

迈向 21 世纪的磁学和磁性材料*

赵见高

(中国科学院物理研究所磁学国家重点实验室, 北京 100080)

摘要 在回顾 20 世纪中磁学随物理学一起获得重大发展的基础上, 指出在 21 世纪磁学将在与生命科学的交叉中获得新的发展. 例如研究生物体中的磁现象, 研究磁场对生物体的影响, 磁学手段在生命科学研究中的应用等. 文章同时还介绍了磁学在 21 世纪可能获得的其他进展, 如量子磁存储器, 各种分子磁性材料以及低维磁性功能材料等.

关键词 磁学与磁性材料, 生物磁学, 量子存储器, 分子磁性材料

Abstract Based on a brief review of significant developments in magnetism as a major part of physics during the 20th century, we foresee that magnetism will have great developments again in the 21st century due to interdisciplinary co-operation between biology and magnetism. We discuss the studies on magnetic phenomena in biological organisms the effects of a magnetic field on living organisms, life science studies using magnetic techniques and so on. We also discuss possible applications of magnetic materials in quantum magnetic memory devices, different kinds of molecular magnets and various low-dimension magnetic materials.

Key words magnetism and magnetic materials, biological magnetism, quantum magnetic memory, molecular magnets

20 世纪是物理学的世纪.

作为凝聚态物理的重要组成部分, 磁学在 20 世纪也得到了飞速的发展, 成为当代人类文明中不可缺少的部分. 磁学的成果在各个领域得到应用, 千家万户都离不开变压器、扬声器、磁性天线棒、录音带、录像带, 乃至计算机的硬盘和软盘等磁性器件(图 1).

我国在公元前 700 余年就有了磁的记载, 指南器——司南的应用更是人人皆知的我国对世界文明的一大贡献. 李时珍在“本草纲目”中关于磁石药性方面的记载及若干磁疗方面的记载, 同时表明我国在这方面的磁性研究也处于世界领先地位.

然而, 磁学作为一门科学而存在, 则是从 17 世纪才开始. 也正是从这个时期起, 东方文明逐渐让位给西方文明. 直至 19 世纪, 奥斯特

及法拉第等对电与磁相互转换的研究, 以及麦克斯韦建立的电磁场理论, 洛伦兹的电子论的建立等, 才为现代磁学的大发展奠定了基础.

19 世纪末 20 世纪初, P. 居里对抗磁性、顺磁性的研究, 居里定律的发现, 以及外斯分子场理论的提出等, 树立了一个又一个磁学发展的里程碑. 接着相继发展了铁磁性、反铁磁性、亚铁磁性、螺旋磁结构、散磁结构等, 以及相应的直接交换作用、超交换作用、RKKY 交换作用等. 通过对各种软磁性、硬磁性、磁致伸缩、磁存储及微波磁性材料的研究和应用, 极大地丰富了对磁畴、磁化过程和反磁化过程的认识. 磁性现象还成为许多凝聚态物理理论研究的对象. 因此, 作为物理学的重要组成部分之一, 磁学在

* 1995 年 6 月 23 日收到初稿, 1995 年 9 月 12 日收到修改稿.

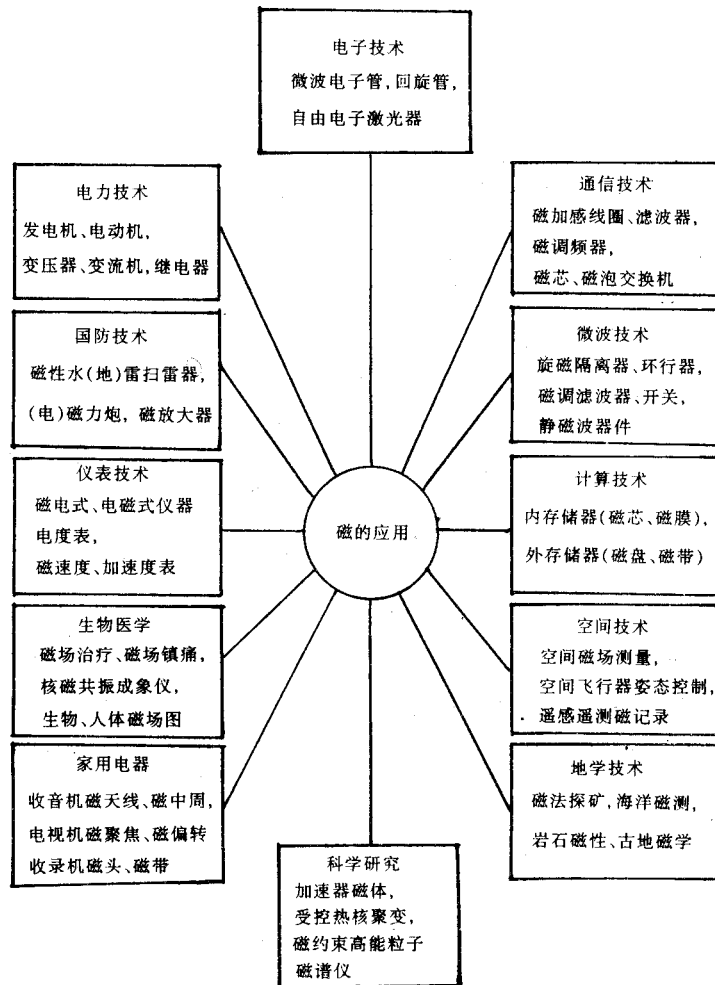


图1 磁学的各种应用示意图

20 世纪得到了很大的发展。目前磁性材料的发展常常难以用一般的词汇来描述。磁存储密度以每 30 年提高 1000 倍的速度在增加。永磁体的磁能积也以跳跃的方式在提高。因而新磁性材料的发现, 常冠以词头“巨”字, 以强调其提高的迅速。如“巨磁矩材料”、“巨磁致伸缩材料”、“巨磁电阻材料”、“巨磁光偏转材料”等。正是本世纪磁学和磁性材料的这种飞速发展, 才使各个领域, 千家万户都离不开磁学和磁性材料。

在这种迅速变化的形势下, 要展望下一世纪的磁学发展将是非常困难的事。本文仅就四方面作些介绍, 并希望说明, 在 21 世纪的磁学

发展中, 中国将大有作为, 在西方文明回归到东方文明的大趋势中, 磁学将不会例外。

1 磁学与生命科学的结合

21 世纪将是生命科学的世纪, 这是许多有识之士共同的想法。磁学也将随着与生命科学的结合而向更高的层次发展。这种结合将体现在以下三方面: 生物体中的磁现象; 磁场对生物体的影响; 磁性手段在生物研究中的应用。

和生物电一样, 生物体本身具有自身的磁场, 从而表现出许多重要的磁现象。这种生物磁

场的来源,一是由生物电流所产生,另一则是生物体中具有强磁性物质的剩磁所致.由于这种生物磁场极其微弱,长期以来无法为人们发现,因而一直未被重视.人们只能从候鸟、信鸽的导航现象,人类对地磁场变化产生的反应等推测生物磁场的存在.然而20世纪物理学的成就,已经为生命科学的发展准备了理论和实验基础.特别是使用超导量子隧道结制造的高灵敏度量子干涉磁强计,已可精确地测出生物的微弱磁场.这就为生物磁学的发展创造了条件.表1列出了人体磁场强度的范围.通过测量心磁图、肺磁图、脑磁图等,不仅可以为疾病的诊断提供全新的、比相应心电图等更具优越性的手段(它得到的不仅是体表层的二维信息,没有电接触的干扰等),而且可将生命功能与磁图相联系,对生命之谜作出更深层次的研究.由于我国人民已积累了数千年的人体科学的经验和理论体系,如经络学说、气功理论等等,因而将高度现代化的磁学研究手段用于这些领域,一定会创造出我国特有的生物磁学的伟大成就来.

表1 人体磁场强度及有关噪音水平

人体磁信号	B(T)	背景场噪声及仪器检测水平
肺磁场	10^{-4}	←地磁场(静止)
	10^{-5}	
	10^{-6}	
	10^{-7}	←城市噪声(交变)
	10^{-8}	
心磁场	10^{-9}	←地磁场起伏噪声及磁
	10^{-10}	←通门磁力仪噪声水平
	10^{-11}	
脑磁场	10^{-12}	
	10^{-13}	
	10^{-14}	
	10^{-15}	←超导量子干涉式磁强计噪声

对于生物体内是否存在强磁性物质,现在也有了明确的结论.特别是对一种向磁性细菌的研究,不仅在电镜的观察下发现了细菌内含有一串直径为 500\AA 的 Fe_3O_4 颗粒,而且还应用穆斯堡尔谱等技术对其结晶形态作了相当细

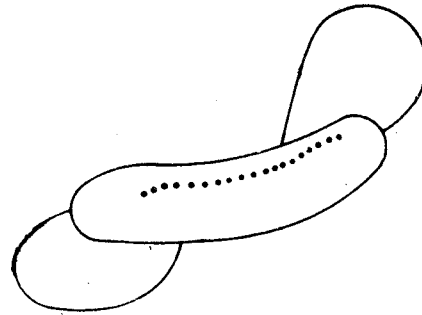


图2 向磁性细菌的透射电镜照片
(表明菌体中有一串约20个、直径约50nm的不透明颗粒)

致的研究(见图2).相继又在蜜蜂、蝴蝶、家鸽、鲸鱼,乃至人的鼻窦壁下发现了强磁性物质.详细研究生物磁效应一定会极大地促进生命科学的发展.

除了生命本身的磁现象外,研究磁场对生命体的影响同样具有重要的意义.地球上的任何生命体都生活在地磁场中,因此地磁场对生命活动会有明显的影响.国内外学者曾研究了地磁场变化对生物进化、遗传关系、生物节律,乃至多种疾病、传染病发病率的相关性.日本和印度等国都统计了近20年的地磁变化与交通事故的关联,以说明地磁对人精神状态的影响.我国自古认为做气功应面南背北,睡觉也应顺南北磁力线方向为好.这确与捷克学者得到的不同睡眠方向脑电波的变化规律相一致.他的计算机分析表明,沿地磁子午线平面位置的睡眠比其他方向要睡得更深,休息更充分.许多发达国家都在深入研究在阈值场以上的磁场将对生命体产生什么影响,包括对神经系统、内分泌系统、心血管系统、血液系统、消化系统等的影响.美国能源部及斯坦福直线加速器中心还分别提出了磁场强度的安全标准.磁场对细胞生长、分裂的影响,磁场对酶、核酸、蛋白质等生物大分子的影响等,也都作了不少研究.特别是我国对磁场疗法的长期研究和实践已经获得了相当丰富的成果.许多省市的医院及医学院等都

开展了磁疗的临床研究和机理研究. 卫生部也多次向磁疗研究成果颁布部级科研成果奖. 本文并不对此作详细介绍, 有兴趣者可参阅文献[1]. 同样可以相信, 我国将会在下一世纪中就生物磁学的这一方面也做出重要的贡献.

作为磁学与生命科学相结合的另一种表现, 则是磁技术在生命科学研究中的应用. 除常规的磁测量、穆斯堡尔谱、顺磁共振等手段外, 核磁共振成像, 特别是近五年刚发展的核磁共振功能成像, 将会发挥重要作用. 美国政府将90年代确定为脑的十年. 1990年贝尔实验室发表了第一篇脑功能的核磁共振功能成像的研究论文. 现在世界上已有许多国家开展了这方面的研究. 它可以实时地研究大脑思维过程、感官刺激过程、运动过程及病变过程中大脑皮层新陈代谢的变化. 除了对诊断脑肿瘤、痴呆病等有实效外, 显然对揭示生命奥秘有极重要的意义. 美国威斯康星大学于1994年拍摄了数千张人脑工作过程的实时图像. 耶鲁大学1995年宣布, 他们用脑功能成像技术, 证明男性和女性对处理发声语言的过程表现出明显的左右脑区激活的差异. 虽然被激活的脑区不同, 但最后完成的工作却相同. 这结果与男女左右两半脑的功能偏侧性是相对应的. 那么, 这些结果与我国传统的“男左女右”的说法是偶然的巧合还是必然的对应呢?

正如前面所述, 超导量子干涉磁强计必然

也是生命科学研究中的重要工具. 例如用此手段测得的胎儿磁图, 与心电图相比不仅方便, 而且不受母体信号的干扰. 在某些心脏疾病的早期诊断方面, 心磁图也比心电图更灵敏. 同样肺磁图也对尘肺职业病的早期诊断极为有效. 我国在这方面也已作了不少研究.

2 量子计算机及量子磁存储

计算机存储元件的存储密度以每30年提高1000倍的速度在增长, 何时方是密度的极限呢? 当然原则上讲可以是单个原子的磁矩作存储单元. 但近年来发现在一定条件下, 强磁性物质的磁矩也会以隧道效应的方式穿过能垒, 导致磁化强度的变化, 这称之为宏观量子隧道效应. 在一定的临界温度以下, 已在大分子铁蛋白(马的脾脏)、一些磁性纳米颗粒、稀土过渡金属非晶态薄膜等材料中观察到这种效应. 例如北京大学测得的 $Dy(Fe_{1-x}Ga_x)_2$ 的退磁曲线, 在临界温度上下有明显的不同. 由图3可见, 在3K下的退磁曲线出现台阶形的大跳跃变化, 正说明了量子隧道现象使磁场强度很快反转. 通过这种量子效应, 就可为磁存储密度的极限尺寸作出界定^[2].

目前的磁存储元件都是磁性的连续介质, 存储过程是在这连续介质的某些局部区域进行的. 因此, 存储点就比较弥散, 相互间也容易造

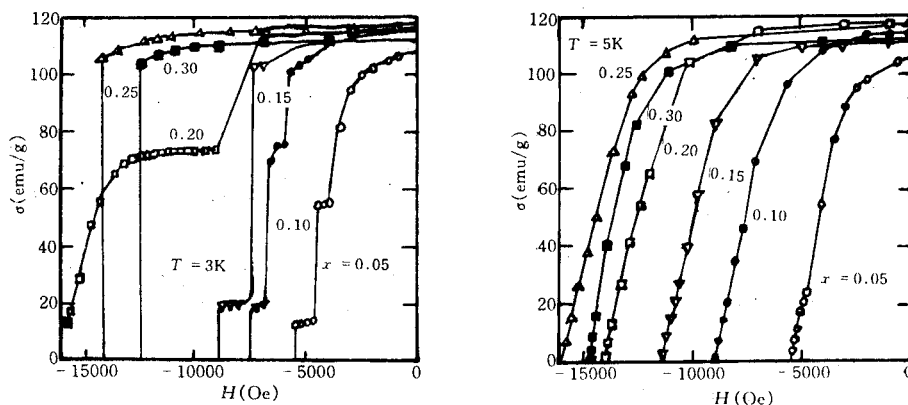


图3 $Dy(Fe_{1-x}Ga_x)_2$ 在3K和5K下退磁曲线的差异

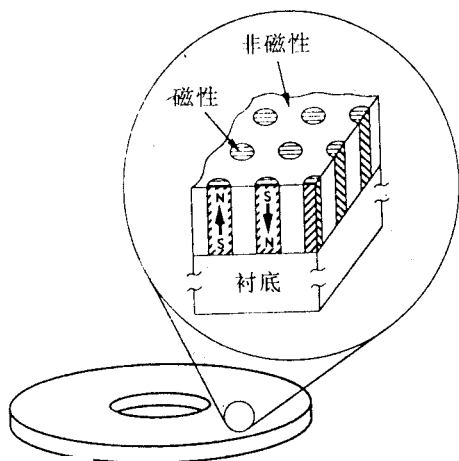


图4 量子存储器示意图及量子化 Ni 柱的扫描隧道电镜像

成干扰. 因此今后的趋势将是使磁性元件量子化, 即用量子存储器构成未来的量子计算机. 所谓量子存储器, 是将单畴铁磁粒子量子化地分散在非磁性基体中, 以此作为存储单元. 这样就可以具有互不干扰、存储信息明确、密度高等许多优点. 例如上述马脾脏中的铁蛋白, 直径仅 7.5nm, 比目前的高密度存储点要小 100 倍. 但其中却包含有 4500 个自旋, 而且其外壳包裹了一层 2nm 厚的普通蛋白, 从而可将各个铁磁存储单元隔开. 这样的生物制造单元就可以构成量子存储器^[3].

用人工方法也可以制造出量子化的磁存储器. 图 4 给出了一种 75nm 量级的柱状单畴 Ni 粒子阵列及量子存储器的示意图. 如果用扫描隧道电镜作原子量级的人工搬动, 则可以制造出更小的存储单元来. 可以想象, 21 世纪的高技术发展将会向存储密度的极限进军.

3 分子磁性材料

上面已经说明了一种铁蛋白生物大分子在磁学中的可能应用. 几乎所有的真核细胞中都存在有铁, 因此生物分子的磁性研究及应用将会得到更多的重视.

非生物有机分子的磁性近年来也得到很大的发展, 即所谓有机铁磁体的研究. 目前这方面包含三方面的内容: 一是不含磁性元素的氮氧自由基铁磁性有机聚合物; 二是含有磁性元素的有机络合物; 第三则是含有磁性元素的有机分子团簇. 前者因不含铁磁元素, 故对研究磁性起源、交换耦合等具有明显的学术意义. 后两种则除学术意义外, 还具有重要的应用价值. 例如有机物常常是绝缘体, 因此可以是很好的微波磁性材料. 又如有机材料密度低, 很轻, 因而用于航空航天材料将会很有价值. 前面还曾经提到, 用分子磁体作存储单元, 将可以极大地提高存储密度等. 可以预计, 有机铁磁体在 21 世纪将会得到重大的发展, 成为磁性材料家族中的重要一员.

可以高兴地指出, 在以上三方面的研究中, 我国科学工作者都处于世界前列. 特别是关于二茂铁类工作, 已经达到实用化并可开发生产的程度. 例如用于移动式电话的天线(表 2). 对分子团簇的铁磁性研究, 其磁化强度也已经可以和某些实用材料相比拟. 至于纯有机聚合物的研究, 我国与法国合作, 用极化中子散射首次给出了自旋密度分布图(图 5). 这对于确定磁矩来源及交换耦合均有重要意义.

表2 移动通信大哥大天线比较*

天线名称	天线长	综合性能
(台湾产)小天线	26mm	高频率不合格
拉杆天线	177mm	频率略偏低,基本合格
拉杆天线	74mm(未拉出)	可能不使用这种状态,不合格
Power小天线	30mm	不合格
Super小天线	30mm	频率偏向高端,低端不合格
Motorola鞭天线	144mm	特性很好
金属有机(高分子)磁棒天线	40mm	-5℃时特性
金属有机(高分子)磁棒天线	40mm	常温时特性
金属有机(高分子)磁棒天线	40mm	+50℃特性
金属有机(高分子)磁棒天线	32mm	频率略低,基本合格
金属有机(高分子)磁棒天线	45mm	特性好

* 按美国摩托罗拉移动通信手机的要求,在工作频率为860—950MHz时,比较了金属有机(高分子)磁棒与国内外移动通信天线的特性。

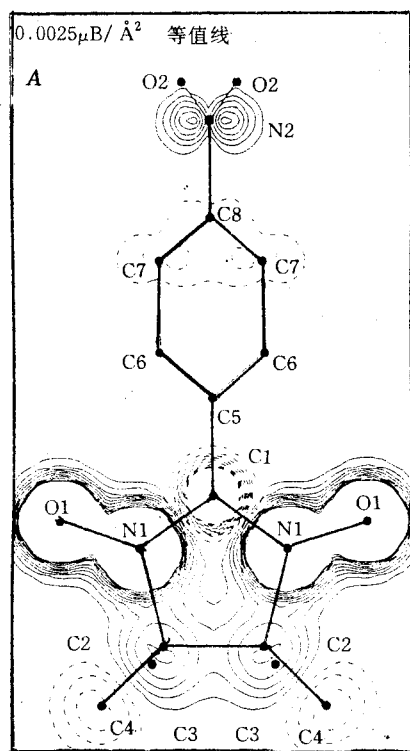


图5 P-NPNN的极化中子散射的自旋密度图

4 低维磁性材料

除常规的磁性材料今后会继续提高其磁性外,另一个重要趋势是磁性器件向低维发展.如近几年发展很快的纳米颗粒磁性材料、磁性薄

膜及磁性多层膜等,发表论文数几乎已占整个磁学研究的四分之一至三分之一.由于样品的尺度与电子平均自由程可以比拟甚至更小,而且样品的界面原子数与主体原子数也可以比拟,界面的作用不可忽视,从而产生了许多大块材料中不存在的特性,这就为磁学的发展提供了新的机遇.例如,当磁性层与非磁性层相间构成磁性多层膜时,相邻磁性层间可以呈铁磁性耦合,也可以呈反铁磁耦合,这取决于非磁性层厚度,而且随其厚度变化而振荡^[4].当传导电子在其间运动时,表现出的电阻率则随其耦合类型而有很大差别,从而产生了很大的磁电阻效应.据此而设计的磁存储读出磁头将可克服目前感应式磁头的许多缺点,如信号与存储介质运动线速度有关,致使磁盘内圈与外圈信号差别很大,对磁盘转速要求很高,特别是难以应用于超高密存储,因存储点很小,信号很弱等.而磁电阻磁头的使用为超高密度存储创造了条件.

薄膜软磁材料也愈来愈受到重视.在各种电器日益小型化的趋势下,变压器的小型化成为日益紧迫的课题.因此,集成薄膜变压器用软磁铁芯材料的研究将非常重要.它既要求磁导率高,又要使用频率高,从而对材料的电阻率、各向异性、厚度等都有很高的要求.为了提高综合性能,往往也要采用纳米颗粒技术、多层薄膜

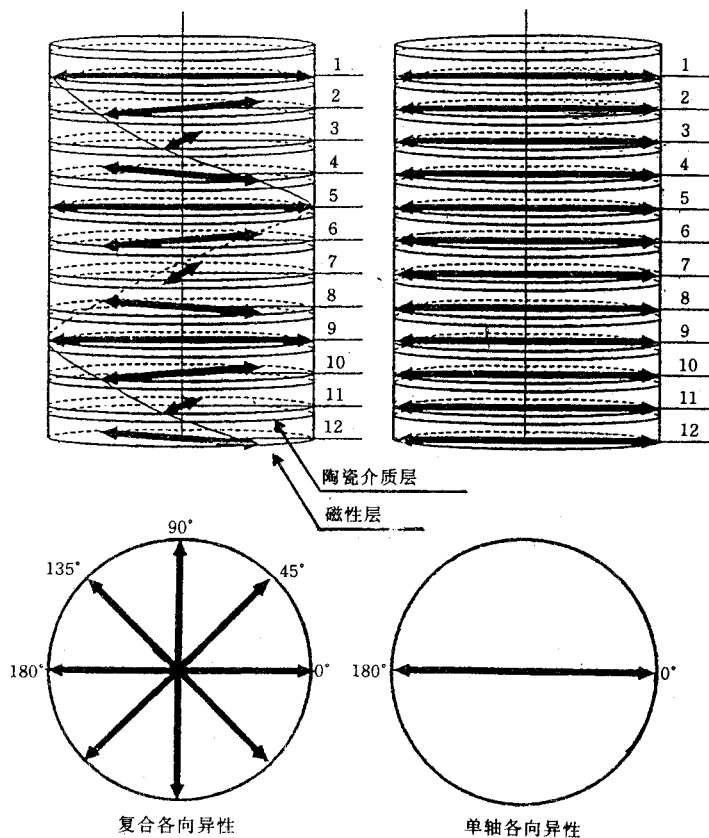


图6 复合各向异性多层膜示意图

技术等. 例如制备如图6所示的复合各向异性多层膜系统, 再经过旋转磁场处理后, 就可以实现几乎各向同性的高频高导磁材料. 因此, 将来实现手表式电话等小型商品也不是不可能的.

同样, 其他各类磁性材料, 如硬磁材料、磁致伸缩材料等, 也都在向低维方向发展, 以适应向21世纪迈进的需要.

综上所述, 经过20世纪物理学的大发展, 磁学将通过与其他学科的结合, 例如与微结构微加工技术, 与化学, 特别是有机高分子化学,

与生命科学的结合, 为人类文明作出新的贡献. 在这新的发展中, 中华民族将可能经过螺旋式上升的轨道而再度为世界文明作出重大贡献.

作者对李国栋研究员和张寿恭研究员对本文提供的许多资料和帮助表示感谢.

参 考 文 献

- [1] 李国栋等, 生物磁学, 国防工业出版社, (1993).
- [2] 钟文定等, 物理学报, **44**(1995), 1516.
- [3] P. Stamp, *Nature*, **359**(1992), 365.
- [4] J. Unguris et al., *Phys. Rev. Lett.*, **67**(1991), 140.