

电子全息法观测点电荷微 电场分布及荷电量*

陈 建 文

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

本文采用一种简易制备静电场样品的方法,基于以下物理事实:一个置于薄导电碳膜上的非导电粒子,例如直径为 $0.31 \mu\text{m}$ 聚乙烯乳剂小球,在电镜中观察时,由于静电积累效应,它将成为一个荷电体,很显然,这个荷电体带有正电量 Q ,并能用一个点电荷场来模拟这个合成电场。采用这个模型,能用电子全息法观测由该点电荷所形成的静电场分布及荷电量的大小。

关键词: 电子全息术; 静电场分布; 静电积累效应。

一、引 言

点电荷所形成的静电场分布,在理论上早已解决,但迄今尚无实验方法来直接观察这种分布。获得点电荷不是难事,但缺乏一种有效的观察手段。近年来,由于电子全息术的不断发展,为这种观察提供了可能性。

采用电子全息术观察微磁场分布,已有许多理论和实验研究工作。对于揭示微磁畴的精细结构,发展高密度磁记录材料,已获得许多有意义的结果,尤其值得提出的是,采用电子全息法来验证物理学中长期争论不休的 $A-B$ 效应^[1],也提供了佐证。但是对于微电场的观察,却很少。1978年, Kulyuping 等^[2]将一曲率半径为几百埃的带有高电压的金属针尖置于干涉电子显微镜的光路中,观察到双棱镜条纹受外电场的影响而发生弯曲现象。最近, Matteucci 等人^[3]在半导体 $p-n$ 结处,施加一反向电压,采用电子全息法企图观察到 $p-n$ 结处的微电场分布。但是这一工作不仅需要化费较大的精力去从事样品制备,而且获得的仅仅是漏电场分布,原因是样品的减薄遇到困难。

本文采用一种简易制备样品的方法,基于以下物理事实:一个置于导体上的非导电粒子,例如灰尘或电镜常用的标准样品聚乙烯乳剂小球等,在电镜中观察时,由于静电积累效应,它将成为一个荷电体,这早已在实验中被证实^[4],而该粒子荷电量的大小与照明该粒子的束流有关。这一屡见不鲜的现象,却一直未被人们所利用过。

本文,采用上述方法制备样品,利用全息术,观察到这种荷电体的等电位线分布,并定量地测量出荷电量的大小。

二、电子束和静电场的相互作用

当电子穿越某一电磁场区域时, 则电子束的相位中将包含该区域电磁场信息^[5], 因此, 只要测定电子束的相位分布就可以探测出该区域电磁场的分布, 而测定相位分布, 只有借助于电子全息干涉度量学。

假定入射电子束是一平行束, 由于电场或磁场的作用, 电子束的波面发生偏转, 或相位发生延迟。如果以电子波长为单位来画倾斜波面的等高线, 那么在磁力线情况下, 等高线沿着磁力线方向, 等高线之间的间隔为 $h/e (=4.1 \times 10^{-15} \text{ wb})$, 式中 h 为普郎克常数, e 为电子电荷数。在电场情况下, 等高线是沿着等电位线, 而等高线之间的间隔不象磁场情况下那样简单地用一方程来描述。

如果电子显微镜中电子能量比起待研究的静电场能量大得多, 静电场对电子束相位的影响可以用不含时间的非相对论薛定谔方程来描述:

$$\psi(x, y) = \frac{\pi}{\lambda E} \int_l V(x, y, z) dz, \quad (1)$$

上述积分是沿着电子运动轨迹进行的, λ 为电子的德布罗意波长, E 为电子的加速动能, V 为静电势。

现在我们讨论一下, 采用电子全息法测试点电荷电场分布以及荷电量大小的可能性。显然问题归结为对方程(1)中积分核的确定。我们采用点电荷模型, 即假定点电荷位于在 x, y, z 坐标上的 $P(x_0, y_0, a)$ 点, 式中 a 为点电荷荷体的半径, 采用镜像法, 很容易写出它的电势分布为:

$$V = KQ \left[\frac{1}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-a)^2}} - \frac{1}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z+a)^2}} \right], \quad (2)$$

式中 K 为常数, $K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \times 10^9$, Q 是荷电量, 将(2)式代入(1)式, 并作以下假定:

1. 荷电粒子的内电势分布是均匀的;
2. (1)式积分沿 z 轴进行, 而不是沿电子运动轨迹进行, 这种近似已被许多文献证明是可行的^[6], 从而求得

$$\psi(x, y) = \frac{-2\pi KQ}{\lambda E} \arcsinh \left[\frac{a}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}} \right]. \quad (3)$$

由于所研究的点电荷载体的线度为 nm 尺度, 所以不考虑电子显微镜中光学系统像差的影响。由于我们所关心的只是相位因子, 可以略去曝光以及重现过程中各种照明参数对振幅项的影响, 并且认为是线性记录(包括电子全息图的记录和重现过程中重现像的记录), 因此重现像的强度分布为:

$$I(x, y) = 1 + \cos \left[\frac{KQ}{\lambda V_0} \arcsinh \frac{a}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right], \quad (4)$$

(4)式已将点电荷体移置 x, y 坐标原点, 因此, $x_0 = y_0 = 0$ 。 V_0 为电子显微镜的加速电压。

从干涉理论, 两相邻最大干涉级之间应满足以下条件:

$$\frac{KQ}{\lambda V_0} \left[\arcsinh \frac{M_1 M_2 a}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}} - \arcsinh \frac{M_1 M_2 a}{\sqrt{x_2^2 + y_2^2}} \right]^{-1} = 1. \quad (5)$$

因此, 荷电粒子的荷电量为:

$$Q = \frac{\lambda V_0}{K} \left[\operatorname{arcsinh} \frac{M_1 M_2 a}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}} - \operatorname{arcsinh} \frac{M_1 M_2 a}{\sqrt{x_2^2 + y_2^2}} \right]^{-1}, \quad (6)$$

式中: M_1, M_2 分别为电子显微镜电子光学参数放大倍数和重现阶段光学放大倍数。

从(6)式可以看出: 给出电子显微镜的加速电压, 以及测出重现像中干涉条纹间距和放大后点电荷荷体的直径, 可以方便地求出荷电量的大小。

三、电子全息图的记录

电子全息图是利用 Philips EM 400 场发射透射式电子显微镜作为电子束源, 样品是直径为 $0.31 \mu\text{m}$ 置于碳膜上的聚乙烯乳剂小球, Möllenstedt 静电双棱镜作为电子分束器进行拍摄的。静电双棱镜是由两块板状接地电极与中央的丝状电极构成, 为图 1 所示。丝的直径通常为 $1 \mu\text{m}$ 左右, 两接地电极相距为几 mm。从丝的两侧入射的电子束, 被加在丝上的正电压所吸引, 从而在双棱镜下方重叠。如果电子束源的空间和时间相干性足够好, 那么在重叠区将会形成干涉条纹。与光学双棱镜情况相似, 在无负载的情况下, 得到等间距的干涉条纹, 干涉条纹间距为^[7]:

$$\Delta = \frac{\lambda V_0 (a_1 + b) \ln \frac{r_0}{R}}{a \pi V_f},$$

式中: r_0 和 R 分别为双棱镜丝的半径和双棱镜丝到接地电极的距离, a_1 和 b 分别为等效电子束源和干涉平面到双棱镜丝的距离, V_f 为静电双棱镜的工作电压, V_0 为电子显微镜工作电压, 显然, 条纹间距受施加在双棱镜丝上的电压控制。

将待测样品置于样品室, 电子束的一半经过样品作为物束, 另一半不经过样品作为参考束, 两者重合后, 产生含有待测静电场信息的干涉条纹。

为了减小对电子束源相干性的要求, 采用像面全息术^[8], 为了减小样品漏电场对参考束的影响, 关掉物镜, 采用低放大倍率的工作方式。电子双棱镜的工作电压为 15 V, 总束流为 $10 \mu\text{A}$, 曝光时间为 1 sec。

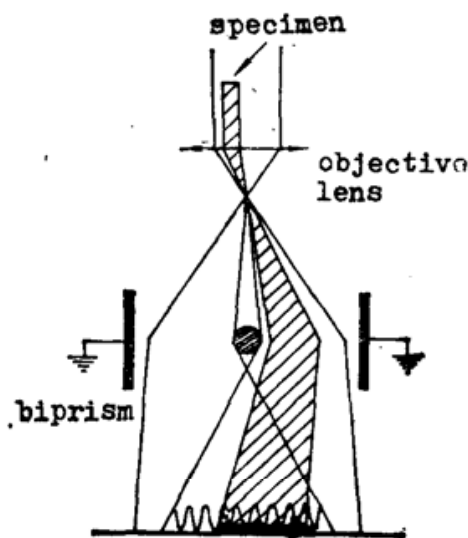


Fig. 1 Schematic of electron biprism

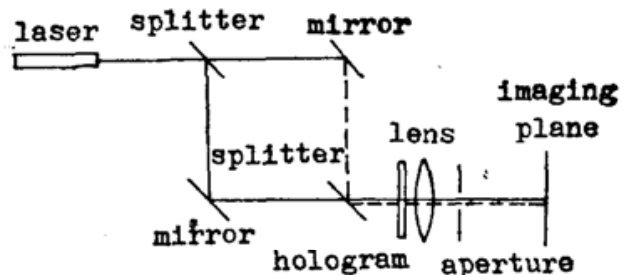


Fig. 2 Optical reconstruction system for phase difference amplified in electron holography

四、电子全息图的重现和实验结果

电子全息图中相位信息的重现有两种方法:一种是二次曝光法^[9],它能精确地重现原始物体的波前,但灵敏度低;另一种是相位差放大技术^[10],它能将弱的相位变化信息,成数量级地放大,但重现过程中会人为地引进误差,为了克服各自的缺点,本文实验中将两者进行结合,即将二次曝光获得的等相位图为准进行放大。

将上述获得的电子全息图放在图 2 所示的光路中进行重现,即让马赫-陈德尔干涉仪中的两束光分别照射全息图,调整马赫-陈德尔干涉仪的两臂,使再现的 ± 1 级共轭波重叠,便可获得相位差放大 2 倍的等高图,如图 3 所示。位于图中心的两个粒子,即为聚乙烯乳剂小球,在电子显微镜束流作用下,由于静电效应,已成为一个荷电体,围绕粒子的同心圆,为球体的等相位的投影。从图中还可以看出,干涉条纹同心圆被一横越线截断而错位,这是由于两小球正位于支撑碳膜厚度突变之处所致。



Fig. 3 The Micro-electrostatic field distribution generated by two charged sphere

从图 3 可以测出: $M_1 M_2 a \approx 2.5 \text{ mm}$, 相邻等相位环的半径(第三环)和第四环分别为: $\sqrt{x_1^2 + y_1^2} = 7.5 \text{ mm}$, 和 $\sqrt{x_2^2 + y_2^2} = 15 \text{ mm}$, 加速电压 $V_a = 100 \text{ kV}$, 电子波长 $\lambda \approx 0.04 \times 10^{-10} \text{ m}$, $K = 9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{coul}^{-2}$, 将以上诸值代入(6)式求得:

$$Q = 1.44 \times 10^{-16} \text{ coul},$$

而一单电子的荷电量为:

$$|e| = 1.6 \times 10^{-19} \text{ coul},$$

因此,本实验中测得聚乙烯乳剂小球上俘获约 900 个电子。

五、讨 论

1. 这里要指出的是,制作样品时,整个操作过程中,要防止样品被空气中悬浮的微尘所污染,因为这些微尘同样可以视为非导电粒子,当沉积在碳膜上时,亦会引起静电积累,而导

致测试误差。

2. 采用上述实验方法和给出的公式, 同样可以对膜层厚度进行测量, 其测试精度主要取决于干涉环尺寸的宏观量的测试等。

3. 本文采用一点电荷模型, 易于将实验结果和理论计算结果进行比较。

本文工作是在联合国科教文组织国际理论物理中心的资助下, 在意大利 Bologna 大学物理系完成的。对于意大利 Bologna 大学物理系电子显微镜中心的同事 G. Pozzi, G. F. Missiroli 和 G. Matteucci 教授协助完成此项工作, 表示深切的谢意。

参 考 文 献

- [1] A. Tonomura *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1986, **56**, No. 8 (Feb), 792~795.
- [2] Yu. A. Kulyupin *et al.*; *Optik*, 1978/1979, **52**, No. 2 (Dec), 101~104.
- [3] S. Farabboni *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1985, **55**, No. 20 (Nov), 2196~2199.
- [4] V. Drahos *et al.*; *Z. Angew. Phys.*, 1969, **27**, 237.
- [5] 陈建文等;《中国激光》, 1987, **14**, No. 1 (Jun), 24~26.
- [6] G. Matteucci *et al.*; *IEEE. Transactions on magnetics*, 1984, **mag-20**, No. 5 (May), 1870.
- [7] Chen Jianwen; *Optica Acta*, 1986, **33**, No. 6 (Jun), 733~744.
- [8] Chen Jianwen; *J. Modern Optics*, 1987, **34**, No. 12 (Dec), 1525~1534.
- [9] G. Matteucci *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1988, **52**, No. 3 (Jan), 176~178.
- [10] O. Bryndahl; *J. Opt. Soc. Am.*, 1969, No. 1 (Jan), 142.

Observation of electrostatic field generated by point-charges and measurement of charged quantity by electron holography*

CHEN JIANWEN

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

(Received 9 September 1988; revised 14 September 1989)

Abstract

A simple and easy method is used for preparation of the electrostatic field specimen in this paper. On account of following physical factor, some dielectric particles supported by a thin carbon film, for example, polystyrene latex spheres, 0.31 μm in diameter, will become a charged body during the observing in electron microscope because of electrostatic accumulation. Obviously, under the electron beam, the spheres, of radius r , acquire a stationary positive charge Q , and the resulting field can be simply modelled by that of a point charge Q . With the field model, the electrostatic field distribution were observed and the magnitude of the charged quantity is determined by electron holography.

Key words: electron holography, electrostatic field distribution, electrostatic accumulation.

* Part of result in this paper was presented in 1987'16th Congr. Electric. Micr., Bologna, Italy.