

# 铁磁金属薄膜磁性的电场调制

王美芳<sup>1 †</sup> 金晓峰<sup>2</sup>

(1 复旦大学附属中学物理教研组 上海 200433)

(2 复旦大学物理系 上海 200433)

**摘要** 文章主要介绍了 Science 上发表的 Weisheit M 等人利用外加电场调制铁磁金属薄膜磁性的实验工作. 该工作所用的实验方法简单、有效, 为人们改变金属磁性开辟了一条崭新的道路. 有序合金 FePt 和 FePd 具有垂直的磁晶各向异性, 将它们置入碳酸丙烯酯的电解液中, 利用铁磁薄膜和液体接触面形成的双电层电容结构, 可以在样品表面产生很大的电场, 从而可以调控金属薄膜费米面附近未成对的 d 电子的态密度. 由于费米面附近电子填充数的变化, 铁磁薄膜的磁晶各向异性也会受到调制. 实验结果表明,  $-0.6\text{mV}$  的电压变化会导致厚度为  $2\text{nm}$  的 FePt 和 FePd 合金的矫顽力分别减少  $4.5\%$  和增加  $1\%$ . 这是第一次观测到电场调控金属薄膜磁性的实验工作.

**关键词** 金属磁性的电场调制, 磁性超薄膜, 磁晶单轴各向异性

## Magnetism in thin-film ferromagnets modified by an electric field

WANG Mei-Fang<sup>1 †</sup> JIN Xiao-Feng<sup>2</sup>

(1 high school affiliated to Fudan university, shanghai 200433, China)

(2 Physical department, Fudan university, shanghai 200433, China)

**Abstract** We describe an experiment in which the magnetism of a ferromagnetic thin-film is modified with an external electric field. The magnetocrystalline anisotropy of ordered FePt (FePd) compounds which have perpendicular magnetocrystalline anisotropy can be modified by an applied electric field when immersed in an electrolyte. The modification of the magnetic parameters is attributed to a change in the number of unpaired d electrons in response to the large electric field because of the formation of an electrolytic double layer in front of the ferromagnetic thin-film. The experimental results demonstrated that a voltage change of  $-0.6$  volts on a  $2\text{ nm}$  thick film altered the coercivity by  $-4.5\%$  and  $+1\%$  in FePt and FePd, respectively. This is the first experimental observation of the modification of the magnetism in thin-film ferromagnets by an electric field.

**Keywords** magnetism in thin-film ferromagnets modified by electric field, ferromagnetic thin-film, magnetocrystalline anisotropy

## 1 引言

自旋电子学是近年来科学和工业研发的一个热点, 用巨磁阻和隧穿磁阻效应研制的磁头就是自旋电子学器件在工业中的最早应用. 关于磁场和电流对磁性的调控已经有很多研究, 利用外加电场调控磁性也有一些实验工作. 比如 H. Ohno 的实验发现, 外加  $125\text{V}$  的电压(相当于场强为  $1.68 \times 10^8 \text{V/m}$  的电场), 可以将 (Ir, Mn)As 稀磁半导体的居里温度  $T_c$  提高  $1\text{K}^{[1,2]}$ , 但由于 (Ir, Mn)As 稀磁半导体的  $T_c$  远低于室温, 所以不能实际应用. 除了在稀磁半导体和铁电体中实现了应用电场调制磁性, 还没有

在实验上发现可以利用电场调制铁磁金属的磁性.

众所周知, 铁磁金属及其部分合金具有高于室温的居里温度, 所以如果能够利用电场调制它们的磁性(比如磁化强度或磁晶各向异性), 则是很有意义的工作. 但是, 由于金属在电场作用下有静电屏蔽现象, 金属表面的感应电荷会阻止电场进入导体内部, 电场只能存在于最表面的原子尺度内, 显然很难对体结构起作用. 可以预计, 如果利用分子束外延技术生长金属超薄膜, 使得其表面积与体积之比足够

2008-03-27 收到

† 通讯联系人, Email: fokitte@hotmail.com

大,就有可能观测到电场调制的效应。

为了得到比较大的电场,我们可以在 FePt 表面依次外延生长电介质(如 MgO)薄膜和金属薄膜(如 Au 电极)形成固体电容,并加电压。但生长出足够薄而又质地均匀的 MgO 介电层在实验上是极困难的,而介电层存在的不均匀极易使两极短路,因此,利用固体电容实现比较大的电场是比较困难的。将金属膜浸入有机溶液中,利用超薄膜和溶液接触面形成的双电层(double layer)结构,不仅可以有效地克服使用固体电容的缺点,而且由于电势降主要在双电层结构上,所以利用双电层电容还能得到比较大的电场。

本文主要介绍 Weisheit M 等利用双电层电容实现电场调制金属薄膜磁性的实验<sup>[3]</sup>。

## 2 实验方法、结果和理论分析

实验选择了具有 L1<sub>0</sub> 结构的 FePt 和 FePd 有序合金,因为它们具有比较高的 T<sub>c</sub>(750K),较大的饱和磁化强度(饱和场 1.4T),比较强的磁晶单轴各向异性(K<sub>u</sub> = 6.6MJ/m<sup>3</sup>(FePt), K<sub>u</sub> = 1.8MJ/m<sup>3</sup>(FePd)),以及较大的矫顽力,同时化学性质稳定。样品的制备是在 MgO(001)表面外延生长,厚度分别为 2nm 和 4nm 的 FePt, FePd 合金(为保证晶格匹配, Pt, Pd 作为过渡层), X 射线衍射(XRD)实验结果表明,它们的薄膜结构和体结构同样都是 L1<sub>0</sub> 有序结构,磁化强度的易轴垂直膜面, FePt, FePd 的各向异性场分别达到 8T 和 2.5T。

实验装置如图 1 所示,作为阴极的 FePt(FePd)超薄膜和作为阳极的 Pt 电极被置于碳酸丙烯酯(Propylene Carbonate)有机溶液中(本实验之所以选择有机溶液而不是水溶液,是因为有机溶液化学性质更稳定)。在有机溶液中加入金属钠,一方面可以除去溶液中可能残留的水,另一方面为 FePt(FePd)超薄膜表面形成双电层结构提供了所需的阳离子(即被溶剂化的 Na<sup>+</sup>)。如果将阳极 Pt 电极)面积做得远大于阴极(本实验中是 30:1),大部分的电压降 U 就会集中在 FePt(FePd)超薄膜表面的双电层结构上(阴极和阳极构成电容串联,两个电容带电量 Q 相同,但由于阴极面积小,所以阴极的电容 C 就比较小,根据  $U = \frac{Q}{C}$ ,可以得知在阴极处的电压降比较大)。

实验过程中为了防止阴极的铁被还原,阴极电压低于 -400mV,为了防止其他一些电化学反应(如有机溶液被电解),阴极电压最低不超过 -1000mV。

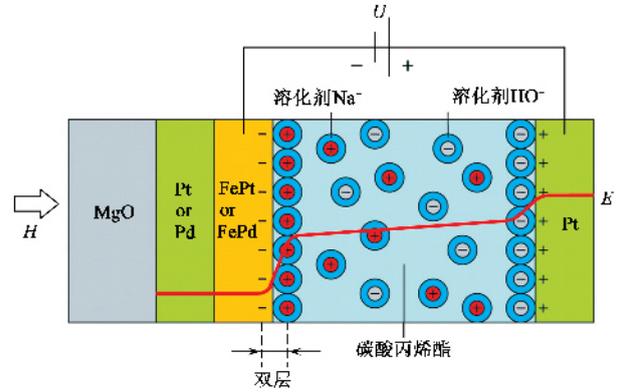


图 1 实验原理示意图(FePd(FePt)与碳酸丙烯酯溶液在接触面上形成了双电层结构,阳极(Pt)面积远大于阴极,大部分的电压降就集中在阴极的双电层结构上)

利用极向磁光克尔效应(外场 H 的方向垂直于样品表面,并且平行于光入射面),在室温下测量不同电压作用下的磁滞回线。从磁滞回线上可以得到饱和磁化强度 M 及矫顽力 H<sub>c</sub>。在一级近似下,矫顽力 H<sub>c</sub> 正比于磁晶单轴各向异性常数 K<sub>u</sub>。这样就得到了磁晶单轴各向异性常数 K<sub>u</sub> 随外加电场的变化情况。

实验结果如图 2 所示:在电压从 -400mV 变化到 -1000mV 过程中,厚度为 2nm 的 FePt 和 FePd 的矫顽力分别减少 4.5% 和增加 1%,厚度为 4nm 的 FePt 矫顽力减少 1%,而厚度为 4nm 的 FePd 没有矫顽力的变化。2nm 厚的 FePt 还出现了克尔转角 3% 的改变,但在其他样品中没有发现这个效应。样品的矫顽力随外加电压的变化是可重复的,这就说明这种变化来源于样品本征的磁性变化,而并非是由样品的沾污或退化造成的。

为什么电场能改变 3d 族过渡金属及合金的内禀磁性呢?理论上的解释是这样的:根据巡游电子模型,这类材料的磁性来源于靠近费米面附近的未成对的 d 电子。如果能改变费米面附近的电子态密度,就能改变磁性。在这个实验中,双电层结构的电容  $C/A = 30\mu\text{F}/\text{cm}^2$ (金属在碳酸丙烯酯溶液中具有很大的介电常数  $k = 66^{[4]}$ ),设薄膜的厚度为 d,则单位体积的容纳电量为  $\frac{CU}{Ad}$ ,由于阳极面积远大于阴极,这里的 U 可近似认为就是电源电压。L1<sub>0</sub> 有序结构的 FePt 和 FePd 的原胞体积为  $V = ac^2/2$ ,其中  $a = 0.385\text{nm}$ ,  $c = 0.371\text{nm}$ ,这样每个原胞得到的电量为  $q = \frac{CU}{Ad}V$ 。如果 U 取 600mV, d 取 2nm 代入,可得每个原胞得电子数为 0.015 个。根据理论计算<sup>[5]</sup>,如果 FePt 的原胞每增加一个电子,其磁晶单轴各向异性

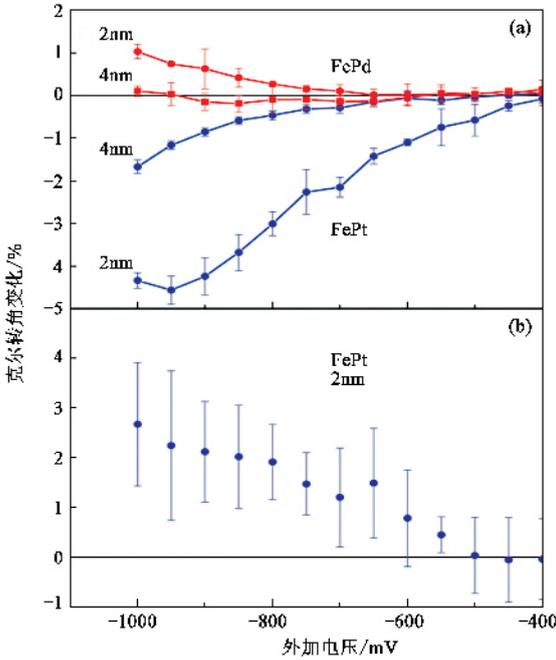


图2 (a)不同厚度 FePt 和 FePd 的矫顽力随电压的变化 ;( b ) 2nm 厚度的 FePt 克尔转角改变随电压的变化

能有 200% 的减少,而 FePd 的磁晶单轴各向异性能有 70% 的增加. 实验上发现 2nm 厚的 FePt 和 FePd 合金矫顽力分别有 3% 的减少和 1% 的增加,这和理论计算的结果基本相符合.

从理论计算可以看出,电场对 3d 族过渡金属

及合金磁性的调制,从本质上讲是因为电场的存在提供了电荷转移. 这一实验方法之所以成功,最巧妙的地方就在于利用了有机溶液和超薄膜表面的双电层结构得到一个性能优良的电容器:电容足够大(因为双电层结构只有几个埃,介电常数大),同时几乎所有的压降都集中在样品表面的电容上,这样样品表面会有比较多的电荷转移. 换句话说,即铁磁薄膜被注入了电子. 正是由于铁磁薄膜费米面附近的电子填充数发生了变化,才导致铁磁薄膜的磁晶各向异性发生了相应的变化.

### 3 结束语

物质所表现出的磁性是由其电子结构决定的,对物质磁性的研究不但大大加深了我们对微观世界的认识,同时又有很高的应用价值. 本文所介绍的实验方法简单、有效,从而为改变其金属磁性开辟了一条崭新的道路. 为进一步研究物质结构和磁性之间的复杂关系打开了一扇新的大门.

#### 参考文献

[ 1 ] Ohno H *et al.* Nature ,2000 408 :944  
 [ 2 ] Chiba D ,Yamanouch M ,Matsukura F *et al.* Science ,2003 301 :943  
 [ 3 ] Weisheit M *et al.* Science ,2007 315 :349  
 [ 4 ] Chernyak Y ,Chem J. Eng. Data ,2006 51 :416  
 [ 5 ] Daalderop G H O ,Kelly P J ,Schuurmans M F H. Phys. Rev. B , 1991 44 :12054



# 北京欧普特科技有限公司

光学元件库—欧普特科技

欢迎访问:

www.goldway.com.cn

北京欧普特科技有限公司严格参照国际通常规格及技术指标,备有完整系列的精密光学零部件(备有产品样本供参考)供国内各大专院校、科研机构、试验室随时选用,我公司同时可为您的应用提供技术咨询. 我公司可以提供美国及欧洲产的优质红外光学材料,如硒化锌,硫化锌,多光谱硫化锌等.



- 光学透镜:平凸、双凸、平凹、双凹、消色差胶合透镜等.
- 光学棱镜:各种规格直角棱镜,及其他常用棱镜.
- 光学反射镜:各种尺寸规格的镀铝、镀银、镀金,及介质反射镜. 直径 5mm—200mm.
- 光学窗口:各种尺寸规格,材料的光学平面窗口,平晶. 直径 5mm—200mm.
- 紫外石英光纤:进口紫外石英光纤 SMA 接口光纤探头,紫外石英聚焦探头.
- 国产滤光片:规格为直径 5mm—200mm.(紫外,可见,红外)及窄带干涉滤片.
- 进口光学滤光片:长波通滤光片/短波通滤光片 波长 400—1000nm,窄带干涉滤光片

地址:北京市海淀区知春路 49 号希格玛大厦 B 座#306 室 电话 010-88096218/88096217 传真 010-88096216  
 北京市 Intor 网址:www.goldway.com.cn E-mail:kevinchen@goldway.com.cn,shinan@goldway.com.cn,zengan@goldway.com.cn

联系人 陈镛先生,施楠小姐,曾安小姐,郑海龙先生