

# 电子和离子光学的象差理论<sup>1)</sup>

西门纪业

(北京大学无线电电子学系)

电子和离子光学的研究范畴是带电粒子在电磁场中聚焦、成象、偏转等的规律,它的理论基础是经典力学、经典电动力学和光学。它依据带电粒子在电磁场中运动与光线在光学媒质中传播之间的相似性,运用类似于光学的方法和概念(例如费马原理、光程函数、折射率、射线、透镜和象差等)形成自己的理论体系。在二、三十年代,电子和离子光学开始发展。现在电子和离子光学已渗透到无线电电子学、电子和离子显微学、质谱学、固体物理和表面物理、材料科学、高能加速器物理和等离子体物理等许多学科领域中。

电子和离子光学包括如下几个主要方面:

1. 旋转对称成象系统(由旋转对称静电透镜或磁透镜构成)的细束、宽束电子光学(研究电子束聚焦成象,几何象差和色差),应用于电子显微镜与细束、宽束电子器件。
2. 电磁偏转系统(由横亘于电子束运动方向上的偏转电磁场组成)的扫描束电子光学(研究偏转扫描与偏转象差),应用于扫描电子显微镜和电子束管的偏转器。
3. 电磁多极系统(由方位角方向对称配置的电极或磁极组成)的非旋转对称电子光学(研究聚焦散焦性质、束流传输与非旋转对称象差),应用于象差矫正器和束流传输系统。
4. 能量-质量分析系统(由不同类型电场、磁场分析器构成)的弯曲轴电子光学(研究质量分散、能量分散及其象差),应用于电子和离子质谱仪、能谱仪。

作者从五十年代初开始从事电子和离子光学的研究,工作范围涉及上述各主要方面,着重致力于研究电子和离子光学的象差。大家知道,由于不同类型的电磁场具有不同的光学性质,导致了独特的、形式复杂的电子离子光学象

差,它们决定了光学系统的性能和品质。因此,在电子和离子光学发展历史上,象差理论一直是一个重要课题。

由作者撰写的《电子和离子光学原理及象差导论》<sup>[1]</sup>一书于1983年由科学出版社出版,该书总结了作者从事电子和离子光学研究的主要成果。1986年作者将其专著译成英文,书名为《电子和离子光学的象差理论》<sup>[2]</sup>,由美国和英国的学术出版社作为《电子学和电子物理进展》丛书的单独增刊发行。作者的主要研究成果有以下六个方面:

1. 运用变分原理全面处理电子和离子光学聚焦、成象、偏转、象差等基本问题,将旋转对称系统、电磁偏转系统、电磁多极系统和弯曲轴离子光学系统都纳入统一的理论框架中,形成完整的普适的理论体系<sup>[1,2]</sup>。

2. 发展了电子和离子光学的矩阵代数方法,运用复数或矢量描写轨迹,采用矩阵表示象差。电子和离子通过存在象差的光学系统时可以用变换矩阵来描写其传输性质,证明了刘维定理成立<sup>[3]</sup>。由于采用了普遍的矩阵代数表述方式,我们就可以把电子和离子光学理论与仪器器件的实际设计结合起来,从而适合于运用现代电子计算机辅助设计方法来解决电子和离子光学设计计算问题,其中包括计算电场和磁场,计算带电粒子在电场和磁场中运动轨迹,计算电子和离子光学系统的光学性质和象差,计算多透镜系统的光学性质和象差的传递,电子和离子光学系统的最优化设计等。

3. 近年来扫描束电子光学的最新发展集中在电磁聚焦-偏转复合系统的研究和应用方面。

1) 本文介绍的研究成果于1987年获第三次国家自然科学基金四等奖。

在这种复合系统中,偏转象差与电磁透镜轴外象差互相补偿,使总的象差能够急剧减少。根据这一原理,设计研制出具有大扫描范围、高扫描频率、低象差和高分辨率(亚微米级到纳米级)电子束、离子束曝光机,它们在超大规模集成电路和超高速电子计算机的生产中将起重要作用。作者从七十年代以来开展了电磁聚焦-偏转复合系统的电子光学理论研究<sup>[4]</sup>。我们发展了普遍的电磁聚焦-偏转复合系统的相对论象差理论,导出了全部三级几何象差和一级色差公式,讨论了多级电磁偏转系统象差的叠加<sup>[5]</sup>;研究了电子束扫描系统象差的动态校正问题<sup>[6]</sup>,证明了可以消除复合系统中大多数的三级偏转象差。

4. 通常细束电子光学器件(如显象管和示波管)中电子束满足旁轴条件(即离轴距离和相对于轴线的斜率都很小),而宽束电子光学器件(如变象管和象增强管)中电子束却满足与前不同的近轴条件(即离轴距离很小,且横向速度也很小)。因此,在传统的电子光学文献中,人们认为细束和宽束电子光学系统是极其不同的两种类型,从而采用很不相同的方法来计算象差。作者于1957年首次建立了电磁聚焦阴极透镜三级象差的严格理论<sup>[7]</sup>。最近我们在文献[8]中从普遍的变分原理出发,发展了适用于细束和宽束的广义电子光学象差理论,确立了两者之间的转换关系。这一理论推广了电子光学奠基人 W. Glaser 的象差理论,适用于各种广泛类型的细束、宽束电子光学仪器器件的设计。

5. 电子光学理论已经证明了旋转对称电子光学透镜系统的球差和色差不可能消除,因此,长期以来人们致力于寻找其他途径来实现电子束聚焦成像。于是,非旋转对称的电磁多极系统便应运而生。作者研究了电磁多极系统的象差理论<sup>[1,2]</sup>,推导了电子显微镜中六极透镜与圆形透镜复合系统的象差<sup>[9]</sup>,证明了运用六极透镜可以消除三级球差。作者与美国科学院院士 A. V. Crewe 教授合作,在文献[10,11]中讨论了六极透镜与圆形透镜复合系统的轴外象差与波动象差,进一步论证了可能使扫描透射电子

显微镜的分辨率出现重大突破(达到 0.05nm)。

6. 通常的电子光学系统都是直线轴系统,其中电子束的主轨迹就是电磁场的对称轴——直线轴。但是在电子和离子谱仪中普遍采用了弯曲轴的电子和离子光学系统,它们具有特殊的质量分散和能量分散性质。作者发展了粒子谱仪中环形电场和非均匀磁场正交重叠场的离子光学象差理论<sup>[1,2]</sup>,导出了电磁正交重叠场中以矩阵表示的二、三级象差<sup>[12,13]</sup>。近来作者研究了变梯度、非均匀磁场弯曲轴电子谱仪的二级象差<sup>[14]</sup>。这些理论对于设计制造高性能粒子谱仪有重要意义。

总之以上六个方面的成果,不仅在理论上具有创造性与重要性,而且对于电子光学仪器(电子显微镜、质谱仪、能谱仪)、器件(电子束管和象管)、装置(电子和离子束曝光机)的设计研制均有指导意义。本项目已经在国内有关高等学校、研究所的电子离子光学教学、科研工作中得到了推广应用并发挥了作用。展望电子和离子光学未来的发展,作者预期在多学科交叉渗透的基础上将进一步建立起电子和离子光学的新理论和新体系。

- [1] 西门纪业,电子和离子光学原理及象差导论,科学出版社,(1983).
- [2] Ximen Jiye, Aberration Theory in Electron and Ion Optics, Adv. in Electronics and Electron Physics, Suppl, 17(1986), Academic Press, New York.
- [3] 西门纪业,物理学报,30(1981),1318.
- [4] 西门纪业,物理学报,26(1977),34;27(1978),247.
- [5] 李钰、西门纪业,物理学报,31(1982),604.
- [6] 西门纪业、李钰,物理学报,31(1982),1617.
- [7] 西门纪业,物理学报,13(1957),339.
- [8] 西门纪业、周立伟、艾克聪,物理学报, 32(1983),1536.
- [9] 西门纪业,物理学报,33(1984),629.
- [10] Ximen Jiye and A.V. Crewe, *Optik*, 69 (1985), 141.
- [11] Ximen Jiye, Zhifeng Shao and A. V. Crewe, *Optik*, 70(1985), 37.
- [12] 西门纪业,物理学报,29(1980),330.
- [13] Ximen Jiye and Chen Renshu, *Int. J. Mass Spectrom. Ion Phys.*, 44 (1982), 129, 153.
- [14] Ximen Jiye and Zhifeng Shao, *Optik*,71(1985), 73.