

Курс лекций по дисциплине

«Вакуумные и плазменные  
приборы и устройства»

# Список использованной литературы

1. Сушков А. Д. Вакуумная электроника: Физико-технические основы: Учеб. пособие. СПб.: Лань, 2004.
2. Булычев А. Л., Лямин П. М., Тулинов Е. С. Электронные приборы: Учеб. пособие. М.: Энергоиздат, 2000.
3. Дулин В. Н. и др. Электронные приборы (учебник). М.: Энергоиздат, 1989.
4. Кацман Ю. А. Электронные лампы (учебник). М., Высшая школа, 1979.
5. Жигарев А. А., Шамаева Г. Г. Электронно-лучевые и фотоэлектронные приборы (учебник). М.: Высшая школа, 1982 .
6. Барченко В. Т., Быстров Ю. А., Колгин Е. А. Ионно-плазменные технологии в электронном производстве / Под ред. Ю. А. Быстрова, СПб.: Энергоатомиздат, 2001.
7. Голант В. Е., Жилинский А. П., Сахаров И.Е. Основы физики плазмы. М.: Атомиздат, 1977.
8. Учеб. пос.: Ионно-плазменные и ионно-лучевые устройства технологического назначения / С. В. Деньбновецкий, В. Т. Барченко, В. Д. Белоусов и др., ч.3, Киев: НМКВО, 1992.
9. Проектирование электроплазменных технологий и автоматизированного оборудования / В. М. Таран, С. С. Лисовский, А. В. Лясникова / под ред. В. Н. Лясникова – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э Баумана, 2005.

# Вакуум

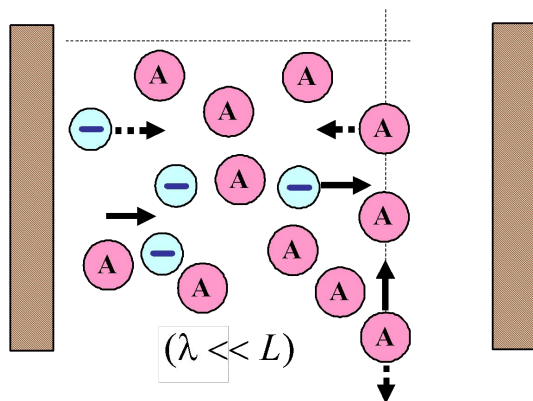
– пространство, свободное от вещества. В технике и прикладной физике под вакуумом понимают среду, содержащую газ при давлении значительно ниже атмосферного. Вакуум характеризуется соотношением между длиной свободного пробега молекул газа  $\lambda$  и характерным размером среды  $d$ . Под  $d$  может приниматься расстояние между стенками вакуумной камеры, диаметр вакуумного трубопровода и т. д.

Степень разрежения определяется соотношением между числом взаимных столкновений молекул и числом столкновений молекул со стенками вакуумной системы.

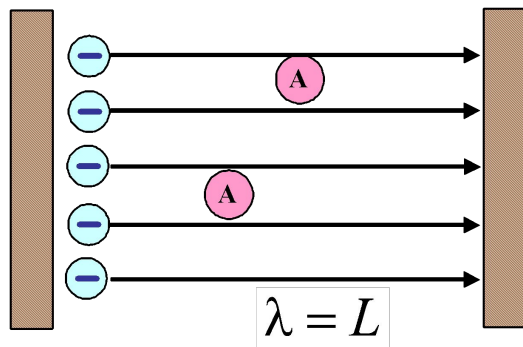
Отношение  $K_n = L / d_{\text{эф}}$  называется критерием Кнудсена.

В зависимости от значения этого критерия различают вакуум низкий, средний и высокий.

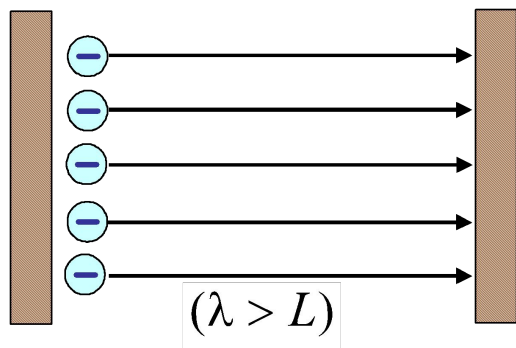
# Вакуум



Низкий вакуум – состояние газа, при котором взаимные столкновения между молекулами преобладают над столкновениями молекул газа со стенками вакуумной камеры, что соответствует условию  $K_n \ll 1$ . При этом длина свободного пробега молекул газа намного меньше размеров вакуумной камеры (от 100 кПа до 100 Па).



Средний вакуум – состояние газа, при котором частоты соударений молекул друг с другом и со стенками вакуумной камеры одинаковы. При этом  $K_n = 1$  (от 100 Па до 0,1 Па).



Высокий вакуум – состояние газа, при котором столкновения молекул со стенками вакуумной камеры преобладают над взаимными столкновениями молекул газа. При этом  $K_n \gg 1$  (0,1 Па до  $10^{-5}$  Па).

# Ионизированный газ и плазма

Газ – физическая система, состоящая из большого числа одноименных частиц высокой подвижности. В данной системе энергия взаимодействия частиц мала по сравнению с кинетической энергией самих частиц. К газам относят не только системы из атомов и молекул, но и системы из других частиц, включая плазму.

Плазма представляет собой частично или полностью ионизированный газ, который состоит из положительно и отрицательно заряженных частиц, находящихся в среде нейтральных частиц.

Однако плазмой можно назвать не всякий ионизированный газ, а лишь тот, который обладает особыми свойствами, не выражаемыми отдельными частицами. Эти свойства проявляются вследствие дальнего характера кулоновских сил, обуславливающих взаимодействие заряженных частиц, имеющих коллективный характер.

# Ионизированный газ и плазма

Основным свойством плазмы является ее квазинейтральность как в пространстве, так и во времени.

Отрицательный заряд электронов в ней почти точно нейтрализует положительный заряд ионов. При любых воздействиях на нее плазма стремится сохранить свою квазинейтральность. Если в каком-то месте происходит случайное смещение части электронов, создающее избыток электронов в одном месте и недостаток в другом, в плазме возникает сильное электрическое поле, которое препятствует разделению зарядов и быстро восстанавливает квазинейтральность.

Характерный масштаб, в пределах которых это разделение возможно, может быть определен из условия равенства энергии теплового движения частиц и энергии кулоновского взаимодействия. Данный размер получил название дебаевской длины, или дебаевского радиуса, экранирования:

$$r_D \approx \sqrt{\frac{\epsilon_0 k T_e}{e^2 n}}.$$

# Ионизированный газ и плазма

Свойства плазмы начинают проявляться в ионизированном газе в случае выполнения соотношения:

$$r_D \ll L,$$

где  $L$  – характерный размер объема, в котором наблюдается ионизованный газ. Возникающие локальные концентрации зарядов или вносимые в систему внешние потенциалы экранируются на расстояниях, малых по сравнению с  $L$ , так что основной объем плазмы не содержит значительных электрических потенциалов и полей.

Таким образом, вопрос о том, обладает или не обладает ионизованный газ свойствами плазмы, зависит не только от параметров, но и от размеров области занимаемой плазмой, а фазовый переход превращения ионизованного газа в плазму не является ярко выраженным, а происходит плавно.

# Газовый разряд

это совокупность процессов, возникающих при протекании электрического тока через вещество, находящееся в газообразном состоянии. Обычно протекание тока становится возможным только после достаточной ионизации газа и образования плазмы. Ионизация происходит за счёт столкновений электронов, ускорившихся в электромагнитном поле, с атомами газа. При этом возникает лавинное увеличение числа заряженных частиц, поскольку в процессе ионизации образуются новые электроны, которые тоже после ускорения начинают участвовать в соударениях с атомами, вызывая их ионизацию. Для возникновения и поддержания газового разряда требуется существование электрического поля, так как плазма может существовать только если электроны приобретают во внешнем поле энергию, достаточную для ионизации атомов, и количество образованных ионов превышает число рекомбинировавших ионов.

Если для существования газового разряда необходима дополнительная ионизация за счёт внешних источников (например, при помощи ионизирующих излучений), то газовый разряд называется несамостоятельным.



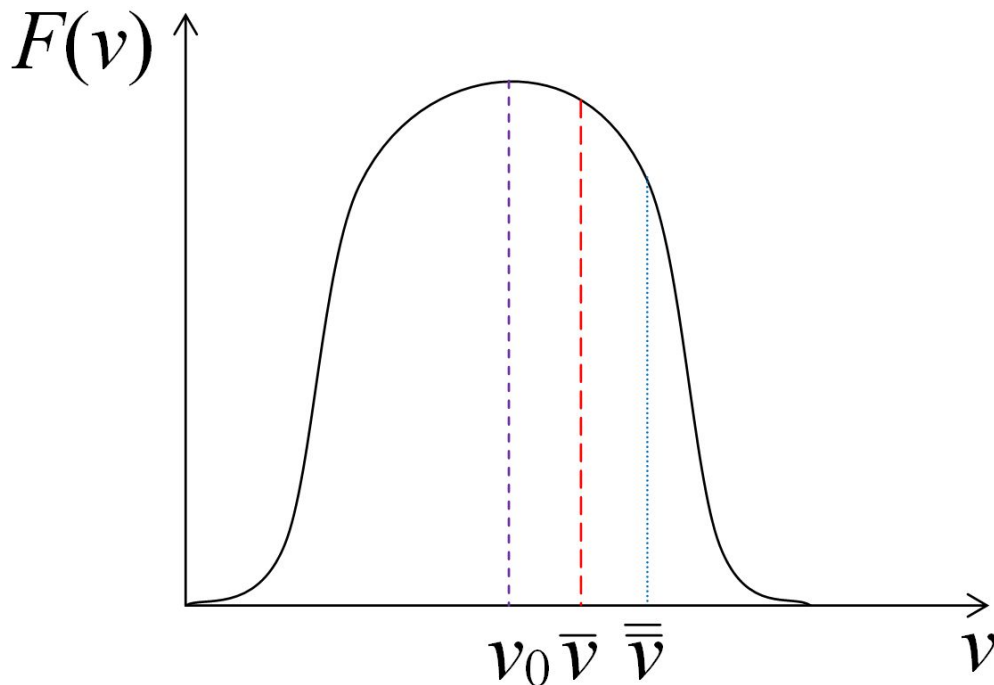
# Направленное движение частиц в газе и плазме

Заряженные частицы (электроны и ионы), принимающие участие в протекании электрического тока в газе, находятся в состоянии непрерывного движения, определяемого наложением двух его составляющих:

- А. Хаотическая составляющая движения, аналогичная тепловому движению молекул газа в закрытом сосуде;
- Б. Направленная составляющая движения, обусловленная действием давления, концентрации, температуры или со стороны внешнего электрического поля силы.

# Хаотическое движение частиц

При хаотическом движении частиц газа их скорости различны как по величине, так и по направлению. В «идеальном газе» распределение частиц по скоростям (энергиям) подчиняется статистике Максвелла-Больцмана. Рассмотрим функцию распределения частиц по скоростям и основные скорости.

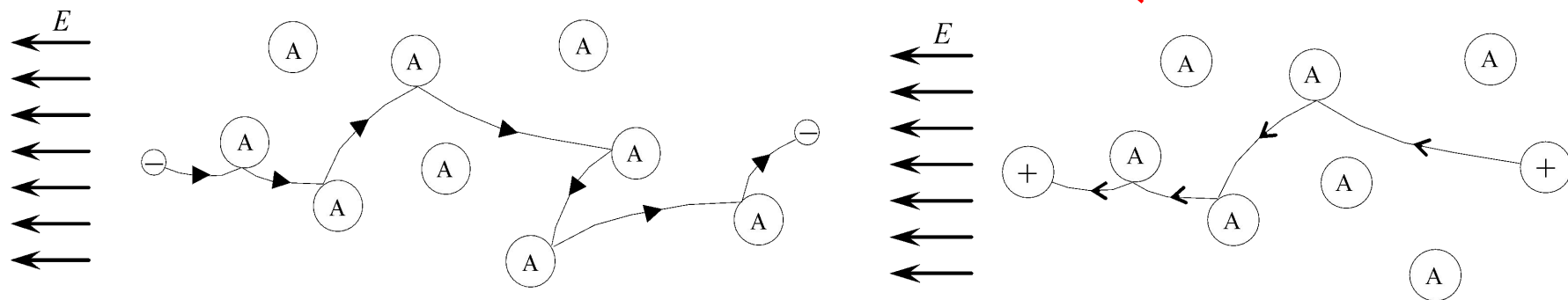
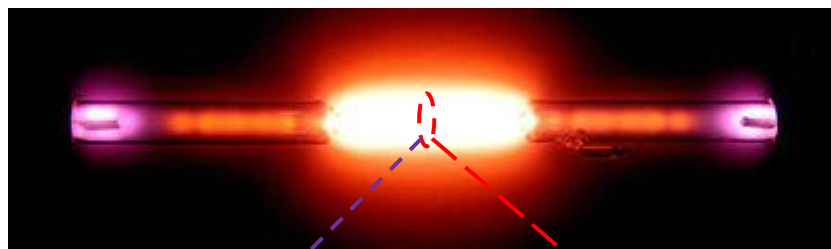


$$v_0 = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$$

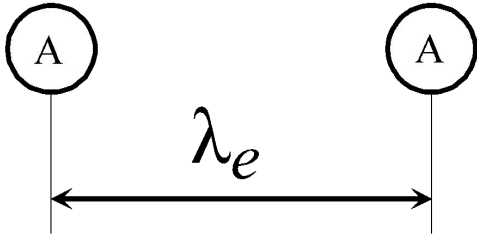
$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$$

$$\bar{\bar{v}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

# Направленное движение частиц Электрический дрейф заряженных частиц



# Направленное движение частиц



Импульс силы, сообщаемый полем электрону на пути его свободного пробега за время  $t_e = \lambda_e / \bar{v}_e$  :

$$(eE)t_e = (eE) \frac{\lambda_e}{\bar{v}_e}$$

Импульс силы, сообщаемый электрону полем, равен количеству движения в направлении поля, то для момента очередной встречи электрона с атомом:

$$(eE) \frac{\lambda_e}{\bar{v}_e} = m_e v_{e\text{нк}}$$

где  $m_e$  – масса электрона;  $v_{e\text{нк}}$  значение направленной составляющей скорости электрона к концу его свободного пробега в предположении, что в начале пробега эта составляющая скорости была равна нулю.

# Направленное движение частиц

Если скорости беспорядочного движения распределены по функциям Максвелла, то  $v_{eH}$  определяется из соотношения

$$v_{eH} = (eE) \frac{\lambda_e}{\bar{v}_e m_e} = E b_e$$

где  $\bar{v}_e$  – средняя арифметическая полная скорость электронов при их беспорядочном движении;  $b_e$  – подвижность (коэффициент подвижности)

$$b_e = e\lambda_e / \bar{v}_e m_e$$

Учитывая, что длина свободного пробега зависит от давления газа:

$$\lambda_e = \lambda_{e0} / p_0$$

$\lambda_{e0}$  – средний пробег в газе при давлении 1 мм рт. ст. и при температуре 0 °С

$p_0$  – давление, приведенное к температуре 0 °С

## Направленное движение частиц

Скорость направленного движения определяется:

$$v_{eH} = (eE) \frac{\lambda_e}{\bar{v}_e m_e} = E \left( e \frac{\lambda_{e0}}{\bar{v}_e m_e} \right) \frac{1}{p_0}$$

$$b_e = e \frac{\lambda_e}{\bar{v}_e m_e} = \left( e \frac{\lambda_{e0}}{\bar{v}_e m_e} \right) \frac{1}{p_0} = \frac{b_{e0}}{p_0}$$

Подвижностью называют скорость заряженных частиц, перемещающихся под действием поля при напряженности поля, равной единице ( $E = 1$  В/см).

# Направленное движение частиц

Скорость направленного движения определяется :

– для электронов  $v_{eH} = b_e E$

– для ионов  $v_{iH} = b_i E$

Усредненные характеристики движения заряженных частиц,  
приведенные к °С и давлению в 1 мм рт. ст. (133 Па)

Род газа	He	H <sub>2</sub>	Ar	N <sub>2</sub>	Ne
$\lambda_{e0}$ , м	$7.41 \cdot 10^{-4}$	$7.53 \cdot 10^{-4}$	$4.38 \cdot 10^{-4}$	$3.58 \cdot 10^{-4}$	$6.57 \cdot 10^{-4}$
$b_{e0}$ , м <sup>2</sup> / В·с·мм рт.ст.	78	37	36	40	150
$b_{i0}$ , м <sup>2</sup> / В·с·мм рт.ст.	1.0	1.3	0.16	0.18	0.4

# Направленное движение частиц

При определении скорости направленного движения ионов следует учитывать процессы перезарядки, так как в этом случае ион почти полностью теряет свою скорость, накопленную им между очередными перезарядками на пути  $\lambda_i$ .

Максимум энергии (скорости) иона в конце свободного пробега находится из равенства:

$$(eE)\lambda_i = 0.5m_i v_{i\max}^2$$

Левая часть уравнения определяет энергию, сообщаемую полем иону на пути свободного пробега,  
а правая часть, приобретенную при этом кинетическую энергию.



# Направленное движение частиц

$$v_{i \max} = \sqrt{2eE \frac{\lambda_i}{m_i}} = \sqrt{2eE \frac{1}{m_i n_0 \sigma_{\Pi}}}$$

$\lambda_i = 1 / n_0 \sigma_{\Pi}$  – длина свободного пробега иона;

$n_0$  – концентрация нейтральных частиц;

$\sigma_{\Pi}$  – сечение перезарядки.

Дрейфовая скорость ионов определяется как среднее значение скорости между двумя столкновениями. Примем, что процесс перезарядки может произойти в любой точке пространства  $x$ , лежащей в интервале от 0 до  $\lambda_i$

$$v_{iH} = \frac{1}{\lambda_i} \int_0^{\lambda_i} v_{i \max}(x) dx = \frac{1}{\lambda_i} \int_0^{\lambda_i} \sqrt{2eE \frac{1}{m_i} x} dx = \frac{2}{3} v_{i \max} = \frac{2}{3} \sqrt{2eE \frac{\lambda_i}{m_i}}$$

# Направленное движение частиц

## Расчетные выражения для скорости

– ИОНОВ:

$$v_{iH} = \frac{2}{3} \sqrt{2eE \frac{1}{m_i n_0 \sigma_{\Pi}}}$$

– ЭЛЕКТРОНОВ:

$$v_{eH} = -0.815 \sqrt{eE \frac{\lambda_{e0}}{p_0} \frac{1}{m_e}}$$

# Направленное движение частиц

## *Диффузионное движение*

Диффузионный поток частиц описывается первым законом Фика.

$$v_{\text{д}} = -D \frac{\text{grad } n}{n} = -D \frac{\text{grad } p}{p} = -D \frac{\text{grad } T}{T}$$

где  $D$  – коэффициент диффузии;  $n$  – концентрация частиц  $p$  – давление;  $T$  – температура.

Скорость направленного диффузионного движения определяется как

$$nv_{\text{д}} = -D \text{grad } n$$

$nv_{\text{д}}$  – плотность потока (число частиц, проходящих в 1 с через сечение 1 см<sup>2</sup>)

# Направленное движение частиц

Согласно кинетической теории для ионов одного знака, движущихся в собственном газе, соотношение, связывающее коэффициент диффузии  $D$  со средней скоростью беспорядочного теплового движения и средней длиной свободного пробега, имеет вид:

$$D_i = (1/3) \bar{v}_i \bar{\lambda}_i$$

Диффузия заряженных частиц связана с их подвижностью  $b$ . Связь коэффициента диффузии с подвижностью определяется соотношением Эйнштейна:

$$\frac{D_{i,e}}{b_{i,e}} = \frac{kT_{i,e}}{e}$$

# Направленное движение частиц

Чаще имеет место диффузное движение зарядов обоих знаков – *двуполярная диффузия*.

Из-за неравномерного распределения концентраций зарядов в объеме начинается диффузионное движение зарядов от больших концентраций к меньшим. Нарушение квазинейтральности в плазме не может быть значительным: возникающее даже при слабом отклонении сильные электрические поля препятствуют дальнейшему разделению зарядов. Электроны как частицы более подвижные стремятся уйти первыми, но при этом между ними и ионами появляется электрическое поле

$$E_r = \frac{D_i - D_e}{b_i + b_e} \frac{1}{n} \frac{dn}{dr}$$

замедляющее движение электронов и ускоряющее движение ионов, в результате частицы с зарядами обоих знаков движутся вместе, и устанавливается общая результирующая скорость.

# Направленное движение частиц

$$v_{ir} = v_{er} = v_r$$

$$v_r = -\frac{b_i D_e + b_e D_i}{b_i + b_e} \frac{1}{n} \frac{dn}{dr} = -D_a \frac{1}{n} \frac{dn}{dr}$$

$$D_a = \frac{b_i D_e + b_e D_i}{b_i + b_e}$$

Для изотермической плазмы  $T_i = T_e = T$   $D_a = 2b_i (kT_e / e)$

В неизотермической плазме  $D_e = 2b_e (kT_e / e) > D_a \approx 2b_i (kT_e / e) > D_i = 2b_i (kT_i / e)$

Для равновесной плазмы, когда  $n_e = n_i = n$ , для соблюдения условия амбиполярной диффузии необходимо, чтобы скорости электронов и ионов были одинаковы  $v_e = v_i = v_a$ , что соблюдается при равенстве токов положительных и отрицательных частиц  $en_e v_e + en_i v_i = 0$ .

# Типы эмиссий электронов

**Электронная эмиссия** – явление испускания электронов твердым телом, осуществляемое путем подведения к телу энергии от внешнего источника.

**Фотоэлектронная эмиссия** – эмиссия электронов из вещества под действием падающего на его поверхность излучения.

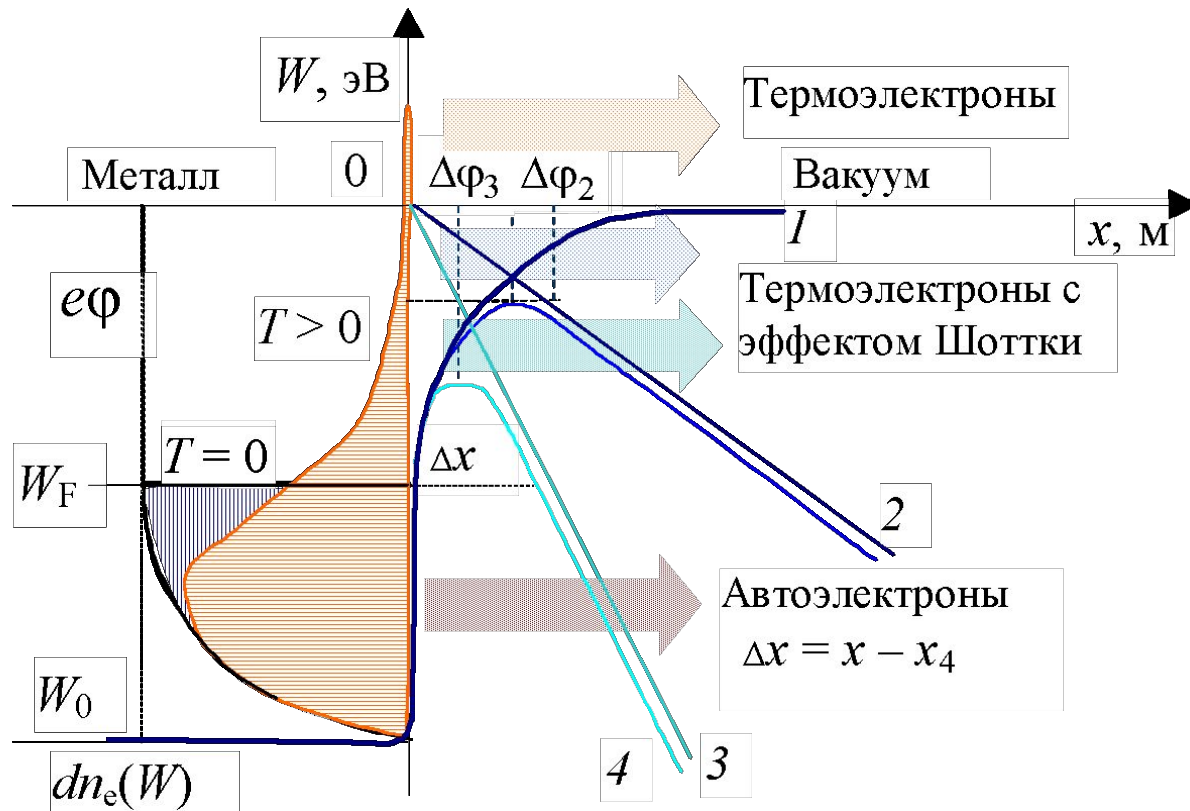
**Вторичная электронная эмиссия** – это эмиссия происходящая при бомбардировке поверхности тел потоком электронов или ионов.

**Термоэлектронная эмиссия** осуществляется за счет нагрева катода.

**Термоавтоэлектронная эмиссия** осуществляется за счет нагрева катода и наличием небольшого электрического поля у поверхности тела (эмиссия электронов с эффектом Шоттки).

**Автоэлектронная эмиссия** – эмиссия электронов, обусловленная наличием у поверхности тела сильного электрического поля. Дополнительная энергия электронам твердого тела при этом не сообщается, но за счёт изменения формы потенциального барьера они приобретают способность выходить в вакуум.

# Типы эмиссий электронов



- 1 – в отсутствие электрического поля ( $\sim e^2/r^2$ );  
 2 – обусловленная наличием внешнего электрического поля ( $eE$ );  
 3 – наличие более сильного поля;  
 4 – энергия, соответствующая отсутствию сил изображения в случае сильного поля.



# Виды электровакуумных структур и приборов

Электровакуумные приборы (ЭВП) – электронные приборы, проводимость в которых осуществляется посредством электронов или ионов, движущихся между электродами через вакуум или газ.

Основу ЭВП составляют электровакуумные структуры (ЭВС), предназначенные для формирования и управления электронным потоком (или потоком ионов) с помощью электрических и магнитных полей. В зависимости от числа электродов ЭВС бывают диодные, триодные и многоэлектродные (тетродные, пентодные и др.).

ЭВС реализуются в различного вида ЭВП:

- электронно-управляемых лампах (ЭУЛ), работа которых основана на управлении током, ограниченном пространственным зарядом, с помощью потенциалов электродов;
- электронно-лучевых приборах (ЭЛП), работа которых основана на управлении по интенсивности и положению одним или более электронными лучами;
- газоразрядных приборах (ГРП), характеристики которых определяются, в основном, ионизацией намеренно введенного газа или пара;
- электровакуумных приборах СВЧ (ЭВП СВЧ), в которых используется инерционные свойства электронов.

# Основные элементы ЭВС

К числу основных элементов электровакуумных структур, которые могут быть использованы в зависимости от назначения ЭВС, относятся:

- баллон, в котором откачан воздух и размещаются внутренние элементы ЭВС;
- электроды, эмитирующие или собирающие электроны или ионы или управляющие их движением при помощи электрического поля;
- катод – электрод, являющийся источником требуемой электронной эмиссии;
- подогреватель катода, служащий для передачи тепла катоду косвенного накала;
- газопоглотитель (геттер) – вещество, которое уменьшает или стабилизирует давление остаточного газа посредством химического или физического воздействия на него;
- анод – ускоряющий электрод, который обычно служит выходным электродом и основным коллектором электронов;
- коллектор – электрод, собирающий электроны или ионы;
- магнитная система, служащая для формирования электронных потоков или управления положением электронных потоков в пространстве.

# Основные элементы ЭВС

Баллоны обычно выполняются из металла, стекла, керамики, металлокерамики и их сочетания.

Степень вакуума внутри баллона составляет  $10^{-5} - 10^{-6}$  Па.

В качестве геттеров используются магний, цирконий, титан, торий, барий.

Аноды, коллекторы изготавливаются из никеля, меди, молибдена, тантала, графита, стали.

Управляющие потоком электронов или ионов электроды (сетки) изготавливаются из никеля, молибдена или вольфрама.

Охлаждение осуществляется либо естественным путем (за счет конвекции), либо принудительно воздушным, жидкостным, испарительным и контактными путями.

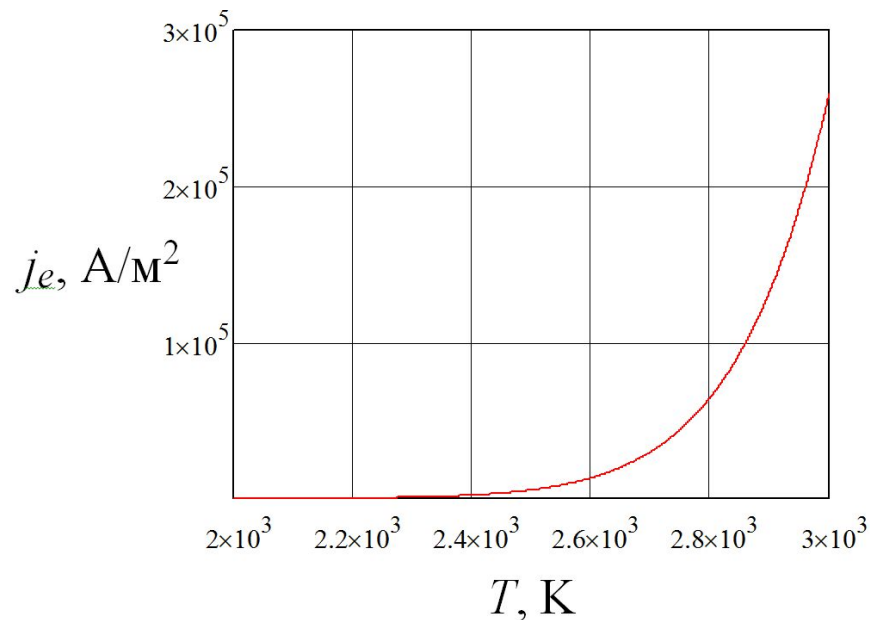
В качестве катодов наибольшее применение находят термокатоды, в которых используется явление термоэлектронной эмиссии.

# Термоэлектронная эмиссия

Формула Ричардсона–Дэшмана:

$$j_e = \frac{4\pi m_e q k^2}{h^3} T^2 e^{-\frac{q\phi}{kT}} = AT^2 e^{-\frac{q\phi}{kT}}$$

$A$  – термоэлектрическая постоянная,  $120 \text{ А/см}^2\text{К}^2$ ;  $q$  – заряд электрона,  $m$  – его масса,  $k$  – постоянная Больцмана,  $h$  – постоянная Планка,  $T$  – температура катода;  $q\phi$  – работа выхода.

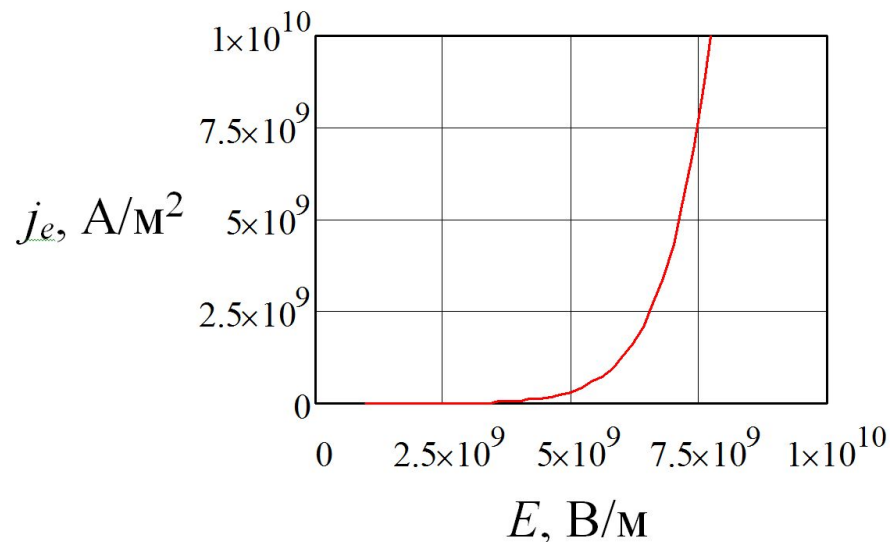


# Эмиссия электронов с эффектом Шоттки

$$j_e = AT^2 e^{-\frac{q(\varphi - \Delta\varphi)}{kT}}$$

$$\Delta q\varphi = \sqrt{\frac{q^3 E}{4\pi\epsilon_0}}$$

$E$  – напряженность внешнего электрического поля;  $\epsilon_0$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость.



# Типы термокатодов

Нагрев катода до необходимой рабочей температуры осуществляется либо постоянным электрическим током, либо переменным. В зависимости от способа пропускания тока для нагрева катода различают катоды прямого и косвенного накала.

- Катод прямого накала разогревается током, пропускаемым непосредственно через катод, выполняемый в этом случае в виде одной или нескольких соединенных между собой нитей или лент.
- Катод косвенного накала нагревается от подогревателя, передающего тепловую энергию эмитирующей поверхности катода. Обычно катоды изготавливаются в виде цилиндра с отдельным выводом. Роль подогревателя выполняет специальная нить накала с выводами, размещаемая внутри цилиндра. Нить накала изолирована от катода и с этой целью обычно покрывается теплостойким изолирующим составом.

# Типы термокатодов

По физическим и электрическим свойствам можно подразделить:

- катоды чистых металлов,
- пленочные катоды,
- полупроводниковые катоды.

Наибольшей работой выхода обладают металлические катоды, наименьшей - полупроводниковые катоды. Вследствие этого эмиссионная способность катодов различна. Различие в физических свойствах материалов приводит к тому, что и многие другие важные свойства катодов оказываются различными.

Представителем *металлических катодов* является вольфрамовый катод. Вольфрам имеет высокую температуру плавления (3700 К), обладает хорошей ковкостью и тягучестью, что позволяет изготавливать весьма тонкую и прочную проволоку для катодов прямого накала (порядка нескольких мкм). Недостатком вольфрама – большая работа выхода (4,54 эВ), а, следовательно, и рабочая температура.

Кроме вольфрама для изготовления металлических катодов иногда используются молибден, тантал и ниобий, имеющие меньшую работу выхода, но уступающие вольфраму в других свойствах. Так, например, при высоких температурах, молибден сильнее распыляется, чем вольфрам, а тантал рекристаллизуется и становится хрупким и ломким.

# Типы термокатодов

*Пленочные катоды* имеют меньшую работу выхода по сравнению с металлическими за счет создания на поверхности катода пленки электроположительных атомов (например, торированный карбидированный, барированный, металлогубчатый катоды). Работа выхода катодов ниже 2,63 эВ. Пленочные катоды работают при более низкой рабочей температуре, чем металлические катоды, поэтому являются более экономичными.

Наиболее широкое распространение получили *полупроводниковые катоды*, конструктивно выполненные в виде металлического основания (керна) с нанесенным на него слоем окисей металлов и имеющие свойства электронного полупроводника. По этой причине такие катоды обычно называют оксидными.

Чаще всего используются окиси щелочно-земельных металлов - бария, стронция, кальция, причем главную роль в эмиссии электронов играет окись бария. Внешняя работа выхода у оксидных катодов меньше, чем у металлических и пленочных, полная работа выхода, которая составляет 1,1 – 1,3 эВ. Поэтому рабочая температура оксидного катода ниже, чем у металлического и пленочного, что и определяет их широкое применение в ЭВП. Конструктивно оксидные катоды выполняются как в виде прямого накала, так и в виде косвенного.



# Типы термокатодов

Параметры	Катоды из чистых металлов	Пленочные катоды	Полупроводниковые катоды
Рабочая температура, К	2300 - 2600	1800 - 2000	900 - 1200
Удельный ток эмиссии, мА/см <sup>2</sup>	Удельный ток эмиссии большинства используемых катодов составляет 100 - 1000 мА/см <sup>2</sup>		
Эффективность, мА/Вт	4 - 14	30 - 70	до 250
Долговечность	Среднее значение долговечности большинства катодов - 1000 ч		

Рабочей температурой катода называют температуру, при номинальном напряжении накала (для пленочных и полупроводниковых катодов – это условие, когда работа выхода имеет наименьшее значение, для металлических – условие обеспечения достаточных тока эмиссии и долговечности).

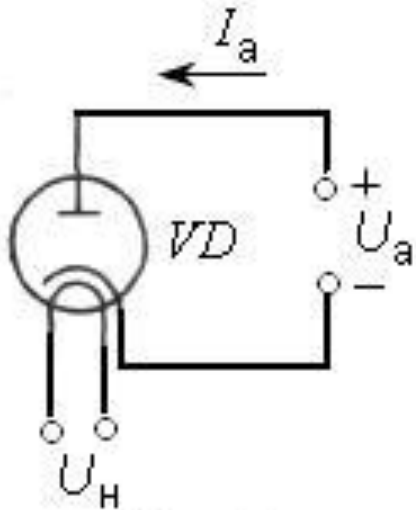
Удельный ток эмиссии, определяемый отношением тока эмиссии к площади катода, характеризует эмиссионную способность катода при рабочей температуре.

Экономичность катода характеризуется эффективностью, под которой понимается отношение тока эмиссии катода к мощности нагрева.

Долговечность катода (срок службы) определяется временем, в течение которого ток эмиссии сохраняет величину, не меньшую некоторой доли (обычно 70 – 80%) от первоначального (номинального) значения при одном и том же напряжении накала.

# Двухэлектродные лампы

## Электровакуумный диод

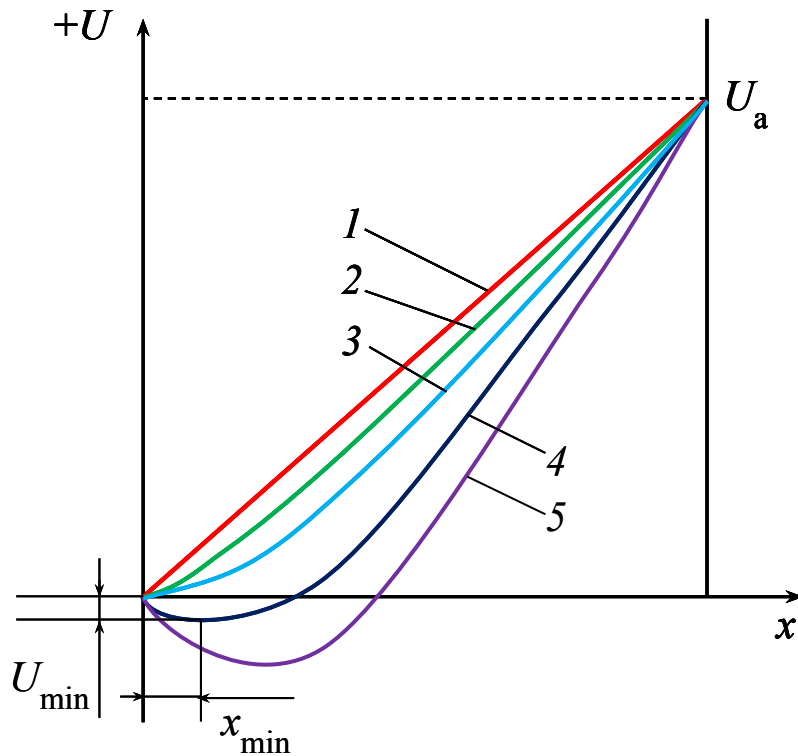


Электровакуумный диод – электронно-управляемая лампа, принцип действия заключается в управлении потоком электронов путем изменения напряжения анода, воздействующего на потенциальный барьер, создаваемый пространственным зарядом электронов, эмитируемых нагретым катодом.

Анодный ток диода определяется двумя факторами: анодным напряжением и напряжением накала. Напряжение накала определяет температуру катода, от которой зависит число эмитируемых электронов. Роль анодного напряжения менее очевидна. Кажется бы, и при малом и при большом напряжении анода все эмитируемые катодом электроны должны попадать на анод, т.е. анодный ток практически не должен зависеть от анодного напряжения. Однако присутствие электронов, обладающих отрицательным зарядом, в рабочем пространстве диода вызывает появление дополнительных электрических полей, изменяющих распределение потенциала в этом пространстве, что приводит к зависимости анодного тока от анодного напряжения.

# Электрoвакуумный диод

Рассмотрим распределение потенциала при различных температурах.



- 1 – соответствует отсутствию пространственных зарядов (холодный катод);
- 2, 3 – соответствует появлению пространственного заряда;
- 4, 5 – накаливаемый катод, начальная скорость электронов не равна нулю.

# Электривакуумный диод

Преодолеть это поле могут электроны, обладающие начальной скоростью:

$$v_0 = \sqrt{\frac{e}{m} U_{\min}}.$$

Величина минимума потенциала может быть определена из уравнения термоэлектронной эмиссии. В уравнение вместо высоты потенциального барьера на границе катод-вакуум  $\varphi_0$  подставить  $(\varphi_0 + U_{\min})$ . Тогда плотность анодного тока:

$$j_a = AT^2 e^{-\frac{e(\varphi_0 + U_{\min})}{kT}}$$

Отсюда определяем минимум потенциала:

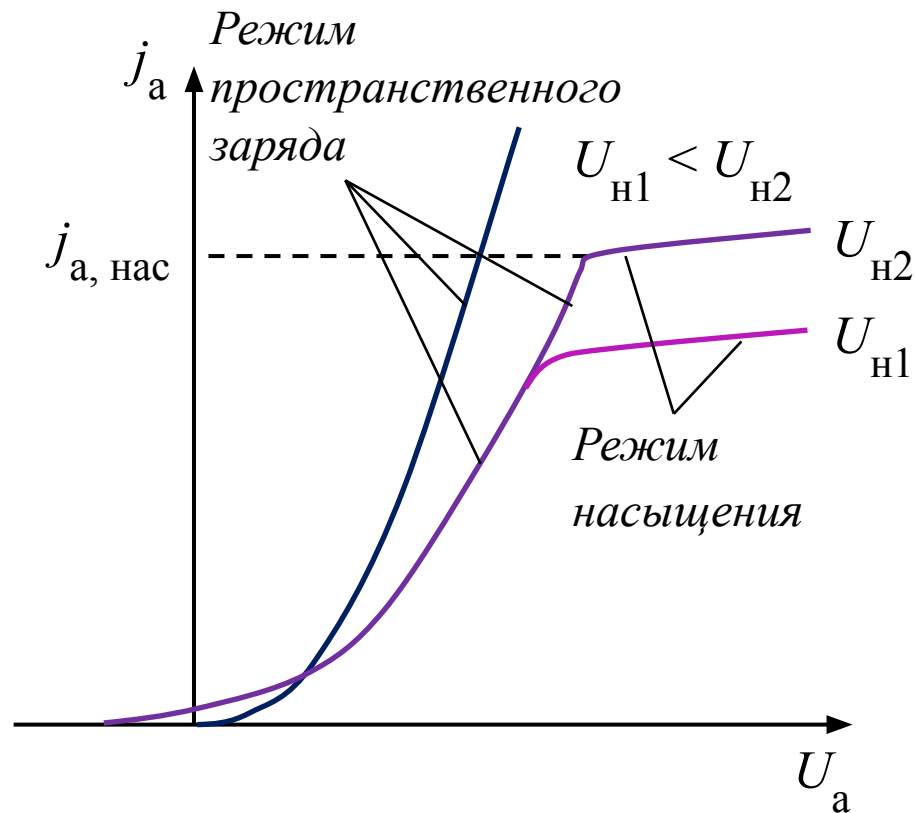
$$U_{\min} = \frac{kT}{e} \ln \frac{j_e}{j_a}.$$

Величина минимума потенциала в диоде обычно не превышает 0.1 эВ.

Минимум потенциала лежит на расстоянии порядка 0.01...0.1 мм от катода.

# Характеристики диода

Основной статической вольт-амперной характеристикой диода является его анодная характеристика - зависимость анодного тока от анодного напряжения при постоянном напряжении накала. Однако может использоваться семейство анодных характеристик, объединяющее несколько характеристик при различных напряжениях накала.



# Характеристики диода

Характер реальной статической анодной ВАХ объясняется явлениями, рассмотренными в связи с распределением потенциала в диоде. Незначительный рост тока при малых напряжениях анода объясняется наличием сильного тормозящего поля, созданного пространственным зарядом у катода и препятствующего проникновению большинства электронов к аноду. По мере увеличения анодного напряжения пространственный заряд у катода уменьшается и все большее число электронов преодолевает потенциальный барьер и достигает анода, вызывая значительное увеличение тока через диод. В дальнейшем рост анодного тока замедляется, так как пространственный заряд у катода полностью «рассасывается», и все эмитируемые катодом электроны попадают на анод; наступает режим насыщения, при котором анодный ток остается практически постоянным. С увеличением напряжения накала в режиме насыщения ток возрастает.

# Характеристики диода

Восходящий участок характеристики (режим пространственного заряда) подчиняется **закону степени 3/2**.

$$I_a = 2.33 \cdot 10^{-6} \frac{S_a}{d_{ак}^2 \beta^2} U_a^{3/2}.$$

где  $S_a$  – действующая площадь поверхности анода;  $d_{ак}$  – расстояние анод-катод;  $\beta$  – функция отношения радиусов;  $U_a$  – анодное напряжение.

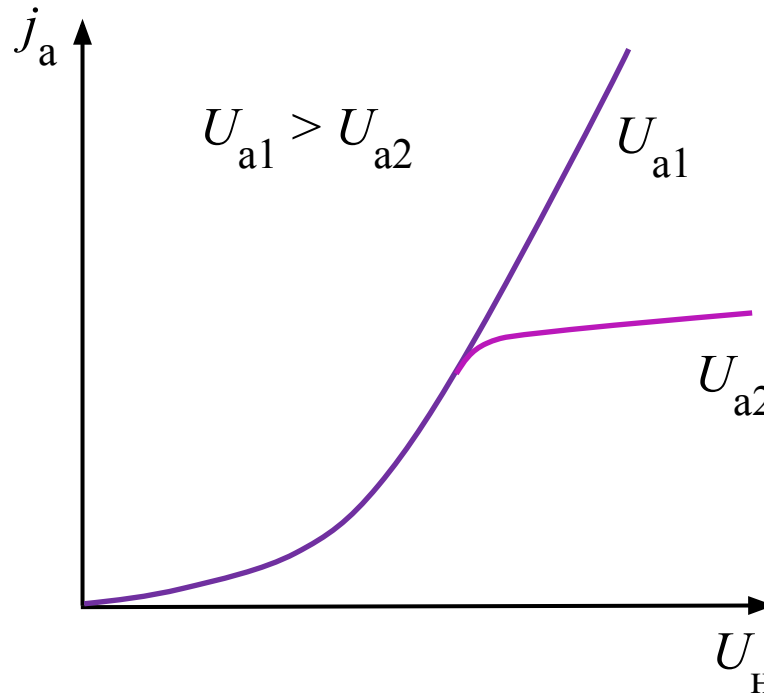
Зная ток насыщения  $I_{а\text{ нас}}$ , можно, пользуясь законом степени 3/2, вычислить напряжение насыщения:

$$U_{а\text{ нас}} = \frac{1}{G^{2/3}} I_{а\text{ нас}}^{2/3}, \quad G = 2.33 \cdot 10^{-6} \frac{S_a}{d_{ак}^2 \beta^2}.$$

Характеристики, соответствующие закону степени 3/2, называют **идеальными характеристиками**.

# Характеристики диода

## Эмиссионные характеристики



Первая характеристика снималась при большом анодном напряжении  $U_{a1}$ . В данном случае анодный ток равен току насыщения в любой точке характеристики.

Вторая характеристика снималась при небольшом анодном напряжении  $U_{a2}$ . В данном случае анодный ток из-за ограничивающего действия поля пространственного заряда растет слабо.



# Дифференциальные параметры диода

Дифференциальными параметрами электронного прибора называются величины, определяющие связь малыми приращениями напряжений и токов прибора.

Основными дифференциальными параметрами диода являются:

- *крутизна анодной характеристики  $S$* ;
- *внутреннее сопротивление лампы  $R_i$* .

Для крутизны характеристики можно записать следующее соотношение:

$$S = \frac{dI_a}{dU_a}.$$

Крутизна характеристики численно равна тангенсу угла наклона касательной в данной точке к кривой  $I_a = f(U_a)$ . Обычно она измеряется в мА/В.

Аналитическое выражение для крутизны характеристики можно получить из закона степени  $3/2$ .

$$S = \frac{3}{2} 2.33 \cdot 10^{-6} \frac{S_a}{d_{ak}^2} U_a^{1/2}.$$

# Дифференциальные параметры диода

Внутреннее сопротивление лампы  $R_i$  характеризует сопротивление лампы переменной составляющей анодного тока:

$$R_i = \frac{dU_a}{dI_a} = \frac{1}{S}.$$

Внутреннее сопротивление представляет собой величину обратную крутизне диода.

Диод также характеризуется сопротивлением по постоянному току:

$$R_0 = \frac{U_a}{I_a}.$$

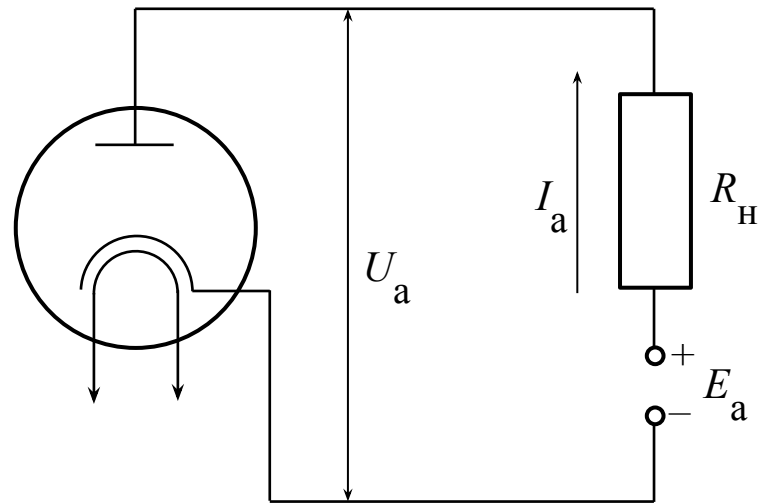
Для характеристик подчиняющихся закону степени  $3/2$ , соотношение между  $R_i$  и  $R_0$  можно выразить следующим образом:

$$R_0 = \frac{2}{3} R_i.$$

# Дифференциальные параметры диода

Под рабочей характеристикой диода понимают зависимость анодного тока от напряжения источника питания в анодной цепи  $E_a$  при наличии сопротивления  $R_H$ . В режиме нагрузки ток, протекающий по внешней цепи лампы, равен:

$$I_a = \frac{E_a - U_a}{R_H}.$$



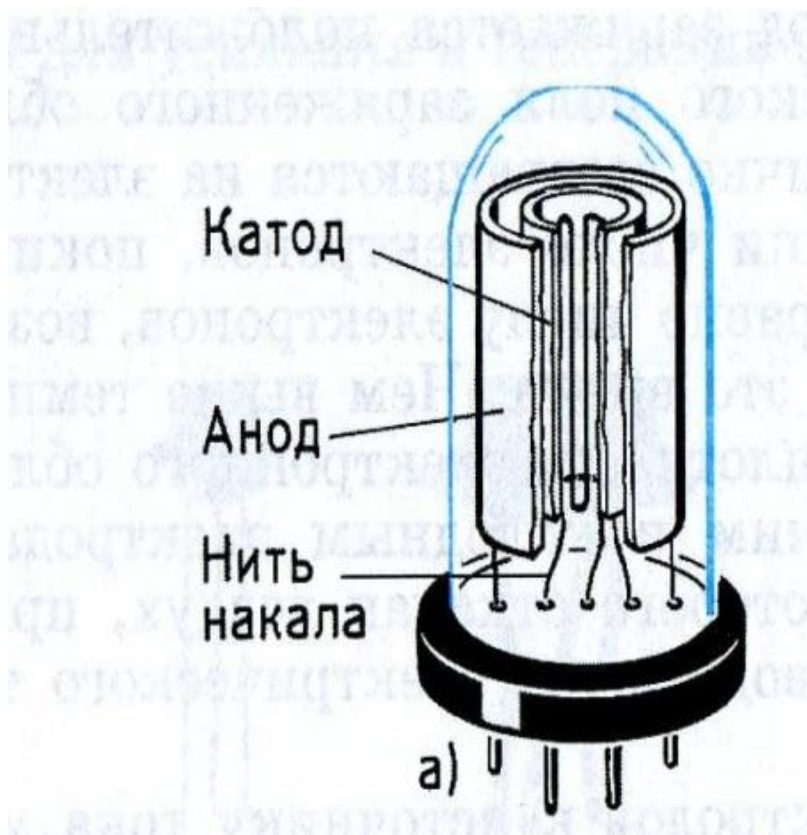
# Применение диодов

1. Выпрямление переменного тока низкой частоты.

2. Детектирование, которое заключается в выделении низкочастотной составляющей из амплитудно-модулированного высокочастотного сигнала. Этот процесс сводится к выпрямлению токов высокой частоты.

3. Преобразование частоты, которое заключается в изменении частоты несущего тока амплитудно-модулированного высокочастотного сигнала. Оно основано на том, что за счет нелинейности характеристики диода возможно получение составляющей переменного тока, не содержащейся в кривой подаваемого на анод сигнала.

# Электрoвакуумный диод



# Трехэлектродные лампы

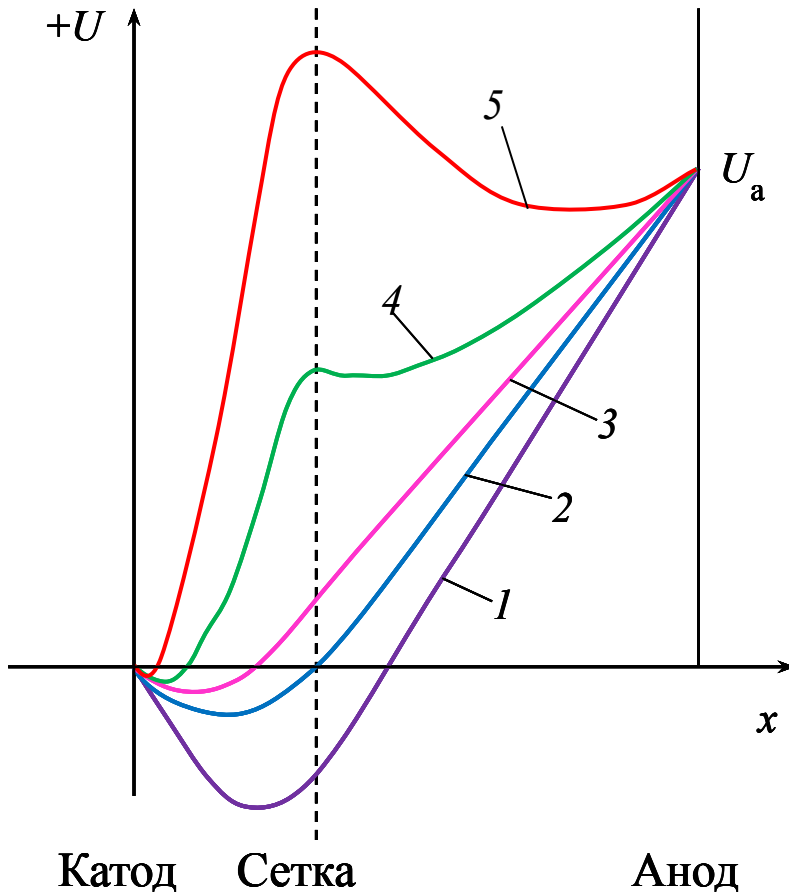
## Устройство и принцип действия триода

Триод – трехэлектродная электронно-управляемая лампа, имеющая катод, анод и управляющий электрод, который обычно имеет форму сетки. Конструкция триода в общих чертах подобна конструкции электровакуумного диода, но в отличие от последнего он содержит дополнительный электрод.

Принцип действия триода (управления анодным током) заключается в управлении потоком электронов путем изменения напряжений управляющей сетки и анода, воздействующих на потенциальный барьер, создаваемый пространственным зарядом электронов, эмитируемых нагретым катодом.

# Устройство и принцип действия триода

Рассмотрим распределение потенциала в триоде при изменении потенциала сетки.

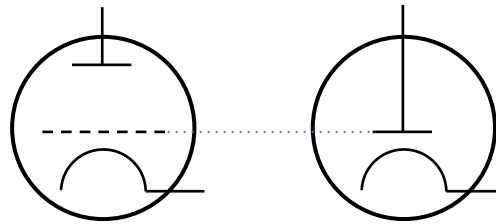


При положительном напряжении сетки, при  $U_c < U_a$  результирующее поле в пространстве между сеткой и катодом направлено к сетке, а поле между сеткой и анодом — к аноду. Если положительное напряжение сетки будет достаточно большим, анодные электроны, прошедшие между сеткой и анодом, могут оказаться в поле, направленном к сетке, и вернуться к ней. Такой режим работы триода называют режимом возврата. В результате электрон может совершить несколько колебаний, прежде чем попадет на сетку. Такой режим работы триода называют режимом прямого перехвата (линия 4).

# Действующее напряжение

Для сравнительной оценки воздействия полей анода и сетки на потенциальный барьер у катода вводят понятие **действующего напряжения**, которое учитывает воздействие как анодного, так и сеточного напряжений.

Ввиду того, что изменения напряжений на аноде и сетке приводят в основном к изменению электрического поля в пространстве сетка-катод, было предложено заменить триод эквивалентным диодом, анод которого находится на месте сетки триода.



Выражение для действующего напряжения может быть представлено в следующем виде:

$$U_{\text{д}} = \frac{U_c + DU_a}{1 + \chi D},$$

где  $D$  – проницаемость триода;  $\chi = r_a / r_c$ .

Т. к.  $D \ll 1$ , то пренебрегая величиной  $\chi D$  по сравнению с единицей, получим упрощенное выражение для действующего напряжения:

$$U_{\text{д}} = U_c + DU_a.$$



# Закон степени трех вторых

Введение понятия о действующем напряжении позволяет применить закон степени трех вторых к триоду. Для эквивалентного диода закон степени  $3/2$  можно записать в обычной форме:

$$I_a = GU_{\partial}^{3/2}.$$

Вследствие эквивалентности диода и триода токи катодов должны быть равны. Тогда закон степени  $3/2$  для триода можно записать в виде:

$$I_k = G' \left[ \frac{1}{1 + \chi D} (U_c + DU_a) \right]^{3/2},$$

где  $G' = 2.33 \cdot 10^{-6} \frac{S_a}{r_a r_c \beta^2}$ .

Отсюда можно получить формулу для напряжения запираания триода  $U_{C0}$ . Считая, что  $I_c = 0$ , можно записать:

$$I_a = G'(U_c + DU_a)^{3/2}.$$

При подаче на сетку напряжения, равного напряжению запираания, анодный ток равен нулю. Поэтому

$$U_{C0} = -DU_a.$$

Таким образом, напряжение запираания тем больше, чем больше проницаемость и анодное напряжение.

# Статические характеристики триода

В общем случае в триоде ток катода разветвляется на два: анодный и сеточный токи. Поэтому для триода наибольший интерес представляют зависимости:

$$I_a = f(U_c ; U_a ),$$

$$I_c = \varphi(U_c ; U_a ).$$

Полагая одно из напряжений постоянным, можно получить четыре зависимости:

$$I_a = f1(U_c), \text{ при } U_a = \text{const} \text{ – анодно-сеточная характеристика;}$$

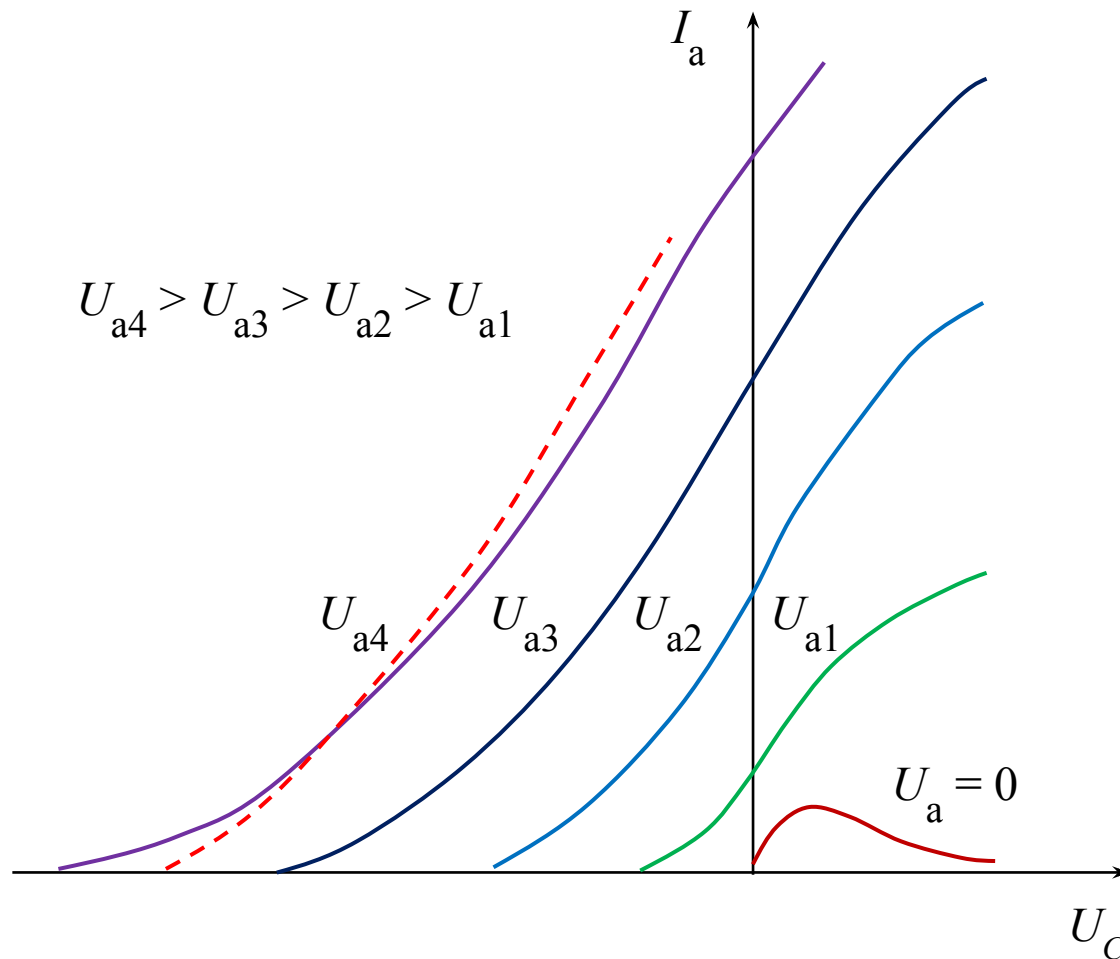
$$I_a = f2(U_a), \text{ при } U_c = \text{const} \text{ – анодная характеристика;}$$

$$I_c = \varphi1(U_c), \text{ при } U_a = \text{const} \text{ – сеточная характеристика;}$$

$$I_c = \varphi2(U_a), \text{ при } U_c = \text{const} \text{ – сеточно-анодная характеристика.}$$

# Статические характеристики триода

*Анодно-сеточные и сеточные характеристики*



# Анодно-сеточные и сеточные характеристики

Вид характеристик в области  $U_c < 0$ , когда анодный ток равен катодному, определяется законом степени  $3/2$ . Однако реальные характеристики отличаются от теоретических. Они идут несколько более полого, чем теоретические характеристики, и медленнее приближаются к оси абсцисс вблизи напряжения запираения. Теоретическая характеристика показана штриховой линией.

Главные причины отклонения реальных характеристик триода от теоретических те же, что и в случае с диодом. Специфические для триода причины состоят в проявлении островкового и краевого эффекта.

# Анодно-сеточные и сеточные характеристики

Островковый эффект заключается в неравномерной эмиссии электронов с поверхности катода из-за неодинаковой величины электрического поля у катода. При островковом эффекте из участков катода (островков), расположенных против междувитковых промежутков, наблюдается более интенсивная эмиссия, чем из участков катода, расположенных против витков сетки.

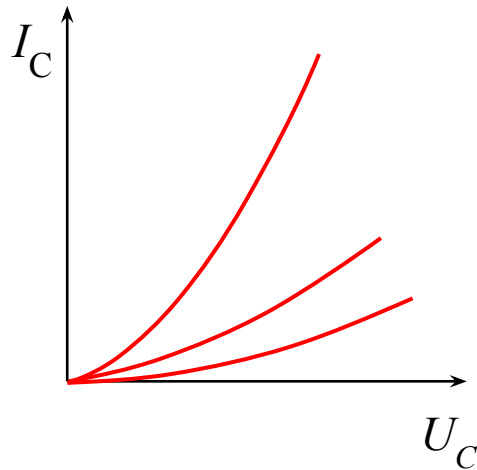
Островковый эффект при увеличении отрицательного напряжения сетки ведет к увеличению проицаемости лампы и к увеличению напряжения запираения, т.е. к появлению «хвоста» у характеристики. Увеличение проицаемости при повышении отрицательного напряжения можно объяснить уменьшением рабочего «островка» на поверхности катода и удалением его от витков сетки. Вследствие этого степень воздействия сеточного напряжения на катодный ток уменьшается, в то время как влияние напряжения анода на катодный ток не изменяется из-за одинакового удаления анода от любой точки катода.

В появлении «хвоста» у реальной характеристики при малых токах определенную роль играет также краевой эффект, состоящий в том, что при недостаточно длинной сетке в триоде электроны могут двигаться к аноду, обходя ее с краев. Эти электроны образуют обычно небольшой по величине неуправляемый ток, наблюдающийся иногда даже при очень больших отрицательных напряжениях сетки.

# Анодно-сеточные и сеточные характеристики

Анодно-сеточные характеристики в области  $U_c < 0$ , снятые при различных напряжениях анода, отличающихся друг от друга на одинаковую величину, располагаются примерно на равных расстояниях вдоль оси сеточного напряжения. Это вытекает непосредственно из закона степени  $3/2$ . Если шаг изменения анодного напряжения равен  $\Delta U_a$ , то при  $I_c = \text{const}$  расстояние между характеристиками вдоль оси сеточного напряжения составит величину  $\Delta U_c = -D\Delta U_a$ . Так как проницаемость лампы с ростом катодного тока уменьшается из-за островкового эффекта, то расстояние вдоль оси между характеристиками в верхней части уменьшается, а книзу увеличивается. Эта особенность характеристик наблюдается у всех триодов в более или менее выраженной степени.

# Анодно-сеточные и сеточные характеристики



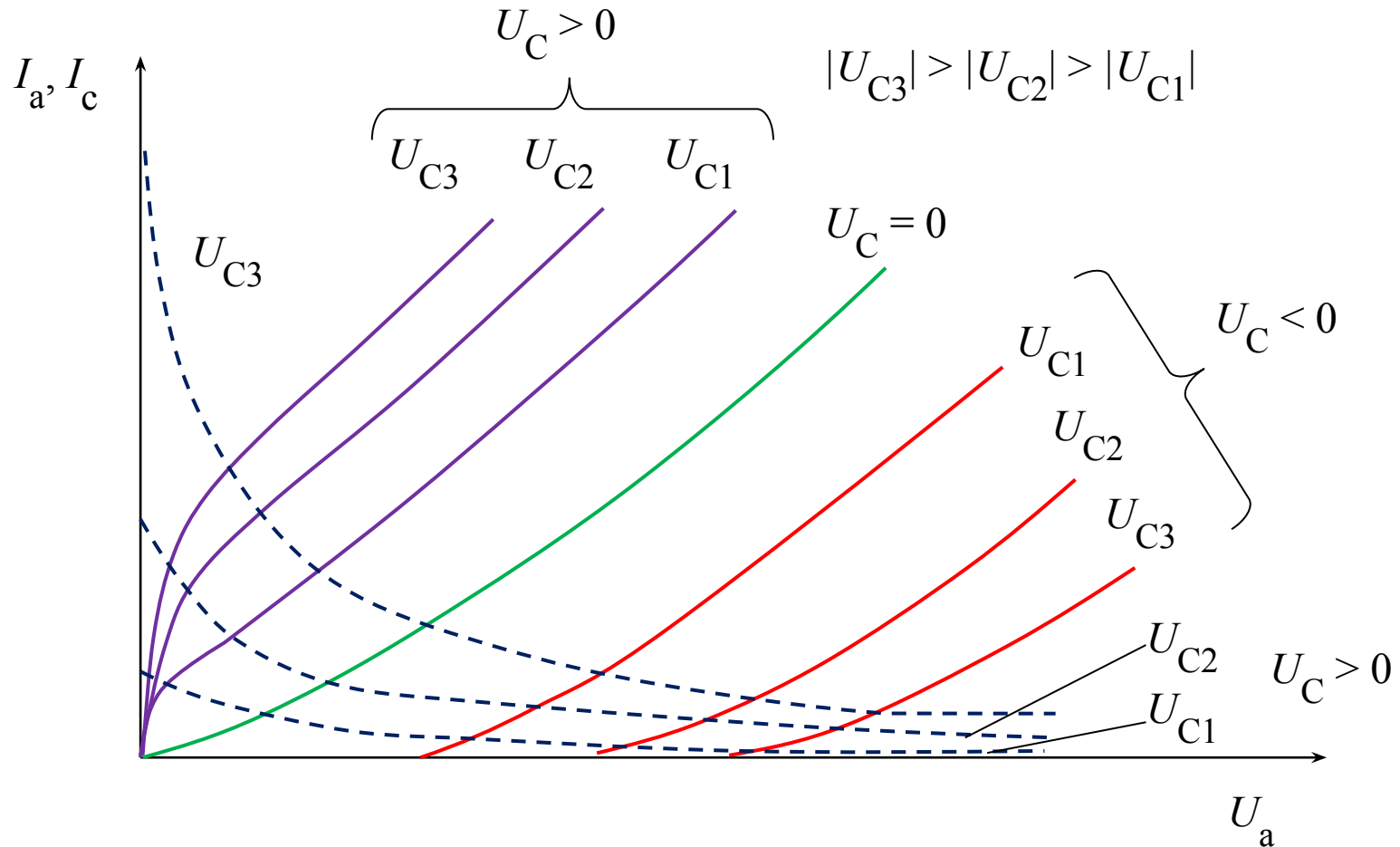
В области положительных напряжений сетки помимо анодного тока появляется сеточный ток, который может быть значительным при напряжениях анода, соизмеримых с напряжениями сетки.

Увеличение напряжения сетки ведет к росту катодного тока, который распределяется между сеткой и анодом. При больших напряжениях анода увеличение положительного напряжения сетки ведет к росту как сеточного, так и анодного тока.

Изменение анодного напряжения в области больших напряжений сдвигает анодно-сеточную характеристику и почти не изменяет наклон сеточной характеристики. Если напряжение анода невелико, то вследствие сильного влияния сетки на катодный ток с увеличением напряжения сетки рост анодного тока замедляется, а рост сеточного тока ускоряется. Это проявляется особенно сильно в режиме «возврата». При больших напряжениях сетки рост анодного тока прекращается и анодный ток может начать даже уменьшаться, несмотря на рост катодного тока. Наиболее ярко эта особенность анодно-сеточных характеристик проявляется при  $U_a = 0$ , когда анодный ток вначале растет вместе с увеличением катодного тока, а затем уменьшается вследствие возврата к сетке большого количества электронов, попадающих в усиливающееся тормозящее поле.

Сеточная характеристика, снятая при большем анодном напряжении, идет ниже, чем снятая при меньшем напряжении.

# Анодные и сеточно-анодные характеристики



Анодные характеристики триода - сплошными линиями,  
Сеточно-анодные характеристики триода - штриховыми.



# Анодные и сеточно-анодные характеристики

В области высоких анодных напряжений характеристики расходятся веером, т.е. угол наклона их к оси абсцисс уменьшается, так как с ростом напряжения анода проницаемость снижается. Уменьшение проницаемости при высоких значениях анодного напряжения объясняется увеличением рабочих «островков» на поверхности катода вследствие действия сильного суммарного поля. В результате этого витки сетки приближаются к рабочим островкам, т.е. воздействие сетки на катодный ток увеличивается, и проницаемость триода уменьшается.

При положительных напряжениях сетки с увеличением анодного напряжения анодный ток в режиме возврата вначале быстро возрастает за счет уменьшения количества возвращающихся к сетке электронов, обусловленного ослаблением тормозящего поля между сеткой и анодом. Снижение пространственного заряда, образованного электронами в этом промежутке, еще больше ослабляет тормозящее поле. В дальнейшем рост анодного тока замедляется и триод переходит в режим прямого перехвата. При увеличении напряжения сетки характер кривой анодного тока остается прежним, но характеристика идет выше, так как катодный ток увеличивается.

# Анодные и сеточно-анодные характеристики

Особенностью анодных характеристик является практически полное их совпадение в начальной части - в режиме возврата. Слабое влияние увеличивающегося сеточного напряжения на положение начального участка анодных характеристик связано с ростом пространственного заряда между сеткой и анодом, приводящим к увеличению тормозящего поля в этом промежутке. Сильное тормозящее поле препятствует увеличению анодного тока, несмотря на рост катодного тока, обусловленный увеличением сеточного напряжения.

С ростом анодного напряжения сеточный ток быстро уменьшается в режиме возврата, а затем остается примерно постоянным в режиме прямого перехвата. Характеристика располагается тем ниже, чем меньше положительное напряжение сетки.

# Параметры триода

Статические параметры характеризуют основные свойства лампы в статическом режиме. С помощью статических параметров оценивается воздействие напряжений на электродах лампы на токи в цепях этих электродов.

Анодный ток является функцией двух напряжений  $U_c$  и  $U_a$ . Для тока можно написать выражение полного дифференциала в виде:

$$dI_a = \frac{\partial I_a}{\partial U_c} dU_c + \frac{\partial I_a}{\partial U_a} dU_a.$$

Частная производная  $\partial I_a / \partial U_c$  называется **крутизной анодно-сеточной характеристики**

$$S = \frac{\partial I_a}{\partial U_c} \left[ \frac{\text{мА}}{\text{В}} \right].$$

$$S = 3.5 \cdot 10^{-6} \frac{S_a}{r_a r_c \beta^2} (U_c + D U_a)^{1/2}.$$

Частная производная  $\partial I_a / \partial U_a$  показывает зависимость анодного тока от анодного напряжения при постоянном напряжении на сетке.

По своему физическому смыслу этот параметр — выходная проводимость лампы.

# Параметры триода

Обратная величина выходной проводимости называется **внутренним сопротивлением лампы**:

$$R_i = \frac{dU_a}{dI_a}.$$

Сопротивление лампы  $R_i$  следует рассматривать как сопротивление лампы переменному току. Сопротивление лампы постоянному току  $R_0$  определяется как отношение постоянного анодного напряжения к постоянному току:

$$R_0 = \frac{U_a}{I_a}.$$

**Коэффициент усиления** показывает, какому приращению анодного напряжения равноценно по своему воздействию на анодный ток приращение напряжения на сетке на один вольт:

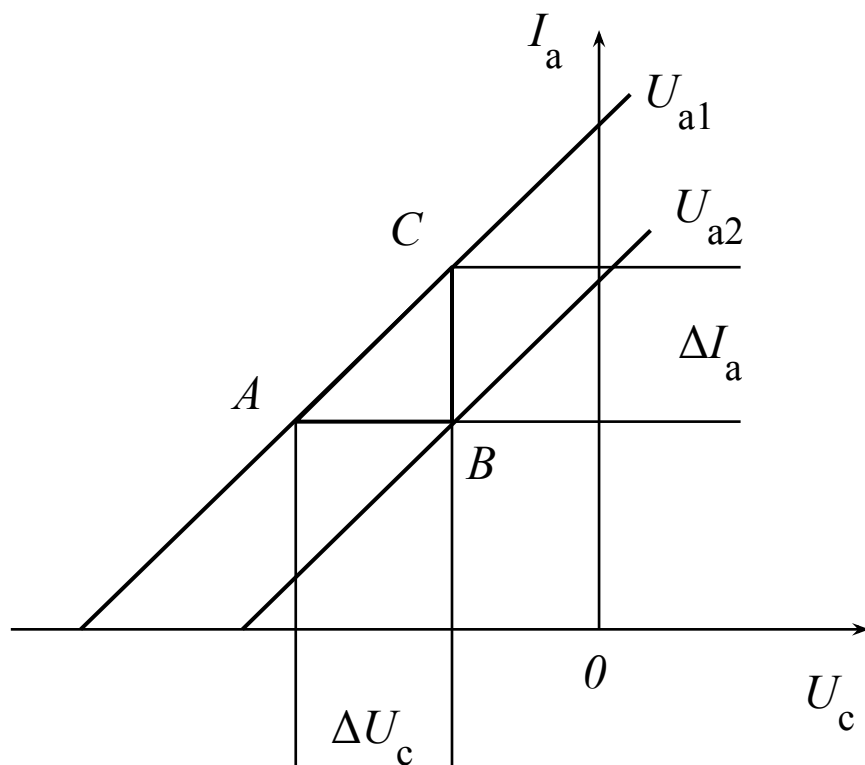
$$\mu = \left. \frac{dU_a}{dU_c} \right|_{I_a = const}.$$

Основные параметры триода связаны между собой соотношением, получившим название **внутреннее уравнение триода**:

$$D S R_i = 1, \quad D = 1/\mu, \quad \mu = S R_i.$$

# Определение параметров по характеристикам триода

Параметры триода могут быть определены по статическим характеристикам. Этот способ определения параметров называется способом характеристического треугольника. Для определения параметров графическим способом необходимо иметь не менее двух характеристик (анодно-сеточные характеристики для двух значений анодного напряжения).



# Определение параметров по характеристикам триода

Характеристический треугольник ABC дает исходные данные для определения параметров триода:

$$S = \frac{CB}{AB} = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_c},$$

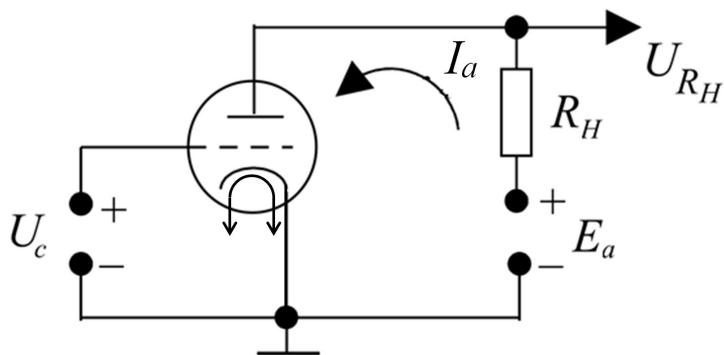
$$R_i = \frac{U_{a2} - U_{a1}}{CB} = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a},$$

$$\mu = \frac{U_{a2} - U_{a1}}{AB} = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c}.$$

Таким же образом можно определить параметры лампы, построив характеристический треугольник на анодных характеристиках.

# Рабочий режим триода

Под рабочим режимом понимают режим работы лампы при наличии нагрузки в анодной цепи. В режиме без нагрузки анодное напряжение лампы равно напряжению анодного источника  $E_a$ . Если в этом режиме напряжение сетки изменяется, то изменяется анодный ток, но анодное напряжение остается постоянным и равным  $E_a$ . Схема включения триода с нагрузкой в анодной цепи.

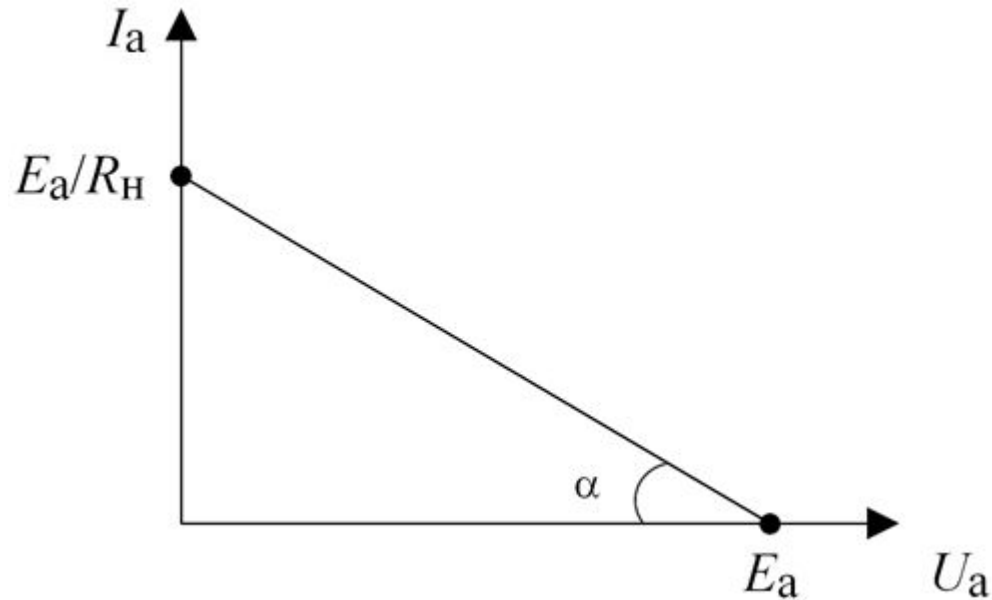


В режиме нагрузки на сопротивление  $R_H$  создается падение напряжения  $U_{R_H}$ . Поэтому анодное напряжение будет зависеть от анодного тока.  $I_a = (E_a - U_a) / R_H$ . Отсюда

Зависимость анодного тока от напряжения на аноде в рабочем режиме в координатах  $I_a - U_a$  изображается прямой линией с угловым коэффициентом  $1/R_H$ .

# Рабочий режим триода

Прямая линия называется выходной **нагрузочной характеристикой** лампы. Прямую можно построить, найдя отрезки, отсекаемые ею на координатных осях: при  $I_a = 0 - U_a = E_a$ , а при  $U_a = 0 - I_a = E_a / R_H$ .



Нагрузочную характеристику можно построить и по тангенсу угла наклона  $\alpha$ :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{y}{x} \frac{1}{R_H},$$

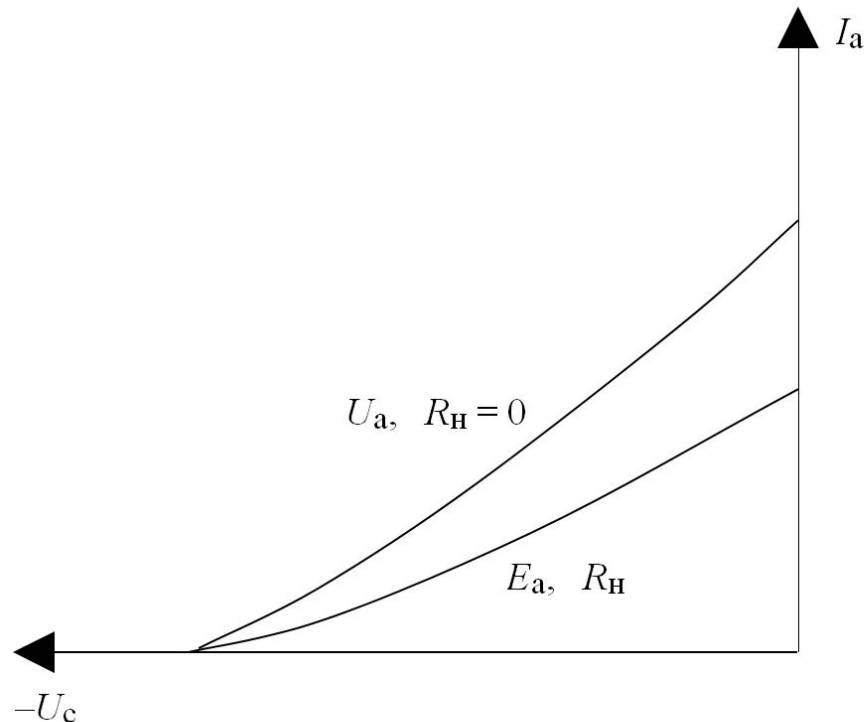
где  $y$  и  $x$  — масштабные коэффициенты по осям ординат и абсцисс соответственно.



# Рабочий режим триода

Вторая из рабочих характеристик триода – анодно-сеточная характеристика. Эта характеристика может быть построена по уравнению нагрузочной прямой.

Рабочие анодно-сеточные характеристики исходят из той же точки на оси абсцисс, что и статические, но идут более полого, чем статические, причем тем полого, чем больше  $R_{\text{H}}$ .



# Рабочие параметры триода

Зависимость анодного тока от напряжения сетки в рабочем режиме оценивается с помощью рабочей крутизны:

$$S_H = \left. \frac{dI_a}{dU_c} \right|_{\text{при } R_H = \text{const и } E_a = \text{const}}$$

Связь между рабочей крутизной и статической выражается следующим соотношением:

$$S_H = \frac{S}{1 + (R_H/R_i)}$$

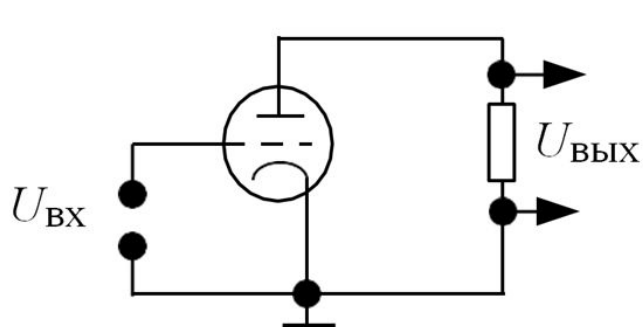
Другим важным параметром рабочего режима является **рабочий коэффициент усиления**  $\mu_H$  или  $K$ , определяющий отношение изменения анодного напряжения  $dU_a$  к напряжению  $dU_c$ :

$$\mu_H = \left. \frac{dU_a}{dU_c} \right|_{\text{при } R_H = \text{const и } E_a = \text{const}}$$

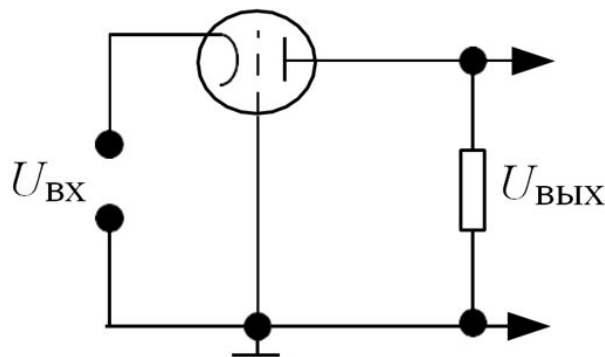
Рабочий коэффициент усиления  $\mu_H$  связан со статическим коэффициентом усиления соотношением:

$$\mu_H = \frac{\mu}{1 + (R_i/R_H)}$$

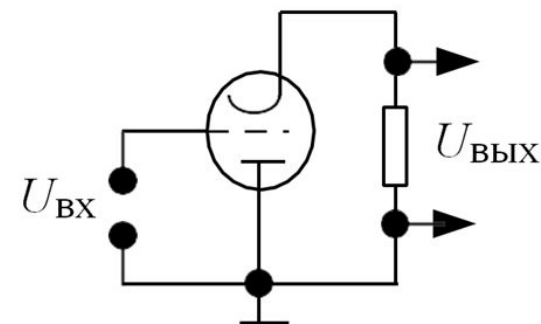
# Схемы включения триода



С общим катодом



С общей сеткой



С общим анодом

Усилительные свойства этих трех схем различны.

В области низких и высоких частот применяется схема с общим катодом.

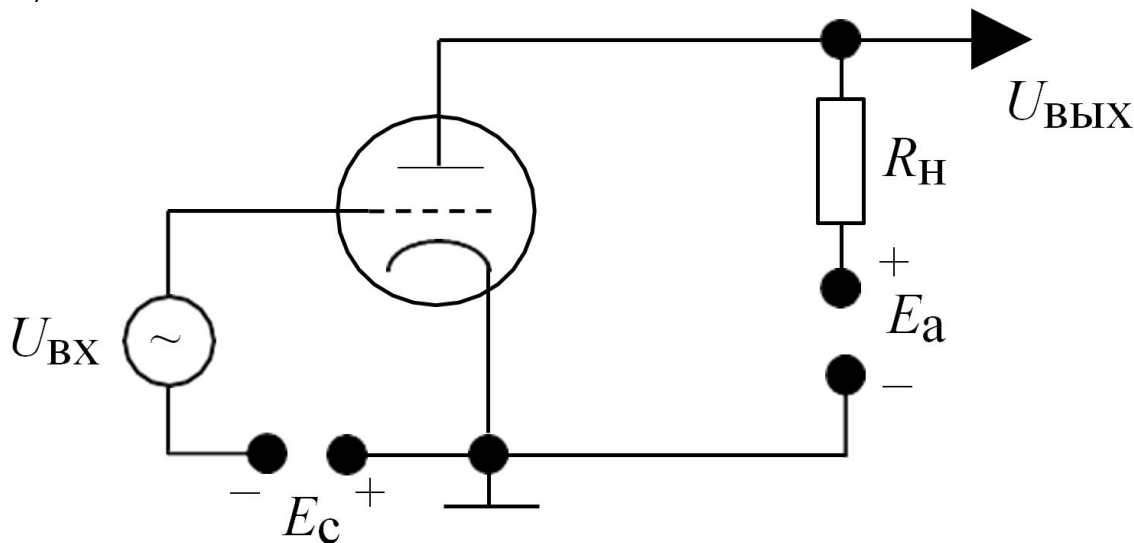
При работе в диапазоне сверхвысоких частот преимущественно применяется схема с общей сеткой.

Схема с общим анодом используется в катодных повторителях. Схема с общим анодом не дает усиления по напряжению, а дает усиление по току и по мощности.

# Квазистатический рабочий режим триода

В электронных схемах лампы в большинстве случаев работают при медленных изменениях приложенных напряжений. Такой режим работы триода называют **квазистатическим режимом**. Частота колебаний обычно не превосходит 100 МГц. За время пролета электронов через систему электродов лампы приложенные напряжения остаются практически постоянными.

Рассмотрим работу усилительного каскада. На сетку триода кроме напряжения смещения подается переменное напряжение  $U_{ВХ}$  – усиливаемый сигнал.

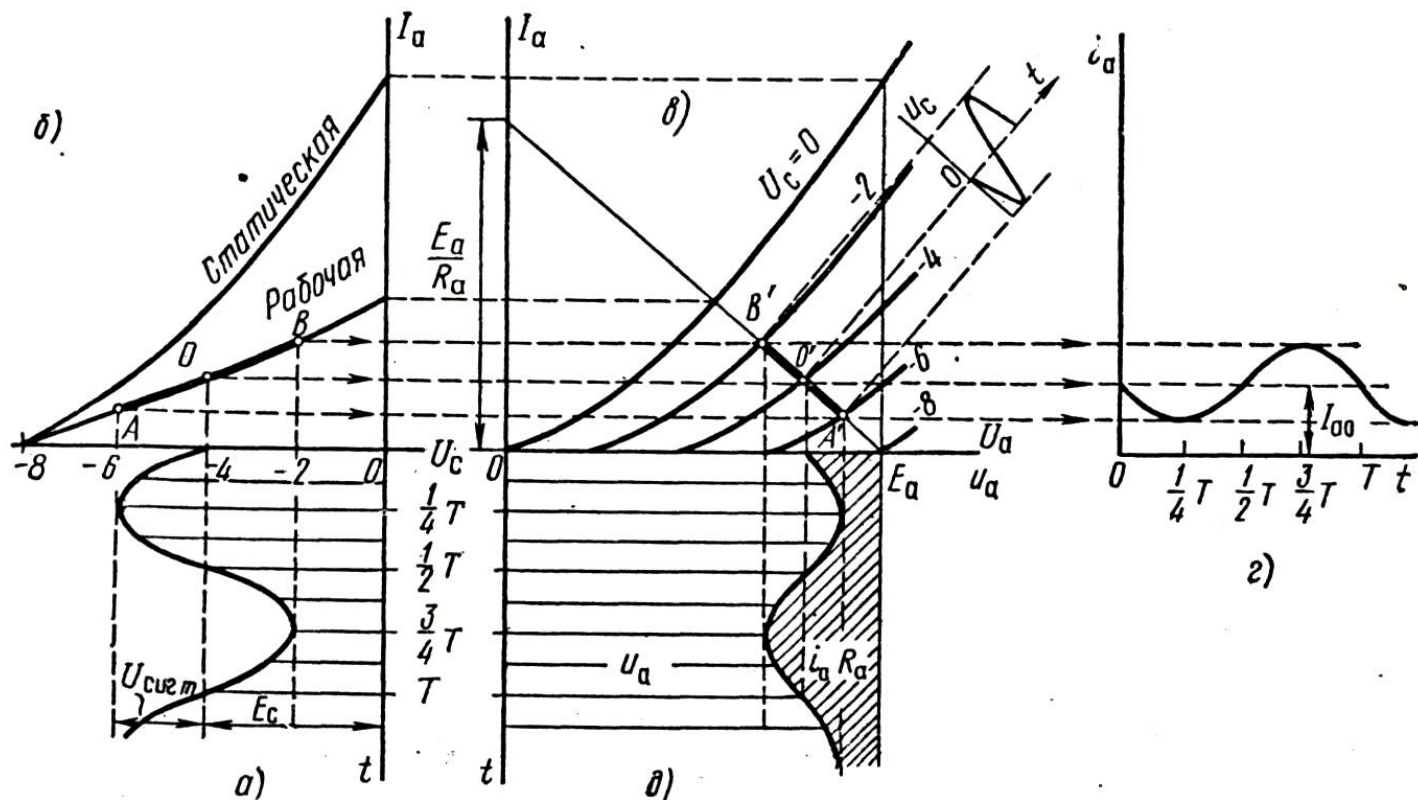


За счет входного сигнала в анодном токе содержится переменная составляющая, которая на сопротивлении нагрузки создает падение напряжения усиленный сигнал –  $U_{ВЫХ}$ .

# Квазистатический рабочий режим триода

Работу такого усилительного каскада лучше всего проанализировать графически. Для этого необходимо построить рабочие характеристики.

Показано построение рабочих характеристик триода, а также формы анодного тока и напряжений на нагрузке и на аноде лампы.



- а – форма сеточного напряжения; б – анодно-сеточные характеристики;  
 в – анодные характеристики; г – форма анодного тока;  
 д – форма падений напряжения на лампе и на нагрузке.

# Квазистатический рабочий режим триода

Пользуясь графическим представлением работы триода, можно рассчитать **параметры режима усиления**:

– полезная (выходная) мощность  $P_{\text{ВЫХ}} = \frac{1}{2} I_{\text{ам}} U_{\text{ам}}$ ;

– коэффициент усиления каскада  $K = \frac{U_{\text{ам}}}{U_{\text{см}}}$ ;

– мощность, подводимая от источника  $E_a$   $P_0 = I_{a0} E_a$ ;

– мощность, выделяемая на аноде в режиме покоя  $P_{a0} = I_{a0} U_{a0}$ ;

– коэффициент полезного действия каскада  $\eta = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_0}$ .

# Типы трехэлектродных ламп

## Триоды для усиления напряжения

Для получения большой величины усиления необходимо, чтобы лампа имела большой статический коэффициент усиления  $\mu$ , а внутреннее сопротивление  $R_1$  должно быть меньше сопротивления нагрузки. При больших  $\mu$  потенциал запирающего электрода невелик. Анодно-сеточная характеристика в области отрицательных сеточных напряжений должна быть линейной, чтобы усиление сигнала было без искажений. Триоды для усиления напряжения изготавливают с коэффициентом усиления  $\mu = 30 \dots 100$ . Крутизна характеристики этих триодов небольшая  $S = 1 \dots 5$  мА/В.

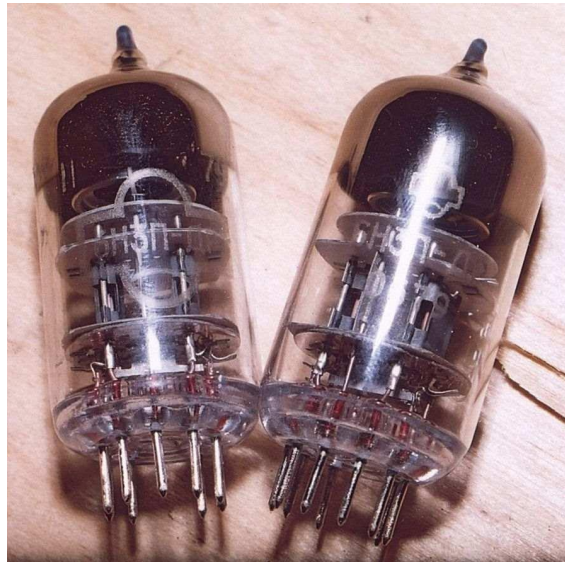
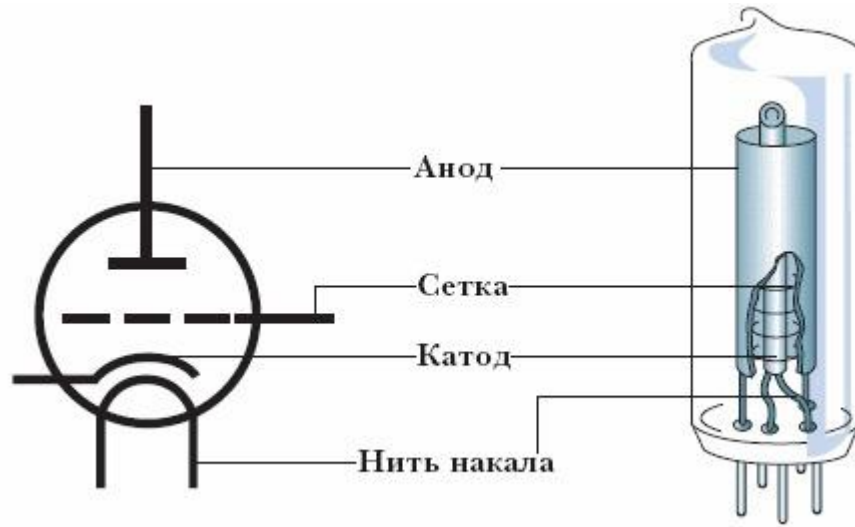
## Триоды для усиления мощности

Для получения большой полезной мощности необходимо иметь большую амплитуду переменной составляющей  $I_a$ . При неискаженном усилении необходимо, чтобы характеристика лампы имела большой прямолинейный участок в области отрицательных потенциалов сетки. Для получения большого сдвига характеристики влево коэффициент усиления должен быть небольшим. Для получения большой амплитуды анодного тока необходимо, чтобы триод имел большую крутизну характеристики  $S$ , т. к.  $I_{am} = S U_{cm}$ . Максимальная мощность, получаемая от лампы, определяется выражением:

$$P_{max} = \frac{1}{32} \mu E_a^2.$$

Триоды для усиления мощности должны иметь большую крутизну  $S$  и малый коэффициент усиления  $\mu$ .

# Трехэлектродные лампы





# Генераторные лампы

Генераторные лампы предназначены для усиления и генерирования колебаний низких и высоких частот. Работу генераторных ламп характеризуют следующие параметры:

– полезная (выходная) мощность

$$P_{\text{ВЫХ}} = \frac{1}{2} I_{\text{ам}} U_{\text{ам}};$$

– входная мощность

$$P_{\text{ВХ}} = \frac{1}{2} I_{\text{см}} U_{\text{см}};$$

– коэффициент усиления по мощности

$$K_P = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P};$$

– коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_0};$$

– мощность, рассеиваемая анодом

$$P_{\text{а max}} = I_{\text{а}} U_{\text{а}}.$$

Коэффициент полезного действия генераторной лампы определяется выражением:

$$\eta = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВЫХ}} + P_{\text{а}}}.$$

# Генераторные лампы

Основные требования:

- а) генераторные лампы должны обладать большими допустимыми значениями анодного напряжения, анодного тока, мощности, рассеиваемой на аноде;
- б) генераторные лампы должны обладать малой проходной емкостью;
- в) генераторные лампы должны иметь большой статический коэффициент усиления;
- г) генераторные лампы должны иметь «правые» анодно-сеточные характеристики;
- д) генераторные лампы должны иметь высоковольтную конструкцию;
- е) генераторные лампы должны иметь большую крутизну и небольшое сопротивление в режиме возврата.

# Генераторные лампы

Предельная допустимая мощность  $P_{a \max}$  определяет и величину полезной колебательной мощности  $P_{\text{ВЫХ}}$ , которую можно получить от данной лампы.

Поэтому принята следующая классификация генераторных ламп по мощности:

1. Генераторные лампы малой мощности ( $P_{a \max} < 20$  Вт). Эти лампы по своей конструкции и внешнему виду мало отличаются от приемно-усилительных ламп.

2. Генераторные лампы средней мощности ( $P_{a \max}$  от 20 Вт до 1 кВт). Эти лампы по своей конструкции существенно отличаются от приемно-усилительных ламп, но аноды их имеют естественное охлаждение.

3. Мощные генераторные лампы ( $P_{a \max} > 1$  кВт). Эти лампы работают при наиболее высоких анодных напряжениях (до 20 кВ) и имеют принудительное охлаждение.

# Генераторные лампы

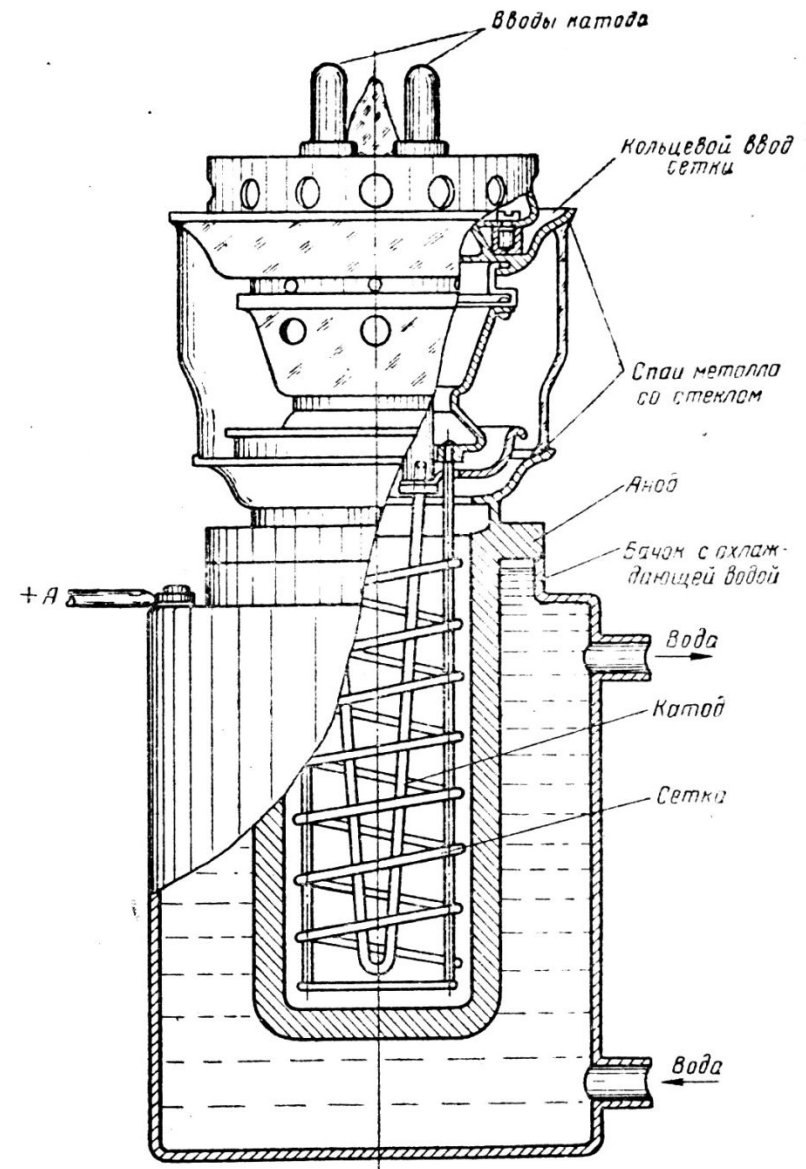
Наиболее распространенным типом генераторных ламп малой и средней мощности являются пентоды. Основные достоинства пентодов при применении их в радиопередающих устройствах следующие:

1. Большой коэффициент использования анодного напряжения ( $\xi = 0.9 \dots 0.95$ ). Благодаря этому от лампы можно получить большую полезную мощность.
2. Большая величина коэффициента усиления  $\mu$ . Вследствие большого коэффициента усиления пентода требуется меньшая амплитуда напряжения возбуждения, что позволяет уменьшить число ступеней усиления мощности.
3. Небольшая проходная емкость, что обеспечивает более устойчивую работу генератора.
4. Отсутствие динаatronного эффекта.
5. Возможность использования защитной сетки в качестве модулярной сетки.

Наряду с пентодами в генераторах и других электронных устройствах находят применение также *лучевые тетроды*.

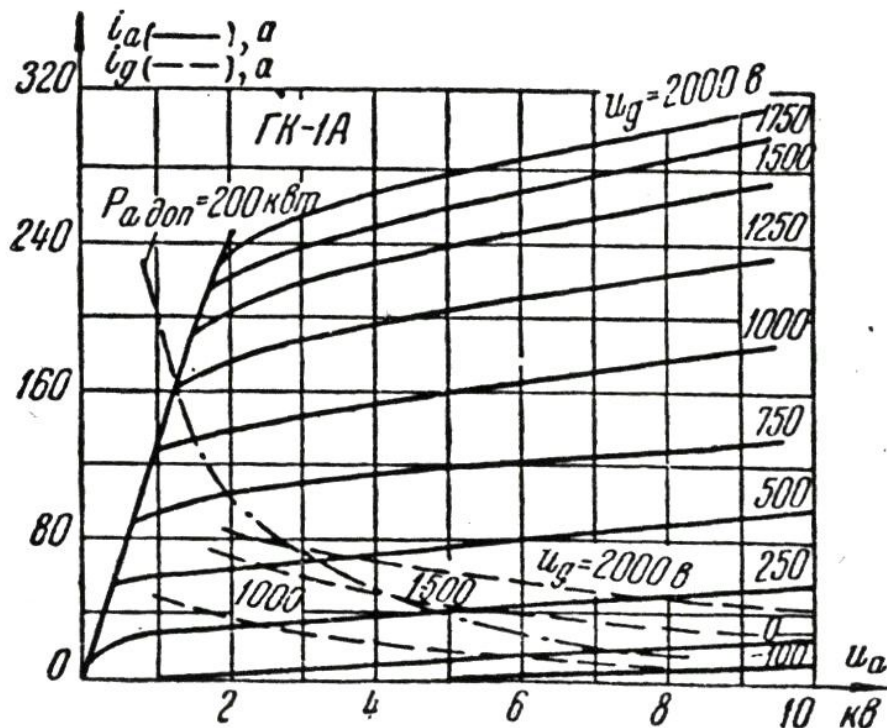
# Генераторные лампы

Большинство мощных ламп имеют триодную конструкцию, так как при конструировании мощных ламп встречаются большие трудности с отводом тепла от сеток. Конструкция генераторных ламп с принудительным охлаждением позволяет очень просто охладить анод. Анод лампы погружается в бачок с проточной водой или снабжается радиатором, обдуваемым воздухом.



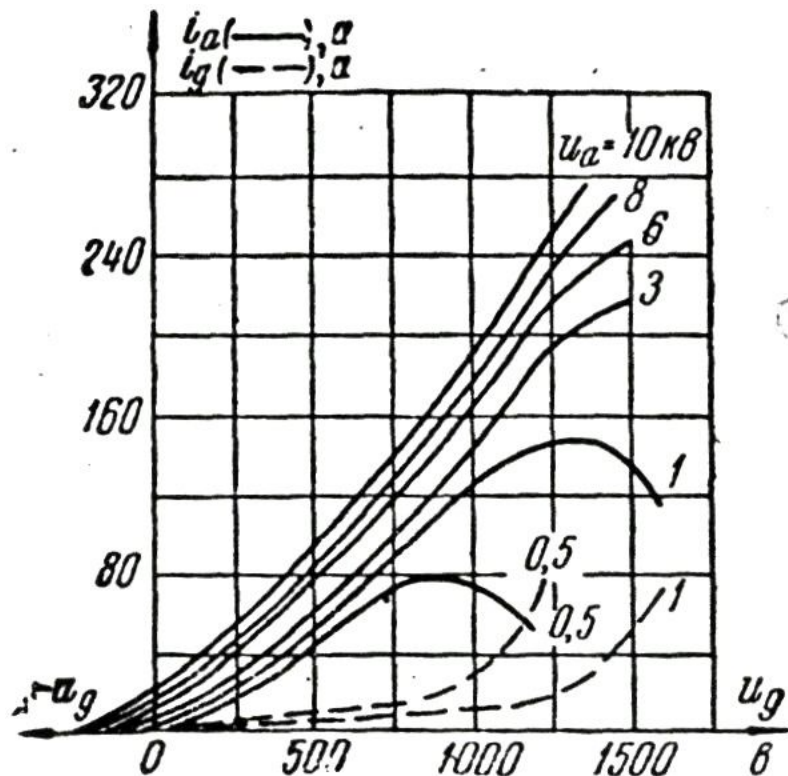
# Генераторные лампы

В генераторных лампах используется режим работы с «отсечкой» анодного тока, обеспечивающий более высокий КПД. Для получения большой мощности необходимо использовать анодный ток лампы вплоть до предельно допустимой величины. Следовательно, мгновенное напряжение на сетке должно достигать до больших положительных значений, что приводит к большим сеточным токам. В силу указанных обстоятельств семейство анодных характеристик генераторной лампы состоит из характеристик анодного тока, снятых как при отрицательных, так и при положительных напряжениях на сетке.



# Генераторные лампы

Анодно-сеточные характеристики мощного триода ГК-1А сдвинуты вправо.



Верообразное расхождение характеристик объясняется тем, что при меньшем напряжении на аноде ток сетки растет быстрее, чем анодный ток. Для обеспечения правых характеристик управляющая сетка лампы должна быть густой, т. е. с малой проницаемостью и большим коэффициентом усиления.

# Генераторные лампы





# Электронно-лучевые приборы

Электронно-лучевые приборы (ЭЛП) – это приборы, в которых формируются и используются электронные потоки в виде тонких лучей.

К электронно-лучевым приборам относятся осциллографические трубки, радиолокационные трубки, приемные телевизионные трубки, передающие телевизионные трубки, электронно-оптические преобразователи и др.

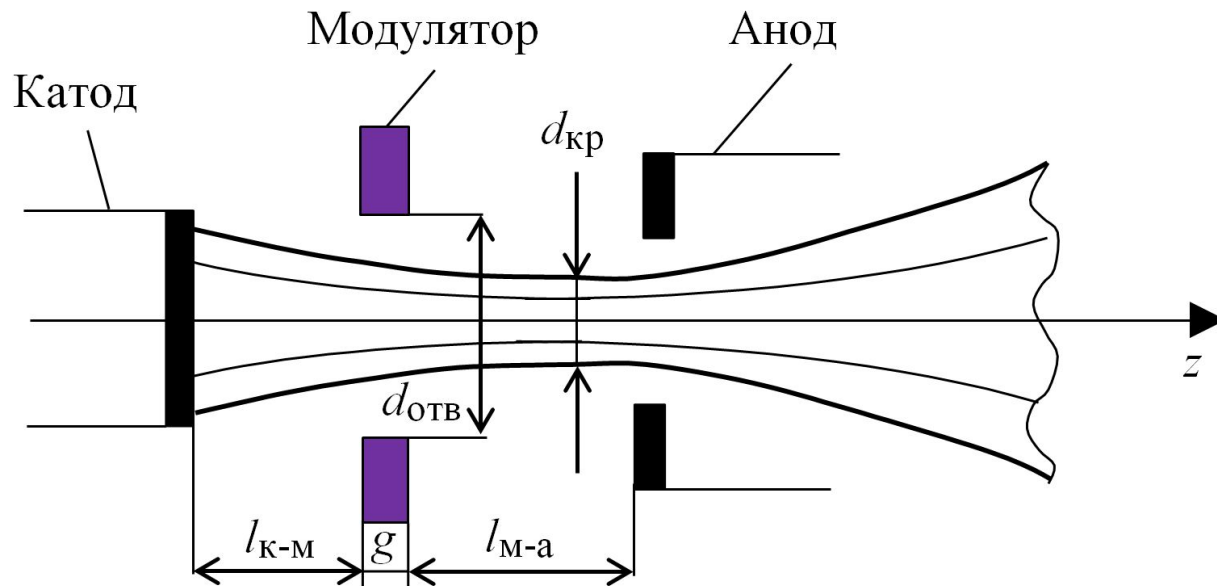
Общими элементами таких типов приборов являются:

- 1) электронная пушка, служащая для предварительного формирования электронного пучка;
- 2) электронные линзы, служащие для формирования электронного пучка на мишени требуемой конфигурации и интенсивности;
- 3) отклоняющая система, служащая для управления сфокусированным пучком;
- 4) приемник электронного пучка – устройство, где при взаимодействии с электронами пучка происходит основной эффект. Наиболее распространенным видом приемника является люминесцирующий экран, а также потенциалоносители (мишени);
- 5) корпус (баллон) прибора, служащий для сохранения в нем вакуума и для крепления внутренних деталей прибора.

# Электронная пушка

Электронная пушка (прожектор) предназначена для формирования кроссвера, являющегося объектом для главной электронной линзы, которая отображает его на экране прибора. В обычных ЭЛП объемный заряд пучка небольшой. Первеанс пучка не превышает  $10^{-9} \text{ A/V}^{3/2}$ , и действием пространственного заряда можно пренебречь. Поэтому в таких приборах применяют слаботочные электронные пушки, элементы которых состоят из диаграмм и цилиндров.

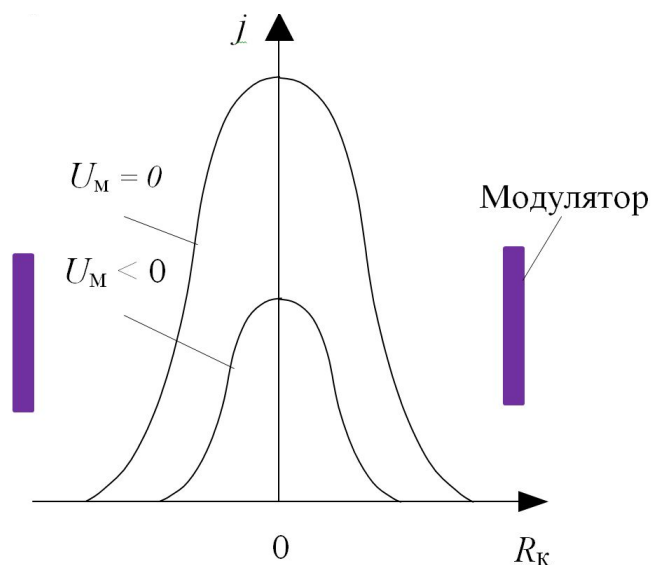
Практически во всех ЭЛП электронной пушкой является иммерсионный объектив, состоящий из трех элементов: катода, модулятора и анода (ускоряющего электрода).



# Электронная пушка

Изменение потенциала модулятора регулирует ток, отбираемый с катода. Управляющий электрод (модулятор) представляет собой диафрагму толщиной  $g$  и диаметром отверстия  $d_{\text{отв}}$ . На модулятор подается регулируемый отрицательный потенциал для регулировки тока луча. Ускоряющий электрод (анод) выполняется обычно в виде цилиндра, а со стороны модулятора он закрыт диафрагмой. На анод подается ускоряющее напряжение. Через отверстие в модуляторе поле анода провисает сильнее на оси и убывает в направлении радиуса. Следовательно, катод нагружен неравномерно и наибольший отбор тока имеет место с его центрального участка.

Изменение потенциала модулятора оказывает двойное действие на ток катода. Во-первых, ток меняется за счет изменения пространственного заряда у катода. Во-вторых, ток меняется за счет изменения площади поверхности катода, у которой создается положительный градиент поля. Следовательно, изменение потенциала модулятора сопровождается более быстрым изменением тока, отбираемого с катода, чем изменение потенциала сетки в триоде.



# Электронная пушка

Диаметр рабочей поверхности катода определяется по формуле

$$d_{\text{к}} = \frac{(U_3 - U_{\text{м}}) \cdot d_{\text{отв}}}{U_3},$$

где  $U_{\text{м}}$  – напряжение модулятора;  $U_3$  – запирающее напряжение;  $d_{\text{отв}}$  – диаметр отверстия модулятора.

Ток с катода можно выразить следующим соотношением:

$$I_{\text{к}} = 3 \frac{(U_3 - U_{\text{м}})^{3/2}}{U_3^2}.$$

Средняя плотность тока катода:

$$j_{\text{к}} = \frac{12 (U_3 - U_{\text{м}})^{3/2}}{\pi d_{\text{отв}}^2}.$$

Зависимость запирающего напряжения от геометрических параметров пушки выражается формулой Гайне:

$$U_3 = 0.034 \frac{(d_{\text{отв}} - \delta)^{3/2}}{l_{\text{км}} l_{\text{ам}}} U_{\text{а}}.$$

где  $\delta$  – толщина стенки диафрагмы модулятора;  $l_{\text{км}}$  – расстояние катод-модулятор;  $l_{\text{ам}}$  – расстояние анод-модулятор;  $U_{\text{а}}$  – ускоряющее напряжение.

# Электронная пушка

Угол расхождения пучка в скрещении определяется следующим выражением:

$$\sin \alpha = 0.3 \frac{d_{\text{отв}}}{l_{\text{ам}}^{3/4}} \frac{U_3 - U_{\text{м}}}{U_3}.$$

Для оценки диаметра пятна на экране трубки необходимо знать радиус пучка в скрещении. Величина радиуса пучка в скрещении может быть найдена из уравнения:

$$0.1 = \exp\left(\frac{eU_{\text{а}}}{kT} \frac{r_{\text{с}}^2 \sin \alpha}{r_{\text{к}}^2}\right).$$

где  $T$  – температура катода;  $k$  – постоянная Больцмана;  $r_{\text{с}}$  – радиус скрещении;  $r_{\text{к}}$  – радиус катода;  $U_{\text{а}}$  – потенциал анода (ускоряющего электрода);  $\sin \alpha$  – угол расхождения пучка в скрещении.

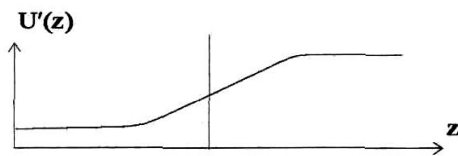
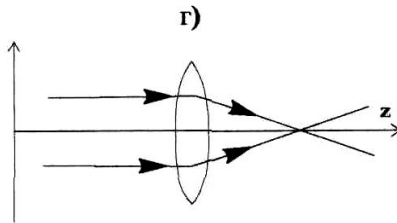
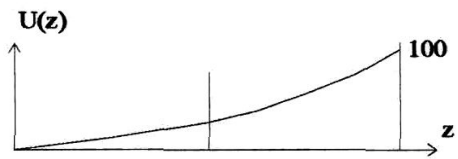
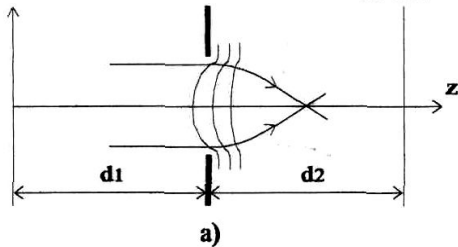
# Электронные линзы

Для формирования электронного луча в трубках используют электронные линзы. **Линза** – устройство, создающее аксиально-симметричное неоднородное или магнитное поле.

*Линза-диафрагма образуется диафрагмой с круглым отверстием.*

Электронно-оптическая система, состоящая из двух плоских электродов с потенциалами  $U_1$  и  $U_2$ , между которыми помещена

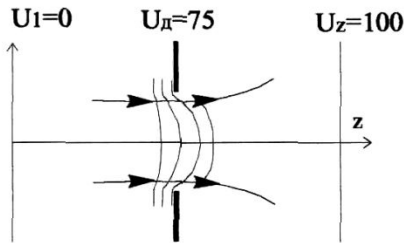
диафрагма радиусом  $D$  и потенциалом  $U_d$



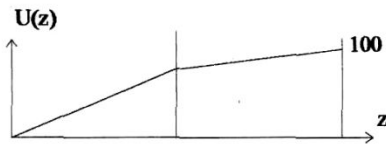
В области диафрагмы вдоль оси  $z$  будет иметь место провисание эквипотенциалей из области с большей напряженностью поля в область с меньшей напряженностью. Следовательно, в области диафрагмы образуется электронная линза. В этой линзе  $U(z)'' > 0$  свидетельствует о том, что линза собирающая.

# Электронные линзы

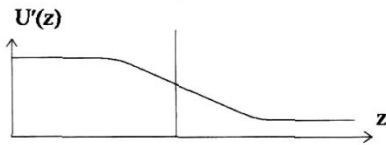
Второй возможный случай соответствует рассеивающей электронной линзе.



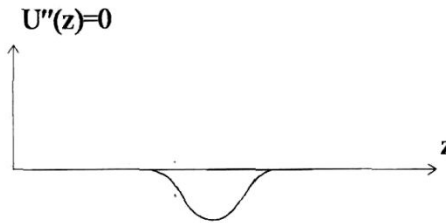
а)



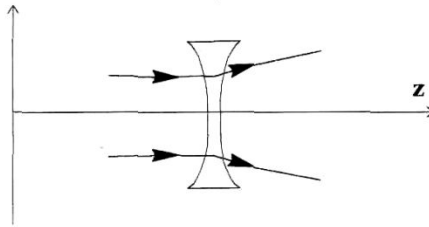
б)



в)



г)



д)

Аналитическое выражение для фокусного расстояния линзы-диафрагмы может быть представлено следующим выражением

$$\frac{1}{f_{\text{д}}} = \frac{1}{4U_{\text{д}}} \int_a^b U''(z) dz,$$

где  $U_{\text{д}}$  – потенциал диафрагмы;  $a, b$  – область неоднородного поля линзы.

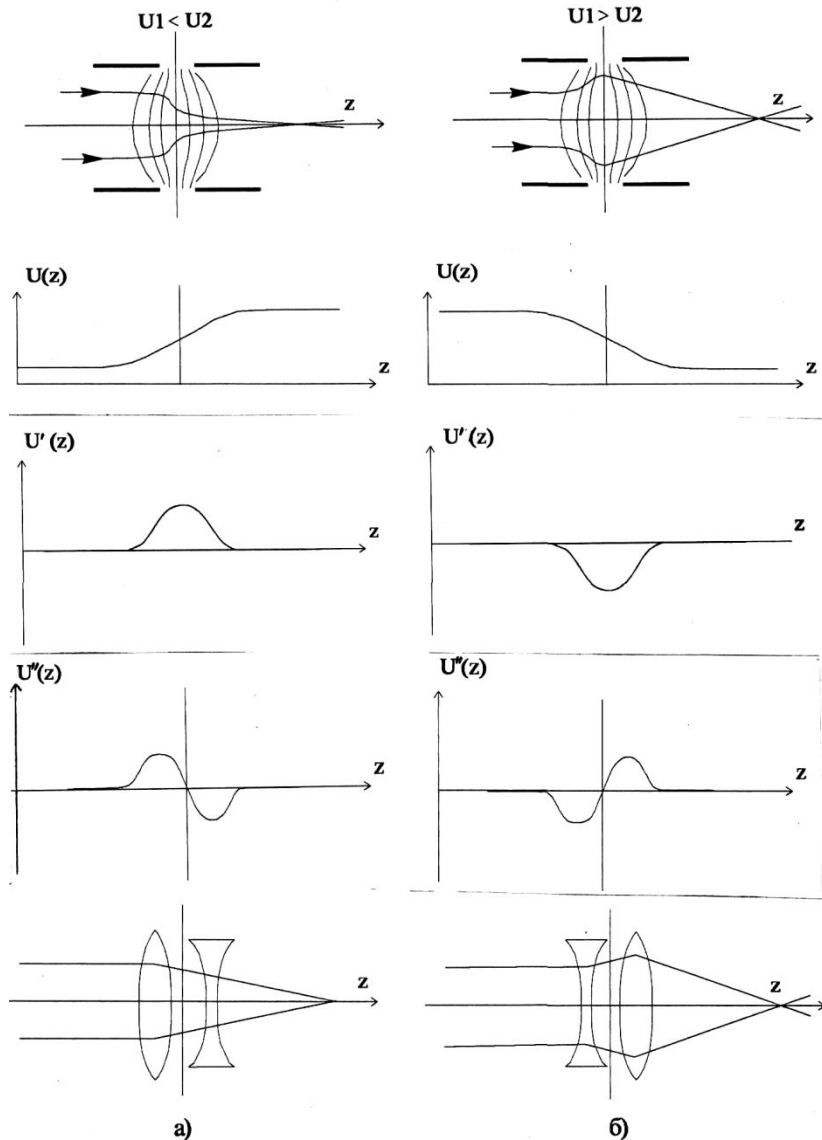
Распределение потенциала вдоль оси  $z$  для линзы-диафрагмы хорошо описывается выражением:

$$U(z) = U_{\text{д}} + \frac{R}{\pi} (E_1 - E_2) \left( 1 + \frac{z}{R} \arctg \frac{z}{R} \right) - \frac{1}{2} (E_1 + E_2) z,$$

где  $E_1$  и  $E_2$  – значения напряженности полей слева и справа от диафрагмы;  $R$  – радиус отверстия диафрагмы.

# Электронные линзы

## Иммерсионная линза



Она образуется двумя цилиндрами или диафрагмами с разными потенциалами. Между электродами, образующими линзу, образуется аксиально-симметричное поле, являющееся электронной линзой. Здесь возможны два случая: первый, когда потенциал второго электрода  $U_2$  больше потенциала первого  $U_1$  ( $U_2 > U_1$ ), и второй случай, когда  $U_2 < U_1$ .

- Свойства иммерсионных линз:
- 1) они всегда собирающие;
  - 2) они несимметричны, т.е. их фокусные расстояния  $f_1$  и  $f_2$  не равны и относятся как:

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{\sqrt{U_2}}{\sqrt{U_1}};$$

- 3) изменяет энергию электронного пучка.

Распределение потенциала вдоль оси  $z$ :

$$U(z) = \frac{U_1 + U_2}{2} + \frac{U_2 - U_1}{2} \operatorname{th} \frac{2.63}{D} z,$$

где  $D$  – диаметр цилиндров линзы.



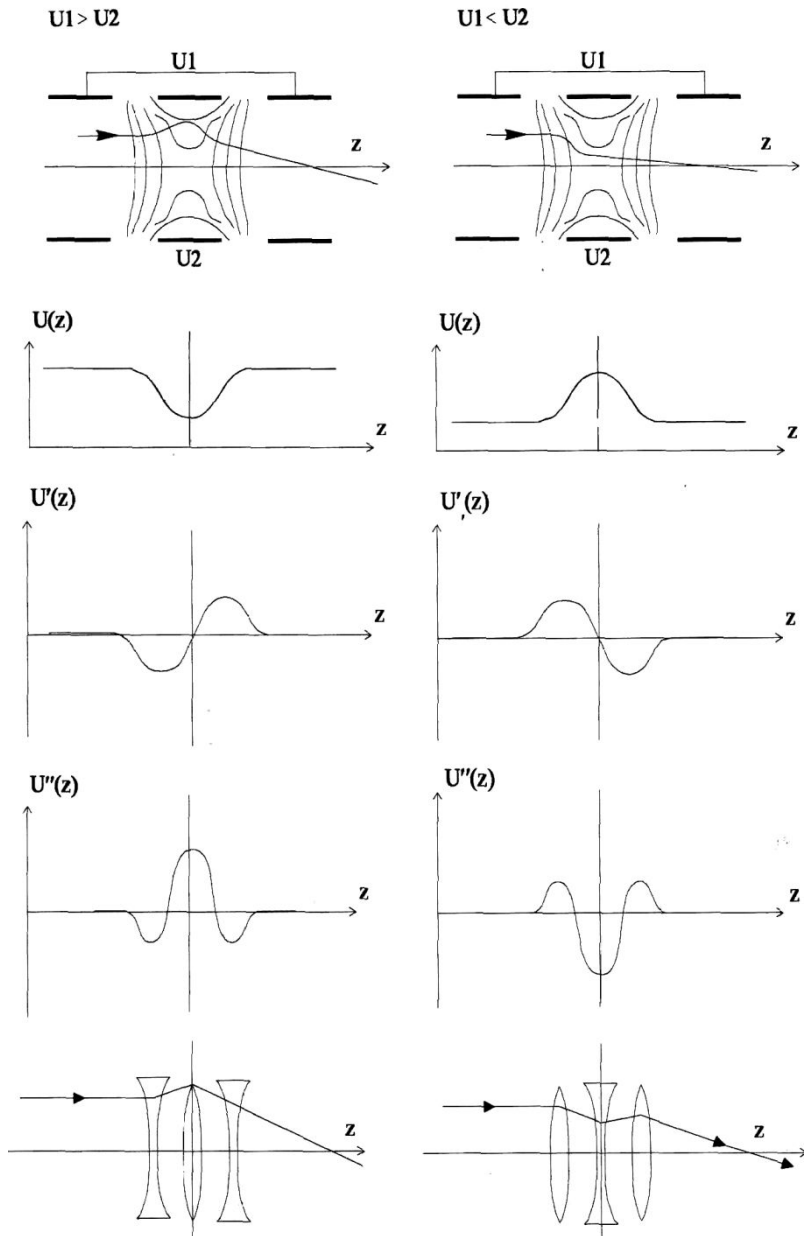
# Электронные линзы

## Симметричная линза

Она образуется различными комбинациями из трех диафрагм и цилиндров. Потенциалы крайних электродов линзы равны. Поле линзы разбито на три части, из которых две оказывают на электроны собирающее или рассеивающее действие, а третья область – противоположное. Симметричная линза, как и иммерсионная, всегда является собирающей.

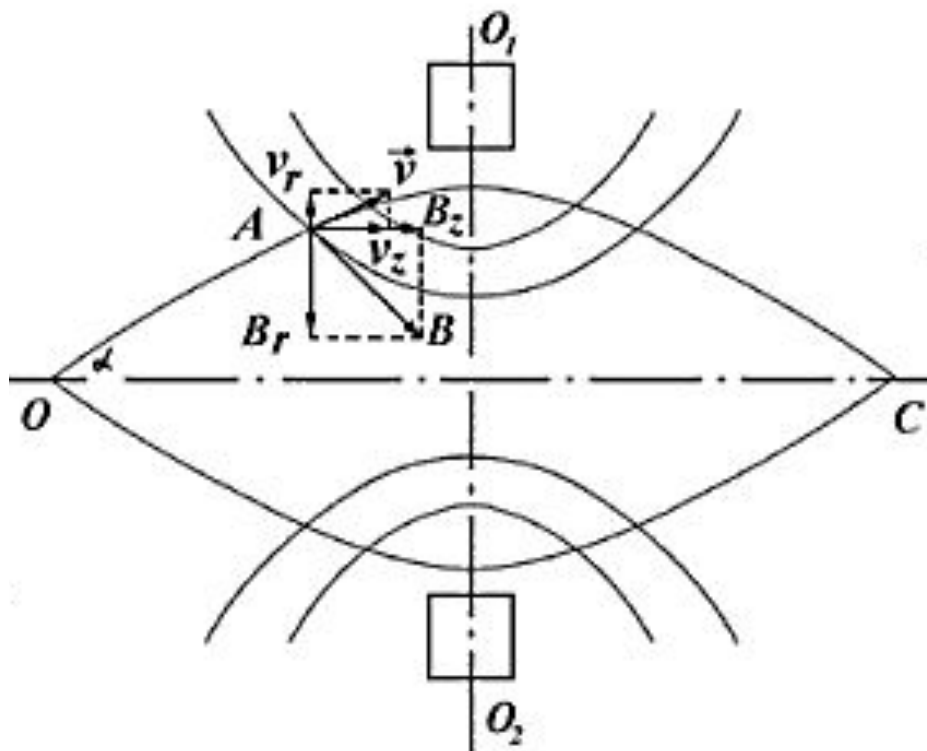
Для линзы, образованной цилиндрами равных радиусов  $R$  при длине среднего цилиндра  $L$ , распределение потенциала вдоль оси  $z$  представлено в виде:

$$U(z) = U_1 - \frac{(U_1 - U_2) \operatorname{sh} \frac{1.3L}{R}}{ch \frac{1.3L}{R} - \frac{2.6z}{R}}$$



# Магнитные линзы

Рассмотрим движение электрона, выходящего из некоторой точки  $A$  на оси. При попадании в область поля электрон начинает взаимодействовать с этим полем, появляются силы, искривляющие траекторию электрона, возникает «фокусирующая» сила, направленная к оси симметрии поля. Траектория электрона является трехмерной кривой.



Уравнение траекторий параксиальных электронов в аксиально-симметричном магнитном поле в дифференциальной форме имеет вид:

$$\frac{d^2 r}{dz^2} = -\frac{eB_z^2}{8mU_a} r,$$

где  $U_a$  – ускоряющее напряжение;  $B_z$  – распределение магнитной индукции вдоль оси  $z$ .

Это уравнение считается **основным уравнением** электронной оптики магнитных полей.

# Магнитные линзы

Распределение магнитной индукции на оси короткой катушки со средним радиусом намотки  $R_{\text{ср}}$  определяется следующим выражением:

$$B(z) = \frac{\mu_0 R_{\text{ср}}^2 n I}{2(R_{\text{ср}}^2 + z^2)^{3/2}} r,$$

где  $n$  – число витков в катушке;  $I$  – ток катушки.

Фокусное расстояние такой магнитной линзы можно рассчитать по формуле:

$$f = 100 \frac{U_a R_{\text{ср}}}{(n I)^2},$$

где  $U_a$  – ускоряющее напряжение.

Угол поворота изображения определяется следующим выражением:

$$\varphi = 10.7 \frac{n I}{\sqrt{U_a}}.$$

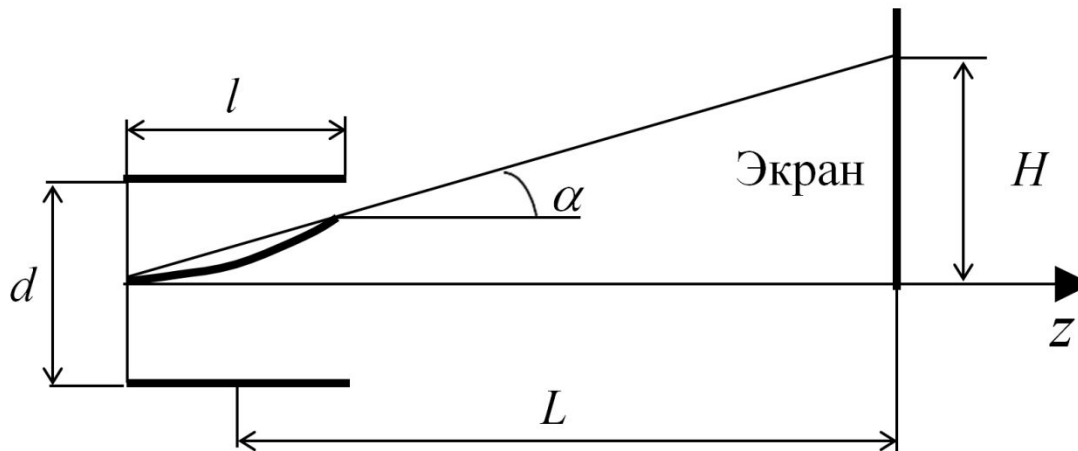
Для получения короткофокусной линзы катушку помещают в магнитный панцирь с узкой кольцевой щелью. Магнитное поле концентрируется в области щели, и продольный размер линзы резко сокращается.

# Отклоняющие системы

К отклоняющим устройствам предъявляется ряд требований:

- 1) отклоняющая система должна иметь большую чувствительность к отклонению;
- 2) отклоняющая система должна обеспечивать необходимый угол отклонения луча;
- 3) отклоняющая система должна давать меньшие искажения;
- 4) отклоняющая система должна иметь малую емкость и индуктивность.

Простейшей электростатической отклоняющей системой являются две параллельные пластины длиной  $l$ , расположенные на расстоянии  $d$  друг от друга и на расстоянии  $L$  от экрана.



# Отклоняющие системы

Отклонение пучка на экране трубки для данной системы отклонения определяется по выражению:

$$H = \frac{l L U_{\text{п}}}{2 d U_{\text{а}}},$$

где  $U_{\text{п}}$  – напряжение между пластинами;  $U_{\text{а}}$  – ускоряющее напряжение.

Чувствительность параллельных пластин:

$$\varepsilon_e = K \frac{l L}{2 d U_{\text{а}}},$$

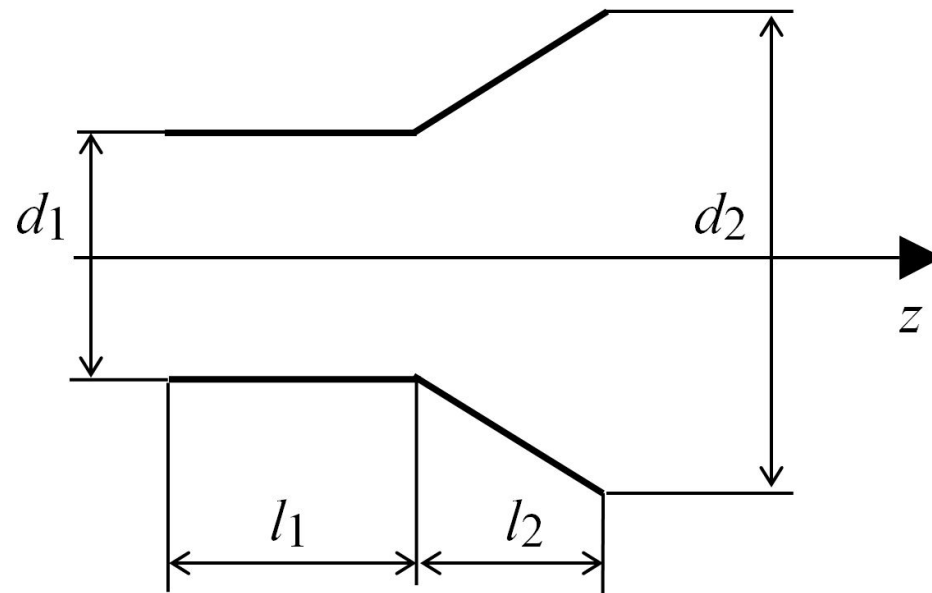
где  $K$  – коэффициент, учитывающий поле рассеяния, обычно  $K = 1.15$ .

Можно сделать следующие выводы:

1. Чувствительность электростатического отклонения не зависит от величины заряда и массы частиц.
2. Чувствительность обратно пропорциональна ускоряющему напряжению.

# Отклоняющие системы

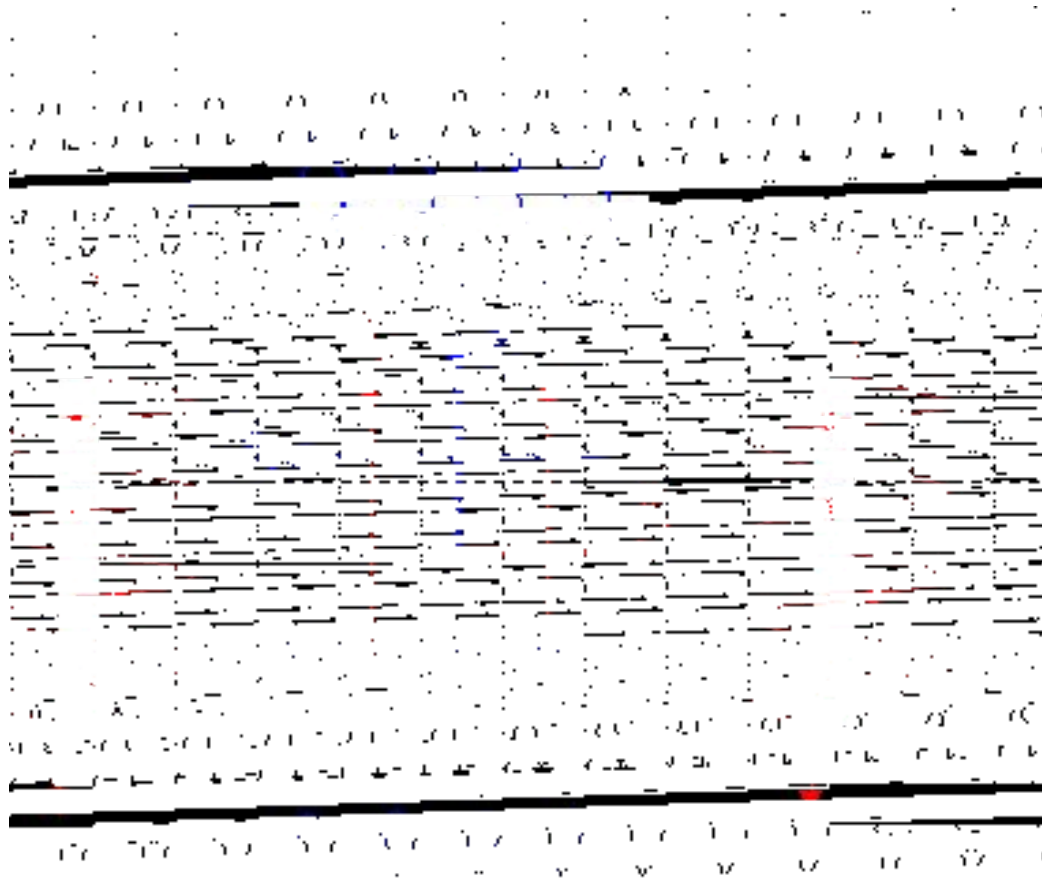
Параллельные отклоняющие пластины не могут обеспечить достаточный угол отклонения при хорошей чувствительности. Поэтому на практике часто применяют плоскопараллельные пластины с отогнутыми краями.



Такая форма отклоняющих пластин позволяет получить хорошую чувствительность и угол отклонения. Однако на практике углы отклонения не превышают  $20^\circ$ , т. к. с ростом угла отклонения растут искажения, вносимые отклоняющей системой.

# Отклоняющие системы

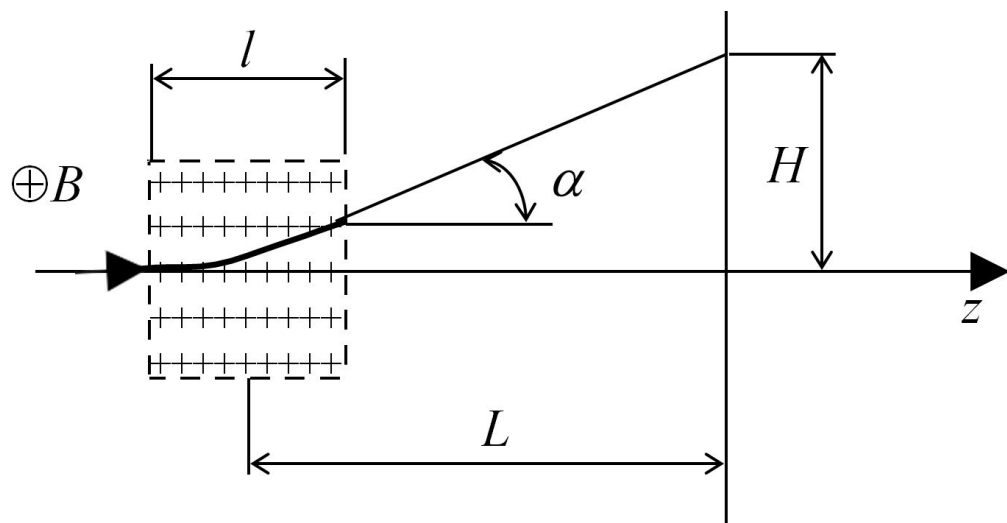
В случае магнитного отклонения используются однородные взаимоперпендикулярные магнитные поля, создаваемые двумя парами обтекаемых током отклоняющих катушек.



Горизонтально расположенные катушки соединяются последовательно, и по ним проходит ток, создающий магнитное поле, под действием которого пучок будет перемещаться в вертикальной плоскости. Вертикально расположенные катушки также соединяются последовательно и своим магнитным полем будут вызывать перемещение пучка по горизонтали.

# Отклоняющие системы

Рассмотрим подробнее отклонение пучка магнитным полем. Будем считать, что магнитное поле, созданное парой катушек, однородно и имеет индукцию  $B$ . Ширина поля, пересекаемая электронным пучком, равна  $l$ . Расстояние до экрана равно  $L$ .



Электронны, входя в поперечное магнитное поле, движутся по дуге окружности. Пройдя по дуге, пучок выходит из зоны магнитного поля под углом  $\alpha$  к оси  $z$ , а затем движется по прямой линии до экрана.

Величина отклонения пучка на экране трубки:

$$H = \sqrt{\frac{e}{2m}} \frac{l L B}{\sqrt{U_a}}$$

Чувствительность магнитного отклонения:

$$\varepsilon_M = \sqrt{\frac{e}{2m}} \frac{l L}{\sqrt{U_a}}$$



# Отклоняющие системы

## Закономерности магнитного отклонения:

- 1) чувствительность при магнитном отклонении зависит от заряда и массы частицы. Следовательно, ионы, имеющие большие массы, будут плохо отклоняться магнитным полем;
- 2) чувствительность магнитного отклонения обратно пропорциональна  $\sqrt{U_a}$ ;
- 3) магнитное отклонение требует в противоположность электростатическому затраты энергии.

Так как индукция магнитного поля пропорциональна числу ампервитков катушки, то удобнее чувствительность при магнитном отклонении выражать:

$$\varepsilon_M = \frac{H}{n I}.$$

Следует отметить, что частотный диапазон системы магнитного отклонения значительно меньше, чем у системы электростатического отклонения, т. к. индуктивное сопротивление катушек имеет большую величину.

# Люминесцирующие экраны

Основу люминесцирующего экрана составляет **катодолюминофор** – вещество, способное светиться под действием бомбардировки электронами.

Взаимодействие электронов с кристаллической решеткой люминофора сопровождается передачей энергии электронам решетки, которые возбуждаются в состояния с более высокой энергией. Возврат этих электронов в нормальное состояние сопровождается выделением энергии, возникает **катодолюминесценция**.

Она связана с наличием в кристалле неоднородностей – центров свечения. Поэтому в процессе изготовления люминофоров в их решетке создаются примеси (активаторы), которые влияют на свойства люминофора.

Цвет свечения люминофора зависит от его природы, а также от наличия в нем активаторов. В качестве активаторов широко применяются серебро, медь, марганец.

# Люминесцирующие экраны

К основным группам люминофоров относятся следующие люминофоры:

- 1) сульфидные люминофоры ( $\text{ZnS}$ ,  $\text{CdS}$ );
- 2) силикатные люминофоры ( $\text{Zn}_2\text{SiO}_4$ );
- 3) вольфраматы ( $\text{CaWO}_4$ ,  $\text{CdWO}_4$ );
- 4) фторидные люминофоры ( $\text{ZnF}_2$ ,  $\text{MgF}_2$ );
- 5) оксидные люминофоры ( $\text{ZnO}$ ,  $\text{CdO}$ ).

По длительности послесвечения люминофоры разбиты на следующие группы:

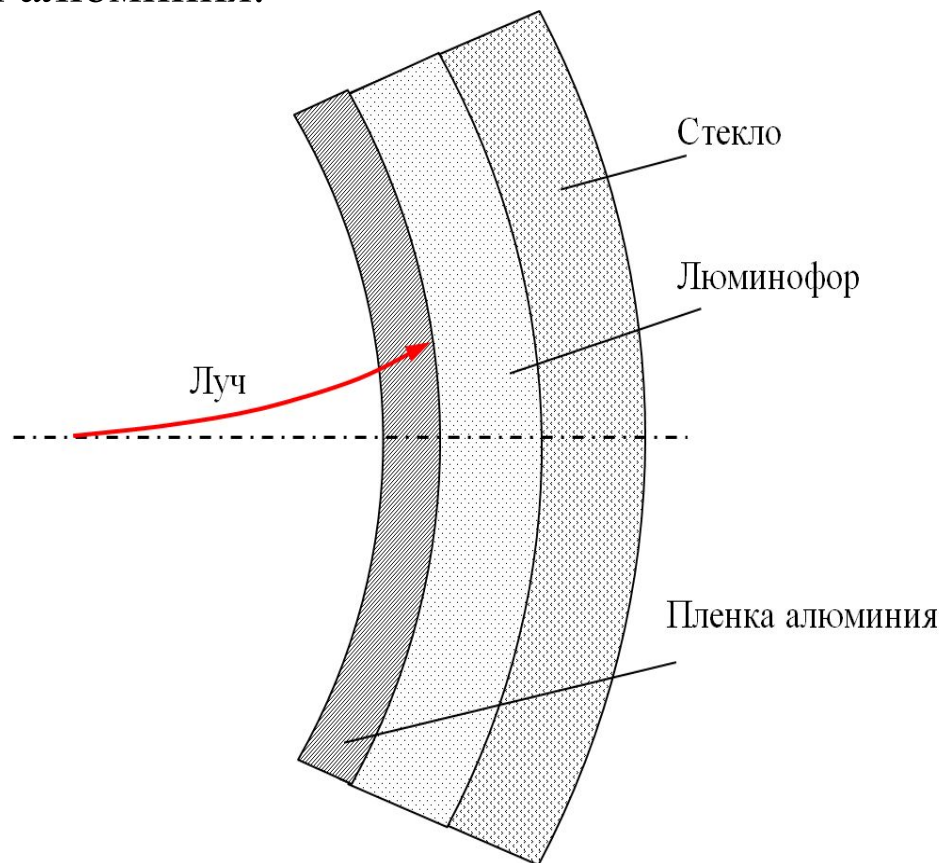
- a) очень короткое  $\tau_{\text{п}}$  с  $10^{-5}$  с;
- b) короткое  $10^{-5} < \tau_{\text{п}} < 10^{-2}$  с;
- c) среднее  $10^{-2} < \tau_{\text{п}} < 10^{-1}$  с;
- d) длительное  $10^{-1} < \tau_{\text{п}} \leq 16$  с.

# Люминесцирующие экраны

**Все люминофоры являются диэлектриками.**

Электроны, попадая на экран, приносят отрицательный заряд. Отвод заряда с экрана происходит в основном за счет вторичной электронной эмиссии, возникающей при бомбардировке экрана пучком электронов.

Во многих электронно-лучевых приборах люминофор покрывается тонкой пленкой алюминия.



# Люминесцирующие экраны

Такие экраны имеют преимущества.

Первичный электронный пучок, имеющий большую энергию, будет проходить через тонкую пленку алюминия и возбуждать свечение люминофора. Часть светового потока будет отражаться зеркальной пленкой алюминия в сторону наблюдателя, повышая яркость свечения экрана. Кроме этого, будет повышаться и контрастность экрана.

Важным преимуществом является также и то, что в случае наличия алюминиевой пленки на экране отрицательные ионы будут задерживаться пленкой и не будут разрушать люминофор.

Алюминированные экраны применяются в электронно-лучевых приборах с ускоряющим напряжением более 10 кВ.

Все люминофоры, а следовательно, и экраны обладают инерционностью.

**Инерционность** выражается в том, что свечение устанавливается (нарастает) в течение некоторого времени — времени разгорания.

# Корпус (баллон) приборов

Корпус любого электронно-лучевого прибора имеет большое значение, поскольку он определяет такие важные параметры прибора, как механическую прочность, предельный вакуум, а также влияет на разрешающую способность и контрастность изображения. Для электронно-лучевых трубок ответственным элементом корпуса является дно, на которое наносится люминесцирующий экран. С точки зрения механической прочности корпуса, испытывающего большое наружное давление, необходимо, чтобы дно было несколько выпуклым. Кроме этого, для получения неискаженного изображения поверхность дна должна иметь кривизну.

В современных трубках с большим диаметром применяется приварка штампованного дна к конической части колбы.

В современных приборах применяются плоские ножки с жесткими короткими выводами диаметром 1...1,5 мм. В центре ножки имеется штенгель для соединения с откачной системой и последующей отпайки. Ранее в электроннолучевых трубках применялись цоколи, и ножки имели тонкие мягкие выводы, которые припаивались к штырькам цоколя.

# Типы электронно-лучевых приборов

## Осциллографические трубки

это электронно-лучевой прибор, предназначенный для наблюдения или регистрации изменений во времени быстропротекающих процессов. В общем случае осциллографическая трубка состоит из стеклянного баллона, электронно-оптической системы и люминесцирующего экрана.