

# 用电子全息法观测磁畴结构\*

陈建文 寇雷刚 王之江

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

**提要** 介绍了采用高轴式电子全息法测量微磁畴和畴壁的工作原理以及实验方法和结果。

**关键词** 电子全息法, 磁畴

## 1 引言

磁畴是强磁性物质中,由大量排列整齐的磁分子组成的集团,具有确定的单一的自旋方向。磁性材料的许多实用性质都与磁畴结构密切相关,因而磁畴结构的研究对于了解和改进磁性材料的性能是非常重要的。

早期都是借助于 Lorentz 显微镜来观测磁畴结构<sup>[1]</sup>,这种方法是基于使电子显微象散焦,在磁力线急骤弯曲的地方产生衬度的机制来观察磁畴。这不仅看不到图象的细节,并且丢掉了电子波的部分位相信息。

最近几年来,随着场发射电子显微镜的不断发展,为电子全息术提供了高亮度的单色电子束源,使电子全息技术日臻成熟。用电子全息术观察微电磁场结构成了物理学领域中的一个活跃分支。

1967年 M. S. Cohen 首次提出用电子全息术可以给出磁畴结构的直观信息,随后 Tonomura, Pozzi 和 Missiroli 用电子干涉术验证了磁畴结构确实影响电子的位相。Wahl 和 Lau 对此还作了理论研究。1980年 Tonomura 首次采用电子全息法观察到铁氧体微粒内的磁畴结构<sup>[2]</sup>。自此人们把电子全息术作为一个有效的工具用来研究磁性材料和微磁场结构<sup>[3-5]</sup>。例如研究超导体中的磁通量子及二维磁通量子晶格等<sup>[6]</sup>。

本文介绍了用电子全息法测试枕木壁式微磁畴结构的工作原理和实验结果并和 Lorentz 显微术观察方法进行了比较。

## 2 电子全息法观察微磁场结构的工作原理

许多理论和实验已证明,对于 100 keV 的高能电子束,纯磁性样品通常可以看成位相物

\* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1994年12月29日; 收到修改稿日期: 1995年3月7日

体,电磁场样品对电子束位相的影响可以通过求解薛定谔方程式求出

$$\left[ \frac{(-i\hbar\nabla + e\mathbf{A})^2}{2m} - eV \right] \psi = E\psi \quad (1)$$

式中  $V$ ,  $\mathbf{A}$ ,  $E$ ,  $e$  和  $m$  分别是电势、磁矢势、电子的能量、电量和质量。如果待测电磁场很弱,电子在穿越电磁场以后,能量基本不变,即  $E \simeq eV_0$ , 其中  $V_0$  是电子的加速电压。采用 WKB 近似,可以得到方程解。假定电子的波函数是  $\psi = R(\mathbf{r})\exp[i2\pi S(\mathbf{r})/h]$ ,  $h$  是普朗克常数,  $R$  和  $S$  是实函数,代入上式并分离虚部和实部,得到

$$(\nabla S + e\mathbf{A})^2 - 2me(V + V_0) = \frac{\Delta R}{R}\hbar^2 \quad (2)$$

$$\nabla[R^2(\nabla S + e\mathbf{A})] = 0 \quad (3)$$

电磁场很弱时,其振幅变化忽略不计,即满足条件

$$2meV \gg \frac{\Delta R}{R}\hbar^2 \quad (4)$$

此时有

$$m\mathbf{v} = \nabla S + e\mathbf{A} \quad (5)$$

$$m\mathbf{v} = [2me(V + V_0)]^{1/2} \simeq (2meV_0)^{1/2} \left( 1 + \frac{V}{2V_0} \right) = \frac{h}{\lambda} \left( 1 + \frac{V}{2V_0} \right) \quad (6)$$

所以电子经过电磁场之后,相位变化为

$$\Delta\phi(x_0, y_0) = \frac{\pi}{\lambda V_0} \int V(x, y, z) ds - \frac{2\pi e}{h} \int \mathbf{A}(x, y, z) ds \quad (7)$$

其中  $s$  是电子的运动轨迹。在纯磁场情况下,电子经过纯磁场后的相位变化为

$$\Delta\phi(x_0, y_0) = -\frac{2\pi e}{h} \int \mathbf{A}(x, y, z) ds \quad (8)$$

通常电子偏转方向很小,上式中的积分可以沿  $z$  轴方向进行

$$\Delta\phi(x_0, y_0) = -\frac{2\pi e}{h} \int A_z(x_0, y_0, z) dz \quad (9)$$

上式是电子全息术中非常重要的公式,它清晰地表明:当电子束穿越磁场区域时,电子束位相中含有该磁场的信息。沿任意两条路径通过磁场后的相位差是

$$\Delta\phi(x_0, y_0) = -\frac{2\pi e}{h} \oint A_z(x_0, y_0, z) dz = -\frac{2\pi e}{h} \int \mathbf{B} \cdot d\Omega \quad (10)$$

式中  $\mathbf{B}$  是磁场,  $\Omega$  是环路包围的面积。可以看出电子经过两条不同路径的位相差正对应着它们包含的磁通量,等位相线正对应着磁力线投影线。由于电子全息术可以完整记录和重现相位信息,所以可定量地测量磁场分布。等相位线之间的间隔为  $h/e' = 4.1 \times 10^{-15}$  Wb。

### 3 电子全息术的实验方法

电子全息术是一个两步成象过程,第一步是记录,是在电子显微镜中进行的。即用电子束照明物体,被物体衍射的电子束和参考束发生干涉,记录在底片上;第二步是重现。通常是用相干的可见光照明全息图,获得原始物波的光学重现波前,然后提取振幅和相位信息。以下分两部分进行讨论。

#### 3.1 电子全息图的记录

实验是在菲利浦 EM 400T 场发射透射电子显微镜上进行的。工作电压为 100 keV, 样品是非晶态坡莫合金, 在真空中蒸镀而成, 厚度为 35 nm。为了防止物镜的磁场对样品磁畴结构的影响, 工作时关掉物镜, 显微镜工作在衍射模式, 衍射透镜的作用就象一个成象透镜。因此, 从全息术型式而言, 这是一种象面全息术, 其目的是减小对电子束源空间相干性的要求<sup>[7]</sup>。

将待测样品置于样品室, 电子束的一半经过样品作为物束, 另一半不经样品作为参考束, 经电子双棱镜偏转后在棱镜的下方两者重合, 产生含有磁畴结构信息的干涉条纹, 如图 1 所示。干涉条纹的间距可以由加在棱镜丝上的电压控制。但由于电子的德布罗意波长很短, 所产生的干涉条纹间距很密, 超过通常电子干板的分辨率。即使具有这种超高分辨率的记录介质, 当条纹间距小于重现可见光波长时, 重现时, 除了倏逝波以外, 得不到任何信息。因此这个条纹间距必须经放大镜放大。

从分辨率的角度来看, 干涉条纹间距至少要小于待测物体的分辨细节的三分之一。这就要求有一个合适的放大倍数。由于以上诸多原因, 使电子全息实验存在有较多的困难。

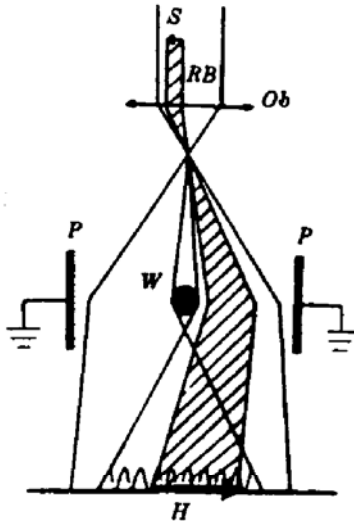


Fig. 1 Schematic diagram of an electron holography  
S; specimen; RB; reference beam; Ob; objective lens; W; biprism; P; plates; H; hologram

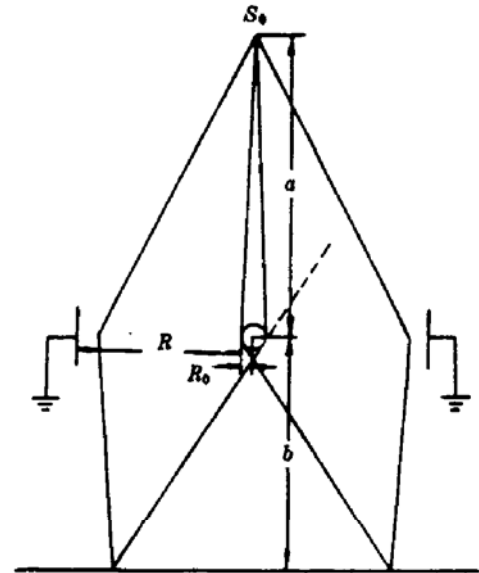


Fig. 2 Schematic of Mollenstedt-type electron biprism

迄今为止提出了各种各样的电子干涉仪方案, 不过, 可以说, 能付诸实用的大概只有 Mollenstedt 等发展的电子双棱镜。这个装置是由两块板状接地板与中央的丝状电极构成, 如图 2 所示。丝的直径为  $0.35 \mu\text{m}$ , 用导电胶固定在一个框架上, 并绝缘地架设在接地电极上, 安装时要使细丝与接地电极平行, 以保证细丝附近的场是对称的, 丝上的电压从 0 到 150 V 连续可调。电子在双棱镜中的偏转角为

$$\alpha = \pm \frac{\pi}{2} \frac{1}{\ln(R_0/R)} \frac{V_1}{V_0} \quad (11)$$

很显然它类似于光学中的双棱镜。式中  $R_0$  为双棱镜丝的半径,  $R$  为丝到接地电极的距离,  $V_0$  为电子显微镜的加速电压,  $V_1$  为丝上所加的电压。从上式可以看出, 似乎只要增加丝上的电压就可以获得任意大的偏转角。事实上, 当考虑源的空间相干性以后, 所允许的最大偏转角为<sup>[8]</sup>

$$\alpha < \frac{(a+b)(\ln 3)^{1/2}}{k b_0 \epsilon} \quad (12)$$

式中  $\epsilon$  是电子束源线度,  $a$  是双棱镜丝到等效电子束源的距离,  $b$  是双棱镜到观察平面的距离,  $k$

是波矢。

### 3.2 电子全息图的重现和实验结果

目前电子全息图的位相信息重现和提取有三种方法：计算机数字重现<sup>[9]</sup>、两次曝光法<sup>[10]</sup>和位相差放大技术<sup>[11]</sup>。本实验采用位相差放大技术。

所谓位相差放大技术就是将重现象的两共轭波相干叠加，可获得相位放大二倍的磁畴等高图。若将上述过程重复  $n$  次，则位相差放大  $2n$  倍，这种放大技术对弱位相物体尤为适合，但存在一定的误差<sup>[12]</sup>。

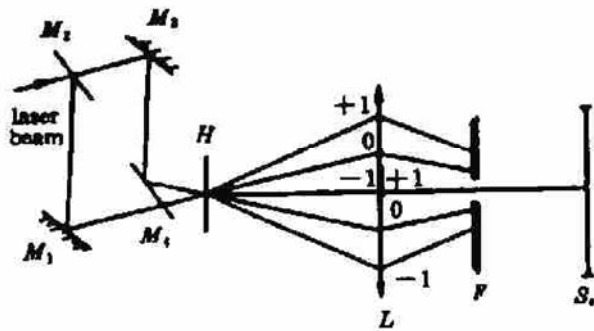


Fig. 3 Schematic diagram of optical reconstruction by a Mach-Zehnder interferometer

$M_2, M_4$ , half mirrors;  $M_1, M_3$ , mirrors;  $H$ , hologram;  $F$ , aperture;  $L$ , lens;  $S$ , observation plane

将上述拍摄好的电子全息图放在如图 3 所示的光路中，即让 Mach-Zehnder 干涉仪的两束光照射同一张全息图，每一束入射光都将在透镜  $L$  的后焦平面上产生 0、 $\pm 1$  级三个衍射斑点，那么在象平面上就可以获得磁畴精细结构，如图 4(a) 所示。

一个有趣的现象是，当将观察屏偏离成像位置观察时，就可以获得一散焦象，这正是采用 Lorentz 显微镜拍摄时所获得的磁畴象，如图 4(b) 和 (c) 所示。

从图 4(b) 和 (c) 看出，在 Lorentz 显微象中，只有磁力线急骤弯曲的地方才会产生衬度。即当薄膜中磁场分布为  $\nabla \times B = 0$  时，在 Lorentz 显微象中不产生衬度。

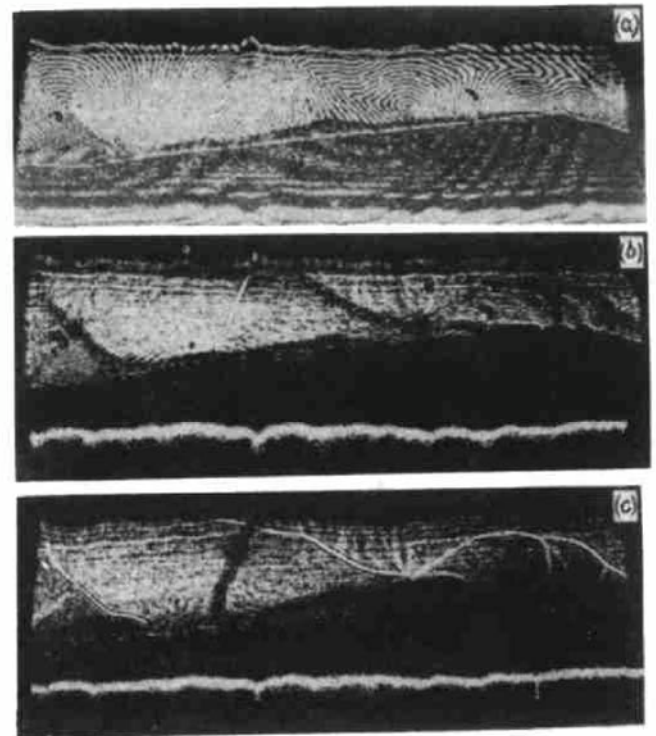


Fig. 4 Cross-tie wall in a permalloy thin film

(a) holographic reconstruction. Magnetic lines of forces are directly observed near a cross-tie wall; (b) and (c) Lorentz micrographs

## 4 讨 论

从图 4(a) 可以看出，相邻两磁畴自旋方向相反，在两磁畴之间有一个畴壁。在畴壁内磁场强度逐渐减弱，并且从一个自旋方向转变成另一个自旋方向；在相交处磁场强度为零，即存在一个中性区，如图 5 所示。材料工作者的目的就在于缩小这个畴壁的尺寸，以提高磁性记录密度。

从图 4(b) 和 (c) 可以看出，在欠焦和过焦情况下，Lorentz 显微象表现相反的黑白衬度，这是由于相邻磁畴磁场方向相反，因而导致通过的电子束在 A 区域发散，在 B 区域会聚，如图 6 所示。

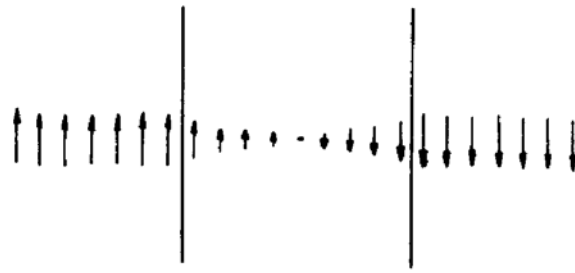
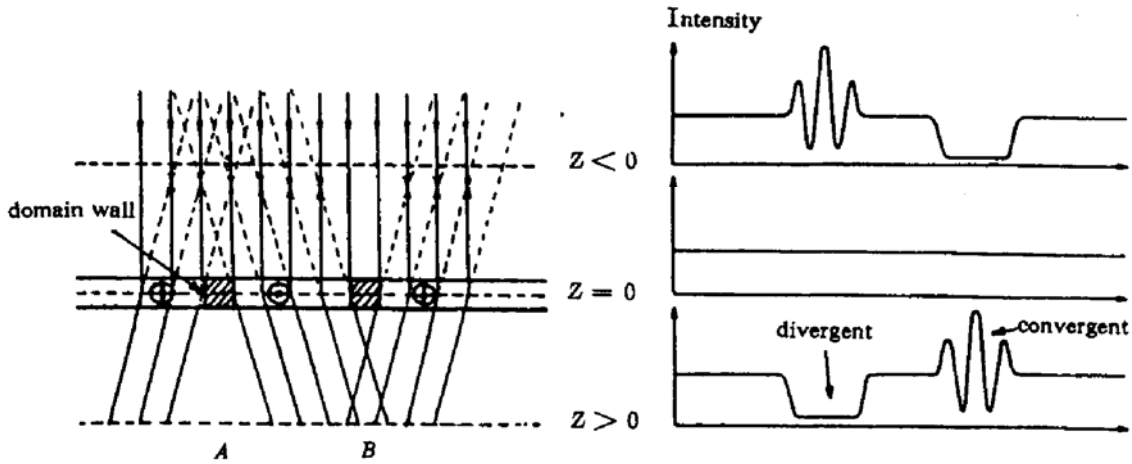


Fig. 5 Rotation of magnetization in a domain wall

Fig. 6 Schematic representation of the intensity distribution of the electron beam which passes through a ferromagnetic foil containing two  $180^\circ$  domain walls

## 5 结 论

由于电子全息图中包含了电子波的全部信息,所以采用电子全息法不但可以定量地测出微磁畴精细结构,而且当采用光学方法重现时,在非成象位置还可以获得 Lorentz 显微象。

## 参 考 文 献

- 1 R. H. Wade. Lorentz microscopy of electron phase microscopy of magnetic objects. *Advances in optical and electron microscopy*, R. Barer, V. E. Cosslet eds, New York; Academic press, 5, 1973. 239
- 2 A. Tonomura, T. Matsuda, J. Endo *et al.*. Direct observation of fine structure of magnetic domain walls by electron holography. *Phys. Rev. Lett.*, 1980, 44:1430
- 3 G. Matteucci, G. F. Missiroli, G. Pozzi. Interferometric and holographic techniques in transmission electron microscopy for the observation of magnetic domain structures. *IEEE Trans. Magn.*, 1984, 20:1870
- 4 J. N. Chapman. The investigation of magnetic domain structures in thin foils by electron microscopy. *J. Phys. D*, 1984, 17:623
- 5 G. Matteucci, G. F. Missiroli, J. W. Chen *et al.*. Mapping of microelectric and magnetic fields with double exposure electron holography. *Appl. Phys. Lett.*, 1988, 52:176
- 6 T. Matsuda, A. Fukuhara, T. Yosuida *et al.*. Computer reconstruction from electron holograms and observation of fluxon dynamics. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, 66:457
- 7 J. W. Chen. The image holography method in electron microscopy. *J. Mod. Opt.*, 1987, 34:1525
- 8 J. W. Chen. The wave theory of electron interference and the method for selecting experimental parameters. *Optica Acta*, 1986, 33:733
- 9 H. Lichte. Electron holography approaching atomic resolution. *Ultramicrosc.*, 1986, 20:293
- 10 陈建文, 傅淑芬, 张大可 等. 电子全息中的两次曝光法. *光学学报*, 1987, 14(1):24
- 11 S. H. Fu, J. W. Chen. Phase difference amplification of double-exposure holograms. *Opt. Comm.*, 1988, 67:417
- 12 J. W. Chen. Some problems of reconstruction in electron holography. *Opt. Eng.*, 1993, 32:2593

## Observation of Magnetic Domain Structure by Electron Holography

Chen Jianwen Kou Leigang Wang Zhijiang

(Shanghai Institution of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

**Abstract** The principle of measuring magnetic domains and domain-walls by electron holography is presented and the experimental method and results are given.

**Key words** electron holography, magnetic domain

\*\*\*\*\*

# CHINESE JOURNAL OF LASERS B

Vol. B4, No. 4 (Series No. 22), August 20, 1995 (July/August)

## CONTENTS

### LASER DEVICES

- High performance AlGaAs Quantum well lasers with low beam divergence grown by molecular beam epitaxy ..... YANG Guowen, XIAO Jianwei, XU Zuntu *et al.* (289)
- A high efficient stable intracavity doubling Nd:YAG laser pumped by a laser diode ..... ZHANG Kuanshou, XIE Changde, GUO Ringxiang, PENG Kunchi (295)
- properties of Nd:YAG laser with the nonlinear absorption of the intracavity fullerenes ..... LUO Ting, YU Zhenxin *et al.* (301)
- Effect of OH<sup>-</sup> on fluorescence lifetime and laser performance of Er<sup>3+</sup> glass ..... JIANG Yasi, Daniel Rhonehouse, WU Ruikun *et al.* (307)
- Theoretical model of bidirectional signal propagation in distributed EDFAs ..... PANG Yong, JIANG Peixuan, XU Daxiong (313)

### LASER PHYSICS AND LASER CHEMISTRY

- Comparative experiments on XUV emissions from groove and planar target ..... WANG Xiaofang, XU Zhizhan, ZHANG Zhenquan *et al.* (319)
- Fundamental soliton compression due to induced-phase-modulation in the regime of normal group-velocity dispersion ..... XU Wencheng, LIU Junmin, LIAO Changjun, LIU Songhao (323)
- Computerized system of multiphoton ionization spectroscopy ..... LIN Meirong, JIN Shaojun, LIU Yaoming *et al.* (329)

### EXPERIMENTAL TECHNOLOGY AND ELEMENTS

- Analytic research of laser-generated plasma parameters ..... ZHANG Jianquan (335)
- Optical realization of comparison of binary patterns ..... HE Yongrong, HAN Liangkai, ZHOU Jin, GAO Wenqi (343)
- Generation of stable near-infrared and violet femtosecond pulses from a self-mode-locked Ti:sapphire laser ..... LI Weiliang, QIU Zhiren, PENG Wenji *et al.* (347)
- Cr:LiNbO<sub>3</sub> planar waveguide ..... ZHU Shengxiang, JIANG Xuyang, QIU Yuanwu *et al.* (355)

### HOLOGRAPHY AND INFORMATION PROCESSING

- Compact optical omega network ..... WANG Ning, YIN Yaozu, QIAN Jiajun, LIU Liren (361)
- Synthesis of binary computer-generated hologram by optimal recursive direct binary search algorithm ..... ZHAI Jinhui, RUAN Yu (369)
- Simulated study on recording and digital reconstruction of LLFT X-ray hologram ..... XIAO Tiqiao, CHEN Jianwen, XU Zhizhan *et al.* (377)