

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ВОЛЖСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (ФИЛИАЛ)
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

КАФЕДРА «ПРИКЛАДНАЯ ФИЗИКА»

С.О. Зубович, Т.А. Сухова

ОПЫТ ФРАНКА И ГЕРЦА

Методические указания



Волгоград
2013

УДК 53 (075.5)

Рецензент:

канд. техн. наук, доцент *А.Л. Суркаев*

Издается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

Зубович, С.О. **Опыт Франка и Герца** [Электронный ресурс]: методические указания / С.О. Зубович, Т.А. Сухова //Сборник «Методические указания» Выпуск 3.-Электрон. текстовые дан.(1файл:141Кб) – Волжский: ВПИ (филиал) ГОУВПО ВолгГТУ,2013.-Систем.требования:Windows 95 и выше; ПК с процессором 486+; CD-ROM.

Методические указания содержат рекомендации к выполнению лабораторной работы, представленной в третьей части практикума кафедры «Прикладная физика» Волжского политехнического института.

Предназначены для студентов всех форм обучения.

©Волгоградский
государственный
технический
университет, 2013
© Волжский
политехнический
институт, 2013

Лабораторная работа № 348

ОПЫТ ФРАНКА И ГЕРЦА

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

348.2. Содержание работы

Одним из простых опытов, убедительно подтверждающих квантовые свойства атомов, связанные с дискретностью их энергий, является эксперимент, впервые выполненный в 1913 г. Дж. Франком и Г. Герцем. Эти эксперименты были начаты ими до выдвижения теории Бора с целью получить потенциал ионизации атомов, однако именно они привели к подтверждению постулатов Н. Бора (*Джеймс Франк, немецкий физик, 1882–1964, Нобелевская премия 1925 г. за установление закономерностей в столкновениях электронов с атомами; Густав Людвиг Герц, немецкий физик, 1887–1975, Нобелевская премия 1925 г. за установление закономерностей в столкновениях электронов с атомами*).

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. Отметим, что при ускоряющем потенциале в 1 В скорость электронов составляет около $6 \cdot 10^5$ м/с, т.е. термин «медленные электроны» имеет весьма относительное значение.

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.

Схема эксперимента представлена на рис. 348.1. Основным элементом

экспериментальной установки является трехэлектродная лампа, заполненная газом, например, парами ртути под давлением 1 мм.рт.ст. . Сетка С имеет положительный потенциал U относительно катода К и играет роль ускоряющего электрода. Электроны, вылетающие из катода К за счет термоэлектронной эмиссии, ускоряются разностью потенциалов U , величина которой может изменяться с помощью потенциометра П и измеряться вольтметром V.

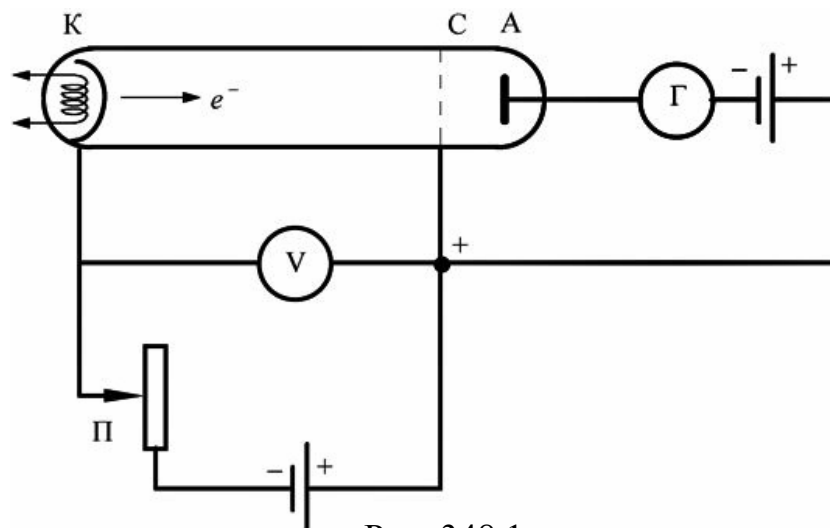


Рис. 348.1

Между сеткой С и анодом-коллектором А создается слабое тормозящее поле за счет разности потенциалов между сеткой и анодом порядка $+0,5 \text{ В}$.

Быстрые электроны преодолевают задерживающий потенциал и попадают на анод А и дают вклад в электронный ток, который измеряется гальванометром Г. Электроны малых энергий задерживаются и не попадают на анод А.

Двигаясь от катода К к сетке С, электроны сталкиваются с атомами ртути, находящимися в основном энергетическом состоянии. Если энергия атома может принимать только определенные дискретные значения, и энергетическое расстояние между основным и первым возбужденным состояниями атома равно ΔE , то характер столкновений электрона с атомом будет существенно зависеть от значения кинетической энергии электрона $W_k = eU$.

Если $W_k < \Delta E$, то электрон при столкновении с атомом не сможет передать ему значительную часть своей энергии. Как говорят, соударение электрона с атомом в этом случае будет *упругим*. В таком столкновении кинетическая энергия электрона не переходит во внутреннюю энергию атома, и в силу большого различия масс соударяющихся частиц, электрон будет двигаться в газовом промежутке между катодом К и сеткой С практически без потерь энергии. Такие электроны, пролетев сетку лампы, легко преодолеют слабое тормозящее поле между сеткой С и анодом-коллектором А и обеспечат протекание тока в цепи коллектора. Как и в обычной вакуумной лампе при увеличении U ток в цепи коллектора будет

монотонно возрастать.

Однако, если при движении в ускоряющем поле электрон приобретет кинетическую энергию $W_{к1} = eU_1$, достаточную для возбуждения атома, то соударение такого электрона с атомом станет *неупругим*. Теперь значительная часть кинетической энергии электрона будет переходить во внутреннюю энергию атома, то есть расходоваться на возбуждение атома.

Неупругие столкновения электронов с атомами начинают происходить при подлете электронов к сетке. После столкновений энергетически «ослабленные» электроны уже не смогут преодолеть тормозящее поле и попасть на анод-коллектор. Следовательно, когда ускоряющее напряжение на сетке достигнет значения U_1 , ток I в цепи коллектора должен резко уменьшиться.

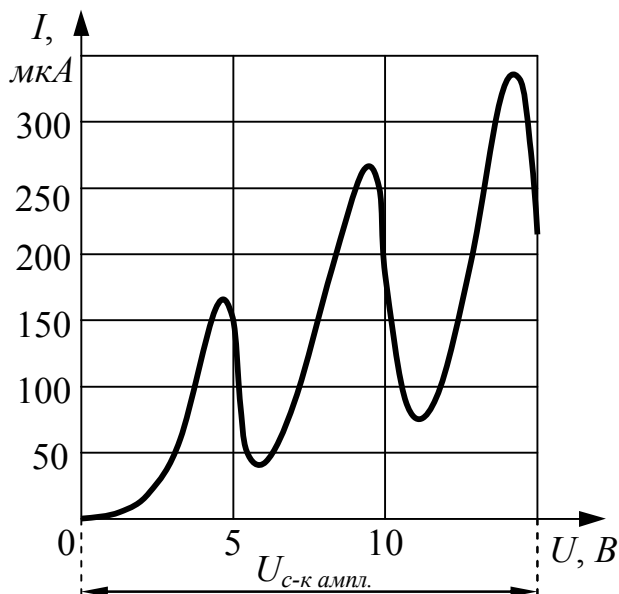


Рис. 348.2

При дальнейшем увеличении ускоряющего потенциала ток, регистрируемый гальванометром, будет снова возрастать. Однако, когда значение ускоряющего напряжения станет равным $U = 2U_1$, ток в цепи коллектора снова резко уменьшится, так как в этих условиях электрон при пролете газового промежутка может дважды испытать неупругие столкновения с атомами. Соответственно, возможны режимы с тремя неупругими столкновениями при $U = 3U_1$ и т.д. Зависимость $I = I(U)$, полученная в опытах Франка и Герца (рис. 348.2), подтвердила этот вывод. Такая зависимость является убедительным экспериментальным доказательством дискретности энергетических состояний атомов.

При увеличении ускоряющего потенциала от нуля ток первоначально возрастал, 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

собой ряд острых максимумов, отстоящих друг от друга на расстоянии $4,9 \text{ В}$. Тот факт, что расстояние между двумя соседними максимумами всегда составляло (с точностью до $0,1 \text{ В}$) $4,9 \text{ В}$, а первый максимум обнаружился у $4,1 \text{ В}$, 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 (рис.348.2) на основании сказанного выше не представляет затруднений. До тех пор, пока энергия электрона не достигнет $4,9 \text{ В}$, он испытывает с атомами ртути упругие соударения, и ток возрастает с увеличением потенциала по обычному закону. При потенциале $4,9 \text{ В}$ удар становится неупругим, электрон отдает при соударении атому ртути всю свою энергию. Эти электроны не попадут на анод-коллектор А, так как они будут выловлены обратно сеткой С, заряженной до $+0,5 \text{ В}$, и ток пластинки резко упадет.

Если энергия электронов заметно превосходит $4,9 \text{ В}$, то такие электроны, потеряв часть своей энергии при неупругом соударении, сохраняют достаточный избыток энергии и потому, несмотря на наличие положительно заряженной сетки, достигают анода-коллектора А, – ток вновь начинает возрастать.

Мы видим, таким образом, что энергия в $\Delta E = eU = 4,9 \text{ эВ}$ 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 $4,9 \text{ эВ}$ 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 $E_1 + 4,9 \text{ эВ}$. Ускоряющий потенциал $4,9 \text{ В}$ называется «*первым критическим потенциалом*» или «*резонансным потенциалом*» атома ртути. Такие же резонансные потенциалы найдены и для других атомов. Например, для калия резонансный потенциал равен $1,63 \text{ В}$, для натрия – $2,12 \text{ В}$, для гелия – 21 В , аргона – $11,6 \text{ В}$ и т.д.

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

Вольтамперная характеристика задержки – это зависимость $I_a = f(U_3)$ анодного тока от задерживающего потенциала при заданном значении ускоряющего напряжения $U_{\text{уск}}$ ($U_{\text{уск}}$ выполняет роль параметра).

В случае, когда значение ускоряющего напряжения меньше резонансного ($U_{\text{уск}} < U_{\text{рез}}$), неупругих соударений электронов с атомами в лампе не происходит, поэтому характеристика задержки такой лампы похожа на ха-

рактеристику задержки вакуумной лампы (рис. 348.3, а).

Если же $U_{уск} > U_{рез}$, то появляется дополнительная ступенька, соответствующая уменьшению анодного тока (рис. 348.3, б). 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 $U_3 = 0$ 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. 348.3, б, 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. 348.3, б, 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. 348.3, б, участок кривой 3).

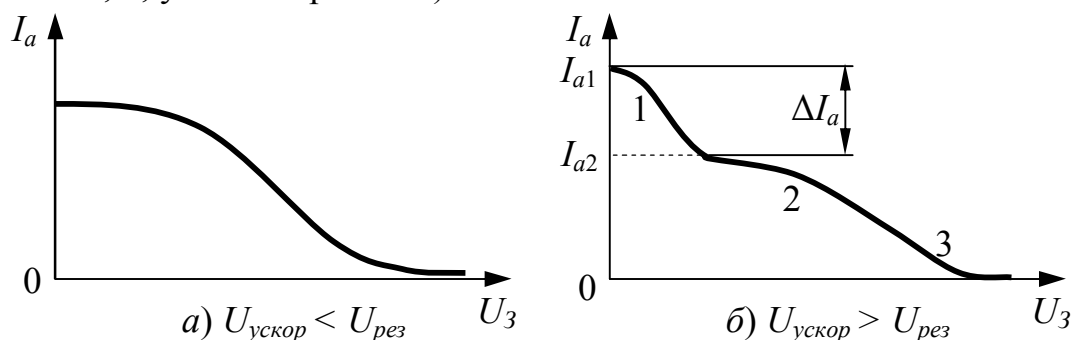


Рис. 348.3

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:

$$\sigma(W_e) = 2\pi \int_0^{\infty} P(W_e, r) r dr, \quad (348.1)$$

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:

$$I_a = en\langle v \rangle S, \quad (348.2)$$

где e – заряд электрона, n – концентрация электронов, $\langle v \rangle$ – средняя скорость электронов при данном ускоряющем напряжении $U_{уск}$.

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 :

$$\frac{dn}{dt} = PnN, \quad (348.3)$$

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

Число электронов Δn , испытавших неупругие столкновения за время Δt находим из соотношения $\Delta n/\Delta t = dn/dt$. Учитывая, что $\Delta t = \ell/\langle v \rangle$, где ℓ – расстояние катод-сетка газонаполненного триода, получаем:

$$\Delta n = \sigma n N \ell. \quad (348.4)$$

С другой стороны, из соотношения (348.2) следует:

$$\Delta n = \frac{\Delta I_a}{e\langle v \rangle S}. \quad (348.5)$$

Тогда, используя соотношения (348.2), (348.4), (348.5), и учитывая, что $p = NkT$, где p – давление газа, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана, получим:

$$\sigma = \frac{\Delta n}{nN\ell} = \frac{\Delta I_a}{I_a N \ell} = \frac{\Delta I_a k T}{I_a \ell p}. \quad (348.6)$$

348.3. Описание лабораторной установки

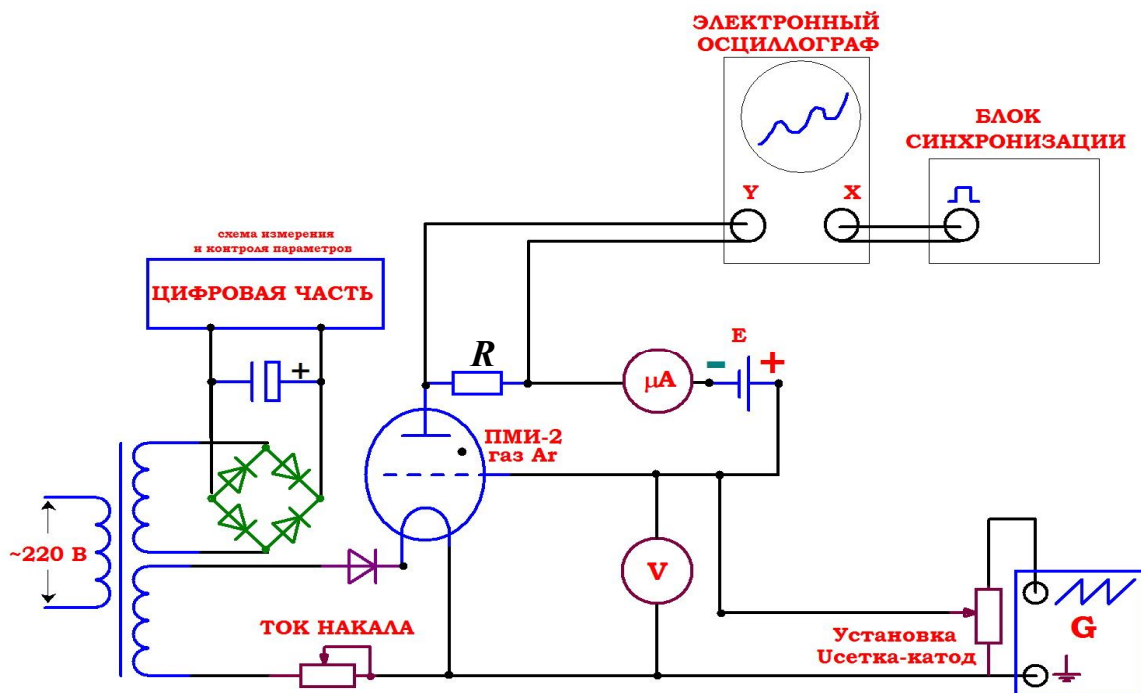


Рис. 348.4. Блок-схема экспериментальной установки ФКЛ-6 для проведения опыта Франка и Герца

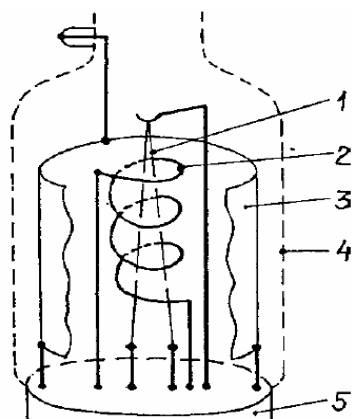


Рис. 348.5 Устройство лампы ПМИ-2 :

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

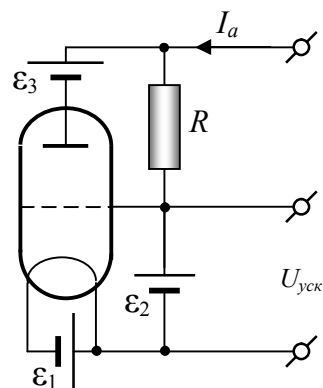


Рис. 348.6. Электрическая схема включения лампы ПМИ-2 и упрощенная схема опыта Франка и Герца:

1. Источник питания накала.
 2. Источник питания ускоряющего напряжения $U_{уск}$.
 3. Источник питания напряжения задержки U_3 .
- I_a – анодный ток.

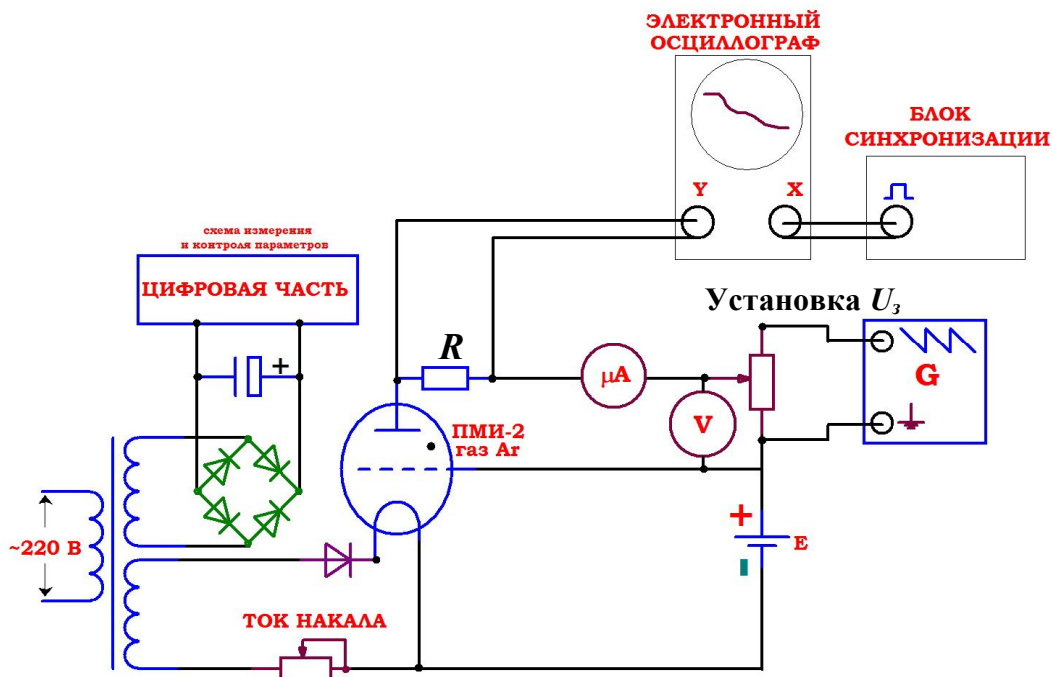


Рис. 348.7. Блок-схема экспериментальной установки ФКЛ-6 для проведения опыта по снятию ВАХ задержки триода и оценки сечения неупругого рассеяния.

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 ПМИ-2. Устройство лампы приведено на рис.348.5. 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.

Экспериментальная установка позволяет произвести снятие анодной характеристики триода в зависимости от ускоряющего напряжения сетки катода $U_{с-к \text{ ампл}}$ (характеристика опыта Франка и Герца) и характеристики задержки $I_a = f(U_3)$ анодного тока от задерживающего потенциала при заданном значении ускоряющего напряжения, установленной больше резонансного потенциала, $U_{уск} = 20 \text{ В}$.

Характеристики снимаются при двух температурах нити накала лампы $T = 600 \text{ К}$ и $T = 1200 \text{ К}$.

Блок-схема экспериментальной установки для получения ВАХ Франка и Герца изображена на рис.348.4. Модуль развёртки G состоит из нескольких блоков, основная задача которых в выработке пилообразного напряжения нужной частоты, формы и длительности. Блок синхронизации вырабатывает синхроимпульсы для стабилизации изображения характеристики на экране осциллографа. Синхроимпульсы подаются на вход X ос-

циллографа, при этом осциллограф должен быть переведен в режим синхронизации внешним сигналом.

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_{c-k} пропорционально времени t ($U_{c-k} \sim kt$), то развертка по времени есть развёртка по напряжению U_{c-k} . С помощью источника запирающего напряжения 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_a лампы. В результате получаем на экране осциллографа вольт-амперную

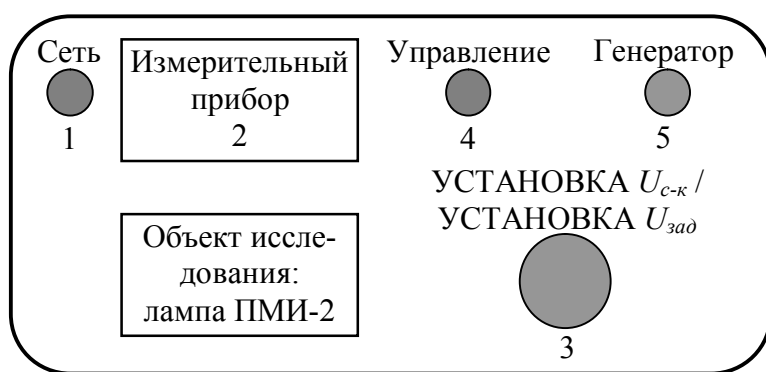


Рис.348.8

характеристику лампы, т.е. зависимость тока анода I_a от ускоряющего напряжения U_{c-k} , имеющий вид, аналогичный рис.343.2.

Электрическая схема установки с электродной лампой ПМИ-2 собрана в корпусе (рис.348.8). На передней панели установ-

ки есть основные ручки управления:

1. Сеть – выключатель сетевого питания.
2. Цифровой экран вольтметра и амперметра.
3. Переменный резистор дает возможность регулировать значение ускоряющего напряжения подаваемого на сетку-катод лампы в эксперименте Франка и Герца и задерживающего напряжение в эксперименте по оценке сечения неупругого рассеяния. Ручка 3 служит для плавной регулировки ускоряющего напряжения сетка-катод в опыте Франка и Герца ($0 \dots 40 \text{ В}$) и задерживающего потенциала анода в режиме снятия характеристики задержки ($0 \dots 20 \text{ В}$). Величина запирающего напряжения в опыте Франка и Герца подобрана наилучшим образом и устанавливается автоматически в пределе $\sim 1 \dots 2 \text{ В}$.
4. Многофункциональная кнопка «УПРАВЛЕНИЕ» служит для:
 - а. изменения температуры нити накала лампы: кратковременное в течение $\sim 0,5$ секунды одиночное нажатие;
 - б. входа в режим снятия ВАХ триода для данной температуры: удержание кнопки нажатой в течение ~ 2 секунд;
 - в. в режиме снятия ВАХ переключение между снятием ВАХ опыта

Франка и Герца и характеристикой задержки (переключение между схемами рис.348.4 – рис.348.7): кратковременное $\sim 0,5$ секунды одиночное нажатие. Перед переключением схем необходимо выключать генератор нажатием кнопки «ГЕНЕРАТОР ВКЛ/ВЫКЛ»;

г. 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».

5. 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 кнопкой 4 схемы. *Перед переключением схем необходимо выключать генератор нажатием кнопки 5.*

Для проведения эксперимента по оценки сечения неупругого рассеяния схема рис.348.4 должна быть видоизменена согласно рис.348.7. При этом в промежутке сетка – катод лампы устанавливается постоянное ускоряющее напряжение 20 В от источника постоянного напряжения ϵ , а пилообразный генератор развертки подключается в промежуток сетка – анод триода и вырабатывает отрицательные относительно сетки пилообразные импульсы в пределе от $0 \dots -20\text{ В}$. Таким образом, потенциал анода линейно

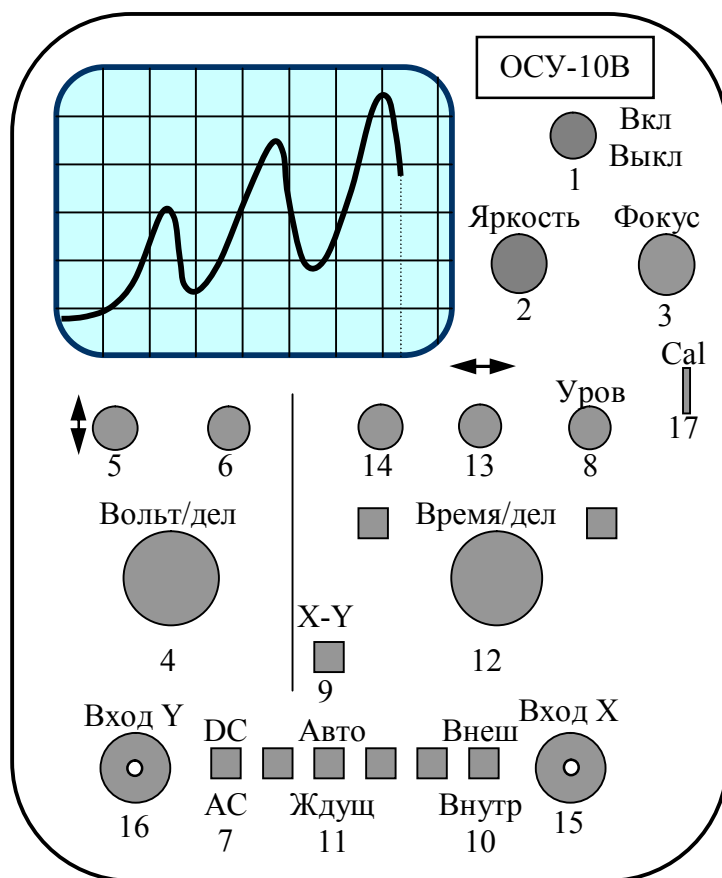


Рис.348.9

уменьшается относительно потенциала сетки. С резистора R снимается сигнал, пропорциональный анодному току I_a лампы. В результате получаем на экране осциллографа вольт-амперную характеристику задержки лампы, аналогичную рис.348.3.

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

В работе используются осциллограф ОСУ-10В с полосой пропускания 10МГц и генератор.

На передней панели ос-

циллографа (рис.348.9) есть основные ручки управления:

1. Сеть – выключатель сетевого питания.
2. Яркость – регулировка яркости изображения.
3. Фокус – регулировка фокуса изображения.

Ручки управления вертикального отклонения:

4. Потенциометр Вольт/Дел – установление коэффициентов отклонения каналов в диапазоне от 10 мВ/дел до 5 В/дел.

5. Смещение Y – регулировка положения изображения по вертикали.

6. Частота плавно Y – плавное изменение коэффициентов отклонения каналов с перекрытием не менее чем в 2,5 раза в каждом положении потенциометра 4.

7. Режим усилителя (AC-DC-GND) – переключатель режима усилителя (AC- закрытый вход; DC- открытый вход; GND –вход усилителя отключается от источника сигнала и заземляется).

Ручки управления синхронизации:

8. Синхронизация (Уровень) – потенциометр регулировки уровня синхронизации.

9. Усилитель (X-Y) – переключатель усилителя (только вход Y или одновременно входы X и Y).

10. Род синхронизации (Внеш, Внутр) – переключатель внешней/внутренней синхронизации (при включении «Внеш» внешний сигнал непосредственно подается на входной усилитель X; включении «Внутр» развертка синхронизируется внутренним сигналом).

11. Род работы (Авто, Ждуц) – переключатель работы развертки (при включении «Авто» если нет сигнала синхронизации или он меньше 25 Гц развертка переходит в автономный режим; при включении «Ждуц» развертка запускается только при наличии входного сигнала TV синхронизации телевизионным строчным сигналом).

Органы управления разверткой:

12. Потенциометр Время/Дел – устанавливает коэффициент развертки в диапазоне от 0,1 мкс/дел до 0,1 с/дел.

13. Смещение X – регулировка положения изображения по горизонтали.

14. Частота плавно X – обеспечивают плавную регулировку коэффициента развертки с перекрытием 2,5 раза в каждом положении потенциометра 12.

15. Вход X – вход У.

16. Вход Y – вход Y.

17. Cal – внутренняя калибровка осциллографа.

348.4. Порядок выполнения работы

1. Установка полностью собрана и готова к работе.
2. Включите осциллограф и лабораторную установку в сеть. Поставь-

те кнопку 1 «СЕТЬ» на панели осциллографа в положение «ВКЛ» (рис.348.9). Поставьте переключатель 1 «СЕТЬ» на панели модуля ФКЛ-6 в положение «ВКЛ» (рис.348.8). Дайте прогреться всем приборам в течение не менее 3 минут.

3. Кратковременно в течение $\sim 0,5$ секунды одиночно нажимая кнопку 4 «УПРАВЛЕНИЕ» установите температуру нити накала триода $T = 600 \text{ K}$. На LCD дисплее 2 отображается текущее значение температуры и надпись «=MENU1=».

4. Удерживая нажатой в течение ~ 2 секунд кнопку 4 «УПРАВЛЕНИЕ», войдите в режим снятия ВАХ триода для данной температуры (на LCD дисплее 2 отображается «=MENU2=»).

5. В режиме снятия ВАХ триода, кратковременно $\sim 0,5$ секунды одиночно нажимая кнопку 4 «УПРАВЛЕНИЕ», выберите режим снятия ВАХ Франка и Герца (на LCD дисплее 2 отображается «FRANK-HERTZ»).

6. Запустите пилообразный генератор кратковременно в течение $\sim 0,5$ секунд нажав кнопку 5 «ГЕНЕРАТОР ВКЛ/ВЫКЛ» (На LCD дисплее 2 отображается значение напряжения на катоде «Uset-katod=...V» и силы тока на аноде «Ianoda=...mA»).

7. Плавным вращением ручки 3 «УСТАНОВКА U_{c-k} / УСТАНОВКА $U_{зад}$ », установите максимально возможное значение ускоряющего напряжения ($\sim 40 \text{ B}$) для того, чтобы получить вольт-амперную характеристику с максимально возможным количеством экстремумов (обычно отчетливо наблюдается не более 3 экстремумов).

8. Установите ручки на панели осциллографа (рис.348.9) следующим образом: потенциометр 4 должен стоять в положении «0.2 ВОЛЬТ/ДЕЛ»; потенциометр 12 – в положении «1 МС/ДЕЛ»; переключатель 10 – в положение «ВНЕШ» (синхронизация внешним сигналом); ручка 8 (УРОВЕНЬ) – в крайнее левое положение против часовой стрелки; переключатель 11 – в положение «АВТО»; переключатель 7 – в положение DC (обозначение – волнистая линия под прямой).

9. Вращением ручек 13 «СМЕЩЕНИЕ ПО ОСИ X», и 5 «СМЕЩЕНИЕ ПО ОСИ Y», а также вспомогательных ручек 14 и 6 для осей X и Y, расположите картинку так чтобы вся вольт-амперная характеристика умещалась на экране. Регуляторами 2 «Яркость» и 3 «Фокус» получите резко очерченную светящуюся кривую без ореола.

10. При вращении ручки установки 3 «УСТАНОВКА U_{c-k} / УСТАНОВКА $U_{зад}$ », вольт-амперная характеристика триода будет «обрезаться» справа (рис.348.11). При этом на LCD экране 2 цифрового вольтметра отображается значение напряжения на катоде «Uset-katod=...V» и силы тока на аноде «Ianoda=...mA» в крайней правой точки кривой. Плавным вращением ручки 3 «УСТАНОВКА U_{c-k} / УСТАНОВКА $U_{зад}$ », установите минимально возможное значение ускоряющего напряжения ($U_{c-k} = 0 \text{ B}$). Вращая ручку 3 «УСТАНОВКА U_{c-k} / УСТАНОВКА $U_{зад}$ » по

часовой стрелке и, наблюдая за характеристикой на экране осциллографа, измерьте значения анодного тока I_a и значения ускоряющего напряжения на катоде $U_{c-к}$ для каждого 2-го деления (в одной клетке – 5 делений; на 2 клетки приходится 5 измерений). Результаты запишите в таблицу 348.1.

11. Отключите генератор кратковременно в течение $\sim 0,5$ секунды нажав кнопку 5 «ГЕНЕРАТОР ВКЛ/ВЫКЛ».

12. Кратковременно в течение $\sim 0,5$ секунды нажав кнопку 4 «УПРАВЛЕНИЕ» переключитесь в режим снятия характеристики задержки. При этом на LCD дисплее 2 установки отображается автоматически установленное постоянное ускоряющее напряжение, подаваемое согласно схеме (рис.348.9) в промежуток сетка – катод лампы « $U_{usk}=20V$ ».

13. Включите генератор кратковременно в течение $\sim 0,5$ секунды нажав кнопку 5 «ГЕНЕРАТОР ВКЛ/ВЫКЛ». (На LCD дисплее 2 отображается значение напряжения задержки « $U_{zaderjki}=\dots V$ » и силы тока на аноде « $I_{anoda}=\dots mA$ »).

14. Плавно вращая ручку 3 «УСТАНОВКА $U_{c-к}$ / УСТАНОВКА $U_{зад}$ » по часовой стрелке и, наблюдая за вольт-амперной характеристикой задержки $I_a = f(U_3)$ на экране осциллографа, измерьте значения анодного тока I_a для двух точек (рис.348.3,б): в начале характеристики $I_a = I_{a1}$ при $U_3 \sim 1 B$ и в начале излома участка 2 $I_a = I_{a2}$ (рис.348.3,б). Результаты запишите в таблицу 348.2.

15. Отключите генератор кратковременно в течение $\sim 0,5$ секунды нажав кнопку 5 «ГЕНЕРАТОР ВКЛ/ВЫКЛ».

16. Удерживая нажатой кнопку 4 «УПРАВЛЕНИЕ» в течение ~ 2 секунд, вернитесь в меню изменения температуры накала «=MENU1=».

17. Кратковременно в течение $\sim 0,5$ секунды одиночно нажимая кнопку «УПРАВЛЕНИЕ» установите температуру нити накала триода $T = 1200 K$.

18. Повторите пп. 4 – 15. Результаты запишите в табл. 348.1 и 348.2.

19. По окончании работы поставьте переключатель «СЕТЬ» на панели приборов в положение «ВЫКЛ» и отключите установку и осциллограф от сети.

348.5. Обработка результатов измерений

1. По результатам измерений постройте в протоколе в одной системе координат графики зависимостей значений силы тока на аноде от напряжения на катоде $I_a = f(U_{c-к})$ для температур $T = 600 K$ и $T = 1200 K$.

2. Определите из графиков значение потенциала $\Delta\varphi_{n, n+1}$, выраженное в вольтах, между 1-ым и 2-ым; 2-ым и 3-им максимумами для каждого графика отдельно. Результаты запишите в табл. 348.2.

3. По результатам всех опытов для двух температур нити накала определите среднее значение резонансного потенциала $\langle\Delta\varphi\rangle$ и сравните его с табличным значением для газа аргона, наполняющего лампу согласно

табл.348.3.

4. Определите разность токов $\Delta I_a = I_{a1} - I_{a2}$, которая пропорциональна концентрации только тех электронов, которые испытали неупругие соударения с атомами.

5. Оцените по формуле (348.6) сечение неупругого рассеяния σ электронов атомами инертного газа, наполняющего лампу. При оценке принять $\ell = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – расстояние катод-сетка газонаполненного триода, давление внутри колбы при $T = 600 \text{ К}$ принять равным $p = 5 \text{ Па}$, а при $T = 1200 \text{ К}$ давление $p = 17 \text{ Па}$.

6. Сравните полученные вами оценочные значения сечения неупругого рассеяния σ электронов атомами инертного газа с графиком рис.348.12. При сравнении учесть, что электроны в опыте по снятию характеристики задержки ускоряются постоянным напряжением $U_{\text{уск}} = 20 \text{ В}$, при этом соответственно обладая энергией $W = eU_{\text{уск}}$.

7. Вычислите длину волны λ , с которой происходит излучение при возбуждении резонансной линии атома:

$$\lambda = \frac{hc}{e \Delta \phi}, \quad (348.7)$$

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

Таблица 348.1. Вольт-амперная характеристика лампы ПМИ-2

$T = 600 \text{ К}$		$T = 1200 \text{ К}$	
$U_{\text{с-к}}, \text{ В}$	$I_a, \text{ мкА}$	$U_{\text{с-к}}, \text{ В}$	$I_a, \text{ мкА}$
2		2	
4		4	
...		...	
40		40	

Таблица 348.2. Расчетные данные

$T, \text{ К}$	$\Delta \phi_n, \text{ В}$	$\langle \Delta \phi \rangle, \text{ В}$	$I_{a1}, \text{ А}$	$I_{a2}, \text{ А}$	$\Delta I_a, \text{ А}$	$\ell, \text{ м}$	$p, \text{ Па}$	$\sigma, \text{ м}^2$	$\lambda, \text{ м}$
600									
1200									

Таблица 348.3. Потенциалы возбуждения некоторых газов

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

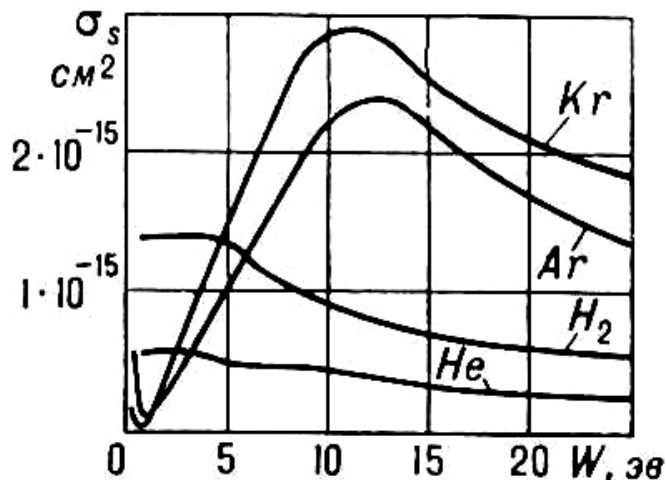


Рис.348.10. Сечение неупругого рассеяния электронов различными газами при разных значениях энергии электронов $W = eU_{\text{уск}}$

348.6. 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 на экране осциллографа вольт-амперную характеристику $I_a(U_{c-k})$ лампы. Почему наблюдается четкий ряд пиков и спадов тока на вольт-амперной характеристике лампы?
6. Существуют ли резонансные потенциалы для других газов и веществ?
7. В чем состоят различия между потенциалом возбуждения и ионизационным потенциалом атома?
8. 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?

Литература, рекомендуемая для обязательной проработки: [1], §§59,..., 63; [2], §§9,..., 16; [3], §§208,..., 212; [4], §§2.1,..., 2.4, [5], §§39.1,..., 39.7.

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики в 4-х томах. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. – М.: КноРус, 2012. – Т.3. – 368 с.

2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Атомная и ядерная физика. – М.: ФИЗМАТЛИТ, МФТИ, 2006. – Т.5. – 784 с.

3. Трофимова Т.И. Курс физики. – 20-е изд., стер. – М.: Изд-во «Академия», 2014. – 560 с.

4. Иродов И.Е. Квантовая физика. Основные законы: Учебное пособие для физич. спец. вузов. – 3-е изд. стер. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 256 с.

5. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Курс физики. – 9-е изд., стер. – М.: Изд-во «Академия», 2014. – 720 с.

Учебное издание

Сергей Олегович **Зубович**
Татьяна Александровна **Сухова**

ОПЫТ ФРАНКА И ГЕРЦА

Методические указания

План электронных изданий 2010 г. Поз. № 16В
Подписано на «Выпуск в свет» 08.10.10. Уч-изд. л. 1,08.
На магнитносителе.

Волгоградский государственный технический университет.
400131, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, корп. 1.