

## 1. Какой ток эмиссии будет больше с чистого вольфрама или если на вольфрам нанести пленку кислорода?

Ток эмиссии будет больше с чистого вольфрама, так как если на поверхности металла нанести пленку кислорода, то работа выхода электронов из такого пленочного катода будет больше, чем из чисто металлического. Чем больше работы выхода, тем больше энергии нужно передать электрону. При одинаковых условиях, электронов, вылетавших из чистого металла, будет больше, чем из пленочного катода с нанесённой пленкой кислорода.

## 2. Как выглядит потенциальный барьер с учетом и без эффекта Шоттки

ние,  $d$  – расстояние катод-анод. Легко видеть, что внешнее поле направлено в противоположную сторону, чем перечисленные выше, т.е. оно способствует выходу электронов из твердого тела и, таким образом, понижает высоту потенциального барьера. Суммарное поле является суперпозицией всех указанных полей. Поэтому, чтобы нарисовать суммарное поле, действующее на электрон, надо просто кривую рис. 5 опустить вниз на величину  $E$  (рис. 20). Соответственно, потенциальный барьер примет вид, показанный на рис. 20 пунктиром, а максимальная высота барьера  $W_a'$  станет ниже.

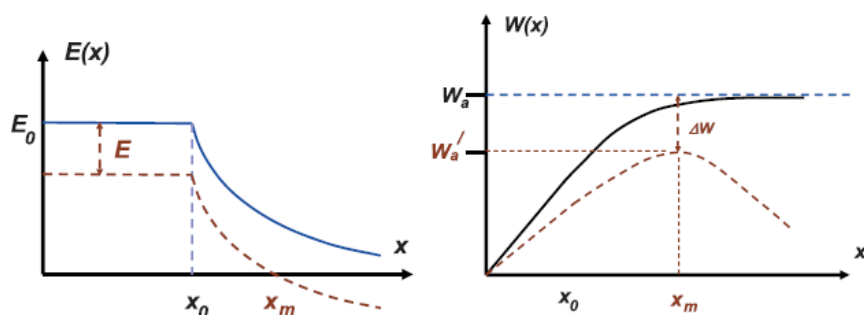


Рис. 20. Электрическое поле и потенциальный барьер на границе твердого тела без учета эффекта Шоттки (сплошная линия – кривая  $E_0(x)$ ) и при его учете (пунктир)

## 3. Эффект Шоттки

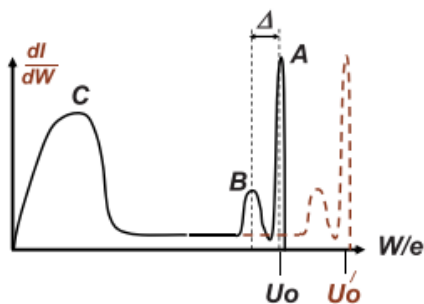
При наличии вблизи эмитирующей поверхности термокатода внешнего ускоряющего электрического поля с напряжённостью  $E$  электронная эмиссия с этой поверхности усиливается – эффект Шоттки – суть заключается в снижении высоты потенциального барьера вблизи его эмитирующей поверхности.

лой (9) закона Ричардсона-Дешмана. Однако если продолжать дальше увеличивать анодное напряжение, то оказывается, что когда анодное напряжение станет настолько большим, что электрическое поле на катоде превысит некоторое пороговое значение  $E_{\text{max}} \approx 10^5 \text{ В/м}$  то ток снова начинает заметно расти (рис. 19). Это явление получило название эффекта Шоттки.



Рис. 19. Вольт-амперная характеристика диода при больших анодных напряжениях

#### 4. Как измениться распределение вторичных электронов, если увеличить анодное напряжение?



ис. 29. Распределение вторичных электронов по энергиям при разных ускоряющих напряжениях первичного пучка

При изменении энергии первичного пуска максимумы А и В синхронно сдвигаются вправо, причем максимум А всегда соответствует энергии первичного пучка.

#### 5. Почему КПД 3-х резонаторного клистрона выше, чем 2-ух резонаторного

Применение ещё одного резонатора резко улучшает группировку электронов т.к. второй резонатор становится ненагруженным, т.е. не связан с вводом и выводом энергии таким образом потери в нём гораздо меньше. Из этого следует что даже слабый, недогруппированный сгусток наводит переменный потенциал с амплитудой  $U_2 > U_1$ . Импеданс второго резонатора чисто активный  $z_2 = R$ . Поэтому максимум тормозящей фазы поля во 2 резонаторе достигается в момент прохождения центром сгустка 2-го резонатора. Таким образом, после 2-ого резонатора скорость электронов, первоначально участвовавших в процессе группирования и образовании сгустка, уменьшается, а для электронов, которые раньше разгруппировались увеличивается. В процесс группировки вовлечены больше электронов, что и даёт увеличение КПД.

#### 6. Почему полоса усиления ЛБВ-О шире, чем у клистрона

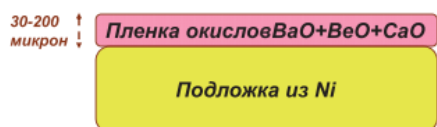
Причиной малых значений полосы усиления является использование резонаторов, где очень сильна зависимость амплитуды от частоты. Клистроны используют резонаторы с относительно большими величинами добротностей (50 – 100). Это позволяет получать большое усиление сигнала, но одновременно ведет к узкой полосе усиления.

$\omega_0$  – центральная частота канала.

$$\frac{\Delta \omega}{\omega_0} = \frac{1}{Q}$$

#### 7. Оксидный катод

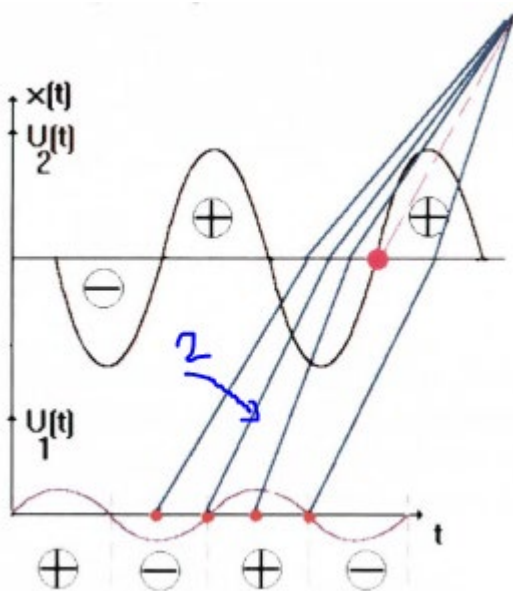
Оксидный катод представляет из себя толстую пленку смеси окислов щелочноземельных металлов на поверхности подложки, в качестве которой обычно выступает никель. Оксидный слой, состоящий из оксидов щелочноземельных или редкоземельных металлов, распределенных по всему слою атомов чистого металла-донора, придающему оксидному слою свойство примесного полупроводника с электронной проводимостью.



Устройство оксидного катода

Вместо окислов наносится соль щелочноземельного металла, затем катод помещается в вакуум, нагревается до 300 градусов, соль разлагается на окисел и углекислый газ и далее этот газ откачивается.

#### 8. Как найти разность фаз у второго резонатора трехрезонаторного клистрона?

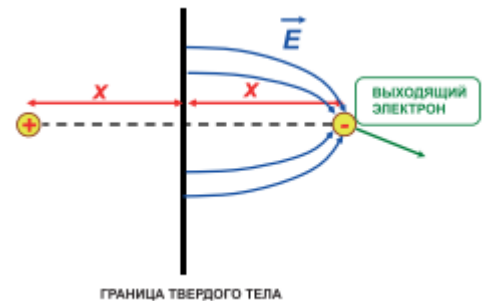


Размеры резонатора выбираются так, чтобы собственные частоты у них были равными  $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3$ , поэтому можно найти фазу напряжения с помощью пространственно-временной диаграммы.

Чтобы найти фазу, нужно вспомнить задачку, когда единственный электрон влетает между двумя сетками. А между сетками имеется омическое сопротивление, так как 2-ой резонатор имеет активный импеданс. Электрон, номер 2, является центром сгустка, то есть является аналогом единственного электрона. Когда центр сгустка влетает во второй резонатор, он наводит максимальное тормозящее напряжение. Так мы находим фазу из этого соображения.

## 9. Сила зеркального отображения. На каких расстояниях действует?

Рассмотрим, какие силы действуют на выходящий электрон по мере увеличения координаты  $x$ . На субатомных расстояниях, пока  $x$  не превышает нескольких ангстрем, на электрон, очевидно, действует сила притяжения со стороны слоя внешних положительных ионов и сила отталкивания со стороны вышедших ранее электронов. Обе силы препятствуют выходу электрона. Если электрону удастся продвинуться дальше, на еще большие расстояния, то он уже «перестает» видеть детали кристаллической решетки, а концентрация электронов в электронной шубе становится пренебрежимо малой. Поэтому ситуация становится



## 10. Какой тип перехода в оксидном катоде до активации?

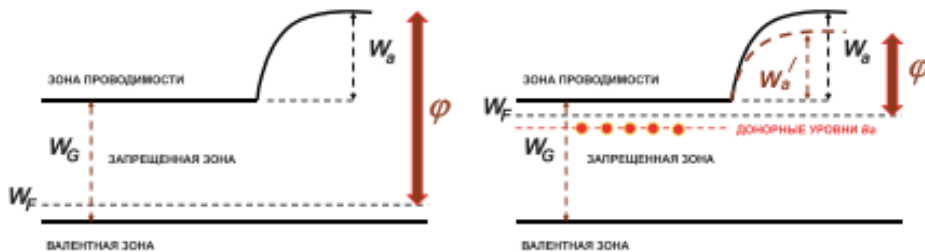


Рис. 18. Энергетическая диаграмма катода до и после активировки

Как уже отмечалось ранее,  $W_a$  является электроположительным элементом, поэтому он легко отдает свои валентные электроны (см. рис. 17), т.е. при внедрении в кристаллическую решетку окисла он ведет себя как **донорная примесь**. В результате тип проводимости окисла меняется с **p-типа** на **n-тип** и уровень Ферми перемещается к потолку

**До активации он имеет проводимость p-типа!**

## 11. Вывести формулу скоростной модуляции.

Пучок входит в тороидальный резонатор со скоростью  $v_0$ , и выходит с искомой скоростью  $v(t)$ . Будем считать, что на резонатор приложено переменное поле  $U_m \sin \omega t$ .

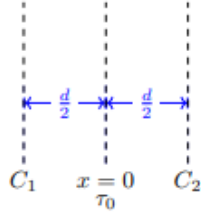


Рис. 48: Движение электрона через сетки

Найдём изменение энергии электрона при прохождении отрезка  $dx$ :

$$dW = e dU = e \frac{U_m \sin \omega t}{d} dx \quad (2.4.4)$$

Не совсем строго, пренебрегая изменением скорости, можно найти время пролёта:

$$t = t_0 + \frac{x}{v_0} \quad (2.4.5)$$

Тогда

$$\Delta W = \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} dW = \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} \frac{eU_m}{d} \sin \left[ \omega \left( t_0 + \frac{x}{v_0} \right) \right] dx = eU_m \sin \omega t_0 \underbrace{\frac{\sin \frac{\Theta_1}{2}}{\frac{\Theta_1}{2}}}_M, \quad (2.4.6)$$

где  $M$  – коэффициент взаимодействия поля с резонатором,

$$\Theta_1 = \frac{\omega d}{v_0} \quad (2.4.7)$$

Тогда кинетическая энергия на выходе

$$W = \frac{mv^2}{2} = eU_0 + \Delta W \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2e}{m} U_0 \left( 1 + \frac{MU_m}{U_0} \sin \omega t_0 \right)} \quad (2.4.8)$$

При скоростной модуляции  $\frac{U_m}{U_0} \ll 1$ , и корень можно разложить в ряд, тогда

$$v = v_0 \left( 1 + \frac{MU_m}{2U_0} \sin \omega t_0 \right). \quad (2.4.9)$$

Полученное уравнение называется уравнением скоростной модуляции.

## 12. Там была диаграмма металл-вакуум и что-то статическое и динамическое распределение

**Статический способ управления пучком.** Идея состоит в создании заданной зависимости  $\rho = \rho(t)$ . Для обычного диода в режиме ограничения поля пространственным зарядом, если менять поле по закону

$$J_a = PU_a^{\frac{3}{2}}, \quad (2.4.2)$$

то в ускоряющей фазе электронов будет лететь больше, а в тормозящей – меньше. В промежутках между максимумами электроны тоже будут: идеальных сгустков не выходит.

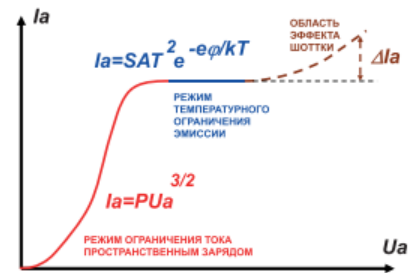
**Динамический способ управления пучком.** Плотность заряда теперь трогать не будем, но разным электронам будем придавать разную скорость:

$$v = v(t). \quad (2.4.3)$$

Такую операцию называют *скоростной модуляцией* или *модуляцией электронов по скорости*.

### 13. Напряженность при которой наблюдается эффект Шоттки

лой (9) закона Ричардсона-Дешмана. Однако если продолжать дальше увеличивать анодное напряжение, то оказывается, что когда анодное напряжение станет настолько большим, что электрическое поле на катode превысит некоторое пороговое значение  $E_{\text{тах}} \approx 10^5 \text{ В/м}$  то ток снова начинает заметно расти (рис. 19). Это явление получило название эффекта Шоттки.



### 14. Условие синхронизма ЛБВ-О.

Условие синхронизма появилось из соображений о необходимости сохранения КПД и выходной мощности ЛБВ-О на уровне соответствующему значению у клистрона. Для этого нужно чтобы электроны достаточно долго взаимодействовали с электрическими полями. Это означает, что электроны, движущиеся в том же направлении со скоростью  $V_e$  должны «видеть» все время одну и ту же фазу волны. Поэтому условием синхронизма является:  $V_e = V_{\text{фаз}}$ .

### 15. Определение электронной эмиссии

Эмиссией электронов называется явления испускания электронов поверхностью вещества при физическом воздействии на это вещество.

Такое воздействие может быть нагревом, облученным светом, бомбардировка ускоренными электронами или различными атомными частицами, сильное электрическое поле, механическое воздействие.

Источником электронов мб только вещество, оно может находиться в любом агрегатном состоянии.

### 16. Нарисовать распространение электрического и магнитного полей в тороидальном резонаторе

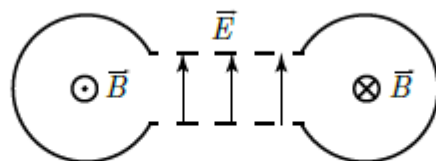


Рис. 42: Структура поля в резонаторе

Электрическое поле в основном сконцентрировано между сетками, но за счет краевого эффекта проникает также в тороидальный объем. Линии магнитного поля образуют концентрические окружности, заполняющие тороидальный объем, идентичный отрезку коаксиальной линии.

### 17. Каким образом формируется дипольный слой в пленочном катode. От чего зависит ориентация диполя?



Электроположительные вещества при нанесении на металл, легко отдают свой электрон ионам металла, поэтому концентрация электронов в приповерхностном слое увеличивается, таким образом образуется дипольный слой с «+»-ым наружу.

Электроотрицательные вещества забирают электрон у металла, поэтому на поверхности образуется слой отрицательных ионов, а в приповерхностном слое будет положительный заряд, таким образом, диполь с «--»-ми наружу.

Ориентация диполя зависит от того какой одноатомной пленкой элемента покрыть металл. Либо электроположительным элементом, либо электроотрицательным (К сожалению, полностью в этом не уверен)

Поскольку Ва является электроположительным элементом, то он легко отдает свои валентные электроны и эти электроны притягиваются к ионам вольфрама (рис. 11). В результате концентрация электронов  $n(x)$  в приповерхностном слое увеличивается. Таким образом, на границе твердого тела создается дипольный слой (рис. 12), у которого положительные заряды расположены наверху, а отрицательные – внизу. Очевидно, при такой полярности диполя, он будет создавать отри-

## 18. Потенциальный барьер плёночного катода

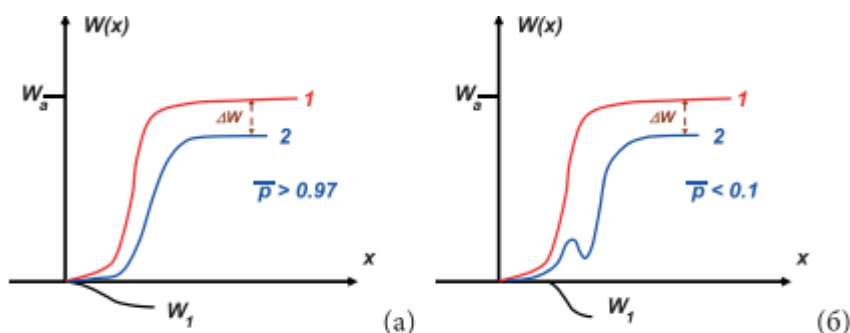


Рис. 13. Возможные формы потенциального барьера (синяя кривая) в плёночном катоде

В принципе, возможны два варианта формы барьера. Если функция  $W_1(x)$  плавная, то происходит просто уменьшение высоты барьера (рис. 13 а). Если же функция резкая, то барьер приобретает более сложную форму (рис. 13 б), и он имеет участок резкой неоднородности.

## 19. Пространственно-временная диаграмма двухпролетного клистрона.

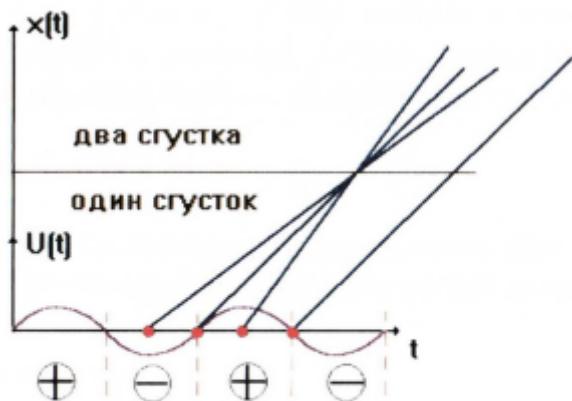
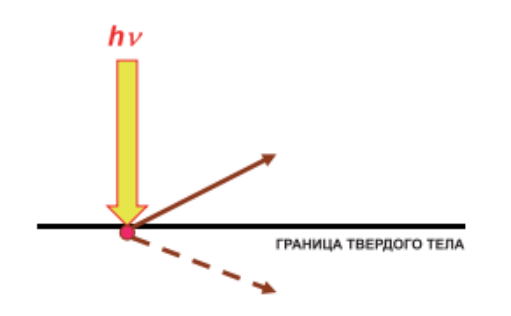


Рис. 22. Пространственно-временная диаграмма двухрезонаторного клистрона

Тормозящая фаза поля отмечена знаком «--», а ускоряющая фаза «+». Ровно половина собирается в сгусток около центрального электрона, проходящего резонатор в момент изменения фазы потенциала с тормозящей на ускоряющую. Когда эти электроны достигают некоторой плоскости  $x=x_1$ , все сгруппированные частицы оказываются в ней одновременно. Т.О. имеем 1 сгусток с бесконечной плотностью, а другая половина разгруппировывается.

## 20. Что такое квантовый выход, его максимальное значение?

Квантовый выход является одной из характеристик фотокатода, позволяющей судить о его эффективности. Величина квантового выхода по определению равна отношению влетевших при фотоэффекте электронов  $n_e$  к числу фотонов  $n_\phi$ , т.е.  $Y = \frac{n_e}{n_\phi}$



К определению максимальной величины КВ рис. Поскольку квант света поглощается одним электроном, а в силу симметрии задачи направления вверх и вниз равноправны, то максимальное значение квантового выхода  $Y_{\max} = 0.5$ .

## 21. ПОЛНОЕ ОБЪЯСНЕНИЕ наведенного тока

Для понимания этого определения рассмотрим другой простой пример. Пусть у нас имеется два проводящих тела. Одно из них заряжено отрицательно, заряд  $Q < 0$ , другое – не заряжено ( $Q = 0$ ). И пусть первое (заряженное) тело движется ко второму со скоростью  $v$ . В этом случае, по закону индукции, оно индуцирует положительные и отрицательные заряды на обеих сторонах нейтрального тела, как это показано на рис. 5. Но первое тело меняет свое положение в пространстве. Соответственно, величины зарядов на краях второго тела также меняются (очевидно, чем меньше расстояние, тем больше величины наведенных зарядов). В результате мы видим, что через второе тело начинает протекать ток  $I_{ind}$ . Этот ток и называется **наведенным током**. Легко видеть, что величина наведенного тока пропорциональна скорости и заряду первого тела

$$I_{ind} \propto v Q. \quad (2)$$

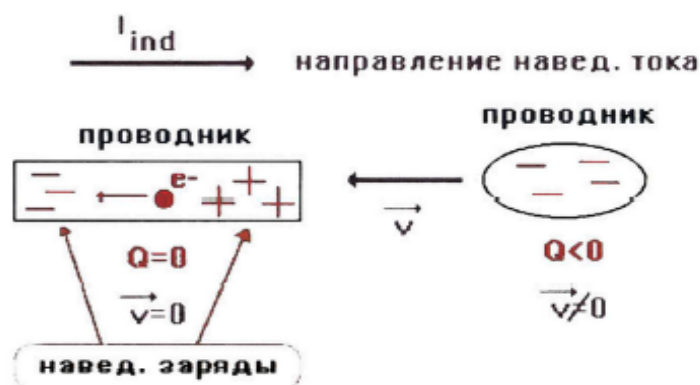


Рис. 5. Возникновение наведенного тока

Можно доказать, что в общем случае, если мы имеем систему электродов (рис. 6) и нам необходимо найти ток на электроде с постоянным потенциалом  $U$ , соответствующая расчетная формула выглядит следующим образом:

$$I_{ind} = Q \frac{\vec{v} \vec{E}}{U}. \quad (3)$$

## 22. Устройство и работа L-катода.

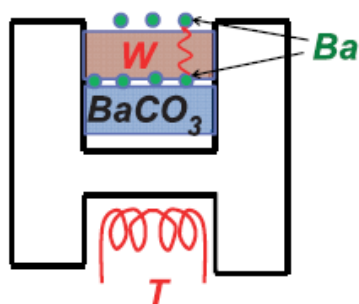
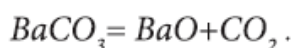


Рис. 15. Устройство L-катода

Он представляет собой двойной металлический стакан, с одной стороны которого находится спираль подогревателя, обеспечивающего нужную температуру катода, а с другой вставлены две таблетки. Нижняя представляет из себя соль карбоната бария  $BaCO_3$ , а выше находится пористый вольфрам  $W$ . Работа катода происходит следующим образом. Сначала происходит так называемый **процесс активировки катода** (в исходном состоянии катод ток не дает, его нужно активировать; эта закономерность справедлива для любых типов катодов, основанных на термоэлектронной эмиссии). Он производится в два этапа и заключается в следующем. Сначала катод нагревают до температуры  $300^\circ C$ . При этом карбонат бария разлагается на окись бария и углекислый газ, который откачивают с помощью вакуумного насоса



Далее температуру увеличивают до  $1275^\circ C$ . При этом происходит реакция восстановления



в результате которой на границе вольфрам – окись бария образуются атомы бария. Атомы бария при такой высокой температуре ( $1275^\circ C$ ) способны диффундировать по порам к поверхности, где и образуют одноатомную пленку бария. Пористость вольфрама подбирают таким образом, чтобы скорость подкачки бария по порам равнялась скорости его испарения с поверхности. Изготовленные таким образом катоды способны обеспечить плотность тока эмиссии порядка  $3-10 \text{ A/cm}^2$ , что является вполне приемлемой величиной для большинства электронных приборов СВЧ.

## 23. Что такое первый и второй критический потенциал?

Это две точки, где сигма равна 1 для диэл и полупроводников

~~до  $10-30 \text{ В}$ , а  $U_{\text{max}}$  до  $1000-1200 \text{ В}$  (см. рис. 34).~~ Для диэлектриков и полупроводников на графике  $\sigma(U)$  выделяют также особо две точки, где  $\sigma=1$ . Эти значения называются соответственно **первым и вторым критическими потенциалами** (рис. 34). ~~Другие особенности~~



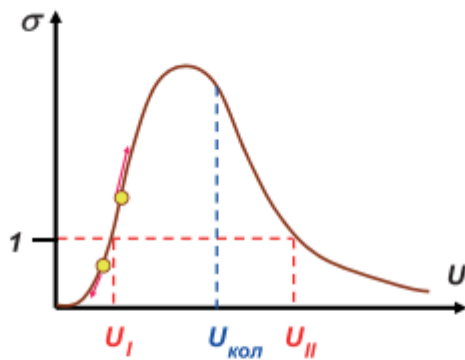


Рис. 34. Зависимость коэффициента вторичной эмиссии от энергии падающих электронов для диэлектрика. Указаны величины первого ( $U_I$ ) и второго ( $U_{II}$ ) критических потенциалов. Желтыми точками отмечены возможные рабочие точки

Если  $U_0 < U_p$ , то  $\sigma < 1$  и на мишень приходит больше электронов, чем уходит. В результате мишень начнет заряжаться отрицательно, следовательно, ее потенциал упадет, тогда  $\sigma$  еще больше уменьшится, еще больше электронов останется на диэлектрике, потенциал еще снизится... и т.д. В результате рабочая точка на рис. 34 будет сдвигаться вдоль кривой  $\sigma(U)$  влево и вниз, пока потенциал диэлектрика не станет равным нулю.

Если  $U_0 = U_p$ , то  $\sigma = 1$  и рабочая точка останется на месте. Однако, как легко видеть, эта точка неустойчивая: если в результате флуктуации

напряжения  $U_0$  станет меньше  $U_p$ , то реализуется случай, описанный выше, если же будет обратная ситуация (см. далее), то рабочая точка начнет смещаться вправо.

Если  $U_0 > U_p$ , то  $\sigma > 1$ , т.е. уходит электронов больше, чем приходит, и потенциал диэлектрика начнет расти, рабочая точка начнет двигаться вправо (рис. 34). До какой величины увеличится потенциал диэлек-

## 24. Будет ли наблюдаться эффект Шоттки на плоском диоде, если дано напряжение и расстояние между электродами

Если дано расстояние и напряжение, то для того чтобы наблюдался эффект Шоттки должно быть выполнено условие  $E \geq 10^5 \frac{B}{m}$ , где  $E = \frac{U}{d}$

## 25. Дать определение термоэлектронной эмиссии

Термоэлектронная эмиссия – явление испускания электронов поверхностью твердого тела (эмиттера) при его нагреве. В это случае плотность тока вышедших в вакуум термоэлектронов будет:

$$J_T = eN_e = e(1 - R_e) \int_{W_b}^{\infty} dN_x, \quad (2.15)$$

где  $N_e$  — число электронов, вышедших из эмиттера наружу с единицы площади ( $1 \text{ м}^2$ ) эмитирующей поверхности в единицу времени ( $1 \text{ с}$ ),  $R_e$  — коэффициент отражения электронов от потенциального барьера, учитывающий, что не все электроны, движущиеся изнутри к поверхности эмиттера с энергией  $W \geq W_b$ , выйдут наружу, часть из них отразится от потенциального барьера и возвратится назад;  $dN_x$  — функция распределения электронов по нормальным составляющим скоростей.

Возвращаясь к уравнению термоэлектронной эмиссии (2.16), следует сказать, что оно применимо не только к металлам, но и к примесным полупроводникам. Однако при этом надо иметь в виду, что если у металлов положение уровня Ферми в первом приближении можно считать не зависящим от температуры и рассматривать работу выхода  $e\phi_0$  как константу металла, то у примесных полупроводников (использующихся в качестве катодов) положение уровня Ферми явно зависит от температуры.

## 26. Дать определение конвекционному току?

Рассмотрим диод. Ток в цепи какого-либо электрода возникает благодаря попаданию на этот электрод потока электронов, летящих внутри лампы, т.е. электроны создают в вакууме ток, который называется конвекционным.

## 27. Дать определение коэффициента взаимодействия со средой резонатора

Проинтегрировав надлежащим образом, получим

$$J_{\text{нав}n} = M_{2n} J_{\text{конв}n}, \quad \text{где} \quad M_{2n} = \frac{\sin \frac{\Theta_2}{2}}{\frac{\Theta_2}{2}}, \quad (3.2.14)$$

$M_{2n}$  — коэффициент взаимодействия  $n$ -й гармоники с резонатором.

Найдём мощность, выделяемую на втором резонаторе определённой гармоникой:

$$P_{2n} = \frac{1}{2} U_{2n} J_{\text{нав}n} \cos \Psi = U_{2n} M_{2n} J_n(nX) \cos \Psi, \quad (3.2.15)$$

где  $M$  — коэффициент взаимодействия поля с резонатором, (2.4.6)

$$\Theta_1 = \frac{\omega d}{v_0} \quad (2.4.7)$$

Тогда кинетическая энергия на выходе

Тета — угол пролета.

## 28. Форма потенциального барьера при автоэлектронной эмиссии вернее там было что-то типа какая форма пот барьера используется для расчёта тока автоэлектронной эмиссии

Согласно рис. 21, одновременно происходит два процесса: **медленное** уменьшение **высоты** барьера и **быстрое** – его **ширины**. В результате при поле  $E \sim 10^8$  В/м ширина барьера  $d$  на уровне энергии Ферми становится порядка нескольких ангстрем. При такой малой ширине барьера электроны уже имеют большую вероятность **туннелировать** **сквозь барьер** без изменения своей энергии. Этим и объясняется явление автоэлектронной эмиссии.

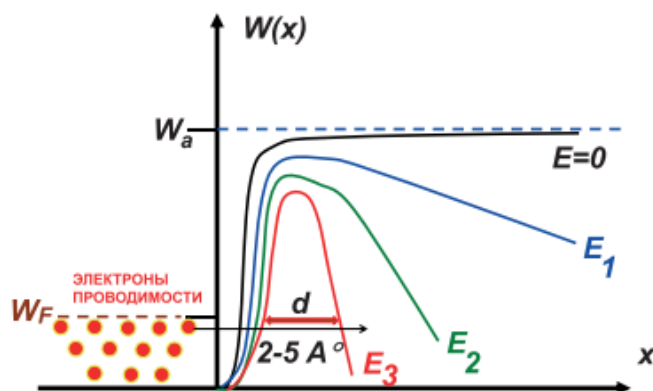


Рис. 21. Трансформация формы барьера по мере увеличения электрического поля на поверхности катода.  $E_3 > E_2 > E_1$

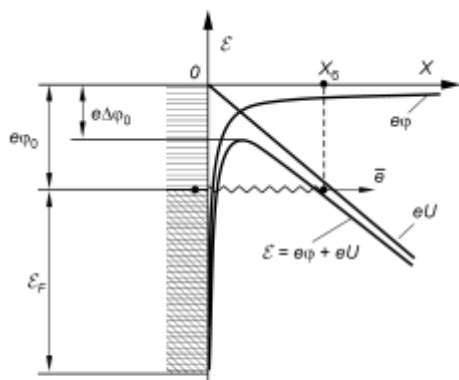


Рис. 2.24

Сужение поверхностного потенциального барьера под действием сильного электрического поля

С возрастанием напряженности электрического поля потенциальный барьер принимает форму острого узкого «зуба» и становится прозрачным для электронов, имеющих энергию, равную или близкую к  $E_F$ .

Связь между плотностью тока автоэлектронной эмиссии и напряженностью электрического поля при температуре  $T = 0$  К определяется уравнением Фаулера-Нордгейма:

$$J_E = BE^2 e^{-\frac{a}{E}}.$$

## 29. Определение автоэлектронной эмиссии.

Электронная эмиссия, возникающая с поверхности холодного катода под действием сильного внешнего электрического поля, называется автоэлектронной эмиссией.

Автоэлектронная эмиссия заключается в том, что если к поверхности твердого тела приложено очень большое электрическое поле  $E > 10^8$  В/м, то даже при температуре близкой к абсолютному нулю по Кельвину наблюдается заметный ток эмиссии.

## 30. Условие синхронизма ЛОВ

Идея ЛОВ заключается в том, чтобы использовать тот же механизм энергообмена между электронным пучком и волной, что и в ЛБВ, но в то же время обеспечить обратную связь прямо внутри лампы.

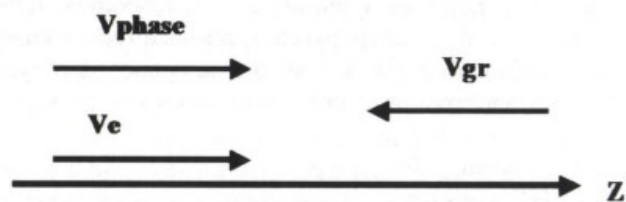


Рис. 34. Направления скоростей в ЛОВ-О

$$V_{\text{фазовой}} \approx V_{\text{электрона}}$$

Так же, как и в ЛБВ, электронный пучок движется в положительном направлении, фазовая скорость тоже положительна, но направление групповой скорости отрицательно.

В результате СВЧ энергия передается на вход лампы. В условиях синхронизма скорость электронов и фазовая скорость обратной гармоники в ЛОВ совпадают по направлению, а поток энергии направлен в обратную сторону от коллектора электронов к электронной пушке.

### 31. Условие взрывной эмиссии в коаксиальном диоде с магнитной изоляцией.

При подаче ускоряющего напряжения на анод(А) электронной пушки в области кромки катода формируется очень сильное электрическое поле. Легко оценить, что величина среднего поля  $E_{\text{avr}}$  (рассчитанного для «идеальной», т.е. гладкой поверхности) при указанных размерах и напряжениях превышает  $10^8$  В/м, что больше чем технологический порог, при котором возникает заметная автоэлектронная эмиссия.

### 32. Механизм возникновения взрывной эмиссии.

При подведении к электродам вакуумного промежутка «острый катод-плоский анод» высокого импульсного напряжения с катода возникает автоэлектронная эмиссия, ток которой увеличивается по мере нарастания фронта импульса напряжения. При определенном(предельном) значении этого тока происходит взрыв острого катода и ионизация распыленного материала. В результате у поверхности катода образуется медленно расширяющийся плотный сгусток плазмы. Благодаря быстрому разделению в нем зарядов (уходу более подвижных электронов на анод), у катода образуется объемный заряд положительных ионов, значительно электрического поля во всей области, где существует плотная плазма. При этом резко возрастает ток автоэлектронной эмиссии, причем не только за счет повышения плотности тока с первоначальных центров эмиссии, но и вследствие увеличения эмитирующей поверхности катода, граничащей с плотной плазмой. Прекращается взрывная эмиссия, как только расширяющийся плазменный сгусток достигнет анода и междуэлектродный промежуток окажется закороченным.

### 33. На каком расстоянии от первого резонатора $x$ идет наиболее плотный сгусток

на). В результате мы видим, что ровно половина электронов собирается в сгусток около центрального электрона, проходящего резонатор в момент, когда фаза потенциала меняется с тормозящей на ускоряющую. Когда эти электроны достигают некоторой плоскости  $x=x_1$ , все сгруппированные частицы оказываются в ней одновременно. Это означает, что в этот момент мы имеем один сгусток с бесконечной плотностью пространственного заряда (конечно, это справедливо только в рамках наиболее простой модели, не учитывающей расталкивающее действие кулоновских сил пространственного заряда). Другая половина электронов, как легко видеть, разгруп-



34. Причины возникновения потенциального барьера.

Несмотря на наличие в металле при  $T = 0\text{ К}$  большого количества свободных электронов с достаточно высокой внутренней энергией  $W_F$ , выхода электронов наружу (в вакуум) практически не наблюдается не только при нулевой, но даже при комнатной ( $T \approx 290\text{ К}$ ) температуре. Этому препятствуют электрические силы, возникающие между электронами, вылетающими из металла, и оставшимся нескомпенсированным положительным зарядом ионов кристаллической решетки. Следовательно, на границе металла существует скачок потенциальной энергии, выступающий над уровнями энергии электронов в металле в виде своеобразного энергетического, *потенциального барьера*, высота которого  $W_b$  превышает уровень Ферми, т. е.  $W_b > W_F$ . Поэтому, чтобы выйти из металла, электрон должен обладать энергией, достаточной для совершения работы по преодолению потенциального барьера. Значение этой работы, очевидно, будет зависеть от исходной энергии электрона, т. е. от того, на каком энергетическом уровне в металле он находится.

35. какие элементы являются электроположительными

Рассмотрим принцип работы пленочного катода. Обратимся для этого к таблице Менделеева и выпишем одну строчку этой таблицы:

Li литий	Be бериллий	B бор	C углерод	N азот	O кислород	F фтор	Ne неон
Электроположительные					Электроотрицательные		

~~темиными или элементами с малым электронным сродством.~~ Наоборот, элементы в конце строки имеют почти заполненные внешние электронные оболочки, связь электронов с ядром сильная, и такие элементы стремятся присоединить электроны, чтобы дополнить внешнюю оболочку до полной. При таком присоединении, очевидно, атом превращается в отрицательно заряженный ион. Поэтому такие элементы называют **электроотрицательными** или элементами с **большим электронным сродством**. ~~Оказывается, если покрыть металл одноатомной~~

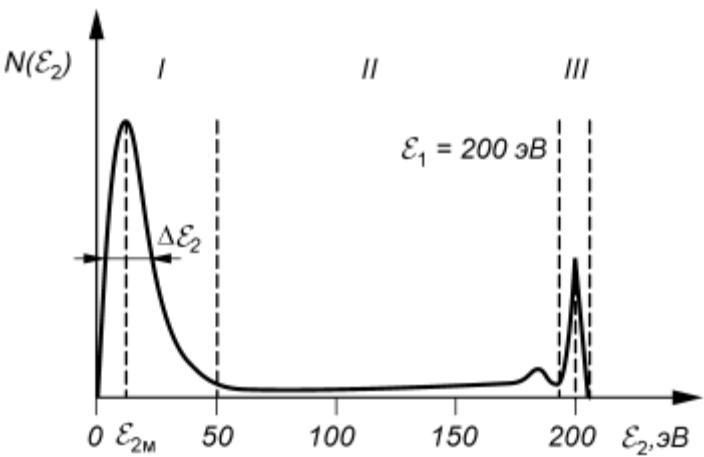


Рис. 2.32

Кривая распределения вторичных электронов по энергиям

36. Нарисовать и объяснить распределение вторичных электронов по энергиям

Важнейшей характеристикой вторичной эмиссии является функция распределения вторичных электронов по энергиям  $N(E_2)$ , обычно представляемая в виде кривой. Вид этой кривой, характерный для разных материалов и энергии первичных электронов, наглядно отражает сложный механизм вторичной электронной эмиссии. Принято весь энергетический спектр делить на три части, каждая из которых соответствует определенному участку на

графике. Участок 1 – истинно вторичные электроны, выбитые из материала эмиттера. 2 – неупруго отраженные. 3 – упруго отраженные первичные электроны.

### 38. По какому закону меняется поле сил зеркального отображения?

Тогда поле, действующее на электрон, рассчитывается как

$$E(x) = \frac{e}{4\pi\epsilon_0(2x)^2} = \frac{e}{16\pi\epsilon_0x^2}. \quad (2)$$

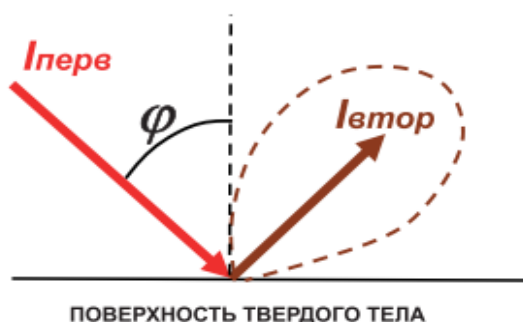
Здесь  $e$  – заряд электрона,  $\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума. Легко видеть, что это поле также препятствует выходу электронов из твердого тела. Таким образом, в результате действия **трех** перечисленных сил на границе твердого тела образуется **потенциальный барьер, препятствующий выходу электронов в вакуум.**

### 39. Напишите определение вторичной автоэлектронной эмиссии

Вторичной электронной эмиссией называется процесс выхода электронов из твердого тела (рис. 26) под воздействием бомбардирующей поверхность первичного электронного пучка с током  $I_{\text{перв}}$ . В результате такого воздействия образуется вторичный поток электронов с током  $I_{\text{втор}}$ . Важнейшей характеристикой вторичной эмиссии является коэффициент вторичной эмиссии

$$\sigma = I_{\text{перв}}/I_{\text{втор}}.$$

Коэффициент вторичной эмиссии зависит как от энергии первичных электронов (потенциала  $U$ ), так и от угла падения  $\varphi$ . Соответствующие зависимости представлены на рис. 27. Для металлов значение  $\sigma_{\text{max}}$  как правило лишь немного превышает 1, а соответствующее  $U_{\text{max}}$  – несколько сотен вольт.



### 40. Какие элементы таблицы Менделеева являются электроотрицательными

Рассмотрим принцип работы пленочного катода. Обратимся для этого к таблице Менделеева и выпишем одну строчку этой таблицы:

Li литий	Be бериллий	B бор	C углерод	N азот	O кислород	F фтор	Ne неон
Электроположительные					Электроотрицательные		

Первые два элемента в строчке имеют мало электронов на внешней оболочке и связь этих электронов с ядром слабая. Поэтому эти элементы легко отдают эти электроны и превращаются, таким образом, в положительные ионы. Такие элементы называются **электроположительными** или элементами с малым электронным сродством. Нао-

41. Объяснить зависимость КПД ЛБВ-О от длины лампы.

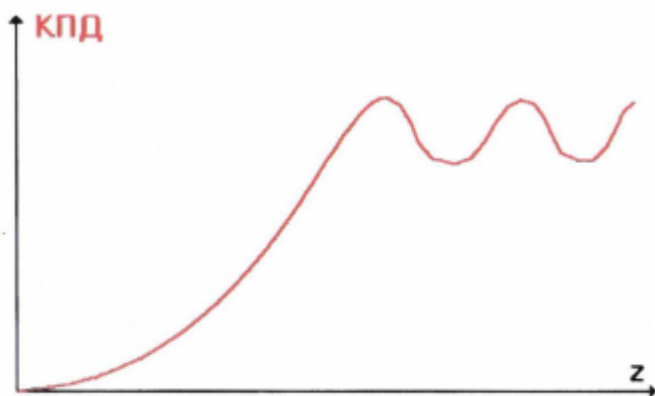


Рис. 33. Зависимость КПД ЛБВ-О от длины ЗС (продольной координаты)

Описанная качественная картина группировки позволяет нарисовать зависимость  $\eta$  от длины волновода (см. рис. 33). После точки максимума КПД наблюдаются осцилляции величины  $\eta$ . Причина этого явления связана с потерей электронами значительной части их исходной кинетической энергии. Такие электроны смещаются в ускоряющую фазу поля, отбирают здесь часть энергии от ВЧ поля и опять ускоряются, после этого снова попадают в тормозящую фазу, отдают часть своей энергии, снова ускоряются и т.д.

42. Дать определение автоэлектронному катоду

Автоэлектронные катоды обычно представляют собой тонкую длинную иглу, размещенную на дужке D (рис. 24).

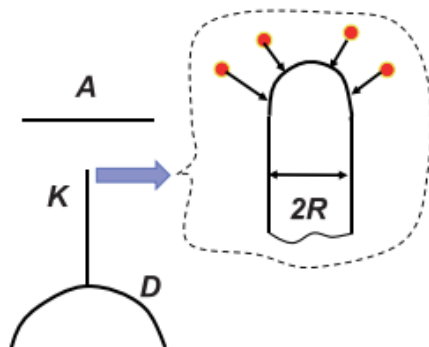


Рис. 24. Устройство автоэмиссионного катода. На выноске показан процесс бомбардировки катодной иглы положительными ионами

#### 43. Какая гармоника используется в ЛБВ-О?

Можно доказать, что в такой периодической системе полное электромагнитное поле может быть разложено в комплексный ряд Фурье и представлено в форме

$$E(x, y, z, t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} C_m(x, y) e^{j(\omega t - \beta_m z)}. \quad (33)$$

Из выражения (33) видно, что полное поле есть сумма **плоских неоднородных волн**. Такие волны получили название **пространственных гармоник**. Каждая волна имеет одну и ту же частоту  $\omega$ , но разные постоянные распространения  $\beta_m$  и, соответственно – разные длины волн

Каждая пространственная гармоника является поверхностной волной прижатой к замедляющей системе и для работы пригодны только гармоники с низкими номерами.

#### 44. Три закона фотоэффекта.

Уже вскоре после открытия этого явления стали известны три основных закона фотоэффекта.

1. **Закон Столетова или закон линейности:** фототок  $i_\phi$  пропорционален интенсивности падающего излучения  $I$ :

$$i_\phi \sim I.$$

2. **Закон Эйнштейна:** максимальная кинетическая энергия эмиттированных электронов является линейной функцией частоты  $\nu$ :

$$\left(\frac{mv^2}{2}\right)_{\max} = a + b\nu.$$

3. **Закон красной границы.** Фотоэффект наблюдается только если длина волны падающего света меньше некоторого значения  $\lambda_0$ :

$$\lambda < \lambda_0.$$

#### 45. Как добиться в ЛОВ отрицательной групповой скорости?

Следовательно, если мы выберем ускоряющее напряжение  $U_0$  таким образом, чтобы дисперсионная кривая пучка

$$\frac{\omega}{\beta} = \sqrt{2\eta U_0} \quad (42)$$

пересекалась с дисперсионной кривой волновода в точке с отрицательным углом наклона, мы получим требуемое направление групповой скорости (рис. 35).

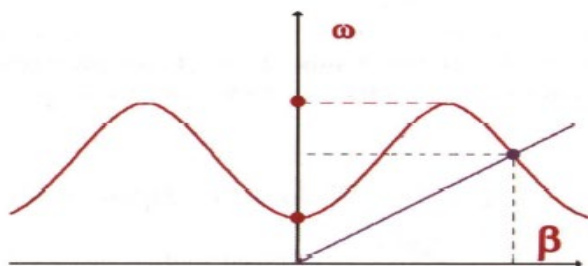


Рис. 35. Определение рабочей точки на дисперсионной кривой для ЛОВ-О

#### 46. Какую проводимость имеет оксидный катод после активации?



Как уже отмечалось ранее, Ва является электроположительным элементом, поэтому он легко отдает свои валентные электроны (см. рис. 17), т.е. при внедрении в кристаллическую решетку окисла он ведет себя как донорная примесь. В результате тип проводимости окисла меняется с *p*-типа на *n*-тип и уровень Ферми перемещается к потолку запрещенной зоны (рис. 18). Помимо этого, барий диффундирует непосредственно к поверхности катода и образует на нем одноатомную пленку бария, т.е. начинает действовать механизм снижения высоты потенциального барьера, подробно рассмотренный ранее для пленочных катодов (высота барьера становится равной  $W_a'$  – см. рис. 18). В результате этих двух процессов эффективная работа выхода резко уменьшается и в рассматриваемом случае снижается с 4.9 эВ до 1.0 эВ.

#### 47. Автоэмиссия при каких полях?

Автоэлектронная эмиссия заключается в том, что если к поверхности твердого тела приложено очень большое электрическое поле  $E > 10^8 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ , наблюдается заметный ток эмиссии.

#### 48. Распределение энергии вторичных электронов при повышении ускоряющего напряжения

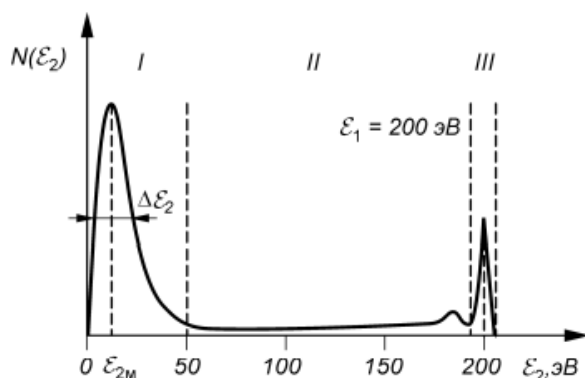


Рис. 2.32

Кривая распределения вторичных электронов по энергиям

Таким образом, с повышением кинетической энергии  $\epsilon_1$  первичных электронов коэффициент  $\sigma$  первоначально возрастает потому, что увеличивается число внутренних вторичных электронов, возникающих вблизи поверхности эмиттера и в большинстве своем выходящих наружу. В дальнейшем число внутренних вторичных электронов продолжает нарастать, но вероятность их выхода наружу становится тем ниже, чем глубже они возникают. Следует заметить, что внутренние вторичные электроны возникают неравномерно вдоль пути следования первичных электронов.

## 49. Как замедлить волну в лампе бегущей волны

Как уменьшить скорость волны? Используемая идея очень проста: увеличить путь, проходимый волной, путем использования периодических волноводов (см. рис. 28).

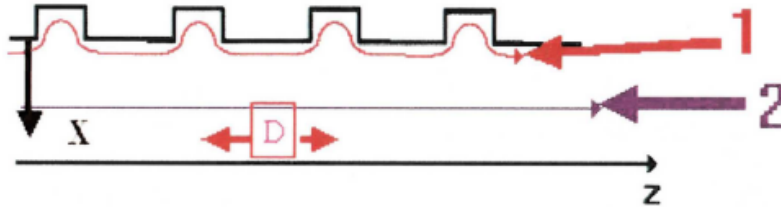


Рис. 28. Периодический волновод, D – период. 1 – путь, проходимый волной, 2 – фазовым фронтом

Здесь волна движется по криволинейному пути, в то время как фазовый фронт движется прямолинейно вдоль оси системы. В результате волна проходит больший путь, чем фазовый фронт, и оказывается возможным выполнить условие

$$v_{phas} < c. \quad (32)$$

## 50. Уравнение Эйнштейна для фото эффекта с доказательством.

2) максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов  $(mv^2/2)_{\text{макс}}$  прямо пропорциональна частоте излучения  $\nu$  и не зависит от его интенсивности (закон Эйнштейна, 1905 г.):

$$\left( \frac{mv^2}{2} \right)_{\text{макс}} = h\nu - e\phi_0, \quad (2.38)$$

где  $h$  — постоянная Планка и  $e\phi_0$  — работа выхода электрона из материала фотоэмиттера. Общепринятая в то время электромагнитная волновая теория света позволяла объяснить только первый закон. Для теоретического истолкования второго закона (сам факт зависимости максимальной кинетической энергии от частоты излучения был установлен экспериментально Ленардом в 1889 г.) потребовалось пересмотреть классические представления о природе света. Это сделал А. Эйнштейн, который разработал фотонную теорию света и математически сформулировал второй закон в виде уравнения (2.38). Согласно этой теории, электромагнитное излучение, падающее на поверхность металла, представляет собой поток квантов света (фотонов), которые взаимодействуют с электронами металла и возбуждают их. При этом предполагается, что отдельный электрон поглощает только один фотон (однофотонное взаимодействие). Если в первоначальном состоянии кинетическая энергия электрона была  $W = W_F + \delta W$ , где  $W_F$  — уровень Ферми и  $\delta W$  — добавка энергии, обусловленная тепловым возбуждением электрона, то после поглощения фотона его энергия станет равной  $W_F + \delta W + h\nu$ . Двигаясь к поверхности фотоэмиттера, этот электрон может потерять (рассеять) часть своей энергии  $\Delta W$ . Если, тем не менее, оставшаяся энергия окажется больше полной работы выхода  $W_b$  и скорость электрона будет направлена в сторону поверхности эмиттера, то электрон сможет преодолеть потенциальный барьер и выйти из эмиттера в вакуум. При этом с собой он унесет кинетическую энергию, равную

$$\frac{mv^2}{2} = W_F + \delta W + h\nu - \Delta W - W_b,$$

или, учитывая, что  $W_b - W_F = e\phi_0$  — внешняя работа выхода электрона, получим

$$\frac{mv^2}{2} = h\nu - e\phi_0 + \delta W - \Delta W.$$

Очевидно, что наибольшей кинетической энергией при заданном значении  $\delta W$  будут обладать те электроны, у которых потери энергии  $\Delta W = 0$ . Тогда

$$\left( \frac{mv^2}{2} \right)_{\text{макс}} = h\nu - e\phi_0 + \delta W. \quad (2.39)$$

Если же температура эмиттера  $T = 0$  К, то  $\delta W = 0$ , и тогда получаем

$$\left( \frac{mv^2}{2} \right)_{\text{макс}} = h\nu - e\phi_0$$

уже известное уравнение (закон) Эйнштейна.

**51. Что приводит к быстрому выходу из строя автоэлектронного катода при  $10^6$  атм?**

Поломка происходит из-за ионизации молекул остаточного газа, которые превращаются в положительные ионы и бомбардируют катод.  
(Искать в man\_emis 30)

**52. ЛБВ-М нарисовать, объяснить.**

Она содержит катод, анод, периодическую электродинамическую систему и коллектор. На рисунке показана также схема подачи потенциалов на электроды лампы. Электронно-оптическая система, которая содержит все перечисленные выше электроды, формирует так называемый ленточный пучок, в котором при отсутствии ВЧ поля все электроны двигаются в  $x$ -направлении с одинаковой скоростью (рис. 39). В отличие от обычной ЛБВ-О, в ЛБВ-М в области взаимодействия имеются еще скрещенные электрическое  $E_0$  и магнитное  $B_0$  поля. На рисунке также качественно показаны электронные траектории в присутствии ВЧ поля (пунктир на рис. 39).



Рис. 39. Схема ЛБВ-М

**53. От чего зависит скорость фотокатода**

исходит за время менее  $10^{-12}$  с). Однако **быстродействие** фотоэлемента определяется, прежде всего, **временем пролета** электрона от катода до анода. Примем для простоты плоскую модель фотодиода. Поскольку токи фотоэмиссии малы, мы можем пренебречь влиянием пространственного заряда на процесс движения электрона. Тогда электрон движется от катода к аноду равноускоренно и поэтому время пролета

$$\tau = \frac{d}{v_{\text{средн}}} = \frac{2d}{\sqrt{2\eta U_a}}.$$

Здесь  $d$  – зазор анод-катод,  $U_a$  – анодное напряжение,  $\eta$  – удельный заряд электрона. В современных фотоэлементах величина  $\tau$  обычно составляет  $10^{-7}$ – $10^{-8}$  с. В сверхбыстродействующих она может достигать до  $10^{-11}$  с.

**54. Что такое ток накачки?**



Накачка лазера — процесс перекачки энергии внешнего источника в рабочую среду лазера. Поглощённая энергия переводит атомы рабочей среды в возбуждённое состояние. Когда число атомов в возбуждённом состоянии превышает количество атомов в основном состоянии, возникает инверсия населённости.

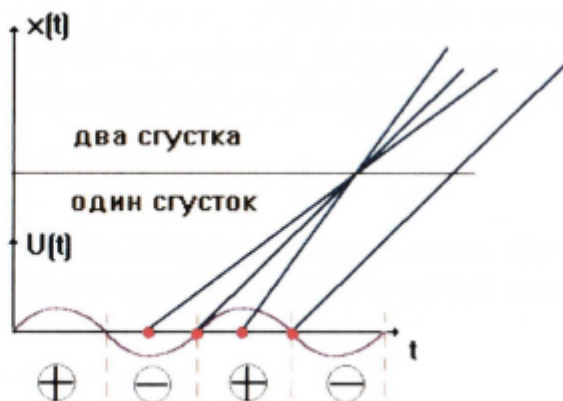
## 55. Профиль барьера ленточного катода с объяснением

## 56. Принцип действия пленочных катодов.

Чистые металлы, как указывалось выше, имеют большие значения  $\phi$  (чаще всего 3–4 эВ) и поэтому редко используются в качестве материалов катодов. Один из способов снижения эффективной работы выхода заключается в **нанесении на поверхность металла одноатомной пленки другого металла**. Такой катод получил название **пленочного катода**.

## 57. На каком расстоянии нужно установить второй резонатор в двухрезанотарном клистроне для обеспечения макс КПД на $n$ -ой гармонике?

на). В результате мы видим, что ровно половина электронов собирается в сгусток около центрального электрона, проходящего резонатор в момент, когда фаза потенциала меняется с тормозящей на ускоряющую. Когда эти электроны достигают некоторой плоскости  $x=x_1$ , все сгруппированные частицы оказываются в ней одновременно. Это означает, что в этот момент мы имеем один сгусток с бесконечной плотностью пространственного заряда (конечно, это справедливо только в рамках наиболее простой модели, не учитывающей расталкивающее действие кулоновских сил пространственного заряда). Другая половина электронов, как легко видеть, разгруппировывается: частицы уходят все дальше от электрона, проходящего первый резонатор в момент перехода фазы из ускоряющей в тормозящую. Можно доказать, что максимальный КПД клистрона достигается, когда второй резонатор поставлен в некоторой плоскости с координатой  $x > x_1$ . В этом случае один сгусток делится на два.



## 58. почему время жизни частиц на катоде в условиях технического вакуума очень маленькое

На сегодняшний день основным фактором, определяющим срок службы серийных отпаянных изделий с автоэмиссионными узлами, работающих в условиях **технического** вакуума на уровне  $10^{-7}$ – $10^{-6}$  торр, является ресурс катода. Дело в том, что в результате бомбардировки ионами остаточных газов происходит разрушение микровыступов, определяющих автоэмиссию с рабочей поверхности



**59. как распределено поле для закона отражения**

Тогда поле, действующее на электрон, рассчитывается как

$$E(x) = \frac{e}{4\pi\epsilon_0(2x)^2} = \frac{e}{16\pi\epsilon_0x^2}. \quad (2)$$

Здесь  $e$  – заряд электрона,  $\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума. Легко видеть, что это поле также препятствует выходу электронов из твердого тела. Таким образом, в результате действия **трех** перечисленных сил на границе твердого тела образуется **потенциальный барьер, препятствующий выходу электронов в вакуум.**

**60. будет ли взрывная эмиссия, если  $U=1000\text{кВ}$ , а расстояние между анодом и катодом  $0.5\text{ см}$**

man\_emis 31

В методичке взрывная эмиссия наблюдается при  $E = 10^8 \frac{\text{В}}{\text{м}}$

При условиях данных в задаче получаем  $E = 2 * 10^8 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ , что даже больше

Значит взрывная эмиссия будет