

电子全息术中的两次曝光法

陈建文 傅淑芬 张大可 倪瑞莲 王之江 曹涵清

(中国科学院上海光机所)

(宝山钢铁总厂)

提要: 以 LaB₆ 灯丝为电子束源, Möllenstedt 静电双棱镜为电子分束器, 在 JEM-200CX 热发射电子显微镜中采用两次曝光法, 获得了 MgO 晶体颗粒的等厚条纹。

Double exposure in electron holography

Chen Jianwen, Fu Shufen, Zhang Dake, Ni Ruilian, Wang Zhijiang

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

Cao Hanqing

(Bao Shan Steel and Iron Works)

Abstract: Contour fringes of MgO crystal grain were obtained by means of double exposure in JEM-200 CX heat emission electron microscope with LaB₆ filament as electron beam source and Möllenstedt electrostatic biprism as electron beam splitter.

一、引言

电子全息术的方法是 Gabor 1948 年提出的^[1], 其目的在于实现物体振幅和位相分量的完善变换, 然后再将振幅和位相分布分别检测出来, 以实现原子尺度的微观探测。

关于电子全息术中的位相检测已经有大量的实验研究报道^[2~4]。通常的做法是: 将所获得的电子全息图放在如图 1 所示的光路中进行再现, 即让 M-Z 干涉仪中的两束光, 分别照射全息图, 调整 M-Z 干涉仪的两臂, 使再现的共轭波重迭, 以达到振幅和位相分离的目的。若采用非线性方法记录全息图

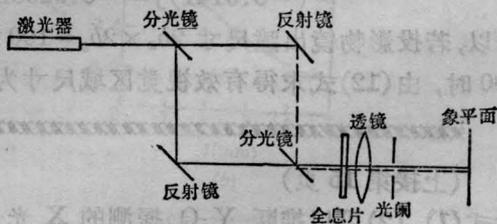


图1 采用 M-Z 干涉仪检测电子束位相时, 还可以实现高倍率的位相差放大。但是, 由于是共轭波迭加, 电子光学系统的象差同样将被放大。

另一种做法是: 在完全相同的条件下拍摄同一物体的两张全息图, 分别放置在 M-Z

收稿日期: 1986 年 4 月 14 日。

干涉仪的两个臂中进行再现。这种做法固然可以消除电子光学系统的象差,但却引进了再现系统的象差。

我们成功地解决了电子光学系统的各种漂移,在一张底片上,首次在电子全息技术中采用光学全息两次曝光方法拍摄了全息图,用 He-Ne 激光再现,观察到 MgO 单晶的等厚象。

二、电子束位相中包含的信息

电子束的位相与光波的位相在实质上有很大的差别。这里,我们使用波面的概念进行考察。电子束的位相 S/h 为^[5]

$$S/h = \frac{1}{h} \int (m\mathbf{v} - e\mathbf{A}) \cdot d\mathbf{s} \quad (1)$$

其相应的微分形式为:

$$m\mathbf{v} - e\mathbf{A} = \nabla S \quad (2)$$

式中 h 为普朗克常数, e 和 m 分别为电子的电荷和质量, \mathbf{A} 为矢势, \mathbf{v} 为电子的速度。

(1)式的物理意义是很清楚的:其中第一项是以德布罗意波长来计算程长求位相,它是由电场决定的,第二项代表矢势场的影响。虽然,电子束的位相是由电子所经历地区的电磁场决定的。因此,在电子束的位相中包含有电磁场的信息。电子束位相与光波位相在实质上的这种差别,主要是由于电子是带电粒子而光子呈电中性所导致的。

三、实验方法

电子全息首先是在电子显微镜中产生全息图。由于受电镜结构的限制,电子全息所采用的光路与光学全息有较大的差别。图2为制作电子全息常用的工作原理图。其中电子束源是 JEM-200 CX 热发射型透射式电子显微镜,电子分束器是 Möuenstedt 静电双棱镜。为了不对电镜作机械结构上的改动,双棱镜置于第一中间镜光阑处。图3为带有

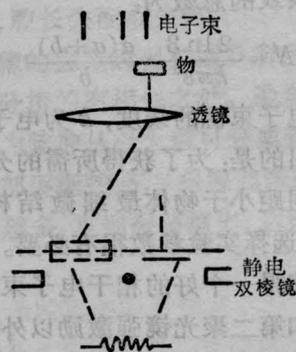


图2 制作电子全息原理图

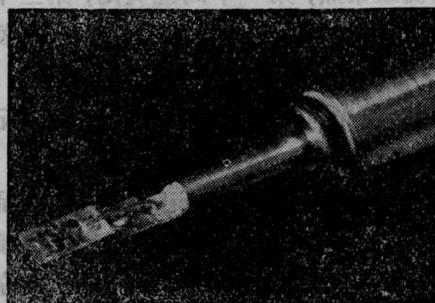


图3 带有静电双棱镜的插件

双棱镜的插件图。

将待测样品 MgO 单晶置于样品室。MgO 单晶是用烟熏法制取的。由于在电子的轰击下 MgO 单晶颗粒将会发生强烈振动,故采用深冷的方法“冻结”物体,以克服这种热扰动。电子束一半经样品作物束,而另一半不经样品作参考束。物束和参考束在双棱镜的作用下重合,产生含有待测物体信息的干涉条纹。干涉条纹的间距为:

$$\Delta = \frac{\lambda(a+b)}{2a\alpha} \quad (3)$$

式中 λ 为德布罗意波长, a 为等效电子束源到双棱镜丝的距离, b 为双棱镜丝到干涉平面的距离, d 为静电双棱镜的偏转角^[6]:

$$\alpha = \frac{\pi}{2 \ln \frac{r_0}{R}} \cdot \frac{V_f}{V_a} \quad (4)$$

式中 r_0 为双棱镜丝的半径, R 为双棱镜丝到地电极的距离, V_f 为静电双棱镜的工作电压, V_a 为电子显微镜的加速电压。

干涉条纹的总数为:

$$N = \frac{2 \ln 3}{k\pi \varepsilon^2} \cdot \frac{a(a+b)}{b} \quad (5)$$

式中 ε 为电子束源的线度, k 为电子波波矢。这里要指出的是: 为了获得所需的分辨率, 必须使条纹间距小于物体最细微结构的 $1/3$ 。因此, 正确选择实验参数很有必要。

为了获得一个好的相干电子束源, 除第一聚光镜和第二聚光镜强激励以外, 应尽量采用较小尺寸的光阑。由于采用了象面全息术, 物镜正聚焦, 第一中间镜关闭, 第二中间镜和投影镜将样品放大在底片上, 这样就获得了电子全息图。

两次曝光时, 一次无样品, 底片上记录的仅是干涉图形。然后将样品送入工作台, 进行第二次曝光。在两次记录期间要保证电镜工作状态不发生变化。这不仅需要谨慎小心地操作, 而且要防止周围环境被空间杂散磁场所污染, 保证电子束和样品稳定, 机械结构不发生振动, 否则将导致实验的失败。

两次曝光时, 由于插入样品, 使电子束产生的相移为:

$$\frac{\delta\phi(\mathbf{x})}{2\pi} = \frac{\delta V(\mathbf{x})\rho(\mathbf{x})}{2V_0\lambda} - \frac{e}{h} \int \mathbf{B}(\mathbf{x}) \cdot d\sigma \quad (6)$$

式中 V_0 是电子的加速电压, δV 是被测样品的内电势(通常为 $10 \sim 30$ V), ρ 是样品的厚度, 而 $\int \mathbf{B} \cdot d\sigma$ 是待测样品的磁通量。由于 MgO 单晶是非磁性材料, 若已知物体的内电势, 那么, 根据(6)式, 通过两次曝光方法, 就可以确定物体的厚度增量:

$$\Delta\rho = \lambda \left(\frac{2V_0}{\Delta V} \right) \quad (7)$$

四、实验结果

电镜的工作电压为 80 kV, 电源电压的稳定性为 2×10^{-6} , 静电双棱镜上施加的正

电压为 32 V, 丝直径为 $1.77 \mu\text{m}$, $a=14$ cm, $b=9$ cm, 电镜的标称放大率为 73,000 倍, 曝光时间 1 分钟。为了减小底片的相干噪声, 采用图 4 所示的再现光路, 因此 MgO 单晶粒子除了在电子显微镜中预放大以外, 还可以在再现光路中进一步被放大, 放大率可以通过物距和象距的变化来调节。

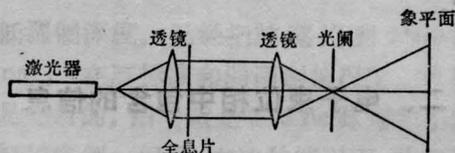


图4 MgO 晶体等厚图的再现光路

图 5 为用两次曝光法而获得的 MgO 单晶粒子的等厚图。

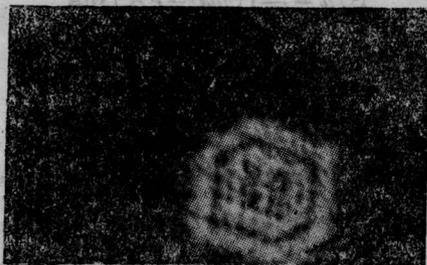


图5 MgO 单晶的等厚图

五、讨论

1. 本实验采用两次曝光法, 测试了 MgO 单晶的等厚图, 现在估算一下这种方法的灵敏度。如方程(7)所表明的, 当 $\Delta V=10$ V, $V_0=80$ kV, 两条等厚线之间的物体厚度增量 $\Delta\rho$ 为:

$$\Delta\rho = \lambda \left(\frac{2V_0}{\Delta V} \right) \approx 70.0 \text{ nm} \quad (8)$$

如果对条纹的偏移估计可以准确到 10%, 那么厚度测量的不确定量为 $\Delta\rho=7$ nm。当然, 如果采用较低的加速电压工作, 可以提高灵敏度。若采用位相差放大技术, 灵敏度将会大幅度提高。在光学全息术中, 位相差已经放大到 64 倍, 实际上这种技术已被移植到电子全息术中。

(下转第 30 页)

激光波长约为 8 mm (K_0 波段)。这与图 2 给出的理论值 (频率约 44 GHz) 符合。图 7 的其他工作参数是: 电子束能量 0.5 MeV, 束流 1 kA, 电子束持续时间 60 ns, 空心电子束截面外径 $\phi 16$ mm, 内径 $\phi 14$ mm; 漂移管内径 $\phi 20$ mm, 铁环波荡器共 26 个周期, 其周期长 22.5 mm, 全长 585 mm; 辐射由增益为

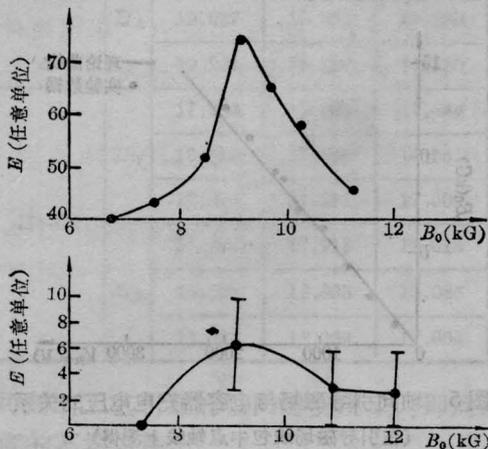


图 7 引导磁场 B_0 对激光输出能量 E 的影响
(条件: 上方, 空心电子束, 下方; 实心电子束;
采用铁环波荡器泵浦 (周期 22.5 mm))

13 dB 的喇叭输出, 由 H 面扇形喇叭接收, 经 3 m 长 K_0 波段标准波导管输入屏蔽房测试辐射脉冲的频谱及时谱; 由炭斗量热器测试激光能量。

将引导磁场置于最佳值 (9 kG) 处, 获得的较好结果的一组典型值为: 能量 13 mJ, 脉冲半高宽 25 ns, 平均功率 0.5 MW, 瞬时电子效率 0.1%, 波长约 8 mm (K_0 波段)。

引导磁场线圈是由中国科学院合肥等离子体研究所施嘉标、潘引年、王伟同志设计绕制的; 此外, 本工作是在王之江教授指导下进行的。作者对他们表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] 褚成等;《中国激光》, 1985, 12, No. 12, 767.
- [2] R. H. Jackson *et al.*; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1983, **QE-19**, 346.
- [3] 褚成等;《中国激光》, 1985, 12, No. 6, 330.
- [4] S. H. Gold *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1984, **52**, 1218.
- [5] S. H. Gold *et al.*; *Phys. Fluids*, 1984, **27**, 746.
- [6] J. A. Pasour *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1984, **53**, 1728.

(上接第 26 页)

如果采用其他方法能够测出两条等厚线之间的厚度增量, 那么采用上述方法, 就可以测定物体的内电势。

2. 本实验中采用的 MgO 单晶, 其颗粒的线度约为 80.0 nm, 因此在这里讨论分辨率似乎没有意义。

参 考 文 献

- [1] D. Gabor; *Nature* (London), 1948, **161**, 777.
- [2] H. Wahl; *Optik*, 1974, **39**, 585.
- [3] A. Tonomura, T. Matsuda; *Optik*, 1979, **53**, 143.
- [4] K. J. Hanszen; *Electron Microsc. Proc. Eur. Congr. 7th*, 1980, Vol. 1, 140.
- [5] 外村彰;《应用物理》, 1984, **53**, No. 8, 664.
- [6] 兹建文;《光学学报》, 1985, **5**, No. 3, 229.