

# 电子束干涉和电子干涉仪

傅淑芬 陈建文 王之江

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

曹涵清

(宝山钢铁总厂中心实验室)

## 提 要

本文描述了在 JEM-200CX 电子显微镜上装入 Möllenstedt 电子双棱镜构成的电子干涉仪和电子干涉实验结果,详细叙述了双棱镜的结构和干涉仪光路设计,讨论了可得到的干涉条纹数目与束源亮度的关系。

## 一、引 言

电子束干涉是随着电子显微镜的发展而发展起来。从 1940 年 Boersch 等观察到在小孔或半透明开孔边界上的 Fresnel 衍射条纹起,许多电子显微镜专家开始重视电子干涉工作,并先后发展了多种形式的电子干涉仪器。双束干涉实验分别在 1953 年由 Marton 等和 1954 年由 Möllenstedt 等获得成功,这种双束干涉装置称为电子干涉仪。1957 年, Möllenstedt 等又构成了电子干涉显微镜,用以观察物体引起的相位调制,1959 年实现了电子的杨氏实验,电子的 Michelson 干涉仪出现在 1972 年,Young-Fresnel 双镜干涉仪在 1978 年制成。现在,电子干涉仪已成为许多微观课题研究中的有用工具,例如固体的微观电磁场测量等。

随着电子显微镜技术的发展和改进,电子亮度的不断提高,电子干涉仪也日趋完善。近几年,已用场发射电镜进行了电子全息实验<sup>[1]</sup>,获得了很好的结果。可以预料,电子干涉技术将为提高电子显微镜的分辨率作出贡献,特别是结合全息技术,有希望将微观尺度的物体细节再现到肉眼可见的尺度<sup>[2]</sup>,这是一项很有意义的工作。

本文将详细介绍我们在 JEM-200CX 电子显微镜上装入 Möllenstedt 双棱镜构成的双束干涉仪和有关的实验结果。

## 二、Möllenstedt 双棱镜

选取 JEM-200CX 电子显微镜作为电子干涉实验的仪器,它具有较高的电源稳定度 ( $\Delta u/u = 2 \times 10^{-6}$ ) 和机械稳定性,受外电磁场的干扰小,用 LaB<sub>6</sub> 阴极,有较高的束源亮度。为方便地加入电子分束器而又不电子显微镜做任何改动,取第一中间镜光阑平面作为双

棱镜插入平面。图 1 是整个双棱镜系统的简图, 包括调整系统和引入元件。棱镜主体部分结构如图 2,  $A$  为双棱镜接地板, 双棱镜的细丝用导电胶固定在一个小框架  $B$  上,  $B$  绝缘地固定在  $A$  上, 并将绝缘材料用  $B$  全部遮住以避免充电引起场畸变。  $B$  经一导线与外电池联接, 电源电压  $0\sim 145\text{ V}$  连续可调,  $A$  经显微镜外壳接地。安装时使细丝  $F$  刚好处于两接地板  $G_1$  和  $G_2$  中间并与其平行, 以保证细丝附近场对称。

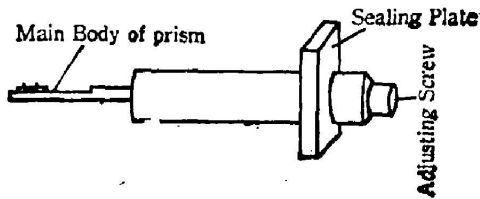


Fig. 1 Electron biprism system

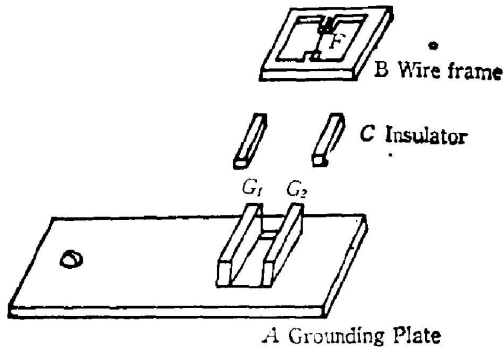


Fig. 2 Schematic diagram of the biprism

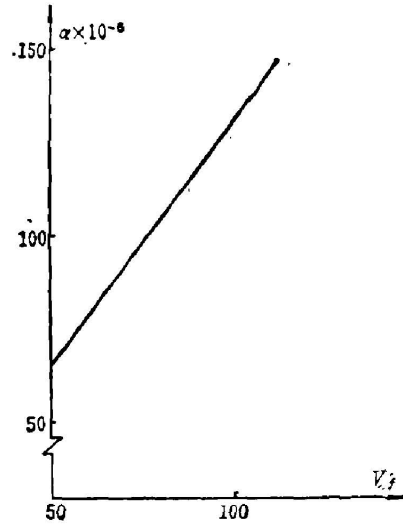


Fig. 3 Electron deflection angle  $\alpha$  vs.  $V_f$

由于实际电子束只通过细丝附近很小的区域, 在一级近似下可视丝附近场为常数, 这样给出电子的偏转角与丝电压  $V_f$  成正比, 与电子加速电压成反比<sup>[3]</sup>,

$$\alpha = CV_f/U. \tag{1}$$

$C$  为由实验布局决定的常数, 可用实验测得。当丝上加一正电压时, 在观察屏上得到的重叠区尺寸为<sup>[4]</sup>

$$W = \frac{2aba - \phi(a+b)}{a}. \tag{2}$$

已知  $a, b, \phi$  (细丝直径), 测得  $W$ , 便可由 (2) 式求出偏角  $\alpha$ , 图 3 是实验测得的  $\alpha$  与  $V_f$  的关系, 近似为一直线 ( $a, b$  的意义见图 5)。

### 三、电子光学光路

图 4 示出实验光路。聚光镜  $C_1, C_2$  均处于强激励状态, 以期获得尽可能小的光斑尺寸。经  $C_1, C_2$  缩小后的像再经物镜缩小一次, 得到用来照明的电子束源, 其直径为  $S$ 。Möllenstedt 双棱镜置于第一中间镜  $I_1$  的光阑处, 也就是通常说的视场光阑处。电子束经棱镜分成两束, 并在  $I_1$  后面相交, 调节第二中间镜  $I_2$  和投影镜  $P_r$  的组合焦距, 可将处于两束重叠区不同位置的干涉条纹成像在底片面  $FL$  上。图 5 是电子经双棱镜的路线图,  $OP$  为

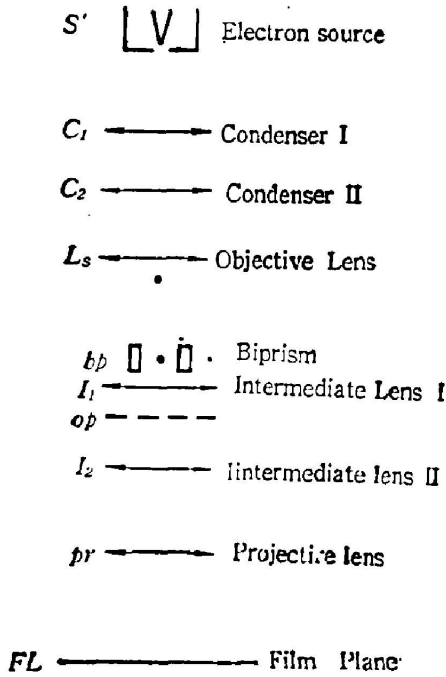


Fig. 4 Schematic diagram of optical system

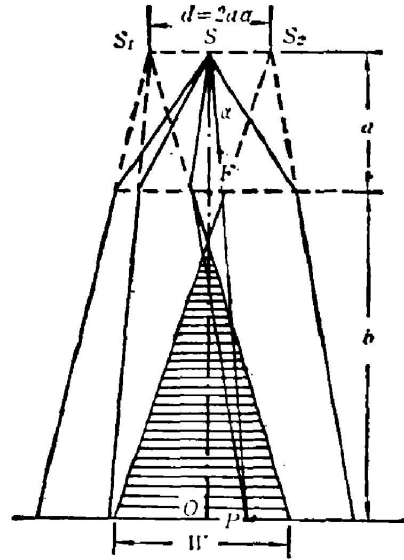


Fig. 5 Effective optical path of electron beam passing by the biprism

$I_2$  和  $P_r$  组合系统的物平面。为获得较大的  $b$  值,  $I_1$  关掉。

这种光路选择具有以下优点:

1. 可以不对电子显微镜作任何改动, 只加入一个双棱镜系统取代第一中间镜光阑, 便可进行衍射和干涉实验, 双棱镜系统很容易与视场光阑互换;

2. 灯丝经聚 I、聚 II 和物镜三个透镜聚焦后成一缩小的像, 可得到一更小的干涉仪光源, 从而有更好的相干性。由于在干涉实验中, 为得到好的条纹对比度, 光源线度  $S$  必须满足

$$S \leq a\Delta/4b, \tag{3}$$

$\Delta$  为干涉条纹宽度, 对给定的  $a$  和  $b$ , 减小  $S$ , 可得到小的  $\Delta$ ;

3. 在样品台上置一物体, 便构成一台电子干涉显微镜, 可以在底片上拍下物体引起的相位变化, 从而得到物体的有关信息。

#### 四、实验结果和讨论

在电子干涉实验中, 所能拍到的最多干涉条纹由以下几个量决定: 电子束的亮度  $B$ 、曝光时间  $T$ 、底片可分辨的最小条纹宽度  $d$  和使底片感光所要求的最小电流密度  $I$ 。  $T$  可取的最大值由实验决定, 例如电子显微镜电源的稳定性、机械稳定性以及保持样品不受破坏的最大照射时间等, 对给定的样品或实验条件有一个确定值。对给定的底片,  $d$  和  $I$  也是确定的, 因此所能得到的最多条纹数决定于源的亮度  $B$ , 那末在底片相同、曝光时间相同的条件

下,获得的干涉条纹数目是束源亮度的间接变量。当然,单纯做为摄取干涉条纹的目的,可以将曝光时间拉长到仪器稳定性允许的最大值,因为双棱镜本身并不受电子束照射的影响。但对实际的干涉仪,总是要对某种样品进行测量,而样品在电子束的照射下会发生各种变化,甚至失去原来属性,并且由于曝光过程中样品的变化,将使底片完全成为一片模糊,所以曝光时间要尽可能短,必要时要对样品进行液氮冷却。在我们的实验中,曝光时间在1分钟左右。

电子干涉仪的分辨率依赖于干涉条纹的宽度,一般总希望干涉条纹尽可能窄。(4)式给出最小条纹宽度

$$\Delta_{\min} = 4bS/a, \quad (4)$$

在我们的实验中,  $a = 14 \text{ cm}$ ,  $b = 9 \text{ cm}$ , 估计  $S = 500 \text{ \AA}$ , 由(4)式求得  $\Delta_{\min} = 0.13 \mu$ 。为将这样的条纹记录在  $d = 20 \mu$  的底片上而保持尽可能大的照度,  $I_1$  和  $P_r$  的组合放大率  $M$  应取为  $M = d/\Delta_{\min} \approx 154$  倍。

图6是在上述干涉仪中获得的一组干涉照片。从(a)到(d)丝上的电压  $V_f$  分别为  $0 \text{ V}$ ,  $15 \text{ V}$ ,  $20 \text{ V}$  和  $25 \text{ V}$ 。(a)对应细丝的衍射。上述照片的阳极电压  $U = 80 \text{ kV}$ 。

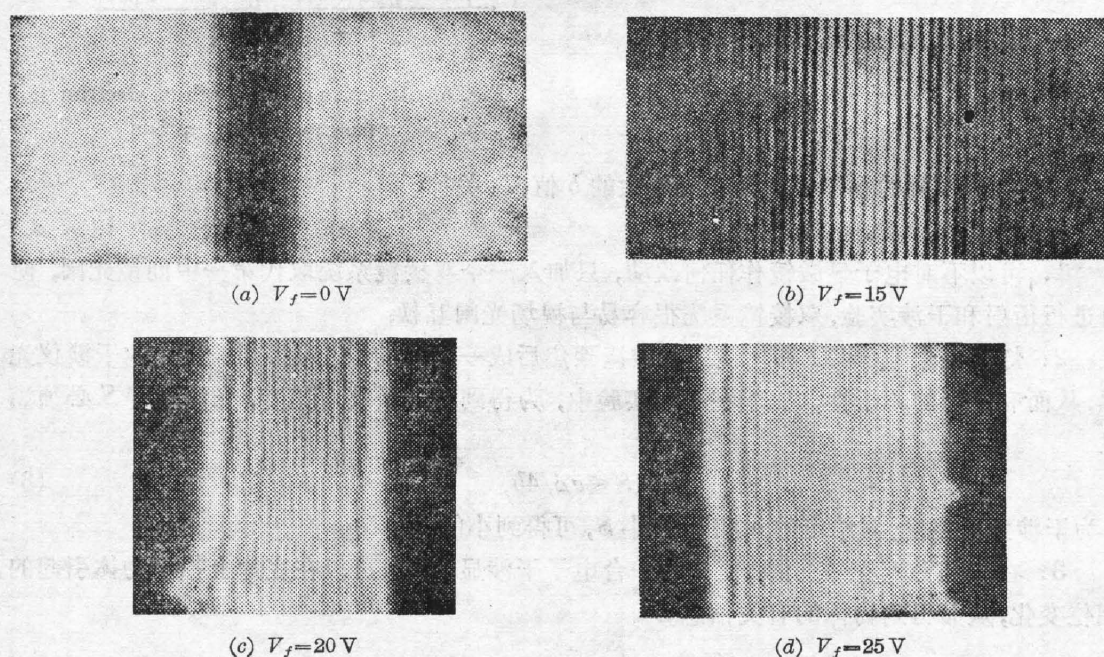


Fig. 6 Electron interference fringes with accelerating voltage  $U = 80 \text{ kV}$

图7是经信息处理后的照片(d)的一部分,去掉了衍射背景。从照片(d)上数到360条干涉条纹。

实验表明,我们设计的电子干涉仪是稳定的,具有较好的场分布,便于调整和装拆,获得的干涉照片是满意的。本装置可以作为一台电子干涉显微镜使用,例如用来测量相位物体的等位线。由于在  $80 \text{ kV}$  时电子的波长  $\lambda \approx 0.04 \text{ \AA}$ , 干涉可分辨的相位变化也是波长量级,因此可给出  $0.04 \text{ \AA}$  的程差精度。关于这种干涉仪的应用将另文报道。

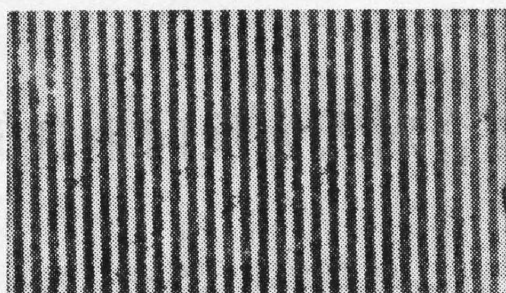


Fig. 7 Interference fringes after information processing

### 参 考 文 献

- [1] Akira Tonomura *et al.*; *J. Electron Microsc.*, 1979, **28**, No. 1 (Jan), 1.
- [2] J. Endo *et al.*; *Ico-13 Conference Digest, Ico-13*, (Sapporo, Japan, 1984).
- [3] M. Vanzi; *Optik*, 1981, **58**, No. 2 (Feb), 103.
- [4] O. Donati *et al.*; *American Journal of Physics*, 1973, **41**, No. 5 (May), 639.

## E-beam interference and electron interferometer

FU SHUFEN, CHEN JIANWEN AND WANG ZHIJIANG

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

CAO HANCHING

(*Central Laboratory, Baoshan Iron and Steel Plant, Shanghai*)

(Received 13 March 1985; revised 12 September 1985)

### Abstract

Experimental results of an electron interferometer are presented. The interferometer was set up by installing a Möllenstedt biprism in a JEM-200CX electron microscope. The configuration of the biprism and the optical system of the interference experiments are described in detail. The relation between the maximum number of obtainable interference fringes and the source brightness is discussed.