

НОВЫЕ ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

**ЭЛЕКТРОННЫЙ ПРОЕКТОР
КАК МЕТОД ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Б. М. Царёв

ВВЕДЕНИЕ

Бурное развитие электронной микроскопии за последние 10—15 лет дало в руки экспериментаторов мощное средство для исследования многих физико-химических явлений, значительно расширившее диапазон увеличений по сравнению с доступными методами оптической микроскопии. Особую ценность электронная микроскопия приобрела в области изучения различного рода электронных эмиттеров¹, при исследовании явлений катализа² и в биологических науках.

В обычном своём оформлении электронный микроскоп, особенно для случая больших увеличений, представляет собой комплекс чрезвычайно сложной аппаратуры, состоящий из собственно микроскопа, вакуумной системы для его откачки и схемы его электропитания. При больших увеличениях конструкция самого микроскопа очень сложна, и по своей стоимости подобный электронный микроскоп доступен лишь наиболее крупным институтам и лабораториям. Однако наряду с подобными конструкциями в ряде исследований успешно применялись различные упрощённые конструкции электронных микроскопов, не требующие сложных электронно-оптических систем. Эти конструкции в дальнейшем мы будем называть «электронными проекторами», так как термин «электронный микроскоп» по существу возник благодаря далеко идущей аналогии этих приборов с оптическими микроскопами, в то время как в упрощённых конструкциях используется возможность получать большие увеличения исследуемого объекта за счёт радиального распространения эмиттируемых его поверхностью электронов, то-есть, по существу, путём «проектирования» с помощью потока электронов поверхности объекта на поверхность люминесцирующего экрана. Как мы увидим ниже, электронные проекторы, несмотря на их исключительную простоту по сравнению с электронным микроскопом, позволяют легко получать гораздо большие увеличения, достигающие в отдельных случаях 1—2 миллионов крат.

К недостаткам электронных проекторов следует отнести возможность исследования объектов лишь с помощью эмиттируемых ими же электронов. Тем не менее, как мы увидим ниже, электронные проекторы успешно используются для исследования не только электронных эмиттеров, но и ряда других физико-химических явлений, как, например, кристаллического строения и рекристаллизации металлов, явления адсорбции, поверхностной миграции и испарения различных веществ, кинетики химических реакций твёрдых тел с газами, парами и т. п. Кроме того, электронные проекторы незаменимы для исследования катодов обычных конструкций, применяемых в различных современных электровакуумных приборах в виде, например, проволок, лент, цилиндров, а также монокристаллов различных металлов, исследование которых с помощью электронного микроскопа чрезвычайно затруднительно вследствие особенностей электронной оптики последнего.

1. КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРОЕКТОРОВ

Основные типы электронных проекторов, а именно цилиндрический, сферический и конусный, являющийся лишь разновидностью сферического, приведены в схематическом виде на рис. 1.

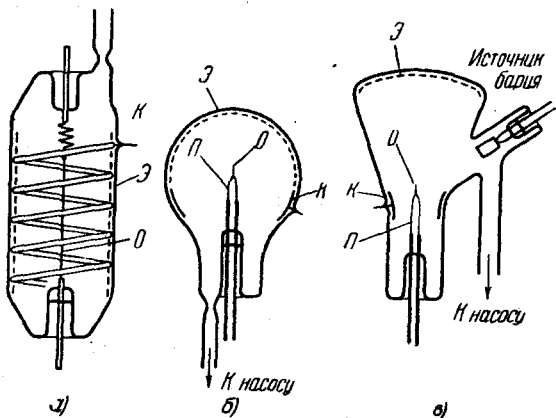


Рис. 1. Основные типы электронных проекторов:
 а — цилиндрический; б — сферический; в — конусный;
 Э — флуоресцирующий экран, К — коллектор;
 О — исследуемый объект: проволока или острей,
 П — подогреватель острей.

В зависимости от способа получения электронного потока с исследуемого объекта, можно было бы различать термоэлектронные проекторы, в которых объект накаливается до температуры, при которой он даёт электронную эмиссию, достаточную для получения изображения на экране, и автоэлектронные проекторы,

в которых электронное изображение объекта получается за счёт электронов, вырываемых с его поверхности сильным внешним электрическим полем. Однако в большинстве случаев в одном и том же приборе изображение объекта на экране может быть получено как путём подогрева объекта непосредственно током или за счёт теплопроводности от специального подогревателя, так и за счёт автоэлектронной эмиссии под действием внешнего поля, и поэтому эта дополнительная классификация проекторов излишня.

1. Цилиндрический электронный проектор, предложенный впервые Джонсоном и Шокли³ (см. рис. 1,а), наиболее удобен для исследования объектов в виде тонких проволок и широко применялся для исследования авто- и термо-электронной

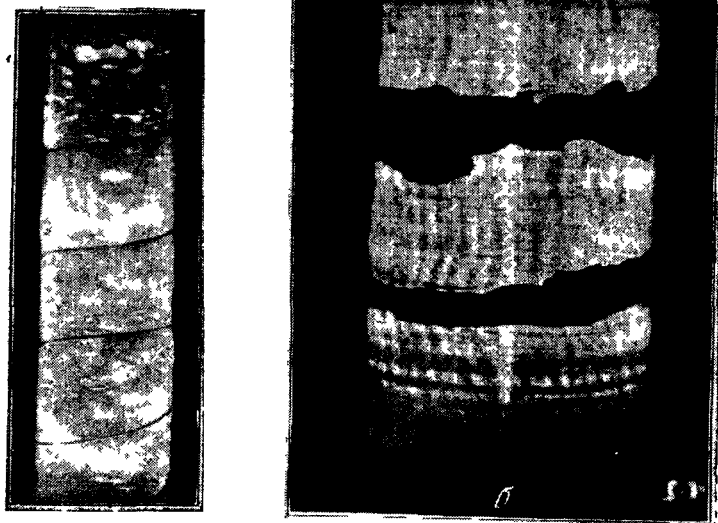


Рис. 2. Автоэлектронная эмиссия необработанной вольфрамовой проволоки: а — до очистки от загрязнений, б — после очистки.

эмиссии как чистых металлов, так и плёночных катодов, то-есть плёнок различных загрязнений на поверхности металла.

Этот проектор состоит из стеклянного цилиндрического баллона, стенки которого покрыты внутри флуоресцирующим веществом. По оси баллона натянута с помощью пружины исследуемая проволока, укрепленная на двух впаях, позволяющих подводить к проволоке ток накала. Внешнее электрическое поле подаётся между проволокой (—) и анодом (+), оформленным в виде проволочной спирали,

расположенной по стенкам цилиндра и имеющей вывод сквозь стенку баллона.

Так как флуоресцирующий экран, благодаря вторичной электронной эмиссии с него под действием бомбардировки его электронами, приобретает высокий положительный потенциал, близкий к потенциалу анода (спирали), то эмиттируемые проволокой за счёт накаливания или вырывания внешним электрическим полем электроны проходят от проволоки до экрана практически по радиальным траекториям и дают на экране увеличенное изображение эмиттирую-



Рис. 3. Эмиссия вольфрама после удаления загрязнений: *а* — неполированная проволока; сквозь следы протяжки видны места стыков отдельных кристаллов; *б* — полированная проволока, отчетливо выделяется кристаллическая структура; *в* — структура вольфрама, проявленная абсорбцией цезия.

щей поверхности проволоки. Примеры подобных изображений показаны на рис. 2 и 3 для чисто вольфрамовой проволоки, на рис. 4 для торированного вольфрама и на рис. 5 для оксидного катода.

Недостатком цилиндрического катода является увеличение лишь в одном измерении, перпендикулярном оси исследуемой проволоки. При этом легко достигаются увеличения порядка сотен и тысяч крат. Так, например, при диаметре проволоки 0,1 мм и диаметре цилиндра 60 мм получаем радиальное увеличение, равное 600, а при тех же диаметрах, равных соответственно 20 микронам и 100 мм, получим увеличение в 5000 крат. В направлении же оси проволоки уве-

личение равно 1, то есть изображение объекта на экране получается сильно искажённым. Однако во многих случаях не только для качественных исследований, но и для количественных оценок и измерений подобные изображения вполне достаточны. Кроме того, для исследования проволок или других объектов с цилиндрической симметрией подобный тип проектора наиболее удобен.

2. Сферический проектор. Указанный выше недостаток цилиндрического проектора полностью устраняется в так называемом сферическом проекторе (рис. 1,б), получившем широкое применение для исследования монокристаллов различных металлов^{4,5,6}. Сферический проектор до сих пор в основном применяется для исследования авто- и термо-электронной эмиссии с тонкого монокристаллического острия исследуемого металла.

Сферический проектор обычно состоит из стеклянного шара, половина внутренней поверхности которого покрыта флуоресцирующим слоем. В центре этого полусферического экрана помещается

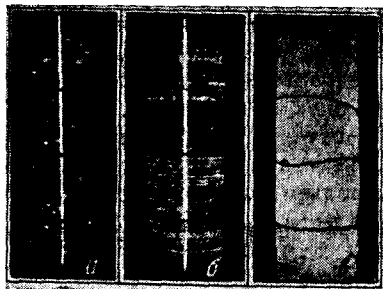


Рис. 4. Торированный вольфрам: а — непосредственно после прокаливания до 2800° абс.; б — после 4 минут активирования при 1850° абс.; в — после 40 минут активирования при 1800° абс.

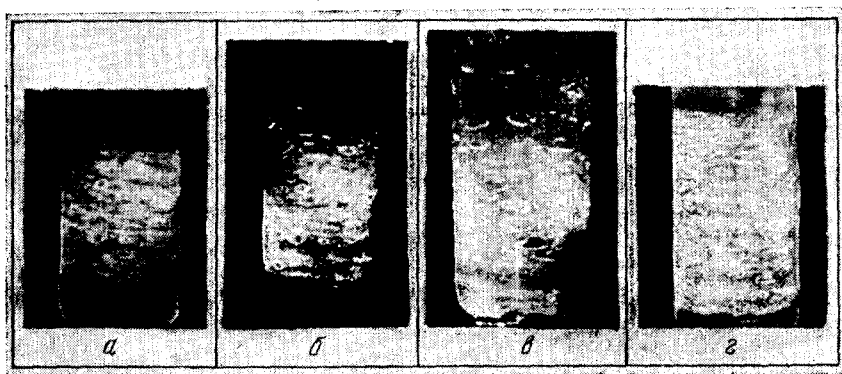


Рис. 5. Оксидный катод; а, б, в, г — различные стадии активирования.

исследуемое металлическое остриё, длиной обычно порядка 1 мм, привариваемое к вольфрамовой петле, позволяющей накаливать остриё за счёт теплопроводности. Анодом-коллектором чаще всего служит либо прозрачный слой платины, нанесённый на стекло под флуоресцирующим слоем экрана, либо металлическое кольцо, рас-

положенное несколько ниже острия, как это мы видим в проекторах, показанных на рис. 6 и 7. Мартин⁵ использовал сферический проектор для исследования монокристаллической вольфрамовой полусферы диаметром 1 см, и при диаметре сферического экрана, равном 22 см, имел, следовательно, увеличение всего лишь в 22 раза (см. рис. 7). В случае же исследования объектов в виде острия, сравнительно легко достигаются увеличения порядка нескольких десятков тысяч раз. Так, например, даже при сфере диа-

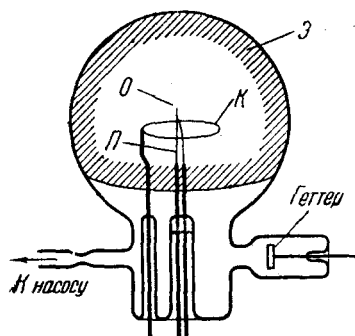


Рис. 6. Сферический проектор с кольцевым коллектором, обозначения те же, что и на рис. 1.

метром 10 см относительно легко получаемое острие с радиусом закругления в 5 микрон даёт увеличение в 10 000 крат. Специально же приготовленные острия в сферах диаметром в 10, 15, максимум 20 см позволяют получать увеличения в 100, 200 и 500 тысяч раз и выше. Так, например, Бенжамен и Дженкинс⁴ в своих опытах имели острия диаметром от 0,5 до 1 микрона и при диаметре экрана 10 см получали увеличения от 100 до 200 тысяч крат, а Мюллеру⁷ удалось получать острия с радиусом закругления в 1120 Å и увеличения до 420 000 раз. При исследовании же предельной разрешающей способности сферического проектора ему удалось получить острия в 180 Å и даже 110 Å и достигнуть увеличений в 1 200 000 и 2 миллиона крат.

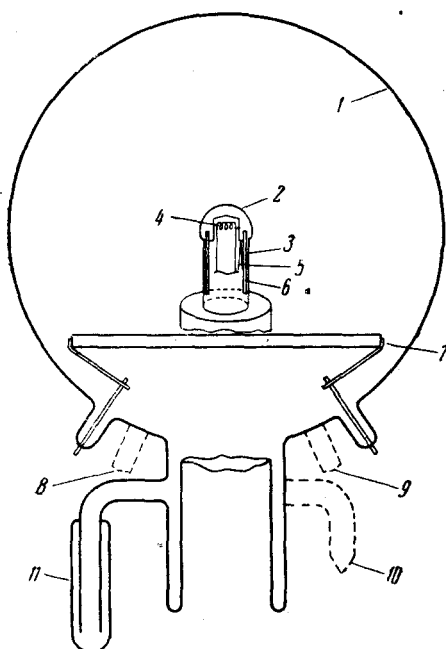


Рис. 7. Сферический проектор Мартина: 1 — флуоресцирующий экран; 2 — вольфрамовая полусфера диаметром 1 см, 3 — вольфрамовые держатели, 4 — вольфрамовый подогреватель, 5 — термопара: вольфрам-тантал, 6 — танталовые экраны, 7 — танталовый коллектор, 8 — отросток с геттером, 9 — отросток с ионизационным манометром, 10 — место отпайки, 11 — ловушка с цезием, охлаждаемая жидким воздухом.

3. Конусный проектор. В сферических проекторах большие увеличения достигаются, как мы увидим позже, главным образом за счёт уменьшения размеров объекта, то есть острия, так как чрезмерное увеличение диаметра стеклянного баллона не достигает этой цели и нецелесообразно, вызывая значительные затруднения как при изготовлении самого баллона, так и при дальнейшей его стеклодувной обработке и при нанесении на внутреннюю поверхность флуоресцирующего экрана или слоя платины. Поэтому часто предпочитают пользоваться конусной конструкцией проектора, изображённой на рис. 1, в (см., например, ^{7,8}), экран которого, по существу, представляет собой часть сферической поверхности. $U_p < 0$

Такая конструкция позволяет легко пользоваться относительно большими радиусами сферы экрана, а при малых радиусах (5—10 см) даёт весьма компактный прибор. Использование небольшой части сферической поверхности при этом вполне возможно и достаточно, так как, при проекции граней монокристалла на полусферу, всё изображение обычно состоит из ряда симметрично расположенных одинаковых или подобных друг другу изображений отдельных граней или их групп, и вполне достаточно ограничиться получением изображения одной из таких граней или групп.

Недостатком конусного проектора является, однако, необходимость изготовления баллонов с хорошим, геометрически правильным куполом, на который наносится экран, что очень трудно осуществимо при ручной стеклодувной работе. Изготовление же небольшого сферического, а тем более цилиндрического проектора вполне доступно любому стеклодуву средней квалификации.

Наконец необходимо отметить ещё предложенную Малем⁹ простую конструкцию электронного проектора для одновременного наблюдения электронной и ионной эмиссии нитевидных или цилиндрических эмиттеров. Схематически эта конструкция показана на рис. 8. Электронная эмиссия с одной стороны проволоки даёт непосредственно изображение на экране, нанесённом на аноде и находящемся под высоким, положительным потенциалом относительно катода. Одновременно ионная эмиссия с обратной стороны этого же катода попадает на отрицательную относительно катода пластину P , где вызывает эмиссию вторичных электронов, направляющихся на

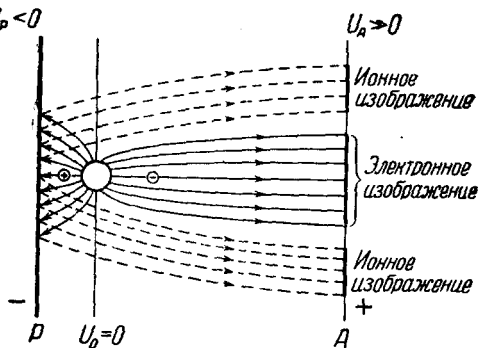


Рис. 8. Схема ионно-электронного проектора (по Малю).

анод-экран и дающих там изображение обратной стороны проволоки (катода) в «ионных» лучах, то есть картину её ионной эмиссии.

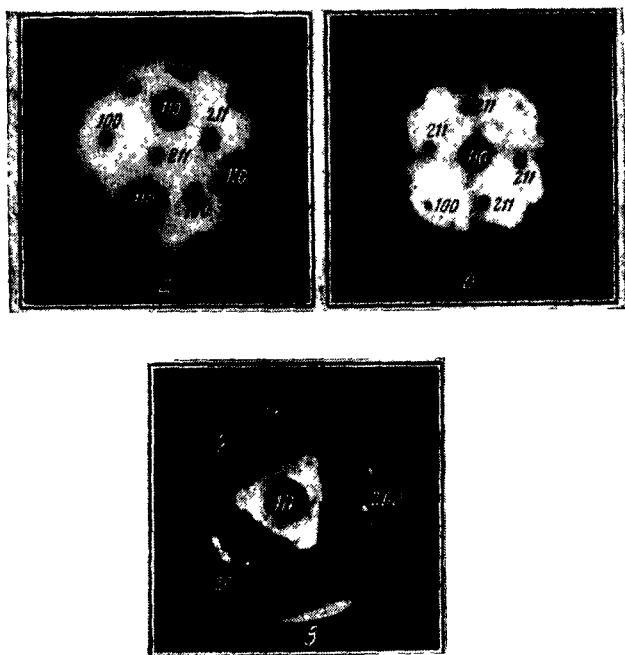


Рис. 9. Изображения монокристаллов чистых металлов; *а* — вольфрам, *б* — молибден, *в* — никель.

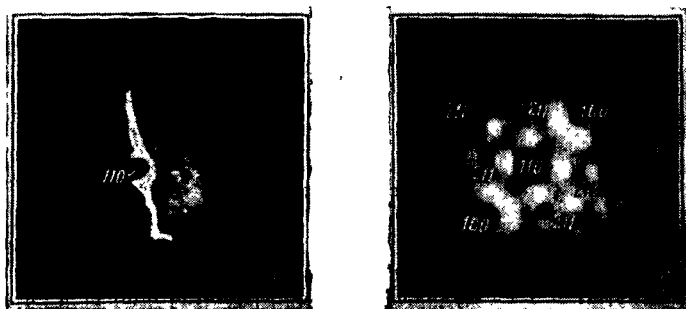


Рис. 10. Плёнка бария на вольфраме: *а* — барий напылён слева, видна одноатомная плёнка на границе напылённого слоя; *б* — незначительные следы бария.

Ряд изображений, полученных с помощью сферического или конусного проекторов, приведен на рис. 9, 10 и 11.

II. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПРОЕКТОРА

Основное назначение электронного проектора — исследование термоэлектронной эмиссии различного рода поверхностей, начиная с чистых металлов и кончая сложными катодами. Однако в большинстве таких работ, помимо электронной эмиссии, попутно изучались и многие другие явления. Так, например, Бенжамен и Дженкинс⁴ в первой части своей работы (1940 г.), посвящённой исследованию эмиссии чистых металлов, исследовали также подвижность атомов металлов под влиянием температуры и внешнего электрического поля и определяли начала заметной подвижности поверхностных атомов. Так, для вольфрама, молибдена и никеля ими были получены значения этой температуры, равные соответственно 1170, 770 и 370° абс., в то время как для железа им не удалось получить устойчивого изображения монокристалла даже при комнатной температуре. Подвижностью поверхностных атомов никеля под влиянием электрических полей уже при температурах порядка 100°C эти авторы объясняют явления пробоя, часто наблюдаемые в мощных генераторных лампах во время нормальной их работы в условиях хорошего вакуума (см. ¹⁰).



Рис. 11. Плёнка цезия на вольфраме.

Все работы, посвящённые исследованию термоэлектронной эмиссии, плёнок электроположительных загрязнений на металлах^{4, 5, 6, 7, 8, 11, 12}, как правило, включают также и исследования явлений адсорбции, поверхностной миграции и испарения образующих плёнку металлов. Например, механизм образования ториевой плёнки в случае вольфрама с присадкой окиси тория и явления миграции тория по поверхности вольфрама были окончательно установлены еще в 1936 г. Эшерном и Беккером¹³ и затем подтверждены и уточнены дальнейшими работами^{3, 4, 5, 6, 8}. В противоположность этому, опыты Бенжамена и Дженкинса¹¹ по миграции бария на поверхности вольфрама дали первоначально отрицательные результаты. Лишь путём усовершенствования процесса обезгаживания всего проектора и более тщатель-

ного проведения опытов Беккеру и Муру¹², а затем и Бенжамену и Дженкинсу¹ удалось установить факт миграции бария на вольфраме и молибдене и выяснить роль ничтожнейших следов кислорода и других загрязнений в прекращении миграции бария в первых опытах.

Перечисленные работы позволили окончательно установить различие адсорбционных свойств различных граней кристалла основного металла по отношению к различным загрязнениям.

Такая же картина получилась и для процесса испарения примеси, особенно в случае её мономолекулярных плёнок. Различной оказалась также и скорость поверхностной миграции атомов загрязнений в зависимости от кристаллографического направления данного участка поверхности.

Для исследования оксидных катодов цилиндрический электронный проектор был применён недавно М. Д. Ягудаевым и Г. Н. Шуппе¹⁴. При этом они сравнивали поведение катодов, покрытых методом катафореза с катодами, полученными пульверизацией, и проследили последовательно процессы многократной активации и дезактивации оксидных нитей.

Успешные исследования Мартином⁵ чистого вольфрама и различных плёнок на его монокристалле при всего лишь 22-кратном увеличении позволяют думать о возможности исследования термоэлектронной эмиссии и различных физико-химических процессов на поверхности подогретых оксидных катодов, с помощью цилиндрического или сферического проекторов.

Используя отмеченную уже Джонсоном и Шокли³ возможность наблюдения процесса рекристаллизации металлов, Робинсон¹⁵ исследовал с помощью цилиндрического проектора зависимость скорости рекристаллизации или, вернее, роста кристаллов вольфрама от температуры, получив при этом эмпирическую зависимость вида:

$$R = 7,1 \cdot 10^{-3} \exp \left(- \frac{55\,000}{T} \right),$$

где R — скорость рекристаллизации (роста кристаллов) в *см/час* и T — температура в градусах абс. Этот пример служит иллюстрацией использования электронного проектора для количественных определений, а не только для получения качественной картины исследуемого явления.

Кроме перечисленных ранее явлений, исследованных с помощью электронных проекторов, следует назвать еще диффузию примесей в металлах, примером которой может служить упомянутый уже нами механизм активирования торированных вольфрамовых катодов, и очистку металлов от примесей и поверхностных загрязнений, в частности различными электроотрицательными элементами, как например кислородом. В этом случае мы непосредственно сталкиваемся с вопросами кинетики химических реакций металлов с газами и парами различных веществ. В качестве примера можно указать на

работу Ягудаева и Шуппе¹⁴, исследовавших также адсорбцию иода на вольфраме и кинетику реакций иода с чистым и торированным вольфрамом. При этом ими обнаружено значительное ускорение реакции иода с торированным вольфрамом по сравнению с практически незаметной его реакцией с чистым вольфрамом. Повидимому, здесь мы имеем дело с явлением, аналогичным коррозии металлов и образованием микрогальванических элементов (вольфрам-иод-торий), ускоряющих реакцию иода с вольфрамом, что наглядно подтверждается глубоким травлением торированного вольфрама под воздействием паров иода. Кроме того, было обнаружено, что после обработки торированного вольфрама парами иода и затем удаления последних процесс активирования вольфрама протекает быстрее, что указывает на заметное изменение структуры поверхностных слоёв вольфрама.

В заключение следует указать на возможность комбинированных исследований различных объектов с помощью электронного проектора и, их же, с помощью других приборов, дающих количественную оценку различных величин. Так, например, Никольс¹⁶ воспользовавшись результатами предварительного исследования полученных им монокристаллических вольфрамовых нитей с помощью цилиндрического проектора, поместил их затем в специальный прибор, в котором он с помощью ряда коллекторов особой конструкции, вращающихся вокруг нити, смог исследовать термоэлектронную эмиссию с различных граней кристалла вольфрама и определить термоэлектронные константы для этих граней методом построения ричардсоновских прямых, то есть зависимостей вида $\lg I_e - 2 \lg T = f(1/T)$, где I_e — измеренная с данной грани кристалла (или в данном направлении) эмиссия.

Не исключена также возможность комбинирования в самом электронном проекторе коллекторов, позволяющих производить и различные количественные определения. Наконец, как показала работа Фокса и Бейли¹⁷ по электронно-микроскопическому сравнению различных сложных эмиттирующих поверхностей, подобные количественные определения, повидимому, возможны также путём фотометрирования отдельных участков изображения на экране проектора или же получаемых с них снимков. Для этой цели необходима лишь предварительная «градуировка» шкалы зависимости интенсивности свечения экрана или почернения фотопластины под действием этого свечения от величины электронного тока, попадающего на рассматриваемые участки экрана.

Перечисленных примеров вполне достаточно для иллюстрации возможностей применения электронных проекторов различной конструкции в самых разнообразных областях научных исследований. Особенно следует подчеркнуть при этом возможность исследования различных явлений, требующих проведения опытов в очень чистых условиях, достигаемых лишь с помощью высокого вакуума, с одновременным получением при большом увеличении наглядной картины исследуемого явления.

III. ТЕХНИКА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРОЕКТОРОВ И РАБОТЫ С НИМИ

1. Общее конструктивное оформление

Стремление к проведению всего опыта в возможно более чистых условиях заставляло большинство экспериментаторов пользоваться отпаянными от насоса электронными проекторами и изготавливать их баллоны из наиболее тугоплавких сортов стекла, чтобы иметь возможность обезгаживать, при возможно более высокой температуре, как баллон, так и внутренние детали, не поддающиеся прокаливанию высокой частотой или пропусканием по ним тока. Так, например, многие авторы пользуются стеклом типа «нонекс» с вольфрамовыми впамями, а Мартин⁵ сделал свой сферический проектор (рис. 7) из стекла «пайрекс» и прогревал его в течение 60—70 часов во время откачки при температуре порядка 500—510°C. Бенжамен и Дженкинс⁴ указывают, между прочим, на то, что, работая с баллонами из легкоплавкого стекла, они не смогли получить устойчивых изображений на экране проектора.

Применение достаточно эффективного геттера, помещаемого обычно в отдельном отростке для избежания попадания его при распылении на исследуемый объект, позволяет получать чрезвычайно высокий вакуум, достигающий часто в отпаянных проекторах 10^{-7} — 10^{-8} мм. рт. ст. и даже ниже. Для измерения вакуума проектор снабжается отдельным отростком с напаянным к нему ионизационным манометром. Для удаления излишков легко конденсирующихся паров, вводимых в проектор во время опытов с ними, необходим ещё отросток с ловушкой, охлаждаемой жидким воздухом или твёрдой углекислотой с помощью надеваемого на неё дьюаровского сосуда.

В соответственно расположенных отростках помещаются также источники тех или иных металлов или загрязнений, влияние которых на рассматриваемый объект должно быть исследовано.

К преимуществам отпаянных проекторов, помимо возможности осуществления опытов в условиях наилучшего вакуума и гарантированной чистоты всех деталей проектора, следует отнести также возможность длительного сохранения проекторов с исследуемыми объектами и многократной их демонстрации. При этом такие проекторы не занимают откачной установки.

В этом отношении конструкции отпаянных проекторов могли бы служить в качестве прекрасных наглядных пособий, позволяя во время чтения специальных курсов легко демонстрировать различные явления из перечисленных выше областей применения электронных проекторов.

Однако, отпаянный проектор обладает тем основным недостатком, что он не позволяет производить исследования с неконденсирующимися парами или газами после его отпайки от насоса, что

значительно ограничивает область его применения. Кроме того, для каждого исследуемого объекта приходится изготавливать отдельный проектор, что делает исследования чрезвычайно трудоёмкими или заставляет ограничиваться единичными объектами, как это видно на примере работы Мартина⁵.

В то же время современная техника получения высокого вакуума и хорошего вакуумного уплотнения различного рода сочленений вакуумных приборов и схем, как, например, плоских или конических шлифов больших диаметров, вполне позволяет осуществлять конструкции разборных электронных проекторов на шлифах с непрерывной откачкой. Так, например, Ягудаев и Шуппе¹⁴ для своих исследований оксидных катодов и реакций вольфрама с иодом применили цилиндрический проектор со шлифом, схематически показанный на рис. 12.

Подобные конструкции вполне устраняют перечисленные выше недостатки отпаянного проектора, позволяя с помощью одного прибора исследовать чрезвычайно большое количество объектов, фиксируя наиболее интересные моменты фотографическим путём или даже на киноплёнке в случае относительно быстрых изменений изображения на экране. Кроме того, с помощью одного проектора возможно многократное повторение одних и тех же экспериментов с одним или различными объектами, с исследованием таких явлений, как влияние различных газов и паров как конденсирующихся, так и не конденсирующихся, откачивая их в последнем случае для производства наблюдений на экране.

Ряд возможных конструкций подобных проекторов с непрерывной откачкой показан схематически на рис. 13.

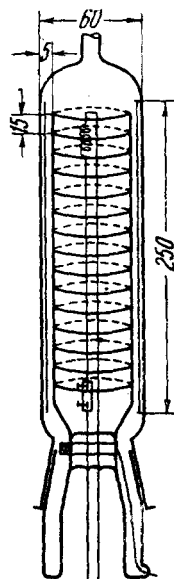


Рис. 12. Цилиндрический проектор со шлифом.

2. Некоторые указания по подготовке объектов для исследования

а) Подготовка проволок. Основными формами исследуемых с помощью проекторов объектов являются проволока и остриё или сфера. В случае поликристаллических проволок, их подготовка сводится чаще всего к полировке поверхности с целью как получения равномерного по всей длине проволоки диаметра и сечения, так и удаления следов протяжки, дающих на экране характерный муар (см. рис. 3), сквозь который проглядывает кристаллическая структура металла.

Шлифовка и затем полировка проволок возможны как механическим путём с помощью специального станка (см., например,¹⁸), так и

химическими или электролитическими методами. Механическая обработка позволяет получать гораздо большую однородность проволоки по диаметру и сечению и используется в случае более точных исследований. Однако она требует специального оборудования. Химическое травление приводит чаще всего к проявлению кристаллической микроструктуры (даже в случае «блестящего» травления), благодаря различной скорости воздействия реактивов на разные грани кристаллов, и не позволяет поэтому получить необходимой «гладкости» поверхности проволоки. Поэтому чаще всего предпочитают пользоваться электролитической полировкой, дающей прекрасные результаты во многих

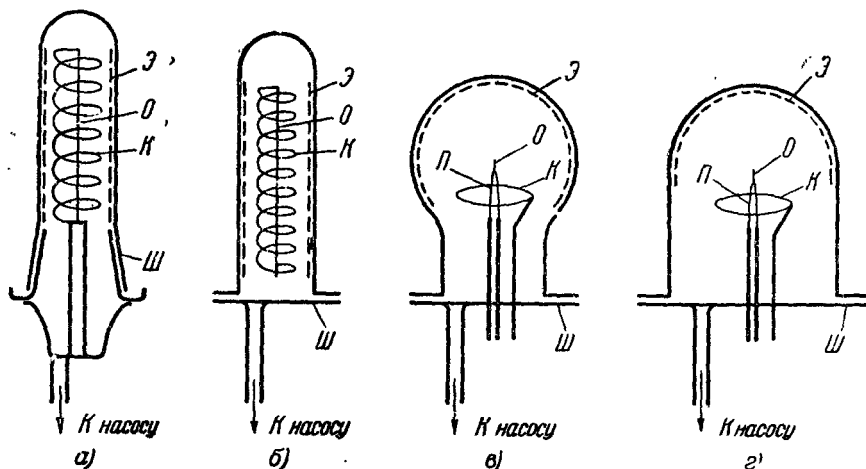


Рис. 13. Возможные конструкции разборных проекторов: Ш — шлиф, остальные обозначения см. рис. 1.

случаях её применения. Однако скорость электролитической полировки требует весьма тщательного контроля, в противном случае не удаётся достигнуть необходимой однородности проволоки по всей длине. За подробностями процесса полировки различных металлов и сплавов отошлём читателя к книге Л. Я. Попилова¹⁹ и к приведённому в ней обширному списку специальной литературы.

Более сложным процессом является получение монокристаллических проволок. Так в случае, например, вольфрама их можно готовить из поликристаллической проволоки, используя метод, предложенный Никольсом¹⁸. Робинсон¹⁵ превращал поликристаллические проволоки в монокристаллические, нагревая их длительно в вакууме при постоянной температуре. Обычно в этом случае проволока состоит из нескольких кристаллов, расположенных вдоль неё и частично перекрывающих друг друга, и, следовательно, в отдельных поперечных сечениях проволоки могут встречаться

по 2—3 кристалла. График на рис. 14 наглядно показывает процесс возникновения отдельных центров кристаллизации и рост кристаллов со временем, причём после 3 часов нагрева при 2100° абс. вдоль нити расположились 7 кристаллов.

После окончания основного процесса рекристаллизации любым методом рекомендуется дополнительный прогрев до более высоких температур (например для вольфрама при 2950° абс. в атмосфере водорода или при 2700° абс. в вакууме), с целью абсорбции монокристаллами мелких поверхностных кристаллов.

б) Крепление и натяжение проволок. В случае цилиндрического проектора, особенно с использованием автоэлектронной эмиссии с тонких проволок, то-есть с применением относительно сильных внешних электрических полей, оказывающих значительное механическое воздействие на проволоку, чрезвычайно большую роль играет выбор пружи- н, натягивающих исследуемую нить. При этом пружина должна не только поддерживать нить в натянутом состоянии при её тепловом расширении во время накаливания, но и предотвращать также возможность возникновения вибрации нити. Частота этих вибраций оказывается вовсе не связанной, например, с частотой переменного тока, применяемого для накаливания проволоки, а колебания последней могут происходить в плоскости, непрерывно меняющей своё положение вокруг оси прибора, вдоль которой натянута проволока. Интенсивность вибрации проволоки зависит в основном от напряжения на коллекторе U и от силы натяжения проволоки F . Так, например, для вольфрама Даниель²⁰ приводит следующее выражение для условия возникновения вибрации проволоки:

$$U \geq 3,4 \cdot 10^4 \left(\frac{F^{1/2}}{l} \right) \cdot D \cdot \lg \frac{D}{d},$$

где D и d — соответственно диаметры коллектора и проволоки в см; F — сила натяжения проволоки в г и l — длина проволоки в см.

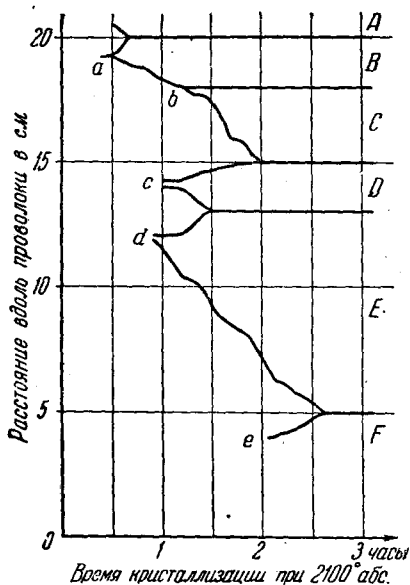


Рис. 14. График процесса рекристаллизации вольфрамовой проволоки, полученный с помощью цилиндрического проектора.

Отсюда для силы натяжения проволоки при заданном напряжении на коллекторе U получаем выражение:

$$F \geq 8,64 \cdot 10^{-10} \frac{U^{2/3}}{D^2 \left[\lg \frac{D}{d} \right]^2}.$$

Для изготовления пружин обычно применяется вольфрам или молибден в виде проволоки или ленты. Делаются пружины чаще всего спиральными. Метод расчёта и конструирования вольфрамовых и молибденовых пружин приводится соответственно в статьях Блоджетт и Лэнгмюра²¹ и Тоуня²². В случае натягивания проволоки из других металлов достаточно вычислить допустимую силу натяжения необходимой для этого вольфрамовой пружины, умножая силу натяжения, требуемую для вольфрамовой проволоки того же диаметра, на произведение отношения температуры плавления данного металла к температуре плавления вольфрама (3355°) на отношение их же линейных коэффициентов теплового расширения (см.²⁰). При этом для танталовых проволок получаем множитель, равный 0,83, для молибдена — 0,77 и для никеля — 1,06.

в) Подготовка и крепление металлического острия. В случае сферического или конусного проекторов наиболее удобны для исследования объекты в виде сферы или острия.

Метод изготовления сферы из монокристалла вольфрама приведён в статье Мартина⁵. На нём мы здесь останавливаться не будем, так как для получения больших увеличений интереснее пользоваться остриями. Они изготавливаются с одинаковым успехом как из монокристаллической, так и из поликристаллической проволоки, и неоднократно опыт многих экспериментаторов показал, что в случае очень тонких острий, получаемых обычно химическим или электролитическим травлением, почти всегда в острие остаётся монокристалл.

Вольфрамовые и молибденовые острия обычно травятся электролитически в растворе едкого натрия, а затем в аммиаке. Никель травят (также электролизом) в растворе перхлората калия в разведённой соляной кислоте. Процесс травления, сопровождаемый вторичными наблюдениями под микроскопом, продолжается до тех пор, пока острие не перестанет быть отчётливо различным. Для вольфрама такие острия легко удаётся получать с радиусом закругления порядка 0,2 — 0,5 микрона. Даниель⁶ приводит рецепт приготовления вольфрамовых острий путём электролитического травления в растворе 30 г едкого натрия на литр воды и рекомендует вести травление переменным током, что даёт более однородные острия, нежели в случае постоянного тока, причём лучшие результаты для проволок диаметром в 75 микрон он получал при напряжении в 4,4 вольта, подаваемом на ванну через сопротивление в 20 омов.

Последующий прогрев вольфрамового острия кратковременно до 2950° абс. или длительно при 2600° абс. не меняет ни формы, ни размеров его. Длительный же нагрев (порядка 10 часов) при 2700° абс. устраняет лишь неровности и некоторую асимметрию без заметного изменения диаметра острия. Подобные, «сглаженные» термической обработкой, острия дают монокристалл с гранями, гладкими с точностью до атомных расстояний, что не сказывается уже на автоэлектронной эмиссии, так как эти расстояния малы по сравнению с «толщиной» поверхностного потенциального барьера.

Более высокие температуры обработки острия приводят к его оплавлению с образованием шарика и значительному увеличению диаметра острия. Мюллеру⁷ удалось получить острия гораздо меньших размеров, вплоть до диаметров в 360 и 220 Å, путём применения для этой цели катодного распыления, то-есть бомбардировки острия ионами инертных газов или ртути.

Крепление острия на петле подогревателя можно производить двумя способами, схематически изображёнными на рис. 15. В первом случае (а) к вольфрамовой петле может быть приварено точечной электро-

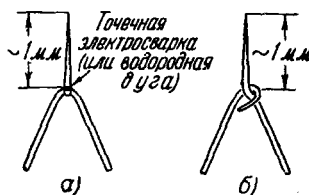


Рис. 15. Способы крепления острия на подогревателе.

сваркой остриё из любого металла, причём, как показали приблизительные подсчёты Даниеля⁶, произведённые с явным завышением результатов, разница температур самого острия и места крепления на петле соответственно составляет 6° , 100° и 500° при температурах петли, равных 1000, 2000 и 3000° абс.

Действительные значения падения температуры вдоль острия безусловно значительно ниже, и при температурах, не превышающих 2000° абс., ими, в большинстве случаев, вполне можно пренебречь. Сколько-нибудь значительные поправки, повидимому, необходимы лишь в случае прокаливания острия до более высоких температур, необходимых при обработке объектов, а не при наблюдениях их на экране. Во втором же случае (б) остриё изготовляется непосредственно на конце одной из ветвей петли подогревателя, и этот способ, следовательно, применим лишь в случае тугоплавких металлов. При таком креплении острия разница температур петли и острия, повидимому, должна быть ещё меньше, благодаря дополнительному местному разогреву контакта обеих ветвей петли за счёт его сопротивления.

г) Способы определения радиуса закругления острия. Так как часто приходится иметь дело с остриями, выходящими по своим радиусам закругления за пределы разрешающей способности обычного микроскопа, и, например, Хеферу⁸ приходилось их размеры определять с помощью электронного микроскопа с увеличением от 3 до 23 тысяч крат, то необходим какой-либо

метод косвенного определения размеров острия. Такое определение возможно непосредственно в самом сферическом (или конусном) проекторе. Согласно Мюллеру⁷, радиус закругления острия r может быть определён из измеряемого значения силы тока I_e автоэлектронной эмиссии с исследуемого острия при заданном напряжении U на коллекторе по формуле:

$$r = \frac{2U(1g 2\pi A - 1g I_e + 2 1g 2U) - 2 1g 2,3(1g R - 1g r)}{2,3 B(1g R - 1g r)},$$

где A и B — константы уравнения автоэлектронной эмиссии

$$I_e = AF^2 \exp\left(-\frac{B}{F}\right).$$

Хотя это уравнение несколько громоздко, оно всё же практически может быть использовано для подсчётов методом последовательного приближения. Для этого достаточно в правой части уравнения сначала подставить любое приблизительное значение r , и при последующих подстановках вычисленных по этому уравнению значений r последнее очень быстро сходится. Так как, однако, изменение R в десять раз меняет значение r всего лишь на 2%, то вполне можно воспользоваться более простой, полуэмпирической формулой

$$r = \frac{0,85}{\varphi^2} U^{3/4} \quad (\text{при } I_e = 10^{-5} \text{ а}),$$

где φ (работа выхода острия) и U измеряются в вольтах, а r в Å.

д) Конструкция коллектора. В случае цилиндрического проектора в качестве анода-коллектора может служить, как мы видели, либо проволоочная спираль, непосредственно прилегающая к флуоресцирующему экрану (см. рис. 1а), либо нанесённый по спирали слой платины на внутренней поверхности баллона (см. рис. 2б). Последний метод, однако, более сложен, и относительно широкая полоса платинового слоя заслоняет собой слишком большую часть изображения на экране. Наконец, Ягудаев и Шуппе сделали в своём разборном проекторе коллектор в виде сварной молибденовой сетки, расположенной на расстоянии 5 мм от экрана. Такой коллектор легко можно обезгазить, прокаливая его токами высокой частоты или электронной бомбардировкой. Из этих же соображений, в случае сферических или конусных проекторов, удобнее всего пользоваться коллектором в виде молибденового или, лучше, танталового кольца (см. рис. 6 и 7). Иногда в сферических проекторах⁸ коллектор осуществляется в виде прозрачного слоя платины, наносимого под флуоресцирующий слой экрана на всю полусферическую внутреннюю поверхность баллона. Однако в этом случае и способ нанесения слоя, и осуществление контакта с ним для вывода наружу очень сложны и кропотливы.

е) Изготовление флуоресцирующего экрана. Флуоресцирующий экран обычно изготавливается из виллемита (ортосили-

ката цинка) или вольфрамата кальция или же их смеси. Для нанесения экрана проще всего пользоваться одним из следующих способов:

1) После тщательной очистки внутренней поверхности баллона путём промывки, последовательно, подкисленной и щелочной водой, раствором хромпика в серной кислоте, проточной водой, дистиллированной водой и спиртом и, затем, сушки, её покрывают 10% раствором силиката калия и, удалив его излишек, просушивают слой в течение 2 минут, после чего пульверизатором наносят сухой порошок люминофора.

Окончательный слой должен быть достаточно толстым, чтобы в случае термоэлектронных исследований сквозь него не просвечивал бы накаливаемый до высоких температур исследуемый объект, мешая наблюдениям и фотографированию.

2) Второй способ, не применяющий силикатной связки, состоит в том, что внутреннюю поверхность баллона шлифуют (матировают) с помощью порошка алунда, просеянного через сито в 120 меш и вращающегося латунного диска, укрепленного на длинной оси. После этого матовую поверхность натирают всухую порошком люминофора. Этот способ даёт более равномерный, но зато слишком прозрачный слой, пригодный, следовательно, лишь для работы с автоэлектронной эмиссией.

3) Для получения больших однородных экранов удобнее следующий способ: смесь виллемита и вольфрамата кальция размалывается с ацетоном в фарфоровой шаровой мельнице в течение 6—8 час.

Непосредственно перед нанесением экрана к размолотой смеси добавляют несколько капель (на 50 см^3 суспензии) раствора нитроклетчатки в диатоле (диетил-карбонате) и наносят суспензию с помощью пульверизатора на стекло.

При этом нитроклетчатка способствует лучшему сцеплению слоя со стеклом. Для предотвращения распыления слоя под влиянием бомбардировки его электронами и попадания его частиц на исследуемый объект, а в случае работы с парами щелочных металлов и, особенно, цезия, для избежания их разрушительного действия на экран, последний необходимо предохранять защитным слоем силиката калия.

Для этой цели баллон с нанесённым слоем люминофора прогревают на воздухе до 550°C , выжигая при этом органические примеси, и, охладив баллон, осторожно (чтобы не повредить слой) наливают в него 5% раствор силиката калия. Слив излишек раствора, баллон просушивают, непрерывно вращая его для получения более равномерного покрытия.

Удалив протиранием слой с лишних мест, вновь прогревают баллон на воздухе до 550°C . Затем тщательно промывают большим избытком дистиллированной воды для удаления свободных частиц и снова повторяют весь процесс нанесения защитного слоя. Обработанный таким образом экран требует более длительного обезгаживания

во время откачки, но при этом полностью устраняется возможность загрязнения исследуемого объекта.

ж) Откачка проекторов. Процесс откачки проекторов, по-видимому, можно вести с помощью как парортутных, так и паромасляных диффузионных насосов. В первом случае, после прогрева прибора, в ловушку наливают жидкий воздух и проводят дальнейшую обработку проектора.

В случае же паромасляного насоса жидкий воздух не требуется, и достаточно охлаждения водой и применения специальных пароуловителей для масла по пути от насоса в систему проектора.

Однако при некоторых более точных исследованиях необходимо иметь в виду возможность как реакции накаливаемого объекта или других деталей проектора с остаточными парами масла, попадающего в прибор во время откачки, так и образования изолирующих плёнок за счёт полимеризации органических паров под влиянием электронной бомбардировки и каталитического действия металлов. Подобные плёнки наблюдал, например, Стюарт²⁴, доказавший их природу и происхождение в условиях чисто электронного разряда в вакууме со следами органических паров, остающихся даже при охлаждении ловушки жидким воздухом. Поэтому до проведения специальных опытов по сравнительной откачке отпаянных проекторов парортутными и паромасляными насосами и разработки процесса их откачки паромасляными насосами, гарантирующего отсутствие влияния остаточных паров масла, можно, по-видимому, рекомендовать откачку отпаянных проекторов лишь парортутными насосами с непрерывным охлаждением ловушки жидким воздухом.

Процесс откачки отпаяваемых проекторов обычно сводится к длительному (60—70-часовому) прогреву при температуре порядка 500—510°С (в случае баллонов из стекла нонекс или пайрекс), прокаливанию током исследуемой проволоки или подогревателя с остриём, прокаливанию коллектора токами высокой частоты и обезгаживанию ионизационного манометра, геттера и прочих вспомогательных деталей прибора. Помимо этого, экран может быть дополнительно прогрет электронной бомбардировкой. После тщательного обезгаживания и проведения всех процессов, необходимых для подготовки данного объекта к исследованию, проверяют, достигнут ли предельный возможный вакуум, затем распыляют геттер и приступают к отпайке прибора от насоса. При достаточно тщательной обработке во время откачки удаётся получать в отпаянных проекторах вакуум порядка 10^{-8} — $5 \cdot 10^{-9}$ мм рт. ст.

Примерно такого же порядка вакуум можно получить и при непрерывной откачке проекторов на шлифах, причём в случае парортутного насоса ловушка всё время должна охлаждаться жидким воздухом, в случае же паромасляных насосов необходимо применять специальные уловители, предохраняющие прибор от попадания в него паров масла.

Кроме того, при непрерывной откачке в отдельных случаях возможно также применение различного рода геттеров. Наконец, не исключена, повидимому, возможность построения отпаянных разборных проекторов с достаточно хорошим уплотнением шлифов и введением геттера в количестве, достаточном для поглощения газов в течение всего времени производства опытов с проектором.

з) Геттеры. Наилучшим видом геттера для проекторов является металлический барий; причём в наиболее чистом виде он получается из так называемого бариево-бериллатного геттера, представ-

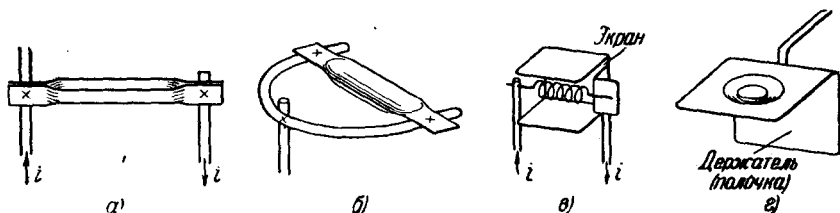


Рис. 16. Конструкции геттеров: а, б, в — бариево-бериллатный геттер, г — таблеточный геттер.

ляющего собой²⁶ узкую тонкую танталовую полоску, формованную в виде лодочки (см. рис. 16, а и б) или спираль из танталовой проволоки (рис. 16, в), покрытые слоем бериллата бария, получаемого прокаливанием эквимольных количеств окиси бериллия и гидрата окиси или карбоната бария при температуре порядка 1300°C . Такой геттер при первом прокаливании до 1200°K отдаёт чрезвычайно малое количество окклюдированного в нём газа, а затем, за счёт реакции тантала с бериллатом бария при температуре выше 1470° абс., он выделяет исключительно чистый барий, а образующееся при этом соединение окислов бериллия и тантала (танталат бериллия) чрезвычайно устойчиво при температурах распыления геттера.

Распыление бариево-бериллатного геттера возможно либо путём пропускания тока непосредственно по танталовой лодочке или спирали (рис. 16, а—в), для чего необходим один лишний впай для подвода тока (в качестве второго ввода может быть использован любой впай, имеющийся в приборе), либо путём прокаливания токами высокой частоты, для чего полоска геттера приваривается к никелевой дужке (рис. 16, б).

Возможно также применение в качестве геттера таблеток из сплава 50—65% бария с алюминием, укрепляемых в специальных капсулах, состоящих (см. рис. 16, г) из никелевого держателя (полочки) и никелевой же крышки, позволяющих распылять геттер путём прокаливания его токами высокой частоты. Для уменьшения газовыделения бариево-алюминиевыми таблетками иногда рекомендуется применять для них танталовые держатели и крышку. Для избежания попа-

дзния бария на исследуемый объект геттер обычно либо помещают в отдельном отростке, припаянном к проектору, либо, пользуясь направленным испарением бария, благодаря наличию специального экрана (рис. 16, в) или особой форме геттера (лодочка на рис. 16, а—б), помещают геттер в самом проекторе так, чтобы при распылении он ни в коем случае не мог попасть на исследуемый объект. Распыление геттера безусловно необходимо производить лишь после предварительного хорошего его обезгаживания в условиях достаточно высокого вакуума, проверяемого перед распылением геттера по ионизационному манометру.

Помимо геттерирования, барий, наравне со многими другими металлами, используется также для напыления на металлы с целью исследования, например, его абсорбции, миграции или испарения.

Стронций и кальций можно получать в чистом виде, аналогично барию, из бериллатов. Из щелочных металлов цезий, рубидий и калий удобно вводить в стеклянных ампулах с капиллярами, вскрываемыми механически в нужный момент. Натрий и литий можно получать из карбонатов, покрывая ими танталовую ленточку (аналогично бериллату бария). При прокаливании сначала разлагается карбонат, а затем, при более высоких температурах, образующиеся окислы реагируют с танталом, выделяя чистый металл. Для получения абсорбированного слоя и избежания образования на поверхности основного металла кристаллитов напыляемых металлов испарение последних необходимо вести при возможно более низких температурах, а именно не выше 1200° абс. для бария, 400° абс.— для калия и 300° абс.— для цезия, т. е. с таким расчётом, чтобы атомный слой получался примерно в течение 20—30 минут.

IV. НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ, СВЯЗАННЫЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРОЕКТОРОВ

1. Определение температуры исследуемого объекта

Для определения температуры проволоки или подогревателя острия в случае вольфрама можно вполне ограничиться вычислением температуры из значений тока накала и диаметра проволоки, пользуясь при этом таблицами, приведёнными в книге А. П. Иванова²⁶. Для тантала подобные таблицы даны в статье Малтера и Лэнгмюра²⁷. Определения температур проволок и острий из других металлов лучше всего производить с помощью оптического микропирометра. С этой целью в экране, нанесённом внутри баллона, прочищается небольшое отверстие против центральной части проволоки или подогревателя острия.

Точность определения температуры в обоих случаях составляет от $\pm 20^{\circ}$ до $\pm 50^{\circ}$, в зависимости от величины самой температуры. Температуру острия, приваренного к подогревателю, вполне можно,

как мы уже видели, считать приблизительно равной температуре центральной части петли подогревателя. В случае длинных нитей (10—20 см) влиянием холодных концов можно во всех случаях практики пренебречь.

2. Схема питания электронного проектора

Питание самого электронного проектора состоит в основном из питания накала исследуемого объекта и источника высокого напряжения для коллектора; кроме того, необходимы отдельные схемы питания ионизационного манометра, а также цепей распыления геттера и различных металлов, применяемых при исследованиях.

Выбор тока для накала объекта играет чрезвычайно большую роль, так как от рода тока накала зависит протекание процесса рекристаллизации проволоки. При достаточно низких температурах накал переменным током не даёт никаких изменений, при более высоких температурах наблюдаются рекристаллизация проволоки (рост кристаллов) и затем небольшое «вытравливание» поверхности за счёт испарения.

Совершенно иная картина наблюдается при накаливании проволоки постоянным током. Под действием падения напряжения вдоль нити наблюдается миграция отрицательных ионов металла в направлении положительного конца нити, причём это явление обнаруживается не только в случае поверхностных загрязнений посторонними веществами, но и в случае чистых металлов. При этом, в ~~конце~~ концов, проявляется ступенчатая рекристаллизация, что наблюдали для вольфрама и ряда других металлов Джонсон²⁸, а для тантала Мровка²⁹. Поэтому, для сохранения однородной поверхности, накал исследуемых проволок лучше всего осуществлять переменным током. Накал подогревателя острия в сферическом подогревателе также удобнее вести переменным током.

Мощность источников питания коллектора оказывается сравнительно низкой, благодаря отбору с исследуемого объекта чрезвычайно малых токов, не превышающих десятков или сотен микроампер в случае автоэлектронной эмиссии или нескольких миллиампер для накаливаемых катодов. Даже при потенциале коллектора порядка 10—15 киловольт потребляемая коллектором мощность не превышает нескольких десятков ватт, тем более, что с ростом эмиссии с катода необходимый для получения хорошего изображения потенциал значительно снижается. Особенно это заметно в случае тонких острий, т. е. при больших увеличениях, и при использовании автоэлектронной эмиссии, так как интенсивность последней определяется не потенциалом коллектора, а градиентом поля у проволоки или острия. В таблице I приведены напряжения на коллекторе U , при которых с вольфрамового острия диаметром d получается ток на шаровой коллектор диаметром в 14 см, равный 10^{-6} а.

Таблица 1

Зависимость потенциала коллектора U от диаметра острия d
при токе эмиссии 10^{-5} а

Материал острия	d в $\text{\AA}$	U вольт	Увеличение
Вольфрам	1120	3500	420 000
Плёнка бария на вольфраме	1120	2800	420 000
Вольфрам	180	790	1 200 000
Вольфрам	110	540	2 000 000

Даже при отборе термоэлектронных токов порядка 15—20 ма в проекторе Мартина⁵, с целью прогрева экрана, требовалось напряжение порядка 6—8 киловольт, что составляет мощность порядка 90—160 вт.

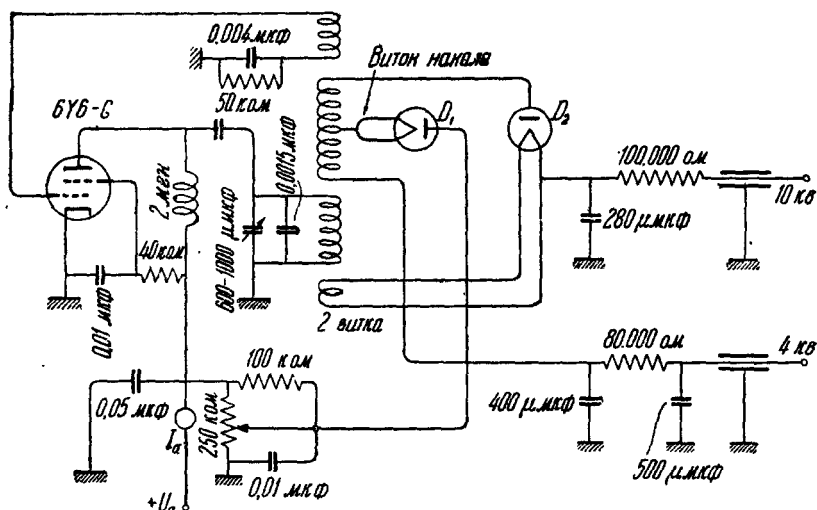


Рис. 17. Схема высокочастотного источника высокого напряжения для коллектора.

Следовательно, в любом случае можно воспользоваться для питания коллектора схемой так называемого высокочастотного источника постоянного тока, состоящего из высокочастотного лампового генератора, повышающего трансформатора высокой частоты и выпрямителя на специальных кенотронах с малой ёмкостью между катодом и анодом и прямонакальным катодом, питаемым от высокочастотного контура. Пример подобной схемы приведён на рис. 17.

а в таблице II приведены основные данные таких схем, рассчитанных на различные напряжения.

Таблица II

Основные данные высокочастотных источников высокого напряжения постоянного тока для питания электроннооптических приборов

Выпрямленное напряжение в кВ	Тип схемы выпрямления	Количество и тип ламп в генераторе	Количество и тип ламп в выпрямителе
1,2	полупериодная	955 (жёлудь)	Диод типа жёлудь
4	»	6AQ5 (миниатюрная)	1Z2 (миниатюрная)
4—7	»	6Y6 — G	8016
10	удвоение напряжения	6Y6 — G	2 шт. 8016
25—30	»	3 шт. 6Y6 — G	2 шт. спец. диодов
30	»	2 шт. 6Y6 — G	8016 и R6194A
30	утроение напряжения	2 шт. 6Y6 — G	3 шт. R6158A
90	»	4 шт. 807	3 шт. спец. диодов

Благодаря выпрямлению на высокой частоте пульсации выпрямительного тока легко отфильтровываются простым конденсаторным фильтром с конденсатором очень малой ёмкости, что делает схему при небольших мощностях совершенно безопасной, вследствие накопления на конденсаторах незначительных зарядов, и лишь при мощностях порядка десятков и сотен ватт необходима защитная блокировка схемы. Подобные схемы весьма компактны и, кроме того, позволяют легко стабилизировать выходное напряжение постоянного тока. Более подробное описание с расчётом схем можно найти в книге Рейха³⁰ и в статьях Шейда³¹, Маутнера и Шейда³².

3. Разрешающая способность электронного проектора и качество изображения на экране

а) Цилиндрический проектор. Разрешающую способность цилиндрического проектора можно оценить, рассмотрев пути двух электронов: одного, покидающего катод (проволоку) в радиальном направлении, и второго, уходящего из той же точки с начальной скоростью $\left(\frac{2kT}{m}\right)^{1/2}$, нормальной к этому радиусу. Угловое расстояние θ конечных точек путей обоих электронов на экране даётся формулой [см.³]

$$\theta = 2 \left(\frac{300kT}{eU} \right)^{1/2} \left(\ln \frac{D}{d} \right)^{1/2} \int_0^{(\ln D/d)^{1/2}} \exp(-x^2) dx,$$

что в случае $D=50,8$ мм, $d=0,127$ мм, $U=10$ кВ и $T=2000^\circ$ абс даёт $\theta=1^\circ$, или при $D=50$ мм размытость изображения точек

равна примерно 0,44 м.м. При пересчёте на объект, исходя из 400-кратного увеличения ($\frac{D}{d} = \frac{50,8}{0,127}$), получаем разрешающую способность, равную 1,1 микрона. Аналогичный подсчёт для начальной скорости вдоль оси проволоки показывает, что можно различать точки на расстоянии порядка 0,2 м.м. При больших увеличениях разрешающая способность в поперечном сечении проволоки возрастает. Поле у поверхности проволоки при заданном потенциале коллектора U можно вычислить по формуле

$$E = \frac{dU}{dr} = \frac{U}{(r-x) \ln \frac{R}{r}},$$

где r —радиус проволоки, R —радиус коллектора и x —расстояние от проволоки, на котором определяется градиент потенциала.

Благодаря тому, что увеличение происходит лишь в направлении, перпендикулярном оси цилиндра, эмиттирующие острия на поверхности катода должны были бы получаться на экране в виде весьма тонких линий по окружности экрана. В действительности же они изображаются вытянутыми по окружности экрана яркими довольно широкими пятнами (см. рис. 2, а).

Причиной этого является неравномерность поля вблизи таких острий. Кроме того, эти пятна могут дополнительно размываться под влиянием контактных разностей потенциалов между отдельными участками поверхности, обладающими различными работами выхода. Весьма наглядную картину местных неравномерностей на поверхности катода даёт приведённое на рис. 5 изображение оксидного катода с образованием «лунного пейзажа»; то-есть с явным преобладанием эмиссии с краёв участков растрескавшегося слоя оксида.

б) Сферический проектор. Разрешающая способность сферического проектора с автоэлектронной эмиссией с острия определяется в основном двумя факторами, а именно: явлениями диффракции и распределением обеих тангенциальных к сфере закругления острия компонент начальных скоростей электронов. Согласно Мюллеру⁷, диаметр D_0 окружности рассеяния изображения точки на экране может быть вычислен из уравнения

$$D_0 = \frac{0,78R}{U^{1/2}} \sqrt{2,89e + 15,5 \frac{\varphi^2}{U^{3/2}}}$$

или, в пересчёте на объект, разрешающая способность определяется величиной

$$d_0 = \frac{U^{1/2}}{\varphi^2} \sqrt{2,89e + 15,5 \frac{\varphi^2}{U^{3/2}}},$$

где φ —работа выхода, e —заряд электрона, R —радиус коллектора и U —потенциал коллектора. При этом первый член под корнем учитывает влияние начальных скоростей, а второй—диффракцию.

К этой величине следует ещё добавить влияние контактных разностей потенциалов между отдельными гранями или пятнами на поверхности объекта. Практически, в случае приведённых выше увеличений в 420, 1200 и 2000 тысяч крат, величина d_0 равнялась соответственно 40, 15 и 12 Å. Следует при этом отметить, что в случае острия диаметром в 360 Å на экране ещё хорошо различалась структура вольфрама, в то время как остриё диаметром в 220 Å этой структуры уже не позволяло различать.

В заключение в таблицах III и IV приведены основные данные цилиндрических и сферических проекторов, применявшихся различными авторами.

Таблица III

Основные данные цилиндрических электронных проекторов

Автор и год опубликования работы	Поверхности и явления, подвергавшиеся исследованию	Диаметр экрана D в мм	Диаметр провсложки d в микронах	Полученные увеличения
Джонсон и Шокли ³ 1936	W, Th—W, Cs—W, K—W рекристаллизация W	50	125	~400
Бенжамен и Дженкинс ⁴ 1938—40—42 гг.	Th—W, Ba—W миграция Th и Ba	35	120	~300
Нельсон (Никольс ¹⁶) 1940	Чистый W	50	120	400
Беккер и Мур ¹² 1940 г.	Ba—W миграция	35	120	~300
Даниель ²⁰ 1941	очистка W, Ta и Mo от загрязнений	50 (?)	25 и 50	2000, 1000
Робинсон ¹⁵ 1942 г.	скорость рекристаллизации W	50 (?)	75 и 125	660—400
Ягудаев и Шуппе ¹⁴ 1947	ThW, W, окисный катод и реакции J_2 —W и J_2 —ThW	60	81—100	750—600

Таблица IV

Основные данные сферических электронных проекторов

Автор и год опубликования работы	Поверхности и явления, подвергавшиеся исследованию	Расстояние от острия до экрана R в мм	Диаметр острия d в ми- кронах	Полученные увеличения
Мюллер ⁸ 1937—1938	W, Mo, Ni, Cu, Fe, Th—W, O—W, Ba—W, испарение, миграция, адсорб- ция	100	до 0,5	100 000—200 000 и до 1 000 000
Мартин ⁵ 1939	W, Cs—W, Ba—W, Cs—O—W, Ba—O—W адсорб- ция, испарение	110	сфера диамет- ром в 1 см	22
Хефер ²⁸ 1940	Ba—W Cs—W K—W и W	75	до 2,6	27 000
Бенжамен и Дженкинс ⁴ 1940—1942	W, Mo, Ni, W—Th Ba—W, Na—W, Th—Mo, Ba—Mo, Na—Mo, миграция, испарение, адсорбция	50	~ 0,5	~ 200 000
Даниель ⁶ 1942	Чистый W Th—W	50	0,4—1,0	100 000—250 000
Мюллер ⁷ 1943	W, Ba—W	33	0,224 0,036 0,022	420 000 1 200 000 2 000 000

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 1 Брюхе и Шерцер, Геометрическая электронная оптика Лен-издата, 1943, гл. VI.
- 2 Сборник „Методы изучения катализаторов“, изд. АН СССР 1948, разд. I, стр. 58—74 (статья Шехтера).
- 3 R. P. Johnson и W. Shockley, Phys. Rev. 49, 436 (1936).
- 4 M. Benjamin и R. O. Jenkins, Nature No. 3623, 599 (1939); Proc. Roy. Soc. A176, No. 3, 965, 262 (1940), A180, No. 981, 225 (1942).

5. S. T. Martin, Phys. Rev. 56, 947 (1939).
6. J. H. Daniel, Phys. Rev. 61, 9/10, 657 (1942).
7. E. W. Müller, Zeits. f. Phys. 120, No. 5/6, 270 (1943).
8. E. W. Müller, Zeits. f. Phys. 105, 541 (1937); 108, 668 (1938).
9. H. Mahl, Zeits. f. Phys. 108, 771 (1938).
10. B. Gossling, J. I. E. E., 71, 461 (1932).
11. M. Benjamin a. R. O. Jenkins, Phil. Mag. 26, 1049 (1933).
12. J. A. Becker a. G. E. Moore, Phil. Mag. 29, 129 (1940).
13. A. J. Ahearn a. J. A. Becker, Phys. Rev. 54, 448 (1938).
14. М. Д. Ягудаев и Г. Н. Шуппе, Бюлл. Ак. Н. Уз. ССР., № 7, 7—11, (1947).
15. C. S. Robinson, J. Appl. Phys. 13, No. 10, 647 (1942).
16. M. H. Nichols, Phys. Rev. 57, 297 (1940).
17. G. W. Fox a. F. M. Bayley, Phys. Rev. 59, 174 (1941).
18. R. P. Johnson, A. B. White a. R. B. Nelson, Rev. Sc. Instr. 9, 253 (1938).
19. Л. Я. Попилов, Электрополировка металлов, Машгиз (1947).
20. J. H. Daniel, J. Appl. Phys. 12, No. 8, 645 (1941).
21. K. B. Blodgett and I. Langmuir, Rev. Sc. Instr. 5, 321 (1934).
22. G. L. Tawney, Rev. Sc. Instr. 10, 152 (1939).
23. R. Haefer, Zeits. f. Phys. 116, No. 9/10, 604 (1940).
24. R. L. Stewart, Phys. Rev. 45, 483 (1934).
25. E. A. Lederer, RCA Review 4, No. 3, 117 (1937).
26. А. П. Иванов, Электрические источники света, т. I, Г. Э. Изд. 1938, стр. 145 и 152.
27. L. Malter and D. B. Langmuir, Phys. Rev. 55, 743 (1939).
28. R. P. Johnson, Phys. Rev. 54, 459 (1938).
29. B. A. Mrowca, J. Appl. Phys. 14, 684 (1943).
30. Дж. Г. Рейх, Теория и применения электронных приборов, Г. Э. Изд. 1948, гл. 14.
31. O. H. Schade, Proc. I. R. E. 31, No. 4, 158 (1943).
32. R. S. Mautner and O. H. Schade, RCA Review 8, No. 1, 43 (1947).