

НОБЕЛЕВСКИЕ ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ – 1986

537.533.35

**РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОННОГО МИКРОСКОПА И ЭЛЕКТРОННОЙ
МИКРОСКОПИИ**

Э. Руска*)

1. РОДИТЕЛЬСКИЙ ДОМ, СЕМЬЯ

Месяц назад Нобелевский фонд прислал мне свой ежегодник за 1985 г. Из него я узнал, что многие нобелевские лекции представляют собой настоящие научные доклады, насыщенные кривыми, синоптическими таблицами и цитатами. Мне не хочется делать здесь такой доклад о предмете, который можно найти в любом современном учебнике по физике. Поэтому я расскажу не столько о физических и технических деталях и их взаимосвязи, сколько о человеческих впечатлениях — некоторых радостных событиях и многих огорчениях, которые не обошли меня и моих коллег на пути к конечному успеху. Но я не хочу, чтобы это звучало как жалоба — и я считаю подобный опыт ученых вполне понятным и даже нормальным.

В таком изложении я, конечно, должен рассмотреть влияние моего окружения, в частности моей семьи. В моей семье и до меня были ученые: мой отец Юлиус Руска занимался историей науки в Гейдельберге и Берлине; мой дядя Макс Вольф был астрономом в Гейдельберге; его ассистент, ученик моего отца и мой крестный отец, Август Копф был директором Института астрономических расчетов в бывшем Университете Фридриха-Вильгельма в Берлине. Племянник моей матери Альфреде Хоче был профессором психиатрии во Фрейбурге (Брейстгай); мой дед по материнской линии Альфред Мерке был теологом в Гейсене и Гейдельберге.

Мои родители проживали в Гейдельберге и имели семерых детей. Я был пятым, а мой брат Гельмут — шестым. С ним у меня были особенно близкие и дружеские отношения. Уже в раннем детстве на нас произвели большое впечатление оптические приборы. Несколько раз дядя Макс показывал нам телескопы в обсерватории в Кёнигстуле, недалеко от Гейдельберга, которую он возглавлял. Вскоре мы получили представление, хотя и противоречивое, о световом микроскопе. На втором этаже нашего дома у отца было два кабинета, соединенных широкой скользящей дверью, которая обычно была открыта. Одну комнату он использовал при своих исследованиях по истории науки, другую — для научных увлечений, в частности минералогией, ботаникой и зоологией. Когда наши игры с соседскими детьми перед домом становились

*) Russka E. The Development of the Electron Microscope and of Electron Microscopy: Nobel Lecture. Stockholm, December 8, 1986.— Перевод В. Г. Терзиева.

Профессор Эрнст Руска работает в Институте Фрица Хабера Общества Макса Планка, Зап. Берлин.

слишком шумными, он стучал в окно. Поскольку это действовало ненадолго, то он стучал второй раз уже гораздо громче. После третьего раза мы с Гельмутом должны были прийти в его комнату и тихо сидеть на низкой деревянной скамейке спиной к спине на расстоянии двух метров от его стола иногда в течение целого часа. В это время мы могли видеть на столе в соседней комнате красивую желтоватую коробку, в которой находился большой цейссовский микроскоп отца. Трогать его нам было строго запрещено. Правда, он иногда показывал нам интересные вещи под этим микроскопом, но по известным причинам он опасался, что детские руки повредят объектив или образец неумелым обращением с грубой и точной настройками. Так что наше первое знакомство с микроскопией не было полностью удачным.

2. ШКОЛА, ВЫБОР ПРОФЕССИИ

Спустя несколько лет мой брат получил отличные знания по биологии от своего учителя Адольфа Лейбера, а я — весьма основательные познания по физике от моего преподавателя Карла Рейнига. С большим удовольствием я недавно прочитал впечатляющий рассказ о личности Рейнига в мемуарах физика-теоретика Вальтера Эльзассера, который учился в нашей школе и был на два года старше меня. Даже теперь я помню то глубокое впечатление, которое произвело на меня его объяснение того, что движение электронов в электростатическом поле подчиняется тем же законам, что и движение инертной массы в гравитационных полях. Он пытался объяснить нам даже причину ограничения разрешающей способности микроскопа, связанную с длиной световой волны. Тогда я понял не все, и вскоре после этого во время одной из наших частых прогулок по лесу около Гейдельберга у нас состоялась продолжительная дискуссия на эту тему с моим братом Гельмутом, который тогда уже проявил склонность к медицине, и с моим одноклассником Карлом Дейсслером, который тоже впоследствии изучал медицину.

В нашем колледже (классической гимназии) у нас было до 17 часов в неделю латыни, греческого и французского языков. В отличие от моего отца, которому исключительно легко давалось изучение языков, у меня были очень слабые достижения в этой области. Мой отец, преподававший в то время в нашей школе, ежедневно узнавал от своих коллег о моем недостаточном рвении и ругал меня за лень, так что мои школьные годы были невеселыми. У преподавателя греческого, который учился с моим отцом, был более реалистичный взгляд на вещи: по случаю конфирмации он подарил мне книгу «Hinter Pflug und Sehraubstock» («За плугом и тисками») швабского «поэта» инженера Макса Эйта (1836—1906). Технический прогресс всегда завораживал меня; в частности, позже я интересовался развитием аэронавтики, конструированием дирижаблей и самолетов. Впечатляющая книга Макса Эйта подтолкнула меня к изучению машиностроения. Мой отец, учившийся в университетах Страсбурга, Берлина и Гейдельберга, видимо, считал учебу в Высшей технической школе недостаточной и предложил мне один семестр обучения в каком-нибудь университете. Но у меня было убеждение, что инженерное дело привлекает меня больше, и я отказался.

3. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОСЦИЛЛОГРАФ И КОРОТКАЯ КАТУШКА

После того, как я в течение двух лет изучал электротехническое машиностроение в Мюнхене, отец получил приглашение возглавить вновь образованный Институт истории науки в Берлине в 1927 г. Таким образом, после предварительных экзаменов в Мюнхене я прибыл в Берлин на вторую половину моего обучения. Здесь я специализировался на высоковольтной технике и электрических установках и, кроме того, слушал лекции профессора Адольфа Маттиаса. В конце летнего семестра 1928 г. он посвятил нас в свои планы собрать небольшую группу людей для совершенствования брау-

новской трубки с целью создания эффективного электронно-лучевого осциллографа для измерения очень быстрых электрических процессов в силовых станциях и воздушных высоковольтных линиях передач. Возможно, благодаря отложившемуся в глубине моего сознания воспоминанию о школьном уроке физики я немедленно вызвался на решение этой задачи и стал самым молодым сотрудником группы, которую возглавил доктор Макс Кноль. Курс практической физики в Высшей Технической школе в Мюнхене под руководством профессора Джонатана Зеннека и нынешняя работа в группе Макса Кноля были моими первыми попытками в области эксперимента. Как новичку, мне было поручено решение некоторых вакуумно-технических проблем, которые имели большое значение для всех нас. Благодаря личности Макса Кноля в группе были дружеские взаимоотношения, и за нашим общим с ним дневным кофе мы открыто обсуждали текущие научные проблемы каждого члена группы. Так как я не испытывал отвращения к вычислениям, а создание катодно-лучевых осциллографов с высокой разрешающей способностью было нашей общей целью, в своей «курсовой работе», которая была необходимым условием перехода к выполнению дипломной работы, я хотел разработать подходящий метод оценки параметров таких катодно-лучевых осциллографов.

Диаметр пишущего пятна и плотность его энергии являются наиболее важными параметрами, влияющими на точность измерений и пишущую скорость катодно-лучевых осциллографов. Для того чтобы получить маленькие и яркие пишущие пятна, электронные пучки, расходящиеся с катода, необходимо сконцентрировать в крохотную точку на флуоресцентном экране катодно-лучевого осциллографа. Для этого еще в 1905 г. Рэнкин применил короткую катушку постоянного тока, которая ранее была использована экспериментаторами в опытах с электронными пучками (прежние названия: «свечение» или «катодные лучи»). Еще до этого Хитторф (1869 г.) и Беркленд (1896 г.) использовали аксиально-симметричное поле, расположенное перед цилиндрическим магнитом, для фокусировки катодных лучей. Более точного представления о влиянии аксиально-симметричного, т. е. неоднородного магнитного поля, подобных стержней или катушек на электронный пучок, проходящий вдоль их осей, долгое время не удавалось получить.

Поэтому Ганс Буш³ в Йене рассчитал траектории электронов в таком электронном пучке и обнаружил, что магнитное поле короткой катушки оказывает такое же воздействие на пучок электронов, что и стеклянная линза с определенным фокусным расстоянием на световой пучок. Фокусное расстояние такой «магнитной электронной линзы» можно непрерывно изменять с помощью тока в катушке. Буш хотел экспериментально проверить свою теорию, но не смог провести новые эксперименты из-за нехватки времени. Он воспользовался экспериментальными результатами, полученными им за 16 лет до этого в Гётtingене. Однако они крайне неудовлетворительно согласовывались с теорией. Возможно, это послужило причиной того, что Буш не дал описания какого-либо прибора с такой катушкой, что продемонстрировало бы практический выход от его теории линзы.

Для того чтобы более точно объяснить свойства пишущего пятна электронно-лучевого осциллографа, полученного на основе короткой катушки, я проверил теорию линзы Буша с помощью простого экспериментального приспособления в более хороших, однако все еще неадекватных, экспериментальных условиях (рис. 1) и обнаружил, таким образом, более близкое, но все же недостаточно хорошее согласие размера изображения с теоретическими предсказаниями Буша. Основной причиной было то, что я использовал катушку с размерами катушки Буша, распределение поля вдоль оси которой было слишком широким. Моя курсовая работа⁴, представленная на факультете электротехнического машиностроения в 1929 г., содержала большое количество отчетливых изображений освещенной электронами апертуры анода диаметром 0,3 мм с различным усилением, которые были

получены с помощью короткой катушки («магнитной электронной линзы»), т. е. первые зарегистрированные электронно-оптические изображения.

Из уравнения Буша для фокусного расстояния магнитного поля короткой катушки следовало, что заданное фокусное расстояние можно было получить, используя тем меньшее число ампер-витков, чем больше поле катушки

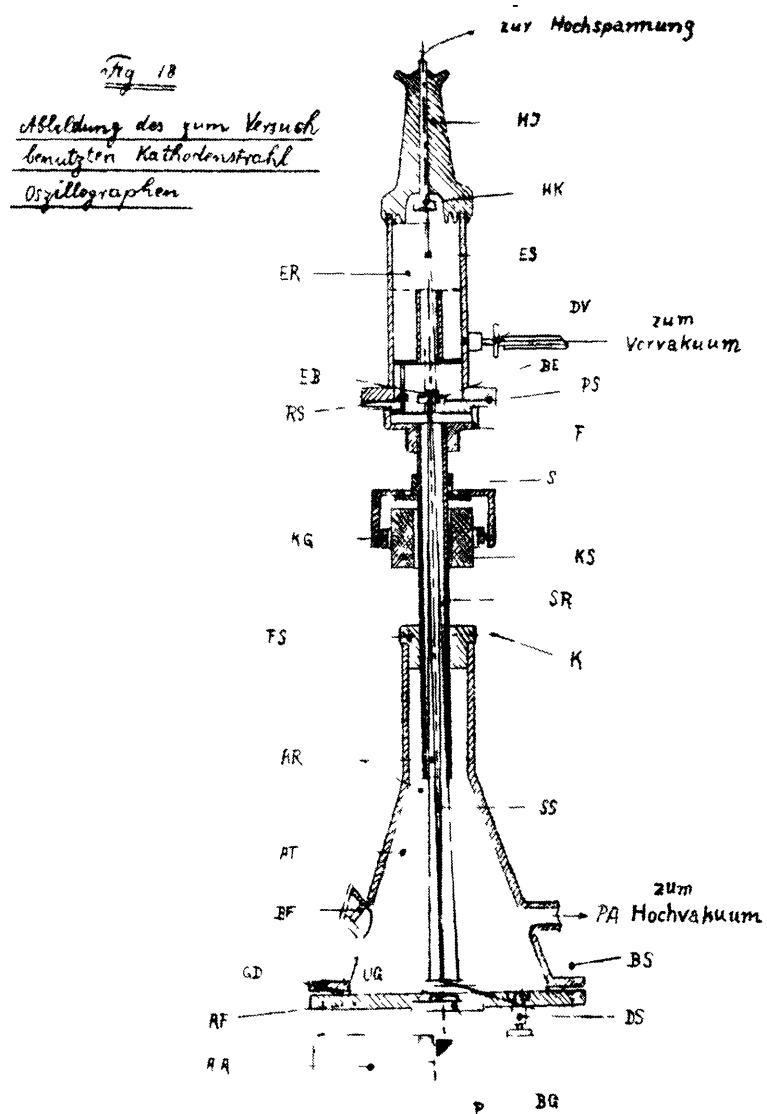


Рис. 1. Авторский эскиз (1929 г.) электронно-лучевой трубы, предназначенной для изучения отображающих свойств неоднородного магнитного поля короткой катушки

сконцентрировано в малой области на ее оси, так как в этом случае максимум поля возрастает. Поэтому для меня как будущего инженера-электротехника было логично упаковать катушку в железный кожух, с кольцевой щелью на внутренней стороне Измерения, проведенные с такой катушкой, сразу же показали, что то же самое фокусное расстояние можно получить, используя гораздо меньше ампер-витков^{4,5}. И наоборот, то же самое количество ампер-витков позволяет получить более короткое фокусное расстояние.

4. ПОЧЕМУ Я ИСПОЛЬЗОВАЛ В ЭЛЕКТРОННОМ МИКРОСКОПЕ МАГНИТНУЮ ЛИНЗУ?

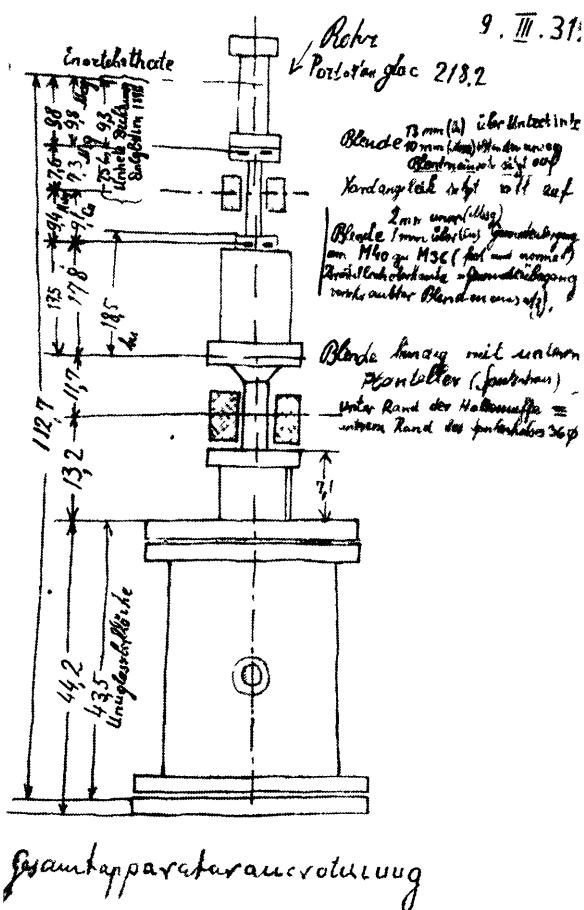
В своей дипломной работе (1930 г.) я должен был вести поиск электростатической замены магнитной фокусировки расходящегося электронного пучка, которая могла бы быть проще и дешевле. Для этой цели Кноль предложил провести экспериментальную проверку приспособления из полых электродов с различным электрическим потенциалом, на которые он получил патент за год до этого⁶. Мы обсудили форму электрического поля между этими электродами; я предположил, что фокусирующий эффект не должен иметь места в отверстии между искривленными эквипотенциальными плоскостями из-за зеркальной симметрии электростатического поля электродов с любой стороны от центра линзы. При этом я исходил лишь из геометрии поля. Но этот вывод был неверным. Я упустил из виду, что фокусировка расходящегося электронного пучка должна происходить из-за существенного изменения скорости электронов при прохождении через такое поле. Кноль также не заметил эту ошибку. Поэтому в моей дипломной работе я избрал другой подход⁷. Я пропустил электронный пучок через просверленный насеквозд сферический конденсатор с мелкоячеистыми сферическими сетками, закрепленными с обоих концов канала. С помощью этого приспособления я получал горизонтальное перевернутое изображение с правильными размерами. Несколько позже я нашел верное решение — заменить все стеклянные линзы двойными электрическими слоями, имеющими форму соответствующих линз⁸. Чтобы достичь результата, необходимо было создать разность потенциалов между двумя мелкоячеистыми сетками такого двойного слоя, которая должна была имитировать эффект преломления между воздухом и стеклом в обычной стеклянной линзе. Первые опыты с такой линзой подтвердили правильность идеи, но в то же время показали практическую непригодность таких сеточных линз из-за сильного поглощения в проходящем электронном луче на проволочных сетках, а также искажения на них поля. Вследствие моей теоретической ошибки и экспериментальной неудачи я решил продолжать работу с магнитной линзой. Я рассказываю это с такими подробностями только для того, чтобы показать, что время от времени нахождение более правильного, а возможно, и единственного верного пути может быть скорее игрой случая, чем результатом исключительного научного предвидения. Возможность создания электронного микроскопа с электронными линзами из электростатических полых электродов была реализована позже другими выдающимися экспериментаторами и привела вначале к существенному успеху. Однако от такого подхода пришлось отказаться, так как электростатическая линза по некоторым физическим причинам хуже магнитной.

5. ИЗОБРЕТЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО МИКРОСКОПА

После того, как я получил диплом (в начале 1931 г.), экономическая ситуация в Германии стала очень сложной и найти удовлетворительную должность в каком-нибудь университете или в промышленности представлялось нереальным. Поэтому я был рад возможности продолжить неоплачиваемую работу в аспирантуре в Институте высоких напряжений. После того, как в 1929 г. я показал в своей курсовой работе, что с помощью короткой катушки можно получить четкие увеличенные изображения освещенных электронами отверстий, мне хотелось выяснить, можно ли, как в световой оптике, получить дальнейшее увеличение при помощи второго отображающего каскада, расположенного позади первого каскада. Такую установку с двумя короткими катушками удалось легко собрать (рис. 2), и в апреле 1931 г. я получил убедительное доказательство того, что дальнейшее увеличение возможно (рис. 3). Эта установка сегодня считается первым элек-

тронным микроскопом, хотя ее общее увеличение $4 \times 4 = 16$ раз было весьма скромным.

Таким образом впервые было доказано, что наряду со светом и стеклянными линзами можно использовать электронные лучи и магнитные поля для получения изображений освещенных объектов и при этом возможно применение нескольких каскадов увеличения. Но какая могла быть польза от



вычислив с помощью формулы де Бройля, что длина этих волн должна быть примерно на пять порядков меньше световой. Таким образом, не было причины оставлять попытки превзойти в электронной микроскопии разрешающую способность световой.

В 1932 г. мы с Кнолем рискнули предсказать предельную разрешающую способность электронного микроскопа¹². Предположив, что формула для предельного разрешения светового микроскопа применима и для материальной волны электронов, мы заменили длину световой волны длиной волны электронов при ускоряющем напряжении в 75 кВ и подставили в формулу

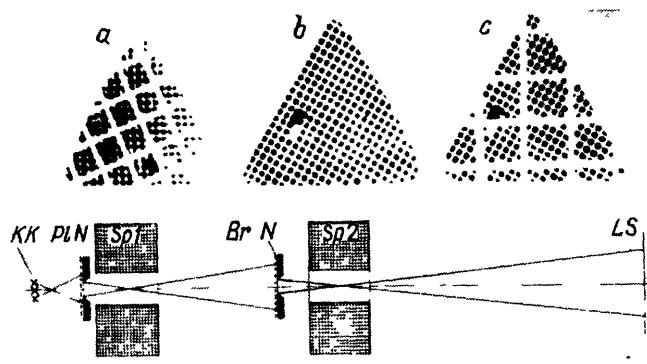


Рис. 3. Первое экспериментальное подтверждение того, что увеличенные изображения освещенных электронами образцов могут быть получены в несколько этапов с помощью (магнитных) электронных линз ($U = 50$ кВ)⁸.

a — Однокаскадное изображение платиновой сетки, расположенной перед катушкой 1, полученное с помощью катушки 1; увеличение $M = 13\times$. *b* — Однокаскадное изображение бронзовой сетки, расположенной перед катушкой 2, полученное с помощью катушки 2; $M_{el} = 4,8\times$. *c* — Двухкаскадное изображение платиновой сетки, расположенной перед катушками 1 и 2 ($M_{el} = 17,4\times$) вместе с однокаскадным изображением бронзовой сетки, расположенной перед катушкой 2; $M_{el} = 4,8\times$. KK — холодный катод, PtN — платиновая сетка, Sp1 — катушка 1, BrN — бронзовая сетка, Sp2 — катушка 2; LS — флуоресцентный экран

Аббе апертуру изображения $2 \cdot 10^{-2}$ рад, что соответствовало ранее использованной нами. Такая же апертура изображения применяется и теперь. Таким образом, еще тогда мы установили предел разрешающей способности $2,2 \text{ \AA} = 2,2 \cdot 10^{-10} \text{ м}$, — величину, которая реально была достигнута 40 лет спустя.

Большинство специалистов, конечно, в то время не принимали всерьез наш подход. Они, скорее, рассматривали его как несбыточную мечту. Я и сам чувствовал, что преодолеть существующие трудности будет очень сложно, и главным образом — проблему нагревания объекта. В апреле 1932 г. М. Кноль получил должность в компании «Telefunken» (Берлин), связанную с развивающейся работой в области телевидения.

В отличие от многих биологов и медиков, мой брат Гельмут, который почти закончил свое медицинское образование, верил в успешное развитие этих направлений. Его уверенность в удачном исходе помогала мне преодолевать возникшие трудности. На следующем шаге я должен был показать, что есть возможность получить увеличение настолько большое, чтобы достичь разрешения более высокого, чем у светового микроскопа. Для этой цели надо было разработать такую форму катушки, чтобы ее магнитное поле было сконцентрировано в очень малой области по оси катушки, что позволило бы получать короткие фокусные расстояния, которые необходимы для достижения сильно увеличенных изображений на не очень больших расстояниях за катушкой. Техническое решение этого я дал уже в своей курсовой работе в 1922 г., когда использовал катушку, упакованную в железный кожух. В 1932 г. совместно с моим другом и соаспирантом Бодо фон Борриесом я при-

менил, для получения патента на оптимизацию этого решения, линзу с полюсными наконечниками «Polschuhlinse», которая используется сейчас во всех магнитных электронных микроскопах. Ее изготовление и измерения фокусных расстояний, которых можно было достичь с ее помощью, были предметом моей диссертации¹⁴. Она была закончена в августе 1933 г., и в своих измерениях я получил трехмиллиметровые фокусные расстояния для электронных лучей при ускоряющем напряжении 75 кВ (рис. 4). Имея такие линзы, я, конечно, сразу же захотел сконструировать второй электронный микроскоп с гораздо более высокой разрешающей способностью. Благодаря рекомендации Макса фон Лауэ я получил для решения этой задачи на второе полугодие 1933 г. стипендию в 100 рейхсмарок в месяц от Немецкого Общества содействия науке для оплаты текущих счетов и личных расходов. Я закончил новый прибор в конце ноября (рис. 5) и почувствовал, что должен вернуть жалованье за декабрь. К моей большой радости, мне «в виде исключения» было разрешено оставить эти деньги у себя. Тем не менее это был самый дешевый электронный микроскоп из всех, за которые когда-либо платило «Deutsche Gesellschaft fur Wissenschaftsförderung» (Немецкое Общество содействия науке).

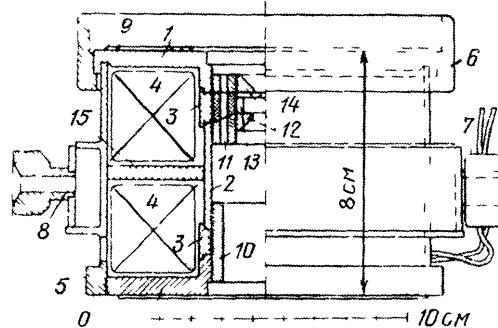


Рис. 4. Поперечное сечение первой линзы с полюсными наконечниками^{14,15}

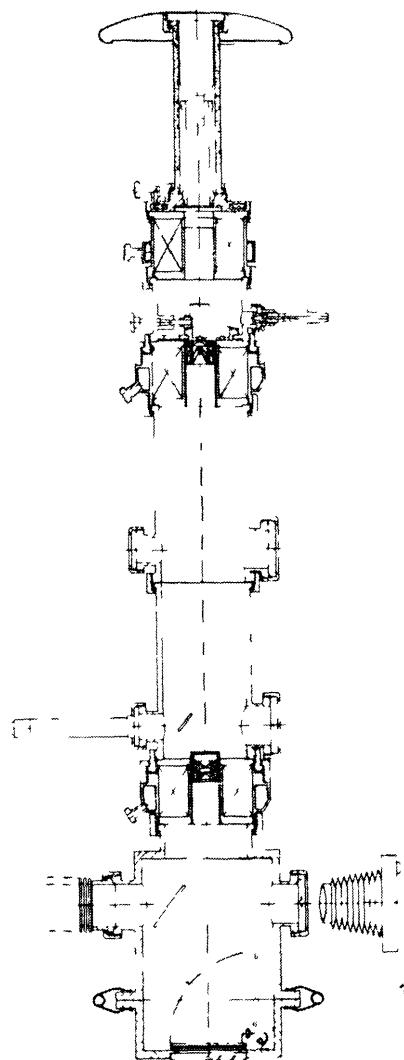


Рис. 5. Первый двухкаскадный электронный микроскоп, увеличивающий сильнее, чем световой.
Поперечное сечение колонны микроскопа (перерисовано 1976 г.)

С помощью этого прибора, который давал увеличение 12 000× (в 12 000 раз), мне удалось получить лишь несколько изображений, однако при этом я заметил важное обстоятельство, которое дало мне надежду на будущее: даже при очень тонких образцах удавалось получать хороший контраст изображения, определяемый уже не поглощением, а исключительно дифракцией электронов; при этом, как известно, объекты нагреваются гораздо слабее.

6. У ИСТОКОВ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОННЫХ МИКРОСКОПОВ

Я понимал, однако, что дальнейшая разработка практически полезного прибора с более высоким разрешением потребует много времени и огромных денежных затрат. При таких полученных результатах надежда получить откуда-нибудь в то время финансовую поддержку была очень малой. Я приготовился к длительному скучному периоду и решил вернуться к идеи создания коммерческого прибора позже, вместе с Бодо фон Борриесом и моим братом Гельмутом. Поэтому я согласился на должность в берлинско-зелендорфском Телевизионном акционерном обществе, где занимался усовершенствованием брауновских трубок с целью создания трубок, принимающих и воспроизводящих изображение. С целью лучше координировать наши действия, направленные на то, чтобы получить финансовую поддержку для разработки коммерческого электронного микроскопа, я убедил Бодо фон Борриеса оставить место на рейнско-вестфальской электростанции и вернуться в Берлин. Здесь в 1934 г. он получил должность в фирме «Сименс — Шуккерт». В течение почти трех лет мы обращались за финансовой помощью во многие государственные и промышленные исследовательские учреждения.

В течение этого периода появились первые электронные микрофотографии биологических объектов. Ганс-Отто Мюллер (изучающий электротехническое машиностроение) и Фридрих Краузе (студент-медик) работали на созданном мной в 1933 г. приборе и раз от раза публиковали все более интересные результаты (рис. 6—9). К несчастью, ни один из этих двух одаренных молодых ученых не выжил во время второй мировой войны.

Ладислав Мартон в Брюсселе создал свой первый микроскоп с горизонтальной колонной и получил на нем относительно небольшое увеличение биологических объектов¹⁷. В 1936 г. он собрал второй прибор, на этот раз с вертикальной колонной¹⁸.

Несмотря на эти новые публикации, мы нашли финансовую поддержку лишь через три года, благодаря профессиональному отзыву на нашу работу профессора д-ра Зибека, директора 1-й медицинской клиники в Берлине, бывшего клинического преподавателя Гельмута Руски. Я цитирую последние два абзаца его отзыва от 2 октября 1936 г.¹⁹:

«Если бы возможности микроскопического разрешения превосходили предполагаемые значения в 100 раз, то научные применения для такого прибора невозможно было бы перечислить. То, что представляется сейчас достижимым, я считаю настолько важным, что настоятельно рекомендую начать подобную исследовательскую работу в области медицины и готов сотрудничать с привлечением ресурсов моего Института.

Я хотел бы напомнить ход развития рентгеновской аппаратуры. В то время, когда Рентгену удавалось продемонстрировать изображения кости в руке или денег внутри бумажника, никто не подозревал о том, сколь распространенной и особенно важной для медицины станет эта форма излучения. Практический успех электронной микроскопии предсказать, конечно, нельзя, но проблемы, о которых я упоминал, так важны, что необходимо использовать для их решения любую возможность, которая в наших силах». Этот отзыв произвел впечатление в фирмах «Сименс» в Берлине и «Карл Цейсс» в Йене, и обе они выразили готовность выпускать промышленные электронные микроскопы. Мы внесли предложение соединить усилия, чтобы использовать опыт «Сименс» в электротехнике и «Цейсс» в точном машиностроении, но, к сожалению, наше предложение было отвергнуто, и тогда мы предпочли «Сименс». Будучи первыми сотрудниками, мы привлекли к работе Отто Мюллера для практической разработки и теоретика Вальтера Классера из Праги. Мы начали работу в 1937 г., а в 1938 г. собрали два прибора с конденсаторами и полюсными наконечниками для объективной и проекционной



Рис. 6. Поверхность крыла домашней мухи (первая внутренняя фотография, $U = 60$ кВ, $M_{el} = 2200\times$)²⁸



Рис. 7. Диатомы *Amphipleura pellucida* ($U = 53$ кВ, $M_{el} = 3500\times$, $\delta' = 130$ нм)²⁹



Рис. 8. Бактерии, зафиксированные с помощью формалина, помещенные на опорную пленку и окрашенные солью тяжелого атома ($U = 75,3$ кВ, $M_{el} = 2000\times$)³⁰



Рис. 9. Нитевидный кристалл железа (вискер) ($U = 79$ кВ, $M_{el} = 2000\times$)³¹

линз, а также с воздушными шлюзами для объектов и фотопластинок. Максимальное увеличение достигало $30\,000\times$ ²⁰. Один из этих приборов Гельмут Руска сразу же стал использовать в первых биологических исследованиях (профессор Зибек отпустил Гельмута Руску для нашей работы в фирме «Сименс»). К сожалению, из-за нехватки времени я не могу сейчас сделать обзор этого богатого публикациями периода. В 1940 г. «Сименс» по нашему предложению организовал исследовательскую лабораторию, которую возглавил Гельмут Руска. В лаборатории было четыре электронных микроскопа для проезжих научных работников. В 1941 г. Гельмут Руска получил первые изображения бактериофагов (рис. 10). Осенью 1944 г. эта лаборатория была уничтожена во время воздушного налета.

Интерес к электронной микроскопии постепенно возрастал. Впервые фирма «Сименс» заключила выгодную сделку в 1938 г., когда химическая промышленность, представленная в основном концерном «Farben Industrie», сделала заказы на изготовление одного прибора для каждого из своих предприятий в Хёхсте, Ливеркузене — Биттерфельде и Вольфене. К тому времени прибор не производили, он даже не прошел испытания, а был лишь спроектирован. Тем не менее в конце 1939 г. первый серийно произведенный фирмой «Сименс» прибор был доставлен в Хёхст (рис. 11). Между прочим, прибор под № 26 был доставлен профессору Арне Тицелиусу в Уппсалу осенью 1943 г. К февралю 1945 г. более 30 электронных микроскопов были собраны в Берлине и доставлены покупателю. Таким образом, теперь не связанные друг с другом представители разных медицинских и биологических направлений могли сформировать собственное мнение о перспективах электронной микроскопии. Выбор объектов, однако, был все еще ограничен, поскольку достаточно тонкие срезы получать не удавалось. После окончания войны прекратилось мое тесное сотрудничество с братом и фон Борриесом.

7. РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ ПОСЛЕ 1945 г.

Нашу лабораторию необходимо было полностью перестраивать. Я смог приступить к работе лишь в июне 1945 г. в основном с новыми сотрудниками. Несмотря на тяжелые условия в Берлине и Германии, новые электронные

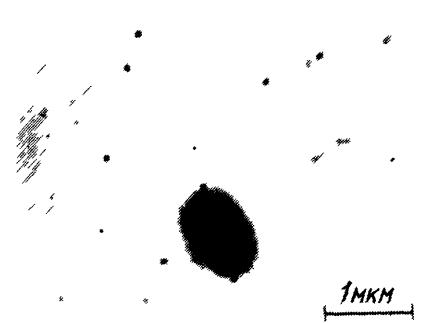


Рис. 10. Бактериофаги³²

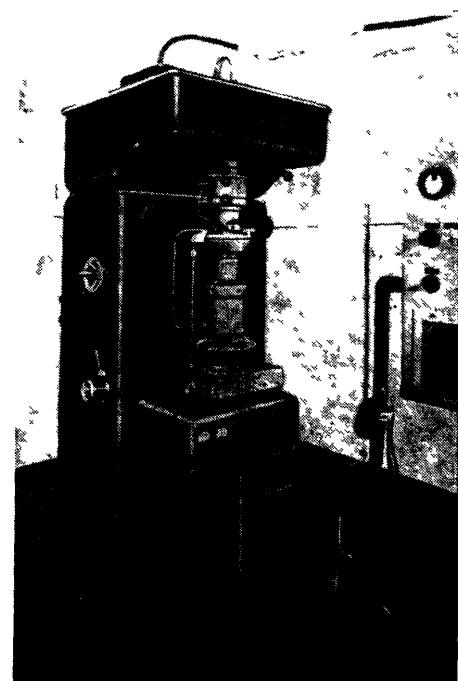


Рис. 11. Первый серийно произведенный электронный микроскоп фирмы «Сименс» (общий вид)²¹

микроскопы были выпущены в конце 1949 г. В 1954 г. фирма «Сименс» вернула себе лидирующее положение в этой области с помощью микроскопа «Elmiskop»²³ (рис. 12). Этот прибор имел две конденсорные линзы, что позволяло освещать только малые области образца для получения необходимого конечного увеличения и, таким образом, обеспечивало температурную защиту объекта. Теперь при окончательном увеличении в 100 000 раз освещенная

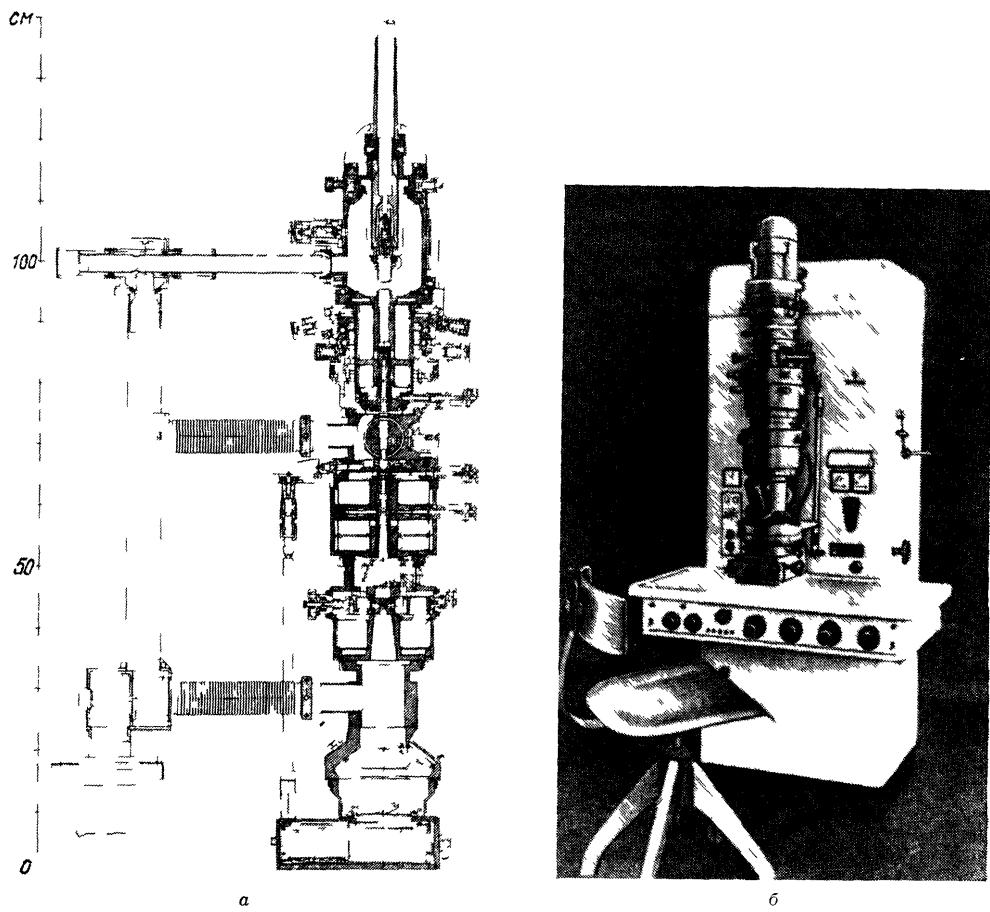


Рис. 12. Первый серийно произведенный 100-кВ электронный микроскоп с двумя конденсорными линзами для «малообластного освещения» фирмы «Сименс»²³.
а — Поперечное сечение. б — Общий вид²³

область образца должна составлять 1 мкм (в отличие от 1 мм ранее), чтобы получить изображение 10 см в диаметре; переходящая в тепло энергия электронного пучка может быть уменьшена в миллион раз. Объекты нагреваются так, что выделенная тепловая энергия рассеивается во всем пространстве вокруг образца. Если тепловая энергия мала, то происходит меньшее повышение температуры по отношению к окружающей среде.

Сначала новый прибор нас сильно разочаровал, так как мы выяснили, что при подобном «освещении малых областей» те части образца, которые больше не нагревались, моментально покрывались налетом, что приводило к исчезновению деталей изображения объекта за какие-то секунды. Исследования показали, что небольшое количество остаточных газов, в частности углеводорода, конденсируется при этом на самом объекте; таким образом, результирующий слой С (который был не очень тонок) в освещенной области объекта был виден как черный налет, закрывающий все интересные тонкие

детали. К счастью, спустя некоторое время мы смогли преодолеть и это препятствие относительно простым способом: все окружающее объект пространство охлаждалось влажным воздухом так, что до нагревания пучком объект был заметно теплее окружающей среды даже при низкой температуре. За счет этого остаточные углеводородные газы конденсировались теперь не на образце, а на окружающих сильно охлажденных плоскостях.

Наряду с успешным решением этой проблемы, другая трудность, связанная с толщиной объекта, была также неожиданно преодолена, благодаря изобретению «ультрамикротомов». Вместо отшлифованных стальных ножей, лезвия которых были недостаточно гладкими из-за кристаллизации, стали применяться края разломанного стекла, которое не имело кристаллических неровностей. Обычное механическое перемещение материала перпендикулярно ножу — из-за механического люфта или даже из-за масляного слоя — нельзя было провести достаточно точно, чтобы получить необходимое смещение в 10^{-5} мм. Наиболее тонкие срезы без дефектов были получены путем теплового расширения стержня, на концах которого закреплялся образец. Чтобы сохранить тончайшие срезы ровными, их сразу же после срезания погружали в раствор спирта, благодаря чему они оставались плоскими. Более того, для новой режущей аппаратуры были подобраны специальные фиксирующие агенты. Разработка новых ультраатомов существенно увеличила выбор объектов для электронной микроскопии. В течение уже 25 лет почти во всех научных направлениях, использующих световую микроскопию, может также применяться и электронная.

За последние десятилетия новые идеи и методы, предложенные многими ведущими учеными из разных стран, продвинули электронную микроскопию далеко вперед. Я могу привести сейчас лишь несколько примеров. На рис. 13 показано поперечное сечение электронного микроскопа с однопольным конденсорным объективом, образец в котором помещается в максимум поля магнитной линзы с полюсными наконечниками²⁴. Таким образом, область возрастающего магнитного поля перед объективом ведет себя как конденсор с коротким фокусным расстоянием, а область уменьшающегося поля за объективом — как объектив с таким же фокусным расстоянием. В таком приспособлении обе линзы имеют особенно маленькую сферическую aberrацию. На рис. 14 дан общий вид этого прибора. На рис. 15 показано изображение, полученное от золотой кристаллической пластинки. Хорошо видны плоскости кристаллической решетки, отстоящие друг от друга на расстоянии 1,4 Å. Два подобных прибора были в дальнейшем усовершенствованы в Институте электронной микроскопии, созданном специально для меня в 1957 г. Обществом Макса Планка после моего ухода из фирмы «Сименс». На рис. 16 изображен высоковольтный (1 МВ) прибор, разработанный «Japan Electron Optics Laboratory». Развитию таких установок очень способствовали исследования Гастона Дюпюи (1900—1985) во Франции. Для таких установок, кроме их высокой стоимости, возникают специфические проблемы, связанные со стабилизацией ускоряющего напряжения и защитой операторов от рентгеновского излучения. Целью создания таких приборов было изучение более толстых образцов, однако в связи с тем, что сейчас решена проблема стабилизации высокого напряжения, было улучшено и разрешение, благодаря тому, что очень сильно разогнанные электроны имеют более короткие длины волн. Это позволяет исследовать и более тонкие, чем в обычном электронном микроскопе, объекты.

Возросло значение криогенной техники, которую начал развивать Фернандес-Моран в США. С помощью этой техники можно исследовать объекты, охлажденные до очень низкой температуры: они более устойчивы к повышенным дозам облучения, так как их внутреннее тепловое движение гораздо слабее, чем при комнатной температуре. Благодаря этому, даже при необратимой ионизации, молекулы сохраняют свою структуру в течение длительного времени. В последние годы в криогенном микроскопе стало

возможным получать изображения для очень чувствительных к пучку кристаллов с разрешением $2,5 \text{ \AA}$ ^{25, 26} (рис. 17²⁷). Образцы охлаждались до температуры -269°C . Напрямую получить контрастные изображения не удается, так как объекты разрушаются при дозах облучения, необходимых для нормальной экспозиции. Поэтому регистрируется большое количество

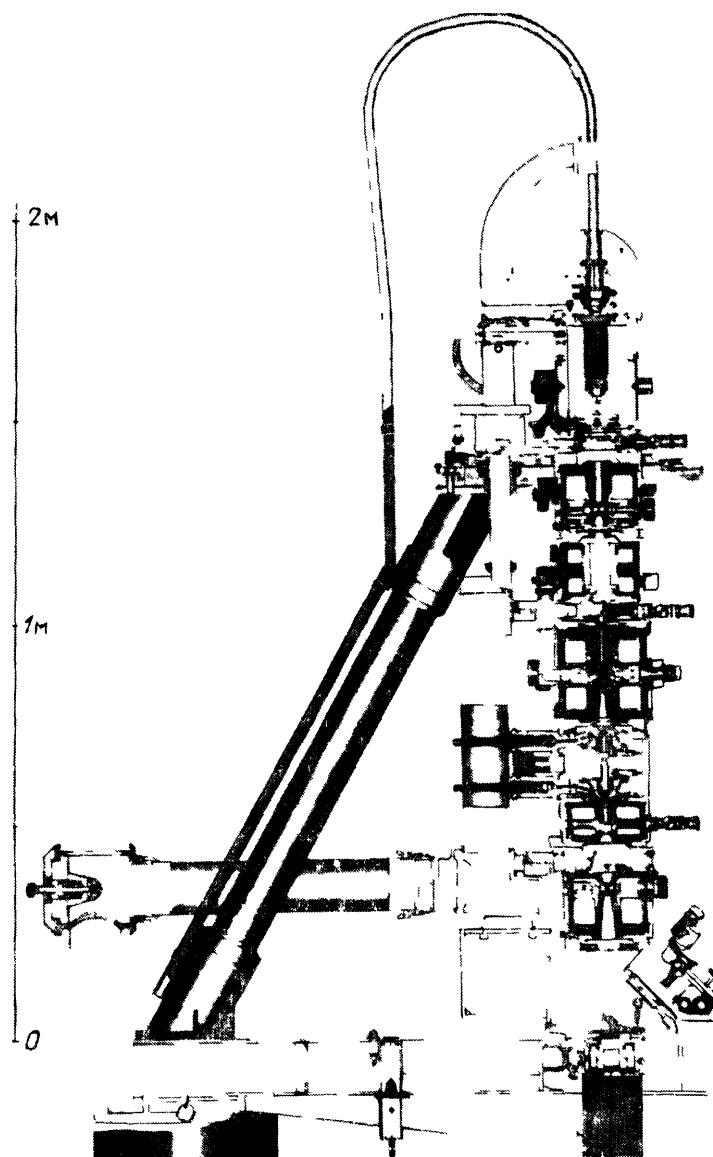


Рис. 13. 100-кВ электронный микроскоп с однодольным конденсорным объективом²⁴ (поперечное сечение)

изображений при малой дозе облучения, и потом эти изображения усредняются. Недодержанные изображения сильно зашумлены, но тем не менее содержат определенную полезную информацию. «Конечное» усредненное изображение формируется затем с помощью компьютера: микрофотография сначала преобразуется в цифровую форму на денситометре так, что каждой точке изображения присваивается число, соответствующее значению оптической плотности для данной точки на микрофотографии. Недоэкспониро-

ванное изображение всего кристалла делится компьютером на ячейки, как шахматная доска, и затем большое количество (в нашем случае 400) изображений ячеек перекрестно совмещается и складываются компьютером. Конеч-

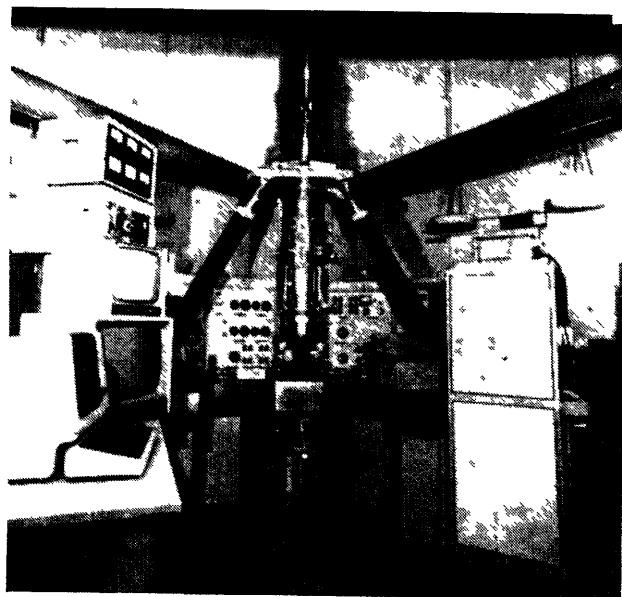


Рис. 14. Тот же прибор (общий вид)²⁴

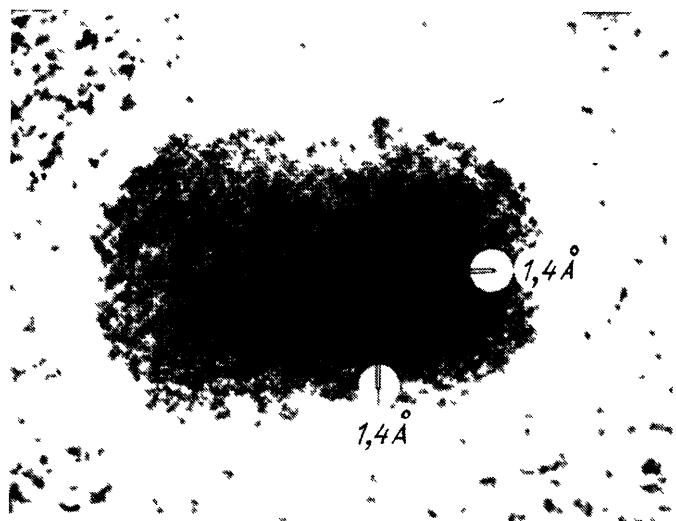


Рис. 15. Пластинчатый кристалл золота, плоскости кристаллической решетки с межплоскостным расстоянием 0,14 нм (получено с аксиальным освещением ($U = 100$ кВ, $M_{el} = 800\,000\times$). (Получено К. Вейссом и Ф. Землином на 100-кВ просвечивающем электронном микроскопе с однопольным конденсорным объективом в Институте Фрица Хабера Общества Макса Планка)

ное изображение можно поставить в соответствие достаточно экспонированной микрофотографии. На рис. 17, *a* показано начальное зашумленное изображение кристаллов парафина, на рис. 17, *б* — усредненное изображение. Длинные молекулы парафина СН расположены перпендикулярно плоскости

снимка. С помощью этого метода электронные микрофотографические изображения могут обрабатываться на ЭВМ. Есть возможность получать изображения даже трехмерных белковых кристаллов с очень высоким разрешением. Компьютер представляет собой мощный инструмент в современной электронной микроскопии.

Я не могу вдаваться в подробности, связанные с устройством просвечивающих электронных микроскопов на электростатических линзах и с устройством сканирующих электронных микроскопов, которые широко используются для исследования поверхностей и прозрачных образцов; не могу остановиться на описании различных методов обработки изображений, проводимой частично с применением компьютера; не могу охарактеризовать электронно-полевой микроскоп и ионный микроскоп.

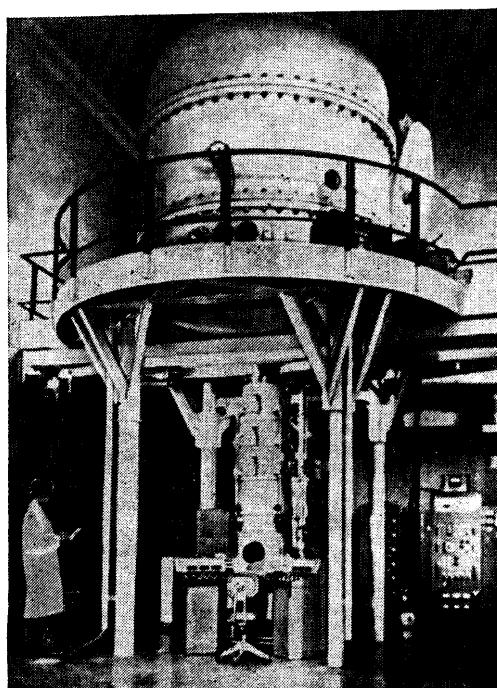


Рис. 16. 1 МВ электронный микроскоп
(Г. Дюпюи и др.)

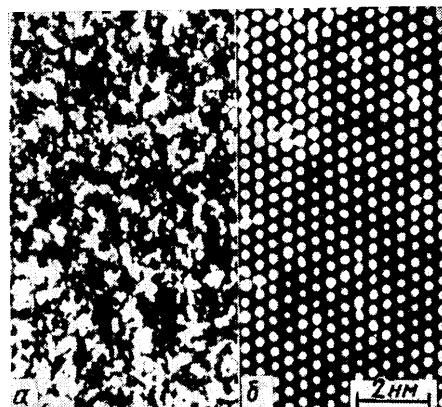


Рис. 17. Кристаллы парафина.
а — Изображение получено при минимальном освещении; б — Результат наложения с помощью компьютера друг на друга 400 ячеек изображения рис. а

Процесс развития электронной микроскопии в наши дни представляет собой борьбу с нежелательными проявлениями тех свойств электронных лучей, которые позволили достичь разрешения более высокого, чем у светового микроскопа. Так, например, короткая длина волны — необходимое условие хорошего разрешения — связана с нежелательной высокой энергией электронов, которая приводит к разрушению объекта. Преломление лучей в магнитном поле, необходимое для формирования изображения в линзе, может в то же время ограничивать разрешение, если не создать защиту от внешних по отношению к микроскопу переменных магнитных полей. Поэтому не стоит сейчас обвинять тех ученых, которые с самого начала не верили в возможности электронной микроскопии. Но даже сам по себе тот факт, что все проблемы решены к сегодняшнему дню настолько, что множество научных направлений может использовать ее в своих исследованиях, — это просто чудо.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rankin R.//Electr. Club. 1905. V. 11. P. 620.
2. Hittorf W.//Ann. d. phys. Chem. 1869. Bd 16. S. 1, 197.— Münster, 9. Okt. 1868.
3. Busch//Arch. Elektrotechn. 1927. Bd 18. S. 583.— Jena, Physikalischs Institut, März 1927.

4. R u s k a E.//Über eine Berechnungsmethode des Kathodenstrahlzoszillographen auf Grund der experimentell gefundenen Abhängigkeit des Schreibfleckdurchmessers von der Stellung der Konzentrierpule — (Работа велась с 1 ноября 1928 г. в Высоковольтной лаборатории Высшей технической школе в Берлине; директор — проф. А. Маттиас).— Тезисы студенческого проекта (117 с.); представлены 10 мая 1929 г.
5. R u s k a E., K n o l l M.//Zs. techn. Phys. 1931. Bd 12. S. 389.—Получено 18 апреля 1931 г.
6. K n o l l M. Vorrichtung zur Konzentrierung des Elektronenstrahls eines Kathodenstrahlzoszillographen: Немецкий патент № 690809; заявлен 10 ноября 1929 г., выдан 11 апреля 1940 г.
7. R u s k a E. Untersuchung elektrostatischer Sammelveorrichtungen als Ersatz der magnetischen Konzentrierpulen bei Kathodenstrahlzoszillographen.— Начато 18 июля 1930 г. в Высоковольтной лаборатории Технического университета (директор — А. Маттиас) в Берлине; представлено 23 декабря 1930 г. в виде дипломной работы (90 с.).
8. K n o l l M., R u s k a E.//Ann. d. Phys. 1932. Bd 12. S. 607.—Получено 10 сентября 1931 г.
9. K n o l l M. Berechnungsgrundlagen und neuere Ausführungsformen des Kathodenstrahlzoszillographen: Текст лекции, прочитанной 4 июля 1931 г. на Кранц-коллоквиуме в Технологическом университете в Берлине (26 с.).
10. R u s k a E.//The Early Development of Electron Lenses and Electron Microscopy.— Stuttgart: S. Hirzel Verlag, 1980.— P. 113.
11. D e B r o g l i e L. Recherches sur la théorie des quanta: Thèse.— Paris: Masson et Cie, 1924; //Ann. de Phys. 1925. T. 3. P. 22.
12. K n o l l M., R u s k a E.//Zs. Phys. 1932. Bd 78. S. 78.
13. B o r g i e s B., von, R u s k a E.//Magnetische Sammellinse kurzer Feldlänge: Немецкий патент № 680284; заявлен 17 марта 1932 г., выдан 3 августа 1939 г.
14. R u s k a E. Über ein magnetisches Objektiv für das Elektronenmikroskop: Диссертация в Технологическом университете в Берлине, представлена 31 августа 1933 г.; //Zs. Phys. 1934. Bd 89. S. 90; получено 5 марта 1934 г.
15. R u s k a E.//Ibidem. Bd 87. S. 580.— Получено 12 декабря 1933 г.
16. См. ¹⁰.— P. 120—122.
17. M a r t o n L.//Acad. roy. de Belg. Bull de la Cl. Sci. Ser. 1934. T. 20. P. 439.— Université libre de Bruxelles, Mai 1934.
18. M a r t o n L.//Rev. de Microbiol. Appl. 1936. T. 2. P. 117.
19. См. ¹⁰.—P. 123—124.
20. B o r g i e s B., von, R u s k a E.//Wiss. Veroff. Siemens-Werken. 1938. Bd 17. S. 99.—Получено 29 февраля 1938 г.
21. B o r g i e s B., von, R u s k a E.//Naturwissenschaften. 1939. Bd 27. S. 577.— Получено 24 июня 1939 г.
22. R u s k a E.//Kolloid. Zs. 1950. Bd 116. S. 103.— Получено 15 декабря 1949 г.
23. R u s k a E., W o l l f O.//Zs. wiss. Microskop. und mikroskop. Techn. 1956. Bd 62, S. 466.— Получено 19 июля 1955 г.
24. R i e c k e W. D., R u s k a E.//VI Intern. Congress for Electron Microscopy.— Kyoto, Japan, 1966.— V. 1. P. 19.
25. Z e m l i n F., R e u b e r E., B e e k m a n n B., Z e i t l e r E., D o r s e t D. L.// Science. 1985. V. 229. P. 461.
26. D i e t r i c h I., F o x F., K n a p e k E., L e f r a n c G., N a c h t r i e b K., W e y l R., Z e r b s t H.//Ultramicroscopy. 1971. V. 2. P. 241.
27. H e n d e r s o n R., U n w i n P. N. T.//Nature. 1975. V. 257. P. 28.
28. D r i e s t E., M ü l l e r H. O.//Zs. wiss. Mikroskop. und mikroskop. Techn. 1935. Bd 52. S. 53.
29. K r a u s e F., B u s c h H., B r ü c h e E.//Beiträge zur Elektronenoptik.— Leipzig: J. A. Barth, 1937.— S. 55.
30. K r a u s e F.//Naturwissenschaften. 1937. Bd 25. S. 817.
31. B e i s c h e r D., K r a u s e F.//Ibidem. S. 825.
32. R u s k a H.//Ibidem. 1941. Bd 29. S. 367; Arch. gesamte Virusforsch. 1942. S. 345,