同,隧穿过程就被抑制了.这些过程(a)和(b)都可称为“磁阀门效应”.作一个类比:在光学情形,一束偏振光通过一个检偏器,如果它的极化轴转 90°(垂直)就可以阻止光束通过,这是“光学阀门”.然而,在磁学情形,磁化强度必须转动 180°(反平行)才可以抑制电子传导.

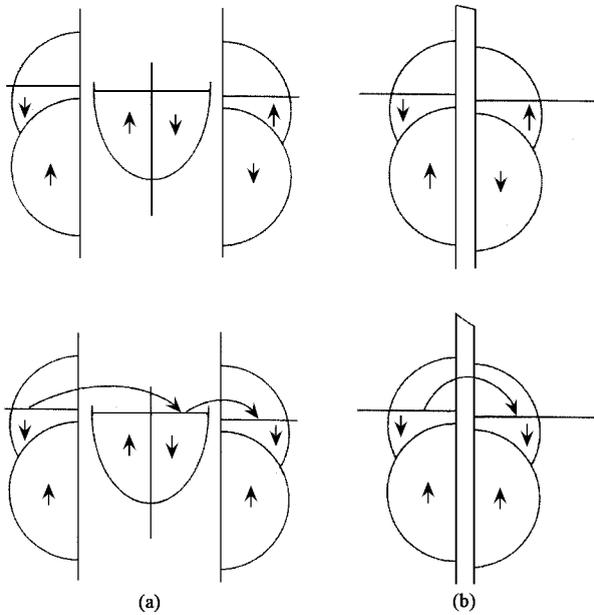


图 2 用态密度示意图表示的巨磁电阻效应原理

(a) 电子从一个铁磁金属薄膜通过非磁金属到另一个铁磁金属薄膜的运输过程.图的上部表示两层铁磁薄膜的磁矩彼此反平行,图的下部表示两层铁磁薄膜的磁矩彼此平行.(b) 电子从一个铁磁金属薄膜通过绝缘薄膜到另一个铁磁金属薄膜的隧穿过程,图的上、下部的意义和(a)中一致

1975 年在铁磁/半导体/铁磁三层膜中的磁隧穿测量,是在低温 4.2K 进行.平行和反平行磁化状态对应的电导相对差别为 14%,这就是最早的隧穿磁电阻(TMR)效应.静止 20 年后,1995 年日本科学家宫崎照宣^[8]报道了电导的相对变化在室温下达到 18%.同年美国 MIT 研究组^[9]也报道了类似结果,这是继 GMR 效应之后最重大的进展.于是,在世界范围掀起了自旋电子学研究和开发的第二个高潮.

在自旋极化电子的运输过程(上述多层膜的电导、隧道结的电子隧穿或下面讨论的电子自旋注入

等)中,最关键的三个特征长度,按从小到大排序是:间接交换作用或 RKKY 交换作用长度 $d_{\text{RKKY}} \approx 1\text{nm}$,铁磁金属中电子平均自由程 $L \approx 10\text{—}30\text{nm}$ 和自旋扩散长度 $d_{\text{sd}} \approx 50\text{—}100\text{nm}$.这些参数决定了 GMR 和 TMR 效应的物理实验元件或应用器件都只能处在“纳米结构”范畴,对技术提出了挑战.

2 外存贮和内存贮新器件

GMR 第一个应用是,作为计算机中外存贮部分——硬盘的读出磁头.

目前广泛应用的 GMR 读出磁头就是基于上一节描述的原理制造的.实际器件的主要部分是铁磁/非磁/铁磁三层薄膜,见图 3(a).其中一个铁磁层磁矩极易反转(称为自由层或传感层),另一个铁磁层磁矩不易反转(称为被钉扎层).在一个铁磁层上镀一层反铁磁膜(如 FeMn, PtMn, IrMn 等),铁磁层磁矩将因为界面交换作用而被钉扎.电子传输方向是平行膜面的,主要通过高电导的非磁性铜层(其厚度控制在 2.7—2.9nm,远低于电子平均自由程).自旋极化电子的散射过程发生在非磁层与铁磁层的界面.通常不采用垂直膜面电子运行方式,是因为对于金

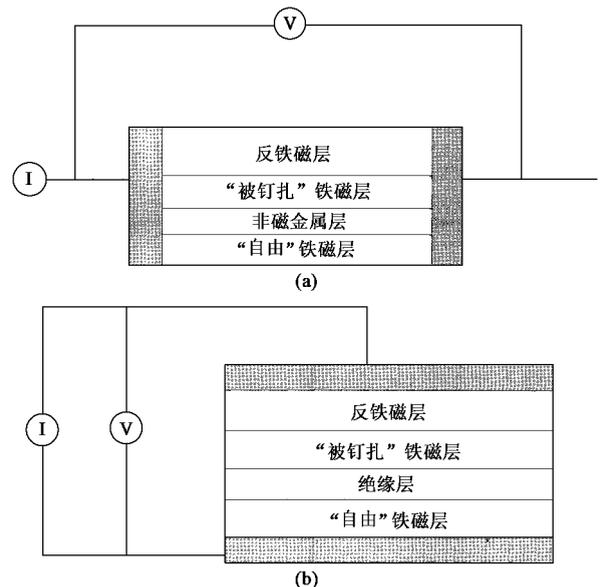


图 3 器件原理示意图

(a) GMR 元件(自旋阀)中,电流平行膜面流过,反铁磁膜通过交换作用钉扎一个铁磁层磁矩(被钉扎层),另一个铁磁层(自由层)磁矩在信号磁场作用下,与被钉扎层的磁矩间可以有彼此平行或反平行两种状态,从而实现磁阀门效果.(b) TMR 元件(磁隧道结,MTJ)中,隧道电流垂直膜面流过,信号磁场作用下的动作原理和(a)相同

属薄膜这种方式电阻值太小。

计算机硬盘用于记录信息脉冲单元,它对应于盘面磁介质上微小的磁化区(磁畴)。其中磁矩在某一个方向的磁畴,对应二进制信息的“0”;另一个方向的磁畴对应“1”。这些磁化单元产生两种不同方向的弱磁场。从硬盘读出信息时,GMR读出磁头传感器非常贴近硬盘面。在硬盘面上两种不同方向的弱磁场作用下,GMR读出磁头的自由层磁矩随弱磁场的不同方向而转动,实现与被钉扎层磁矩相互平行或反平行。从而,出现低的或高的电阻态。它对应于二进制信息的“0”或“1”,完成读出信息的功能。

另一个市场更大的应用就是计算机内存贮硬件部分。

1970年以前,计算机采用磁芯或磁膜为内存贮单元,这种材料中的两个磁化状态对应于二进制的“0”和“1”。这种硬件的存储方式是“非易失性(non-volatile)”的,即存储的信息不因停电而“挥发”。其后,半导体MOSFET平面器件因其高密度、快速、可靠、省电的特性,完全取代磁芯成为计算机内存贮芯片。不过,这种存储是“易失性”的。

GMR效应的发现使技术产业界又重提磁性内存贮硬件的旧话题。1997年1月Honeywell公司^[10]证明,GMR元件可以制成随机存储器(RAM)阵列,称为磁性随机存储器(MRAM),其密度和速度接近半导体存储器芯片。而且,GMR元件的存储是“非易失性”的。当然,这并不是70年代磁芯的复活,在原理上它是全新的,在技术上采用了半导体微电子工艺^[4]。GMR元件被光刻成线状,组成“感受线(sense lines)”用于存储信息,其电阻是所有线上元件电阻之和。电流通过感受线,在线端上的放大器可以检测到元件电阻的改变。这些线平行排列于平面。检测GMR存储单元磁矩的磁场则由另外刻蚀的细线提供,称为比特线(bit lines)和字线(word lines)。此二线分别在GMR元件的上面和下面,呈交叉状。这些比特线和字线在平面上也形成相互垂直的网状。“写入”过程如下:分别通过比特线和字线的两个电流脉冲产生的磁场,都只是感受线上GMR元件自由层磁矩反转场的一半多一点,并不足以使该磁矩反转;当这两个脉冲在平面某一点上相遇时(该点上有一个GMR存储单元),合磁场就足够使位于该点在感受线上的GMR元件自由层磁矩反转。根据GMR效应原理,该单元的电阻将变化。信号就被“写入”到平面的那一点上。“读出”过程类似。

1995年实现了室温TMR效应的磁隧道结

(MTJ)更适合制备非易失随机存储器阵列,见图3(b)。TMR在结构上和GMR自旋阀[图3(a)]的差别,只是前者以非磁性绝缘层取代后者的金属Cu层。物理上,则是电子隧穿过程。控制原理是同样的:作为隧道结两极的铁磁层磁矩平行与反平行状态,对应两个不同隧穿电导状态[图2(b)]。但是,TMR磁电阻比GMR自旋阀磁电阻要高,目前已达到50%。隧道器件的高阻抗使电流远低于全金属构成的自旋阀器件。自然,节能的优点很明显。但是,高阻抗又带来噪声增长以及响应时间变长的不良因素。存储密度的提高使磁隧道结MTJ的截面积减小,后一个问题也就越加明显^[11]。围绕上述问题,已经展开了材料、物理和器件问题的广泛研究和开发。

2001年11月16日的《科学》杂志^[12]介绍了目前磁随机存储器的研究和开发水平,展示了Motorola公司的256kb的MRAM芯片。与硅基电可擦可编程只读存储器(EEPROM)和闪烁(flash)存储器比较,MRAM“写入速度”快1000倍。与硬盘比较,MRAM读取信息时间快10000倍。预期两三年内,容量为4Mb的MRAM可以上市。

3 探索新材料

凝聚态物理学的进展离不开材料科学,其内容包括新材料的探索、制备和结构表征。在GMR和TMR研究和应用开发过程中,也得到证实。虽然,GMR和TMR在物理、材料和器件方面已经取得很大业绩,但不足之处还是明显的。材料的局限性尤为突出:电子的平均自由程较短(几十纳米),自旋极化率较低(小于50%)。

为解决电子的平均自由程的问题,人们尝试探索铁磁性和半导体性兼备的材料。这是一个长期目标,也是最难以捉摸的课题,牵涉到性质不同的材料的不同结构和化学键等方面。铁磁性半导体不仅可以作为理想的自旋极化电流源,而且易于与半导体微电子元件集成。所以,自旋电子学研究者对此非常感兴趣。稀土镱(Eu)的硫化物是广泛研究过的磁性半导体,可惜它的铁磁性居里点远低于室温^[13]。最近铁磁有序温度高到110K掺有锰(Mn)元素的III-V族化合物(稀磁半导体)引起人们注意^[14]。理论上预言这类材料的居里点可以超过室温,现在又看到电压可以控制该材料的磁性^[15]。为了在半导体中达到大的自旋极化度,导带(或价带)的塞曼分裂必须大于电子(或空穴)的Fermi能量。以EuS为例,前者约

为 0.3eV , 而 Fermi 能约为 0.15eV , 如图 4(a) 所示^[16].

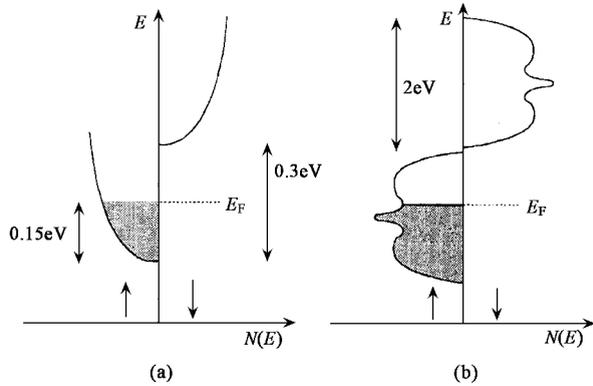


图 4 两类新材料的态密度示意图

(a) 居里温度以下的掺杂磁性半导体 (b) 半金属性铁磁体 CrO_2

(图 (b) 中的能量尺度比 (a) 中大 10 倍)

对于自旋极化率较低的问题, 人们需要找寻新磁性材料, 它应该具有极大的电子自旋极化度。目前, 研究者关注一种称为“半金属磁体 (half-metallic magnets)”的材料^[17]。这种材料的理想电子状态是, 其中的 Fermi 能级处在一个自旋子带中, 对另一个自旋子带而言刚好处在一个能隙处, 如图 4(b) 所示, 所以, 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。换言之, 处于巡游金属态的传导电子只具有一种自旋态, 即自旋极化率为最大 (注意, 以前根据载流子浓度曾命名铋, 石墨, 碲, 砷等元素为“半金属”, 意义与此处不同)。这种特性是 R. A. de Groot 小组在做化合物能带计算时发现的^[18]。目前, 列入自旋极化率最大、最具希望的材料有 NiMnSb ($T_c = 728\text{K}$), CrO_2 以及 $\text{La}_7\text{Sr}_3\text{MnO}_3$ 和 Fe_3O_4 等。实际上, 自旋极化率的测量方法本身也是很活跃的研究对象, 同一材料的几个测量结果也存在偏差。测量方法有自旋极化光电子谱, Andreev 反射等。目前, 公认的最高自旋极化率为 CrO_2 的 96% (在液态氦的温度)^[19]。

可以肯定, 新材料和新结构的发展将继续成为自旋电子学研究和计划的主要部分。

4 自旋注入和自旋相干态

技术应用是物理学和材料科学发展的主要动力之一。自旋电子学需要发展更多的器件, 使得外来信号被放大、振荡、操纵和检测, 其中净自旋电流的振幅和位相应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?

如果电子器件的尺寸记为 D , 电子的平均自由程记为 λ , 以目前的技术水平而言, 薄膜器件的功能结区尺寸 D 一般可以在 $0.1\text{--}1\mu\text{m}$ 。我们知道, 金属中 $\lambda \approx 10\text{nm}$ 至 30nm 。当 $D \gg \lambda$ 时, 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, 不能完成信号被放大、振荡、操纵等功能。相反, 当 $D \ll \lambda$ 时, 电子在器件中的行为表现为弹道型。半导体中 $\lambda \approx 10\mu\text{m}$, 用它容易做成弹道型器件。作为放大、振荡、操纵和检测器件, 我们当然希望电子在器件中的行为表现为弹道型。

如上一节所述, 探索铁磁性和半导体性兼有的材料是一个长期的目标。最直接的想法是: 以铁磁金属或半金属性磁体为自旋电子电流源, 将其“注入”到半导体中进行放大、处理、控制。可惜大量努力并不成功。铁磁/半导体界面的自旋翻转散射损失了载流子的自旋极化度。目前最好结果是 $T < 10\text{K}$ 时有 4.5% 的极化^[20]。

另外两个途径显现了希望之光, 它们是铁磁性半导体中异质结和自旋极化相干态。

首先介绍前者, 铁磁性半导体异质结中的自旋注入^[21]。它的实验设计及结果如图 5 所示。图的上半部是外延生长的半导体异质结的示意, 其顶端为铁磁半导体 $p\text{-GaMnAs}$ 层。温度在居里点以下时, 出现铁磁有序 (用箭头表示)。在外加偏置电压下, 从 $p\text{-GaMnAs}$ 层产生的自旋极化空穴与 $n\text{-GaAs}$ 层产生的未极化电子, 同时注入到 InGaAs 量子阱 (QW) 中 (图中斜线区)。通过厚度为 d 的间隔层产生极化的场致发光。场致发光谱偏振的检测是用电荷耦合元件谱仪实现, 其中有可变波片和线偏振器。

图 5 的下半部给出总的场致发光的强度 (用粗线表示), 间隔为 $d = 20\text{nm}$, 温度为 $T = 6\text{K}$, 外加磁场 $H = 10000\text{e}$, 电流 $I = 1.43\text{mA}$ 。偏振极化率用细线表示。注意到极化出现最大值的能量对应于量子阱的基态 ($E = 1.34\text{eV}$)。右上角插入图是相应的电流-电压 ($I-V$) 曲线。

其次, 另一重要进展是光学抽运产生自旋极化相干态^[22-23]。所谓相干态是指在初始时刻系统中所有电子的状态 (如, 自旋、轨道、动量) 是一致的。随着时间增长, 所有电子的状态保持一致的变化。经过一段时间, 相干态将退化, 该时间称为退相干时间或驰豫时间。过去很多年, 未计入自旋量的电子相干态已经被广泛研究。通常用强激光脉冲在半导体中产生电子相干态。随时间增长, 相干态演化过程逐次为最

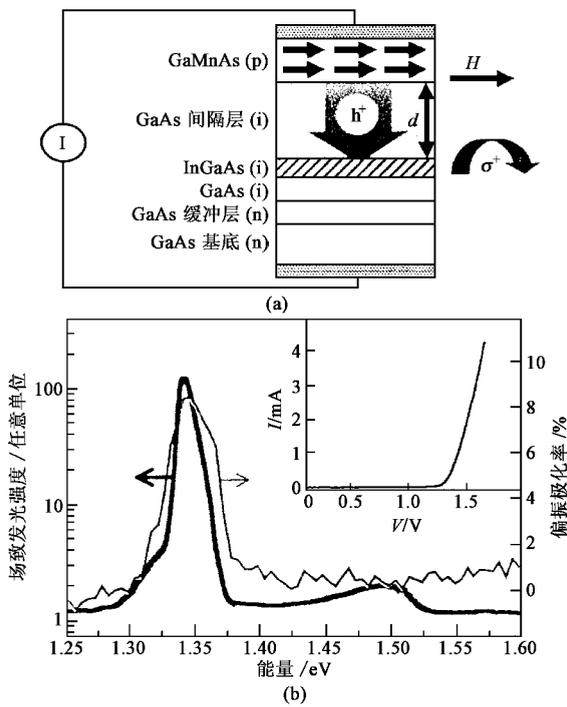


图5 在外延生长的铁磁半导体异质结中的自旋注入^[21]
(a) 铁磁半导体异质结的示意图 (b) 场致发光强度和偏振度

早的相干阶段,即无碰撞过程(但可以出现 Rabi 跃迁);其次为位相弛豫阶段,由电子-缺陷或电子-电子散射过程决定;最后进入准热平衡阶段,由电子-声子散射过程造成。检测方法可用探测光速瞬态吸收光谱。结果是在 GaAs 中位相弛豫时间约为 30fs,量子阱(QW)中约为 1—2ps,量子点中可达 10ps 左右,已经接近光学相干器件的要求。

这几年,自旋相干态的研究取得重大进展。自旋位相弛豫时间达到 100 μ s,比电子相干态提高三个数量级^[12]。空间扩展达到 100 μ s 左右,已经适合实际器件的需要。

在样品上施加外磁场形成塞曼能级,来自抽运光源的圆偏振光垂直入射样品,调整适当的抽运能量值,使光跃迁发生在最低磁能级之间,实现电子-空穴的激发。适当的外磁场和入射光电磁分量之间的相对取向,使过程的“选择定则”给出下列结果:被激发电子的自旋沿着光束方向。这种自旋极化的电子与空穴复合,产生的圆偏振光分别为 i_+ 和 i_- 。两个分量 i_+ 和 i_- 振幅之比就是电子的两个自旋分量之比,即自旋电子的极化度。

由于磁场的存在使电子自旋产生 Larmor 进动,反映在 i_+ 和 i_- 分量上,就是以 Larmor 频率的振荡。因为退相干过程,自旋相干态的位相弛豫使振荡衰减。用时间分辨的克尔(Kerr)旋转装置,测得探测光

束反射后偏振面的旋转角,从而决定 i_+ 和 i_- 分量。

最近,在 p-GaAs/n-InSe 异质结上施加偏置电压,使得自旋相干电流产出率提高了几十倍^[24]。p-GaAs 行为像一个自旋相干态的电流“水库”,源源不断地向 n-InSe 输送自旋电流,见图 6。而电场、磁场的控制可以独立进行。其物理现象使人想到在 MOSEFT 中用门电压来控制从“流”到“漏”流过的准二维电子气。

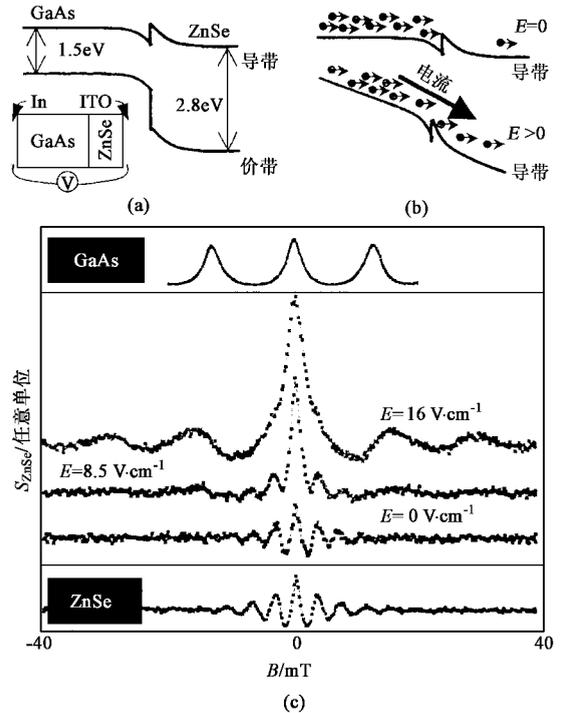


图6 光学抽运自旋相干态的生产和检测^[24]
(a) n-GaAs/n-ZnSe 异质结的导带和价带示意图 (b) 没有电场偏置(上部)和有电场偏置(下部)时,自旋电流在导带中传输的示意图 (c) 从基片 GaAs 到外延层 ZnSe,自旋相干态传输的磁场响应关系

用经典计算机模拟量子系统的演化带来的复杂性,使 Feynman 提出了量子计算机的设想^[25]。量子算法语言和相关理论正在快速发展,物理实现方案也在努力探索中,关键问题是选用什么硬件来执行这种算法语言。光学和自旋的相干态是实现这项任务很有希望的候选者^[26]。随着磁-电子学向磁-光-电子学推进,实现量子计算机的可能性将大大增加。

5 展望

巨磁电阻硬磁盘(HDD)已经成就了数十亿美元的工业,而另一个以磁随机存储器(MRAM)为核心的数十亿美元的工业正在兴起。磁-半导体电子学、

磁-光-半导体电子学已经形成。

为了保持目前进展的势头并开拓新的发现,需要在下列方向加速推进:固体中自旋相互作用的基本研究,在金属多层结构和半导体中自旋自由度的控制,发展相应的材料科学,微加工和元器件制造技术的开发。综合物理学、化学、电子工程、计算机科学、数学信息理论,新兴的自旋电子学可望在纯粹和应用科学方面获得长足进展。

参 考 文 献

[1] Baibich M *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1988 ,61 :2472 ;Binnasch G *et al.* Phys. Rev. B ,1989 ,39 :4828
[2] Daughton J M *et al.* IEEE Trans. Magn. ,1994 ,30 :4608
[3] Thompson D A ,Best J S. IBM J. Res. Develop. , 2000 ,44 :311
[4] Grunberg P. Physics Today 2001(5) 31
[5] Belleson J ,Grochowski E. www. ibm. com/harddrive
[6] Mott N F. Proc. Roy. Soc. A ,1936 ,153 :699 ;Mott N F ,Jones H. The Theory of the Properties of Metals and Alloys. London :Oxford University Press(中译本 :付正元 ,马元德译.金属与合金性质的理论.北京:科学出版社出版,1958)

[7] Julliere M. Phys. Lett. ,1975 ,54A :225
[8] Miyazaki T *et al.* J. Magn. Magn. Mater. ,1995 ,151 :403
[9] Moodera J S *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1995 ,74 :3273
[10] Dax M. Semicond. Int. ,1997 ,20 :84
[11] Prinz G A. Science ,1998 ,282 :1660
[12] Wolf S A *et al.* Science 2001 ,294 :1488
[13] Methfessel S ,Mattis D C. Handb. Phys. ,1968 ,18 :389
[14] Ohno H *et al.* Appl. Phys. Lett. ,1996 ,69 :363
[15] Ohno H *et al.* Nature 2000 ,408 :944
[16] von Molnar S. IBM J. Res. Develop ,1970 ,14 :269
[17] Pickett W E ,Moodera J S. Physics Today 2001 :39
[18] de Grot R A *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1983 ,50 :2024
[19] Ji Y *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2001 ,86 :5585
[20] Hu C M *et al.* Phys. Rev. B 2001 ,63 :125333
[21] Ohno Y *et al.* Nature ,1999 ,402 :790
[22] Kikkawa J M *et al.* Science ,1997 ,277 :1284
[23] 夏建白 ,常凯. 物理 ,2001 ,30 :533[Xia J B ,Chang K. Wuli (Physics) 2001 ,30 :533(in Chinese)]
[24] Malajovich I *et al.* Nature ,2001 ,411 :770
[25] Feynman R. Int. J. Theoret. Phys. ,1982 ,21 :467
[26] Sham L J. J. Magn. Magn. Mater. ,1999 ,200 :219

·信息服务·

美国伦斯勒理工学院招生信息



Troy ,New York ,U.S.A.

July 2002

JOIN OUR GRADUATE SCHOOL IN PHYSICS

Ph.D. in Department of Physics ,Applied Physics and Astronomy

Areas of research :Astronomy ,Elementary Particles Physics ,Origins of Life ,THz Imaging ,THz Electronics ,Nano-Particles Physics .

Teaching ,research assistantships and fellowships are available .

Application :<http://www.rpi.edu/dept/grad-services/>

Information :<http://www.rpi.edu/dept/phys/>

Email :gradphysics@rpi.edu