

# 纪念电子显微镜发明人 Ernst Ruska

吴自勤

(中国科学技术大学基础物理中心)

1988年5月末西柏林技术大学向报界宣布:诺贝尔奖金物理学奖获得者、电子显微镜发明人、物理学家 Ernst Ruska 于1988年5月27日去世,享年81岁。

E.Ruska 和 M.Knoll 在1932年发明电子显微镜<sup>[1]</sup>。因 Knoll 去世较早,所以1986年诺贝尔奖金物理学奖授予了 Ruska。和他同时分得另一半诺贝尔奖金的科学家是西德的 G. Binnig 和瑞士的 H.Rohrer, 这二位科学家发明了扫描隧道显微镜。从扫描隧道显微镜的发明到得奖,经过了五年,而 E.Ruska 则等了50多年才得到诺贝尔奖金。

E.Ruska 1907年生于现在西德的海得堡。他的父亲是一位科学史专家,他的舅父是一位天文学家,他的亲戚中也有不少学者。他生活在一个学术的环境之中。E.Ruska 在家中排行第五,他和他的六弟 Helmut 在学术上一直保持着密切的联系。在童年时代,他们就被舅父的天文望远镜和父亲的 Zeiss 光学显微镜所吸引,他们的父亲常让他们从显微镜中观察有趣的矿物和生物标本,但是不让他们动手以免损坏了显微镜。E.Ruska 受过良好的基础教育,他清楚地记得,中学物理老师透彻地讲过,静电场中电子的运动和引力场中质点的运动遵循同样的规律;他和想学医的 Helmut 讨论过老师讲的显微镜的分辨率受到光波波长的限制。

E.Ruska 喜欢工程。他先在慕尼黑学了二年电机工程,后随父到了柏林,上了柏林技术学院,在学院中他作为最年轻的成员、以高年级学生的身份参加了高(电)压实验室主任 A. Matthias 教授领导的阴极射线管科研组(1928年夏),当时的组长是工学博士 M.Knoll,从此

Knoll 和 Ruska 开始了发明电子显微镜的工作。

## 一、电子显微镜的发明

Knoll 小组中气氛友好,每个成员在下午喝咖啡时都可以提出科学问题进行讨论,这对 Ruska 的成长很有好处。Ruska 在完成了一些真空技术任务后集中精力研究阴极射线管中电子束的聚焦问题,以提高阴极射线示波管的性能。

在此之前的1927年,在耶拿的 H.Busch 的计算曾指出:由短直流线圈产生的轴对称不均匀磁场可以像一个凸透镜那样使电子束聚焦。他把计算结果和16年前他的实验结果作了比较,由于早期实验条件的限制,二者的相符情况并不好。尽管如此,Busch 在论文中仍提出“现在我们可以用电子成象”。这篇论文引起了科学界的重视。但是,多数科学家担心样品在电子束轰击下会变为灰烬。当时在柏林技术学院同一实验室在电子束研究方面有重要贡献,后来发明全息术的年轻科学家 D. Gabor 也持同样看法。他们当时没有想到,这些“灰烬”仍可以保持生物样品的构造,甚至有机分子的外形。

德国的高等学校要求学生作毕业论文之前,完成一个学年论文。从1928年11月1日开始,E.Ruska 在他的学年论文中利用阴极射线管在短线圈条件下检验了 Busch 的理论,得到了更好的结果,但是由于磁场分布范围仍过宽,使实验和理论相符的程度仍不够满意。1929年5月10日 Ruska 上交了学年论文,在论文中记载不少直径为0.3mm 阳极光阑的放大倍数不同的明锐的象,它们是用短线圈(磁透镜)获得的第一批电子光学象。

前面提到过 Gabor, 他曾在柏林技术学院高压实验室工作、攻读博士学位, 他离开时留下一个部分包有铁壳的线圈。根据 Busch 的理论, Ruska 自然地把他自己的线圈也用铁壳包围起来, 只在内壁留有窄的环状空隙, 这就使磁场分布范围变窄, 得到了更短的焦距。1929 年 Ruska, 1931 年 Ruska 和 Knoll 发表了这方面的论文, 他们从实验上测定了为达到同样的焦距, 包铁壳线圈的安匝数比不包铁壳时少得多。

1930 年 Ruska 在大学毕业论文中探索用静电透镜代替磁透镜的可能性, 因为前者更容易制造并且便宜。但是, 他在方案设计上犯了一个错误, 他以为由带孔电极组成的透镜具有镜面对称静电场分布, 因此不能产生聚焦作用, 他忽略了电子通过这种电场时速度有显著的变化, 因此会出现聚焦现象。Knoll 也没有发现这个错误。Ruska 采用了由四个球形栅网分成二组模拟玻璃透镜的方案, 在每一组栅网上加上电势差使电子发生折射。结果电子通过四个栅网时被吸收掉很大一部分, 因此实际效果不好。于是, Ruska 又转过来发展磁透镜。他后来认为, 这是他的运气。如果当初他采取了合理的静电透镜方案, 那么他只可能在十几年后才会知道, 对电子显微镜来说, 磁透镜比静电透镜优越得多。

1931 年初 Ruska 获得学位后留在高压实验室工作。他在 1929 年工作的基础上再加用一个透镜。1931 年 4 月 7 日, 他在 50 kV 电压下用第一个线圈获得了放大 13 倍的铂栅网象, 用第二个线圈获得放大 4.8 倍的黄铜网象, 以及第一级放大 3.6 倍、第二级放大 4.8 倍、总放大 17.4 倍的铂网象。这样的总放大倍数虽然很小, 但是产生它的仪器总究成了今天的电子显微镜的雏型, 即第一台电子显微镜。1931 年 6 月 4 日, Knoll 在柏林技术学院作题为《阴极射线示波器的设计基础和新的结构》的演讲, 详细介绍了 Ruska 的上述工作, 当时他们商定先不使用“电子显微镜”的名称。但是在 1932 年的 *Z. Phys.* 78 卷 318 页上, Knoll 和 Ruska

联名发表了题为《电子显微镜》的论文。可以认为: 1932 年(以论文发表年份为准)是电子显微镜发明的年份。

虽然德布罗意在 1924 年就给出了粒子动量和波长的关系, 但是作为工程师的 Ruska 和 Knoll 一直到 1931 年夏才得知这个关系。在此之前, 他们简单地认为电子的尺寸非常小, 没有波长的问题, 不像光那样会受到光波衍射决定的分辨率的限制。知道这一关系后, 他们大为失望。但是, 后来他们又作了计算, 并在 1932 年的论文中对电子显微镜的未来做了预测, 他们得出: 当加速电压 75kV, 孔径角  $2 \times 10^{-2}$  rad 时衍射限制的分辨率将是 0.22nm。这样的分辨率终于经过了 40 年实现了。

1932 年 4 月, Knoll 得到一个公司职位, 他离开了学院。Ruska 和他的同学、后来的妹夫 B.von Borries 继续发展电子显微镜, 他们企图让电子显微镜具有超过光学显微镜的分辨率。这时, 即将完成医学学习的 Helmut 给了他很大的鼓励。他的弟弟和其他许多生物学家、医学家不同, 认为电子显微镜的进展会大大地促进生物学、医学的发展。1932 年, Ruska 和 von Borries 在铁壳线圈内加上了极靴(它一直沿用到今天), 进一步缩短了磁场范围, 减小了焦距。他们在 1932 年申请了专利。Ruska 以这种磁透镜的研制和焦距的测量作为他的博士论文内容, 在 1933 年 8 月论文完成时, 他获得了 75keV 电子束的焦距为 3mm 的好结果。在此基础上, 他及时地设计制造了分辨率更高的电子显微镜。1933 年下半年他获得经济资助, 并在 11 月末完成了研制任务, 获得了一些放大 12000 倍的电子显微象。这些结果使他对电子显微镜的前景更加有了信心, 样品会被电子束烧毁这一点并没有那么严重, 因为这些照片的衬度来自薄样品对电子的散射, 而不是吸收, 这就使电子束的热效应大大降低。

这里应该介绍一下有关电子显微镜的专利申请情况。1931 年 Ruska 和 Knoll 制成电子显微镜后没有得到专利的保护, 他们的动作太迟, 因为西门子-舒凯特工厂的一位电机总工

工程师在 Knoll 6 月 4 日公开介绍之前五天,已提出了包罗所有类型(静电的和磁的)电子显微镜的专利申请其实他并没有参与发展电子显微镜的工作。

## 二、电子显微镜商品化过程

1933 年 12 月, Ruska 得到了一个公司职位。但是,他在发展显象管工作之余仍和 von Borries, 还有 Helmut 一起到政府和工业研究部门多方奔走,争取财政支持,以制成商品电子显微镜。

这一时期布鲁塞尔的 L.Marton 在很困难的条件下(包括从旧货市场购买旧部件)组装成一台卧式电子显微镜,在 1934 年获得第一张生物样品的电子显微象,这个样品经过了锍酸处理。过了一年,他又装成一台镜筒内有底片室的电子显微镜。几乎在同一时间柏林技术学院的电机工程系学生 Müller 和医学系学生 Krause 利用 Ruska 制成的电子显微镜也获得了生物样品的象。

Ruska 等人奔走了三年,才从西门子公司得到了资助。对此临床医学所所长 R.Siebeck 在 1936 年 10 月的推荐起了关键的作用,他认为电子显微镜对临床医学和卫生事业的推动作用将是不可估量的,他还认为成功的日子就在眼前,所以他准备提出研究课题并提供医学研究所的条件参加合作。Ruska 等人从 1937 年开始研制电子显微镜,他们原来想利用西门子的电工技术和 Zeiss 的精密机械制造经验,但是这两家工厂不愿合作,他们只好选择了前者。1938 年,他们制成二种型号的电子显微镜,均有聚光镜、带极靴的物镜、投影镜和更换样品、底片的装置。von Borries 和 Ruska 在 1938 年获得 30000 倍放大象,Helmut 和其他医学专家立即用来研究噬菌体等,得到很大的成功。1939 年,第一台 Elmiskop 商品电子显微镜终于问世。

1940 年经 Ruska 提议,西门子公司建立了以他弟弟为首的开放实验室,有四台供客座

人员使用的电子显微镜。可惜的是这一实验室 1944 年秋毁于空袭。

1930 年起德国的 AEG 公司和 Zeiss 公司合作研制发射显微镜,到 1932 年得到许多热阴极的照片,成为一种研究物质表面性质的仪器。此后,AEG 和西门子展开了竞争,在 AEG 实验室工作的 H.Boersch 和 M.Mahl 发展的是静电式电子显微镜,由于它的球差比磁透镜高一个数量级以上,后来被磁透镜战胜。在静电式仪器上,Mahl 首先在 1940 年把复型技术用于冶金研究,Boersch 在 1936 年首先发现并解释了象形成中的电子衍射现象,他首创的选区衍射技术在 1940 和 1947 年分别被 von Ardenne 和 Le Poole 改进和完善,使仪器兼有形貌观察和结构分析的功能。

电子显微术的成功使更多国家的公司在第二次世界大战前就参加了研制电镜的工作,如英国的 Metropolitan Vickers 公司、美国的 RCA 公司等。但是,当时国际上主要产品仍来自西门子。

从 1945 年 6 月起,Ruska 和他的新的合作者开始完全重建实验室的工作,尽管有很多困难,他们仍能在 1949 年末就生产出了新的电子显微镜。到 1954 年,西门子的 Elmiskop 再次占据了国际领先的位置。这种电子显微镜首次使用双聚光镜系统,使高倍观察时样品的照射面积从近  $1\text{mm}^2$  降为约  $1\mu\text{m}^2$ ,从而使样品受到的热量减少几个数量级。五十年代,西门子的电子显微镜的分辨率达到  $0.6\text{nm}$ 。但是后来,它被日本的 JEOL 公司和日立公司,荷兰的 Philips 公司的电镜比了下去。

1955 年,Ruska 离开西门子到西柏林的马普学会 Fritz-Haber 研究所领导电子显微镜实验室,一直到 1978 年。他同时还在柏林技术学院任教。这一实验室至今在世界上仍有相当大的影响,它孜孜不倦地从事生物样品和有机样品的高分辨电子显微镜研究,包括发展液氮温度样品台以减少电子束辐照损伤等,但这些都是实验室中其他科学家的贡献了。

### 三、1986 年诺贝尔奖金物理学奖

到了八十年代,电子显微学得到高度的发展<sup>[2]</sup>,它在新的准晶态的发现<sup>[3]</sup>、界面和表面的结构研究<sup>[4]</sup>等方面发挥了重大的作用。电子显微镜也日益完善,生产了大量原子级分辨率的高分辨电子显微镜<sup>[5]</sup>和分析电子显微镜。后者具备会聚束电子衍射<sup>[6]</sup>、X射线能谱分析<sup>[7]</sup>和电子能量损失谱分析<sup>[8]</sup>等功能,使得 1—10nm 范围内的形貌、结构和组分可以同时得到测定。扫描电子显微镜也得到高度的发展,并在大规模集成电路的研制等方面<sup>[9]</sup>发挥了重大的作用。科学家设想了几十年的看到原子的目标终于实现了。

从 1981 年开始,IBM 苏黎世研究实验室的 G.Binnig 和 H.Rohrer 探索了另一条观察原子的道路,他们研制了扫描隧道显微镜。四、五年内经过不断的更新换代,扫描显微镜达到了极高的分辨率:在垂直表面方向为 0.005nm,横向分辨率为 0.2nm。利用这种仪器直观地观察到 Si(111) 7 × 7 的再构表面的原子结构、薄膜的表面结构、生物大分子、病毒等的表面形貌<sup>[10-12]</sup>等。

如上所述,1986 年诺贝尔奖金物理学奖颁

发给了这二种原理上截然不同的高分辨率仪器的发明人。E.Ruska 在获悉得奖时说:“最初没有人非常认真地对待它”,这显然是指 36 年以前得到 Siebeck 支持以前的事。当时年纪不到 30 岁的 Ruska 等人正在为制造电子显微镜而到处奔走。从这句话和前面介绍的历史情况可以看到,除了年轻的科学家的坚持不懈之外,很需要有识之士对创新的科学仪器的发明的充分支持。从这段历史还可以看到,高年级大学生认真参加科研活动的制度和研究生制度对 Ruska 的成才起了多么大的作用。

黄兰友同志仔细审阅了初稿,提出了许多宝贵的意见,刘绪平同志帮助寻找了有关资料,作者向他们表示深切的感谢。

- [1] E.Ruska, *Rev. Modern Phys.*, **59**(1987), 627.
- [2] 郑可信,物理, **16**(1987), 568.
- [3] 郑可信,物理, **14**(1985), 449.
- [4] 吴自勤,物理, **15**(1986), 1.
- [5] 李方华,物理, **8**(1979), 236.
- [6] 冯国光,物理, **12**(1983), 183.
- [7] 吴自勤,物理, **12**(1983), 301.
- [8] 朱静,物理, **12**(1983), 679.
- [9] 张明等,物理, **13**(1984), 654.
- [10] 戴道宣,物理, **14**(1985), 235.
- [11] 汪世才,物理, **16**(1987), 321.
- [12] 戴道宣,物理, **16**(1987), 641.

---

(上接第297页)

需要提高数字传输速度。为克服二维对称性的假设过于简单化的问题需要采用三维计算,只有在三维空间中我们才能获得流体的物理实质。但是,对于三维的、随时间变化的连续性物理问题的模拟与形象化的技术要求比二维问题要高得多,这一点是必须考虑的。

根据我们调查的结果,发现利用现有的计算机网络,装配一种可以提高一至二个数量级的计算能力的机器是不可能的。目前的网络几乎不能适应我们现行的数字实验。可设想在将来的网络中,几千用户将通过高速光导纤维线

与巨型计算机相连。现在, Thinking Machines 公司可以提供更高的计算能力的机器,可以使对流体动力学现象的模拟与形象化技术更加完善。

我们相信,最近技术的进步使计算物理工作者可能在更为接近实验室实验的状态下进行工作。现在通过计算已经看到了很多以前不得不忽略的结果,并可将其制成彩色影片。这样一个数字实验室为计算科学开辟了一条新的、激动人心的道路。

(杨百瑞根据 Physics Today 1987 年  
第 10 期第 28 至 37 页编译)