Лабораторная работа № 49.2

Опыт Франка-Герца

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Планетарная модель атома и ее недостатки

В 1911 году Резерфорд исследовал рассеяние α - частиц на тонкой золотой фольге и сделал предположение о планетарной модели атома: атом состоит из положительно заряженного ядра, вокруг которого по круговым (эллиптическим) орбитам движутся электроны. Заряд ядра Ze , где Z – порядковый номер элемента в таблице Менделеева, e – элементарный заряд. Так как атомы электрически нейтральны, то вокруг ядра должны вращаться Z электронов.

Электрон движется вокруг ядра под действием кулоновской силы, поэтому можно написать:

$$\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{Ze^2}{r^2}=m\frac{v^2}{r}$$

Это уравнение содержит две неизвестных величины: r и v. Следовательно, существует бесчисленное множество значений радиусов и соответствующих им скоростей, которые удовлетворяют этому уравнению. Значит величины: r и v могут меняться непрерывно, а значит, и значения энергии могут меняться непрерывно, то есть может испускаться любая, а не старого определенная порция энергии. Поэтому спектр атомов должен быть сплошным. Но это не согласуется с результатами опыта, который показывает, что атом имеет линейчатый спектр. Кроме того, согласно электродинамике, ускоренно движущийся электрон должен излучать электромагнитные волны и вследствие этого непрерывно терять энергию. Поэтому электрон должен постепенно приближаться к ядру и, в конце концов, упасть на него. То есть атом по модели Резерфорда должен оказаться неустойчивой системой, что противоречит действительности.

Таким образом, ядерная модель оказалась в противоречии с законами классической механики и электродинамики. Потребовалось создание новой квантовой теории.

Постулаты Бора

Нильс Бор (1913) предпринял первую попытку построения квантовой

теории атома. Он хотел объединить линейчатый спектр атома, ядерную модель атома Резерфорда и квантовый характер излучения и поглощения света.

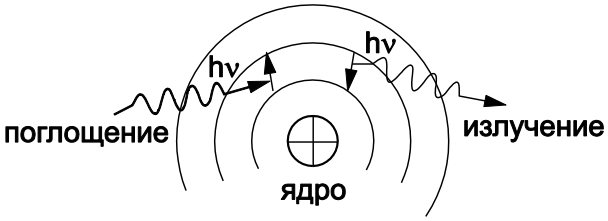
Постулаты:

1. Постулат стационарных состояний. В атоме существуют стационарные состояния (не изменяющиеся со временем), в которых он не излучает энергии. Стационарным состояниям соответствуют стационарные орбиты, по которым движутся электроны. Движение электронов хотя и ускоренное, но электроны на этих орбитах не излучают энергию.

2. Правило частот. При переходе электрона с одного стационарного состояния в другое излучается (поглощается) один фотон с энергией

$$h\nu = E_n - E_m, \qquad (1)$$

где E_n и E_m – энергии стационарных состояний до излучения (поглощения) и после, соответственно. Если $E_n > E_m$, то происходит испускание фотона: переход атома из состояния с большей энергией в состояние с меньшей энергией, то есть переход электрона с более удаленной от ядра орбиты на расположенную ближе к ядру. Если $E_n < E_m$, то происходит поглощение фотона: переход атома из состояния с меньшей энергией в состояние с большей энергией, то есть переход электрона на более удаленную от ядра орбиту. Набор различных дискретных частот и определяет линейчатый спектр атома.



Опыты Франка и Герца

Существование дискретных энергетических уровней атома экспериментально подтвердили опыты Франка и Герца (1914 г.).

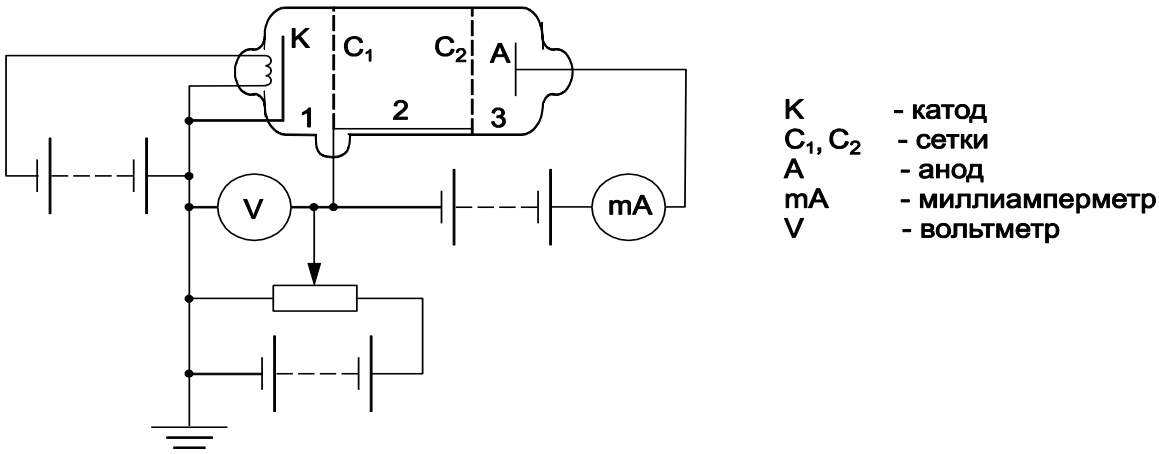
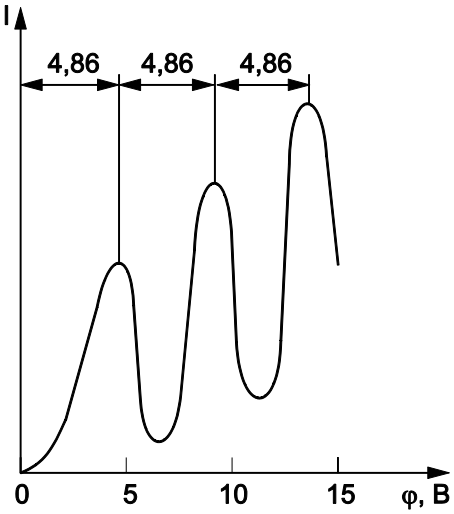


Рис. 1. Схема опыта Франка и Герца.

В трубке (рис. 1), заполненной парами ртути при небольшом давлении (13 Па) имеются катод (К), две сетки (С1 и С2) и анод (А). Электроны, вылетают из катода вследствие термоэлектронной эмиссии, ускоряются разностью потенциалов $U_у$, приложенной между катодом и сеткой С1, и попадают в область между сетками, где испытывают соударения с атомами паров ртути. Между сеткой С2 и анодом приложен небольшой задерживающий потенциал (0,5 В). Исследуется зависимость тока I в цепи анода от напряжения $U_у$ между катодом и сеткой С1. Сила тока вначале возрастает, достигает максимума при $U_у$ = 4,86 В, после чего при дальнейшем увеличении $U_у$ резко падает, достигает минимума и снова начинает расти. Максимумы силы тока повторяются при $U_у$ = 2 · 4,86 В; 3 · 4,86 В…. Такой ход объясняется тем, что атомы, в силу дискретности уровней, могут воспринимать энергию только порциями:



$$\Delta E_1 = E_2 - E_1 \quad \text{или} \quad \Delta E_2 = E_3 - E_1,$$

где E_1, E_2, E_3 – энергия 1-го, 2-го, 3-го стационарных состояний.

Пока энергия электрона меньше первого потенциала возбуждения атома ртути ($\Delta E_1 =$ 4,86 эВ), соударения между электроном и атомом ртути носит упругий характер, причем, поскольку масса электрона во много раз меньше массы атома ртути, энергия электрона при столкновении практически не меняется. Часть электронов падает на сетку С2, остальные, проскочив сетку, достигают анода, создавая ток в цепи. Чем больше разность потенциалов между катодом и сеткой С1, тем больше скорость, с которой электроны достигают сетку С2, тем больше доля электронов, проскочивших сетку, и, следовательно, больше ток (рис. 2). Когда энергия, накапливаемая электронами в промежутке катод – сетка С1, достигает значения ΔE_1, электроны при столкновении с атомами ртути передают им эту энергию и продолжают двигаться с меньшей скоростью. Между сеткой С2 и анодом – задерживающее напряжение 0,5 В и уже не все электроны смогут преодолеть это напряжение и дойти до анода, поэтому ток уменьшается.

Атом, получивший при соударении с электроном энергию ΔE_1, переходит в возбужденное состояние, из которого он спустя время 10^{-8} с возвращается в основное состояние, излучая фотон частотой $\nu = \frac{\Delta E_1}{h}$. Следовательно,

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E_1}. \qquad (2)$$

Из опыта $\Delta E_1 = 4{,}86$ эВ. Поэтому λ = 253,7 нм - такая линия существует.

При напряжении, превышающем 9,72 В, электрон может дважды претерпеть столкновения, теряя энергию 9,72 эВ, из-за чего сила тока начнет уменьшаться снова.

Ускоряющее напряжение $U_у$ = 4,86 В называется «первым потенциалом возбуждения» 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 и т.д.

При достаточном разрежении паров ртути и соответствующей величине ускоряющего напряжения электроны могут приобретать скорость, достаточную для перевода атома ртути в состояние E_3, и тогда на зависимости $I(U_у)$ будут наблюдаться максимумы при напряжениях, кратных второму потенциалу возбуждения.

Таким образом, в опытах Франка и Герца непосредственно обнаруживается существование у атомов дискретных энергетических уровней.

Таблица 1

ПЕРВЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ВОЗБУЖДЕНИЯ
(РЕЗОНАНСНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ) НЕКОТОРЫХ ГАЗОВ

Газ	H_2	He	Ne	Ar	Kr	Xe	Hg	Cs
$U_р$	11,2	20,9	16,6	11,6	10,0	8,5	4,9	1,4

Характеристика задержки

Вольтамперная характеристика задержки – это зависимость $I = f(U_з)$ анодного тока от задерживающего потенциала при заданном значении ускоряющего напряжения $U_у$ ($U_у$ выполняет роль параметра).

В случае, когда значение ускоряющего напряжения меньше резонансного ($U_у < U_р$), неупругих соударений электронов с атомами в лампе не происходит, поэтому характеристика задержки такой лампы похожа на характеристику задержки вакуумной лампы (рис. 3а).

Если же $U_у > U_р$, то появляется дополнительная ступенька, соответствующая уменьшению анодного тока (рис. 3б). 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 $U_з = 0$ все электроны достигнут анода и анодный ток будет пропорционален их числу. При постепенном увеличении

задерживающего напряжения все большая часть медленных электронов возвращается на сетку (рис. 3б, участок кривой 1). Плавный спад кривой здесь 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. 3б, участок кривой 2). Очевидно, что разность токов ΔI 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. 3б, участок кривой 3).

Эффективное сечение неупругих столкновений

Любые взаимодействия частиц имеют определенную вероятность. Их количественной характеристикой является э ф ф е к т и в н о е с е ч е н и е 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:

$$\sigma = 2\pi \int_0^\infty P(W,r)\, r\, dr, \qquad (3)$$

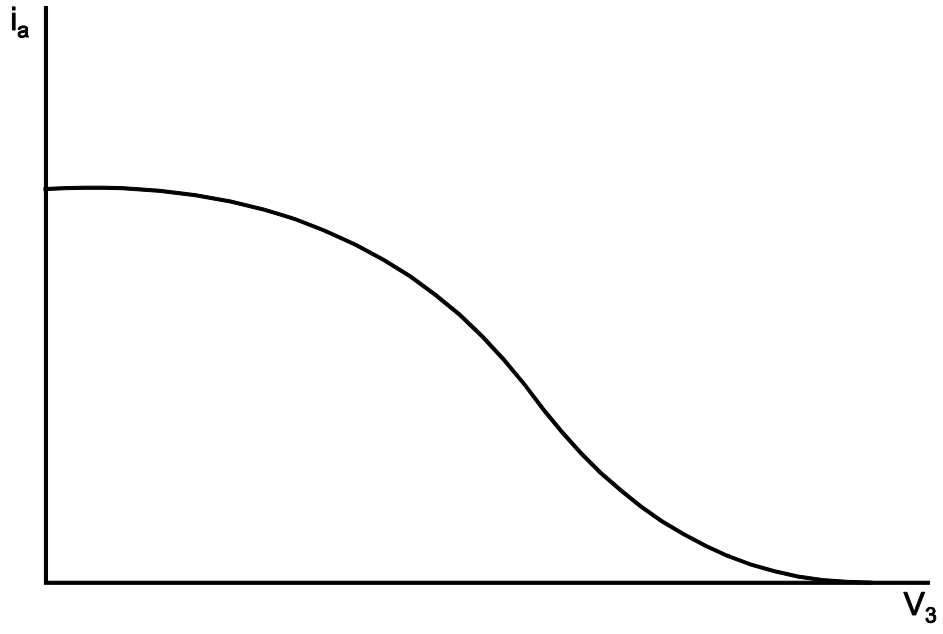
где $P(W,r) -$ вероятность осуществления этого процесса в случае, когда налетающий электрон имеет кинетическую энергию W и прицельное расстояние r.

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

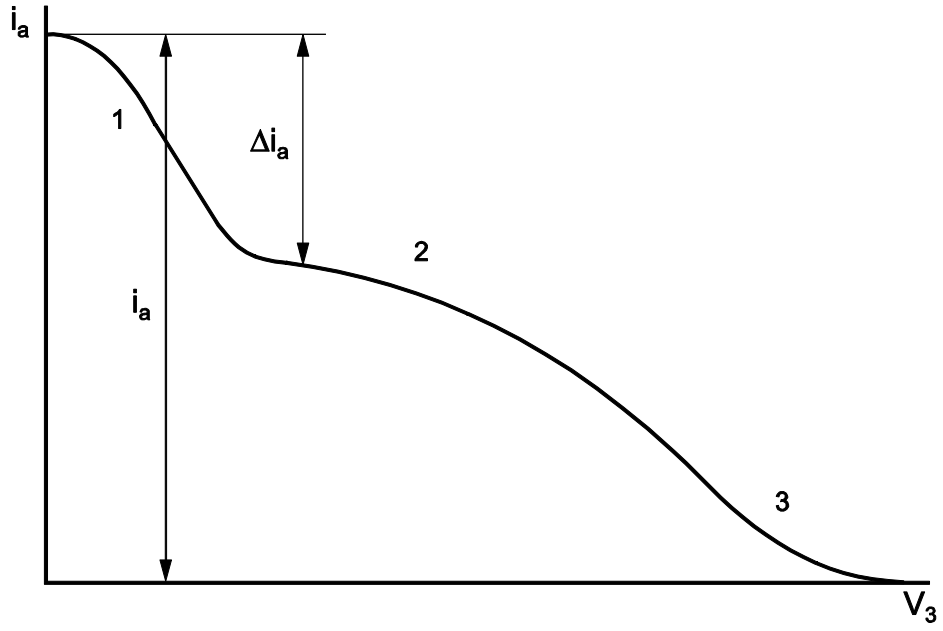
Выведем выражение для определения эффективного сечения σ через измеряемые параметра опыта.

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

Так как $j = e\, n < u >$, то



а



б

Рис. 3. Зависимости анодного тока от задерживающего потенциала для разных значений ускоряющего потенциала $U_у$: а) $U_у > U_р$; б) $U_у < U_р$.

$$I = e\,n < u > S, \qquad (4)$$

где e - заряд электрона, n - концентрация электронов, $< u > -$ средняя скорость электронов при данном ускоряющем напряжении.

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:

$$\frac{\mathrm{dn}}{\mathrm{dt}} = P\,n\,N, \qquad (5)$$

где вероятность неупругих столкновений $P = \sigma < u >$. В последнем выражении $\sigma -$ искомая величина, равная эффективному сечению неупругих соударений электронов с атомами.

Тогда $$\frac{\mathrm{dn}}{\mathrm{dt}} = \sigma < u > n\,N. \qquad (6)$$

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

$$\Delta n = \frac{\mathrm{dn}}{\mathrm{dt}}\,\Delta t = \sigma < u > n\,N\,\Delta t. \qquad (7)$$

Очевидно, что $\Delta t = \frac{\ell}{< u >}$, где ℓ –расстояние катод-сетка.

Тогда:

$$\Delta n = \sigma\,n\,N\,\ell. \qquad (8)$$

С другой стороны, из соотношения (4) следует:

$$\Delta n = \frac{\Delta I}{e < u > S}. \qquad (9)$$

Тогда, используя соотношения (4), (8), (9), получим:

$$\sigma = \frac{\Delta n}{n\,N\,\ell} = \frac{\Delta I}{e < u > S\,n\,N\,\ell} = \frac{\Delta I}{I\,N\,\ell}. \qquad (10)$$

Для расчета концентрации атомов N используется известное соотношение $p=NkT$, где p - давление газа, $k=1{,}38\cdot10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана. Тогда окончательно имеем оценочную формулу для σ:

$$\sigma = \frac{\Delta I\,k\,T}{I\,\ell\,p}. \qquad (11)$$

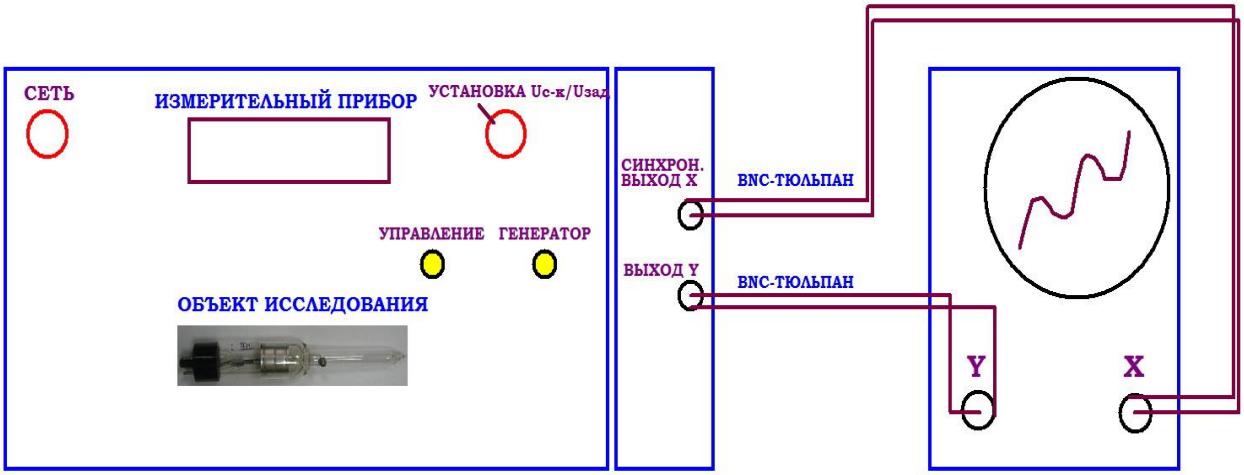
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В лабораторной установке используется серийная трехэлектродная лампа ТГ1-0.1/0.3 (тиратрон, заполненный инертным газом).

Экспериментальная установка позволяет произвести измерение зависимости $I = f(U_у)$, то есть вольт-амперной характеристики триода (характеристики опыта Франка и Герца) и характеристики задержки $I = f(U_з)$ (анодного тока от задерживающего потенциала при заданном значении ускоряющего напряжения $U_у$).

Характеристики снимаются при двух температурах нити накала лампы Т~600 К и Т~1200 К.

Блок-схема экспериментальной установки для получения ВАХ Франка и Герца изображена на рис. 4.



ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

ЗАДАНИЕ 1. ИЗМЕРЕНИЕ ВАХ ОПЫТА ФРАНКА И ГЕРЦА.

1. Включить осциллограф и лабораторную установку в сеть напряжением ~220 В.
2. Поставить кнопку «СЕТЬ» на панели осциллографа во включенное положение. При этом должна загореться сигнальная лампа на панели осциллографа.
3. Поставить переключатель «СЕТЬ» на панели модуля в положение «ВКЛ», при этом должен загореться сигнальный светодиод «СЕТЬ» на панели модуля. Дать прогреться всем приборам в течение не менее 3 минут.
4. Кратковременно (~0,5 секунды) одиночно нажимая кнопку «УПРАВЛЕНИЕ» установить температуру нити накала триода Т=600

К. Текущее значение температуры отображается на ЖКД LCD дисплее.

5. В режиме снятия ВАХ триода, кратковременно (~0,5 секунды) одиночно нажимая кнопку «УПРАВЛЕНИЕ», выбрать режим снятия ВАХ Франка и Герца «FRANK-HERTZ».
6. Запустить генератор кратковременно (~ 0,5 секунд) нажав кнопку «ГЕНЕРАТОР ВКЛ / ВЫКЛ».
7. Плавным вращением ручки «**УСТАНОВКА Uy / УСТАНОВКА Uзад»,** установить ускоряющее напряжение 40 В для того, чтобы получить вольт - амперную характеристику с максимально возможным количеством экстремумов.
8. Срисовать вольт-амперную характеристику с экрана осциллографа в натуральную величину на миллиметровой бумаге.
9. Вращая ручку «**УСТАНОВКА Uy / УСТАНОВКА Uзад»** и наблюдая за характеристикой на экране осциллографа, снять вольтамперную характеристику опыта Франка и Герца, записывая измеренные значения анодного тока I и значения ускоряющего напряжения Uy. Особое внимание обратить на значение показаний цифрового вольтметра в точках максимумов и минимумов характеристики.
10. Отключить генератор кратковременно (~0,5 секунды) нажав кнопку «**ГЕНЕРАТОР ВКЛ / ВЫКЛ**».
11. Определить разность напряжений $\Delta U_{\text{у}} = \left(U_{\text{у}}\right)_i - \left(U_{\text{у}}\right)_{i-1}$ между соседними максимумами (в вольтах). Рассчитать $< \Delta U_{\text{у}} >$ и сравнить полученное значение с потенциалами возбуждения некоторых газов, представленных в таблице 1. Сделать вывод о том, какой инертный газ используется в опыте.
12. При возбуждении инертного газа происходит последующее излучение фотона с длиной волны λ, которую легко можно вычислить, используя закон сохранения энергии. Электрон, проходя ускоряющую разность потенциалов, набирает энергию $e \cdot \Delta U_{\text{у}}$, которую передаёт атому инертного газа. Атом переходит в возбуждённое состояние, излучая длину волны λ. Таким образом:

$$h \cdot \frac{c}{\lambda} = e \cdot < \Delta U_{\text{у}} >, \qquad (12)$$

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.

Рассчитать длину волны λ, нм с помощью формулы (12). Сделать вывод о том, к какому диапазону видимого света относится рассчитанная длина волны.

Задание 2. Измерение зависимости анодного тока от задерживающего потенциала при заданном значении ускоряющего напряжения

13. Кратковременно (~0,5 секунды) нажав кнопку **«УПРАВЛЕНИЕ»** переключиться в режим снятия характеристики задержки. При этом на дисплее отображается автоматически установленное постоянное ускоряющее напряжение **Uу**, равное 20 В.
14. Поставив ручку **«УСТАНОВКА Uу / УСТАНОВКА Uзад»** в крайнее правое положение по часовой стрелке нажать кнопку **«ГЕНЕРАТОР ВКЛ / ВЫКЛ»**. При этом на экране осциллографа должна отображаться характеристика задержки, т. е. зависимость анодного тока от задерживающего потенциала $I = f(U_3)$ при заданном значении ускоряющего напряжения $U_{\text{у}} = 20$ В. Характеристика должна иметь вид аналогичный рис. 3 б.
15. Зарисовать задерживающую характеристику с экрана осциллографа по клеткам на миллиметровую бумагу.
16. Вращая ручку «**УСТАНОВКА Uу / УСТАНОВКА Uзад»** и наблюдая за характеристикой на экране осциллографа, снять вольтамперную характеристику задержки $I = f(U_3)$ триода. Особое внимание обратить на значения тока анода в начале характеристики при U_3~ 1 В (I_1) и в начале излома участка 2 на рис. 3 б (I_2).
17. Отключить генератор кратковременно (~0,5 секунды) нажав кнопку **«ГЕНЕРАТОР ВКЛ / ВЫКЛ».**
18. Удерживая нажатой кнопку **«УПРАВЛЕНИЕ»** (в течение ~2 секунд), вернуться в меню изменения температуры накала из меню переключения опытов.
19. Кратковременно (~0,5 секунды) одиночно нажимая кнопку **«УПРАВЛЕНИЕ»** установить температуру нити накала T=1200 К. Текущее значение температуры отображается на ЖКД LCD дисплее.
20. Повторить пп. 13–17.
21. По окончании работы поставить переключатель **«СЕТЬ»** на панели приборов в положение «ВЫКЛ» и отключить установку и осциллограф от сети.
22. По вольтамперной характеристике задержки $I = f(U_3)$, полученной в п.16 определить разность токов $\Delta I = I_1 - I_2$, которая пропорциональна концентрации только тех электронов, которые испытали неупругие соударения с атомами.
23. Оценить по формуле (11) сечение σ неупругого рассеяния электронов с атомами инертного газа, наполняющего лампу, при двух значениях температуры. При оценке принять $\ell = 3 \cdot 10^{-3}$ м, давление внутри колбы при T = 600 К принять равным P ~ 5 Па, при T = 1200 К: p ~ 17 Па. Получить среднее значение сечения неупругого рассеяния электронов < σ >. Все расчёты производить в СИ.
24. Сравнить полученное оценочное значение сечения неупругого рассеяния электронов < σ > атомами инертного газа со значением, представленным на рисунке 5. При сравнении учесть, что электроны

при измерении $I = f(U_З)$ ускоряются напряжением $U_У = 20$ В, при этом обладают энергией $W = e \cdot U_У$. На рисунке необходимо найти график инертного газа, заполняющего лампу, и соответствующую энергию электронов W.

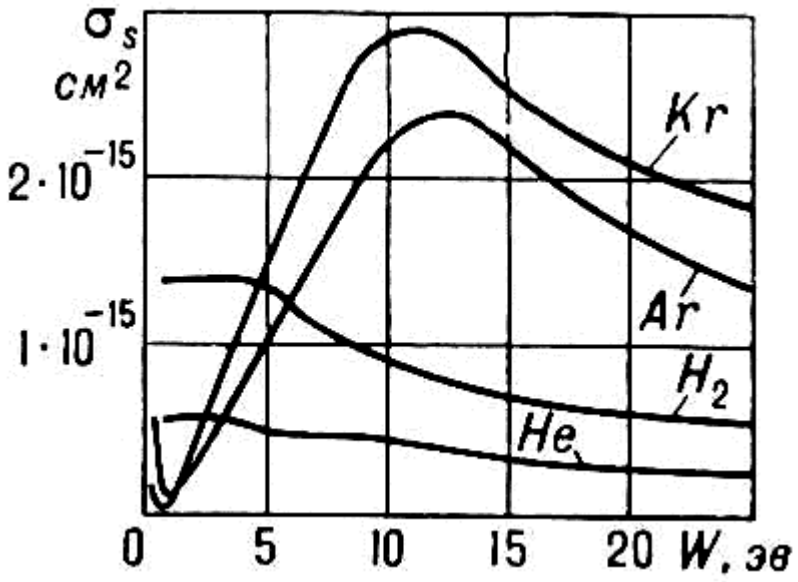


Рис. 5. Сечение неупругого рассеяния электронов различными газами при разных значениях энергии электронов W

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие проблемы атомной физики и каким образом пытался разрешить Н.Бор с помощью своих постулатов?
2. Какие постулаты выдвинул Бор в теории атома водорода?
3. Как де Бройль объяснил правило Бора квантования орбит электрона в атоме водорода?
4. Воспользовавшись квазиклассической теорией Бора, получить формулу для энергии электрона E_n в однократно ионизированном атоме гелия. В чём, по вашему мнению, основной недостаток теории Бора?
5. Пользуясь энергетической диаграммой для атома водорода, определите энергию ионизации атома водорода. Определить по той же диаграмме первый потенциал возбуждения атома водорода.
6. Получите обобщенную формулу Бальмера и выражение постоянной Ридберга через основные константы.
7. Определить энергию фотона, испускаемого при переходе электрона в атоме водорода с третьего энергетического уровня на основной.
8. Во сколько раз минимальная длина волны в серии Пашена спектра

водорода больше максимальной длины волны в серии Бальмера?

9. Вычислить наибольшие длины волн в сериях Лаймана, Бальмера, Пашена в спектре водорода.
10. Охарактеризуйте физическую сущность и значимость в атомной физике опытов Франка и Герца?
11. Почему на вольтамперной характеристике лампы в опыте Франка-Герца наблюдаются неоднократные спады анодного тока?
12. Почему анодный ток в опыте уменьшается в минимумах не до нуля?
13. Какие столкновения электронов с атомами называются упругими, а какие – неупругими? На каких участках вольтамперной характеристики имеют место упругие, а на каких – неупругие столкновения?
14. С какой целью на коллектор подается задерживающее напряжение? Из каких соображений оно выбирается?
15. Почему энергия электрона в атоме квантуется?
16. Какие состояния атома называются стационарными?
17. Чем основное состояние атома отличается от возбужденного?
18. Что такое первый потенциал возбуждения? Какое состояние атома называется основным, а какое возбужденным?
19. Что такое потенциал ионизации? Чем он отличается от потенциала возбуждения? Какой из них больше, а какой меньше?
20. Как необходимо настроить лабораторную установку, чтобы измерить потенциал ионизации?
21. Возможно ли на используемой лабораторной установке измерять последующие за первым потенциалы возбуждения?
22. Какие виды соударений возможны между атомом и налетающим на него с некоторой скоростью электроном? Является ли опыт Франка и Герца доказательством возможности неупругих соударений?