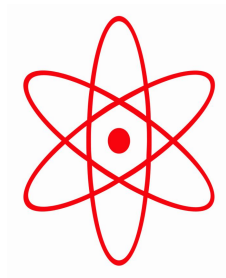


НПО УЧЕБНОЙ ТЕХНИКИ «ТУЛАНАУЧПРИБОР»

МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО ПО ВЫПОЛНЕНИЮ
ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ



ФКЛ-6

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЗОНАНСНОГО ПОТЕНЦИАЛА АТОМА
ИНЕРТНОГО ГАЗА (РТУТИ). ОПЫТ ФРАНКА И ГЕРЦА.**

Тула, 2007 г

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЗОНАНСНОГО ПОТЕНЦИАЛА АТОМА ИНЕРТНОГО ГАЗА (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 ω 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 изобилии 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:

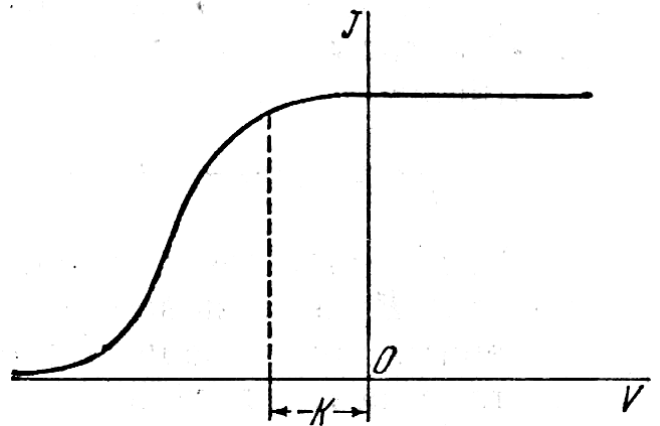


Рис. 1 Вольтамперная характеристика трубки с горячим катодом.

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.

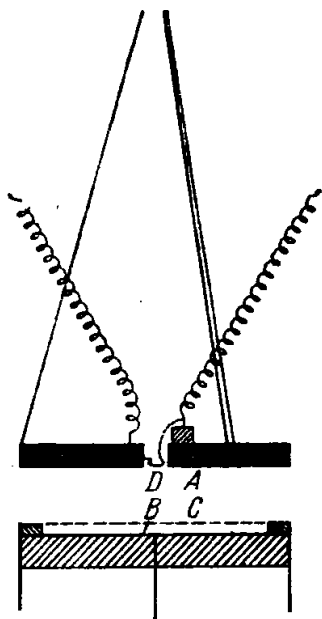


Рис. 2

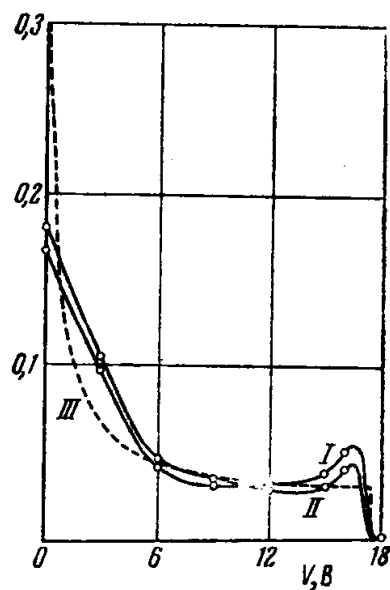


Рис. 3

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.

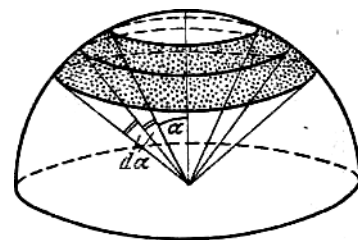


Рис. 4.

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 α , 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.е. 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

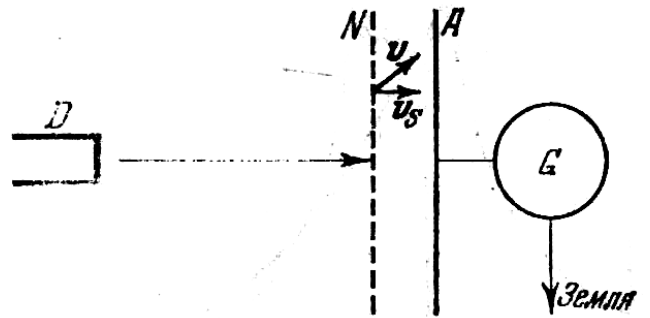


Рис. 5 Схема метода задерживающего потенциала.

(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.

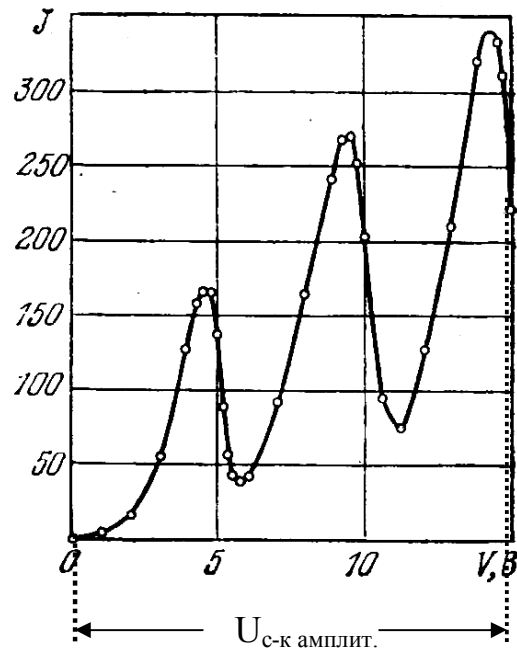


Рис. 6

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_I будет запас энергии «невозбужденного» атома ртути, то следующее возможное значение энергии атома будет $E_I + 4,9$ 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, аргона — 11,6 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 возбуждения. Эти более высокие ступени возбуждения 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.

Характеристика задержки.

Характеристика задержки. Вольтамперная характеристика задержки – это зависимость $i_a = f(V_z)$ анодного тока от задерживающего потенциала при заданном значении ускоряющего напряжения V_y (V_y выполняет роль параметра).

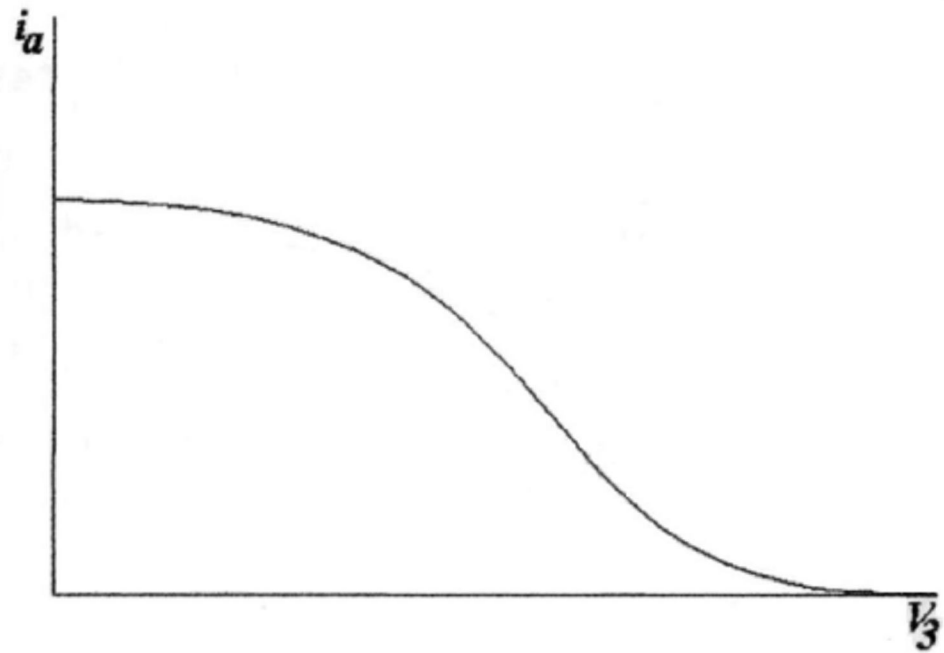
В случае, когда значение ускоряющего напряжения меньше резонансного ($V_y < V_p$), неупругих соударений электронов с атомами в лампе не происходит, поэтому характеристика задержки такой лампы похожа на характеристику задержки вакуумной лампы (рис. 7а).

Если же $V_y > V_p$, то появляется дополнительная ступенька, соответствующая уменьшению анодного тока (рис. 7б). Этот факт нетрудно объяснить. В результате неупругих столкновений вблизи сетки появляются две группы электронов: быстрые, не испытавшие неупругих соударений, и медленные, которые отдали свою кинетическую энергию атомам.

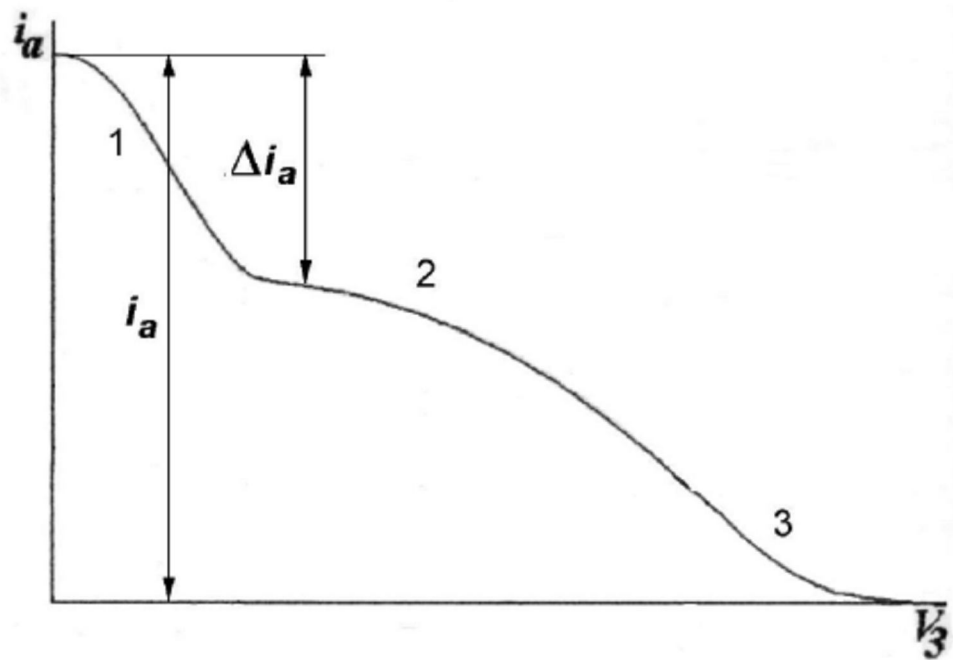
При $V_z = 0$ В все электроны достигнут анода и анодный ток i_a будет пропорционален их числу. При постепенном увеличении задерживающего напряжения все большая часть медленных электронов возвращается на сетку (рис. 7б, участок кривой 1). Плавный спад кривой здесь также обусловлен разбросом электронов по скоростям.

Начиная с некоторого значения задерживающего потенциала все медленные электроны попадают на сетку, а задерживающего напряжения еще не хватает, чтобы вернуть на сетку быстрые электроны, в результате чего на вольтамперной характеристике появляется участок, где анодный ток практически не меняется (рис. 7б, участок кривой 2). Очевидно, что разность токов Δi_a пропорциональна концентрации только тех электронов, которые испытали неупругие соударения с атомами.

При дальнейшем увеличении задерживающего поля начинают задерживаться быстрые электроны и анодный ток плавно уменьшается до нуля (рис. 7б, участок кривой 3).



а



б

Рис. 7. Зависимости анодного тока от задерживающего потенциала для разных значений ускоряющего потенциала: а) $V_y < V_p$; б) $V_y > V_p$

Эффективное сечение неупругих столкновений. Любые взаимодействия частиц имеет определенную вероятность. Их количественной характеристикой является **эффективное сечение** процесса, физический смысл которого заключается в следующем: для осуществления с определенной вероятностью взаимодействия между электроном и атомом обе частицы должны сблизиться на некоторое

«прицельное» расстояние r . Тогда площадь круга радиуса r будет называться эффективным сечением соударения или вообще взаимодействия.

Математически сечение процесса σ можно определить следующим образом:

$$\sigma(W_e) = 2\pi \int_0^{\infty} P(W_e, r) r dr, \quad (11.1)$$

где $P(W_e, r)$ - вероятность осуществления этого процесса в случае, когда налетающий электрон имеет кинетическую энергию W_e и прицельное расстояние r .

Результаты измерения задерживающей характеристики в опыте Франка и Герца позволяют оценить эффективное сечение неупругих соударений, так как здесь измеряется полный анодный ток i_a и его часть Δi_a , обусловленная только медленными электронами.

Выведем выражение для определения эффективного сечения σ через измеряемые параметра опыта.

Анодный ток можно определить как $i_a = jS$, где j - плотность тока, S - площадь анода.

Так как $j = en \langle v \rangle$, то

$$i_a = en \langle v \rangle S, \quad (11.2)$$

где e - заряд электрона, n - концентрация электронов, $\langle v \rangle$ - средняя скорость электронов при данном ускоряющем напряжении V_y .

Согласно теории столкновений скорость процесса, т.е. изменение числа электронов в единицу времени, пропорциональна концентрациям соударяющихся частиц (n электронов и N атомов) и вероятности данного процесса P :

$$\frac{dn}{dt} = PnN, \quad (11.3)$$

где вероятность неупругих столкновений $P = \sigma \langle v \rangle$. В последнем выражении σ - искомая величина, равная эффективному сечению неупругих соударений электронов с атомами.

Тогда

$$\frac{dn}{dt} = \sigma \langle v \rangle nN. \quad (11.4)$$

Запишем число электронов Δn , испытавших неупругие столкновения за время Δt :

$$\Delta n = \frac{dn}{dt} \Delta t = \sigma \langle v \rangle nN \Delta t. \quad (11.5)$$

Очевидно что $\Delta t \approx \frac{l}{\langle v \rangle}$, где l – расстояние катод-сетка газонаполненного триода. Тогда:

$$\Delta n = \sigma n N l. \quad (11.6)$$

С другой стороны, из соотношения (11.2) следует:

$$\Delta n = \frac{\Delta i_a}{e \langle v \rangle S}. \quad (11.7)$$

Тогда, используя соотношения (11.2), (11.6), (11.7), получим:

$$\sigma = \frac{\Delta n}{n N l} = \frac{\Delta i_a}{e \langle v \rangle S n N l} = \frac{\Delta i_a}{i_a N l}. \quad (11.8)$$

Для расчета концентрации атомов N используется известное соотношение $p = N k T$, где p – давление газа, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана. Тогда окончательно имеем оценочную формулу для σ :

$$\sigma = \frac{\Delta i_a k T}{i_a l p}. \quad (11.9)$$

Газонаполненный триод.

Для демонстрации опыта Франка и Герца в вакуумную трехэлектродную лампу необходимо добавить немного атомарного газа (Франк и Герц использовали пары ртути) до давления от нескольких Паскаль до десятков Паскаль.

В качестве такой лампы можно использовать ртутную лампу (в колбе лампы находится капля ртути), нагретую до определенной температуры либо тиратрон, наполненный инертным газом.

В этом случае электроны, испускаемые катодом и разгоняемые ускоряющим напряжением V_y между катодом и сеткой, начнут сталкиваться с атомами ртути либо инертного газа.

На вольтамперной характеристике такой лампы (рис. 8) в отличие от вакуумной лампы можно видеть ряд максимумов и минимумов, являющихся следствием неупругих столкновений электронов с атомами газа.

Разберем подробнее явления, происходящие в газонаполненной лампе.

До тех пор, пока энергия разгоняемых ускоряющим полем катод/сетка электронов не достигнет значения $e V_{PE3} = E_2 - E_1$, в объеме катод-сетка возможны только упругие соударения электронов с атомами. Поскольку масса электрона m намного меньше массы атома M , то передача кинетической энергии от электрона к атому очень мала:

$$\Delta E \approx E_{\text{кин}} m_e / M \approx 10^{-4} E_{\text{кин}}. \quad (12.1)$$

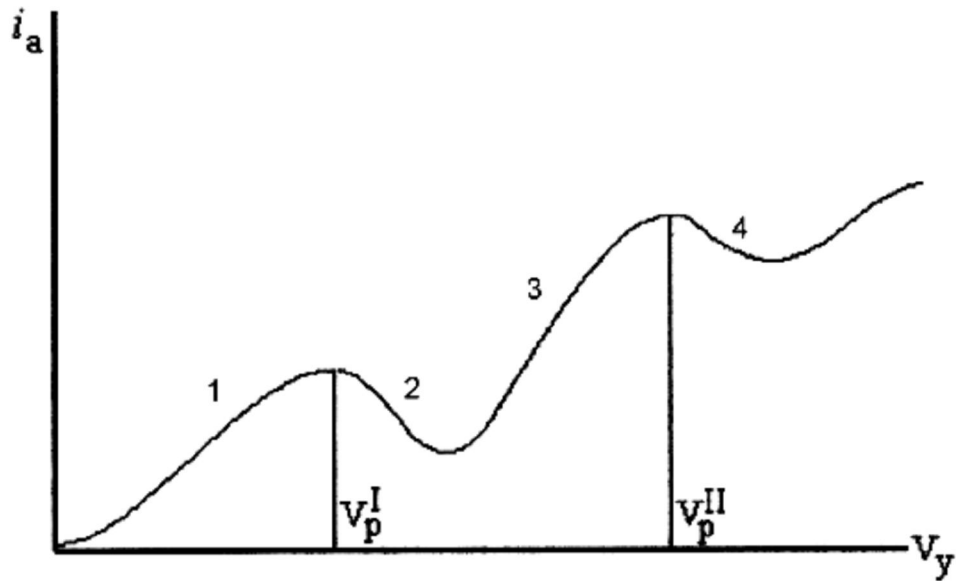


Рис. 8 Зависимость анодного тока газонаполненной лампы от ускоряющей разности потенциалов V_y (катод/сетка) при небольшой задерживающей разности потенциалов V_3 (сетка/анод). V_p - резонансный потенциал

Хотя при каждом столкновении электрон теряет первоначальное направление движения, в среднем электронный поток направлен вдоль электрического поля и энергия электронов определяется только разностью потенциалов катод – сетка.

Практически не теряя до сетки своей кинетической энергии, электроны преодолевают задерживающий потенциал сетка – анод, и анодный ток растет с увеличением V_y так же, как в вакуумном триоде (рис. 8, участок кривой 1).

При дальнейшем увеличении V_y электронный поток в промежутке катод – сетка увеличивает свою кинетическую энергию, и как только кинетическая энергия электронов $E_{кин}$ достигнет значения $eV_{рез}$ атома газа, могут возникнуть неупругие столкновения, в результате которых энергия электронов передается атомам, электроны замедляют свое движение и оседают на сетке. В результате анодный ток уменьшается (рис. 8, участок кривой 2). На рис. 10а заштрихованная область I представляет ту область лампы, где в любой ее точке при условии $E_{кин} \approx E_2 - E_1$ могут произойти неупругие соударения электронов с

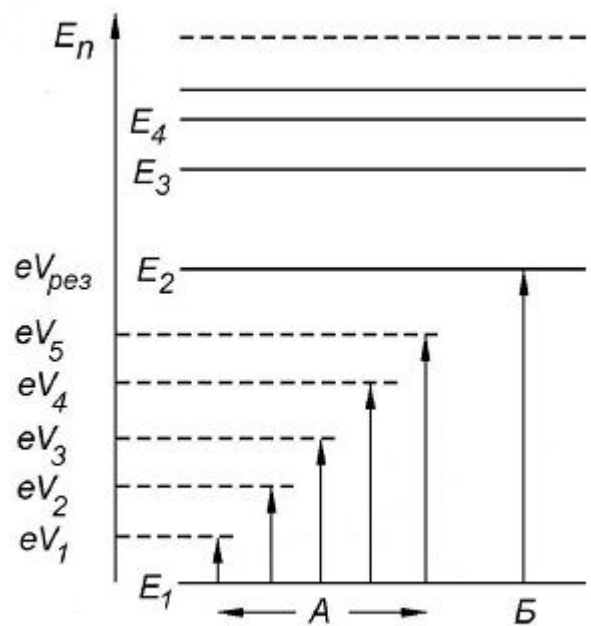


Рис. 9 Схема уровней энергии атома

атомами.

Не испытывая внешних воздействий, атом всегда находится в состоянии с наименьшей энергией E_1 . Минимальная энергия, которую может поглотить атом при столкновении с электроном, равна $E_2 - E_1$. Уровень E_2 обычно называют резонансным. Пока кинетическая энергия электрона, разгоняемого электрическим полем, не достигнет значения $eV_{PE3} = E_2 - E_1$, атом эту энергию поглотить не может (переходы А на рис. 9). Лишь разогнавшись до энергии eV_{PE3} , электрон сможет передать ее атому (переход Б на рис. 9). Поэтому соударения движущегося свободного электрона с атомом могут быть лишь двух типов: упругие и неупругие.

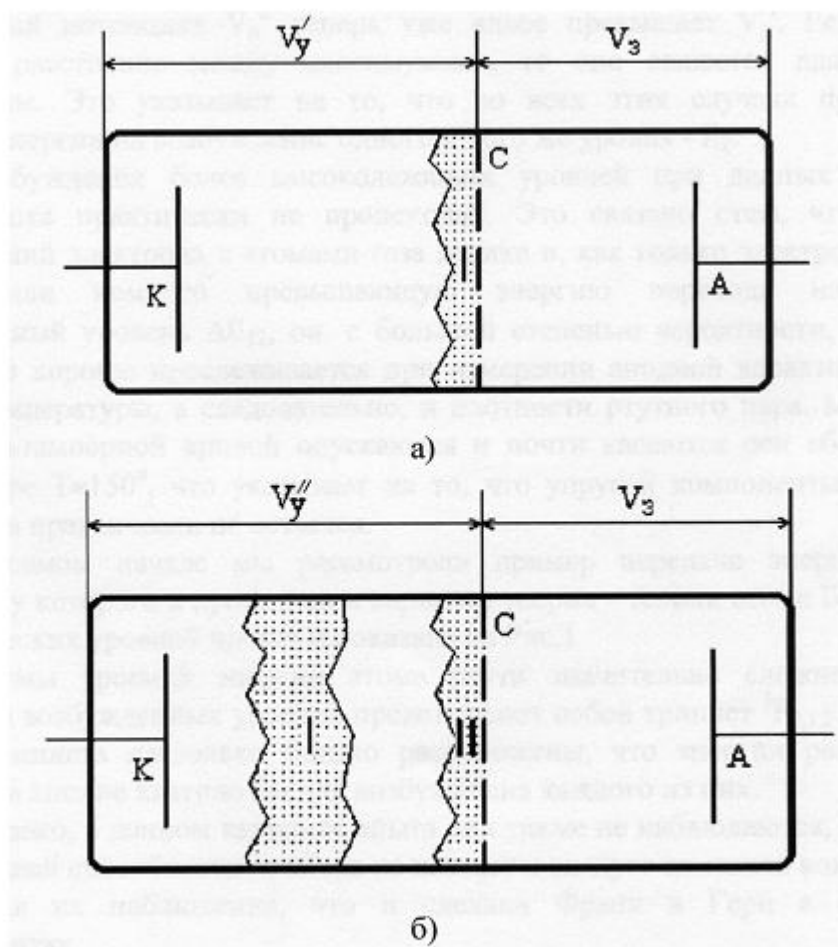


Рис. 10 Области неупругих столкновений электронов с атомами ртути.
а) область I - $eV_y' = \Delta E_{12}$; б) области I и II - $eV_y'' = 2\Delta E_{12}$

Таким образом, первый максимум на вольтамперной характеристике соответствует энергии электронов, при которой возникают их неупругие столкновения с атомами ртути (инертного газа). Потенциал V_p^I , соответствующий максимуму на вольтамперной характеристике, называется резонансным.

При дальнейшем увеличении ускоряющего поля электроны быстрее наберут необходимую для неупругих столкновений энергию, и заштрихованная область сдвинется влево ближе к катоду. Электроны,

испытывавшие неупругие соударения с атомами ртути, на оставшемся до сетки пути снова смогут набрать энергию, достаточную для преодоления задерживающего потенциала, и дадут вклад в анодный ток, который вновь начнет расти с увеличением V_y (рис. 8, участок кривой 3).

При дальнейшем увеличении ускоряющего напряжения, когда область неупругих соударений сместится приблизительно на середину расстояния между катодом и сеткой (заштрихованная область I на рис. 10б), оставшегося расстояния до сетки будет достаточно, чтобы электроны могли набрать энергию для нового неупругого соударения с атомами вблизи сетки (область II на рис. 10б) и, испытав его, попасть на сетку. На вольтамперной характеристике появится второй максимум, при этом резонансный потенциал V_p^{II} , соответствующий этому максимуму, вдвое превышает V_p^I . Потеря электронами энергии при соударениях с атомами и появление медленных электронов, которые не могут преодолеть задерживающего потенциала сетка – анод, отражается в уменьшении анодного тока (рис. 8, участок кривой 4).

Второй максимум вольтамперной характеристики выражен менее четко по сравнению с первым, так как вероятность соударения одного и того же электрона с двумя атомами значительно меньше, чем вероятность однократного соударения. Третий и последующие максимумы соответствуют трехкратному и т.д. соударениям и могут наблюдаться при очень тщательном подборе давления газа и геометрии лампы. Франку и Герцу удавалось наблюдать пять максимумов в парах ртути.

Если измерить расстояние между максимумами на вольтамперной характеристике лампы, то окажется, что оно составляет одну и ту же величину, равную $V_{рез}$, что соответствует энергии $\Delta E_{12} = E_2 - E_1$ возбуждения уровня E_2 . Возбуждение более высоко лежащих уровней при данных условиях эксперимента не происходит.

Это связано с тем, что частота соударений электрона с атомами газа велика, и как только электрон наберет энергию, равную или чуть превышающую энергию перехода ΔE_{12} на первый возбужденный уровень, он с большей вероятностью отдает ее атому. Это хорошо прослеживается при измерении анодной характеристики с ростом температуры, а следовательно, и плотности паров ртути. Минимумы вольтамперной характеристики опускаются и почти достигают оси абсцисс при температуре $T = 150^\circ\text{C}$, что указывает на то, что упругого компонента в потоке электронов практически не остается.

Нужно заметить, что схема уровней энергии атома ртути значительно сложнее по сравнению с атомом водородом. Самые нижние из возбужденных уровней представляют собой триплетное состояние $^3P_{0,1,2}$. При этом уровни триплета расположены настолько близко, что энергии разогнавшихся электронов вполне хватило бы для возбуждения каждого из них. Однако в данном варианте опыта разрешающая способность прибора не позволяла их наблюдать; для их наблюдения необходимо изменить конструкцию лампы,

что и сделали Франк и Герц в последних экспериментах.

В экспериментально полученных вольтамперных зависимостях значение энергии электронов, соответствующее положению первого максимума, отличается от резонансного. Это обусловлено тем, что начало вольтамперной характеристики может не совпадает с началом координат в основном из-за контактной разности потенциалов между изготовленных из разных материалов катодом и сеткой, которая может достигать нескольких вольт. Поэтому резонансный потенциал определяется по расстоянию между соседними максимумами на вольтамперной характеристике (см. рис. 8):

$$V_{\text{РЕЗ}} = V_{\text{Р}}^{\text{II}} - V_{\text{Р}}^{\text{I}}. \quad (12.2)$$

В опытах Франка и Герца с лампой, наполненной парами ртути, расстояние между максимумами составляло величину, равную 4,9 эВ. Таким образом, при достижении электроном энергии $E_{\text{кин}} \geq 4,9$ эВ происходит неупругое соударение электрона с атомом ртути, при этом последнему передается энергия, необходимая для возбуждения атома в первое возбужденное состояние с энергией E_2 .

Атом находится в этом состоянии достаточно короткое время ($\sim 10^{-8}$ сек), после чего спонтанно переходит в невозбужденное состояние с испусканием фотона с энергией $h\nu = E_2 - E_1$. В ультрафиолетовой области спектра должна появиться спектральная линия с длиной волны

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{hc}{E_2 - E_1} = 253,6 \text{ нм}, \quad (12.3)$$

что позже и наблюдалось в опыте Франка и Герца.



Лампа газонаполненная трехэлектродная ПМИ-2 для опыта Франка и Герца.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.

Приборы и оборудование.

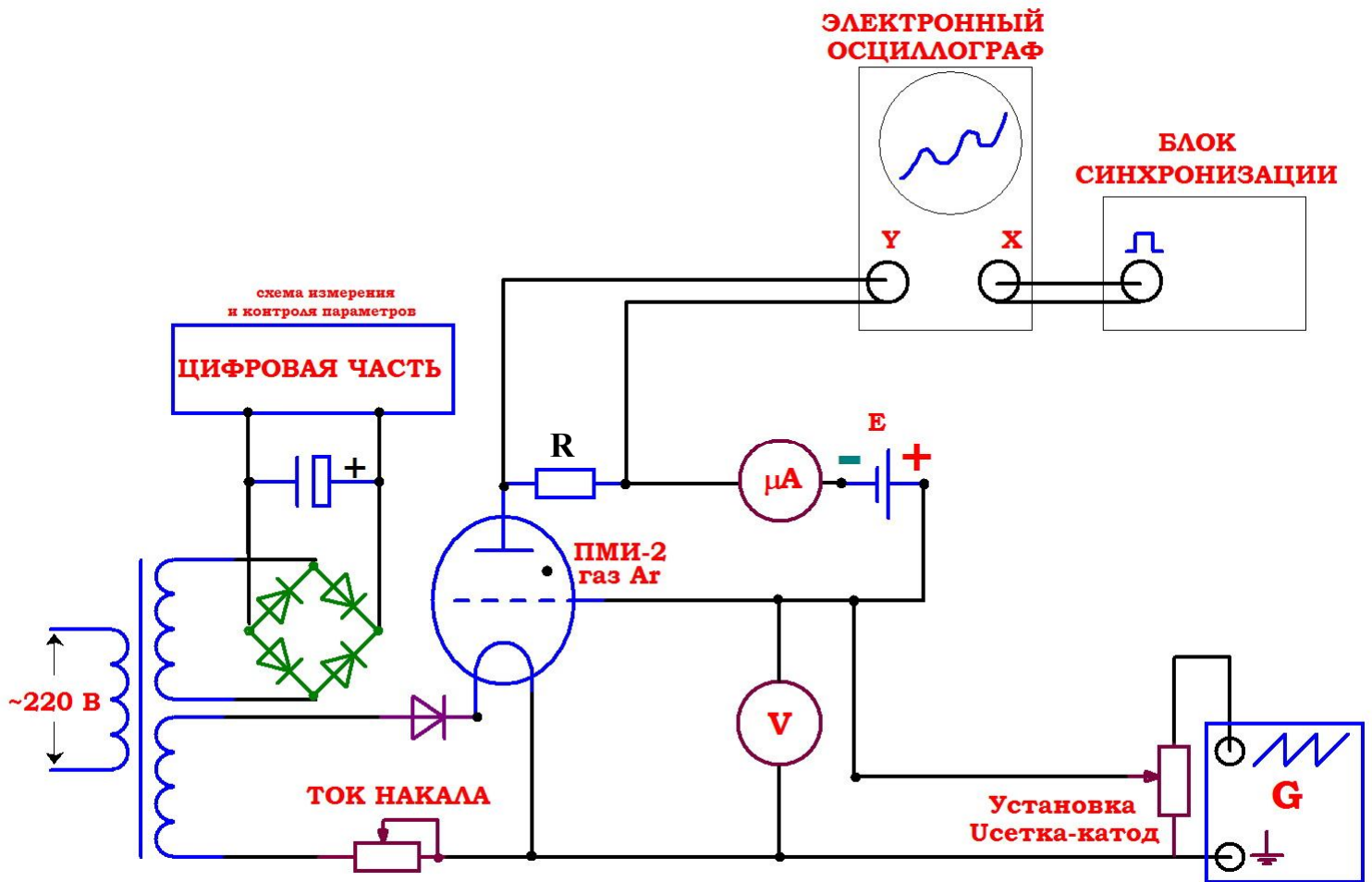


Рис. 11. Блок-схема экспериментальной установки ФКЛ-6 для проведения опыта Франка и Герца

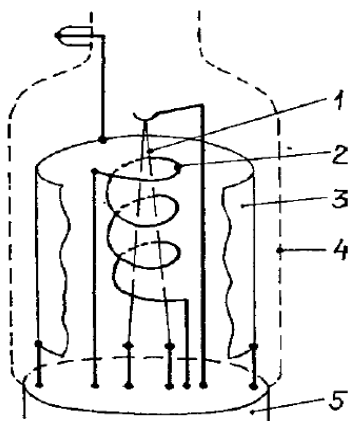


Рис. 12 Устройство лампы ПМИ-2 :

1. Нить накала.
2. Сетка.
3. Анод.
4. Стекланный баллон.

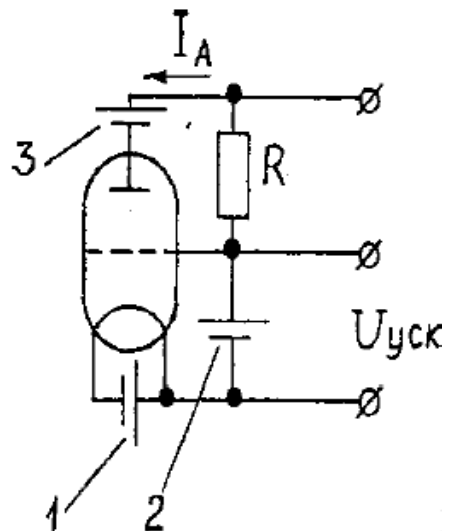


Рис. 13. Электрическая схема включения лампы ПМИ-2 и упрощенная схема опыта Франка и Герца:

1. Источник питания накала.
2. Источник питания ускоряющего напряжения $U_{\text{уск}}$.
3. Источник питания напряжения задержки $U_{\text{зад}}$.
- I_A – анодный ток.

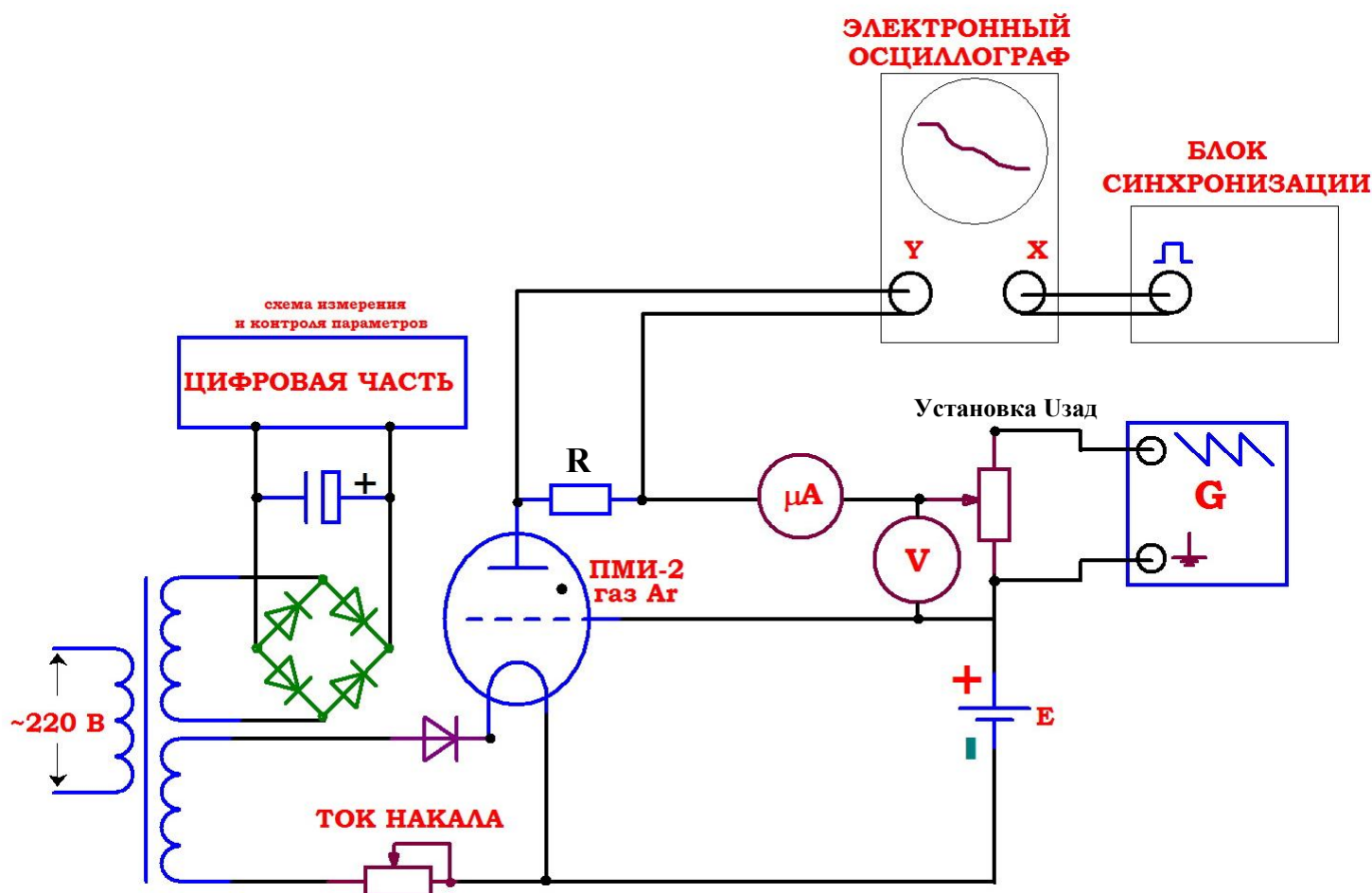


Рис. 14. Блок-схема экспериментальной установки ФКЛ-6 для проведения опыта по снятию ВАХ задержки триода и оценки сечения неупругого рассеяния.

Работа выполняется с использованием лабораторного комплекса ФКЛ-6. Основной частью комплекса является газонаполненный триод с инертным газом при низком давлении.

В лабораторной установке используется серийная трехэлектродная лампа ТГ1-0.1/0.3 (тиратрон, заполненный инертным газом аргоном) либо ПМИ-2 (лампа, используемая в ионизационном манометре). Устройство лампы приведено на рис. 12. Катод и накал лампы соединен и представляет собой единый электрод. Данная конструкция позволяет избежать погрешности, связанной с возможностью появлений различных явлений между катодом и нитью накала.

Экспериментальная установка позволяет произвести снятие анодной характеристики триода в зависимости от ускоряющего напряжения $U_{\text{сетка-катод}}$ (характеристика опыта Франка и Герца) и характеристики задержки $i_a = f(V_z)$ анодного тока от задерживающего потенциала при заданном значении ускоряющего напряжения, установленной больше резонансного потенциала $V_y > V_{PE3}$, $V_y = 20$ В.

Характеристики снимаются при двух температурах нити накала лампы $T \sim 600$ К и $T \sim 1200$ К.

Блок-схема экспериментальной установки для получения ВАХ Франка

и Герца изображена на рис.11. Модуль развёртки G состоит из нескольких блоков, основная задача которых в выработке пилообразного напряжения нужной частоты, формы и длительности. Форма импульсов представлена на рис. 15. Блок синхронизации вырабатывает синхроимпульсы для стабилизации изображения характеристики на экране осциллографа. Синхроимпульсы подаются на вход X осциллографа, при этом осциллограф должен быть переведен в режим синхронизации внешним сигналом.

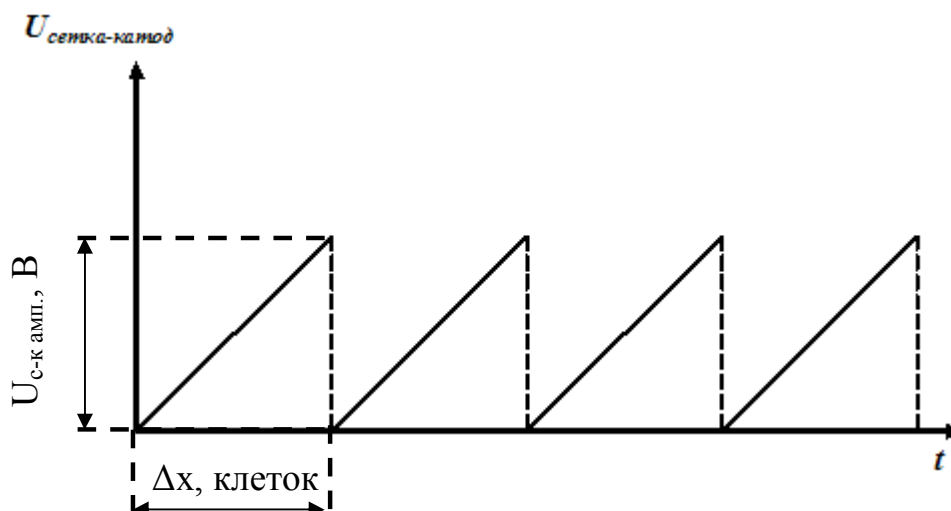


Рис. 15. Форма сигнала, подаваемого на промежуток сетка-катод триода.

Напряжение пилообразной формы подаётся на промежуток сетка-катод триода. Потенциал сетки линейно возрастает относительно неизменного потенциала катода. Таким образом, между сеткой и катодом лампы создаётся 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 ($U_{\text{с-к}} \sim kt$), то развертка по времени есть развёртка по напряжению $U_{\text{сетка-катод}}$. С помощью источника запирающего напряжения E между сеткой и анодом лампы создан запирающий потенциал. Питание всех устройств осуществляется от стабилизированного источника питания.

С резистора R 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, рис. 8.

Переменным резистором «УСТАНОВКА $U_{\text{с-к}}$ / УСТАНОВКА $U_{\text{зад}}$ » имеется возможность регулировать значение ускоряющего напряжения подаваемого на сетку-катод лампы в эксперименте Франка и Герца и задерживающего напряжение в эксперименте по оценки сечения неупругого рассеяния.

Цифровой измерительный прибор, собранный на базе ЖКД LCD дисплея и микроконтроллера служит для измерения **амплитудного значения** этих напряжений.

Таким образом, вольтметр фактически показывает напряжение в крайней правой точке вольтамперных характеристик рис. 16.

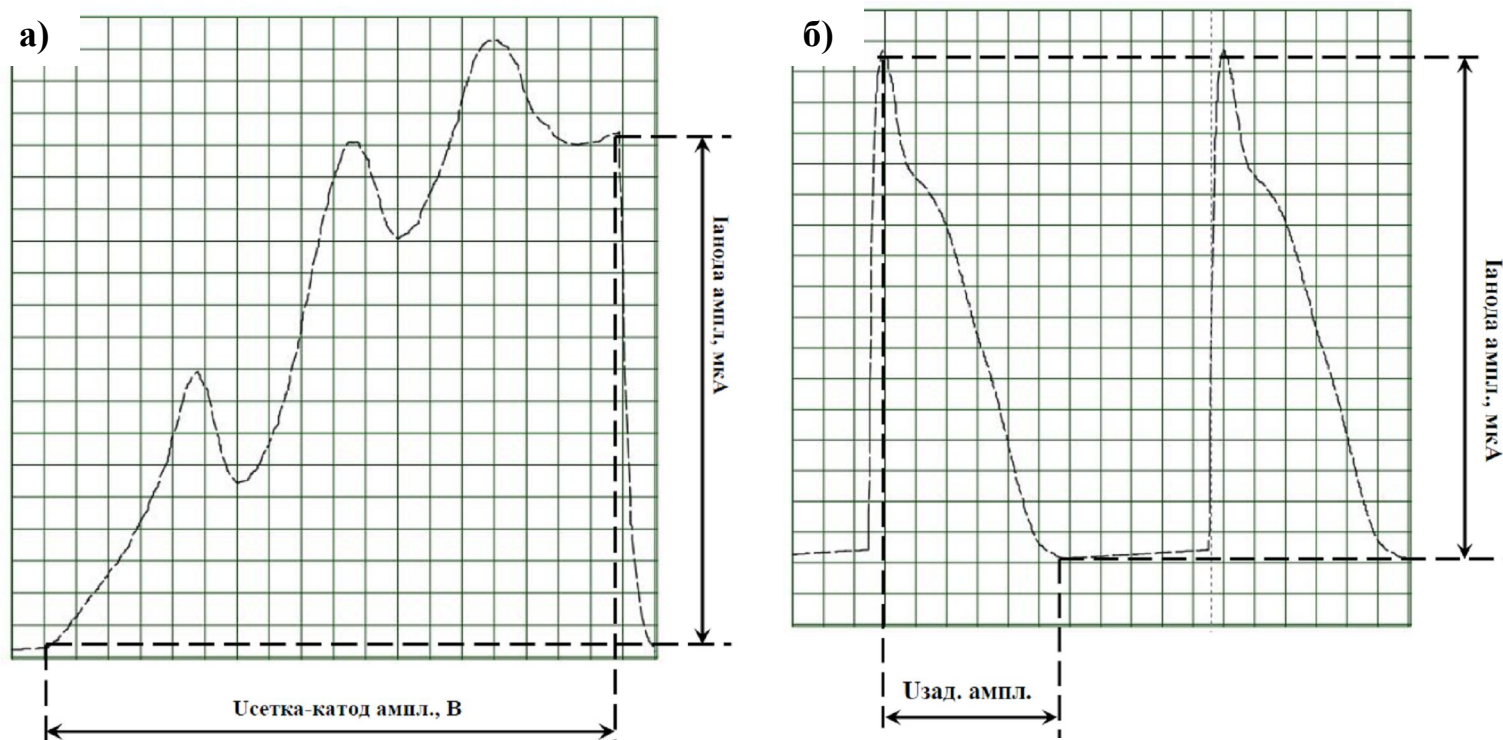


Рис. 16. Вольтамперные характеристики, получаемые на учебной установке ФКЛ-6. а) характеристика Франка и Герца б) характеристика задержки.

Как было сказано выше, измерение амплитудного значения напряжения и амплитудного значения тока при данном напряжении производится при помощи встроенного цифрового комбинированного «ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА» (вольтметр, микроамперметр). Таким образом, в данной модификации прибора микроамперметр, аналогично вольтметру, показывает значение тока в крайней правой точке ВАХ.

Через каждый период следования пилообразных импульсов, вольтамперная характеристика повторяется (рис. 16 б).

Многофункциональная кнопка «УПРАВЛЕНИЕ» служит для:

1. изменение температуры нити накала лампы: кратковременное ~0,5 секунды одиночное нажатие;
2. входа в режим снятия ВАХ триода для данной температуры: удерживание кнопки нажатой в течение ~2 секунд;
3. в режиме снятия ВАХ переключение между снятием ВАХ опыта Франка и Герца и характеристикой задержки (переключение между схемами рис. 11 – рис. 14): кратковременное ~0,5 секунды одиночное нажатие. Перед переключением схем необходимо выключать генератор нажатием кнопки «ГЕНЕРАТОР ВКЛ/ВЫКЛ»;
4. возвращение в меню изменения температуры накала из меню переключения опытов: удерживание кнопки нажатой в течение ~2

секунд. При срабатывании кнопки на дисплей выводится сообщение «WAITING».

Кнопка «ГЕНЕРАТОР ВКЛ/ВЫКЛ» работает только в режиме снятия ВАХ триода, запускает пилообразный генератор развертки, подключает нить накала, сетку и анод лампы в схему. При запуске генератора на экране осциллографа должна отображаться характеристика Франка и Герца либо характеристика задержки в зависимости от выбранной в п. 3 схемы. Перед переключением схем необходимо выключать генератор нажатием кнопки «ГЕНЕРАТОР ВКЛ/ВЫКЛ».

Ручка УСТАНОВКА $U_{с-к}$ / УСТАНОВКА $U_{зад}$ служит для плавной регулировки ускоряющего напряжения сетка-катод в опыте Франка и Герца (0...40 В) и задерживающего потенциала анода в режиме снятия характеристики задержки (0...20 В).

Величина запирающего напряжения в опыте Франка и Герца подобрана наилучшим образом и устанавливается автоматически в пределе $\sim 1 \dots 2$ Вольт.

Для проведения эксперимента по оценки сечения неупругого рассеяния схема рис. 11 должна быть видоизменена согласно рис. 14. При этом в промежутке сетка – катод лампы устанавливается постоянное ускоряющее напряжение 20 В от источника постоянного напряжения E , а пилообразный генератор развертки подключается в промежуток сетка – анод триода и вырабатывает отрицательные относительно сетки пилообразные импульсы в пределе от 0 ... -20 В. Таким образом, потенциал анода линейно уменьшается относительно потенциала сетки. С резистора R снимается сигнал, пропорциональный анодному току $I_{анод}$ лампы. В результате получаем на экране осциллографа вольт-амперную характеристику задержки лампы, аналогичную рис. 7б, рис. 16б.

Осциллографический метод исследования нагляден, однако следует заметить, что получаемые результаты скорее являются оценочными, погрешность опыта может достигать 10-12 %.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Перед выполнением работы рекомендуется ознакомиться с работой электронного осциллографа.

Блок – схема включения модуля совместно с осциллографом приведена на рис.17.

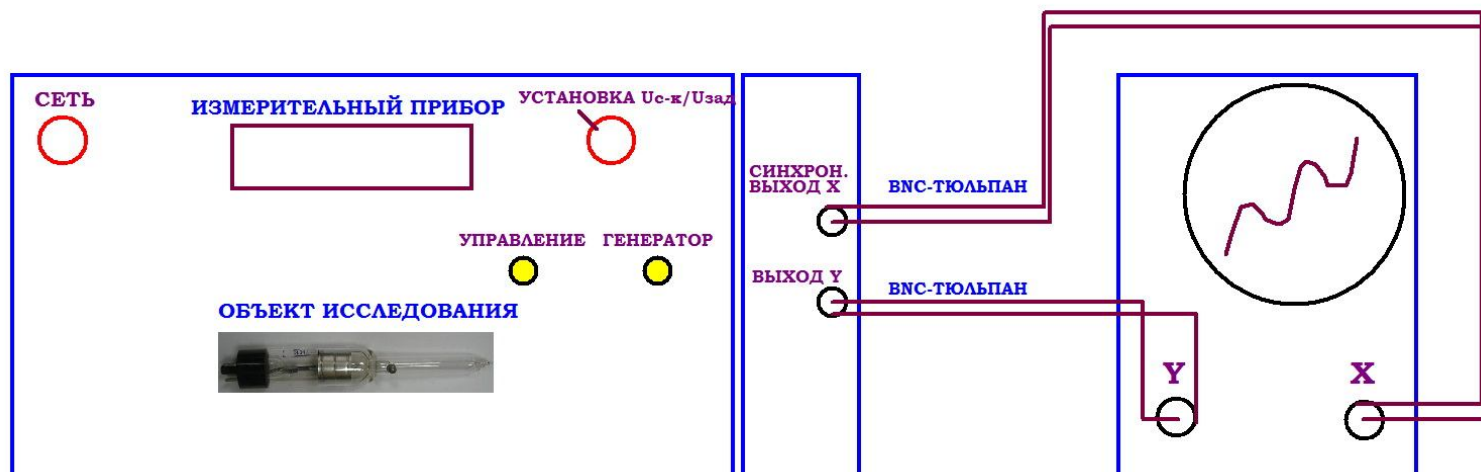


Рис. 17. Блок- схема включения лабораторного модуля ФКЛ-6.

1. Перед включением установки в сеть проверить целостность соединительных и сетевых проводов.
2. Ознакомиться с блок-схемой включения модуля ФКЛ-6, приведенной на рис. 17. Подключить выход «ВЫХОД Y - СИГНАЛ» учебной установки ко входу Y осциллографа, выход «ВЫХОД X - СИНХРОНИЗАЦИЯ» ко входу X внешней синхронизации электронного осциллографа.
3. Включить осциллограф и лабораторную установку в сеть напряжением ~220 В проводами евро – стандарта из комплекта.
4. Поставить кнопку «СЕТЬ» на панели осциллографа во включенное положение. При этом должна загореться сигнальная лампа на панели осциллографа.
5. Поставить переключатель «СЕТЬ» на панели модуля ФКЛ-6 в положение «ВКЛ», при этом должен загореться сигнальный светодиод «СЕТЬ» на панели модуля. Дать прогреться всем приборам в течение не менее 3 минут.
6. Кратковременно ~0,5 секунды одиночно нажимая кнопку «УПРАВЛЕНИЕ» установить температуру нити накала триода $T=600$ К. Текущее значение температуры отображается на ЖКД LCD дисплее.
7. Удерживая нажатой в течение ~ 2 секунд кнопку «УПРАВЛЕНИЕ», войти в режим снятия ВАХ триода для данной температуры.
8. В режиме снятия ВАХ триода, кратковременно ~0,5 секунды одиночно нажимая кнопку «УПРАВЛЕНИЕ», выбрать режим снятия ВАХ Франка и Герца «FRANK-HERTZ».
9. Запустить пилообразный генератор кратковременно ~ 0,5 секунд нажав кнопку «ГЕНЕРАТОР ВКЛ / ВЫКЛ».

10. Плавным вращением ручки «**УСТАНОВКА $U_{с-к}$ / УСТАНОВКА $U_{зад}$** », установить максимально возможное значение ускоряющего напряжения для того, чтобы получить вольт - амперную характеристику с максимально возможным количеством экстремумов.
11. Комбинированный цифровой измерительный прибор отградуирован таким образом, что показывает напряжение $U_{с-к \text{ ампл}}$ в крайней правой точке характеристики тиратрона, которое совпадает с амплитудным значением пилообразного напряжения с выхода генератора и значение анодного тока $I_{анода}$ также в крайней правой точке ВАХ.
12. Установить ручки на панели осциллографа таким образом, чтобы обеспечить развертку всей вольт-амперной характеристики лампы наилучшим образом. Рекомендуемые положения ручек: **.1** либо **.2 VOLTS/DIV (ВОЛЬТ/ДЕЛ)**; **0.5** либо **1 mS TIME/DIV (ВРЕМЯ/ДЕЛ)**; переключатель «**Y – LINE - EXT**» слева от входа X в положение «**EXT**» (синхронизация внешним сигналом); ручка **LEVEL (УРОВЕНЬ)** – крайнее левое положение против часовой стрелки; переключатель **SLOPE** в верхнее либо среднее положение; способ развертки «**AUTO-NORM-TV**» в положение «**NORM**» («**ЖДУЩАЯ**») либо «**AUTO**» («**АВТОМАТИЧЕСКАЯ**»), переключатель **AC-GND-DC** в положение **DC**.
13. Вращением ручек **POSITION X** («**СМЕЩЕНИЕ ПО ОСИ X**»), «**POSITION Y**» («**СМЕЩЕНИЕ ПО ОСИ Y**»), а также ручек «**VOLT VAR.**» и «**TIME VAR.**» («**ПЛАВНО**») для осей X и Y, находящихся на передней панели осциллографа, расположить картинку так чтобы вся вольт-амперная характеристика умещалась на экране. Затем, вращением ручки «**СМЕЩЕНИЕ ПО ОСИ X**» и ручкой «**TIME VAR.**» («**ПЛАВНО**») для оси X расположить характеристику таким образом, чтобы расстояние между пиками было равно целому числу клеток, например 2 клетки (для удобства измерения). Для стабилизации характеристики следует вращать ручку **LEVEL** осциллографа.
14. Срисовать вольт-амперную характеристику с экрана осциллографа в натуральную величину на миллиметровую бумагу.
15. Определить расстояние $\Delta x_{n \text{ } n+1}$, выраженное в клетках (количество клеток, естественно, может быть дробным), между 1-ым и 2-ым; 2-ым и 3-им пиками, т.е. несколькими соседними максимумами а также между соседними минимумами (обычно отчетливо наблюдается не более 3 экстремумов).
16. Далее необходимо определить коэффициент чувствительности оси X осциллографа.
17. Вращением ручки «**УСТАНОВКА $U_{с-к}$ / УСТАНОВКА $U_{зад}$** » установить рекомендуемое для калибровки максимально возможное амплитудное значение напряжения с выхода пилообразного генератора порядка 40 Вольт.
18. Так как цифровой вольтметр на ЖКД индикаторе показывает значение напряжения в крайней правой точки характеристики, то для

калибровки оси X достаточно воспользоваться следующей формулой:

$$K_{x \text{ чувств.}} = \frac{\Delta U_{c-k \text{ ампл.}}}{\Delta x}$$

где $\Delta U_{c-k \text{ ампл.}}$ - установленная амплитуда напряжения с выхода генератора по показаниям измерительного прибора, Δx - количество клеток по оси x, занимаемое характеристикой при данном значении напряжения $U_{c-k \text{ ампл.}}$

19. Расстояние между пиками, определенное в п. 15 и выраженное в количестве клеток, перевести в значение потенциала $\Delta\phi$ по формуле:

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

20. Все данные занести в таблицу:

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

№ опыта			Значение резонансного потенциала $\Delta\phi$ (Δx_{nn+1} в вольтах), В.	Среднее значение $\langle\Delta\phi\rangle$, В
1.	Расстояние $\Delta x_{n \text{ } n+1}$ между соседними пиками, в клетках.	...	...	...
		...	...	
2.	Расстояние $\Delta x_{n \text{ } n+1}$ между соседними минимумами, в клетках.	...	...	
		...	...	

21. Вращая ручку «УСТАНОВКА U_{c-k} / УСТАНОВКА $U_{\text{зад}}$ » и наблюдая за характеристикой на экране осциллографа, снять вольтамперную характеристику триода опыта Франка и Герца, записывая измеренные значения анодного тока $I_{\text{анода}}$ и значения ускоряющего напряжения $U_{\text{сетка-катод}}$. Особое внимание обратить на значение показаний цифрового вольтметра в точках максимумов и минимумов характеристики. При вращении ручки установки амплитуды с выхода пилообразного генератора «УСТАНОВКА U_{c-k} / УСТАНОВКА $U_{\text{зад}}$ », характеристика Франка и Герца триода, как и следует ожидать, будет «обрезаться» справа. При этом, так как цифровой вольтметр показывает амплитудное значение напряжения с выхода генератора (напряжение в крайней правой точке характеристики тиратрона), то, фактически, вращая ручку «УСТАНОВКА U_{c-k} / УСТАНОВКА $U_{\text{зад}}$ », можно определить значения напряжения промежутка «сетка-катод» лампы и тока анода в каждой точке характеристики.

22. Определить разность напряжений соответственно между соседними максимумами и минимумами в вольтах, сравнить полученные значения со значениями резонансного потенциала $\Delta\phi$ вычисленными согласно пп. 15-20 и рассчитать среднее значение $\langle\Delta\phi\rangle$, В.

23. Отключить генератор кратковременно ~0,5 секунды нажав кнопку

«ГЕНЕРАТОР ВКЛ / ВЫКЛ».

24. Кратковременно $\sim 0,5$ секунды нажав кнопку «УПРАВЛЕНИЕ» переключиться в режим снятия характеристики задержки. При этом на дисплее отображается автоматически установленное постоянное ускоряющее напряжение, подаваемое согласно схеме рис. 14 в промежуток сетка – катод лампы $U_{ск}=20$ В, а пилообразный генератор подключается к промежутку сетка – анод триода и выдаёт импульсы отрицательной полярности относительно сетки. При этом, так как цифровой вольтметр показывает амплитудное значение напряжения с выхода генератора (напряжение в крайней правой точке характеристики тиратрона), то, фактически, вращая ручку «УСТАНОВКА $U_{с-к}$ / УСТАНОВКА $U_{зад}$ », можно определить значения напряжения задержки промежутка «сетка-анод» лампы и тока анода в каждой точке характеристики задержки.
25. Поставив ручку УСТАНОВКА $U_{с-к}$ / УСТАНОВКА $U_{зад}$ в крайнее правое положение по часовой стрелке, запустить пилообразный генератор кратковременно $\sim 0,5$ секунд нажав кнопку «ГЕНЕРАТОР ВКЛ / ВЫКЛ». При этом на экране осциллографа должна отображаться характеристика задержки, т. е. зависимость $i_a=f(V_3)$ анодного тока от задерживающего потенциала при заданном значении ускоряющего напряжения $V_y=20$ Вольт. Характеристика должна иметь вид аналогичный рис. 7 б, 16 б. В силу технических особенностей применяемой схемы, начало задерживающей характеристики слева, отображаемое на экране осциллографа может иметь всплеск (пик) при $U_{зад} \sim 1$ В. Поэтому рекомендуется начинать измерения задерживающей характеристики с $U_{зад\text{ергки}} \sim 0,8$ Вольт.
26. Зарисовать задерживающую характеристику с экрана осциллографа по клеткам на миллиметровую бумагу.
27. Вращая ручку «УСТАНОВКА $U_{с-к}$ / УСТАНОВКА $U_{зад}$ » и наблюдая за характеристикой на экране осциллографа, снять вольтамперную характеристику задержки $i_a=f(V_3)$ триода. Особое внимание обратить на значения тока анода i_{a1} в начале характеристики при $U_{зад\text{ергки}} \sim 1$ Вольта и в начале излома участка 2 рис. 7 б i_{a2} . Определить разность токов $\Delta i_a = i_{a1} - i_{a2}$, которая пропорциональна концентрации только тех электронов, которые испытали неупругие соударения с атомами.
28. Оценить по формуле (11.9) сечение неупругого рассеяния σ электронов атомами инертного газа, наполняющего лампу. При оценке принять $l=3 \cdot 10^{-3}$ м – расстояние катод-сетка газонаполненного триода, давление внутри колбы при $T=600$ К принять равным $p \sim 5$ Па. Все расчёты производить в СИ.
29. Отключить генератор кратковременно $\sim 0,5$ секунды нажав кнопку «ГЕНЕРАТОР ВКЛ / ВЫКЛ».
30. Удерживая нажатой кнопку «УПРАВЛЕНИЕ» в течение ~ 2 секунд, вернуться в меню изменения температуры накала из меню

переключения опытов.

31. Кратковременно $\sim 0,5$ секунды одиночно нажимая кнопку «УПРАВЛЕНИЕ» установить температуру нити накала триода $T=1200$ К. Текущее значение температуры отображается на ЖКД LCD дисплее.
32. Удерживая нажатой в течение ~ 2 секунд кнопку «УПРАВЛЕНИЕ», войти в режим снятия ВАХ триода для данной температуры.
33. Повторить пп. 8 – 28. При оценке сечения неупругого рассеяния σ принять $l=3 \cdot 10^{-3}$ м – расстояние катод-сетка газонаполненного триода, а давление внутри колбы при $T=1200$ К принять равным $p \sim 17$ Па.
34. По результатам всех опытов для двух температур нити накала определить среднее значение резонансного потенциала $\langle \Delta \phi \rangle$, В и сравнить его с табличным значением для газа аргона, наполняющего лампу согласно таблице 1.
35. Сравнить полученные вами оценочные значения сечения неупругого рассеяния σ электронов атомами инертного газа с графиком рис. 18. При сравнении учесть, что электроны в опыте по снятию характеристики задержки ускоряются постоянным напряжением $U_{\text{уск}}=20$ Вольт, при этом соответственно обладая энергией $W=e \cdot U_{\text{уск}}$, поэтому на рисунке необходимо найти график для инертного газа, наполняющего лампу и соответствующую энергию электронов W в [эВ]. Полученное по таблице значение сечения рассеяния σ перевести в м^2 ($1 \text{ см}^2 = 10^{-4} \text{ м}^2$) и сравнить с рассчитанными экспериментальными значениями.
36. При возбуждении резонансной линии атома происходит последующее излучение с длиной волны λ , которую легко можно вычислить, используя закон сохранения энергии. Электрон, проходя ускоряющую разность потенциалов, набирает энергию $e\Delta\phi$, которую передаёт атому инертного газа (либо ртути в зависимости от наполнения лампы). Атом переходит в возбуждённое состояние, излучая длину волны λ . Таким образом:

$$h \cdot \frac{c}{\lambda} = e \cdot \langle \Delta \phi \rangle \quad (13.1)$$

где $h=6,63 \cdot 10^{-34}$ – постоянная Планка, $c=3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме, $e=1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – модуль заряда электрона.

37. Подсчитать длину волны λ , нм с помощью формулы (13.1).
38. По окончании работы поставить переключатель «СЕТЬ» на панели приборов в положение «ВЫКЛ» и отключить установку и осциллограф от сети.

ПОТЕНЦИАЛЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ГАЗОВ

Таблица 1

Газ	H ₂	He	Ne	Ar	Kr	Xe	Hg	Cs
$U_{\text{ВОЗБ}}, \text{ В}$	11,2	20,9	16,6	11,6	10,0	8,5	4,9	1,4

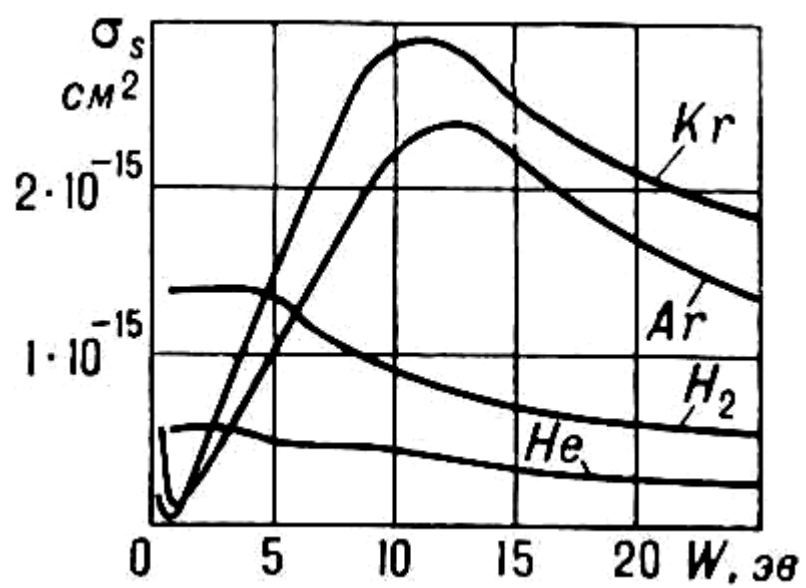


Рис. 18. Сечение неупругого рассеяния электронов различными газами при разных значениях энергии электронов $W = e \cdot U_{\text{ускоряющее}}$

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 $I_A(U_{\text{сетка-катод}})$ 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 ΔE_{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 ΔE_{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 - ΔE_{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 разделять уровни возбуждения атома, отстоящие друг от друга на десятые доли эВ.

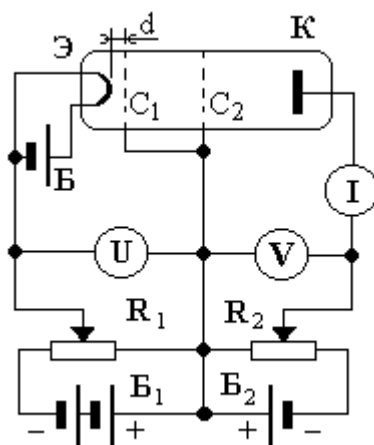


Рис.12. Метод двух сеток

РЕКОМЕНДУЕМАЯ 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.

**ДЛЯ СВОБОДНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ
НПО УЧЕБНОЙ ТЕХНИКИ «ТУЛАНАУЧПРИБОР»**