

ЭЛЕКТРОННЫЙ МИКРОСКОП

Н. Н. Малов, Москва

І. Введение

Быстрое развитие радиотехники, применение сверхмощных установок в технике сильных токов, а также целый ряд исследовательских задач из различных областей физики настоятельно требовали создания аппарата, способного регистрировать очень кратковременные (миллионные доли секунды и меньше) электромагнитные процессы. Никакая механическая конструкция в силу своей инерции не способна удовлетворить подобному требованию, но решение этой задачи может быть осуществлено при помощи электронного пучка, получающегося в той или иной разрядной трубке, так как этот пучок, во-первых, не обладает практически никакой инерцией и, во-вторых, может быть управляем при помощи электрического или магнитного поля. В сравнительно короткое время трубка Брауна, впервые примененная для регистрации электромагнитных процессов еще в 1897 г., была значительно усовершенствована, и в настоящее время довольно широко распространились катодные осциллографы, прекрасно разработанные с конструктивной стороны¹ и позволяющие регистрировать процессы, имеющие длительность порядка 10^{-8} сек.

Электроны, вылетающие из катода осциллографа, имеют, вообще говоря, различно направленные скорости, взаимно отталкиваются друг от друга и рассеиваются, сталкиваясь с молекулами газа, находящегося в трубке. Вследствие этого сечение электронного пучка постепенно расширяется по мере удаления от катода, и при падении электронов на флуоресцирующий экран, служащий для визуального наблюдения, или фотопластинку, они дают на нем след, представляющий собою более или менее размытое пятно.

Вследствие этого, во-первых, записываемая кривая оказывается очень размытой, во-вторых, яркость пятна сильно ослабляется, что влечет за собой уменьшение возможной скорости записи, т. е. ухудшает качество осциллографа.

При многочисленных попытках сконцентрировать электронный пучок для получения яркого пятна возможно малой пло-

щади выяснилось, что, при наличии подходящих условий, существует чрезвычайно далеко идущая аналогия между распространением пучка световых лучей в какой-либо оптической системе и ходом электронного пучка в электрическом или магнитном полях, которые могут быть выбраны таким образом, что будут собирать или рассеивать электронный пучок аналогично тому, как линзы собирают или рассеивают световые лучи. Далее, оказалось возможным настолько разработать методику управления электронным пучком, что удалось получить „электронные“ изображения источника электронов или предмета, стоящего на пути электронов („освещаемого“ электронами), причем увеличение изображений можно делать чрезвычайно большим. Таким образом удалось, в конце концов, сконструировать „электронный микроскоп“, уже теперь дающий „электронотграммы“ (Elektronenabbildungen), не уступающие по качеству обычным микрофотографиям, и имеющий, как мы увидим ниже, значительно большую разрешающую способность, чем обычный микроскоп.

Изменение направления светового луча в обычной оптической системе получается либо при отражении его, причем скорость распространения остается неизменной, либо при преломлении, когда скорость луча изменяется. „Электронное отражение“ может быть получено при помощи отрицательно заряженной пластины или надлежащим образом выбранного магнитного поля, причем в первом случае величина скорости электронов непрерывно изменяется. Преломление электронного луча получается при прохождении его через соответствующий конденсатор, либо через магнитное поле. Первый случай соответствует оптическому преломлению в среде с непрерывно меняющимся показателем преломления, второй, где скорость электронов не изменяет своей величины, не имеет аналогии в обычной оптике. Таким образом в электронной оптике резкой границы между отражением и преломлением провести нельзя. Впрочем, и в обычной оптике иногда это различие исчезает: например, отражение электромагнитного луча от слоя Хивисайда, в сущности говоря, является результатом многократного преломления его.

Аналогия между геометрической и электронной оптикой может быть продолжена и дальше. Параболическое зеркало соответствует венельтовскому цилиндру Брауновской трубки, с успехом применяемому для создания параллельного пучка электронов. Явлению полного внутреннего отражения световых лучей, обуславливающему, в частности, распространение луча вдоль узкой стеклянной трубки, может быть противопоставлено явление ван-дер-Билия (наблюдающееся при определенных соотношениях между давлением газа и скоростью электронов в разрядных трубках и заключающееся в самопроизвольной концентрации электронного пучка благодаря действию положительных ионов

газа, концентрирующихся по оси пучка, и образованию вокруг пучка оболочки из отрицательных зарядов), а также, повидимому, способность электронного пучка распространяться вдоль узкой металлической трубки, обнаруженная недавними опытами Брюхе². На рис. 1 и 2 изображены электронные пучки, создаваемые в левом стеклянном шаре и проникающие в правый

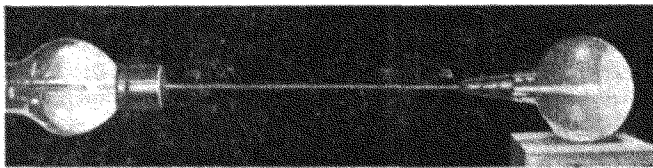


Рис. 1. Прохождение электронного пучка через прямую медную трубку ($l = 80$ см, $d = 2,5$ мм).

шар, стенки которого покрыты флуоресцирующим слоем, через медную трубку длиной 80 см, имеющую внутренний диаметр 2,5 мм. Шары наполнены водородом при давлении 10^{-2} — 10^{-1} мм ртут. Интересно отметить, что явление отражения электронов от заряженных слоев, созданных объемным зарядом внутри трубки, настолько резко выражено, что внешнее магнитное поле порядка нескольких гаусс не влияет заметным образом на прохождение электронов вдоль трубки.

Если принять во внимание, что можно легко изменять „преломляющую способность электромагнитных линий“, изменяя знак и величину электрического и магнитного поля, воздействующего на электронный пучок, и что скорость электронов, влияющая на показатель преломления, также удобно регулируема, то становится ясным, что применение „электронной оптики“ открывает перед научным исследованием чрезвычайно широкие перспективы, все значение которых едва ли может быть в настоящее время оценено с достаточной полнотой. Например, Брюхе³ допускает возможность создания „электронного телескопа“, который будет собирать пучок электронов, летящих с поверхности солнца (конечно, для этого придется подняться с телескопом за пределы слоя Хивисайда) и даст возможность изучить детали строения солнечных пятен.

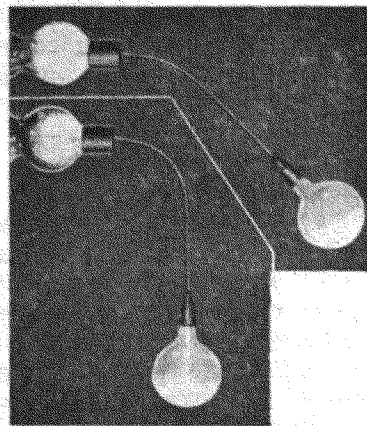


Рис. 2. Прохождение электронного пучка через изогнутую медную трубку.

2. ПОЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОНО-ОПТИЧЕСКОГО ПУЧКА

При попытках получить неискаженное изображение источника электронов или освещаемого электронами предмета с помощью электронных линз необходимо принять во внимание ряд возможных помех, отсутствующих в обычной оптике световых лучей.

Прежде всего необходимо принять меры к устранению влияния на электронный пучок посторонних электрических и магнитных полей, аналогичные тем мерам, которые принимаются при работе с обычным катодным осциллографом (устранение магнитного поля земли и питающих проводов, предохранение от образования на стенках трубки и фотопластинке или флуоресцирующем экране статических зарядов и т. д.). Далее, ускоряющее электроны поле, расположенное между катодом и анодом должно быть, по возможности, однородным и обладающим симметрией относительно оси трубки⁴. Поверхность излучающего катода целесообразно делать в виде плоскости, размеры которой несколько превышают размеры снимаемого электронным микроскопом объекта. Анод может быть осуществлен в виде трубки, охватывающей катод и снабженной диафрагмой. При этом поле вблизи катода оказывается почти однородным, но постепенно ослабевает по мере удаления от катода, благодаря чему силовые линии несколько искривляются, создавая незначительное рассеяние электронного пучка; это рассеяние происходит до попадания пучка в „линзу“ и, как показал Буш⁵, не искажает получаемого изображения, а лишь несколько изменяет масштаб изображения.

Следующей причиной, могущей вызвать искажения получаемого изображения, является постепенное расширение электронного пучка под действием сил электростатического отталкивания электронов, превышающих (поскольку скорость электронов меньше скорости света) силы взаимного притяжения линий тока, созданного электронами. Расчет показывает⁶, что даже при относительно низких ускоряющих электронах напряжениях рассеяние пучка не играет сколько-нибудь заметной роли, если плотность тока не слишком велика; опыты Кнолля и Русски⁷ показали, что при плотностях тока, потребных для получения достаточно ярких изображений, расширения пучка не наблюдается.

Наконец, последней возможной причиной искажений является частичное рассеяние электронного пучка при столкновениях электронов с молекулами газа, имеющимися в разрядной трубке. Подобные искажения будут проявляться только при относительно многочисленных соударениях электронов с молекулами газа. При уменьшении давления газа и увеличении скорости электронов длина пути свободного пробега электрона легко может быть сделана соизмеримой с длиной трубки, благодаря чему

рассеяние пучка делается незаметным* (при длине трубки около 1 м и ускоряющей разности потенциалов $V=100$ В давление в трубке, в случае воздуха, не должно превышать 5×10^{-4} мм ртутного столба, при $V=100$ В давление может быть увеличено до 5×10^{-1} мм).

ТАБЛИЦА 1
Обзор электроно-оптических систем

Способ получения изображения	Под электронооптической системы	Положение изображения	Увеличение
Без электрического или магнитного поля	Диафрагма с малым отверстием	обратное	произвольное
Магнитное поле	Длинная катушка	прямое	1
Электрическое поле	Длинный столб (собственная ионизация)	прямое	1
	Короткий столб (собственная ионизация)	обратное	произвольное
	Короткий столб (ионизация посторонним источником)		
	Сферические электроды с сеткой	обратное	произвольное
	Плоские электроды с отверстием		
	Комбинация обеих предыдущих систем		
Магнитное поле	Короткая катушка	обратное	произвольное
Комбинированный	Комбинация нескольких систем	произвольное	произвольное

При соблюдении всех вышеуказанных условий никакого искажения прямолинейных путей электронов не возникнет, и электронный пучок, созданный в какой-либо точке трубки, будет распространяться вдоль трубки аналогично пучку световых лучей.

Перейдем теперь к рассмотрению электромагнитных систем, применяемых для получения изображений при помощи подобного электроно-оптического пучка.

3. ОБЗОР ЭЛЕКТРОНО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В табл. 1 сопоставлены различные методы получения электронограмм при помощи электромагнитных „оптических“ систем. На рис. 3 дано схематическое изображение этих же систем. Займемся изучением их свойств.

Простейшим методом получения электронограмм является метод диафрагмы с отверстием, размеры которого должны быть значительно меньше размеров изучаемого объекта (рис 3, а).

В этом случае, собственно говоря, электромагнитная оптическая система отсутствует. Увеличение полученного изображения

$$M = \frac{b}{a}, \quad (1)$$

где b и a — расстояния изображения и предмета от диафрагмы.

Если размеры отверстия диафрагмы слишком велики относительно размеров источника электронов, то на экране уже не получится изображения источника, но спроекти-

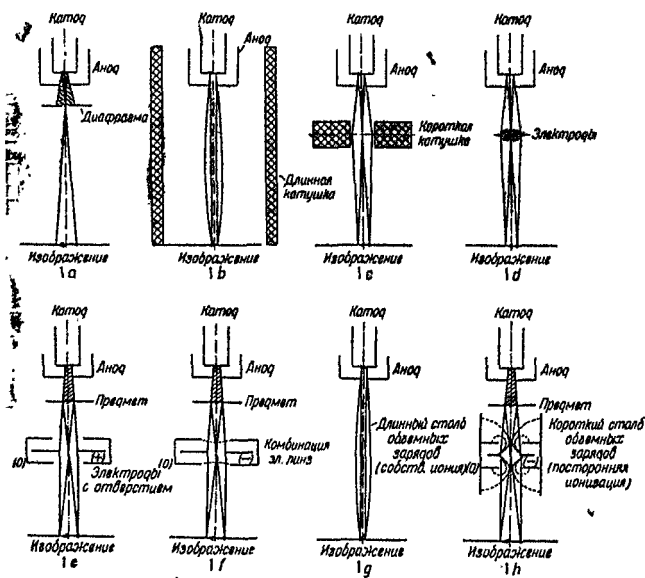


Рис. 3. Различные способы получения электронограмм.

руется отверстие диафрагмы. Получаемые этим методом снимки оказываются не вполне удовлетворительными, так как края изображений выходят не особенно резкими (см. рис. 6, а).

Другим давно известным простым способом получения изображений является концентрирование электронного пучка коаксиальным однородным магнитным полем, созданным катушкой, охватывающей разрядную трубку по всей длине пути электронного пучка⁹ (рис. 3, б). Так как увеличение изображения в этом случае равно единице, то этот метод не представляет большого интереса.

Изображенный на рис. 3, г метод самостоятельного концентрирования электронного пучка при помощи столба пространственного заряда, образующегося при подходящем давлении вдоль всей длины электронного пучка¹⁰ (эффект ван-дер-Билия), также не дает возможности получить увеличенное изображение; этот и предыдущий методы пригодны для изучения структуры

амиттирующей поверхности, проектирующей на экране в натуральную величину, так как отклонение каждого электронного луча в поле пространственного заряда (или в магнитном поле) оказывается пропорциональным удалению этого луча от оси пучка.

Если создать столб пространственного заряда не по всей длине пути луча, а лишь на небольшом его отрезке, то, благодаря изменению направления отдельных электронных лучей лишь на этом небольшом участке пути, можно получить на экране увеличенное изображение излучающего или освещаемого электронами предмета, так как такой ограниченный пространственный заряд будет действовать как линза, фокусное расстояние которой можно изменять, варьируя скорость электронов и величину поля пространственного заряда. Получение короткого столба пространственного заряда возможно двумя методами ¹¹: в первом трубка перегораживается тремя электродами, имеющими отверстия, расположенные на оси трубки; среднему электроду сообщается вспомогательный отрицательный потенциал, а наружные заземляются или соединяются с анодом.

При подходящем разряджении между электродами наступает разряд, причем распределение его имеет вид, изображенный на рис. 3, б. В зависимости от величины вспомогательного потенциала преломление пучка электронов, летящего от катода, будет более или менее сильно, и на экране получится изображение какого-либо сечения электронного пучка. Во втором методе в разрядную трубку помещают две диафрагмы с отверстиями. Эти диафрагмы выделяют в трубке небольшой объем, в который при помощи специального вентиля выпускают воздух. По бокам полученной камеры в стенках разрядной трубки делаются два отверстия, соединенные с мощным разряжающим насосом. Таким образом удастся поддерживать во всем объеме трубки (кроме камеры) достаточно высокое разряджение, препятствующее образованию пространственного заряда, внутри же камеры давление увеличивается ¹² (благодаря дросселирующему действию отверстий диафрагм) и возникает пространственный заряд, вызывающий преломление электронных лучей.

Оба эти метода позволяют получить произвольное увеличение объекта. Экспериментальное исследование такой электронной линзы показало, что изображение получается искаженным; это, повидимому, объясняется трудностью получения необходимого распределения вспомогательного разряда и влиянием медленных электронов этого разряда на проходящий электронный пучок. Впрочем эксперименты такого рода пока еще очень немногочисленны, так что в настоящее время трудно сделать окончательное заключение о пригодности этого метода.

Значительно лучшие результаты получаются при управлении электронным пучком при помощи электростатического поля. Основные методы изменения направления лучей электронного

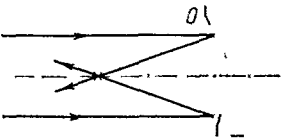
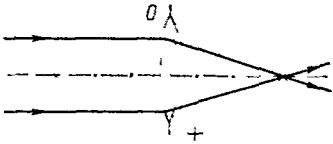
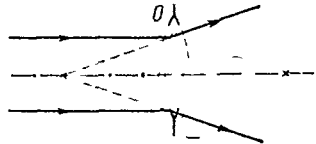
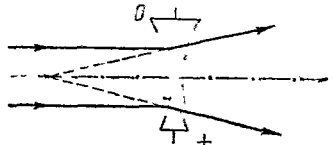
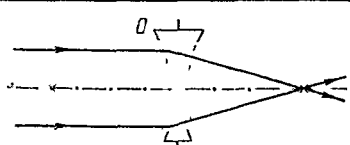
		Тип двойного электрического слоя		
		а) Плоскость		Плоское зеркало
		Эллипсоид б) Параболоид Шар		Вогнутое зеркало
Призма, преломляющая к основанию		в) Призма		Призма, преломляющая к вершине
Собирающая линза		г) Выпуклая линза		Рассеивающая линза
Рассеивающая линза		д) Вогнутая линза		Собирающая линза

Рис. 4. Электростатические системы электронной оптики.

пучка при помощи электрического поля изображены на рис. 4. Действие их понятно без дальнейших пояснений. Необходимо отметить возможность изменения преломляющей способности электронооптических систем путем регулировки напряжения между обкладками конденсаторов; при изменении же направления электрического поля собирающая система делается рассеивающей и наоборот.

При прохождении электронного пучка, имеющего скорость V вольт через бесконечно-тонкий двойной электрический слой, обладающий разностью потенциалов V_0 вольт показатель преломления слоя

$$n = \sqrt{1 + \frac{V_0}{V}} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}, \quad (2)$$

где α и β — углы падения и преломления¹³.

Так как V_0 может принимать всевозможные значения (от $-\infty$ до $+\infty$), то возможны следующие электронооптические явления (табл. 2), схематически изображенные на рис. 5.

При практическом осуществлении электростатических электронных линз в электродах приходится делать отверстия для пропускания электронного пучка (рис. 3, d). В целях уменьшения искажений поля отверстия затягиваются мелкоячеистой сеткой. При этом частичное оседание электронов на сетке и не вполне равномерное распределение поля около проволок сетки несколько искажает изображение.

Если электронную линзу выполнить в виде сферического конденсатора, в обкладках которого сделаны небольшие отверстия, затянутые сеткой, то, как показывает расчет⁴, фокусное расстояние такой линзы

$$f \approx r \frac{V}{V_0}, \quad (3)$$

где r — радиус линзы. Изображение объекта получается, конечно, обратное и может быть произвольно увеличено, а при изменении фокусного расстояния (изменением V_0) можно получать изображения различных сечений электронного пучка. Кнолль и Руска⁸ (рис. 3, d) поместили между анодом и линзой диафрагму с T-образным отверстием, размеры которого превышали размеры катода и, изменяя V_0 от нуля до некоторого значения, получили снимки, представленные на рис. 6. Снимок 6, a получен при

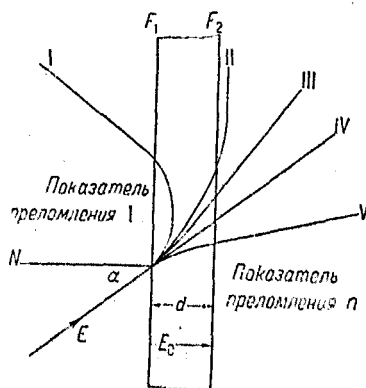


Рис. 5. Пути электронов в двойном электрическом слое.

$V_0 = 0$ и соответствует проекционному изображению диафрагмы. При увеличении V_0 начало сказываться действие линзы и получились изображения катода (снимок 6, б), а затем и диафрагмы (рис. 6, с), повернутые, как и следовало ожидать, на 180° (рис. 6 а, б и с см. вклейку). Благодаря указанным выше искажениям электронограммы получаются не особенно резкими.

Брюхе и Иоганнсон³ применяли в качестве линзы конденсатор, состоящий из стержневого электрода, расположенного по оси электронного пучка и двух полусферических электродов, помещенных по обе стороны центрального электрода и электрически соединенных между собой. Меняя V_0 , они получили снимки, изображенные на рис. 7, на которых ясно видно преломление и фокусирование электронного пучка. Существенным недостатком этой линзы являются выпадение центральной части изображения и невозможность избавиться от сферической аберрации линзы, так как не удастся вполне строго соблюсти условие изменения направления луча, пропорционального его отклонению от оси.

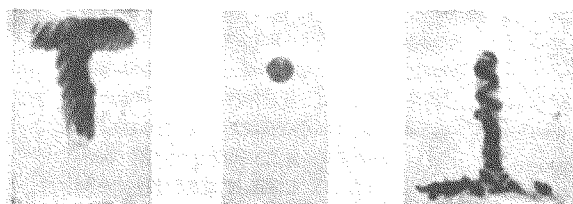
ТАБЛИЦА 2

Преломляющая способность двойного электрического слоя

№ пути на рис. 5		V_0/V	Показатель преломления n	Оптическое действие поля
I	$\uparrow$ $V_0 < 0$ $\downarrow$	$\infty > \left \frac{V_0}{V} \right > \cos^2 \alpha$	$n < \sin \alpha$ (или мнимо)	Полное внутреннее отражение
II		$\left \frac{V_0}{V} \right = \cos^2 \alpha$	$n = \sin \alpha$	Граница полного внутреннего отражения
III		$\cos^2 \alpha > \left \frac{V_0}{V} \right > 0$	$\sin \alpha < n < 1$	Преломленный луч удаляется от перпендикуляра, проведенного в точку падения луча
IV	$V_0 = 0$	$\frac{V_0}{V} = 0$	$n = 1$	Луч проходит без преломления
V	$V_0 > 0$	$0 < \frac{V_0}{V} < +\infty$	$1 < n < \infty$	Преломленный луч приближается к перпендикуляру

Для устранения искажений, вносимых сеткой, обеспечивающей сферическую форму эквипотенциальных поверхностей в шаровом конденсаторе, можно воспользоваться изображенной на рис. 3, е комбинацией плоских электродов, снабженных отверстиями для пропускания электронного пучка. Так как у поверхности электродов эквипотенциальные поверхности имеют

К ст. Н. Малова.



a

b

c

Рис. 6. Электронограммы катода и Т-диафрагмы, полученные при помощи сферической электростатической линзы.

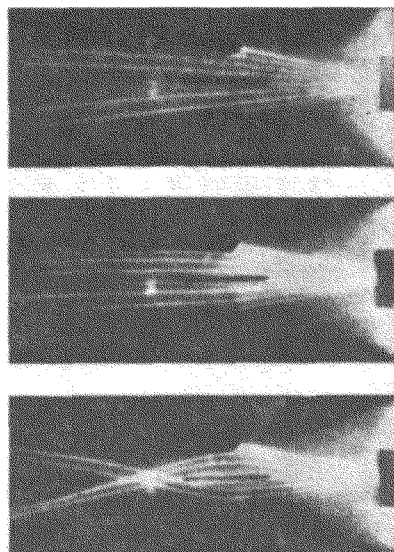


Рис. 7. Демонстрационная электростатическая линза Брюхе-Йогансона.

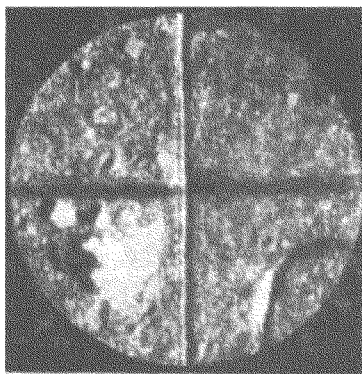
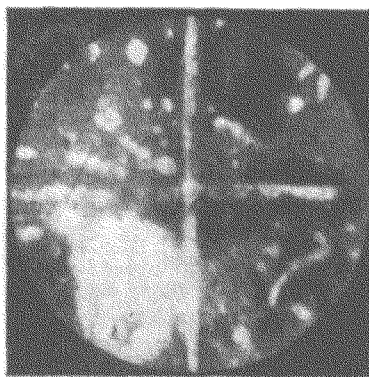


Рис. 9. Электронограмма (слева) и микрофотография (справа) поверхности оксидного катода (150-кратное увеличение).

почти сферическую форму ¹⁴ (рис. 8), то получается комбинация двух плосковыпуклых линз с фокусным расстоянием

$$f \approx 2r \frac{V}{V_0}, \quad (4)$$

где r — средний радиус эквипотенциальных поверхностей.

На рис. 9 приводится полученная таким образом электронограмма оксидного катода, полученная при относительно малом ускоряющем потенциале (650 В) Брюхе и Иоганнсоном ³. Для сравнения рядом изображена микрофотография того же объекта при одинаковом увеличении. Перекрещивающиеся прямые являются изображениями нацарапанной на поверхности катода сетки, служившей для определения увеличения.

Комбинируя оба вышеуказанных метода, мы получаем систему (рис. 3, *f*), в которой эквипотенциальные поверхности имеют более правильную сферическую форму благодаря чему устраняются искажения, появляемые при работе с системой 3, *e*; в то же время оседание электронов на сетках меньше, чем в системе 3, *d*, так что резкость изображения увеличивается. На рис. 3, *f* вместо двояковыпуклой линзы изображена двояковогнутая, но с противоположно направленным электрическим полем.

Электронограмма, изображенная на рис. 9, достаточно ясно доказывает, что при помощи электростатических электронных линз можно получать превосходные снимки.

Последний метод, который нам осталось рассмотреть, — магнитная линза, — дает столь же хорошие результаты. В то время, как магнитное поле, коаксиальное электронному лучу и распространяемое по всей его длине, способствует концентрации электронного пучка, применение магнитного поля, ограниченного в небольшом пространстве, должно вызвать преломление электронных лучей на небольшом участке их пути, и может быть, при надлежащих условиях, использовано в качестве собирающей линзы (рис. 3, *c*). Впервые на это указал Буш ¹⁵, показавший, что достаточно короткая катушка ведет себя по отношению к электронному пучку так же, как обычная линза по отношению к световому, причем фокусное расстояние такой магнитной линзы определяется соотношением:

$$f = \frac{ab}{a+b} = \left(\frac{2v}{e/m} \right)^2 \frac{1}{\int_{-\infty}^{+\infty} H^2(z) dz}, \quad (5)$$

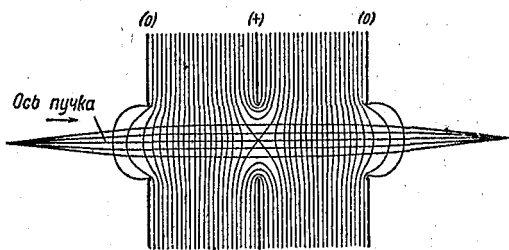


Рис. 8. Распределение электрического поля вблизи плоских электродов с отверстиями.

где v — скорость электронов, e/m — их удельный заряд, $H(z)$ — напряженность магнитного поля катушки в направлении ее оси; увеличение изображения определяется обычной оптической формулой:

$$M = \frac{L_{из}}{L_{пр}} = \frac{b}{a}, \quad (6)$$

где b и a — расстояния изображения и предмета от линзы.

Так как катушка имеет конечные размеры, то при желании получить очень большое увеличение может случиться, что расстояние a придется уменьшить настолько, что предмет окажется лежащим в области, где поле катушки имеет уже заметную величину. Тогда участок поля, лежащий за предметом, конечно, не будет принимать участия в преломлении электронных лучей, теоретическое соотношение (5) теряет силу, и расчет линзы для этого случая сильно усложняется.

Поэтому, в случае необходимости получить очень большое увеличение, нужно сконцентрировать поле катушки на возможно коротком отрезке; для этой цели катушка снабжается железным кожухом, вплотную примыкающим к стенкам разрядной трубки, благодаря чему поле сосредотачивается лишь в очень небольшом пространстве, лишенном железа. Теория Буша была подвергнута экспериментальной проверке Кноллем и Руска¹⁶, нашедшими вполне удовлетворительное совпадение теории с экспериментальными данными. Полученные снимки отличались большой резкостью и яркостью. Рис. 10 представляет электронограмму круглого отверстия диафрагмы, снятую при помощи магнитной линзы (13-кратное увеличение). Сравнение ее с соответственной электронограммой (рис. 6, б), полученной при помощи электростатической линзы со сферическими электродами, ясно показывает преимущества магнитной линзы. Изменяя ток в катушке и, следовательно, ее фокусное расстояние, Кнолль и Руска смогли получать изображения различных сечений электронного пучка и, в частности, различных диафрагм, поставленных друг за другом вдоль пучка, причем электронограммы получились весьма удовлетворительными.

Благодаря неодинаковой скорости отдельных электронов пучка возможны искажения изображения, аналогичные хроматической аберрации обычных оптических систем. Экспериментальным путем было установлено, что при достаточных ускоряющих потенциалах эти искажения не играют заметной роли. Колебания напряжения, питающего разрядную трубку, могут вызвать изменение резкости и интенсивности всего изображения в целом, так как оно несколько сместится из фокальной плоскости; это делается особенно заметным при больших плотностях тока, создаваемого электронным пучком. Постановка надежного фильтра в выпрямительной схеме, питающей разрядную трубку, позволяет избавиться от этих искажений.

Искажения, возникающие благодаря непропорциональному отклонению электронов, сравнительно далеко отстоящих от оси электронного пучка (сферическая аберрация), оказались лежащими за пределами точности наблюдений, так как сечение электронного пучка, вообще говоря, очень невелико, и электроны попадают в линзу очень близко к ее оси. По тем же причинам в электронограммах не наблюдается и других искажений, связанных с падением лучей на линзу под очень большими углами (астигматизм, кома и т. д.).

4. Электронный микроскоп

Поскольку возможность получения электронограмм при помощи тех или иных электромагнитных линз была экспериментально доказана, естественно возникла мысль объединить в одной разрядной трубке две или несколько оптических систем, которые позволили бы, не увеличивая чрезмерно длину трубки, получить сильно увеличенные изображения источника электронов или предмета, „освещаемого“ ими (электронный микроскоп).

Теоретически мыслимо объединение любых, рассмотренных выше, типов электронных линз. Практически до настоящего времени комбинированные электронные микроскопы, дающие большие увеличения (до 400-кратного), были сконструированы Кноллем и Руской⁴ и Кноллем, Гаутермансом и Шульце¹⁷, использовавшими комбинацию магнитных линз, выполненных в виде коротких катушек, снабженных железным кожухом.

Законченная конструкция электронного микроскопа Кнолля, Гаутерманса и Шульце изображена на рис. 11; на рис. 12 приводится схема этого электронного микроскопа.

В стеклянную разрядную трубку на шлифу вводился накаливаемый эквипотенциальный катод, сделанный из массивной никелевой пластины, покрытой (на поверхности, обращенной к линзам) слоем эмиттирующего электроны вещества. На противоположной стороне катода помещалась нить накала. Для по-

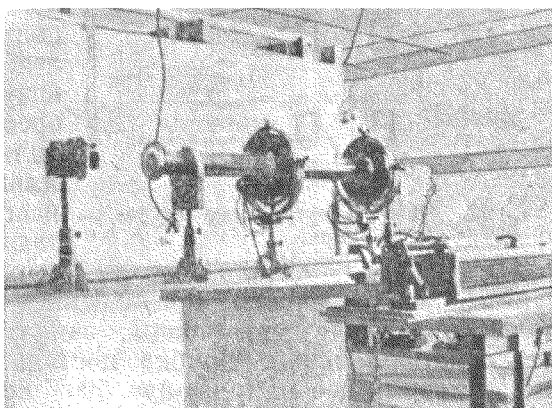


Рис. 11. Общий вид электронного микроскопа с магнитными линзами.

лучения по возможности параллельных эквипотенциальных поверхностей, катод снабжался охранным кольцом. Значительная толщина никелевой пластины уменьшала искажающее действие магнитного поля тока накала. Для определения получаемого увеличения на излучающей поверхности катода при помощи делительной машины была начерчена решетка. Анодная трубка охватывала катод и простиралась далеко по длине электронного пучка, предохраняя его от внешних электрических полей. Линзы были выполнены в виде катушек, расположенных снаружи трубки и подвешенных на карданных подвесах. При малых увеличениях работала только одна катушка (расположенная ближе к катоду). Для контроля за фокусировкой изображения, даваемого первой катушкой при больших увеличениях, вторая катушка снабжалась контрольной сеткой, служившей в то же время окулярным микрометром.

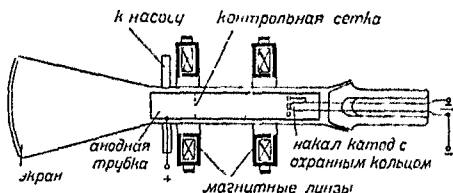


Рис. 12. Схема электронного микроскопа.

Влияние земного магнитного поля компенсировалось постоянным магнитом, расположенным вблизи трубки. При визуальных наблюдениях флуоресцирующий экран наносился прямо на стенку трубки, имевшую, как обычно, слегка изогнутую форму, обеспечивающую большую прочность трубки. При фотографиро-

вании электронограмм, производившемся фотоаппаратом, расположенным вне микроскопа, задняя стенка трубки делалась плоскопараллельной. Трубка постоянно находилась под откачкой. Ускоряющее напряжение было незначительно (до 2 kV), ток через трубку составлял (в зависимости от рода изучаемого объекта и увеличения) от 10^{-3} до 10^{-6} А, экспозиция составляла от 0,5 до 30 сек. Весь аппарат был смонтирован на оптической скамье, по которой при желании легко можно было перемещать магнитные линзы.

Так как незначительные механические сотрясения микроскопа вызывали при больших увеличениях и длительных экспозициях заметные искажения, пришлось принять специальные меры для их устранения.

Другой экземпляр электронного микроскопа, сконструированный Кноллем и Руской⁴, работал при высоких ускоряющих напряжениях (от 10 до 100 kV), причем в нем был использован не накаливаемый, а холодный катод и, кроме двух катушек — линз, установленных в первой конструкции и игравших роль объектива и окуляра, применялась еще третья катушка, расположенная между катодом и освещаемым объектом и концентрировавшая электронный пучок на объекте (аналогично конденсору обычного микроскопа). В этой конструкции трубка была

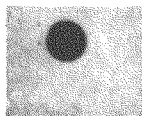


Рис. 10. Электронограмма круглого отверстия, снятая при помощи магнитной линзы (13-кратное увелич.).

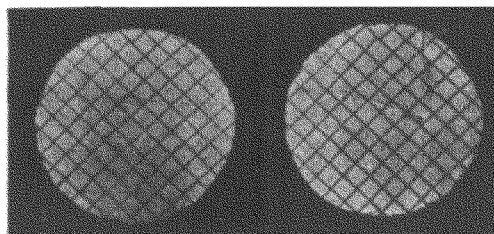


Рис. 13. Электронограмма (слева) и микрофотография (справа) сетки из молибденовой проволоки. Электронограмма снята при 70 kV ускоряющего напряжения, при помощи одной магнитной линзы (12-кратное увелич.).

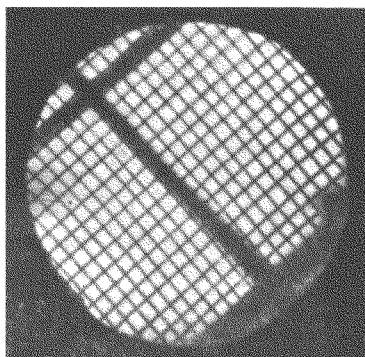
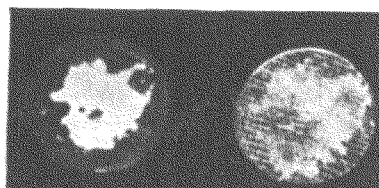


Рис. 14. Электронограмма сетки из молибденовой проволоки, снятая при 65 kV ускоряющего напряжения; (10-и и 150 кратное увеличение).



a

b

Рис. 16. Электронограмма (*a*) и микрофотография (*b*) катода, покрытого тонким оксидным слоем (13-кратное увеличение, 2000 V).

металлическая, а флуоресцирующий экран был сделан из тонкой стеклянной пластинки ($0,1 \text{ мм}$), покрытой металлическим слоем (толщиной около 100 мк), полученным при помощи катодного распыления.

Изменяя токи, текущие по катушкам, можно было варьировать фокусные расстояния магнитных линз и получать изображения различных сечений электронного пучка при самых разнообразных увеличениях (до 400-кратного).

На рис. 13 изображена электронограмма молибденовой проволочной сетки, помещенной вблизи конденсорной линзы, снятая вторым микроскопом при 70 кВ ускоряющего напряжения при помощи одной магнитной линзы (12-кратное увеличение). Для сравнения рядом помещена оптическая микрофотография того же объекта, которая оказывается гораздо менее контрастной.

На рис. 14 та же сетка снята электронным микроскопом дважды; один раз при 10-кратном увеличении (одна линза), другой раз (обе линзы)—при 150-кратном увеличении. Ускоряющее напряжение составляло в обоих случаях 65 кВ . Размытость краев проволоки при большом увеличении объясняется сотрясениями микроскопа, вызывавшимися работой откачивающего насоса.

На рис. 15 воспроизводятся электронограммы диафрагмы с T -образным отверстием, полученные (при неизменном расстоянии между диафрагмой и экраном) путем изменения фокусных расстояний двух магнитных линз. Увеличение меняется от однократного до 13-кратного. Сравнение этих электронограмм с электронограммами той же диафрагмы, снятыми электростатической линзой со сферическими электродами (рис. 6, с), ясно доказывает преимущества магнитных линз.

Подбирая фокусные расстояния магнитных линз таким образом, чтобы на экране получалось изображение эмиттирующего катода, можно исследовать процессы, происходящие на нем при различных условиях температуры и давления окружающего газа.

На рис. 16, а изображена электронограмма накаливаемого катода, покрытого тонким оксидным слоем, снятая при 2000 В ускоряющего напряжения. На ней ясно видно, что, несмотря на равномерное покрытие катода, не все части оксидного слоя излучают одинаково интенсивно. Изображенная на рис. 16 б обычная оптическая микрофотография того же катода (снятая в отраженном свете), позволяет видеть „темные“ (в отношении

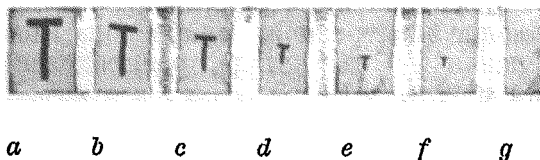


Рис. 15. Электронограммы T -образном диафрагмы, снятые при помощи двух магнитных линз при неизменном расстоянии между объектом и экраном. Увеличение от 1 до 13 раз.

излучаемых электронов) участки катода с нанесенной на них сеткой. Яркое, излучающее электроны, пятно электронограммы, на микрофотографии, конечно, значительно потеряло в яркости.

На рис. 17 приводится серия последовательных электронограмм тонкого оксидного слоя, излучавшего в вакууме в течение 8 час. (снимки производились первым микроскопом при 2000 V ускоряющего напряжения). На снимках ясно видны постепенные изменения интенсивности излучения в отдельных частях катода, образование островков излучения и их постепенное разрушение.

Та же картина еще более резко заметна при большом (100-кратном) увеличении (рис. 18). Особенно интересны яркие, сильно излучающие полосы, являющиеся трещинами, образовавшимися в толстом оксидном слое, работающем в условиях газового разряда.

Многочисленные снимки излучающего катода, сделанные при помощи электронного микроскопа, позволяют подробно изучить условия работы катода, распределение интенсивности излучения и т. д.

При увеличении тока накала катода, изображение, бывшее до того совершенно резким, оказывается частично завуалированным (рис. 19, а и б). Если слегка изменить установку электронного микроскопа, изменив ток в магнитной линзе, то снова появляется резкое изображение излучающего островка; таким образом доказывается, что вуалирование снимка создается облаком пространственного заряда, образующимся над интенсивно излучающей частью катода (рис. 19, с).

Не останавливаясь на дальнейших результатах изучения излучающего катода при помощи электронного микроскопа, так как они имеют в настоящее время лишь характер предварительных данных, рассмотрим вкратце возможности, которые электронный микроскоп открывает перед научными исследованиями.

Изучение структуры решеток, малых отверстий, определение размеров зерен и неравномерной плотности слоев веществ, полностью или частично пронизаемых для электронного пучка, можно производить в „проходящем электронном свете“, помещая исследуемое тело на пути пучка перед линзами.

Если поверхность тела способна отражать электроны, то изучение структуры поверхности может производиться в отраженном электронном свете, если однородный пучок, пущенный на поверхность тела, будет отбрасываться ею в электронооптическую систему.

Если поверхность тела излучает электроны, то возможно непосредственное изучение распределения эмиссии по поверхности тела. Этим способом можно изучать свойства холодных и накаливаемых катодов разрядных трубок, а также фотоэлементы.

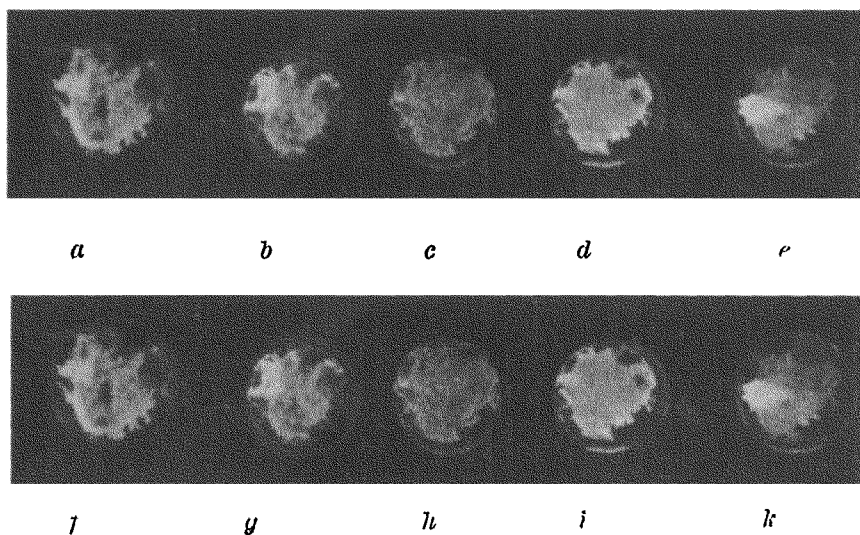


Рис. 17. Образование и изменение с течением времени излучающих островков на тонком оксидном слое, работающем в вакууме в течение 8 часов. Электронограммы сняты при 2000 V.

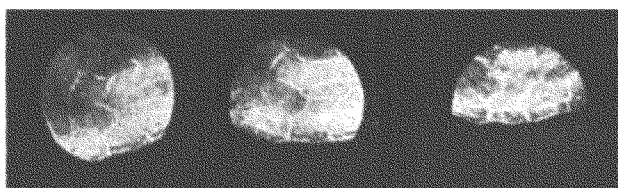


Рис. 18. Интенсивное излучение трещины в толстом оксидном слое (100 кратное увеличение, 2000 V).

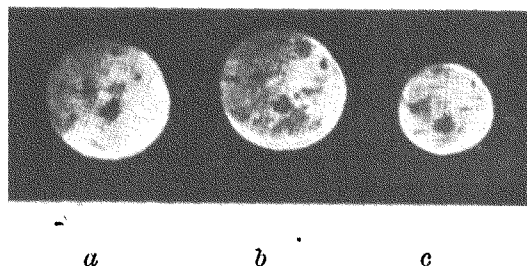


Рис. 19. Образование облака пространственного заряда у поверхности толстого оксидного слоя. *a*—пространственный заряд отсутствует; *b*—увеличение излучающего островка пространственным зарядом при увеличении накала катода, *c*—восстановление резкого изображения излучающего островка путем изменения фокусного расстояния электроно-оптической системы.

Изменяя в этом случае фокусное расстояние системы, можно получать изображения различных сечений электронного пучка, расположенных над излучающей поверхностью и изучать распределение в них пространственного заряда.

Наконец, комбинируя электронные линзы с обычными оптическими системами, можно надеяться получить весьма совершенный микроскоп, так как искажения, могущие возникнуть в электронограммах при слишком большом увеличении, могут быть в той или иной степени скомпенсированы обычной оптической системой, свойства которой в настоящее время нам известны более подробно, чем свойства электронных линз.

Вышеприведенная сводка не охватывает, конечно, всех возможных применений электронного микроскопа, свойства которого пока еще изучены далеко не полностью. Его несомненное преимущество перед оптическим микроскопом заключается в легкости, с которой можно менять фокусное расстояние электронных линз и увеличение получаемого изображения; кроме того, разрешающая сила электронного микроскопа значительно выше, чем обычного. Действительно, в обычной оптической системе разрешающая сила

$$d = \frac{\lambda}{A} \text{ см}, \quad (7)$$

где λ — длина волны, а A — апертура. Нормальный микроскоп обладает разрешающей силой около $0,2 \mu$; при определении разрешающей силы электронного микроскопа нужно рассматривать волну де-Бройля, связанную с движущимся электроном, длина которой

$$\lambda = \frac{h}{mv} = 1,22 \cdot 10^{-7} \frac{1}{\sqrt{V}} \text{ см},$$

где h — постоянная Планка, m и v — масса и скорость электрона, V — ускоряющее напряжение, выраженное в вольтах. При $V = 2000 \text{ В}$ получаем $\lambda = 2,7 \cdot 10^{-9} \text{ см}$. При повышении ускоряющего напряжения волна, связанная с электроном, будет еще меньше.

Так как для получения неискаженных электронограмм при помощи магнитных линз приходится работать с электронами, пути которых образуют с осью линзы малые углы, то апертура электронного микроскопа оказывается значительно меньше, чем оптического. Кноль и Руска находят для своего микроскопа апертуру $A_1 = 0,02$. При этих данных разрешающая сила электронного микроскопа получается равной

$$d_1 = \frac{2,7 \cdot 10^{-9}}{0,02} = 1,35 \cdot 10^{-7} \text{ см} = 13,5 \text{ \AA}$$

что превышает разрешающую силу оптического микроскопа примерно, в 150 раз.

Апертура электронного микроскопа, по мнению его конструкторов, может быть еще значительно увеличена, так что дальнейшее повышение разрешающей способности, подводящее нас вплотную к границам молекулярного мира, представляется вполне возможным.

В заключение укажем, что теоретически возможна также конструкция ионного микроскопа, в котором освещение объекта производится не электронами, а ионами. Так как, однако, масса иона значительно превосходит массу электрона, то магнитная линза для ионов при том же фокусном расстоянии и ускоряющем напряжении должна иметь значительно большее (примерно в 100—200 раз) число ампервитков, что сильно усложняет конструкцию подобного микроскопа.

Более благоприятны в этом отношении электрические линзы, фокусное расстояние которых не зависит от массы частицы, испытывающей преломление. Однако, до последнего времени в литературе не было никаких сведений о конструкции ионного микроскопа.

Проблема конструкции электронного микроскопа разрешена всего несколько месяцев назад. Имеющиеся конструкции, конечно, еще очень далеки от совершенного типа электронного микроскопа, который, быть может, в недалеком будущем позволит нам видеть и регистрировать целый ряд явлений, бывших до настоящего времени недоступными непосредственному наблюдению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. Альберти, Катодный осциллограф, перев. с немецкого Н. Ф. Головиной, Н. Н. Малова и С. Н. Ржевкина. М. 1933 (с указанием литературы до 1931 г.).
2. E. Brüche, „Z. Physik“ **78**, 177, 1932.
3. E. Brüche, „Naturwiss.“ **20**, 353, 1932.
4. M. Knoll u. E. Ruska, „Z. Physik“ **78**, 318, 1932.
5. H. Busch, „Arch. f. Elektrot.“ **18**, 588, 1927.
6. E. E. Watson, „Phil. Mag.“ **3**, 849, 1927.
7. M. Knoll u. E. Ruska, „Z. f. techn. Phys.“ **12**, 3-9, 1931.
8. M. Knoll u. E. Ruska, „Ann. d. Phys.“ **12**, 607, 64, 1932.
9. E. Wiechert, „Ann. d. Phys.“ **69**, 739, 1899; E. Riecke, „Ann. d. Phys.“ **13**, 191, 1881.
10. A. Wehnelt, „Ann. d. Phys.“ **14**, 463, 1904; B. Johnson, „Journ. Opt. Soc. Amer.“ **6**, 701, 1922; E. Brüche, „Z. Physik“ **64**, 186, 1930.
11. B. v. Borries u. E. Ruska, „Z. Physik“, **76**, 649, 1932.
12. W. Wien, „Ann. d. Phys.“ **76**, 117, 1925.
13. H. Bethe, „Naturwiss.“ **15**, 785, 1927.
14. F. Ollendorf, „Potenzialfelder d. Elektrotechnik“, S. 297, Berlin 1927, Verl. J. Springer.
15. H. Busch, „An. d. Phys.“ **81**, 974, 1926.
16. M. Knoll u. E. Ruska, „Z. f. techn. Phys.“ **12**, 448, 1932; см. также 7.
17. M. Knoll, F. G. Houtermans u. W. Schulze, „Z. Physik“ **78**, 340, 1932.