



大湾区显微科学与技术研究中心

Bay Area Center for Electron Microscopy

简讯

第15期

中国科学院东莞材料科学与技术研究所

广东省东莞市大朗镇屏东路333号

Email: bacem@sslabor.org.cn



世界上最早的以电子显微镜为主题的邮票

出版日期: 2025年11月13日

2025年第4期 (总第15期)



透射电子显微镜的发明与发展

——马秀良（整理）

一、透射电子显微镜的发明及其发明权之争^[1-10]

1.1 透射电子显微镜的发明^[1-8]

根据德国物理学家和数学家 Ernst Abbe（1840-1905）推导出的阿贝定理，光学显微镜的分辨与光波的波长成正比。至 19 世纪末，开启了人类通往微观世界第一扇门的光学显微镜的分辨率已经接近推至其理论极限（大约 0.2 微米）。

光学显微镜的分辨率大约是晶体中原子间距的三个数量级，因此无法通过光学显微镜来探测晶体中的原子排列规律。1923-1927 年间物理学领域的三项科学发现，奏响了发明电子显微镜提高分辨率的序曲。

（1）1923 年法国科学家德布罗意（1892-1987）首先提出了电子的波粒二象性的设想，并推导出电子波长的表达式（因此获得 1929 年的诺贝尔物理学奖）。

（2）1926 年奥地利物理学家薛定谔（1887-1961）推导出电子波在电磁场中的运动方程（因此获 1933 年诺贝尔物理学奖）。

（3）德国物理学家 Hans W. H. Busch 经过 15 年对阴极射线的研究，终于在 1926-1927 年相继报道了轴对称电磁场对电子束的透镜聚焦效应，奠定了几何电子光学的基础。

电子波具有远小于光波的波长且能够在磁场下聚焦，成为提高显微镜分辨率的希望所在。1931-1933 年，德国电气工程师 Ernst Ruska 与 Max Knoll 一起发明了历史上第一台电子显微镜，开启了人类通往微观世界的第二扇门。

1906 年 Ruska 出生于德国海德堡的一个科学之家，在七个兄弟姐妹中排行第五。他的弟弟 H. Ruska（1908-1973）曾从事生物方面的研究，对电子显微镜的发明以及在生物领域中的应用起了重要的推动作用。Ruska 的妹夫 Bodo von Borries 在 Ruska 的影响下参与了电子显微镜的研制工作，是 Ruska 工作、生活中的亲密伙伴。

Ruska 研制电子显微镜的过程，按时间顺序简要总结如下：

1925-1927 年：就读于慕尼黑技术学院、柏林工业大学，学习电子学。

1928-1929 年：在柏林高等工业学校电机系高压实验室做副博士论文期间，从事阴极射线的聚焦研究。实验上证明 Busch 提出的通电线圈产生的磁场具有对电子束的聚焦作用。Ruska 认识到，如果在线圈外加一个铁盖，可以缩短电磁透镜的焦距，于是动手制作了真正意义上的电磁透镜。他先用一个磁透镜聚焦得出金属网的 13 倍放大像，后来用双透镜得出 17.4 倍的放大像。这些工作奠定了高分辨率电子显微镜的基础，开启了研发电子显微镜的征程。

1931-1933 年：与 Knoll 一起，引入极靴及投影镜，得出 12000 倍的放大像，该电镜的分辨率（估



计为 50nm) 首次超越光学显微镜的分辨极限, 宣告第一台电子显微镜诞生。

1934 年: 获柏林高等工业学校博士学位。由于缺乏项目资助, 不得不别离亲手制造的电镜, 到柏林的一家电子光学公司谋得一份差事, 研发电视发射器和接受器。

1937 年: 2 月与妹夫 von Borries 加入西门子公司, 并建立电子光学实验室, 发展西门子超级显微镜。

1939 年: 制造出第一台分辨率为 7nm、放大倍数为 3 万倍的商用电子显微镜。

1940 年: 与妹夫 von Borries 建议西门子公司成立客座实验室, 邀请德国和外国科学家来此进行与电子显微学相关的研究工作。该举措取得了巨大成功, 仅 4 年左右的时间就有 200 多篇与该实验室有关的论文发表, 对电镜工作的推广功不可没。

1945 年: 西门子公司在 Ruska 及其妹夫 von Borries 的负责下, 生产了 40 多台电镜, 装备于该公司 35 个研究所。

1946-1948 年: 战后重建, 电镜制造暂时中止。

这里值得一提的是, 1948 年, 荷兰代尔夫特理工大学的 A.C. Vanderstien 等^[11]为飞利浦光学电子公司设计了一款颇具创意的电镜。他们在物镜和投影镜之间加入了一个中间镜, 通过改变中间镜线圈的磁场, 在不移动样品和电子束的情况下实现了成像和衍射模式间的转换。另外, 他们在物镜的像平面上装有一个可变换孔径的光阑, 只选择感兴趣部分进行电子衍射 (也就是我们现在常说的选区电子衍射)。选区衍射的实现从根本上丰富了电子显微镜的功能, 使得电子显微镜不仅可以在实空间得到物体的放大像, 而且可以通过倒易空间研究物质的结构与缺陷。

1949-1954 年: 在西门子公司生产出带有电子衍射功能的电子显微镜 “Elmiskop I”。该显微镜采用双聚光镜以减小电子束照射面积和样品升温, 同时使用冷阱以减少样品污染等, 很受用户欢迎, 英国剑桥大学在几年内就购置了 8 台这种电子显微镜。P. B. Hirsch 等就是使用这种型号的电子显微镜在 1955-1956 年观察到金属薄膜中的位错运动, 证明了位错理论的正确。在这之后, 电子显微镜在金属学及物理冶金学中得到了广泛应用。

1955-1972 年: 任 Fritz Haber 电子显微学研究所所长。

1974 年: 是年 12 月 31 日退休。

1986 年: 获得诺贝尔物理学奖。获奖理由是: “为他在电子光学基础研究方面的贡献和设计出第一台电子显微镜”。

1988 年: 是年 5 月 25 日过世。

1.2 透射电子显微镜的发明权之争^[5-10]

这里涉及西门子公司与德国电气公司之争, 以及电子物理学家 Reinhold Rüdenberg 与电气工程师 Ruska 之争。这种争论从二战前延续到二战后。最后还是因为其他有争议权的人陆续离世, Ruska 才得以在 1986 年 80 岁高龄之际, 毫无争议地获得了诺贝尔物理学奖。

从专利优先角度来看, 电子显微镜的发明人确实不是 Ruska, 而是物理学家 Rüdenberg。

Rüdenberg 是一位天才学者, 他 1883 年生于德国汉诺威, 1901-1906 年就读于汉诺威工业大学电气



工程专业。1906 年他在大学毕业的同时就提交了博士学位论文，并取得了博士学位。

1931 年 5 月 28 日，任职于西门子公司的 Rüdenberg 向法国、德国及美国的专利局提出了利用磁透镜来制造电子显微镜的专利申请，第一次出现“电子显微镜”一词。他的专利于 1932 年 12 月和 1936 年 10 月分别获法国、美国专利局批准。在此之前，德国通用电气公司 AEG 于 1930 年就在 Brüche 领导下开始研究静电透镜成像，并在 1931 年 11 月获得涂上氧化物的灯丝的显微图像。在 AEG 公司的反对下，Rüdenberg 的两个电子显微镜专利申请直到第二次世界大战后才在 1953 年和 1954 年获得联邦德国专利局批准。

Rüdenberg 是著名的电子物理学家，除了在西子公司任科技部总工程师外，还兼任柏林高等工业学校电机系教授，无论在学识、经验和远见方面都很强。但是，他从未做过磁透镜成像方面的工作，其专利申请全凭理论推导。1930 年 Rüdenberg 的次子得了小儿麻痹症，他曾试图探究病毒的形态与结构。但受到分辨率的限制，光学显微镜对这种病毒无能为力。于是，设想利用 X 射线或电子束制造分辨率更高的显微镜^[9]。

1931 年 5 月，Rüdenberg 的助手 Steenbeck 曾去 Knoll 的实验室参观，了解到 Ruska 的实验结果，并看到了 Knoll 将在 6 月 4 日做的有关 Ruska 工作的学术报告的手稿--《阴极射线示波器的设计及新结构的原理》。就在 Knoll 6 月 4 日报告的前几天，Rüdenberg 于 5 月 28 日向法国、德国及美国的专利局提出专利申请。作为柏林高工兼职教授的 Rüdenberg 恰恰参加了 Knoll 在 6 月 4 日的报告，并坐在第一排，但讨论中他一言不发，也没有透露他已于一周前递交了电镜的专利申请。于是，Ruska 与 Knoll 对此产生一些怀疑。

第二次世界大战结束后，Steenbeck 在苏联工作，直到 1956 年 7 月才回到东德，同时期 Knoll 也从美国回到西德，但 Knoll 仍念念不忘 Steenbeck 曾在 Rüdenberg 申请专利前去他的实验室参观一事。因此，Knoll 于 1960 年 10 月 17 日写信给 Steenbeck，希望了解当时的一些具体情况。11 月 8 日 Steenbeck 在回信中承认了他在参观后向 Rüdenberg 做过汇报，并说“Rüdenberg 的专利申请是我访问的结果，也肯定是从我的见闻中得到了启迪”^[6]。

在希特勒迫害犹太人期间，Rüdenberg 于 1936 年移居英国，两年后定居美国，1961 年 12 月 25 日过世。Rüdenberg 过世后，他的太太（Lily）把他生前与电子显微镜有关的所有资料都捐献给了哈佛大学，供后人研究那一段历史。他的两个儿子（Herman Gunther Rüdenberg 和 Frank Hermann Rüdenberg）以及孙子（Paul G. Rüdenberg）也曾提供大量的历史资料以弘扬其前辈在电子显微镜方面的贡献^[9, 10]。

二、中国第一台电子显微镜

2.1 中国第一台电子显微镜的来历、运输、安装

我国电子显微学界的前辈钱临照、郭可信、黄兰友、姚骏恩等都曾在多个场合对中国“第一台电子显微镜”有过这样的记述^[12-15]：它是在南京原国民党广播事业局的一个仓库里发现的，该电镜由英国 Metropolitan Vickers 公司生产。



2019年，中国科学院出版了一本离退休老同志们撰写的回忆文集——《定格在记忆中的光辉七十年——献给中国科学院70周年华诞》，文集中第四章的标题是“再不说或许会被遗忘的过往”。中科院物理研究所离退休老同志胡欣撰写了一篇纪实短文，题为《新中国第一台电子显微镜运输纪实》，对“第一台电镜”的归属、存放、及后期运输等诸多环节提供了一些鲜为人知的线索^[16]。

科学出版社胡升华先生根据物理所胡欣提供的线索，借助当下便捷的文献检索，重新开始了困扰他20多年神秘往事的探秘追踪，并于2020年完成了题为《困扰海峡两岸的中国第一台电子显微镜之谜》这一纪实文章^[17]。文中围绕“第一台电镜”这一重要科学事件，牵扯出背后一连串神奇的故事，扣人心弦。这里以时间为序简单摘录如下：

1940-1945年：原“重庆电波研究所”所长冯简（1896-1962）先生以电波研究的名义购买了两台电子显微镜，一台是由英国 Metropolitan Vickers 公司生产，另一台由美国 RCA 公司生产。美元经费来自“美国油锡贷款”，英镑经费来自英国第一次对华信用贷款。冯简先生是我国无线电通信领域的先驱，为我国短波通信事业做出了重要贡献。抗战期间他任国民党“中央广播事业管理处”总工程师，在重庆主持了35kW短波电台的建设，为战时对外宣传做出了重要贡献。

1945年抗战胜利后：冯简奉命回南京接收电台，“中央广播电台”也由重庆迁回南京。冯简应该是乘着电台搬迁的机会，把 RCA 公司产的电镜带到了南京，以后国民党撤离大陆时，又带到了台湾（该电镜到台湾后一直存放在广播公司的仓库里，1969年台湾大学电机系打算安装使用这台电镜，但因为零配件损坏又找不到供应商，只得作罢）。另一台英国产的电镜则留在了重庆，连同包装完整地存放在国民党“西南财经委员会”，一直保持未拆箱的状态。

1950年12月：政务院决定将属于国民党“重庆电波研究所”的这台电子显微镜交给刚刚组建的中国科学院（简称“中科院”）。中科院一经得知政务院的决定，立即开始安排各项接收事宜。12月20日，中科院先与重庆大学物理系郑衍芬主任取得联系，委托他代为接收和保管。

1951年1月：1月16日，中科院向郑衍芬了解该电镜的具体情况。郑衍芬随后致函严济慈先生告知：电波研究所的孙文海曾赴英国专门学习过该仪器，目前正在北京，可就近联系。郑衍芬还提出建议：待长江水上涨后再搬运，由重庆经水路到汉口转车至北京，可以减少装卸损失。

1951年2月初：中科院派工学馆周行健到重庆落实电镜的具体情况。

1951年3月：3月21日，经过周密准备并由政务院机关事务局同意，中科院院长办公会决定将这台电镜运到北京，交给近代物理所、应用物理所管理。中科院决定派应用物理所许少鸿承担接收、起运这台贵重设备的任务。许少鸿于1950年10月响应新中国政府的号召从美国归来，进入中科院应用物理所工作，当时是应用物理所助理研究员。3月26日，许少鸿接到任务，31日动身离开北京，途经武汉，于4月4日到达重庆。到重庆后许少鸿立即开始接洽，经过与多方协商并请示中科院，确定了起运方案。先是拟用军用飞机运输，协调中得知空军总司令部暂时没有专机。经中科院再次协调，4月26日决定包用一架民航专机。同时，确定由西南财经委员会负责搬运，西南公安部二处负责全程保卫工作。重庆当时有珊瑚坝和白云峰两个机场，其中珊瑚坝机场跑道短，大飞机不能起飞，而白云峰机场又没有符合条件的称重设施。

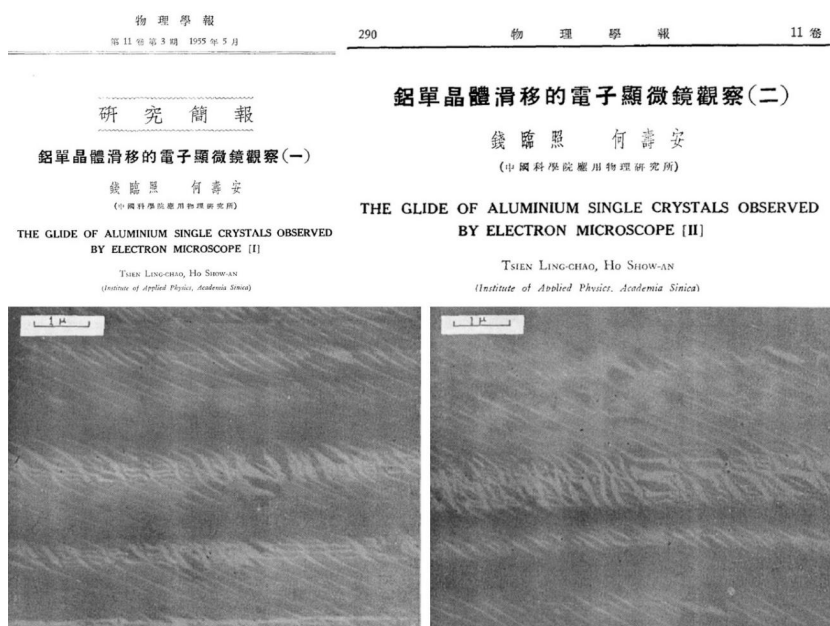


1951年4月：4月28日，公安部二处派来两名武装人员负责押运，先将全部包装箱送珊瑚坝机场过磅，然后运至白云峰机场。至白云峰机场后，立即由有装卸经验的西南邮电局仓库工人负责装入飞机，保证设备无损伤。这台电镜所有部件共装入18只木箱，另有一箱是装箱清单，总重量为2060kg。4月30日，当载有珍贵电镜的专机到达北京时，中科院派出的运输车已在机场等候，将所有箱子运到位于东黄城根物理所的前楼内存放。

1952年7月：7月16日，钱临照先生与何寿安同志在一无经验二无资料的情况下，把这台在仓库里沉睡多年的电子显微镜安装调试好。这是新中国成立后第一台由中国人自己装配起来的电镜，在10个月内，慕名来物理所来参观的达340余人次。

2.2 在中国第一台电子显微镜上取得的学术成果

在1955年之前，研究晶体范性形变的主要方法是X射线衍射，而在这之后，电子显微镜的使用逐渐普及，特别是用衍衬法（衍射因晶体取向不同而有强弱差别，由此产生像衬）研究位错的交互作用、组态及动态行为^[13]。钱临照先生与何寿安同志一起不仅将一台未开箱的英国造电子显微镜在物理研究所安装就绪，而且对铝单晶体滑移现象进行了详细观察，并于1955年在物理学报上连续发表两篇学术论文^[18, 19]。钱临照先生及合作者的这些论文是我国最早发表电子显微学文献，我国提交到国际电子显微学会议的第一篇学术论文也发端于此。



▲ 图1：1955年发表的我国最早的与电子显微学有关的学术论文首页^[18, 19]。

1956年，第一届亚太电子显微学会议在日本东京举行，日方邀请中国科学院派团参会。科学院指派应用物理所的李林（Anna Chou，李四光先生的女儿）出席了本次会议（李林曾在剑桥大学冶金系 Nutting 教授指导下从事电子显微学方面的工作，可以说是中国用电镜研究合金的第一人）。李林出发前找钱临照先生商量参会事项，钱先生把自己与何寿安合作的《铝单晶体滑移的电子显微镜观察》一文交给她，并拿出许多用氧化铝复型照的铝滑移线电子显微像供她挑选。日方会前临时调整日程，安排李林做了大会报告，英文题目是 Slip Propagation of f.c.c. Aluminum Crystals。“我报告完后得到热烈的掌声，晚宴时被许多国家的代表包围，包括美国和加拿大代表在内，他们对新中国刚解放后不久就有这样水平的电子显微镜工作而感到很惊奇，这是第一篇向国际同行报告的学术论文”^[20]。这篇学术报告也表达了新中国科技工作者有意加入国际科学大家庭的愿望，以及有能力为科学事业做出贡献的自信^[17]。



三、中国学者和工程技术人员自主研发透射电子显微镜

20 世纪 50 年代末至 80 年代,中国学者和工程技术人员在研制透射电子显微镜方面一直进行着不懈的努力。1996 年,中国电子显微学会旗下的《电子显微学报》同期刊登了由黄兰友先生和姚骏恩先生分别撰写的两篇文章。文章分别以《早期电子显微镜制造的回忆》和《我国超显微镜的研制与发展》为题,纪实描述了中国人研制透射电子显微镜的那段波澜壮阔的历史^[14, 15]。以时间顺序简要摘述如下:

1956 年,国家制定了《十二年科学技术发展规划》,由王大珩、龚祖同和钱临照教授等组成了仪器规划小组。当时规划小组就提出研制电子显微镜,但苏联顾问认为难度太大,系统太复杂,不要列入。

1957 年冬,电镜创始人德国电气工程师 Ruska 访华,李林、吴全德教授负责接待和交流。

从此,中国学者和技术人员自行研制透射电镜的热情愈发强烈。下面以时间为序从不同单位角度简要回顾。

3.1 1958-1959 年 长春光机所

1958 年,中国科学院长春光机所王大珩所长、龚祖同副所长再次提出研制电子显微镜的构想。同年,我国著名科学家黄鸣龙之子黄兰友在西德图宾根大学完成电子显微镜方面的博士论文后回国,并被分配到中国科学院电子学研究所工作。那时电子所正在讨论“大跃进”计划,黄兰友博士提出了若干书生气十足的研究计划,但没人理睬,在冥思苦想怎么才能算得上解放思想时猛然想起:制造电子显微镜!这个“大胆”的设想受到所长顾德欢的赞赏。

1958 年 4 月底,黄兰友出差到长春光机所,经过几番交流后被告知:“马上回北京去取能够保暖一点儿的衣服,国庆前回不了北京了,工作马上开始,国庆前拿出东西来”。黄兰友考虑再三后提出,应有一台比较现代化的电镜做参考,次日被告知:“中国科学院副院长张劲夫已同意把一台新引进的电子显微镜借给我们,此外,电子所已经同意把你借调给光机所”。

当时,光机所有八个为国庆献礼的大项目,所里把电镜研制排为第一号任务。

黄兰友在回北京途中经停沈阳,来到中国科学院金属研究所,希望了解关于极靴材料的事儿。在金属所期间,他遇见了自瑞典留学回来的、后来成为我国电子显微学创始人之一的郭可信。在了解到黄兰友的来意之后,郭可信立刻答应提供用做电镜极靴材料的铁钴合金。

根据黄兰友博士个人的回忆,他离开金属所的时候心情格外轻松,心想这次出来真是看到了祖国的希望,到处都是满腔热情、团结一致的人们。他觉得自己在参与一项伟大的建设事业,心里特别高兴。

1958 年 5 月,黄兰友带着电子所的江钧基一起回到长春。光机所分配了一位有经验的机械工程师王宏义及两个物理专业新毕业的大学生林太基和朱焕文,让他们和黄兰友一起工作。他们先把这台新引进的电子显微镜的电子光学系统计算了一遍,推算出几个透镜的线圈匝数和磁路参数,同时也计算了加工精度要求和电源的稳定度纹波等要求,交给各专业室。他们建立了一个实验室,开始做光阑、进行真空检漏、做荧光屏,后来在此进行了设备安装和调试等。

1958 年 8 月初,电镜的镜筒、真空、电源都加工完成。但是,他们缺少电子枪的高压绝缘陶瓷(外协加工需要的时间太长),于是黄兰友提议用塑料加工一个!所以,他们第一次把电子束调到荧光屏上



时就是利用一个有机玻璃“瓷瓶”做到的。为应对有机玻璃软化变形，他们只能调试十分钟就休息一会儿，这样就解决了镜筒中许多调试初级阶段都会出现的问题。



▲ 图 2：1958 年中国人自行研制的第一台电子显微镜（加速电压 50kV，分辨率约 10nm）^[14]。

1958 年 8 月 19 日凌晨 2 时 45 分，他们在荧光屏上得到第一个电子显微像。这是一个氧化锌烟粒的像。当天新华社记者刘思泰给他们拍了照（图 2）。从开始研制到得到第一个电子显微像仅用了 72 天。

1958 年 9 月，中科院在光机所召开全院庆功大会。中科院院长郭沫若、副院长张劲夫带领各所的所长们观看了展览，张劲夫把黄兰友介绍给郭沫若时说：“这是黄鸣龙的公子”。展览完毕后，第一台电镜及其他献礼大件被装箱运往北京。

全院的献礼成果在新盖的生物物理研究所大楼展出。黄兰友建议把电镜标牌上原先不知谁写的“分辨本领 25 埃”改为“分辨本领 100 埃”。按照黄先生自己的回忆，这 100 埃也是他凭印象估计的，后来就变成官方数据了。周恩来总理曾来这里参观展览。

1958 年中科院庆功大会之前，黄兰友就提出设计一台 100kV 的大型电镜。光机所曾发了一份公函给电子所顾德欢所长，希望把黄兰友调到光机所工作。后来在征得个人意见后，两所同意黄兰友每个月去长春一次，花一半时间兼管那里的电镜工作。

1958 年 9 月，光机所为了加强电子显微镜方面的力量，成立了由姚骏恩任组长的电镜课题组，同时还有新来的曾朝伟和谢信能参加。大型电镜的设计从 11 月份开始，主要参考资料都是黄兰友从德国带回来的。对他们设计影响最大的是 1955 年 Ruska 在西门子公司制造的 Elmiskop 电镜方面的文章和一份 Elmiskop 电镜样本，这些德文资料当时在国内都是查不到的。

设计完毕后，光机所决定与上海精密医疗器械厂合作，由上海方面负责电器和电镜的架子、操作台和面板等。光机所负责电镜镜筒和真空系统。组装完毕后的电镜与 Elmiskop 在外观上基本相同。黄兰友等用光机所自制的光栅做的复形校正了放大倍数，并通过在火棉胶膜上喷重金属颗粒的方法来测量分辨率的样品。

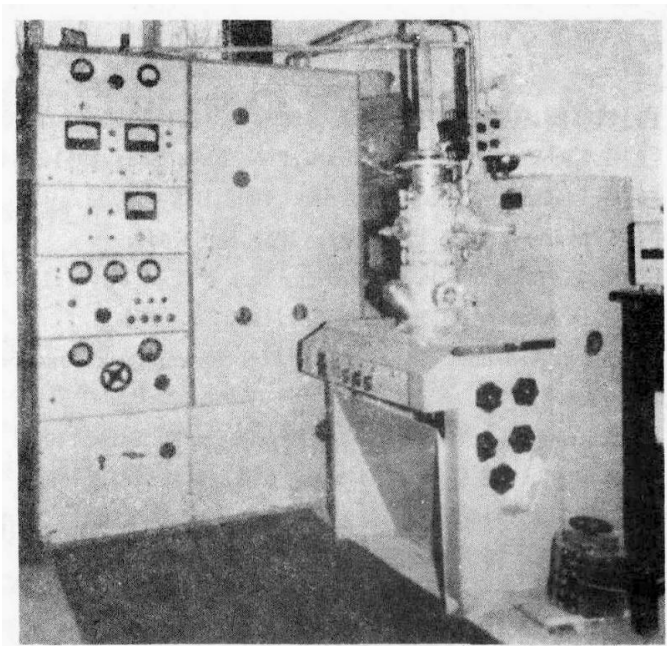
1959 年 9 月 25 日，黄兰友在电镜上工作了一个通宵，26 日清晨拍下了他认为比较好的像。他从定影液里取出照片，冲水，利用放大镜在湿淋淋的底片上找到了 50Å 埃的最小点间距，随即去火车站返回北京。后来光机所的同志在那张底片上找到了 25Å 的点间距。

1959 年 9 月 26 日，光机所把电镜拆下来装箱运往火车站，他们把电镜单独放在一节包下来的货箱里，由姚骏恩和王宏义坐在电镜旁将其护送到北京。



1959年10月1日,大型电镜在北京展览馆展出(图3)。时任国家主席刘少奇参观了展览会并题词鼓励。图3中操作电镜的是光机所的曾朝伟,样品是一只蚊子的翅膀。同一天,国庆十周年大游行在天安门广场举行。排在中科院队伍前列的是大型电镜的一个巨幅模型,当中科院的队伍走过天安门时,毛主席向同志们挥手致意。

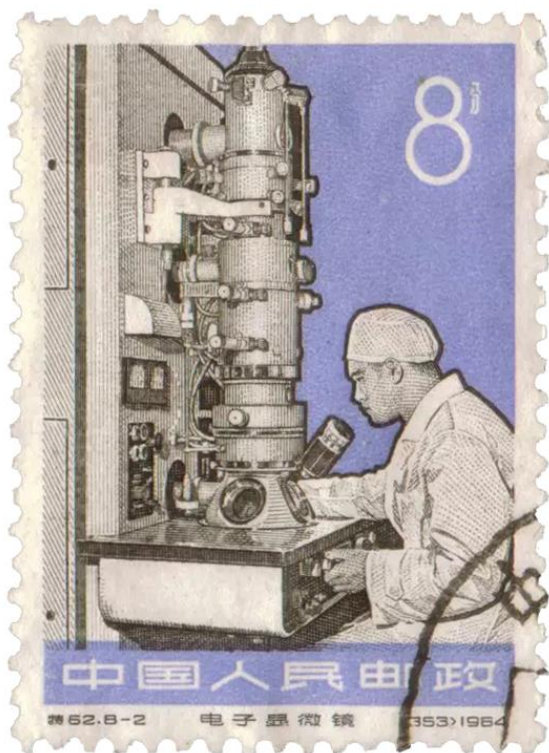
► 图3: 1959年国庆十周年展览会上展出的中国人研制的大型电子显微镜(100kV, 2.5nm)^[14]。



3.2 南京、上海相关厂家批量生产

1958-1959年,在中国参与研制电镜的单位达14家之多。光机所后来把中型电镜移交给南京教学仪器厂(后改名为江南光学仪器厂)生产,把大型电镜交给上海精密医疗器械厂(后来成立了上海电子光学所)生产。南京教学仪器厂后来成为我国生产透射电镜最多的厂家,至1993年共生产200多台。上海共生产约100台大型电镜。

上海电子光学所生产的电子显微镜历经DXA₁-10型(100kV, 5nm)、DXA₂-8型(80kV, 2nm),至1965年7月制成了DXA₃-8型(80kV, 0.7nm)一级电子显微镜,1968年定型为DXA₄-100(100kV, 0.7nm),



并批量生产。1966年3月30日,邮电部为了庆祝当时全国八个新产品,发行了一套八张纪念邮票,其中一张是DXA₂-8型(图4)。这台电镜很像它的原型机DX-100,而原型电镜又很像Elmiskop电镜,以至于美国集邮爱好者、电子显微学者Simine Short把这张邮票上的DXA₂-8当成了Elmiskop电镜。Short于1990年发表在EMSA Bulletin上的一篇文章中认为,这是世界上最早以电镜为主题的邮票,并凭主观想象错误地认为:“中华人民共和国买了这么一台现代的、复杂的Elmiskop电镜,并把这个仪器的图片放在一套显示新工业产品的八张邮票之中”。

◀ 图4: 1966年3月30日,我国以上海电子光学所生产的DXA₂-8型电镜为主题发行的邮票,这是世界上最早的以电子显微镜为主题的邮票^[14]。



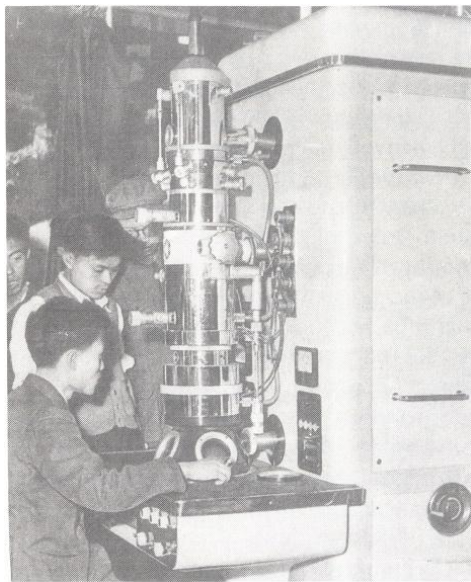
3.3 北京科学仪器厂

根据黄兰友先生的回忆,1959 年以后的光机所在电镜方面没有开展更多工作,地平线上出现了一个北京科学仪器厂(1991 年改名为北京科学仪器研制中心)。1960 年,北京科学仪器厂的胡明相找到黄兰友,请求帮忙做一台发射式电子显微镜。后来,黄兰友帮助胡明相完成了电子光学设计,北京科学仪器厂自己完成了整体设计和调试。这台仪器(图 5)随后交给了中科院电子所用作阴极发射方面的研究。北京科学仪器厂为什么研制这种应用面很小的特殊电镜?按副厂长向鹏举的话来说,是为了跨入电子光学和电子显微镜领域做舆论准备。

1962 年,北京科学仪器厂开始研制大型电子显微镜。

1964 年 4 月,中科院为了集中力量决定把以姚骏恩为负责人的长春光机所电镜室合并到北京科仪厂。北京和长春在电子光学设计方面相近,黄兰友建议以长春的设计为基础,加以必要的修改。厂长田巨生和副厂长向鹏举组织了这项研制任务,包括请科学院下达给上海冶金所和沈阳金属所分别用粉末冶金法和真空冶炼法生产极靴材料的任务、组织厂内极靴加工攻关、引进国外先进电镜专门用于测量极靴像散,最终成功研制出 XD-2 型电镜。1965 年底科学院组织由钱临照主持的成果鉴定会。结论是:“根据鉴定过程中所拍摄的铂铱粒子照片,测得最小可分辨距离为 0.4nm 和 0.5nm 的五对点子。按国外常见的表示方法,DX-2 型电镜的分辨率可达 0.4nm。沿用国内采用的鉴定分辨率从严的方法(以第五对最近点间的距离计算),评定该电镜的点分辨率为 0.5nm,电子光学放大可达 25 万倍以上。由此可以认为 DX-2 型电镜在分辨率和放大倍数方面已达到国际先进水平”。这已接近当时国际水平(3Å)。在科仪厂的庆功大会上,青年职工编排的各种节目如实反映了那个时代人民群众的精神面貌,也生动地表达了大家对出色完成各项任务的自豪感。

中国科学院科仪厂于 1975-1980 年完成了 DX-4 型透射电子显微镜的研制,1980 年 12 月完成鉴定,并获中国科学院重大科技成果一等奖。该款电镜分辨率为 3.4nm,最高放大倍数为 80 万倍,最高加速电压为 100kV。在同类型电镜中体积较小,使用较方便,镜筒由六个透镜组成。设计时采用了黄兰友得到的最短焦距的电子透镜公式。第一中间镜置于物镜下磁路内,减少了镜筒高度,得到了更小的最低放大倍数和更大的视野。



▲ 图 5: 1960-1961 年,北京科学仪器厂研制的第一台发射式电子显微镜,电子所用之研究阴极发射^[14]。

四、中国大陆第一台高分辨透射电子显微镜及其相关成果

1946 年夏,郭可信从浙江大学化工系毕业后通过公费留学考试,1947 年 9 月到瑞典斯德哥尔摩的皇家理工学院金相学实验室专攻冶金学,期间主要利用 X 射线衍射方法研究合金中的相结构。后来逐渐接触电子显微镜,用的是当时瑞典唯一的一台 RCA 电镜。那是第二次世界大战后第一代电镜,只有一



个聚光镜，消像散是靠机械移动在物镜极件周围的八个小铁块来实现，没有衍射功能。1955年，郭可信用萃取复型法研究合金钢回火初期生成的碳化物^[21]，同年11月去伦敦作“ δ -铁素体的金相学”的学术报告，会后去剑桥大学参观。那时卡文迪许实验室 Whelan 已经用配有双聚光镜和中间镜（可做电子衍射）的西门子 Elmiskop-I 型电镜观察到铝中的位错运动，并发展出衍衬技术。当时西门子 Elmiskop-I 是最好的配有衍射功能的电镜，日本的 JEM5 等才刚刚出来。20 多年后，日本电子株式会社生产出 JEM200CX，挤掉了西门子公司公司的电镜市场^[22]。

1956年3月郭可信看到周总理“向科学进军”的动员令，兴奋不已，4月底乘机经苏联回到阔别九年的祖国，任职于中科院金属研究所（沈阳）。之所以来到沈阳工作，与那时金属所有一台苏联人仿制的西门子的透射电镜不无关系。

1962年中科院又分配给金属所一台民主德国产的电镜，仍然不能做电子衍射。郭可信等用它观察到铝合金中的位错运动和交滑移^[23]，并于1964年在捷克召开的第4届欧洲电子显微学会议上作了展示。1965年金属所又争取到一台日本电子株式会社生产的 JEM-150 电镜（加速电压是 150kV），用它开展镍合金中位错、层错的衍衬像研究^[24]。

1967年夏，中科院分配给金属所一台之前通过贸易定购的捷克产电镜。为了安装这台电镜，郭可信去北京参加钢铁学院的同一型号电镜的安装。回沈阳后带领其他人居然把这台捷克电镜安装起来，并调试出十几埃的电子显微像。

“文化大革命”期间，郭可信亲自在 JEM-150 上做了些相分析工作，发现 $M_{23}C_6$ 与 M_6C 都属面心立方晶系，点阵常数又差不多，只凭斑点的几何位置很难区别它们。但是，它们属于不同的空间群，衍射强度差别较大。为了得到三维的不同取向电子衍射图，他还和北京分析中心的孟宪英利用她的 JEM-100 电镜开展了倾斜晶体的实验，确定了一些含钒矿物的点阵类型，后来这种技术在国内得以广泛传播。

改革开放之后的 1980 年，郭可信先生了解到院里准备引进一两台电子显微镜，随即便去北京争取，并向郁文秘书长立下军令状，保证在电镜安装后三年内做出出色成绩。这样，院里决定为金属研究所订购一款当时分辨率最高的透射电镜。该电镜型号为 JEM200CX，是 20 世纪 70 年代末日本电子株式会社为高分辨工作而专门设计的，加速电压为 200kV，点分辨率为 0.25nm。这款当时最高端的透射电镜安装调试完成后，郭可信先生带领研究团队统筹安排诸多研究方向，相继取得了一批具有国际领先水平的研究成果：

在四面体密堆晶体（Frank-Kasper 相）的电子衍射图中观察到五重对称的强电子衍射斑点，并给予正确的诠释；独立在 Ti-Ni 合金中发现具有五重旋转对称的三维准晶（被西方学者称之为“中国相”）；首先发现八重旋转对称二维准晶；首先发现稳定的十重旋转对称的二维准晶；首先发现一维准晶；首先发现具有立方对称的三维准晶，并阐明准晶的必要条件是准周期性，而不是所谓的非晶体学旋转对称（如五重、八重、十重、十二重旋转对称）。关于这部分研究，详见 2023 年 8 月 23 日出版的第九期《简讯》



以及马秀良《案例》一书的第七章^[25]。

这些工作将当时中国的准晶实验观察和理论诠释的研究引领至国际前沿。通过这台电镜完成的研究工作共培养出硕士、博士和博士后共计 36 名，其中有 2 人当选为中国科学院院士。相关研究成果获国家自然科学奖一等奖和四等奖各一项，中国科学院自然科学奖和科技进步奖 4 项。

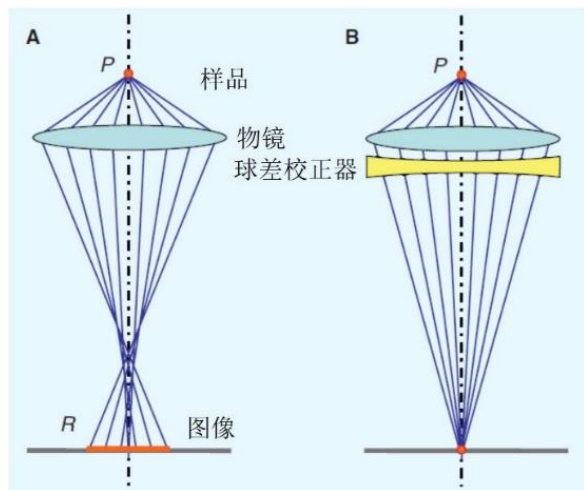
2000 年后，这款已经服役近 30 年的 JEM200CX 基本不能处于正常工作状态。2016 年马秀良组织金属所固体原子像实验室的同事把该电镜的镜筒做了解剖（图 6），整机摆放在研究生教育大厦（郭可信楼）一楼大厅供学习和参观。



▲ 图 6：中国大陆第一台高分辨透射电子显微镜解剖图。

五、像差校正电子显微镜

与透射电镜相关的成像模式大致分两类，一是透射模式成像，二是扫描透射模式成像。在传统的透射电镜成像过程中，接近平行的电子束穿过样品然后通过物镜形成像（这个过程和光学显微镜的成像原理一样），物镜的像差决定成像的质量。在扫描透射成像过程中，电子束经汇聚成细小的微束后在样品上扫描，形成微束的透镜的像差决定成像的质量。这两类像差也总是包含球差和色差。对球差的校正通常采用特殊的透镜设计，而降低色差的效应通常采用场发射枪以及



能量过滤器（单色器）。理想的透镜会使物体（样品）中的一个点形成一个像点，但实际上，由于球差的存在，远离光轴和近离光轴的电子束无法聚焦到一个点上，这样，一个理想的像点就扩展为一个盘，如图 7(A) 所示^[26]。当然，还有其他多种因素也导致上述现象^[27-29]。

◀ 图 7：物镜球差校正前后对成像的作用示意图。(A) 物镜球差的存在导致样品中的点“P”形成一个直径为“R”的像盘。(B) 物镜下方加装校正器后使得样品中的点“P”形成一个敏锐的像点^[26]。

中国电子显微学鼻祖钱临照先生的外孙、郭可信先生 1986 级研究生章效锋博士于 2005 年出版了一本专著《清晰的纳米世界—显微镜终极目标的千年追求》^[30]。由于受到读者的一致好评以及原书责任编辑的邀请，效锋后来将原版内容扩充重新出版，并于 2015 年出版了科普性巨著《显微传》^[31]。该书讲述的是关于人类打开微观世界大门，探索纳米世界，并最终将视野和触角延伸进原子世界的千年历程。

章效锋博士在《显微传》中对像差校正器的研发过程有详细描述，其中涉及到三代科学家的不懈努力。现按时间顺序简要摘述如下：



5.1 三代德国科学家的传承

1936 年，德国科学家 Otto Scherzer (1909-1982，图 8) 提出电镜中圆形电子透镜的像差不可能用光学系统中消除像差的办法完全消除。

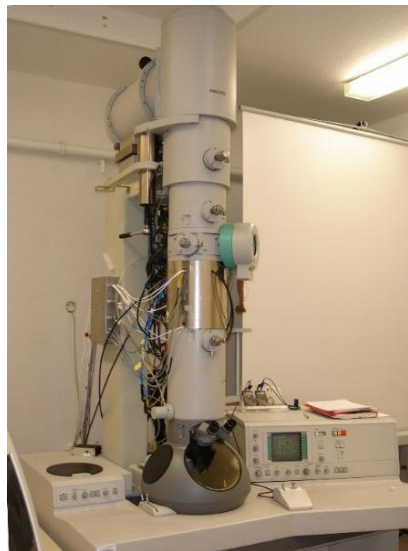
1947 年，Scherzer 提出可采用多极透镜的设计减小像差，并在实验室里搭建了一台配有自制球差和色差校正器的电镜样机用以研究球差校正技术。Scherzer 和 Rose 师徒二人的想法是，电子透镜本身的像差不能被消除，但却可以在电子光路中加装一组校正装置来消除像差，就好像戴眼镜可以校正人眼对光线的折射像差一样。

1980 年起 Rose 与他的学生 Maximilian Haider 一起设计和制造了由六极、八极磁铁以及圆形透镜共同组成的可加装在透射电镜物镜下面的电子光学器件。从原理上说，当电子束依次穿过精确排列的这样一组校正元件后，由电子透镜引起的像差可被减到极小甚至完全消除。

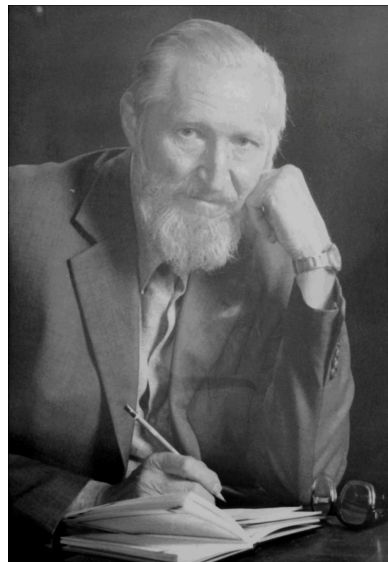
1982 年，Scherzer 去世，研究基金突然终止。但 Rose 与 Haider 还是从理论上继续推敲、改进设计，最终形成了一个包括两个六极电磁透镜和两个圆形传导透镜的组合设计^[32]。

1989 年，Rose 与 Haider 寻求与德国 Jülich 研究中心电子显微实验室主任 Knut Urban 博士合作，他们计划把这种由两个六极电磁透镜和四个圆形传导透镜的组合设计加装到普通透射电镜上，并预期得到校正球差的效果。

1991 年 1 月，大众汽车基金会资助上述方案。一年后，Rose 设计的这种球差校正器的初版制作完成。当时已经去德国海德堡欧洲分子生物实验室工作的 Haider 在该实验室设立了一个电镜球差校正研究项目，用以配合 Rose 的研发计划。



▲ 图 9：加装球差校正器（物镜下方高亮部分）的飞利浦 CM200 透射电镜。



▲ 图 8：电子光学领域先驱者之一、德国理论物理学家 Otto Scherzer (1909-1982)。

1992 年 1 月，球差校正器在 Haider 的主持下在海德堡进行了实验测试。经过两年时间的反复调试与改进，终于在 1994 年取得令人欣喜的结果。大众汽车公司基金会因此追加资金并批准移师到 Jülich 研究中心 Urban 博士负责的电子显微实验室继续研发。

1996 年，Haider 看到球差校正成功在望，随即与人合伙在海德堡创建 CEOS 公司以此推动像差校正器产品化和商业化。

在 Jülich 研究中心，他们首先将球差校正器加装在一台飞利浦 CM200 透射电镜上（图 9），位置处于物镜的下方，加装后电镜镜筒增高了 24cm。1997 年 6 月 24 日，终于在这台 200kV 电镜上得到了砷化镓（GaAs）样品的原子结构像，显示了镓和砷原子列之间 1.4Å 投影点间距。这台电镜原本点分辨率为 2.4Å，加上球差校正器后点分辨率提高了近一倍，得到了以往在 1000kV 或更高电压的超高压电镜上才能取得的点分辨率，而电子束辐照损伤相比之下却可以忽略。



相关结果于 1998 年 4 月发表在 Nature 上^[33]。

5.2 剑桥学派的传承人

由 Rose 设计并最终在 Jülich 研究中心取得球差校正首次突破针对的是透射电镜 (TEM) 成像。而几乎在同一时期, 还有另一个人, 正在另一条路上摸索前进。他就是当时人在美国的 Ondrej L. Krivanek, 其目标是扫描透射电镜 (STEM) 中的像差校正。这位 1950 年出生于捷克斯洛伐克的 Krivanek, 之前曾在 Gatan 公司主持了商业电子能量损失谱 (EELS) 仪的开发并编写了图谱, 后来又在透射电镜中引入 CCD 数码相机, 为 Gatan 公司带来巨大的利润和声誉。

1947 年 Scherzer 提出电镜中像差校正的可能方法后, 英国剑桥大学在 20 世纪 60 年代做了很多球差校正方面的努力, 尽管证明了可行性, 但可惜并未能在提高电镜分辨率方面有显著进展。

毕业于剑桥大学的 Krivanek 非常熟悉剑桥派的这些早期像差校正研发工作, 特别是比较接近成功的、可用于低加速电压(最高 30kV)扫描电镜成像的四极-八极透镜组合的像差校正器, 他的目标是在此基础上将其改进并应用于 100kV 的 STEM 上。在 Gatan 公司不提供研发资金的情况下, Krivanek 想到了母校, 他回到剑桥卡文迪许实验室游说, 试图开发电脑控制的 STEM 球差校正系统。Krivanek 的极大热情、高度自信以及他成功设计电子能量损失谱仪所带来的声望, 使得剑桥最后决定给与支持。卡文迪许实验室答应为 Krivanek 提供所有他需要的实验室资源, 包括提供扫描透射电镜供其研发测试。

1994 年 Krivanek 向英国皇家学会申请资金, 并得到 8 万英镑的资助。他办理了在 Gatan 公司停薪留职, 在剑桥大学进行连续三年的球差校正技术开发。

基于剑桥大学 Hans Deltrap 在 1964 年提出的用四极-八极透镜组合, Krivanek 加入了另外的光学元素设计以校正由于光路校正不佳、磁场不均匀及加工带来的像差效应, 而且校正过程都是由电脑分别控制各透镜以避免透境之间互相干扰, 他在 1997 年的美国电镜学会年会上发表了一篇摘要^[34]。

1997 年 Krivanek 在美国西雅图附近创立了 NION 公司。与德国 CEOS 公司不同的是, NION 公司不卖单个的像差校正器, 而是开发带有像差校正器的扫描透射电镜, 不带有透射电镜成像模式。在 STEM 模式下, 需要将电子束会聚成一个细束斑然后在样品上扫描, 再通过接收透射过样品的电子束进行成像, 成像的分辨率与电子束斑的直径有直接关系, 束斑直径越小, 成像分辨率越高。与 TEM 上球差校正器装在物镜的下方不同, 在扫描透射电镜上, 球差校正器是加装在物镜的上方, 作用是使会聚光斑中包含的所有的近光轴和远光轴电子束都集中到物镜的后焦点上。有了球差校正器, 束斑直径不仅可以大幅度缩小, 而且包含的电子数大幅度增加, 这意味着穿过样品后激发出的用于电子显微成像或者化学分析的信号更强, 特别适合于高空间分辨的化学分析, 如 X 射线特征谱(XEDS)、电子能量损失谱以及原子分辨率的能谱像。

5.3 共享卡夫里 (Kavli) 纳米科学奖

像差校正器的研发和应用使电子显微镜的空间分辨能力达到亚埃尺度, 开阔了人们的视野。2011 年, 以色列沃尔夫 (Wolf) 基金会授予 Harald Rose, Maximilian Haider, Knut Urban 三人沃尔夫物理学奖, 以表彰他们在研发像差校正电子显微镜方面所作出的杰出贡献, 该项工作使人们能够在皮米尺度研究单



个原子，对材料科学产生革命性影响。2020 年，挪威科学与文学院授予 Rose, Haider, Urban, Krivanek 卡夫里（Kavli）纳米科学奖（图 10），并对获奖人的贡献做了单独阐述。

Harald Rose: 创造性地提出像差校正的设计思想（即 Rose 校正器），并在透射电子显微镜中实现了像差校正功能。该设计即可用于常规电镜也可用于扫描电镜。

Maximilian Haider: 基于 Rose 的设计思想，研制出首个六极校正器；在完成第一台像差校正透射电子显微镜的研发过程中发挥了作用。

Knut Urban: 在完成第一台像差校正透射电子显微镜的研发过程中发挥了作用。

Ondrej L. Krivanek: 研制出六级-八级校正器并加装到扫描透射电子显微镜上，使显微镜的分辨能力达到亚埃尺度，该设计非常适用于高空间分辨的化学分析。



▲ 图 10: 共享 2020 卡夫里纳米科学奖的四位科学家，从左到右依次为 Haider, Urban, Rose 和 Krivanek。

六、参考文献

- [1] Knoll M, Ruska E. Das elektronenmikroskop. Z. Phys., 1932, 78(5): 318-339.
- [2] Knoll M, Ruska E. Beitrag zur geometrischen elektronenoptik. I. Ann. Phys., 1932, 12(5): 607-640.
- [3] Ruska E. Über Fortschritte im bau und in der leistung des magnetischen elektronenmikroskops. Z. Phys., 1934, 87(9-10): 580-602.
- [4] Ruska E. Über ein magnetisches objektiv für das elektronenmikroskop. Z Phys., 1934, 89(1-2): 90-128.
- [5] Ruska E. The early development of electron lenses and electron microscopy. Microscop Suppl., 1980 (Suppl 5): 1-140.
- [6] Ruska E. The emergence of the electron microscope: Connection between realization and first patent application, documents of an invention. J. Ultra. Mol. Struct. Res., 1986, 95(1-3): 3-28.
- [7] Ruska E. The development of the electron microscope and of electron microscopy (Nobel Lecture). Rev. Modern Phys., 1987, 59(3): 627-638.
- [8] 郭可信. 金相学史话(6):电子显微镜在材料科学中的应用. 材料科学与工程. 2002, 20(1): 5-10.
- [9] Rudenberg H G, Rudenberg F H. Reinhold rüdenberg as a physicist-his contribution and patent on the electron microscope, traced back to the “Göttingen electron group.”. EMSA Bull., 1994, 24: 572-580.
- [10] Rudenberg H G, Rudenberg P G. Origin and background of the invention of the electron microscope: Commentary and expanded notes on memoir of reinhold rüdenberg. Adv Imag Elect Phys., 2010, 160: 207-286.
- [11] Vandorsten A C, LePoole J B, Verhoeff A, et al. The philips electron microscope. J Appl. Phys., 1948, 19(12): 1190-1190.
- [12] 钱临照, 朱清时. 钱临照文集. 合肥: 安徽教育出版社, 2001.
- [13] 郭可信. 缅怀我国晶体范性及电子显微学研究的先驱钱临照先生. 物理. 1999, 28(12): 751-752.
- [14] 黄兰友. 早期电子显微镜制造的回忆. 电子显微学报. 1996, 15(2-4): 344-352.
- [15] 姚骏恩. 我国超显微镜的研制与发展. 电子显微学报. 1996, 15(2-4): 353-370.
- [16] 胡欣. 新中国第一台电子显微镜运输纪实. 见: 岳爱国. 定格在记忆中的光辉七十年—献给中国科学院 70 周年华诞. 北京: 科学出版社, 2019.
- [17] 胡升华. 困扰海峡两岸的中国第一台电子显微镜之谜. 物理. 2020, 49(11): 777-781.



- [18] 钱临照, 何寿安. 铝单晶体滑移的电子显微镜观察(一). 物理学报. 1955, 11(03): 287-289.
- [19] 钱临照, 何寿安. 铝单晶体滑移的电子显微镜观察(二). 物理学报. 1955, 11(03): 290-294.
- [20] 李林. 对我的老师钱临照先生的怀念. 物理. 1999, 28(12): 748-750.
- [21] Kuo K. Alloy carbides precipitated during the fourth stage of tempering. J. Iron Steel Inst., 1956, 184(part 3): 258-268.
- [22] 郭可信. 准晶与电子显微学——略述我的研究经历. 电子显微学报. 2007, 26(4): 259-269.
- [23] 郭可信, 张修睦. 铝镁合金中位错的运动与交滑移. 物理学报. 1966, 22(3): 257-269.
- [24] 郭可信, 林保军. 镍铬合金中的位错运动与位错反应. 物理学报. 1978, 27(6): 729-745.
- [25] 马秀良, 《晶体结构与缺陷的电子显微分析实验案例》, 高等教育出版社, 2024.
- [26] Urban K W. Studying atomic structures by aberration-corrected transmission electron microscopy. Science, 2008, 321(5888): 506-510.
- [27] Lentzen M. Progress in aberration-corrected high-resolution transmission electron microscopy using hardware aberration correction. Microsc. Microanal., 2006, 12(3): 191-205.
- [28] Uhlemann S, Haider M. Residual wave aberrations in the first spherical aberration corrected transmission electron microscope. Ultramicroscopy, 1998, 72(3-4): 109-119.
- [29] Krivanek O L, Dellby N, Lupini A R. Towards sub-Å electron beams. Ultramicroscopy, 1999, 78(1-4): 1-11.
- [30] 章效锋, 《清晰的纳米世界: 显微镜终极目标的千年追求》, 清华大学出版社, 2005。
- [31] 章效锋, 《显微传》, 清华大学出版社, 2015。
- [32] Rose H H. Historical aspects of aberration correction. J. Electron Microsc., 2009, 58(3): 77-85.
- [33] Haider M, Uhlemann S, Schwan E, *et al.* Electron microscopy image enhanced. Nature, 1998, 392(6678): 768-769.
- [34] Krivanek O L, Dellby N, Spence A J, *et al.* On-line aberration measurement and correction in STEM. Microsc. Microanal., 1997, 3(S2): 1171-1172.

主编: 马秀良

排版: 耿皖荣 陈雨亭 韩梦娇