



都有为,浙江杭州人,磁学与磁性材料专家,中国科学院院士,现任南京大学物理系教授等职。长期从事磁学和磁性材料的教学和研究工作,开展了磁性、磁输运性质与材料组成、微结构关系的研究。研究锰钙钛矿化合物的大磁熵变效应以及锰钙钛矿化合物小颗粒体系中的隧道型磁电阻效应;磁性纳米微粒的小尺寸效应与表面效应以及颗粒膜的巨磁电阻效应、磁光效应、反常霍尔效应与微结构的依赖性等。目前重点研究纳米材料的磁性以及与自旋相关的输运性质。

## 卷首语 Foreword

科技导报 2014, 32(25)

# 自旋——未来的科技明星

磁与电宛如一对孪生兄弟,难以分离,原子是物质的基本单元,原子核以及组成原子核的基本粒子都具有磁矩,但其中中子、微中子等具有磁矩却没有电荷,从此角度考虑,磁比电更具有普适性,然而,人们对电的了解更胜于磁,追其原因,人们的日常生活离不开电,如:电话、电灯、电视、电脑、电动机等,人们没有进一步思考电流是如何产生的,最基本的原理是磁通量的变化产生电流,反之,电流产生磁场,因此,通常磁与电是相互关联的。磁的基本单元是自旋磁矩,电荷与自旋都是电子的本征特性,以往人类社会的发展,从物理的观点看来主要利用电子具有电荷的特性,如电工学奠定了第二次产业革命(电气化)的基础;电子学与微电子学奠定了第三次产业革命(信息化)的基础,而自旋的作用仅体现在磁性材料及其器件中,例如电气化中的发电机、电动机、变压器等离不开磁性材料,同样,信息化中储存信息离不开磁盘、磁带等。在电工学、电子学与微电子学中主要研究电场调控下的电子电荷的运动,没有涉及到电子的自旋。人们不禁要问:为什么同样是电子本征特性的自旋在电子输运过程中不呈现呢?

原因是电荷是与方向无关的标量,而自旋是与方向有关的矢量,电子在晶格中运动时电荷的性质不会变化,但是自旋的方向可以翻转,在电子输运过程中,电子的运动将受到晶格的散射,电子保持其自旋方向不变所经过的距离称为电子自旋扩散长度,通常对磁性材料电子自旋扩散长度大概在纳米量级,对半导体、有机材料可达亚微米至微米量级,假如电子输运的距离远大于自旋扩散长度,那么由于自旋的翻转导致自旋朝上与朝下的几率相当,统计平均结果不会显示自旋的特性,而对于电工学,微电子学所研究的对象通常尺寸大于自旋扩散长度,因此在输运过程中不考虑电子自旋的特性是合理的。

20世纪80年代在 $(\text{Fe}/\text{Cr}/\text{Fe})_n$ 纳米多层膜中发现了巨磁电阻效应,其物理本质是电子在薄膜厚度小于自旋扩散长度的多层膜中运动时,输运过程中将保持自旋极化电子的自旋方向,通过外磁场可以改变自旋方向,从而改变电阻值,这发现开拓了在电子输运过程中通过调控自旋,显示与利用自旋特性的新领域,从而产生重要的自旋电子学新学科,奠基于磁场调控自旋的特性,利用巨磁电阻效应-GMR(Giant Magnetoresistance)与隧道磁电阻效应-TMR(Tunneling Magnetoresistance),首先制备成高灵敏度的磁盘读出磁头,使磁盘的记录密度提高千倍,至今保持着信息存储的主流地位,其产值超过300亿美元,此外各种利用磁电阻效应的新颖传感器脱颖而出,自旋传感芯片70亿美元,自旋磁电信号耦合芯片50亿美元,其应用领域十分宽广,鉴于其基础研究的意义与广泛的应用前景,发现巨磁电阻效应的法国科学家Albert Fert与德国科学家Peter Grünberg获得了2007年度的诺贝尔物理学奖。

继传感器实用化后,与微电子技术相结合,采用电流重合法调控自旋,研发成磁随机存储器(MRAM),为了降低调控自旋的磁场电流,利用自旋转移矩(STT-Spin torque transfer)效应,采用自旋极化电流直接调控自旋的磁随机存储器(STT-MRAM)进一步降低功耗,使MRAM进入到重要的发展阶段,2006年后已步入实用化,欧洲空客350就采用了MRAM;2012年提出同时利用电场调控自旋的低功耗的磁随机存储器(MeRAM)现正处在研发转向应用的阶段,上述不同类型的磁随机存储器可统称为信息存储与处理用的自旋芯片,可望自旋芯片成为后摩尔定律时代强力的竞争对手。自旋芯片优点如下:非易失性;抗辐射性;高集成度;高运算速度;低功耗;长寿命。与DRAM相比:非易失性;抗辐射性;高运算速度。与Flash相比:低功耗;长寿命;存取速度比Flash快千倍。此外,除做内存外,尚可做外存,在自旋芯片中磁盘与芯片可以合二为一。自旋芯片兼具SRAM的高速度、DRAM的高密度和Flash的非易失性等优点,其抗辐射性尤为军方所青睐,原则上可取代各类存储器的应用,成为未来的通用存储器。自旋芯片属于核心高端芯片,是科技关键核心技术,可军民两用,具有高达上千亿美元的巨大市场前景,有可能成为后摩尔时代的主流芯片,是高科技的重要战略领域,应当引起我国高度重视,组织力量,急起直追,发展有中国自主知识产权的自旋芯片,才有可能免蹈引进半导体芯片的历史覆辙。

自旋电子学是奠定在利用电子自旋特性上的新学科,与器件开发和实际应用紧密结合,正处于迅速发展的阶段,其研究内涵与领域不断地在发展中,已从磁电子学发展到半导体自旋电子学以及分子电子学,必将在众多的领域中崭露头角,发挥其重要作用,自旋是矢量,从物理观点看来自旋应当比电荷具有更丰富的物理内涵。自旋不仅在电子学领域初露峥嵘,在催化、生物、医疗、超导等诸多领域已显示出其特色,人类对它的认识与应用尚处于序幕阶段。

20世纪也许可称为“电荷”的世纪,人们充分地调控电子具有电荷这一自由度,从而实现了人类社会电气化、信息化,创造出从二极管直到超大规模的集成电路、半导体芯片,奠定了信息社会的基础。21世纪,未来也许是属于“自旋”的新世纪,人们正在充分地利用、调控电子的另一个本征的自由度“自旋”,推动着社会迈向新的阶段。

## 都有为

(南京大学物理系,南京210093)

(责任编辑 李娜)