

ЭЛЕКТРОННАЯ ОПТИКА

II. ОБЗОР ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ОПТИКИ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЙ¹

Е. Брюхе, Берлин

Содержание: 1) Электронные линзы, 2) Электроннооптические приборы, 3) Электроннооптические исследования эмиссии, 4) Развитие практической электронной оптики.

После того как 9 лет назад Бушем были сформулированы основы теории электронной линзы, электронная оптика развилась в большую самостоятельную область теоретической и технической физики. Это станет совершенно ясным после того, как мы проследим путь ее развития и практические результаты, важнейшие из которых будут нами разобраны.

1. ЭЛЕКТРОННЫЕ ЛИНЗЫ

Основным элементом электронной оптики является тонкое кольцо. Такое кольцо, заряженное положительно или отрицательно относительно окружающего пространства, образует электрическую линзу (рис. 1а); кольцо, по которому течет ток, представляет собой типичную магнитную линзу. Заряженное кольцо действует на электронные лучи так же, как стеклянная линза на лучи световые. На

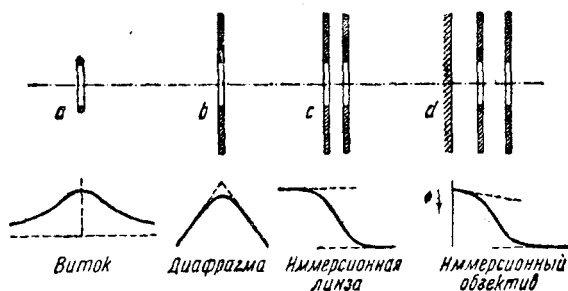


Рис. 1. Основные типы электрических электронных линз с распределением потенциала вдоль оси.

достаточном расстоянии от электрической линзы потенциал с обеих ее сторон имеет одинаковое значение, так же, как и показатель преломления в случае стеклянной линзы. От такого заряженного

кольца можно перейти ко второму важнейшему типу электронных линз — к диафрагме, — если представить себе это кольцо окруженным рядом других колец, лежащих в одной плоскости и имеющих одинаковый потенциал с первым кольцом (рис. 1, *b*). Если мы имеем дело с бесконечно большой заряженной плоскостью, то напряженность поля на большом расстоянии от линзы постоянна. В общем случае напряженность поля с обеих сторон линзы может быть как одинакова, так и различна, причем с одной из сторон она может обращаться в нуль. Диафрагма может быть линзой рассеивающей или собирающей, в отличие от кольца, которое всегда является линзой собирающей. Две диафрагмы, расположенные коаксиально, образуют третий тип электронной линзы (рис. 1, *c*). Это — так называемая иммерсионная линза. Она соответствует в оптике одной преломляющей поверхности, потому что электроннооптический показатель преломления постоянен, но различен по величине по обеим сторонам линзы. Иммерсионная линза всегда является собирающей; она может оказывать как ускоряющее, так и замедляющее действие. Большое значение в электронной оптике имеет „иммерсионный объектив“, под которым понимают иммерсионную линзу, помещенную вблизи заряженной пластины (рис. 1, *d*). Особенно важен иммерсионный объектив для получения изображений эмитирующих электроны поверхностей (исследование катодов). Конструкции электронных линз весьма разнообразны.

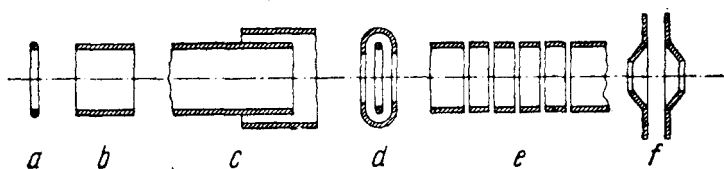


Рис. 2. Различные конструкции простых электронных линз

От кольца можно перейти не только к диафрагме, но и к цилиндрической трубке (рис. 2, *a* и *b*), причем здесь необходимо считать выполненным условие, что пространства с обеих сторон трубки различаются по значению потенциала. Дальнейшие конструктивные изменения шли по пути стягивания поля в наименьшем пространстве. Это достигается введением особых охватывающих кольцо электродов (рис. 2, *c*). Применение нескольких электродов в случае диафрагмы или цилиндра позволяет изменять оптическую силу линзы и, таким образом, управлять увеличением системы (рис. 2, *d*). Конструктивные изменения, как, например, введение воронок, подбор различно заряженных электродов, делаются в целях корректирования электрических линз*.

В магнитных линзах особое значение имеет переход от одного витка к продольным цилиндрическим катушкам, которые создают

* См. статьи О. Шерцера и В. Глезера.

Рис. 4. Электроннооптические изображения, получаемые в случае чисто электрической системы: а) при постоянном напряжении; б) при переменном напряжении

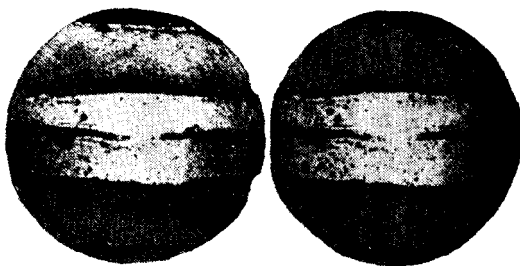


Рис. 8. Изображения золотой фольги, полученные методами светопольного и темнопольного освещения

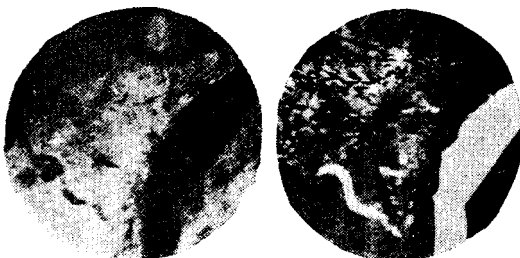


Рис. 10. Перекристаллизация железа



Рис. 11. Включения тория в кристаллах торированного вольфрама

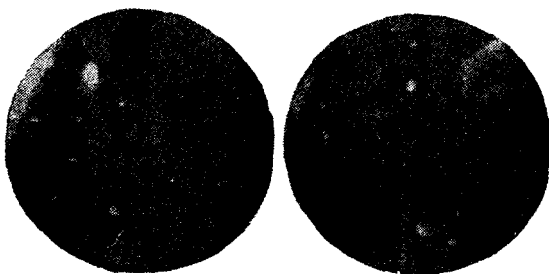


Рис. 4. Электроннооптические изображения, получаемые в случае чисто электрической системы: а) при постоянном напряжении; б) при переменном напряжении

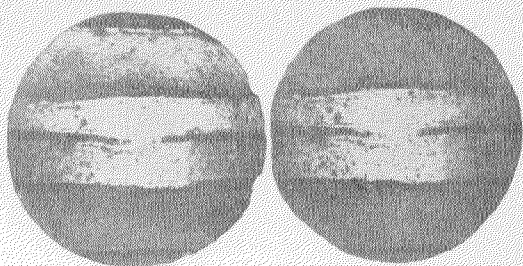


Рис. 8. Изображения золотой фольги, полученные методами светопольного и темнопольного освещения

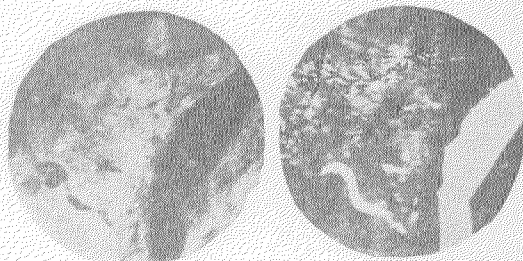
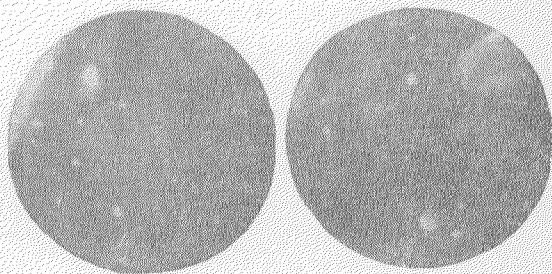


Рис. 10. Перекристаллизация железа



Рис. 11. Включения тория в кристаллах торированного вольфрама



однородное магнитное поле. (Конечно здесь можно также перейти к диафрагме, окружая проводящий контур другими. Таким образом можно притти к катушке в форме плоской спирали). Уменьшение рассеяния поля с помощью двух катушек, расположенных одна внутри другой, используется в магнитных линзах так же, как и в электрических (рис. 3, *c*), причем в данном случае имеется возможность изменения поля путем заключения катушек в железный кожух (рис. 3, *d*). Нежелательное в некоторых случаях вращение электронного изображения может быть устранено с помощью комбинации двух катушек, в которых текут токи противоположного направления² (рис. 3, *e*). Корригирование магнитных линз осуществляется с помощью катушек различной величины, несущих различные токи (рис. 3, *f*). При рассмотрении

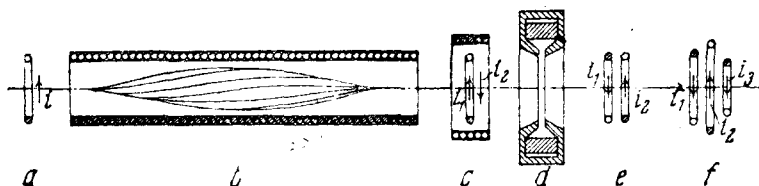


Рис. 3. Магнитные электронные линзы

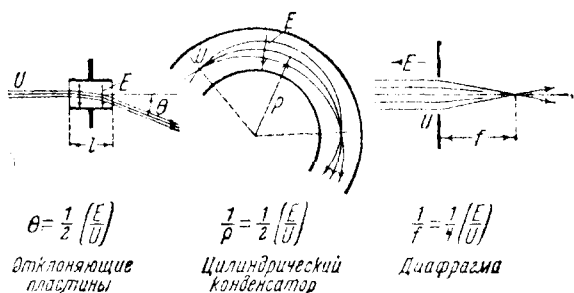


Рис. 3а. Пути электронов в различных линзах.

электроннооптических систем и электронных лучей нужно принять во внимание два момента. Во-первых, ускоряющее поле сильно изменяет направление излучения. Поэтому, с одной стороны, электрические линзы обладают большой глубиной фокуса, а, с другой стороны — поле зрения ограничивается диафрагмой, стоящей на пути луча. Во-вторых, здесь играет роль только величина отношения двух потенциалов, как это показывают следующие 3 примера (рис. 3, *a*). При увеличении всех напряжений (включая ускоряющее) в равном отношении пути лучей не меняются (рис. 4).

2. Электроннооптические приборы

Рассмотрим применение электроннооптического метода на трех примерах. В первую очередь характерный пример из физики

дифракции электронов³. Задача состоит в исследовании помощью дифракции электронов кристаллической структуры фольги. Очень трудно получить необходимый для этого электронный луч диаметром

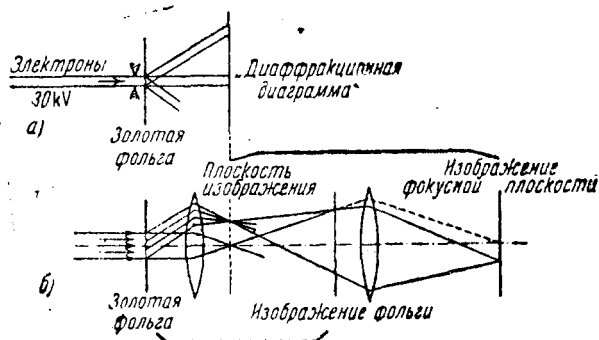


Рис. 5. Исследования кристаллической структуры золотой фольги: а) обычное устройство; б) устройство, содержащее линзу

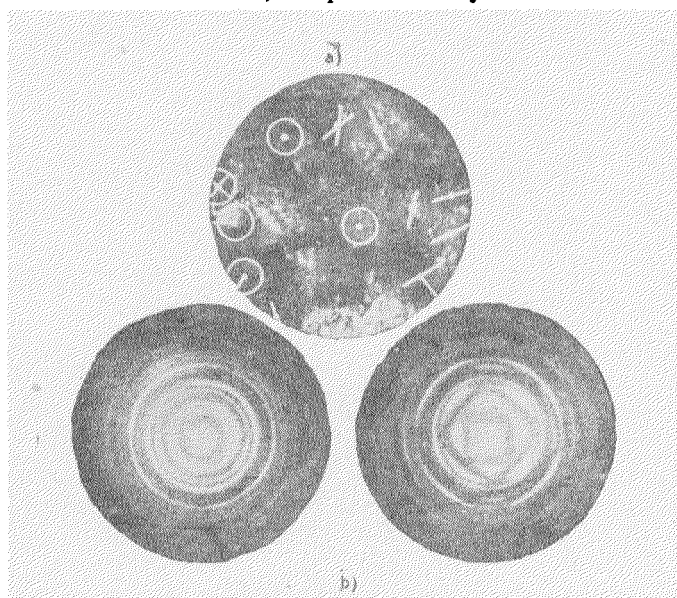


Рис. 6. Дифракционные изображения различных участков золотой фольги: а) увеличенное изображение фольги; б) дифракционные картины отмеченных участков диаметром в 0,08 мм

в 0,1 мм, а также установить место падения этого луча на фольгу. Задача решается следующим образом: сначала получают увеличенное в 10 раз изображение фольги. Из плоскости этого изображения выделяют диафрагмой с отверстием диаметром в 1 мм,

которая одновременно является флуоресцирующим экраном, пучок лучей (рис. 5). Это и γ -лучение, и α -лучение, исходящее из области фольги диаметром в 0,1 мм, соответствующей данному положению диафрагмы на электронном изображении, дает дифракционную картину для этого участка фольги (рис. 6).

Примером того, какое значение имеет электронная оптика для развития давно известных технических приборов, служит трубка Брауна, применяемая для осциллографирования и телевидения*. Электронная оптика показала, что в трубке Брауна основной проблемой является проблема получения изображения катода или диафрагмы. До появления электронной оптики резкие светящиеся пятна (во всяком случае при низких напряжениях) достигались

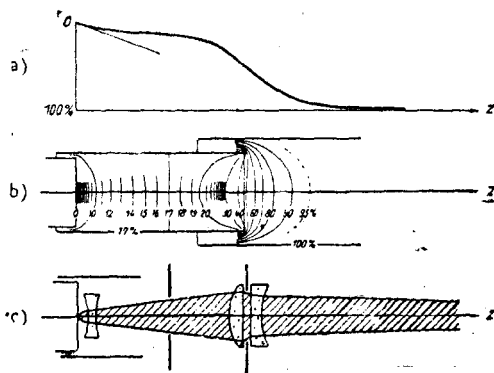


Рис. 7. Схема брауновской высоковакуумной трубки: а) изменение потенциала вдоль оси; б) потенциальное поле, в) оптическая аналогия

только путем газовой концентрации, отказ от которой стал возможным с появлением электронной оптики. В настоящее время имеются разнообразные системы брауновских трубок, причем, исходя из требования малых габаритов при малом увеличении, применяется иммерсионный объектив в виде металлических цилиндров. При этом главная собирающая линза отодвигается возможно дальше от катода (рис. 7). Результатом этих усовершенствований явилось получение более четкого изображения.

Наиболее характерным, можно сказать, классическим применением электронной оптики является электронный микроскоп; он может быть использован для рассматривания биологических и других объектов, подобно микроскопу в световой оптике, или для микроскопического исследования электронной эмиссии катодов. В этой области работа ведется в направлении превышения границы разрешающей способности светового микроскопа**. Разрешению

* См. статьи Грессера об электронной оптике; Брауна и Кноля об электронной оптике в телевидении.

** См. статьи Руска.

этой проблемы способствовали работы лаборатории высоких напряжений Берлинской высшей технической школы. Электронно-оптические исследования дали возможность изучить детали эмиссионного процесса, что невозможно при другом пути исследования. Этим преимущественно занимался исследовательский институт AEG. Электронные микроскопы, применяемые для решения различных задач, различаются по виду объекта (эмитирующий катод или освещаемый объект), а также по характеру выбранной электрической и магнитной системы. Для получения изображения катодов наряду с электрическим иммерсионным объективом большое практическое значение имеет магнитный микроскоп. В последнее время он был использован для получения изображения проволок, после того как удалось придать эквипотенциальной поверхности вблизи катода плоскую форму. С помощью магнитного микроскопа были также получены изображения фольги методами светопольного и темнопольного освещения (рис. 8)⁴.

3. Электроннооптические исследования эмиссии

Известны четыре важнейших способа вырывания электронов: вырывание путем нагрева, ионного удара, электронного удара и светового излучения. Первым объектом электроннооптического исследования стал раскаленный катод. Вскоре стало возможным выяснить кристаллическую структуру катода в случае чистого металла или нанесенного на катод тонкого (мономолекулярного, и меньше) слоя металла, понижающего работу выхода (Ba, Cs). Эти

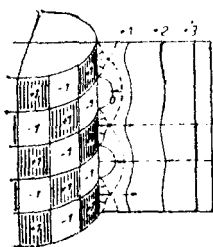


Рис. 9. Схематическое изображение поверхности проволоки, кристаллы которой обладают поверхностным потенциалом $+1$ или -1 В, и поля вблизи нее

исследования показывают, что отдельные кристаллы могут иметь различные значения работы выхода, отличающиеся на десятые доли вольта. Этот результат представляет собой экспериментальный материал, подтверждающий теорию неравномерного распределения эмиссии по поверхности катода и могущий служить для объяснения отклонений от прямых Шоттки⁵. Если предположить, что поверхность проволоки состоит из кристалликов, имеющих различные потенциалы, то при наложении незначительного внешнего поля над некоторыми кристалликами будут создаваться тормозящие поля, затрудняющие выход электронов (рис. 9). Благодаря этому суммарный электронный ток оказывается меньшим, чем это можно ожидать из теории эмиссии. Кроме того, электронная оптика дает металлграфам метод исследования⁶ процесса кристаллизации при высоких температурах, как, например, кристаллизация или перекристаллизация железа (рис. 10). Электроннооптические методы дают возможность исследовать структуру эмитирующей поверхности, напри-

мер, структуру торированного вольфрама (рис. 11)⁷. При фотоэлектрическом катоде невозможно установить его кристаллическую структуру, так как световые кванты приносят энергию, много бóльшую энергии работы выхода. Практическое значение этого метода в этом случае таково: с одной стороны, он позволяет обнаруживать незначительные загрязнения поверхности катода, с другой стороны — позволяет исследовать неоднородность слоев. В некоторых случаях оказывается возможным наблюдать кристаллическую структуру катодов вторичной эмиссии⁸. Посредством вторичной эмиссии может быть исследована внутренняя структура тонкой металлической фольги⁹.

Описанные исследования имели непосредственное значение для всех приборов, в которых использовались катоды с термо-, фото- или вторичной эмиссией (электронные трубки, электронные умножители и т. д.).

4. Развитие практической электронной оптики

Электронная оптика имела несколько стадий развития. Первой стадией нужно считать открытие катодных лучей, их тщательное исследование и изучение влияния электромагнитных полей на них. К этому периоду относится также открытие фото- и термоэлектрических явлений и лучей Рентгена. Впервые катодные лучи получили техническое применение в брауновских и рентгеновских трубках. Позднее к ним присоединяются электронные трубки с накаливаемыми катодами. Наиболее сложной среди этих приборов с точки зрения технического выполнения является брауновская трубка, так как задача ее построения связана с необходимостью получения точечного светящегося пятна. Последняя задача неизбежно должна была привести к развитию электронной оптики.

Цель дальнейшего развития геометрической электронной оптики окончательно определилась после открытия свойств полей с аксиальной симметрией. Теоретически и экспериментально было доказано, что такие поля, как, например, поля, созданные магнитными катушками, могут действовать как линзы; кроме того, электростатические системы позволили разрешить задачу получения четких электронных изображений. Таким образом дальнейшее развитие электронной оптики пошло по следующим направлениям: во-первых, построение электронных приборов, аналогичных световым (электронный телескоп, микроскоп и спектрограф), и применение новых приборов для разрешения проблем, которые не могут быть решены оптическими методами (увеличение разрешающей способности прибора, исследование изменения структуры вещества в раскаленном состоянии и т. д.); во-вторых, изучение с новой точки зрения уже существующих электронных приборов, в которых используется электронное излучение (трубки Рентгена, электронные трубки, фотоэлементы, брауновские трубки); в-третьих, создание приборов типа электронного преобразователя изображений,

вторично-электронного умножителя и т. д. Достижения в области телевидения, электронных умножителей и преобразователей изображения являются примерами современного развития электронной оптики, возможности которой далеко еще не исчерпаны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Из старых работ см. Brüche u. Scherzer, Geometrische Elektro-nenoptik und ihre Anwendungen, Springer, 1934.
 2. H. Stabenow, Z. Physik, **96**, 634, 1935.
 3. H. Boersch, Ann. d. Phys., **27**, 75, 1936.
 4. Boersch, Ann. d. Phys., **26**, 631, 1936; Mahl, Z. Physik, **98**, 321, 1935.
 5. См. J. A. Becker, Rev. Mod. Phys., **7**, 95, 1935; Brüche, Z. Physik, **98**, 77, 1935.
 6. Brüche u. Knecht, Z. techn. Phys., **15**, 461, 1934; **16**, 95, 1935; W. G. Burgers u. J. J. A. Ploos van Amstel, Nature, **136**, 721, 1935.
 7. E. Brüche u. H. Mahl, Z. techn. Phys., **16**, 623, 1935; **17**, 262, 81, 1936; R. P. Johnson u. W. Shockley, Phys. Rev., **49**, 436, 1936.
 8. M. Knoll, Z. techn. Phys., **16**, 467, 1935.
 9. R. Behne, Ann. d. Phys., **26**, 383, 1936.
-