**Электронная эмиссия (ИЭ).**

### ВИДЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ

1. электронно-электронная или вторичная электронная

эмиссия (ВЭЭ);

1. термо-электронная эмиссия (ТЭЭ);
2. ионно-электронная эмиссия (ИЭЭ);
3. полевая электронная эмиссия (ПЭЭ);
4. фото-электронная эмиссия (ФЭЭ);

1

**ТЕМА 1. Вторичная электронная эмиссия (ВЭЭ)**

**ВЭЭ** – испускание электронов (вторичных) поверхностью твѐрдых тел при еѐ бомбардировке ускоренными до нескольких кэВ электронами же, которые называют первичными. В целях анализа поверхности энергия первичных электронов **Еп** как правило = **2 кэВ.**

Промежуток времени между входом в мишень первичных и выходом вторичных электронов не превышает 10-14–10-12 с.

Если облучаемая первичными электронами мишень, имеет толщину меньшую, чем пробег первичных электронов, вторичные электроны эмитируются как со стороны бомбардируемой поверхности (ВЭЭ "на отражение"), так и с еѐ обратной стороны (ВЭЭ "на прострел").

2

Среди эмитируемых (вторичных) электронов принято выделять следующие группы различающиеся энергией и механизмом эмиссии:

* Упруго отраженные от поверхности первичные электроны (**E****E** );

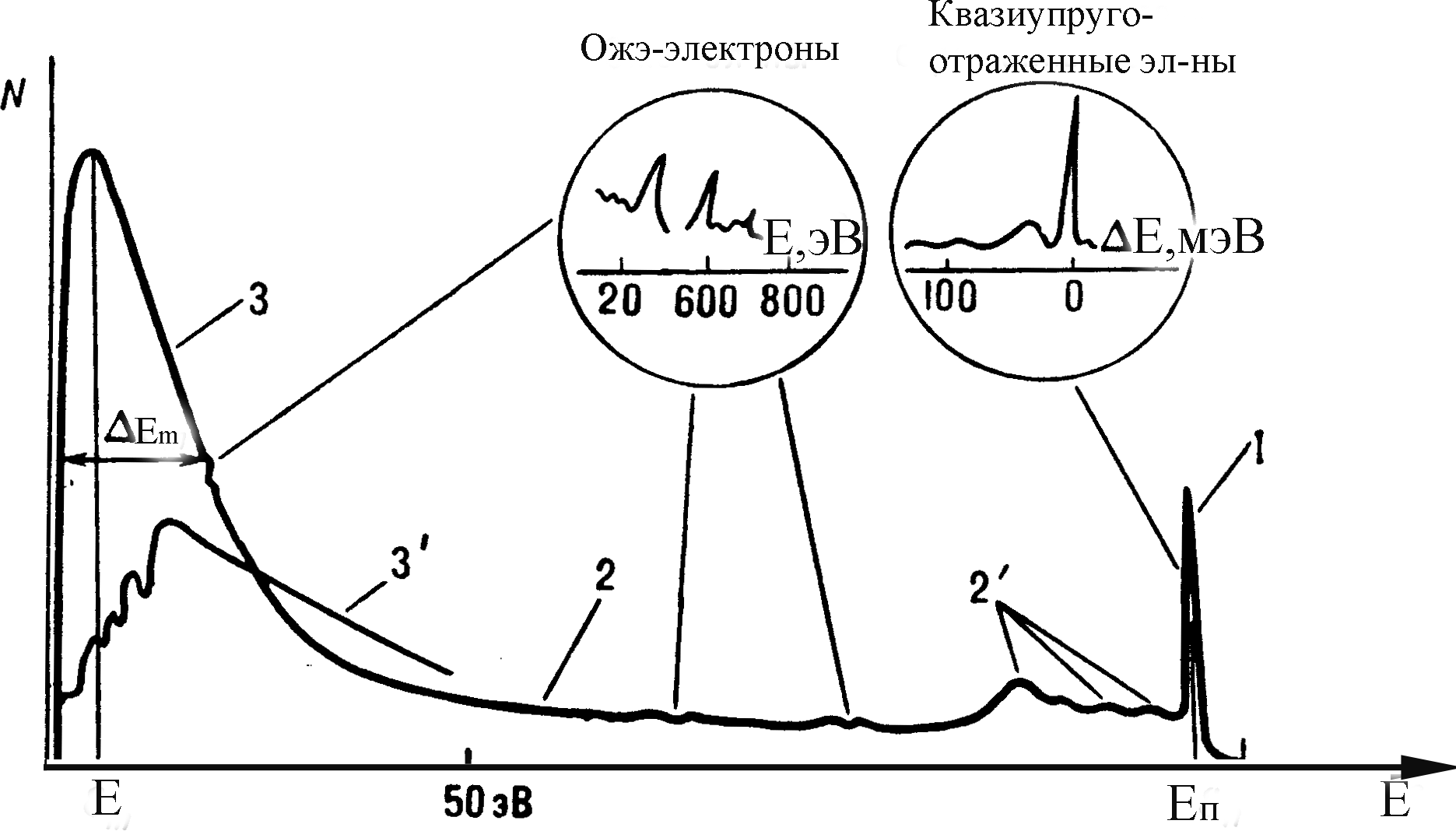
**П**

* Квазиупруго отраженные электроны, то есть испытавшие

характеристические потери энергии до сотен мэВ на возбуждение колебаний кристаллической решетки (**Е=E-Епотерь**);

* Неупруго отражѐнные первичные электроны (**Е>50 эВ**);
* Истинно вторичные электроны – ИВЭ (**Е≤50эВ**).
* Оже-электроны, возникающие в результате оже-процесса в остовных атомах (о этом разговор особый).

3



### Энергетический спектр вторичных электронов: 1 – упруго и квазиупруго отраженные электроны;

* 1. ***–* неупруго отражѐнные электроны (в т.ч. с характеристическими потерями энергии – 2*'*);**

### – истинно вторичные электроны;

**3*' –* пример спектра истинно вторичных электронов для плоскости (100) монокристалла W, полученный в узком телесном угле.**

4

# Количественные характеристики ВЭЭ

Коэффициент ВЭЭ  :

 ***= I*в*/I*п*=*** ***+******+r*,**

*где* ***I*в, *I*п***–* токи всех вторичных и первичных электронов; **,** **, *r*** *–*

коэффициенты, соответственно, истинной ВЭЭ, неупругого и упругого отражения первичных электронов. Коэффициенты **,** **,**

***r*** представляют собой величины, усреднѐнные по большому числу элементарных актов эмиссии, вызванных отдельными первичными электронами.

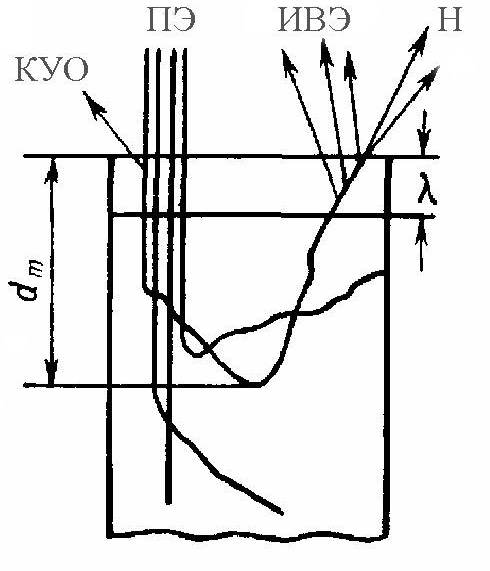
* При Еп<100 эВ,  *+r*,
* при Еп >100 эВ,  *+**.*

Коэффициенты , , , *r* зависят от:

* Еп,
* угла  падения первичных электронов,
* атомного номера *Z* и структуры вещества,
* состояния поверхности,
* температуры (в случае ВЭЭ диэлектриков),
* индексов {*hkl*} грани поверхности, и др. параметров.

5

**Схема формирования вторичной электронной эмиссии:**



**УО**

ПЭ – первичные электроны;

H – неупруго отраженные электроны; КУО – квазиупруго отраженные электроны;

ИВЭ – истинно вторичные электроны; ***dm*** – максимальная глубина с которой еще могут выйти первичные электроны после упругого рассеяния;

 – глубина выхода ИВЭ.

**ИВЭ** эмитируются из припо- верхностного слоя толщиной **λ** под действием первичных и неупруго рассеянных электро- нов, поэтому

***δ=δ*0*+δ*1*=δ*0*+k******s******η***,

где ***δ*0** и ***s*** – количества электронов, образованных од- ним первичным электроном и одним неупруго рассеянным,

***k=dm*/(*dm+λ*)**.

Смысл ***λ*:** ИВЭ, возникшие на больших, чем ***λ*** глубинах остаются в объеме из-за рассеяния на свободных электронах.

### Некоторые свойства ВЭЭ

* + Неупруго рассеянные электроны выходят с разных глубин ***d***

вплоть до

***dm=*3·1011*A/ρZ* Е**

**1,4 м ,**

**П**

где ***ρ*** *–* плотность вещества эмиттера в кг/м3; ***А*** *–* массовое число,

**ЕП** *–* энергия первичных ионов в кэВ.

* + При **ЕП*≥*1кэВ** средняя энергия неупруго рассеянных электронов **<ЕН*>=*(0.31+2.5·10-3*Z*) ЕП***.*

С уменьшением **Z, <ЕН>** возрастает за счет возрастания ***dm***

* + Для металлов ***λ~*30Ǻ**, поскольку ИВЭ в результате

взаимодействия со свободными электронами теряют столько энергии, что не могут покинуть твердое тело. При этом ***λ*** не зависит от **ЕП**, ***Ф*** и ***φ***, а ***σмакс~*0.4–1.8.**

* + Для диэлектриков и для любых твердых тел с широкой

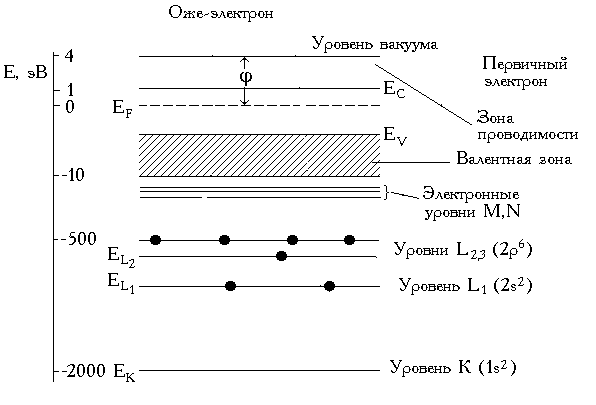
запрещенной зоной первичные электроны теряют энергию преимущественно на возбуждение фононов. Эти потери малы, поэтому ***λ~*200–1200Ǻ,** а ***σмакс~*4–400** в зависимости от

количества дефектов в твердом теле. 7

**Оже-электронная эмиссия. Оже-процесс**

В спектре вторичных электронов есть группы электронов, энергия которых не зависит от энергии первичных электронов, а определяется атомами, испустившими эти электроны.

Это - оже-электроны - основа электронной оже-спектроскопии (ЭОС).



**2**

**4**

**1**

**4**

**3**

*hv*

**2**

**Схема оже-процесса.** Первичный электрон с энергией EП создает вакансию на уровне *E*K атома. Образовавшаяся вакансия через время t ~ 10-14–10-16 c заполняется электроном с какого-либо верхнего уровня (в примере с уровня *L*1). Избыток энергии *E*K – *E*L1 может освободиться одним из двух путей: 1) излучения рентгеновского кванта с энергией *ћ*ω = *E*8K

– *E*L1. 2) Оже-процесса. В этом случае избыточная энергия передается третьему электрону

находящемуся, например, на уровне *L*2.

Оже электрон испускается в вакуум с энергией

*EA*  *EK*  *EL*  *EL* *U* *L*1, *L*2 

1 2

* + - Слагаемое ***U*** в формуле учитывает, что в конечном

состоянии атом оказывается дважды ионизованным в результате образования вакансий на уровнях ***L*1** и ***L*2.** Он учитывает увеличение энергии связи ***L*2**-электрона, когда удален ***L*1**-электрон и ***L*1**-электрона при наличии вакансии на уровне ***L*2**.

* + - Для вычисление слагаемого ***U*(*L*1,*L*2)** используют эмпирическое соотношение, достаточно хорошо согласующееся с экспериментальными результатами:

*U* (*L* , *L*

)= 1 *EZ* 1

* *EZ*
  + *EZ* 1

## EZ 

1 2 2 *L*2

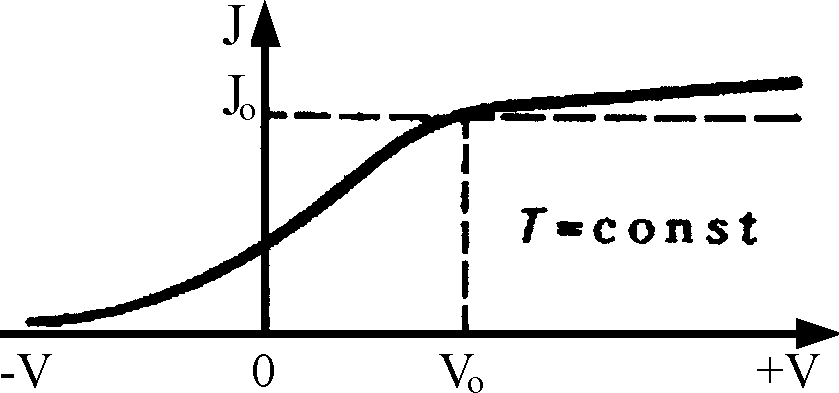
*L*2 *L*1 *L*1

где *Z* - атомный номер элемента.

9

**ТЕМА 2. Термо-электронная эмиссия (ТЭЭ)**

**ТЭЭ** – испускание электронов нагретыми телами (эмиттерами) в вакуум или другую среду. Выйти из твердого тела могут только те электроны, которые получают дополнительную энергию, необходимую для преодоления потенциального барьера.

* При отсутствии поля, "вытягивающего" вылетевшие электроны, они образуют вблизи поверхности эмиттера отрицательный пространственный заряд, ограничивающий ток ТЭЭ.
* Если же такое поле существует, то при малых напряжениях **V<V0** между эмиттером и анодом в соответствии с теорией *Ленгмюра* плотность тока ТЭЭ **J~V3/2***.* При **V>V0** пространственный заряд "рассасывается", и ток достигает насыщения **J=J0**.

10

Плотность тока насыщения *J*0 можно вычислить по формуле Ричардсона -Дэшмана:

*j*0 

*AT* 2

exp*Ф* / *kT* 

здесь ***А=А*0(1*-r*), *r*** *–* усреднѐнный по энергиям коэффициент отражения электронов от поверхности; ***А*0*=*4*πek*2*m/ħ*3*=* 120.4 А/см2К2** где ***е*** – заряд электрона, ***т*** *–* масса электрона; ***Ф*** – работа выхода электрона.

ln *j*0 *AT* 2

 *Ф* 1

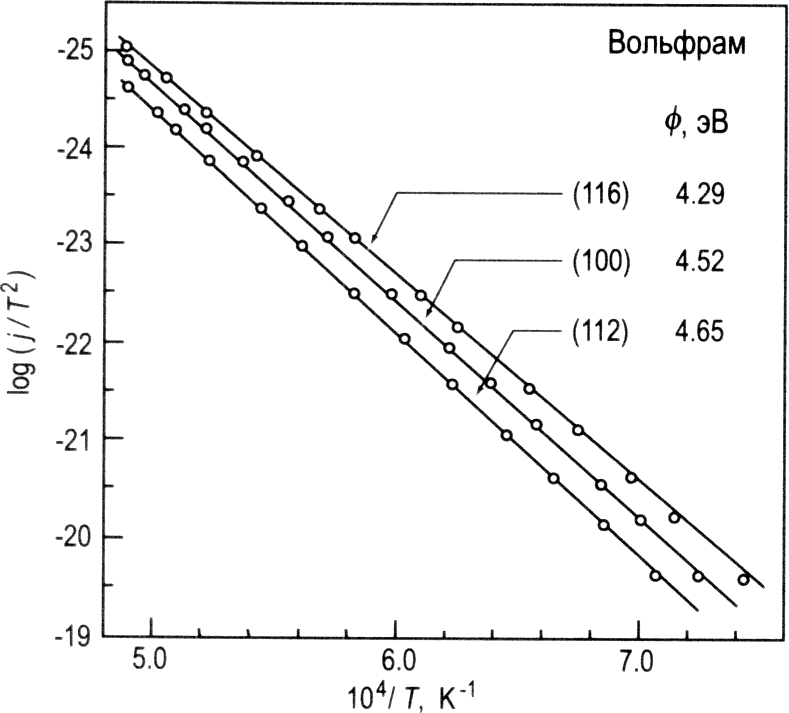
*kT*

График Ричардсона-Дэшмана для термоэлектронной эмиссии с различных граней кристалла вольфрама

11

**ТЕМА 3. Ионно-электронная эмиссия (ИЭЭ)**

* **ИЭЭ** - испускание электронов твѐрдым телом при бомбардировке ионами.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| * Различают | потенциальное | вырывание | электронов | из |
| поверхности | (***потенциальная*** | **ИЭИ**), |  |  |

* и кинетическое выбивание (***кинетическая* ИЭИ**).
* **Потенциальное вырывание** связано с передачей электронам мишени энергии, выделяющейся при переходе бомбардирующего иона в основное состояние атома.
* **Кинетическое выбивание** обусловлено ударной ионизацией атомов поверхностного слоя мишени и бомбардирующих частиц. Для него характерен энергетический порог *Eп* (энергия,

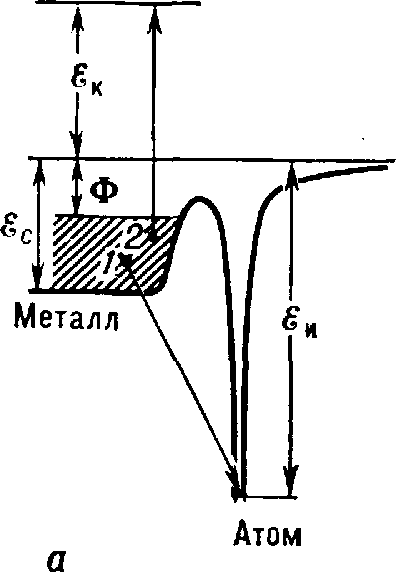
ниже которой этого вида эмиссии не наблюдается)

12

**Механизм потенциального вырывания**

* Если к поверхности металла приближается ион, не занятый энергетический уровень которого лежит ниже уровня Ферми электронов в металле, то один из электронов проводимости перейдѐт на не занятый уровень атома (нейтрализует ион).
* Данный переход на рис слева показан цифрой 1. Высвобождающаяся энергия передаѐтся другому электрону металла (2 на рис.), который получает возможность покинуть металл.

Металл



Ион

Схема оже-нейтрализации положи- тельного иона на металлической поверхности:

Eи – энергия ионизации;

Ф – работа выхода электрона из

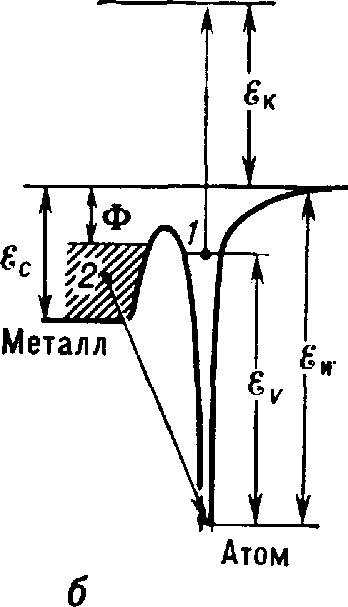
металла;

Eс – дно зоны проводимости;

Eк – кинетическая энергия электрона в вакууме.

13

В случаях, когда к поверхности подлетает ион в возбуждѐнном состоянии, вырывание электронов осуществляется путѐм процесса оже-дезактивации: энергия, выде- лившаяся при переходе электрона мишени (2) в основное состояние атома, передаѐтся электрону на возбуждѐнном уровне (1). При этом условие появления эмиссии: ***E*V*>Ф*,**



Металл

Атом

где ***E*V** – энергия возбуждения

атома.

Схема оже-дезактивации

14

### Кинетическое выбивание

Кинетическое выбивание обусловлено ударной ионизацией атомов поверхностного слоя мишени и бомбардирующих частиц. Для него характерен энергетический порог *E*П (энергия, ниже которой этого вида эмиссии не наблюдается)

* При бомбардировке тугоплавких металлов ионами тяжелее Li+ ,

*E*П*>*1 кэВ;

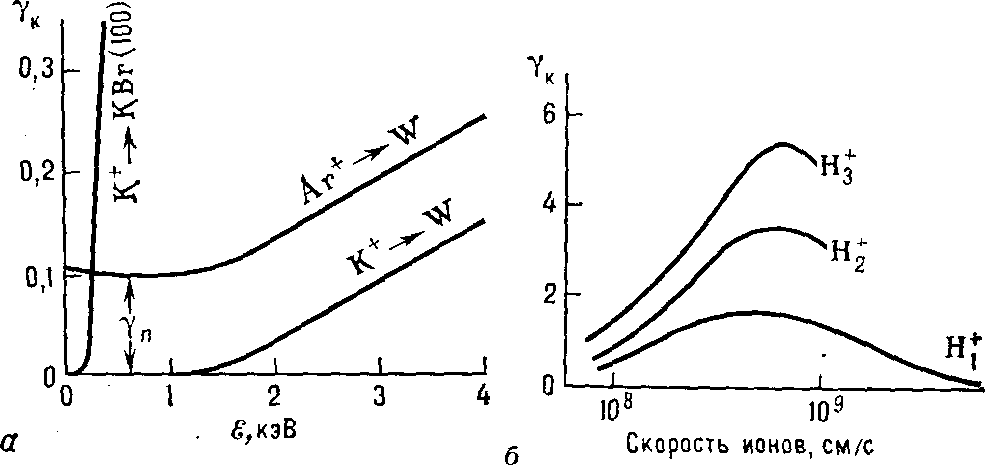
* для диэлектриков, например, шѐлочногалоидных кристаллов,

*E*П ~ 0.1 – 0.2 кэВ*.*

* При энергиях выше порога коэффициент кинетического выбивания

***γк*** растѐт, выходит на плато и далее уменьшается

15



Бомбардирующие ионы

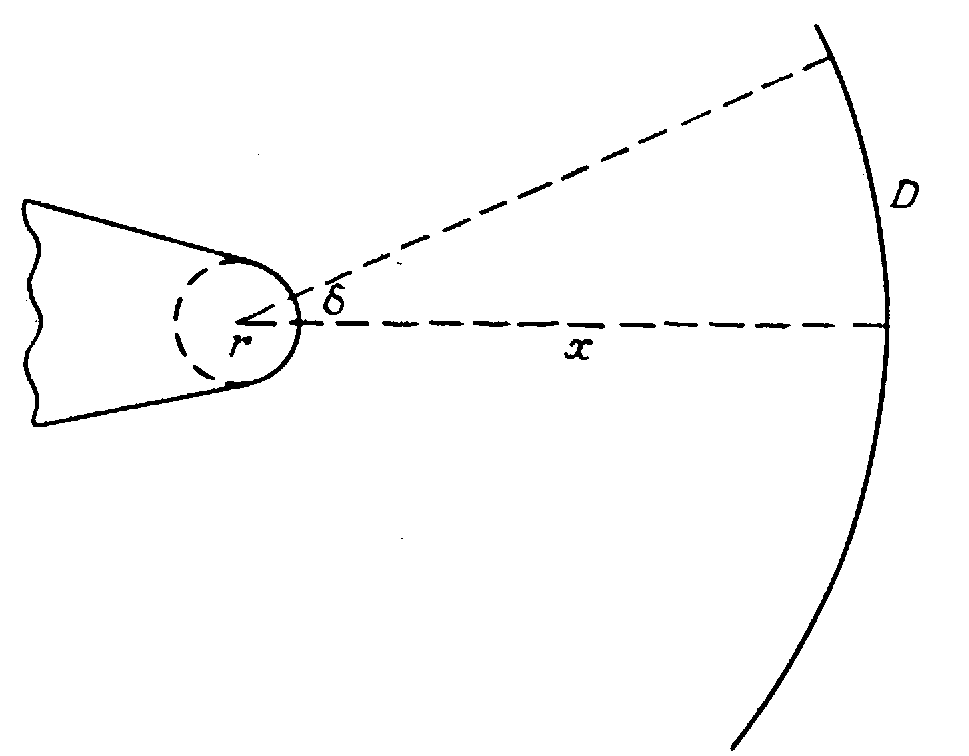
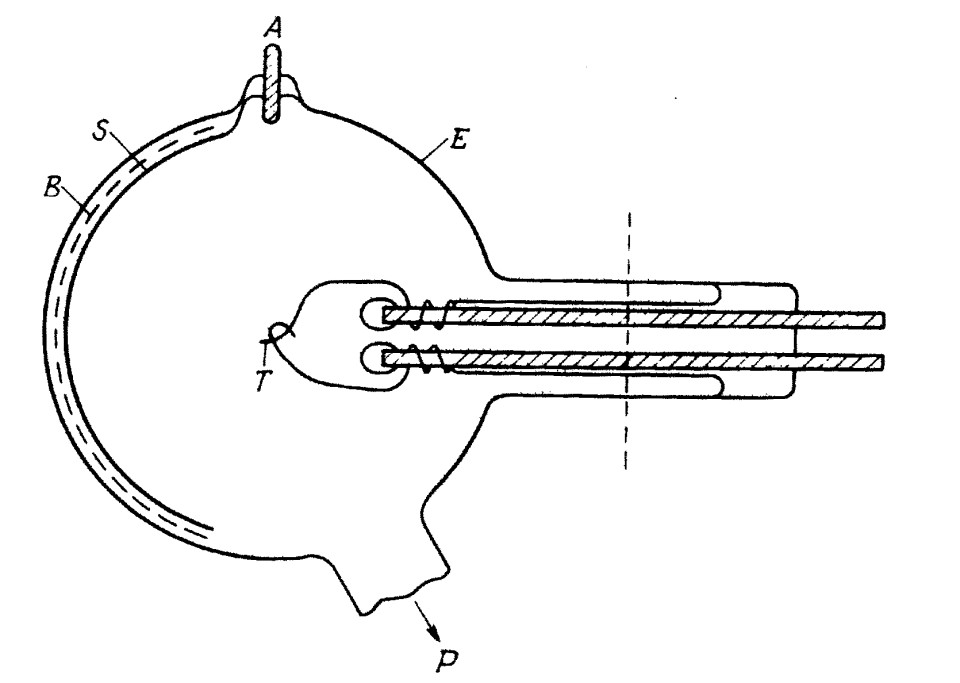
**ТЕМА 4. Полевая электронная эмиссия (ПЭЭ)**

**ПЭЭ (синонимы: автоэлектронная, электростатическая, холодная, туннельная эмиссия)** – это явление испускания электронов проводящими твердыми и жидкими телами под воздействием внешнего электрического поля Е достаточно высокой напряженности (Е~0.1–1 В·Å-1).

* + Впервые обнаружена в 1899 г. Р.У. Вудом.
  + Классическая теория оказалась не в состоянии описать ПЭЭ.
  + Методы квантовой механики впервые были применены к ПЭЭ из металла в 1928 г. Р. Фаулером и Л. Нордгеймом. Они дали теоретическое объяснение ПЭЭ на основе туннельного эффекта.

16

Схема простейшего ПЭМ: Е – стеклянная колба;



S – люминесцентный экран; В – контактное покрытие; А – вакуумный ввод;

Т – эмиттер (образец - острие);

Р – патрубок откачки.

Р

Схема оптики ПЭМ:

r – радиус кривизны острия,

s

r

*х –* расстояние от острия до

экрана.

Область с линейным размером s увеличивается на экране до

Величина напряженности поля вблизи острия равна:

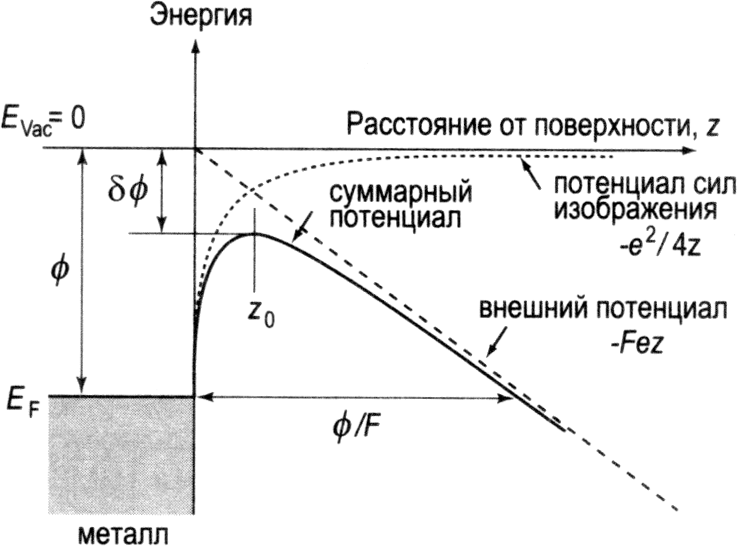
*V* 10000 *Â*

размера D.

Т.о., коэффициент увеличения К=D/s=с*x*/r0.61/10-6=6105

*F*    2 109 Â ì -1 17

*rk* 5 106 *ì*



**Исходный Потенциал**

**Ширина эффективного**

**барьера при**

**туннелировании**

### Диаграмма потенциальной энергии для электрона вблизи

**поверхности металла**

*F* – напряженность приложенного поля, *Evac* – вакуумный (нулевой уровень),

*Ф* – снижение работы выхода *Ф*, обусловленное наличием поля

(эффект Шоттки),

*z*0 – положение максимума суммарного потенциала. 18

**Плотность тока j ПЭЭ описывается формулой Фaулера-Нордгейма:**

1,54 106

6,831073 2 *f*

 

*j*  exp [ *A*/ *см*2]

*t*2 ( )  *F* 

Здесь [*F*]=В/см, [*ф*]=эВ,

*f*   ,

*t*( )

– табулированные медленно меняющиеся функции

безразмерного параметра.

* Экспериментальные графики зависимости **ln(j/F2)** от **(1/F)** используются для определения работы выхода ф аналогично тому как это делается с графиками Ричардсона-Дэшмана для термоэлектронной эмиссии (см. лекцию по термоэлектронной эмиссии).
* Уменьшение работы выхода электрона при приложении к поверхности поля *F* (эффект Шоттки) можно рассчитать из условия поиска максимума потенциала в точке z0 и в предположении что в этой точке электрон испытывает влияние только внешнего поля и сил изображения. Таким

образом:

*d*  *dz* 

*e*  *Fez*   0

4*z*





2

*z*0 

1 *e*1 2 *F* 1 2

2

 

 

*e*3 2 *F*1 2

19

**ТЕМА 5. Фото-электронная эмиссия (ФЭЭ)**

**ФЭЭ** – частный случай известного из вузовского курса общей физики фотоэффекта, а именно, внешний фотоэффект – испускание электронов поверхностями твердых тел под действием электромагнитного излучения в вакуум.

Основные закономерности ФЭЭ:

1. количество испускаемых электронов пропорционально интенсивности излучения;
2. для каждого вещества при определенном состоянии его поверхности существует порог – минимальная частота ωо (или максимальная длина волны λо) излучения, за которой ФЭЭ не возникает;
3. максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с частотой излучения ω и не зависит от его

интенсивности. 20

**ФЭЭ** – результат трѐх последовательных процессов:

1. поглощение фотона и появление в объеме образца электрона с высокой (по сравнению со средней в объеме образца) энергией;
2. движения этого электрона к поверхности, при котором часть энергии может рассеяться из-за столкновений с электронами образца;
3. выхода электрона через поверхность раздела (преодоление поверхностного барьера).

**Количественно ФЭЭ характеризуют *квантовым выходом Y***

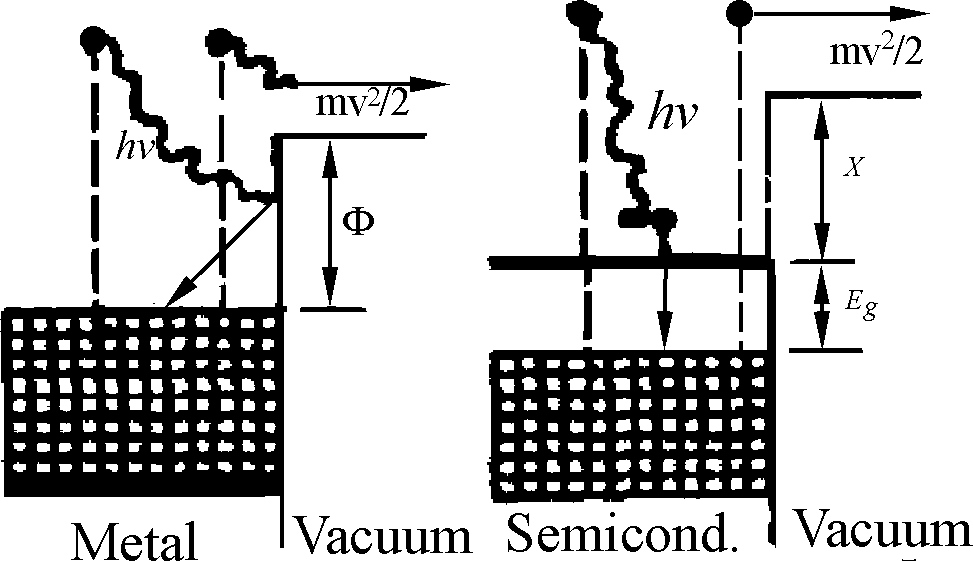
***Y*** *–* это число вылетевших электронов, приходящихся на один фотон, падающий на поверхность.

### Величина *Y* зависит от:

* свойств твердого тела,
* состояния его поверхности,
* энергии фотонов.

21

Формула Эйнштейна: ***hv = Ф +E*фэ**



Порог: для металлов - ***hν*=*Ф***

для полупроводников - ***hν*=*E*g +*χ***

***Eg* –** ширина запрещѐнной зоны, параметр ***χ –*** сродство к электрону, представляет собой высоту потенциального

барьера для электронов проводимости.

22

* Для чистых поверхностей большинства металлов Ф>3 эВ, поэтому ФЭЭ из металлов может наблюдаться в видимой и ультрафиолетовой (УФ) областях спектра. Вблизи порога ФЭЭ для металлов Y~10-4 электрон/фотон. Столь малое значение Y обусловле­но тем, что свет проникает в металл на глубину

~10-7 м и там, в основном, поглощается. Фотоэлектроны при движении из объема к поверхности взаимодействуют с электронами проводимости, которых в металле много, и быстро рассеивают энергию, полученную от фотона.

* В полупроводниках (свободных электронов нет или очень мало) фотоэлектрон теряет энергию при взаимодействии с электронами валентной зоны (при этом может происходить ударная ионизация остовных атомов) и на возбуждение фононов. Величина Y зависит от значения χ и от соотношения

значений *Eg* и *χ.* Таким образом, для полупроводников **Y: от 10-6 до 1.**

23