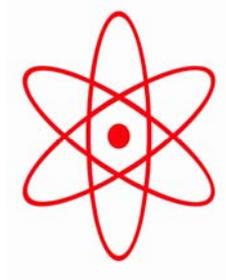


Методическая разработка: Панков Сергей Евгеньевич

ТУЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ЕСТЕСТВЕННО – НАУЧНЫЙ ФАКУЛЬТЕТ  
КАФЕДРА ФИЗИКИ



## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЗОНАНСНОГО ПОТЕНЦИАЛА АТОМА РТУТИ.  
ОПЫТ ФРАНКА И ГЕРЦА.**

Тула, 2006 г

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЗОНАНСНОГО ПОТЕНЦИАЛА АТОМА РТУТИ. ОПЫТ ФРАНКА И ГЕРЦА.

Цель работы: изучение процесса возбуждения атомов ртути электронами, измерение первого потенциала возбуждения (резонансного потенциала).

### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ.

#### **Уровни энергии атомов. Планетарная модель атома и квантовые постулаты Бора.**

Атом построен из тяжелого положительно заряженного ядра и окружающих его электронов. По классической механике такая система может находиться в равновесии лишь при условии, если электроны будут обращаться вокруг ядра по каким-то орбитам. Однако, с точки зрения классической электродинамики, такой атом был бы все же неустойчив, так как при движении с ускорением электроны должны были бы излучать энергию в виде электромагнитных волн и, следовательно, постепенно падать к ядру. Вместе с тем и частота обращения при этих условиях должна была бы непрерывно меняться, и мы получили бы сплошной спектр вместо резких спектральных линий. Тот факт, что этого на самом деле не наблюдается, и атомы испускают резкие спектральные линии, указывает на их замечательную устойчивость, противоречащую классической электродинамике.

Постулат о существовании устойчивых стационарных состояний осцилляторов является необходимой предпосылкой для вывода правильной формулы излучения абсолютно черного тела. Нильсу Бору (1913 г.) принадлежит заслуга отчетливой формулировки этого положения и обобщения его на любые атомные системы. Тем самым впервые с полной ясностью была показана неприменимость классической физики к внутриатомным движениям. Идея о квантах, высказанная Планком в применении к обмену энергией между полем излучения и линейными осцилляторами, приобрела универсальное значение как выражение наиболее характерной особенности процессов внутриатомного мира.

В основу развитой им квантовой теории строения атома Бор положил следующие два постулата:

I. Атомы и атомные системы могут длительно пребывать только в определенных состояниях — стационарных состояниях, — в которых, несмотря на происходящие в них движения заряженных частиц, они не излучают и не поглощают энергию. В этих состояниях атомные системы обладают энергиями, образующими дискретный ряд:  $E_1, E_2, \dots, E_n$ . Состояния эти характеризуются своей устойчивостью; всякое изменение энергии в

результате поглощения или испускания электромагнитного излучения или в результате соударения может происходить только при полном переходе (скачком) из одного из этих состояний в другое.

II. При переходе из одного стационарного состояния в другое атомы испускают или поглощают излучение только строго определенной частоты. Излучение, испускаемое или поглощаемое при переходе из состояния  $E_m$  в состояние  $E_n$ , монохроматично, и его частота  $\omega$  определяется из условия:

$$E_m - E_n = \hbar\omega \quad (10.1)$$

(условие частот Бора).

Оба эти постулата резко противоречат требованиям классической электродинамики, так как по первому постулату атомы не излучают, несмотря на то, что образующие их электроны совершают ускоренное движение (например, обращение по замкнутым орбитам), а по второму — испускаемые частоты не имеют ничего общего с частотами периодических движений электронов.

### Опыты Франка и Герца.

Формулированные в предыдущем пункте квантовые постулаты Бора нашли наиболее непосредственное экспериментальное подтверждение в опытах Дж. Франка и Густава Герца, к описанию этих опытов мы и переходим.

Идея опытов заключается в следующем: атомы или молекулы более или менее разреженного газа обстреливаются медленными электронами; при этом исследуется распределение скоростей электронов до и после соударений. Если соударения происходят упруго, то распределение скоростей в результате соударений не изменяется, и, наоборот, при неупругих соударениях часть электронов теряет свою энергию, отдавая ее атомам, с которыми они испытали соударения, и распределение скоростей меняется.

В результате опытов Франка и Герца оказалось, что:

1. При скоростях электронов, меньших некоторой критической скорости, соударение происходит вполне упруго, т. е. электрон не передает атому своей энергии, но отскакивает от него, изменяя лишь направление своей скорости.

2. При скоростях, достигающих критической скорости, удар происходит неупруго, т. е. электрон теряет свою энергию и передает ее атому, который при этом переходит в другое стационарное состояние, характеризующееся большей энергией.

**Таким образом, атом или вообще не воспринимает энергию (упругий удар), или воспринимает ее только в количествах, равных разности энергий в двух стационарных состояниях.**

Прежде чем переходить к более детальному описанию опытов и их результатов, рассмотрим некоторые вопросы, связанные с осуществлением этих опытов. Основные требования, которым должна удовлетворять экспериментальная установка, предназначенная для изучения соударений медленных электронов с атомами, заключаются в следующем:

1. Источник электронов должен давать достаточно большое число медленных электронов с определенным начальным распределением скоростей.

2. Этим электронам можно сообщить любую, заранее известную скорость путем воздействия приложенного извне ускоряющего поля.

3. Ускоренные электроны должны испытывать соударения с исследуемыми атомами или молекулами в определенном месте аппарата.

Для получения пучков медленных электронов, удовлетворяющих указанным требованиям, пользуются горячими катодами. Электроны, в избытке получаемые от этих катодов, ускоряются приложенным к катоду потенциалом  $V$ , который может меняться по произволу. Скорость  $v$ , которую приобретает неподвижный электрон под действием ускоряющего потенциала  $V$  вольт, находится из соотношения (закон сохранения энергии):

$$\frac{mv^2}{2} = eV \quad (10.2)$$

Таким образом, при ускоряющем потенциале в 1 В скорость электронов составляет около  $6 \cdot 10^7$  см/с. Отсюда видно, что термин «медленные электроны» имеет весьма относительное значение.

Если исследовать зависимость силы тока от ускоряющего напряжения и затем построить график, откладывая по оси абсцисс ускоряющий потенциал, а по оси ординат — соответствующую силу тока, то получается кривая (так называемая вольт-амперная характеристика), типичный вид которой изображен на рис. 1. Отметим, что эта характеристика стандартна для всех вакуумных приборов с эмиссией электронов с катода (термоэлектронная эмиссия у вакуумных ламп, фотоэлектронная эмиссия у фотоэлементов). У этой кривой обращают на себя внимание следующие характерные черты:

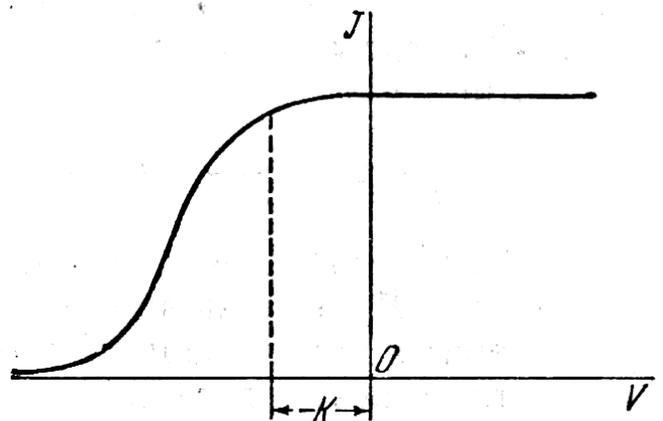


Рис. 1 Вольтамперная характеристика трубки с горячим катодом.

1) При некотором потенциале сила тока становится независимой от напряжения; это — «ток насыщения», возникновение которого объясняется тем, что все электроны, освобождаемые в единицу времени при данной

температуре накала из катода, переносятся к аноду.

2) При ускоряющем потенциале, равном нулю, ток не только не падает до нуля, но продолжает оставаться независимым от напряжения также и при потенциалах обратного знака, т. е. при тормозящих потенциалах, вплоть до некоторого потенциала  $-K$ . При дальнейшем увеличении тормозящего потенциала ток убывает, постепенно спадая к нулю.

Для объяснения этих особенностей следует, прежде всего, принять во внимание, что катод и анод в трубке с горячим катодом всегда бывают сделаны из различных металлов. Поэтому **между катодом и анодом в отсутствии внешнего напряжения обязательно имеется контактная разность потенциалов**. Если теперь внешний ускоряющий потенциал становится равным нулю, то электроны еще подгоняются этой контактной разностью потенциалов. **Для компенсации ее необходимо приложить некоторый тормозящий потенциал  $K$** .

Когда этот потенциал приложен, то сила тока все еще остается отличной от нуля потому, что электроны выходят из катода не с нулевой скоростью, но обладают конечными скоростями, распределенными по закону Максвелла. Только тогда, когда задерживающий потенциал достигает такой величины, что его не могут преодолеть самые быстрые электроны, сила тока становится равной нулю.

Идея опытов, излагаемых в следующих пунктах, как уже было указано, состоит в том, что электронам, получившим определенное ускорение, предоставляется возможность испытывать соударения с атомами газов, вводимых при небольших давлениях в трубку. Для того чтобы установить, каков характер этих соударений, — упругие они или неупругие, очень часто бывает необходимо исследовать после соударений распределение скоростей между электронами. Это осуществляется при помощи метода задерживающего потенциала.

### Упругие соударения.

**Франк и Герц показали, прежде всего, что если энергия электронов не превосходит некоторой критической величины, то соударения между электронами и атомами происходят вполне упруго. Это значит, что электрон в результате соударения изменяет только направление скорости, не теряя своей энергии.** Для доказательства этого было поставлено несколько опытов, из которых мы опишем только один.

В центре металлического диска  $A$  (рис. 2) имеется отверстие, в котором помещается нить накала  $D$ . Диск подвешен на нитях в пространстве, где может создаваться любое давление газа. При помощи специального приспособления, действующего через шлиф, диск может быть поднят или опущен без нарушения вакуума. В пространстве между вторым диском  $B$  и сеткой  $C$  может быть создано задерживающее поле, при помощи которого измеряется распределение скоростей между электронами. Давление газа выбирается таким, чтобы в пространстве между сеткой  $C$  и воспринимающей

Вероятность,  
того, что  
энергия эл-  
нов равна  
eV.

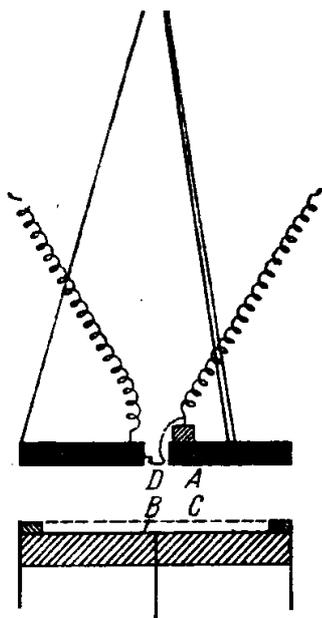


Рис. 2

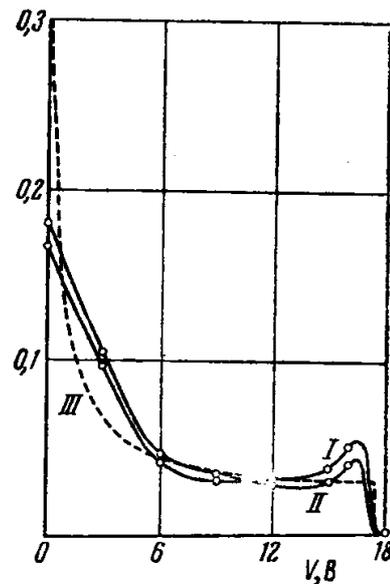


Рис. 3

пластинкой  $B$  электроны по возможности не испытывали соударений. На рис. 3 представлено распределение энергии электронов в гелии при давлении 1,3 мм и при ускоряющем потенциале 18 В. Кривая I измерена при расстоянии  $AC$ , равном 4 мм, кривая II — при расстоянии 18 мм. Несмотря на то, что электроны во втором случае испытывают неизмеримо большее число соударений, чем в первом, обе кривые почти точно совпадают. Отсюда следует, что удары между электронами с энергией в 18 эВ и атомами гелия происходят вполне упруго.

Пунктирная кривая III на рис. 2 есть теоретическая кривая, рассчитанная в предположении, что вследствие соударений, скорости электронов меняют свое направление так, что электроны, проходящие сквозь отверстия сетки  $C$ , имеют всевозможные направления в пределах полусферы. Как видно, эта кривая близко подходит к экспериментальным кривым.

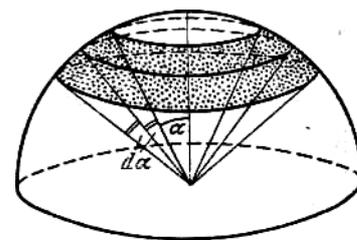


Рис. 4.

Характер кривых требует дополнительного разъяснения. Обращает на себя внимание тот факт, что функция распределения электронов по энергиям принимает наибольшее значение при энергии, равной нулю. Причина этого — чисто геометрическая. Теоретическая кривая III, как уже сказано, построена в предположении, что электроны результате соударений, не меняя своей скорости *по величине*, имеют в пространстве между сеткой  $C$  анодом всевозможные направления. Далее, необходимо принять во внимание, что в методе задерживающего потенциала при плоских электродах имеет значение только *нормальная* составляющая скорости.

При совершенно равномерном распределении скоростей по направлению числа электронов, попадающих внутрь телесного угла  $d\Omega = 2\pi \sin \alpha \cdot d\alpha$  (рис. 4), будет:

$$dN = N_0 d\Omega = 2\pi N_0 \sin \alpha \cdot d\alpha.$$

Из этого следует, что наибольшее число электронов приходится на угол  $\alpha$ , равный  $\pi/2$ . Но для таких электронов нормальная составляющая скорости равна нулю. Это и объясняет подъем кривой при переходе к нулевой энергии. Небольшой максимум, имеющийся на экспериментальных кривых при энергии, несколько меньшей 18 эВ, несомненно, обусловлен тем, что распределение по направлениям электронов, проходящих через сетку, не вполне хаотическое: заметная доля электронов сохраняет направление скорости, близкое к нормали.

### Неупругие соударения. Критические потенциалы.

Для доказательства существования неупругих соударений Франком и Герцем была использована следующая установка. Электроны от нити накала  $D$  (рис. 5) ускорялись отрицательным потенциалом, наложенным на нить  $D$  (соответственно, на  $N$  наложен положительный потенциал, относительно  $D$ ). В пространстве между  $D$  и  $N$  эти электроны испытывали многочисленные соударения и попадали, в конце концов, на воспринимающую пластинку  $A$ . Гальванометр  $G$ , соединенный с  $A$ , измерял ток пластинки. Сетка  $N$ , заряженная слабо положительно относительно  $A$  (в большинстве случаев до потенциала +0,5 В, т.о. между  $N$  и  $A$  создан задерживающий потенциал), помещалась непосредственно перед пластинкой  $A$ .

Назначение сетки заключалось в том, чтобы вылавливать электроны, почти полностью потерявшие свою энергию вследствие неупругих соударений. Опыт производился в парах ртути при относительно высоком давлении и состоял в измерении тока пластинки  $A$  в зависимости от ускоряющего потенциала, наложенного на сетку  $N$ . При увеличении ускоряющего потенциала от нуля ток первоначально возрастал (рис. 6), причем кривая тока имела обычный вид вольтамперных характеристик термоэлектронных приборов. Но при потенциале около 4,1 В ток внезапно резко падал, а затем вновь начинал возрастать до потенциала 9,0 В, при котором вновь обнаруживалось резкое падение тока и новое его возрастание до потенциала 13,9 В. Таким образом, вся кривая представляла собою ряд острых максимумов, отстоящих друг от друга на расстоянии 4,9 В. Тот факт, что расстояние между двумя соседними максимумами всегда составляло

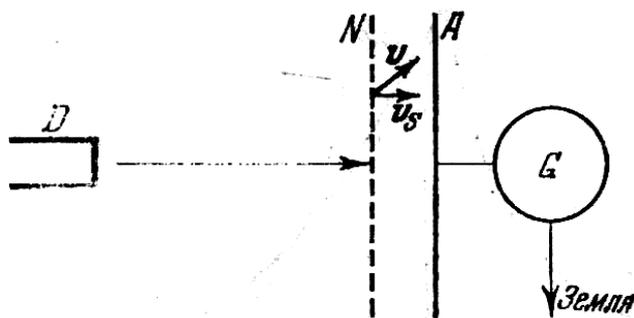


Рис. 5 Схема метода задерживающего потенциала.

(с точностью до 0,1 В) 4,9 В, а первый максимум обнаруживался у 4,1 В, легко объясняется тем, что к наложенному извне ускоряющему потенциалу прибавляется контактная разность потенциалов, которая как бы смещает всю кривую влево, не изменяя расстояния между максимумами.

Истолкование максимумов кривой на основании сказанного выше не представляет затруднений. До тех пор, пока энергия электрона не достигнет 4,9 В, он испытывает с атомами ртути упругие соударения, и ток возрастает с увеличением потенциала по обычному закону. При потенциале 4,9 В удар становится неупругим, электрон отдает при соударении атому ртути всю свою энергию. Эти электроны не попадут на пластинку А, так как они будут выловлены обратной сеткой N, заряженной до +0,5 В, и ток пластинки резко упадет.

Если энергия электронов заметно превосходит 4,9 В, то такие электроны, потеряв часть своей энергии при неупругом соударении, сохраняют достаточный избыток энергии и потому, несмотря на наличие положительно заряженной сетки, достигают пластинки А, — ток вновь начинает возрастать.

Мы видим, таким образом, что энергия в 4,9 эВ имеет особое значение для атомов ртути. Меньшую энергию они воспринять не могут, так как при меньшей энергии бомбардирующих их электронов удар происходит вполне упруго; энергию же в 4,9 эВ они воспринимают полностью. Но это и означает в согласии с первым постулатом Бора, что атом ртути может обладать не любыми запасами энергии, а только избранными. Если  $E_1$  будет запас энергии «невозбужденного» атома ртути, то следующее возможное значение энергии атома будет  $E_1 + 4,9$  эВ. Ускоряющий потенциал 4,9 В называется «первым критическим потенциалом» или «резонансным потенциалом» атома ртути. Такие же резонансные потенциалы найдены и для других атомов. Например, для калия резонансный потенциал равен 1,63 В, для натрия — 2,12 В, для гелия — 21 В и т. д.

Опыты Франка и Герца подтверждают и второй постулат Бора — правило частот. При достижении ускоряющего напряжения 4,9 В пары ртути начинают испускать ультрафиолетовое излучение с  $\lambda=253,7$  нм. Это излучение связано с переходом атомов ртути из первого основного состояния в основное.

Само собою разумеется, что, кроме энергии, соответствующей первому критическому потенциалу, атомы могут обладать и другими, более высокими степенями энергии возбуждена. Эти более высокие ступени возбуждения

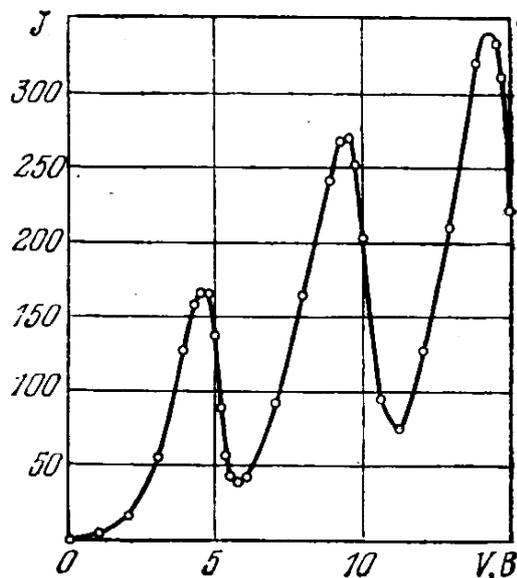


Рис. 6

могут быть также найдены при помощи метода электронных соударений. Однако экспериментальная методика для этой цели должна быть в виде изменена и в данной лабораторной работе мы её не рассматриваем. Интересующимся рекомендуем обратиться к списку литературы, в особенности к книге Шпольский Э. В. «Атомная физика», т.1.

### Методика эксперимента.

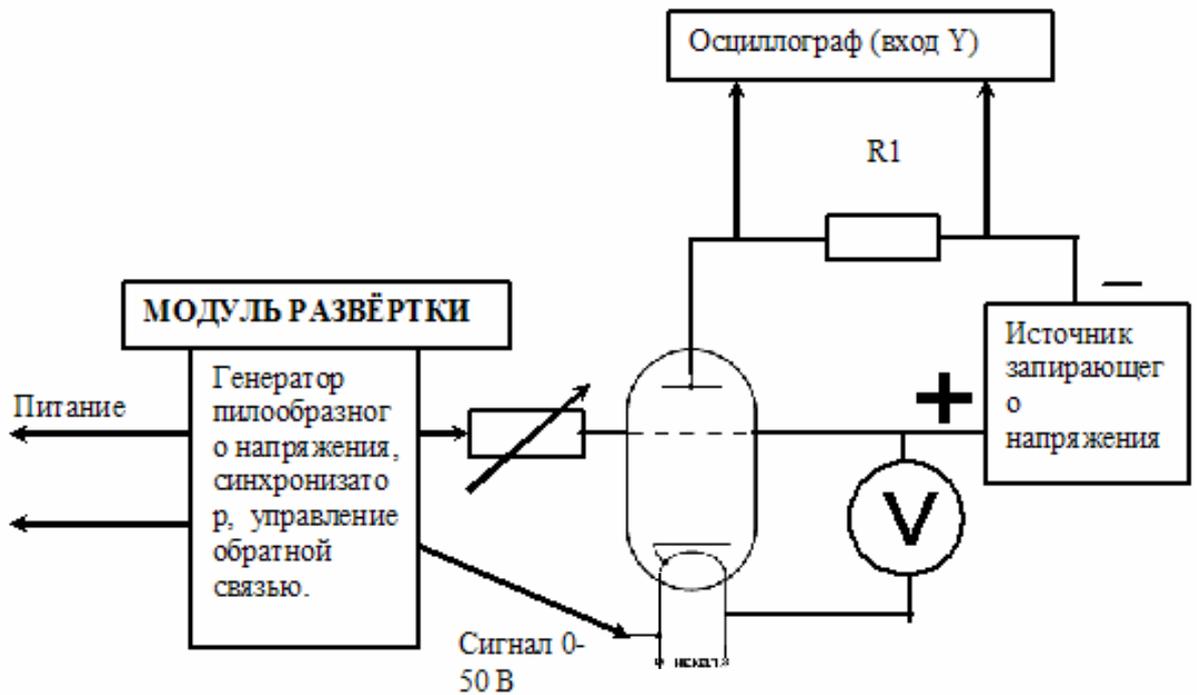


Рис. 7. Блок-схема экспериментальной установки.

В лабораторной установке используется серийная трехэлектродная лампа ПМИ-2 (лампа, используемая в ионизационном манометре). Вид лампы приведен на рис. 8. Катод и накал лампы соединен и представляет собой единый электрод. Данная конструкция позволяет избежать погрешности, связанной с возможностью появления различных явлений между катодом и нитью накала.

Блок-схема экспериментальной установки изображена на рис.7. Модуль развёртки состоит из нескольких модулей, основная задача которых в выработке пилообразного напряжения нужной частоты, формы и длительности, а также синхронизации сигнала (подробные принципиальные

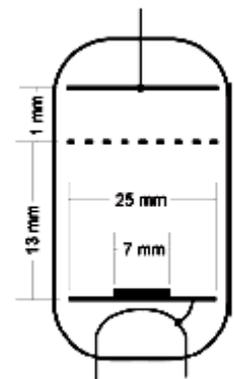


Рис. 8. Лампа газонаполненная трехэлектродная ПМИ-2.

схемы см. в паспорте установки). Форма импульсов представлена на рис. 9.

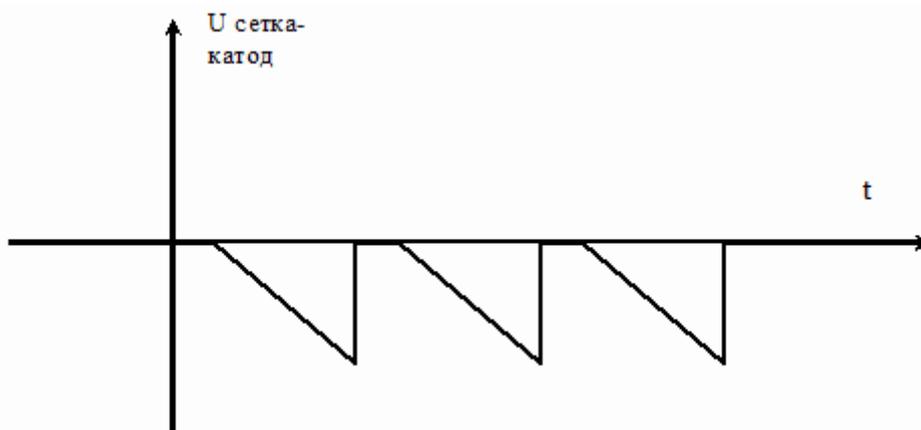


Рис. 9. Форма сигнала, подаваемого на промежуток сетка-катод триода.

Напряжение такой формы подаётся на катод лампы ПМИ-2 (сетка при этом заземлена – соединена с общей точкой). Потенциал катода линейно падает относительно неизменного потенциала сетки. Таким образом, между сеткой и катодом лампы создается ускоряющее напряжение, линейно меняющееся во времени – создается развёртка во времени по оси  $X$  осциллографа, а, так как напряжение  $U_{\text{сетка-катод}}$  пропорционально времени  $t$ , то развертка по времени есть развёртка по напряжению  $U_{\text{сетка-катод}}$ . В свою очередь, осциллограф, развёртывает сигналы, подаваемые на вход  $Y$ , всегда во времени (т. е. пропорционально времени), а т. к. в нашем случае время пропорционально напряжению, то развертка по времени есть развертка по напряжению. С помощью источника запирающего напряжения между сеткой и анодом лампы создан запирающий потенциал. Питание всех устройств осуществляется от стабилизированного источника питания.

С резистора  $R1$  снимается сигнал, пропорциональный анодному току  $I_{\text{АНОД}}$  лампы. В результате получаем на экране осциллографа вольт-амперную характеристику лампы, т. е. зависимость тока анода  $I_{\text{АНОД}}$  от ускоряющего напряжения  $U_{\text{сетка-катод}}$ , имеющий вид, аналогичный рис.6.

Переменным резистором имеется возможность регулировать действующее значение ускоряющего напряжения (т. е. величину пиков), подаваемого на сетку-катод лампы. Цифровой измерительный прибор - ЦИП ПК-010, собранный на базе высокочастотных диодов по схеме, применяемой в Министерстве Обороны РФ, служит для измерения значения этого напряжения. Величины запирающего напряжения, а также ток накала подобраны наилучшим образом и их регулировка не предусмотрена.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Перед выполнением работы рекомендуется ознакомиться с работой электронного осциллографа и паспортом модуля ФПК-10.

Блок – схема включения модуля совместно с осциллографом и звуковым генератором приведена на рис.10.

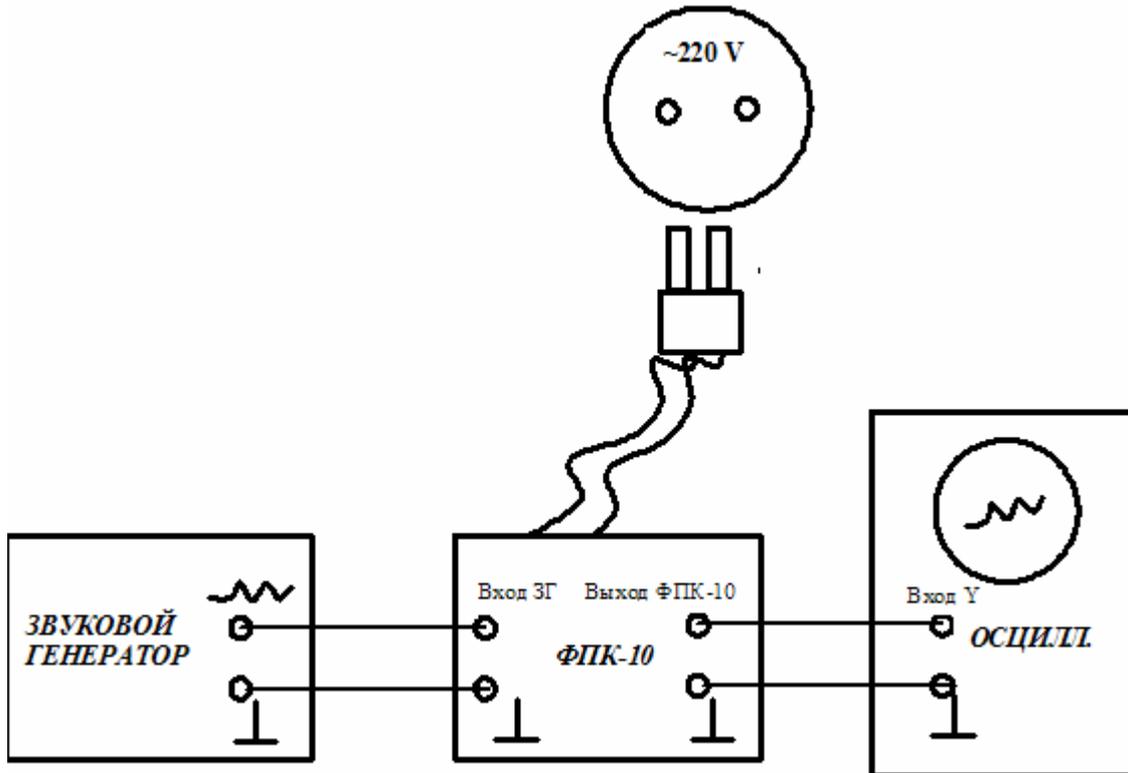


Рис. 10. Блок- схема включения лабораторного модуля ФПК-10.

1. Ознакомиться с блок-схемой включения модуля ФПК-10, приведенной на рис. 10 и проверить правильность включения модуля со звуковым генератором (ЗГ) и осциллографом, руководствуясь обозначениями на панели модуля и на соединительных проводах. Необходимость в дополнительном элементе – звуковом генераторе обусловлена в формировании запускающих импульсов и дополнительном усилении сигнала.
2. Включить звуковой генератор, осциллограф и модуль в сеть напряжением  $\sim 220$  В.
3. Поставить переключатель «СЕТЬ» на панели звукового генератора во включенное положение. При этом должна загореться сигнальная лампа на панели звукового генератора.
4. Поставить переключатель «СЕТЬ» на панели осциллографа во включенное положение. При этом должна загореться сигнальная лампа на панели осциллографа.
5. Поставить переключатель **К** на панели модуля ФПК-10 в положение «ВКЛ», при этом должен загореться сигнальный светодиод «СЕТЬ» на панели модуля. На панели ЦИП ПК-010 при этом должно

индуцироваться некоторое значение ускоряющего напряжения (в т. ч., возможные показания 00.0). Вследствие применения делителей прибор ЦИП ПК-010 откалиброван таким образом, что для получения действующего значения ускоряющего напряжения в вольтах, показания ЦИП ПК – 010 необходимо умножать на **10!** Т.е внимание на десятичную точку обращать не следует. Например, при показании 4 . 5, значение ускоряющего напряжения составляет 45 В.

6. Дать прогреться всем приборам в течение не менее 3-5 минут.
7. **Установить выходной сигнал со звукового генератора следующим образом.** Ручку регулировки ускоряющего напряжения **R** на панели ФПК-10 поставить **в максимально** возможное положение (вращать плавно до упора по часовой стрелке). На панели звукового генератора поставить переключатель множитель в положение **×10**, ручку плавной регулировки частоты в положение **50**. Тем самым вы устанавливаете задающую частоту 500 Гц. **Медленно** вращая ручку «УСИЛЕНИЕ» на панели генератора и наблюдая за изменениями в показаниях ЦИП ПК – 010, добиться значения ускоряющего напряжения 50 В (показание на ЦИП ПК-010 должно, т. о. составлять 5.0). Таким образом, вы устанавливаете максимально возможное значение ускоряющего напряжения в данном опыте. Если ручка «УСИЛЕНИЕ» на панели ЗГ заблокирована, то **максимально допустимое значение напряжения уже подобрано и вращать её запрещается.** Менять значение ускоряющего напряжения в таком случае можно только ручкой **R** на панели модуля. **Значение ускоряющего напряжения в любом случае не должно превышать 60 В во избежание негативных явлений в исследуемой лампе.**
8. **Поставить ручку «Диапазон частот» на боковой стороне осциллографа в положение 30. Медленно** вращая ручку плавной регулировки частоты на панели звукового генератора **в пределах 450-550 Гц**, добиться появления стабильной вольт - амперной характеристики лампы, аналогичной рис.6. **Только в пределах задающих частот 450 - 500 Гц достигается наибольшая стабильность характеристики триода.** Поэтому выход за пределы данных частот недопустим и искажает показания.
9. Вращением ручек «СМЕЩЕНИЕ ПО ОСИ X», «СМЕЩЕНИЕ ПО ОСИ Y» расположенной на боковой панели осциллографа, расположить картинку так чтобы вся вольт-амперная характеристика умещалась на экране. Затем, вращением ручки «СМЕЩЕНИЕ ПО ОСИ X» совместить первый из пиков на вольт-амперной характеристике с одной из клеток (для удобства измерения расстояния между пиками).
10. Вращением ручки «Усиление по оси X» подобрать коэффициент усиления по оси X таким образом, чтобы между максимумами характеристики укладывалось целое число клеток (например, одна

клетка как на рис. 6 – это сделано для удобства измерений). Ручку «Усиление по оси Y» можно поставить в среднее положение.

11. Срисовать вольт-амперную характеристику с экрана осциллографа в натуральную величину.
12. Определить расстояние  $\Delta x_{n \ n+1}$ , выраженное в клетках (количество клеток, естественно, может быть дробным), между 1-ым и 2-ым; 2-ым и 3-им; 3-им и 4-ым пиками, т.е. несколькими соседними пиками (обычно отчетливо наблюдается не более 3-4 пиков).
13. Далее необходимо определить коэффициент чувствительности оси X осциллографа, для чего следует отключить от оси Y модуль ФПК-10 (отсоединить от гнезд на передней панели осциллографа провода, идущие от модуля), и **подключить к оси X** осциллографа устройство «КАЛИБРАТОР». Сетевую вилку устройства «КАЛИБРАТОР» включить в сеть  $\sim 220$  В.
14. Поставить переключатель «Диапазон частот» на боковой поверхности осциллографа в положение 0, тем самым отключив генератор развертки осциллографа.
15. Медленно вращая ручку G на калибраторе, снять зависимость длины линии на экране (выраженной в количестве клеток, которое может быть дробным, например  $2\frac{4}{5}$  клетки) от напряжения, подаваемого на ось X осциллографа. **Внимание! Напряжение, подаваемое на ось X изменять в пределах от 0 до 10 В – по показаниям стрелочного вольтметра! Превышение предела напряжения ведет к нелинейным эффектам, связанным со входной емкостью оси X.**

16. Построить градуировочный график оси X, используя метод наименьших квадратов (см рис. 11).

17. Определить коэффициент чувствительности оси X как коэффициент наклона прямой (коэффициент **B** в методе наименьших квадратов или

$$K_{чувств.} = \frac{\Delta U}{\Delta l} = \left[ \frac{\text{вольт}}{\text{клетка}} \right].$$

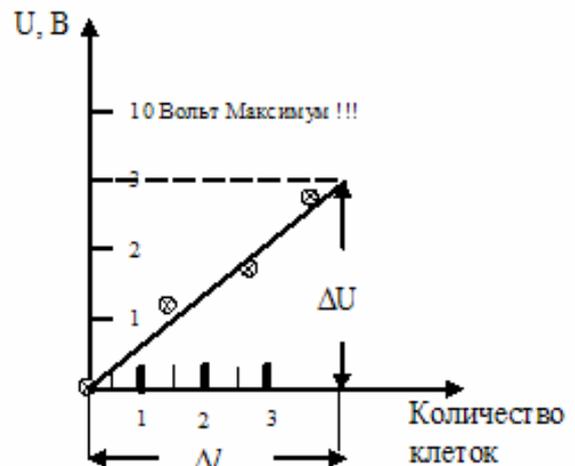


Рис. 11

18. Расстояние между пиками, определенное в п. 12 и выраженное в количестве клеток, перевести в значение потенциала  $\Delta \varphi$  по формуле:

$$\Delta \varphi = K_{чувств.} \cdot \Delta x_{n \ n+1}$$

19. Отключить калибратор от осциллографа и из сети  $\sim 220$  В.
20. Поставить ручку «Диапазон частот» на боковой панели осциллографа в положение 30. **Остальные ручки на осциллографе в дальнейшем**

**вращать запрещается во избежание раскалибровки оси X осциллографа!**

21. Снова подключить модуль ФПК – 10 к оси Y осциллографа.
22. С помощью ручки **R** на панели модуля ФПК-10 изменить значение ускоряющего напряжения  $U_{c.-к.}$ , записав показания ЦИП ПК -010.
23. Повторить пп. 11, 12, 18.
24. Опыт проделать при трех значениях ускоряющего напряжения.
25. По окончании работы отключите все приборы от сети, переведя соответствующие переключатели в положение «ВЫКЛ» и вынув вилки из розеток.
26. Все данные занести в таблицу:

$$K_{\text{чувствительности}} = \dots$$

№ опыта	Значение ускоряющего напряжения $U_{c.-к.}$ , В.	Расстояние $\Delta x_{n \ n+1}$ между соседними пиками, в клетках.	Значение резонансного потенциала $\Delta\phi$ ( $\Delta x_{nn+1}$ в вольтах), В.	Среднее значение $\langle \Delta\phi \rangle$ , В
1.		...	...	...
		...	...	
		...	...	
2.		...	...	
		...	...	
		...	...	
3.		...	...	
		...	...	
		...	...	

17. При возбуждении резонансной линии атома ртути происходит последующее излучение с длиной волны  $\lambda$ , которую легко можно вычислить, используя закон сохранения энергии. Электрон, проходя ускоряющую разность потенциалов, набирает энергию  $e\Delta\phi$ , которую передаёт атому ртути. Атом ртути переходит в возбуждённое состояние, излучая длину волны  $\lambda$ . Таким образом:

$$h \cdot \frac{c}{\lambda} = e \cdot \langle \Delta\phi \rangle \quad (10.3)$$

18. Подсчитать длину волны  $\lambda$ , нм с помощью формулы (10.3). Сравнить все результаты с табличными значениями. Оценить погрешности измерений. Резонансный потенциал атома ртути  $\Delta\phi = 4,9$  В. Длина волны резонансной линии составляет  $\lambda = 253,7$  нм.

**КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. В чём противоречие модели атома Бора с классической электродинамикой? Объясните постулаты Бора.
2. В чём заключается идея опыта, предложенная Франком и Герцом?
3. Каким требованиям должна удовлетворять экспериментальная установка?
4. Какие виды соударений возможны между атомом и налетающим на него с некоторой скоростью электроном? Является ли опыт Франка и Герца доказательством возможности неупругих соударений?
5. Объясните полученную вами на экране осциллографа вольт-амперную характеристику  $I_A(U_{\text{сетка-катод}})$  ртутной лампы. Почему наблюдается четкий ряд пиков и спадов тока на вольт-амперной характеристике лампы?
6. Почему для наблюдения вольт-амперной характеристики на экране осциллографа необходим Генератор Линейно Изменяющегося Напряжения (ГЛИН)?
7. Существуют ли резонансные потенциалы для других газов и веществ?
8. В чем состоят различия между потенциалом возбуждения и ионизационным потенциалом атома?
9. Электрон в электронно-лучевой трубке с накаливаемым катодом, под действием ускоряющего напряжения +1 кВ, приложенного на анод трубки, преодолел некоторое расстояние между катодом и анодом. С какой скоростью он ударится об анод трубки и какую энергию передаст аноду. Возможно ли нагревание анода?
10. Какие методы можно использовать для определения других стационарных состояний атома? (см приложение).

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Метод двух сеток

Как уже было сказано, более высокие ступени возбуждения атома также могут быть найдены методом электронных соударений. Здесь мы кратко опишем данный метод.

Для перевода атома в возбужденное состояние требуется энергия равная или большая  $\Delta E_{12} = E_2 - E_1$ . Здесь  $E_1$  – энергия основного состояния,  $E_2$  – энергия уровня ближайшего к основному (его часто называют резонансным уровнем).

Наименьшие значения величины  $\Delta E_{12}$  наблюдаются у атомов щелочных металлов, а наибольшие у атомов инертных газов. Например, для натрия она составляет 2,12эВ, для гелия – 21эВ, для ртути – 4,9 эВ. Когда кинетическая энергия электрона меньше  $\Delta E_{12}$  столкновения электрона с атомами будут упругими.

Электрон в несколько тысяч раз легче ядра атома. Поэтому скорость электрона после упругого столкновения с атомом будет меняться не по величине, а только по направлению. В плотных газах электрон сталкивается с атомами очень часто. Но не смотря на это кинетическая энергия электрона, по мере движения к сетке, будет расти. Увеличение кинетической энергии продолжается до тех пор, пока столкновения с атомами будут упругими. Когда энергия электрона достигнет величины равной первому потенциалу возбуждения -  $\Delta E_{12}$ , атом, в результате столкновения, перейдет в возбужденное состояние. Электрон потеряет энергию движения. Поэтому высшие уровни энергии атома в опыте Франка и Герца практически не возбуждаются.

Идея метода двух сеток состоит в создании ситуации, когда уже на длине  $L$  свободного пробега электрон набирает энергию позволяющую перевести атом на более высокие уровни, чем резонансный уровень. Математически это означает, что в экспериментальной установке реализуется неравенство:

$$\frac{dU}{dz} L > \Delta E_{12} \quad , \quad (1)$$

где градиент ускоряющего напряжения  $U$  берется вдоль направления эмиттер-сетка, обозначенного как ось  $z$ .

Увеличения средней длины свободного пробега можно добиться уменьшением плотности (давления) газа в баллоне лампы. Однако при этом вероятность столкновений электронов с атомами резко падает и амплитуды скачков тока на ВАХ будут мало заметны и сравнимы с шумами. На практике поступают иначе: увеличивают градиент ускоряющего напряжения в зазоре эмиттер-сетка. Одна из схем эксперимента показана на рис.12.

Основное отличие от установки Франка и Герца состоит во введение в прибор двух сеток:  $C_1$  и  $C_2$ . Ускоряющее напряжение  $U$  подается на сетку  $C_1$ , которую размещают очень близко к эмиттеру, на расстоянии  $d < L$ . Поэтому электроны, вылетающие из катода, ускоряются до нужных значений энергии практически не сталкиваясь с атомами газа. Столкновения с атомами происходят в пространстве между сетками. Чтобы на столкновения не влияли электрические поля, сетки  $C_1$  и  $C_2$  замыкают между собой. На практике роль двух сеток может играть “клетка Фарадея”. Таким образом, в методе двух сеток ускорение электронов до нужных значений энергии осуществляют в зазоре эмиттер – первая сетка. Столкновения же с атомами происходят внутри области ограниченной сетками  $C_1$  и  $C_2$ . Электроны, испытавшие столкновения затем вылавливаются коллектором. Метод позволяет разделить уровни возбуждения атома, отстоящие друг от друга на десятые доли эВ.

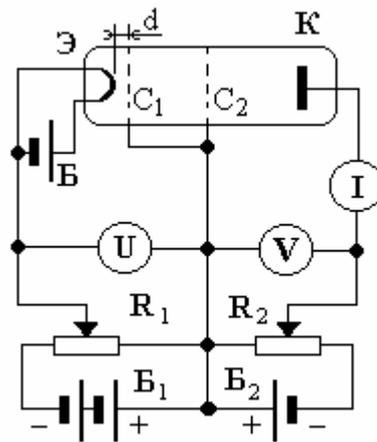


Рис.12. Метод двух сеток

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

При разработке данной лабораторной работы была использована следующая литература:

1. Иродов И. Е., Квантовая физика. Основные законы., М. 2002
2. Савельев И. В. Курс общей физики. М., 1982, т. 3
3. Шпольский Э. В., Атомная физика т.1, т.2
4. Курс физики, под редакцией Лозовского В.Н., С-Пб 2001.
5. Рохлин Г. Н., Разрядные источники света, М., Энергоатомиздат,1991.
6. Лабораторный практикум по физике, под ред. К. А. Барсукова, М. 1988.
7. Принципиальные электрические схемы электронного осциллографа.
8. Физический практикум по атомной и ядерной физике часть 3, учебно-методическое пособие Калининградского Государственного Университета, 2004 г.