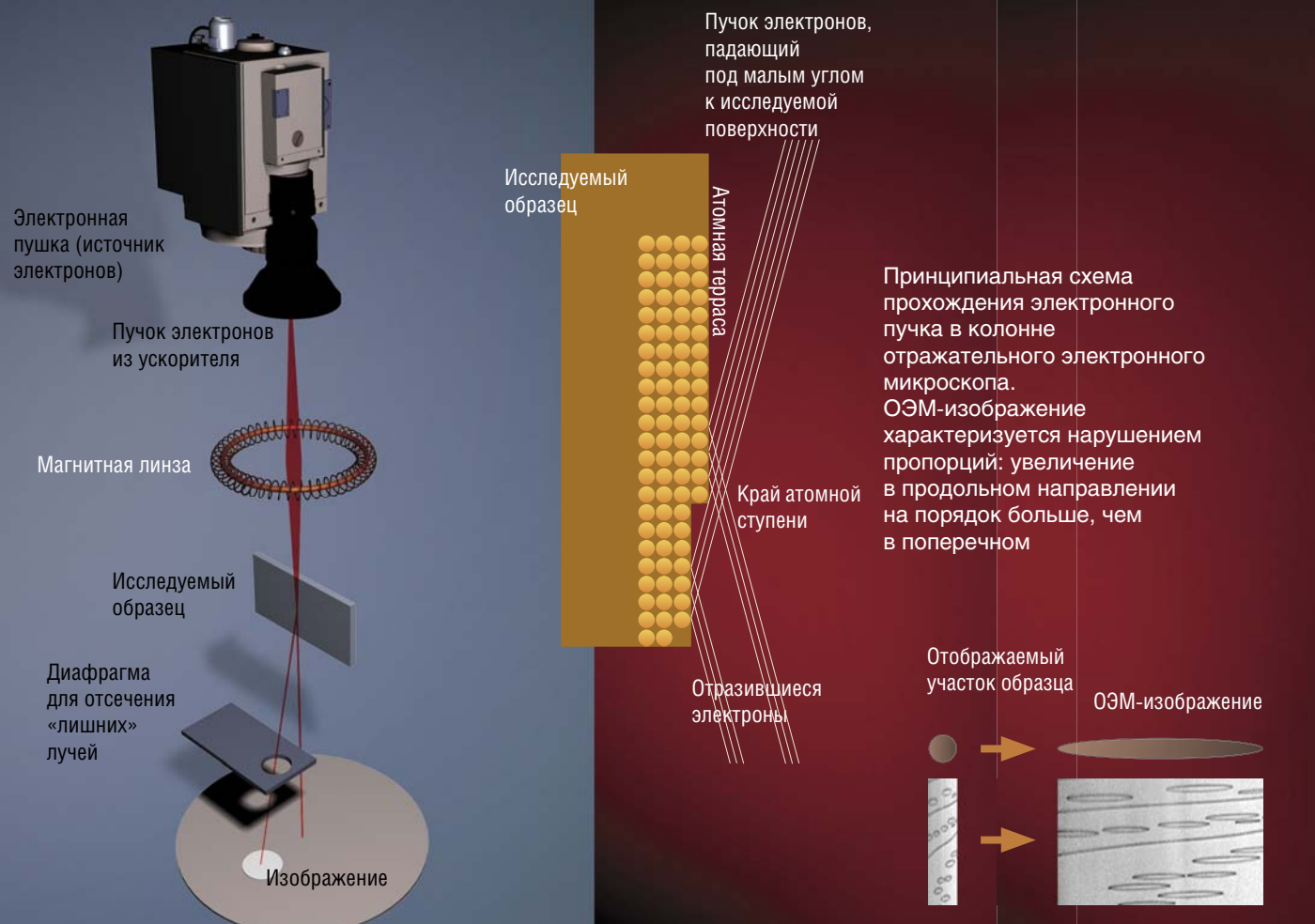
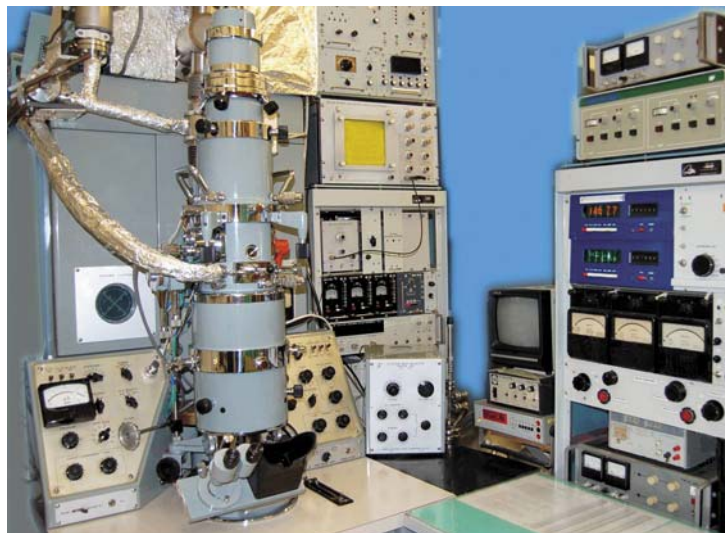


Как начиналась ОЭМ

Успехи в развитии методов исследования структуры и морфологии поверхности твердых тел с помощью электронов, ускоренных электрическим полем, несомненно, связаны с именем выдающегося немецкого физика Эрнста Руски. В 1931 г., почти одновременно с Р. Руденбергом, подавшим патентную заявку на просвечивающий электронный микроскоп, Э. Руска и его научный руководитель М. Кнолль опубликовали статью, где предложили использовать электронные лучи вместо света для создания электронного микроскопа. А через 55 лет Руска

Сверхвысоковакуумный отражательный электронный микроскоп (справа), разработанный в ИФП СО РАН (Новосибирск) на базе просвечивающего электронного микроскопа JEM-7A



Одна из ранних фотографий молодого Э. Руски. 1932 г. Первая публикация. Credits: Ernst Ruska Archive, Berlin (Germany)

Два пионеры электронной микроскопии – Э. Руска (справа) и его друг Б. фон Борриес (слева) накануне ее открытия (8 декабря 1933 г. Руска добился увеличения в 12 тыс. раз). О. Рюген (Балтийское море), 1932 г. Credits: Ernst Ruska Archive, Berlin (Germany)

вместе Г. Биннигом и Г. Рорером – изобретателями сканирующего туннельного микроскопа, также чрезвычайно важного для изучения поверхности, получил Нобелевскую премию по физике.

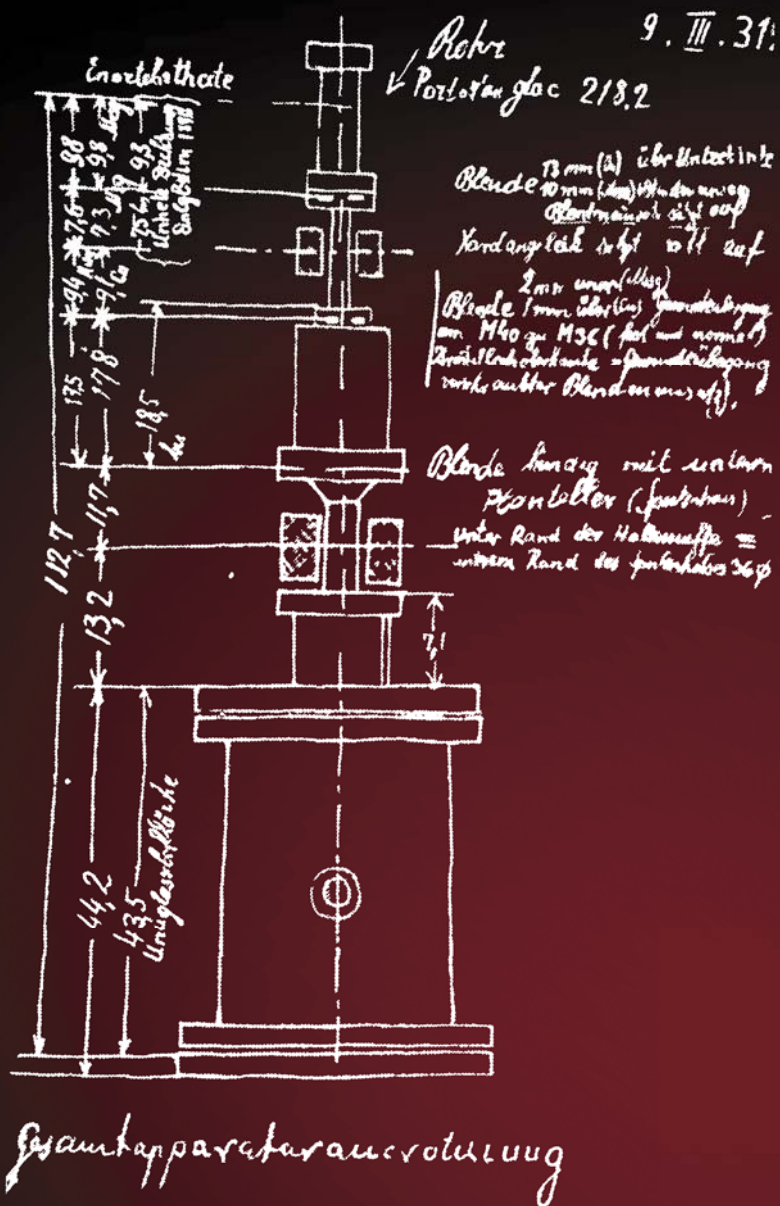
Научная деятельность молодого инженера Руски началась в 1929 г. в группе, руководимой Кноллем, и была связана с разработкой устройства фокусировки электронов на основе короткой электромагнитной катушки, базируясь на уже существовавшей тогда теории «магнитной электронной линзы». Примечательно, что целью этих исследований была разработка катодно-лучевой трубки осциллографа, предназначенного для измерений быстропротекающих электрических процессов в электронике. Однако во время работы обнаружилось, что с помощью этой катушки можно получать увеличенное изображение апертур анода с различным увеличением, зависящим от величины тока, протекающего в катушке. Так были получены первые электронно-микроскопические изображения.

Уже в марте 1931 г. был сконструирован первый просвечивающий электронный микроскоп (ПЭМ) с двухкаскадной системой электромагнитных линз, который обладал весьма скромным увеличением в 16 раз. Следует отметить, что создавая этот первый микроскоп, Руска и Кнолль еще не были знакомы с работами Л. де Бройля, который в 1925 г. выдвинул идею волновой

природы электрона. Простые оценки, проведенные Руской после знакомства с данной работой, показали, что пространственное разрешение электронного микроскопа должно быть, как минимум на 5 порядков выше, чем у светового оптического микроскопа, который в то время уже широко применялся для исследований в физике, биологии, медицине и других научных областях.

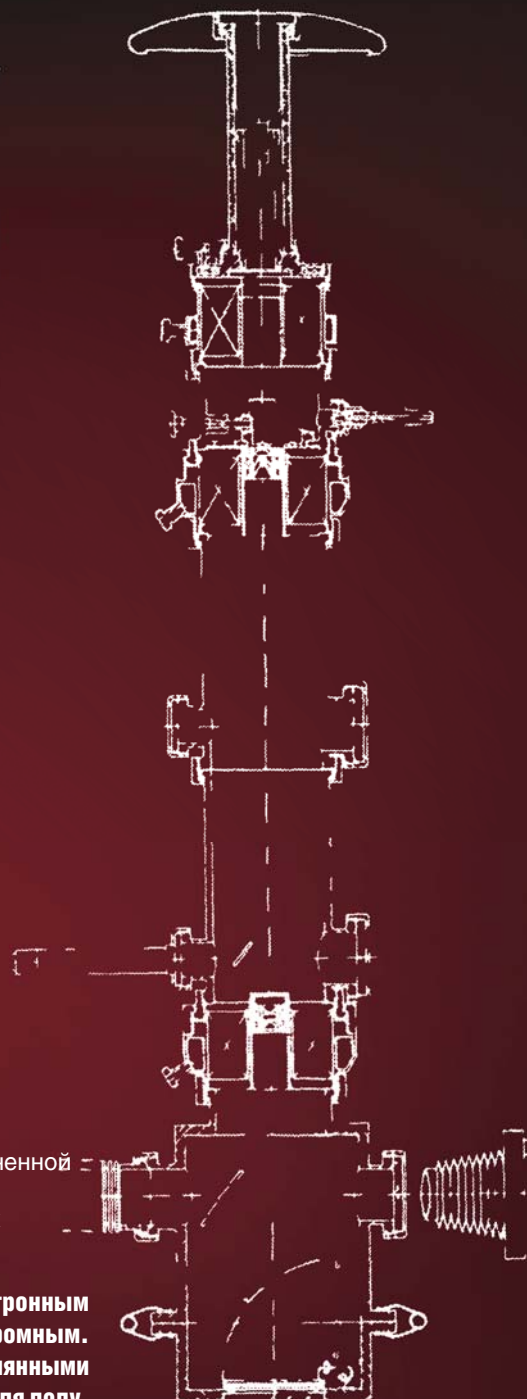
Почти одновременно с ПЭМ был разработан и метод отражательной электронной микроскопии (ОЭМ). Руска впервые, еще в 1933 г. показал, что электроны, отраженные от поверхности образца, могут быть использованы для формирования изображения поверхности.

Первоначально для получения изображения в электронном микроскопе использовались пучки диффузионно-рассеянных электронов, которые формировали теневой контраст от особенностей морфологии поверхности. Однако особого развития идея ОЭМ в то время не получила из-за плохого разрешения метода, не позволявшего детально рассмотреть элементы морфологии. Лишь много позже, после работ Дж. М. Каули (1976), где был проанализирован брэгговский контраст



Авторский эскиз Э. Руски электронно-лучевой трубки, предназначенной для изучения однокаскадного и двухкаскадного формирования электронно-оптического изображения с помощью двух магнитных электронных линз. 9 марта 1931 г.

Э. Руска (1988): «Эта установка сегодня считается первым электронным микроскопом, хотя ее общее увеличение 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 даже сетки из платины и молибдена превращались в пепел при интенсивности облучения, необходимой для увеличения в 16 раз. На следующем шаге я должен был показать, что есть возможность получить увеличение настолько большое, чтобы достичь разрешения более высокого, чем у светового микроскопа»



Авторский эскиз первого двухкаскадного электронного микроскопа (поперечное сечение колонны микроскопа было перерисовано в 1976 г.)

Э. Руска (1988): «С помощью этого прибора [первого ЭМ] который дал увеличение 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».

По: (Э.Руска, Нобелевская лекция, 1988 г. С. 249)
http://ufn.ru/ufn88/ufn88_2/Russian/r882c.pdf



отраженных электронов, интерес к ОЭМ существенно усилился, поскольку использование брэгговских пучков позволяло существенно увеличить разрешение прибора. Развитие технологий сверхвысокого вакуума еще больше способствовало успешному применению метода отражательной электронной микроскопии для анализа атомно-чистых поверхностей некоторых металлов.

Современный сверхвысоковакуумный отражательный электронный микроскоп (СВЭОЭМ) с оригинальной конструкцией дифференциальной криогенной откачки, разработанной в Институте физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН (Новосибирск), обеспечивает остаточное давление вокруг исследуемого образца порядка 10^{-8} Па, что позволяет проводить анализ структурных и морфологических трансформаций атомно-чистых поверхностей кристаллов.

Основное отличие метода ОЭМ от ПЭМ в том, что в этом случае пучок высокоэнергетичных электронов падает на исследуемый образец под малым углом, порядка брэгговского ($\sim 5^\circ$). В результате скользящего падения пучка электронов ОЭМ-изображение имеет различный масштаб увеличений вдоль и перпендикулярно направлению падения электронов. Эти масштабы могут отличаться друг от друга в несколько десятков раз в зависимости от дифракционных условий, формирующих изображение, в частности, от порядка выбранного дифракционного рефлекса. Это приводит к сильным линейным искажениям реальной формы наблюдаемых на поверхности объектов в плоскости ОЭМ-изображения. Однако для атомных ступеней, которые являются почти прямыми линиями, в случае их расположения вдоль направления хода электронного пучка, сокращение

М. Кнолль и Э. Руска со своим первым электронным микроскопом.

Берлин, 1944 г.

Credit: Ernst Ruska Archive, Berlin (Germany)

длины ступеней на ОЭМ-изображении не мешает их визуализации: ступени становятся слегка извилистыми, хотя в реальности их кривизна мала.

Электронно-микроскопический контраст в методе отражательной электронной микроскопии является суперпозицией дифракционного и фазового контрастов, обусловленных наличием полей деформации вблизи атомной ступени и сдвигом фаз электронных волн при их отражении от прилегающих к ступени террас, лежащих в соседних плоскостях.

В электронной микроскопии различают два режима получения изображения – светлопольный и темнопольный. В светлопольном изображении брэгговские пучки отсекаются диафрагмой, и интенсивность изображения элемента кристалла определяется яркостью пучка, прошедшего через образец. В темнопольном изображении, контраст определяется интенсивностью дифрагированного луча, прошедшего через диафрагму.

В методе ОЭМ используется темнопольный режим получения изображения, но идеальный случай, когда диафрагма отсекает только прошедший пучок, не реализован.

к. ф.-м. н. С. С. Косолобов
(Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск)