

## ОПЫТ ФРАНКА И ГЕРЦА.

Эксперимент Франка и Герца является прямым подтверждением постулатов Бора о том, что:

**1. Атом может находиться лишь в определенных дискретных состояниях и иметь внутреннюю энергию, соответствующую состоянию, в котором он находится.**

**2. Изменение внутренней энергии атома может происходить лишь при переходе между состояниями и равно разности энергии этих состояний (энергии перехода).**

Идея эксперимента состоит в анализе энергий электронов, претерпевших столкновения с атомами; при этом можно убедиться в том, что электроны передают атомам энергию лишь порциями, равными энергии переходов. Следует различать два типа столкновений: *упругие и неупругие*.

При *упругих* столкновениях сохраняется суммарная кинетическая энергия сталкивающихся частиц, а изменение кинетической энергии каждой из них зависит от соотношения масс. Например, при упругом столкновении электрона с покоящимся атомом кинетическая энергия электрона  $W_e$  может измениться лишь на величину  $\Delta W_e$  порядка

$$\Delta W_e \approx W_e \frac{m}{M} \quad (1)$$

где  $m$  и  $M$  - массы электрона и атома, соответственно. Внутренние энергии частиц при упругом соударении не меняются.

При *неупругом* столкновении кинетическая энергия сталкивающихся частиц изменяется на величину, равную изменению внутренних энергий частиц. Например, при неупругом столкновении электрона с атомом, атом может перейти из одного энергетического состояния в другое, изменив таким образом свою внутреннюю энергию. Разность энергий конечного и начального состояний атома  $\Delta E$  называется *энергией перехода*.

Изменение кинетической энергии электрона равно энергии перехода (здесь и далее тяжелый и медленный, по сравнению с электроном, атом считаем покоящимся до и после столкновения) :

$$W_{до} = W_{после} + \Delta E \quad (2)$$

Возбуждение атома (увеличение его внутренней энергии) может произойти лишь тогда, когда кинетическая энергия относительного движения электрона и атома будет превышать энергию перехода. В противном случае столкновение будет упругим, а изменение кинетической энергии - ничтожным. При соударении электрона с возбужденным атомом может произойти обратный процесс: атом переходит в состояние с меньшей внутренней энергией, а энергия электрона увеличивается на величину, равную энергии перехода; такое соударение называется *неупругим соударением второго рода*. Число таких столкновений пропорционально числу возбужденных атомов и в условиях эксперимента Франка и Герца мало. Ниже они не учитываются.

Таким образом, если в объем, заполненный некоторым газом, влетает электрон с энергией  $W_e$ , превышающей энергии переходов в атоме, то после столкновений электроны должны разделиться по энергиям на группы:

1. Электроны, столкнувшиеся с атомами только *упруго* и почти не потерявшие энергии.
2. Электроны, столкнувшиеся с атомами *неупруго*, т.е. возбуждившие атомы на различные энергетические уровни и имеющие энергии

$$W_n = W_e - E_n \quad (3)$$

$E_n$  -- энергия перехода из основного энергетического состояния в энергетическое состояние с номером  $n$  (при не слишком высоких температурах, согласно распределению Больцмана, почти все атомы находятся в основном состоянии).

В эксперименте Франка и Герца [1] наблюдается возбуждение самого нижнего (из возбужденных) уровня, далее называемого *резонансным*. Потенциал, соответствующий энергии возбуждения этого уровня, называется *резонансным потенциалом*.

В лабораторной работе для наблюдения возбуждения резонансного уровня используется трехэлектродная лампа, заполненная парами исследуемого элемента.

Электрическая схема эксперимента представлена на рис.1. Электроны, испущенные катодом, ускоряются электрическим полем между сеткой и катодом и испытывают столкновения с атомами. По мере продвижения от катода к сетке изменяется их энергия, численно равная ( в электрон - вольтах ) пройденной от катода разности потенциалов ( в вольтах ) за вычетом энергии, потерянной при столкновениях с атомами.

Тормозящее поле между сеткой и анодом является анализатором энергетического спектра электронов, пропуская к аноду лишь те электроны, энергия которых превышает тормозящую разность потенциалов.

**Если потенциал сетки относительно катода не превышает резонансного потенциала атома, то нигде в лампе не может происходить неупругих столкновений**

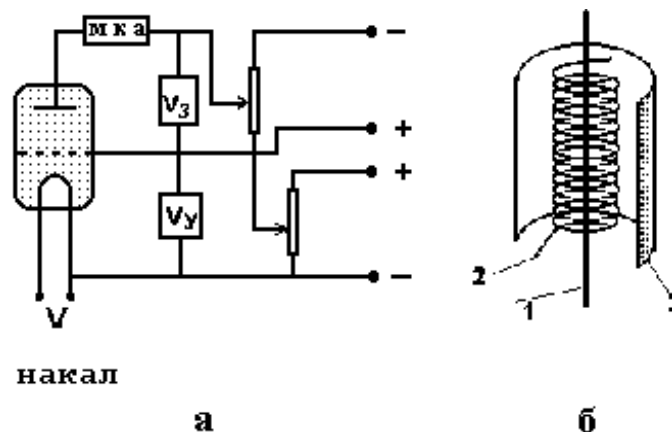


Рис. 1. Электрическая схема опыта Франка и Герца:  
а) -- электрическая схема; б) -- конструкция лампы;  
1 -- катод прямого накала; 2 -- сетка; 3 -- анод.

По мере повышения ускоряющего потенциала при постоянном тормозящем, в районе сетки возникает первая зона столкновений. Медленные (после неупругих столкновений) электроны, неспособные преодолеть задерживающий потенциал, не доходят до анода - попадают на сетку - анодный ток падает. При дальнейшем росте ускоряющего потенциала зона неупругих столкновений отодвигается от сетки к катоду и на оставшемся до сетки пути электроны набирают энергию, достаточную для

преодоления тормозящего поля между сеткой и анодом - анодный ток вновь возрастает. Как только потенциал сетки относительно катода превысит удвоенный потенциал возбуждения уровня, картина повторится, появится вторая зона неупругих соударений в районе сетки, второй минимум тока и т.д. ( В экспериментах со ртутью, выполненных Франком и Герцем, наблюдалось до пяти минимумов анодного тока).

Движение электронов в лампе имеет характер переноса - дрейфа - вдоль электрического поля, сопровождающегося диффузией из-за частых упругих столкновений. Энергия электрона, дрейфующего от катода к сетке, определяется только пройденной от катода разностью потенциалов; на расстоянии  $r$  от катода энергия электрона равна

$$E(r) = e [U(r) - U(0)]$$

Полагая потенциал катода равным нулю  $U(0) = 0$ , (потенциал падает вдоль катода на величину, равную напряжению накала.) определим радиус, за которым начинается зона неупругих столкновений, соотношением

$$E(r_1) = eU(r_1) = E_1$$

$E_1$ - энергия возбуждения резонансного уровня. Если энергия электрона превышает порог возбуждения резонансного уровня, то среднее время, в течение которого произойдет неупругое столкновение ( возбуждение атома ), определится соотношением

$$\tau_{неупр} = 1 / N v \sigma_{неупр} \quad (4)$$

здесь  $N$  - плотность атомов,  $\sigma_{неупр}$  -- сечение неупругого столкновения,  $v$  - скорость электрона. **За это время электрон, дрейфуя вдоль электрического поля и продолжая набирать энергию, не должен достичь порога возбуждения следующего за резонансным уровня  $E_2$ :**

$$E_1 + e \mathbf{E} v_{др} \tau_{неупр} < E_2 ; \quad (5)$$

здесь -  $\mathbf{E}$ - электрическое поле,  $V_{др}$  - скорость дрейфа; второй член в левой части - энергия, набранная электроном в дрейфовом движении вдоль поля за время, необходимое для одного неупругого столкновения. Поскольку электрон после каждого ( в среднем ) упругого столкновения теряет направленную скорость, скорость дрейфа можно считать величиной порядка скорости, набираемой электроном на одном свободном пробеге за время  $\tau$

$$V_{др} = \frac{e \mathbf{E}}{m} \tau = \frac{e \mathbf{E}}{m} \frac{1}{N v \sigma_{упр}} \quad (6)$$

Если выполняется условие (5), то скорость электрона в соотношениях (4) и (6) можно считать не сильно превышающей порог возбуждения резонансного уровня и оценить величиной  $v_1 = \sqrt{2 E_1 / m}$ . Поставив теперь (4) и (6) в (5), получим оценку величины сечения неупругого столкновения - возбуждения атома:

$$\sigma_{неупр} > \sigma_{упр} \frac{(e \mathbf{E} \lambda)^2}{E_1 (E_2 - E_1)}; \quad \lambda = 1 / N \sigma_{упр} \quad (7)$$

$\lambda$  -- длина свободного пробега электрона.

Условие (5), обеспечивающее возбуждение **только резонансного уровня**, требует для своего выполнения достаточно высокой плотности атомов. Электрическое поле в цилиндрической лампе в районе сетки равно

$$\mathbf{E} = \frac{V_{сет}}{R \ln(R/r)}$$

здесь  $R$  - радиус сетки,  $r$  - радиус нити катода,  $V_{сет}$  - потенциал сетки относительно катода. Если в районе сетки расположена зона неупругих столкновений, то можно положить

$$eE = \frac{E_1}{R \ln(R/r)} \quad (8)$$

Подставляя (8) в (7), получаем оценку величины эффективного сечения возбуждения атома:

$$\sigma_{неупр} \geq \sigma_{упр} \frac{E_1}{E_2 - E_1} \left( \frac{\lambda}{R \ln(R/r)} \right)^2. \quad (9)$$

Измерению подлежат зависимости анодного тока от ускоряющего напряжения при постоянном задерживающем ( *анодные характеристики* ) и от задерживающего при постоянном ускоряющем ( *характеристики задержки* ). Типичный вид анодных характеристик и характеристик задержки изображен на рис. 2, 3 и 4.

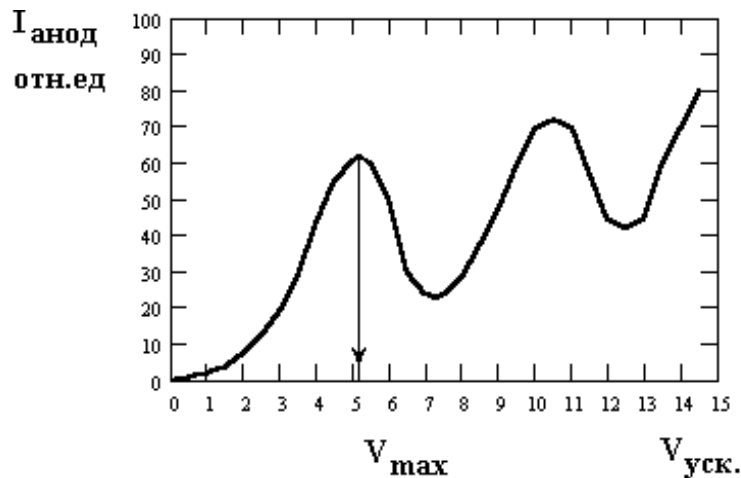


Рис . 2. Анодная характеристика .

Глубина минимума на анодной характеристике и сдвиг его относительно максимума тока (рис. 2) зависит от величины задерживающего потенциала. Необходимо отметить, что начало отсчета потенциалов не является определенным из-за влияния различных факторов: контактной разности потенциалов, распределения потенциала вдоль катода.

Кроме того, поскольку измеряется интегральный ток на всю поверхность анода, диффузия электронов вдоль оси лампы также

эффективно приводит к сдвигу начала отсчета потенциалов. Поэтому потенциал первого максимума  $V_{max}$  анодного тока не определяет резонансного потенциала атома, **разность же потенциалов двух соседних максимумов тока равна разности потенциалов между началами зон неупругих столкновений, т.е. равна резонансному потенциалу с точностью до разности потенциалов между началом и концом зоны неупругих столкновений, определяемой соотношением (5).**

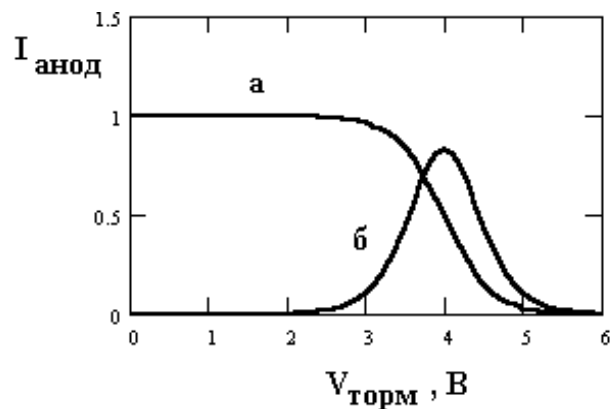


Рис. 3. Характеристика задержки (а) и распределение электронов по энергиям (б) в случае упругих столкновений,  $V_{\text{уск}} = \text{const} < V_{\text{max}}$

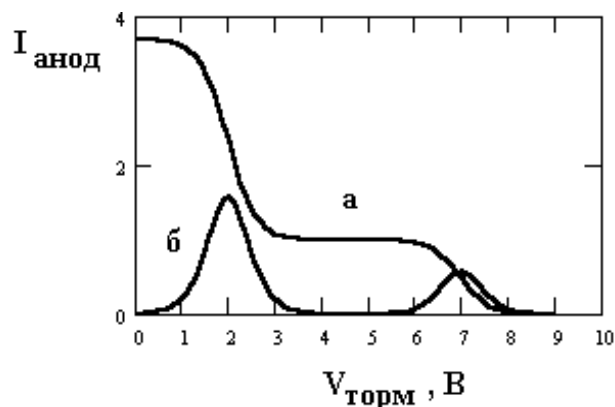


Рис. 4. Характеристики задержки (а) и распределение электронов по энергиям (б) в случае неупругих столкновений,  $V_{\text{уск}} = \text{const} > V_{\text{max}}$

Дифференцирование (кривая "б" на рис. 3,4) характеристики задержки (кривая "а") дает представление о распределении электронов по энергиям в лампе.

Задача эксперимента заключается в подборе режима (давления, тока накала, ускоряющего и задерживающего потенциалов), обеспечивающего получение наилучших анодных характеристик и характеристик задержки лампы. Лампы наполнены парами ртути или инертным газом. Простота регулирования давления насыщенных паров ртути путем нагрева позволяет наблюдать токовые характеристики при различных соотношениях длины свободного пробега электрона и радиуса сетки.

### ЗАДАНИЕ.

1. Снять анодную характеристику и характеристику задержки ртутной лампы при комнатной температуре (при  $V_{\text{уск}} > V_{\text{рез}}$ ).

*ВНИМАНИЕ!* При работе с ртутной лампой анодный ток не должен превышать 1 мкА.

2. Подобрать режим (изменяя величину тормозящего потенциала и ток накала), снять анодные характеристики лампы с инертным газом при двух задерживающих потенциалах и определить резонансный потенциал. Давление газа 1,2 мм рт. ст.

*ВНИМАНИЕ!* При работе с гелиевой лампой анодный ток не должен превышать 10 мкА.

3. Снять характеристики задержки лампы с инертным газом при двух ускоряющих потенциалах:

а) немного меньше  $V_{\text{max}}$  (на 3 – 4 В)

б) немного больше  $V_{\text{max}}$  (на 3 – 4 В.).

Увеличением задерживающего потенциала добиться  $I_{\text{анод}} = 0$

4. Снять те же характеристики (пункты 2 и 3) горячей  $\sim 100$  °С ртутной лампы (см. Приложение):.

а) немного меньше  $V_{\text{max}}$  (на 1 – 2 В)

б) немного больше  $V_{\text{max}}$  (на 1 – 2 В.).

Увеличением задерживающего потенциала добиться  $I_{\text{анод}} = 0$



5. Оценить сечения возбуждения резонансного уровня атомов ртути и инертного газа электронами. Сечения упругого рассеяния считать равными:

$$\sigma_{упр} ( Hg ) \approx 5 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$$

$$\sigma_{упр} ( He, Ne ) \approx 3 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$$

6. Получить анодные характеристики лампы с инертным газом на экране осциллографа. Схема включения лампы изображена на рис.5.

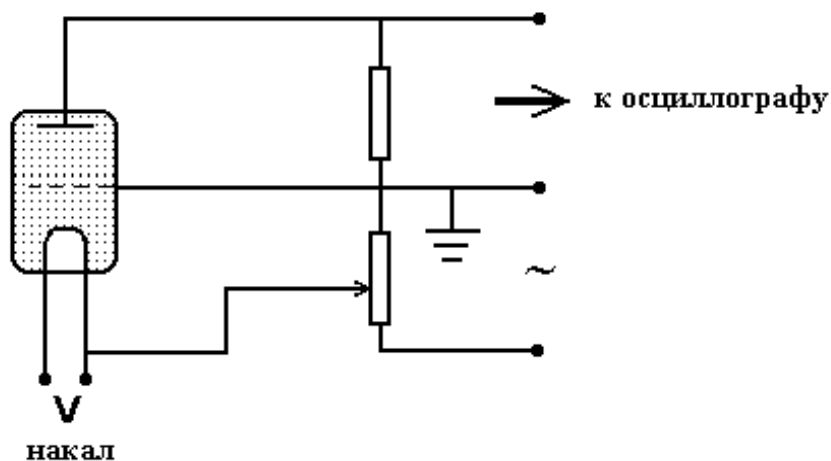


Рис. 5. Схема подключения лампы к осциллографу.

## ЛИТЕРАТУРА.

1. Шпольский Э.Ф. Атомная физика.-- М.: Наука, 1974, т.1. гл.VII.
2. Фриш С.Э. Оптические спектры атомов. - М.- Л.: Физматгиз,1963.
3. Тригг Дж. Решающие эксперименты в современной физике.--М.: Мир, 1974.

**ПРИЛОЖЕНИЕ**

Зависимость давления насыщенного пара ртути  
от температуры

