

感谢国家自然科学基金项目(51101047和51461014)
对本书出版的支持。

界面插层调控磁阻薄膜材料 电输运性能研究

丁雷◎著

磁阻薄膜材料主要指具有磁电阻效应的材料，
在各种磁阻材料中，
NiFe具有优异的软磁性能，
是一种应用广泛的磁性材料。



中国原子能出版社

感谢国家自然科学基金项目 (51101047 和 51461014) 对本书出版的支持。

界面插层调控磁阻薄膜材料 电输运性能研究

丁雷 著



中国原子能出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

界面插层调控磁阻薄膜材料电输运性能研究 / 丁雷
著. -- 北京 : 中国原子能出版社, 2017.5

ISBN 978-7-5022-8184-7

I. ①界… II. ①丁… III. ①磁阻半导体 - 研究
IV. ①TN304.7

中国版本图书馆CIP数据核字 (2017) 第145830号

界面插层调控磁阻薄膜材料电输运性能研究

出版发行 中国原子能出版社 (北京市海淀区卓成路43号 100048)

责任编辑 王 朋

责任印刷 潘玉玲

印 刷 三河市天润建兴印务有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 787毫米*1092毫米 1/16

印 张 8

字 数 130千字

版 次 2018年8月第1版

印 次 2018年8月第1次印刷

标准书号 ISBN 978-7-5022-8184-7

定 价 42.00元

网址: <http://www.aep.com.cn>

发行电话: 010-68452845

E-mail: atomep123@126.com

版权所有 翻印必究

内 容 提 要

磁阻薄膜材料主要指具有磁电阻效应的材料，在各种磁阻材料中，NiFe具有优异的软磁性能，是一种应用广泛的磁性材料。目前国际上研究的焦点集中在NiFe材料超薄情况下如何进一步提高其电输运性能以适应器件发展的需求。

作者近些年来在高灵敏度NiFe磁阻薄膜材料的制备工艺、综合性能调控、薄膜结构设计思路以及理论研究方面开展了一些研究工作。本书重点介绍了各种不同类型的界面插层材料对NiFe磁阻薄膜材料结构及电输运性能的影响。

本书可供从事磁性薄膜材料的研究学者和学生参考使用。

前言

磁阻薄膜材料指具有磁电阻效应的材料。磁电阻效应是导体或半导体在磁场作用下其电阻值发生变化的现象。目前,市场上的磁阻材料及器件主要有半导体及磁性薄膜两种。半导体磁阻器件具有磁电阻比值大及线性度好的优点,但所需磁场较大,灵敏度并不高,且温度稳定性也不够好。实际应用中的磁性薄膜材料主要有各向异性磁电阻(AMR)材料、巨磁电阻(GMR)材料、隧道磁电阻(TMR)材料等,每种磁阻材料及器件都有自己的特点,适应于相应的领域。

近年来,由于对地磁场研究的日益重视,作为非常重要的一类地磁探测材料和器件,AMR薄膜材料和器件又引起了人们强烈的研究兴趣。由于AMR传感器在测量弱磁场和基于弱磁场的地磁导航、数字智能罗盘、交通检测、位置测量、伪钞鉴别等方面具有广泛的应用,制造AMR元件和AMR传感器的技术在国外发展很快并且已经产业化,受到人们的高度重视,国际上相关的各大公司还在不断地发掘AMR薄膜材料的潜力和开发生产各种类型的AMR传感器。目前,我国对于AMR传感器的应用研究与国外相比还有很大差距,因而它在国内有着广阔的市场应用前景。

AMR薄膜材料研究较多的是NiFe(坡莫合金)材料。NiFe具有优异的软磁性能,但是其磁场灵敏度比GMR和TMR薄膜材料的磁场灵敏度低得多,所以,追求高灵敏度的NiFe薄膜材料一直是该领域研究者长期以来的一项重要研究课题。目前研究的焦点集中在NiFe材料超薄情况下如何进一步提高磁场灵敏度以适应器件发展的需求。

本书重点介绍了作者所在课题组近年来利用界面插层调控NiFe磁阻薄膜材料电输运性能方面的一些研究成果,包括对非晶氧化物(SiO_2 和 Al_2O_3)、晶体氧化层(MgO 和 ZnO)、具有强自旋轨道耦合的贵金属(Au 和 Pt)、磁性和非磁材料(CoFeOx 和 AlN)等界面插层材料进行的系统研究,可供从事磁性薄膜材料的研究学者和学生参考使用。

本书研究是在国家自然科学基金项目(51101047和51461014)课题支持下完成的,是著者所在课题组近十年来在高灵敏度磁阻薄膜材料领域主要研究成果的系统总结。本书参考和引用了一些学者的论文资料,列于参

考文献，在此向他们致以感谢。

由于作者理论与实践水平所限，书中难免存在不妥之处，敬请各位读者批评指正。

作 者
2017年5月

目 录

第1章 磁电阻薄膜材料简介	1
1.1 自旋电子学与磁电阻效应概况	1
1.2 各向异性磁电阻效应	3
1.2.1 微观理论	3
1.2.2 磁化特性	5
1.2.3 常用各向异性磁电阻材料	10
1.3 巨磁电阻效应	13
1.3.1 多层膜巨磁电阻效应和双电流模型	13
1.3.2 自旋阀巨磁电阻效应	15
1.4 自旋电子的镜面反射	23
1.4.1 镜面反射原理及其在纳米氧化层自旋阀中的应用	23
1.4.2 电子镜面反射对各向异性磁电阻的作用	26
第2章 NiFe薄膜材料研究现状	28
2.1 成分与厚度对电输运性能影响研究	28
2.2 晶粒尺寸与织构对电输运性能影响研究	31
2.3 不同种子层对电输运性能影响研究	33
2.4 利用界面插层提高电输运性能研究	36
第3章 薄膜制备及结构性能表征方法	38
3.1 薄膜制备	38
3.1.1 基片清洗过程	38
3.1.2 薄膜样品制备	38
3.1.3 元件制备方法	40
3.1.4 样品的真空退火处理	42
3.2 薄膜结构性能表征方法	43
3.2.1 标准四探针法	43

3.2.2 振动样品磁强计	44
3.2.3 X射线光电子能谱	45
3.2.4 X射线衍射	47
3.2.5 透射电子显微镜	48
第4章 非晶氧化物界面插层研究	51
4.1 概论	51
4.2 SiO ₂ 界面插层研究	52
4.2.1 SiO ₂ 界面插层对NiFe薄膜电输运性能影响	52
4.2.2 SiO ₂ 界面插层对NiFe薄膜磁性影响	53
4.3 Al ₂ O ₃ 界面插层研究	55
4.3.1 Al ₂ O ₃ 界面插层对制备态NiFe薄膜结构与性能影响	55
4.3.2 Al ₂ O ₃ 界面插层对退火态NiFe薄膜结构与性能影响	57
第5章 晶体氧化物界面插层研究	63
5.1 概论	63
5.2 MgO晶体氧化物界面插层研究	63
5.2.1 不同MgO插层位置对NiFe薄膜结构与性能影响	64
5.2.2 退火对Ta/MgO/NiFe/MgO/Ta薄膜结构与性能影响	67
5.3 ZnO晶体氧化物界面插层研究	71
5.3.1 ZnO界面插层对NiFe薄膜结构与电输运性能影响	72
5.3.2 高温退火对Ta/NiFe/ZnO/Ta薄膜磁性影响	75
第6章 具有强自旋轨道耦合的贵金属界面插层研究	78
6.1 概论	78
6.2 贵金属Au界面插层研究	79
6.2.1 Au界面插层对NiFe薄膜结构与性能影响	79
6.2.2 Ta/Au/NiFe/Au/Ta薄膜微结构研究	81
6.3 贵金属Pt界面插层研究	83
6.3.1 Pt界面插层对Ta/NiFe/Ta薄膜结构与性能影响	83
6.3.2 Pt界面插层对NiFeCr/NiFe/Ta薄膜结构与性能影响	87
第7章 其它类型界面插层材料研究	91
7.1 概论	91
7.2 磁性金属氧化物CoFeO _x 界面插层研究	91

目 录

7.2.1 单层 CoFeO_x 对NiFe薄膜结构与性能影响	92
7.2.2 双层 CoFeO_x 对NiFe薄膜结构与性能影响	95
7.3 非磁AlN界面插层研究	97
7.3.1 AlN界面插层对NiFe薄膜电输运性能影响	97
7.3.2 AlN界面插层对NiFe薄膜微结构影响	99
参考文献	105

第1章 磁电阻薄膜材料简介

1.1 自旋电子学与磁电阻效应概况

材料科学的发展水平是人类文明进步程度的重要标志，具有特殊性能的新型材料的问世，常导致科学技术的重大突破，甚至引发一场技术革命。20世纪物理学创造之一——微电子学，是以通过电场来调制半导体中数目不等的电子和空穴即多数载流子和少数载流子的输运过程为基础的，并未计及电子的自旋状态。而正如人们所熟知的，被束缚于固体中的原子上的电子同时负载电荷和自旋并伴随有轨道自由度。所以，固体的电子输运和磁性是密切相关的。通过操纵电子的另一个属性——自旋，一门崭新的科学技术——自旋电子学初见端倪。

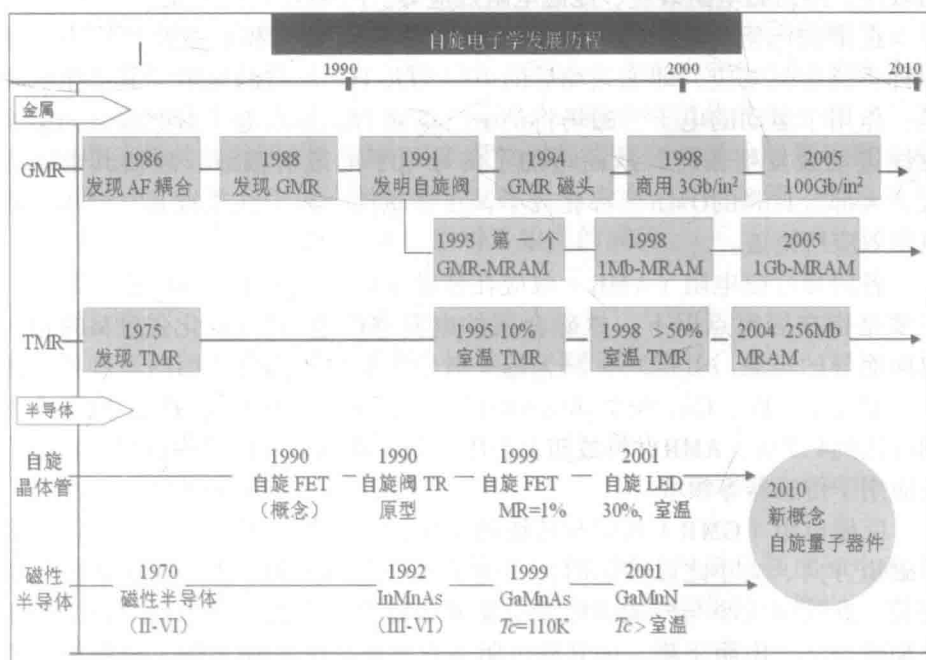


图1-1 自旋电子学的发展历程图：基于金属和半导体的自旋电子学

自旋电子学是以1988年巨磁电阻效应的发现为开端的,其发现者法国科学家阿尔伯特·费尔和德国科学家彼得·格鲁伯格共同获得了2007年诺贝尔物理学奖。自旋电子学的发展历程如图1-1所示。从图中可以看出,以金属为基础的自旋电子学在过去的十几年间取得了非常大的进展。

自旋电子学是建立在自旋极化和自旋相关的电子输运过程的基础上,即通过磁场等在介观尺度上调整自旋状态,借助电子传导与磁性间的关联效应,实现对电子输运特性的调制而开发出各种电子器件的一门新技术。它涉及自旋极化、自旋相关散射和隧穿、自旋积累及弛豫、电荷—自旋—轨道—晶格间相互作用等强关联和量子干涉效应,是当今凝聚态物理的重大课题。作为纳米电子学的重要组成部分,在磁记录、磁头读出、非易失信息随机存储、自旋晶体管及量子计算机等领域将获得广泛应用,成为未来信息科学技术的主导技术。

作为自旋电子学的重要组成部分—磁电阻效应,因其在磁电阻传感器、磁头读出、及信息存储等领域显示出的广阔的应用前景而备受瞩目。所谓磁电阻效应,是指对通电的金属或半导体施加磁场作用时所引起的电阻值变化,其全称是磁致电阻变化效应。根据磁电阻值的大小和机理的不同,磁电阻效应主要可分为:正常磁电阻效应、各向异性磁电阻效应,巨磁电阻效应、隧道磁电阻效应、庞磁电阻效应等。

正常磁电阻(OMR)效应普遍存在于所有磁性和非磁性材料中,是一种正磁电阻效应,即加磁场后的电阻要大于零场时的电阻。其产生机理是:作用于运动的电子的磁场将产生洛伦兹力,导致电子沿电流方向呈螺旋线进动或发生偏转,从而增加了传导电子的散射截面,故使其电阻增大。大部分材料的OMR值都比较小,在铁磁性金属中往往被其它种类的磁电阻效应所掩盖。

各向异性磁电阻(AMR)效应在铁磁金属和合金多晶体中较为常见,主要是指在居里点以下,铁磁金属的电阻率随电流 I 与磁化强度 M 的相对取向而异的现象。其微观机制为基于电子自旋轨道耦合作用的自旋相关散射。室温下,Fe、Co、Ni金属的AMR值一般为0.2~2%,但NiFe、NiCo合金则可达到4~7%。AMR材料最初主要用于制作磁盘系统的磁头,但现在被广泛应用于传感器等领域。

巨磁电阻(GMR)效应与传统的AMR效应不同,其与导电电子通过不同磁矩方向、大小之磁性层时,受电子本身自旋方向产生之自旋散射效应有关。此效应大小与外加磁场及电流间相对方向无关,且为负效应,即于外加磁场下,电阻下降。因其磁电阻变化率远大于AMR效应,故称为巨磁电阻效应。目前已知的GMR材料包含铁磁层/非铁磁层的多层膜材料、自旋

阀多层膜材料和颗粒膜等。

隧道磁电阻 (TMR) 效应存在于铁磁金属层/非磁绝缘层/铁磁金属层 (FM/I/FM)、铁磁金属层/非磁绝缘层/铁磁金属层/反铁磁层 (FM/I/FM/AFM) 等类型磁隧道结中, 其机制为自旋极化电子的隧道效应。在磁隧道结中, 当两铁磁层的磁化方向转至磁场方向而趋一致时隧道电阻为极小值, 若将磁场减小至负, 矫顽力较小的铁磁层的磁化方向首先反转, 两铁磁层的磁化方向相反, 此时隧道电阻为极大值, 这个变化过程只需一个非常小的外磁场就可实现, 因此TMR拥有较高的磁场灵敏度, 这个优点使得TMR适于制造磁随机存储器。目前, 采用自旋极化率更高的半金属材料和合适的绝缘层, 可大幅度提高TMR值, 如Ta/Co₂₀Fe₆₀B₂₀/MgO/Co₂₀Fe₆₀B₂₀/Ta隧道结, 在退火温度为525℃时, TMR值可达604%。

庞磁电阻 (CMR) 效应存在于类钙钛矿结构的氧化物中, 其中以Mn系氧化物最为显著。其机制一般认为来源于双交换作用。CMR材料的共同特征是在一定的温度范围磁场使其从顺磁性或反铁磁性变为铁磁性, 且在其磁性发生转变的同时氧化物从半导体的导电特性转变为金属性, 从而使其电阻率发生巨大的变化, 有时甚至高达数个数量级。由于通常需要一个数十kOe的外磁场, 且在特定温度附近较小的范围内才能实现其电阻率的巨大变化, 其应用前景还未可知。

上述磁电阻效应中, AMR、GMR、TMR和CMR等效应均和材料中电子自旋密切相关。对于磁性材料而言, 由于各种交换作用致使材料变成铁磁性的, 从而出现了电子的自旋极化; 同时, 这些自旋极化的电子在电子输运过程中受到的散射不同, 因此对于磁性材料需要在电子输运理论进一步考虑到电子的自旋。目前尽管理论并没有给出非常完美的解释, 但是基于AMR、GMR和TMR效应的应用却已取得了很大的成就。

1.2 各向异性磁电阻效应

1.2.1 微观理论

各向异性磁电阻(AMR)指铁磁材料的电阻率随自身磁化强度和电流方向夹角改变而变化的现象。因此, AMR效应依赖于磁化强度取向。因此Kohler规则可以推广到铁磁体中:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} \propto a\left(\frac{H}{\rho}\right)^2 + b\left(\frac{M}{\rho}\right)^2 \quad (1-1)$$

其中, 第一项描述的是OMR, 第二项为AMR, a 和 b 为常数。对于普通金属, 电子的自旋是简并的, 所以不存在净的磁矩, 而费密面附近的电子态对于自旋向上和自旋向下当然也是完全一样的, 因而输运过程中电子流是自旋非极化的。不过, 对于铁磁过渡金属来说, 交换作用能与动能的平衡使系统不同自旋的子带发生交换劈裂, 自旋向上的子带与自旋向下的子带发生相对位移, 引起自发磁化, 这样一来系统的动能虽然增加了, 但由于其3d电子在费密面附近具有非常大的态密度, 动能的增加不大, 而交换作用能却大大减小, 因而系统的总能量有所下降。交换劈裂使自旋向上的子带(多数自旋)全部或绝大部分被电子占据, 而自旋向下的子带(少数自旋)仅部分被电子占据。两子带的占据电子总数之差正比于它的磁矩。七十年代初Tedrow和Meservy对“超导体/非磁绝缘体/铁磁金属”隧道结在一定的磁场和不同的电压下测量隧道电流时确证了铁磁金属输运电子的自旋极化。

在AMR效应中, 自旋轨道耦合作用(Spin Orbit Interaction, SOI)对自旋电子的散射起着重要的作用。SOI指的是电子的轨道运动对其自旋取向的作用。电子绕原子核运动时形成一个电流环, 由于电子处于该电流环中心的附近, 因此电子的自旋会受到这个电流环产生的磁场的作用, 结果是使电子的自旋磁矩取向有一个择优方向。而电子的自旋磁矩和其轨道运动相互作用感生的磁场就是SOI。SOI可用下式表示:

$$\mathbf{L} \cdot \mathbf{S} = L_x S_x + L_y S_y + L_z S_z = L_z S_z + (L_+ S_- + L_- S_+)/2 \quad (1-2)$$

其中定义 $L_{\pm} = L_x \pm iL_y$ 为升降算符。

对3d过渡金属, Mott的双电流模型是合适的。尽管认识到有效散射的机制是由于SOI, 但在3d过渡金属中, 这种作用非常微弱, 因为d态受到湮灭轨道角动量晶体场的强烈微扰。对于铁磁金属, 在温度低于居里温度 T_c 时, 多数自旋和少数自旋电子可以沿着两个平行的通道进行传导, 都独立地对电阻率有贡献, 而且在整个散射过程中, 自旋不改变方向, $\rho^{\uparrow}$ 和 $\rho^{\downarrow}$ 构成等效的并联电路。则总电阻率 ρ 可表示为:

$$\rho = \frac{\rho^{\uparrow} \rho^{\downarrow}}{\rho^{\uparrow} + \rho^{\downarrow}} \quad (1-3)$$

Smit指出, 在忽略多半自旋 $s \rightarrow d$ 散射的情况下, $\rho_{sd}^{\uparrow}$ 少量增加对净电阻率有显著的影响。SOI提供了一种使自旋向上与自旋向下相混合的途径, 以

便使 $s^{\uparrow}$ 电子散射到空 d 态。

图 1-2 简单地显示了 SOI 是怎样为 s - d 散射开辟新途径，然后为电阻率各向异性做贡献。当自旋轨道相互作用不起作用时，在多半自旋电路中不存在 s - d 散射。在这种情况下，电阻率可以写成：

$$\rho = \frac{\rho_s (\rho_s + \rho_{sd}^{\uparrow})}{2\rho_s + \rho_{sd}^{\downarrow}} \equiv 0 \quad (1-4)$$

当 SOI 发生作用时， $s^{\uparrow}$ 电子能散射到 $3d^{\uparrow}$ 空穴态，加到总的电阻率中。SOI 也允许 $d^{\uparrow} \rightarrow s^{\uparrow}$ 跃迁，打开 $3d^{\uparrow}$ 空穴态，为 $s^{\uparrow}$ (无自旋反向) 或 $s^{\downarrow}$ (自旋反向) 电子的 s - d 散射提供更多通道。不过，如果传导电子动量 k 是在空 d 态的经典轨道平面内，那么 s 电子只能散射到 $3d$ 空穴态。

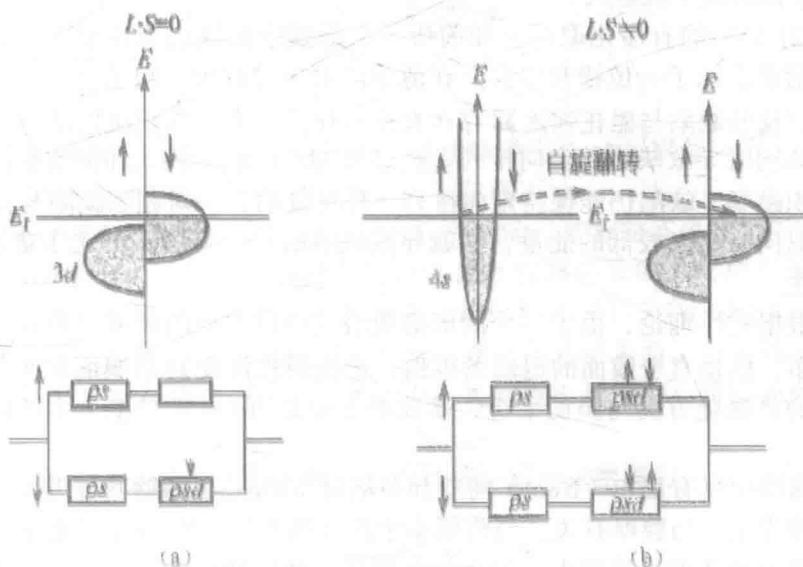


图 1-2 SOI 对自旋电子散射的影响

(a) 一不考虑 SOI 时的态密度，等效电路中缺少 $\rho_{sd}^{\uparrow}$ ；

(b) —SOI 不为零时， $s^{\uparrow} \rightarrow d^{\uparrow}$ 散射过程可以发生，等效电路出现了 $\rho_{sd}^{\uparrow}$ 项

1.2.2 磁化特性

各向异性磁电阻薄膜的磁阻效应决定于外磁场 $\vec{H}$ 与磁膜中磁化强度 $\vec{M}$ 之间的夹角 θ ，而 θ 的大小与磁性薄膜磁化难易程度有关，磁阻薄膜的磁化状态不仅与薄膜材料本身的各向异性、磁畴结构有关，而且与磁阻元件的

几何尺寸也有着密切的关系。

1.2.2.1 AMR薄膜各向异性的起因及磁畴结构

在磁场中淀积而成的NiFe薄膜具有明显的感生单轴各向异性，其单轴各向异性能量 E 可用下式表示：

$$E = K_u \sin^2 \theta \quad (1-5)$$

式中， θ 为磁膜中的 $\vec{M}$ 与易磁化轴之间的夹角， K_u 为单轴各向异性常数。引起感生单轴各向异性的原因有如下两种：

(1) 原子对的方向有序化。在镍铁合金中，原子对的方向有序化是在较低温度下，用很短的时间完成的。薄膜的表面及晶粒间界处存在许多由缺陷造成的空穴。薄膜的厚度愈薄，其表面面积和晶界面积的总和与薄膜体积的比值就愈大，通过原子和空穴的交换作用加速了扩散。空穴的浓度愈高，扩散的速率就愈大。

(2) 缺陷的有序化取向。如前所示，薄膜中的缺陷浓度很高，这些缺陷包括杂志原子、位错和空穴。在薄膜的形成过程中，缺陷具有较高的迁移率。这些缺陷与磁化强度 $\vec{M}$ 存在有耦合作用。由于淀积磁场使 $\vec{M}$ 有序取向，亦同时导致缺陷的定向排列。经过外磁场淀积的膜，即使成膜以后移去淀积磁场，缺陷仍能保持定向排列。理论证明，一对相邻缺陷与 $\vec{M}$ 保持平行取向时具有较低的能量，这就导致缺陷的定向排列，由此建立单轴各向异性。

根据磁性理论，由于一个圆形薄膜沿其厚度方向的尺寸比直径方向的小得多，则垂直于膜面的退磁场很强，迫使磁化强度 $\vec{M}$ 沿膜面取向，磁阻薄膜的易磁化方向与膜面平行，薄膜中主要是以 180° 磁畴壁为主的磁畴结构。

薄膜中具有尼尔（Neel）畴壁和布洛赫（Bloch）畴壁两种类型。究竟以何种为主，与膜厚有关。当膜厚小于几百纳米时，Bloch壁的能量密度将随膜厚的减薄而迅速增大。对于块状样品，畴壁能量主要决定于交换能和磁晶各向异性能。对于薄膜样品，静磁能将起很大作用。图1-3（a）表示薄膜样品的表面与畴壁交界处所形成的自由磁极。该图中仅表示了位于畴壁中心部位的 $\vec{M}$ 的取向。当薄膜的厚度 t 与畴壁的厚度 δ 具有相同数量级时，由膜面的自由磁极所产生的静磁能很大。图1-3（a）所示3坐标关系。当沿 a 轴，即 Z 轴磁化时，退磁系数 N_a 为（ a 为椭球体长轴， b 为短轴）：

$$N_a = \frac{4\pi b}{a+b}$$

当沿 b 轴磁化时, 退磁系数 Nb 为:

$$Nb = \frac{4\pi a}{a+b}$$

此时, 畴壁的静磁能密度 E_{ms} 为

$$E_{ms} = \frac{1}{2} Nt M_s^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{4\pi\delta}{t+\delta} \right) M_s^2 \quad (1-6)$$

以上采用C、G、S制单位, M_s 的单位为奥斯特, E_{ms} 的单位为尔格/厘米³ (erg/cm³)。

YZ平面的单位面积磁畴壁的静磁能 $\gamma_{ms.B}$ 为

$$\gamma_{ms.B} = E_{ms} \times \delta = \frac{2\pi\delta^2 M_s^2}{t+\delta} \quad (1-7)$$

$\gamma_{ms.B}$ 的单位为erg/cm²。

对于块状样品, 由于其 t/δ 很大, 畴壁静磁能 $\gamma_{ms.B}$ 可以忽略不计, 若 $t/\delta \leq 1$, 则出现在畴壁平面上的静磁能不能忽略不计。

随着薄膜厚度 t 的减薄, 畴壁中自旋磁矩的过渡方向不再绕X轴而是绕Z轴在薄膜平面内逐渐过度, 这样可以使出现在薄膜表面上的静磁能不断下降, 由此形成的壁称为尼尔壁。尼尔壁的结构如图1-3(b)所示。尼尔壁形成的自由磁极并不出现在薄膜表面, 而是在畴壁表面。自旋磁矩过渡的特点是: 不论在畴壁中还是在磁畴中, 自旋磁矩都保持与薄膜表面相平行。

设尼尔畴壁的体积近似为椭球形圆柱体, 其能量密度为:

$$\gamma_{ms.N} = \frac{2\pi t \delta M_s^2}{t+\delta} \quad (1-8)$$

由此求得布洛赫畴壁与尼尔畴壁能量密度之比为:

$$\frac{\gamma_{ms.B}}{\gamma_{ms.N}} = \frac{\delta}{t} \quad (1-9)$$

上式说明, 如果薄膜的厚度小于畴壁厚度 δ 时, 尼尔壁的静磁能将小于布洛赫壁的静磁能。以上仅考虑了静磁能的影响。对于厚度一定的薄膜, 究竟哪样类型的畴壁最为稳定, 除考虑静磁能外, 还必须考虑交换能和磁晶各向异性能等能量。

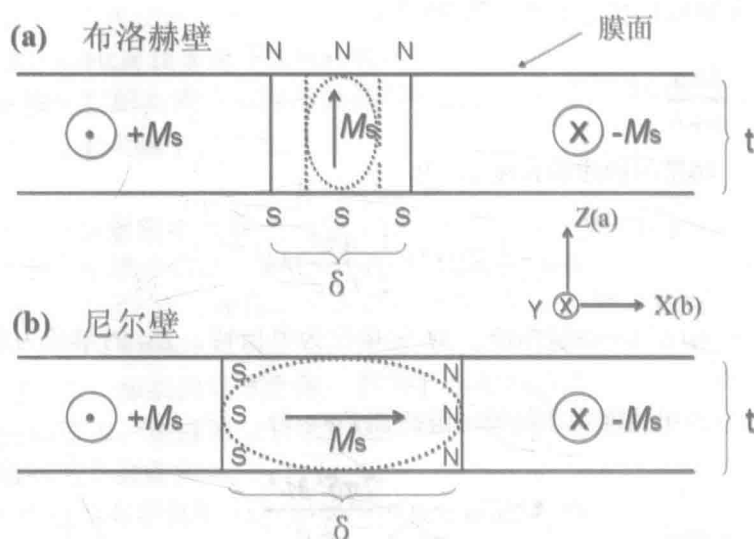


图1-3 薄膜中布洛赫 (Bloch) 壁和尼尔 (Neel) 壁的结构示意图

1.2.2.2 AMR薄膜中的磁化过程

AMR磁阻薄膜在外磁场作用下磁化，引起膜中磁化矢量 $\vec{M}$ 方向的改变，由于 $\vec{M}$ 主要来自于电子自旋的贡献，故 $\vec{M}$ 的改变必然会改变电子的分布状态，即改变了其电阻的大小，从而对磁阻效应产生影响。也就是说，磁阻薄膜的磁化过程会直接影响到它的磁阻效应。

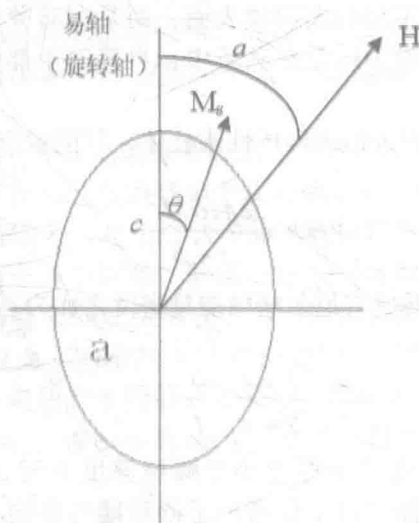


图1-4 薄膜磁化过程中的坐标系统

由于薄膜在厚度方向的尺寸很小，磁化矢量平行于膜面取向，而且大