

М.И. Корсунский

Физика рентгеновых лучей

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 53
ББК 22.3
М11

М11 **М.И. Корсунский**
Физика рентгеновых лучей / М.И. Корсунский – М.: Книга по Требованию,
2021. – 306 с.

ISBN 978-5-458-57833-2

ISBN 978-5-458-57833-2

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2021

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2021

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Серия Книжный Ренессанс

www.samizday.ru/reprint

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ПОГЛОЩЕНИЕ РЕНТГЕНОВЫХ ЛУЧЕЙ

1. Коэффициент поглощения рентгеновых лучей	104
2. Законы истинного поглощения	109
3. Спектр поглощения	117
4. Природа скачка поглощения	120
5. Смещение края полосы поглощения	126
6. Тонкая структура края полосы поглощения	130

ГЛАВА ПЯТАЯ

ФОТОЭФФЕКТ

1. Методы определения скорости фотоэлектронов	140
2. Метод задерживающего поля	142
3. Метод измерения скорости электронов по пробегу	143
4. Анализ скоростей фотоэлектронов	—
5. Сложный фотоэффект (эффект Оже)	145
6. Механизм испускания фотоэлектронов второго рода	146
7. Пространственное распределение фотоэлектронов	150
8. Выход фотоэлектронов	153
9. Ионизация, производимая рентгеновыми лучами	158
10. Выход характеристического излучения	159

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ТЕОРИЯ ПОГЛОЩЕНИЯ РЕНТГЕНОВЫХ ЛУЧЕЙ

1. Поглощение с точки зрения теории импульсов	163
2. Квантовый характер поглощения рентгеновых лучей	164
3. Теория Крамерса	166
4. Теория поглощения рентгеновых лучей и фотоэффекта на основе волновой механики	168
5. Теория тонкой структуры края полосы поглощения	169

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

РАССЕЯНИЕ РЕНТГЕНОВЫХ ЛУЧЕЙ

1. Рассеяние с классической точки зрения	172
2. Рассеяние одним электроном	173
3. Массовый коэффициент рассеяния	175
4. Экспериментальная проверка законов рассеяния	178
5. Рассеяние, производимое парой рассеивающих центров	183
6. Рассеяние многими центрами	188
7. Атомный фактор	190
8. Рассеяние, производимое группами атомов—молекулой	192
9. Опыты по наблюдению рассеяния рентгеновых лучей в газах и жидкостях	194
10. Рассеяние рентгеновых лучей в газе	198
11. Рассеяние связанным электроном	200

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

РАССЕЯНИЕ РЕНТГЕНОВЫХ ЛУЧЕЙ ТВЕРДЫМИ ТЕЛАМИ

1. Интерференция рентгеновых лучей в кристаллах	202
2. Нахождение постоянной решетки	206
3. Методы структурного анализа	211
а) Метод Дебая и Шерера	—
б) Метод Лауэ	212
в) Метод Шнибольда-Поляни	214

4. Интенсивность рентгеновых лучей, рассеянных кристаллическим веществом	215
5. Рассеяние, производимое кристаллом малых размеров	217
6. Рассеяние несовершенным кристаллом	222
7. Рассеяние мелкокристаллическим образцом	224
8. Рассеяние совершенным кристаллом	226
9. Поглощение через отражение (extinction)	232
10. Структурный множитель	234
11. Температурный фактор	236
12. Распределение электронов в атоме	239
13. Распределение электронов в кристалле	245
14. Радиальное распределение электронов в атоме	248

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

РАССЕЯНИЕ РЕНТГЕНОВЫХ ЛУЧЕЙ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ТЕОРИИ КВАНТОВ

1. Рассеяние свободными электронами	250
2. Проверка теории квантового рассеяния	253
3. Рассеяние связанными электронами	258
4. Элементарный комптон-аффект	261
5. Волновая трактовка комптон-аффекта	263

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ

ПРЕЛОМЛЕНИЕ РЕНТГЕНОВЫХ ЛУЧЕЙ

1. Коэффициент преломления рентгеновых лучей	266
2. Методы определения коэффициента преломления	267
3. Полное отражение рентгеновых лучей	275
4. Линейная дифракционная решетка	276
5. Заряд электронов	280
6. Аномальная дисперсия рентгеновых лучей	281
7. Влияние поглощения на преломление рентгеновых лучей	284
Литература	287

ВВЕДЕНИЕ

Когда мы сталкиваемся с каким-либо новым открытием или знакомимся впервые с каким-нибудь явлением природы, то первым вопросом, возникающим у нас, естественно, является вопрос: «Что это такое? В чем сущность явления? Какова его природа? Каковы причины его возникновения? Каков механизм, управляющий его поведением?». Очевидно при этом, что как при описании самого явления, так и при попытках установления объяснения его мы пользуемся понятиями и представлениями, создавшимися у нас при наблюдении других, хорошо изученных явлений.

Определяя и классифицируя явление, мы сопоставляем его с другими, нам уже известными и имеющими более широкий характер. Конечно, заранее мы не можем быть уверены, что такое сопоставление может быть проведено, что оно законно, так как не исключена возможность того, что описание новых явлений потребует установления новых закономерностей, неизвестных ранее; точно так же понимание новых явлений может потребовать от нас создания новых понятий, новых представлений, возникновение которых при рассмотрении ранее известных явлений произойти не могло. Рассмотрение явлений такого рода приведет нас в конечном итоге к ряду противоречий, устранение которых окажется возможным лишь путем пересмотра привычных представлений — путем создания новых понятий.

Затруднения, которые испытывала физика в течение последних двух десятков лет при объяснении атомных явлений при разрешении вопроса о природе света, являются блестящей иллюстрацией вышенаписанного положения. Современная теория вещества (волновая теория вещества) и света (квантовая теория) не установила еще новых понятий, которые позволили бы нам наглядно описывать атомные явления, но вскрыла корни наших затруднений и источники противоречий, которые в основном и заключались в том, что мы пользовались привычными нам понятиями и представлениями там, где пользоваться ими нельзя.

Рассмотрим коротко эволюцию представления о рентгеновых лучах. В 1895 г. Рентген опубликовал свою первую работу об открытии им нового вида лучей. Конец XIX в. вообще был богат открытиями разного рода лучей. Сюда относятся открытие катодных лучей, открытие канальных лучей и, наконец, открытие радиоактивного излучения. Новые лучи, открытые Рентгеном, обладали весьма многими замечательными свойствами, из которых самым удивительным казалась способность этих лучей проходить через значительные толщи непрозрачных для видимого света веществ. Первое время природа этих лучей казалась совершенно загадоч-

ной и необъяснимой, что и явилось причиной того, что их называли «Х-лучами», — это название было дано Рентгеном и удержалось еще и поныне в ряде стран Европы и Америки.

Рентгеновы лучи — это было установлено в первых же опытах — не изменяют своего направления при прохождении их в магнитном и электрическом полях.

Эти наблюдения позволили Рентгену сделать заключение, что Х-лучи не могут представлять собой поток заряженных частиц (например катодных лучей), а представляют собой колебания эфира. Отличие Х-лучей от обычных лучей — видимых, ультрафиолетовых и других — заключалось по предположению Рентгена в том, что Х-лучи являются продольными волнами в эфире, в то время как лучи видимые, инфракрасные и ультрафиолетовые суть поперечные волны. Гипотеза Рентгена о продольном характере Х-лучей не получила в дальнейшем, однако, никакого подтверждения и была чрезвычайно скоро оставлена. В конце XIX в. Стокс, а затем Томсон высказали предположение, что рентгеновы лучи представляют собою чрезвычайно короткий электромагнитный импульс, получающийся в результате резкого торможения электронов при столкновении с атомами, образующими вещество антикатада. Дальнейшее изучение свойств рентгеновых лучей обнаружило известную аналогию между поведением рентгеновых лучей и лучей видимого света, и эта аналогия в процессе изучения рентгеновых лучей делалась все более и более значительной. Так, Баркла обнаружил поляризацию рентгеновых лучей, доказав прямыми опытами поперечный характер колебаний рентгеновых лучей. Лауэ, Фридрих и Книппинг обнаружили явление интерференции рентгеновых лучей. Ученику Зигбана — Стенстрему удалось обнаружить преломление рентгеновых лучей. Опыты по поляризации и по интерференции рентгеновых лучей сыграли решающую роль в установлении природы рентгеновых лучей. Видимые ультрафиолетовые лучи, рентгеновы лучи — явления одного и того же порядка; это — электромагнитные волны, отличаются друг от друга лишь длиной волны. Длина волны рентгеновых лучей оказалась порядка 10^{-8} — 10^{-9} см — в несколько тысяч раз меньше длины волны лучей видимого света.

Итак, рентгеновы лучи сходны по своей природе с обычным видимым светом; вопрос о природе рентгеновых лучей является вместе с тем и вопросом о природе света вообще.

История развития учения о свете чрезвычайно богата борьбой различных представлений и течений. Корпускулярная концепция Ньютона, идеи Гюйгенса о волнах, различного рода механистические представления о колебаниях эфира, электромагнитные волны Максвелла и, наконец, кванты света Эйнштейна-Планка. Физика XX в. — физика последних трех десятиков лет — служила ареной борьбы последних двух воззрений на природу света. Ряд явлений, как то: поляризация света, интерференция и дифракция его, служили опорой волновой природы света, в то время как ряд других явлений, обнаруженных в основном именно в XX в., приводил к совершенно противоположному представлению о свете. Явления фотоэффекта, наблюдаемые впервые с ультрафиолетовыми лучами, а затем и с рентгеновыми, явления, связанные с поглощением и испусканием рентгеновых лучей, комптон-эффект и другие явления могут быть

объяснены только на основе представлений о свете как о квантах. Под знаком противоречий в представлениях о природе света развилась физика в первые 20 лет XX в.

В последние годы к противоречивым представлениям о свете прибавились противоречивые представления о веществе. В 1927 г. Девисон и Джермер при прохождении (отражении) электронов через кристалл никеля обнаружили явление, аналогичное интерференции рентгеновых лучей при прохождении их через кристалл. Подобного рода явления были затем обнаружены Томсоном, Марком и Вирлем и рядом других исследователей. Несколько ранее было обнаружено Рамзауэром аномально малое поглощение медленных электронов при прохождении их через благородные газы, понимание которого на основе чисто корпускулярных представлений об электроне оказывалось невозможным.

В этих опытах, так же как и в опытах по интерференции электронов, мы столкнулись с необходимостью приписывать электронам свойства волн. Противоречивый характер (волна—частица) оказался не только свойством носителей света, — он в одинаковой мере относится и к элементарным частицам вещества — электронам и (как это показано в последних опытах Руппа) протонам. Высказанное выше утверждение, которое мы привели как результат опытных данных, нашло свое углубленное выражение в идеях де-Бройля, послуживших основой для современной — квантово-волновой теории, развитой Шредингером, Гейзенбергом, Борном, Дираком и рядом других крупнейших физиков-теоретиков. Де-Бройль предположил, что всякая движущаяся частица сопровождается волной, названной им фазовой волной, длина которой определяется скоростью и массой движущейся частицы. Если m — масса, а v — скорость частицы, то длина фазовых волн λ определяется соотношением:

$$\lambda = \frac{h}{mv},$$

где h — известная постоянная Планка — $6,65 \times 10^{-27}$ эрг·сек.

Созданная на идеях де-Бройля новая волновая механика с ее математическим аппаратом дала нам возможность без внутренних противоречий и каких-либо специальных допущений описать большинство известных атомных явлений и предсказать правильно огромное число новых. Вместе с тем волновая механика оказалась бессильной дать наглядное представление о носителях света и вещества и о протекании ряда физических явлений. Вряд ли, однако, мы это бессилие должны приписывать квантовой теории вещества. Суть дела (согласно Гейзенбергу) — в том, что понимание свойств элементарных частиц материи не может быть достигнуто с помощью понятий и представлений, установленных нами из наблюдения явлений макроскопического мира. Для наглядного представления элементарных частиц нам нужны новые понятия, новые представления. Создание этих понятий, отражающих свойства элементарных частиц материи — ближайшая задача физики. А в настоящий момент, делая попытки наглядного описания атомных явлений, мы должны пользоваться понятием и волн и корпускул, но лишь как удобными аналогиями и привычными нам сопоставлениями, хотя полностью удовлетворительными они являются лишь для мира макроскопического.

При описании свойств рентгеновых лучей и их взаимодействия с веществом, составляющем задачу настоящей книги, мы будем пользоваться все время этими элементарными представлениями о волнах и корпускулах, не пытаясь, однако, установить «единую точку зрения» и помня, что эти представления созданы лишь по аналогии с макроскопическим миром и могут применяться лишь в той мере, в какой они необходимы для наглядного представления и описания изучаемых явлений.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ПОЛУЧЕНИЕ РЕНТГЕНОВЫХ ЛУЧЕЙ И МЕТОДЫ ИХ ИЗМЕРЕНИЯ

Прошло уже около сорока лет с тех пор, как были открыты рентгеновы лучи (1895 г.), и в настоящее время условия их получения известны достаточно хорошо.

Мы знаем теперь, что рентгеновы лучи возникают всякий раз, когда быстро летящие электроны сталкиваясь с атомами вещества, теряют при этих столкновениях свою энергию. Для получения рентгеновых лучей, следовательно, в нашем распоряжении должен находиться прибор, в котором могут быть получены свободные электроны, и аппарат, генерирующий высокое напряжение, т. е. создающий внутри прибора достаточное электрическое поле, ускоряющее эти электроны. Необходимо, далее позаботиться о том, чтобы получающие ускорение, т. е. накапливающие энергию, электроны не могли ее растерять благодаря столкновениям с молекулами воздуха, и, наконец, необходимо создать условия, при которых электрон, накопивший достаточный запас энергии, быстро ее терял бы путем резкого торможения.

Существует весьма большое количество вариантов аппаратуры, в которой осуществляются эти условия. Детальный разбор их не входит в нашу задачу ¹⁾. Мы ограничимся здесь рассмотрением лишь двух-трех типичных примеров, встречающихся на практике наиболее часто.

1. Высокое напряжение

На рис. 1 и 2 показаны две схемы для получения высокого напряжения. В обоих случаях источником высокого напряжения является трансформатор напряжения T с коэффициентом трансформации порядка тысячи, управляемый системой автотрансформаторов, реостатов или других приборов, регулирующих напряжение. В схеме рис. 1 во вторичную цепь трансформатора последовательно с трубкой R , дающей рентгеновые лучи, включен выпрямитель (обычно кенотрон) K , пропускающий ток только в одном направлении. Вследствие этого, напряжение на рентгеновской трубке будет поддерживаться только в течение одной половины периода.

Этот недостаток устраняется при включении рентгеновской трубки по схеме, изображенной на рис. 2 (схема Грейнахера). Здесь напряжение

¹⁾ Читателей, интересующихся схемами аппаратов и условиями работы их и рентгеновских трубок, мы отсылаем к книгам: Кэп, Рентгеновы лучи, и Глокер, Рентгеновы лучи и испытания материалов.

на рентгеновской трубке остается все время приблизительно постоянным. В самом деле, в первый полупериод, когда на полюсе A имеется положительный потенциал, ток проходит через кенотрон K_1 и заряжает конденсатор C_1 до максимального потенциала. Во второй полупериод работы

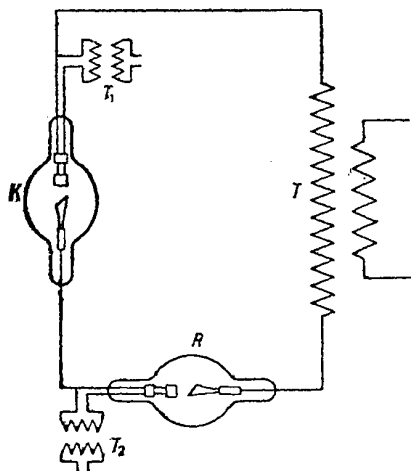


Рис. 1.

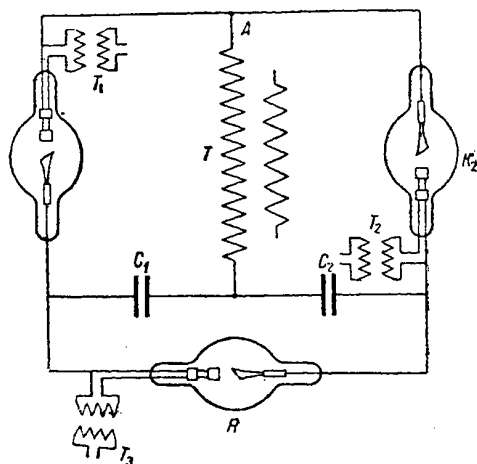


Рис. 2.

трансформатора изменяется знак потенциала на полюсе A , и ток проходит через кенотрон K_2 , заряжая второй конденсатор C_2 . Таким образом после прохождения целого периода оба конденсатора оказываются заряженными, и к полюсам рентгеновской трубки оказывается приложенным напряжение, равное удвоенному максимальному напряжению вторичной обмотки трансформатора (в действительности несколько меньше, так как за этот период конденсаторы частично разряжаются вследствие прохождения тока через рентгеновскую трубку).

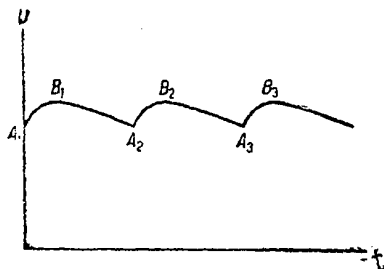


Рис. 3.

В дальнейшем, в процессе работы установки, будет происходить лишь очередная дозарядка каждого из конденсаторов. Рис. 3 дает график зависимости «напряжение — время» для этой установки. Участки кривых A_1B_1 , A_2B_2 ... соответствуют максимальному напряжению на трансформаторе. В это время совершается дозарядка конденсаторов, которая

благодаря малому сопротивлению кенотронов происходит сравнительно быстро. Участки B_1A_2 , B_2A_3 соответствуют времени, в течение которого происходит изменение напряжения на трансформаторе от максимального его значения одного знака до такого же напряжения другого знака, равного по величине разности потенциалов, устанавливающейся на обкладке

благодаря разряду через трубку. Этот промежуток времени по величине близок к полупериоду питающего трансформатор тока.

Подбором емкости конденсаторов можно варьировать амплитуду пульсации напряжения в такой установке и сделать ее достаточно малой.

2. Рентгеновские трубки

Существуют два основных типа рентгеновских трубок, различающиеся по способу получения в них пучка свободных электронов.

В одном из этих типов трубок используется свойство металлов испускать электроны при нагревании их до высокой температуры. Число электронов, испускаемых металлом, зависит от температуры, а именно, растет с возрастанием последней. В настоящее время для выражения зависимости силы электронного тока (т. е. величины заряда электронов, испускаемых нитью в единицу времени) принимается формула:

$$I = AT^b e^{-\frac{b}{T}}, \quad (1, 1)$$

находящаяся в удовлетворительном согласии с экспериментальными данными и вытекающая из теоретического рассмотрения условий вылета электрона из металла. В формуле (1, 1) I представляет силу тока, а A и b — константы, из которых A , по теории, является универсальной постоянной, имеющей для всех металлов численное значение $60,2 \text{ амп/см}^2/\text{град}^2$. Величина b различна для различных металлов. Для вольфрама — которого обычно готовят катоды рентгеновских трубок, $b = 5,5 \cdot 10^4$.

Однако испускание электронов нагретым металлом не может совершаться неопределенно долго, так как электроны, вылетевшие из металла, создают вблизи металла объемный заряд, препятствующий дальнейшему вылету электронов из металла. Для того, чтобы испускание электронов могло совершаться непрерывно, нужно «уводить» электроны, вылетевшие из металла, что достигается созданием электрического поля вокруг металлической проволоки, излучающей электроны. Чем большее количество электронов испускается накаливаемой проволокой, тем большую разность потенциалов нужно создать, чтобы увести от катода все электроны, испускаемые проволокой. Если катод (вольфрамовая проволока) нагрет до температуры, при которой заряд электронов, вылетающих с него в 1 сек., будет I , то разность потенциалов, которую необходимо создать между катодом и анодом для того, чтобы все электроны, испущенные катодом в 1 сек., достигли в 1 сек. же анода, определяется соотношением:

$$U_m = C \cdot I^{\frac{2}{3}}. \quad (1, 2)$$

При разности потенциалов меньшей, чем значение U_m , не все электроны, испущенные проволокой, будут отведены к аноду, электроны начнут накапливаться у катода и эмиссия проволоки уменьшится до того значения, при котором число электронов, испускаемых проволокой, станет равно числу электронов, уводимых полем. Таким образом при разности потенциалов меньшей, чем U_m , через трубку будет идти ток меньший, чем это следует из формулы (1, 1). При разности потенциалов большей, чем

U_m , через трубку будет идти тот же ток, что и при разности потенциалов равной U_m , так как сила тока — количество электричества в 1 сек. — между катодом и анодом не может быть больше, чем количество электричества, испускаемого проволокой в 1 сек. Величина последнего, как было указано выше, и определяется формулой (1, 1).

При достаточно большой разности потенциалов, приложенной к рентгеновской трубке, мы можем изменением температуры катода менять его эмиссию, а следовательно и ток через трубку. На рис. 4 изображена графически зависимость тока через трубку от напряжения при определенном накале катода, а на

рис. 5 — зависимость силы тока от накала катода при определенном напряжении.

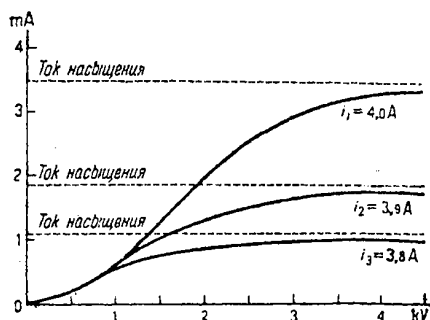


Рис. 4.

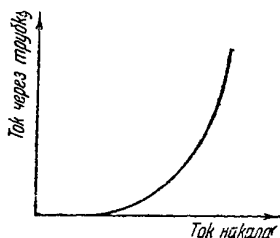


Рис. 5.

Таким образом, изменяя температуру вольфрамовой проволоки, служащей катодом нашей рентгеновской трубки, мы имеем возможность в широких пределах регулировать количество испускаемых катодом электронов. Это обстоятельство и является одним из основных преимуществ трубок описанного типа. Анодом трубки или антикатодом (последнее название в силу традиции является наиболее употребительным) служит металлическая пластинка, материал которой берется различным в зависимости от назначения трубки; она является местом торможения электронов, т. е. местом возникновения рентгеновых лучей.

Оба электрода помещаются внутрь замкнутого сосуда с металлическими или стеклянными стенками, из которого откачан воздух до давления порядка 10^{-6} мм. Нг. При таком давлении электроны, движущиеся от катода к антикатуду, почти не претерпевают столкновений с молекулами воздуха (сталкивается лишь 1 электрон из 10^{10000}), и не происходит окисления раскаленной вольфрамовой нити.

Трубки такого типа, введенные в практику впервые Кулиджем, называются рентгеновскими трубками Кулиджа или трубками с горячим катодом. Существенным в работе трубок этого типа является наличие вокруг нити металлического цилиндра, дающего возможность фокусировать электронный пучок, испускаемый нитью. В зависимости от формы этого цилиндра электронный пучок, а следовательно и фокус — место пересечения лучей этого пучка с антикатодом, будет иметь различную форму. Наиболее часто осуществляют либо точечный фокус (в виде площадки в 1 мм^2) либо линейчатый.