

Ярославский государственный педагогический
университет им. К. Д. Ушинского

Лабораторная работа № 4

Опыт Франка-Герца

Ярославль
2002

Оглавление

1. Краткая теория	3
2. Экспериментальная установка	6
3. Порядок выполнения работы	9
4. Контрольные вопросы	12

Лабораторная работа № 4

Опыт Франка и Герца

Цель работы: снятие вольтамперной характеристики газонаполненной лампы и определение критических потенциалов (потенциалов возбуждения) атомов He или Ne .

Приборы: установка ЛКК-2М, осциллограф С1-73.

Литература:

1. Шпольский Э.В. Атомная физика. т.1.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. т.3

1. Краткая теория

Атомом называется наименьшая частица химического элемента, обладающая его химическими свойствами. Атом ($d = 10^{-8}$ см) состоит из положительного ядра ($d = 10^{-13}$ см) и электронов, движущихся в кулоновском поле. Заряд ядра равен суммарному заряду его электронов. Простейшим атомом является атом водорода. Атом водорода имеет протон (ядро) и вокруг протона движется один электрон. Водородоподобными атомами являются ионы He^+ , Li^{++} , Be^{+++} и т.д.

В основу теории атома водорода положены два постулата Бора.
Первый постулат. Электроны могут двигаться только по определенным орбитам, находясь на которых они, несмотря на наличие у них ускорения не излучают. Эти орбиты соответствуют условиям:

$$M_e V_n R_n = \frac{nh}{2\pi}, \quad (1.1)$$

- M_e — масса электрона,
 n — главное квантовое число, номер орбиты электрона,
 R_n — радиус n -ой орбиты,
 V_n — скорость электрона на n -ой орбите.

Уравнение (1.1) называют также условием квантования.

Второй постулат. Атом излучает (поглощает) квант электромагнитной энергии, когда электрон переходит с орбиты с большим (меньшим)

радиусом на орбиту с меньшим (большим) радиусом. Энергия кванта равна разности энергий электрона на орбитах до и после перехода.

$$E = h\nu = E_m - E_n, \quad (1.2)$$

где ν — частота кванта, возникающего или поглощаемого при переходе.

В стационарном состоянии с $n = 1$ (основное состояние) атомы могут находиться сколь угодно долго. Если электрон в атоме, находящемся в основном состоянии, получил извне энергию, и перешел на другую орбиту с $n > 1$, то атом перешел в возбужденное состояние. В возбужденном состоянии атом имеет большую энергию, чем в основном. Возбужденное состояние неустойчиво, через $10^{-8}c$ электрон скачком (мгновенно) переходит в стационарное состояние с меньшей энергией. Излишек энергии излучается в пространство в виде монохроматического излучения, т.е. какой-то одной спектральной линии.

Частота излучения атома подчиняется условию:

$$\nu = \frac{E}{h} = \frac{E_m - E_n}{h}. \quad (1.3)$$

Для каждого перехода электрона излучается своя спектральная линия, таким образом, спектр такого излучения представляет собой отдельные линии.

Постулаты Бора не следуют ни из каких положений классической физики, они получают объяснение на основе квантовой теории. Из постулатов Бора вытекает наличие в атоме уровней энергии $E_1, E_2, E_3, \dots, E_n$. Эти значения соответствуют различным возбужденным состояниям атома. Испускание или поглощение кванта энергии сопровождается переходом атома из одного состояния в другое. Наличие в атоме дискретных уровней энергии подтверждают опыты Франка и Герца.

Непосредственные экспериментальные доказательства существования дискретных уровней энергии в атоме были получены при определении потенциалов возбуждения и ионизации атомов газа. Для того, чтобы атом мог излучать энергию, необходимо перевести его в возбужденное состояние, т.е. переместить электрон в атоме с основной орбиты на одну из внешних орбит, этот процесс называется возбуждением атома. Возбуждение может быть вызвано различными способами: нагреванием до высоких температур, неупругим столкновением атомов с быстрым свободным электроном и др.

Разберем случай прохождения свободного электрона через газ. Столкновения электронов с атомами могут происходить двумя способами. В одном случае электрон может передать часть своей энергии атому, при этом потенциальная энергия атома не изменится. Такие столкновения называют *упругими*. Столкновения другого рода ведут либо к ионизации, либо к возбуждению атома, то есть электрон столкнувшись с атомом передает электрону атома такое количество кинетической энергии, что он может либо оторваться от атома, либо перейти на более высокий уровень. Такие столкновения называются *неупругими*. Часть кинетической энергии при этом преобразуется в потенциальную.

Напишем законы сохранения энергии и импульса при упругом соударении:

$$E = \frac{m_o V^2}{2} = \frac{m_o V_1^2}{2} + \frac{M V_2^2}{2};$$

$$P = m_o V = -m_o V_1 + M V_2;$$

- m_o — масса электрона,
- M — масса атома,
- V, V_1 — скорости электрона до и после соударения соответственно,
- V_2 — скорость атома после соударения (до соударения атом покоился).

Разность энергии электрона до и после соударения обозначим:

$$\Delta E = E - \frac{m_o V_1^2}{2} = \frac{M V_2^2}{2}.$$

Относительная убыль энергии электрона:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{M V_2^2}{m_o V^2} = \left(1 + \frac{V_1}{V}\right)^2 \frac{m_o}{M}.$$

Если $|V_1| \approx |V|$, то $\frac{\Delta E}{E} \approx 4 \frac{m_o}{M}$.

Подсчитаем относительную убыль энергии электрона при неупругом соударении:

$$E = \frac{m_o V^2}{2} = \frac{(m_o + M)V_3^2}{2}; \quad P = m_o V = (m_o + M)V_3;$$

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{V^2 - V_3^2}{V^2}; \quad V = \frac{m_o + M}{m_o} V_3;$$

где V_3 – совместная скорость электрона и атома после удара. Отсюда следует:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{(m_o + M)^2 - m_o^2}{(m_o + M)^2}.$$

Сравнивая относительную убыль энергии при упругом и неупругом ударе, замечаем:

$$\frac{(m_o + M)^2 - m_o^2}{(m_o + M)^2} \gg 4 \frac{m_o}{M};$$

$$\frac{(m_o + M)^2 - m_o^2}{(m_o + M)^2} \approx 1.$$

Таким образом, если электроны взаимодействуют с атомами по закону упругого удара, то энергия электронов практически не будет изменяться. При неупругом ударе почти вся энергия электронов переходит атомам. Это дает возможность различать такие столкновения экспериментально.

В данной работе находят второй и первый потенциалы возбуждения для атомов гелия или неона, другими словами, определяют, при какой наименьшей энергии происходят первое и второе неупругие столкновения атома с быстро летящим электроном.

2. Экспериментальная установка

Принципиальная схема установки показана на рис. 2.1.

В данной установке в качестве вольтметров V_n , $V_{\text{уск}}$ и $V_{\text{зад}}$ используется универсальный мультиметр. Провода от него подключаются к соответствующим точкам схемы при измерениях напряжений накала, сетки или задержки.

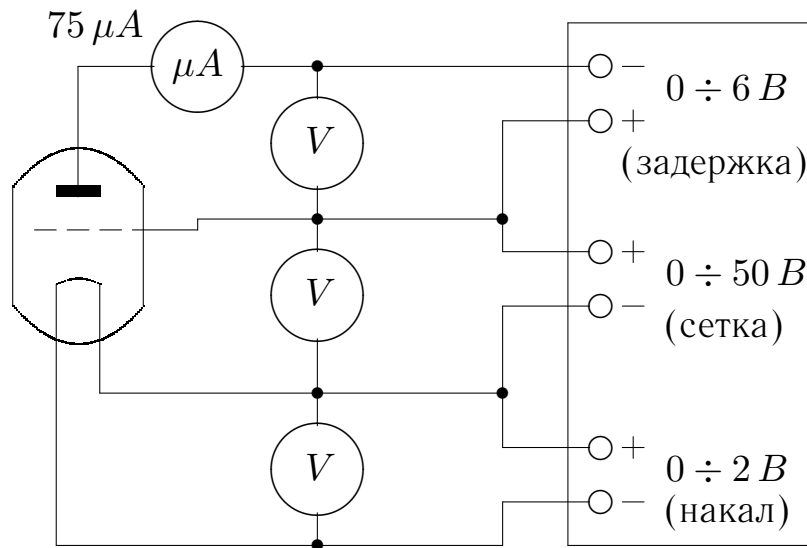


Рис. 2.1

Баллон лампы наполнен газом. В нашем случае это He (в лампе Л1) и Ne (в лампе Л2), но может быть и какой-нибудь другой газ. В классическом варианте этого опыта были использованы пары ртути. Горячий катод испускает электроны. Перед анодом ставится сетка, разность потенциалов между анодом и катодом может быть любой. На анод подается потенциал, слегка отрицательный по отношению к сетке. (При ртутном наполнении он равен $0,5\text{ В}$). Расположение электродов и давление газа подобраны так, что между сеткой и анодом столкновений почти нет, соударения между электронами, испускаемыми катодом, и атомами газа, происходят между катодом и сеткой. Если соударения упругие, то электроны не теряют энергию и достигают анода. При неупругих соударениях электроны теряют энергию и оседают на сетке.

Таким образом, назначение сетки заключается в том, чтобы вылавливать электроны, которые потеряли свою энергию вследствие неупругих соударений с атомами газа.

Опыт происходит следующим образом.

Дают на сетку потенциал, равный катодному, затем потенциал увеличивают, тем самым разгоняя вылетевшие с катода электроны (кинетическая энергия электронов возрастает). Электроны, вылетающие из катода, ускоряются и подлетают к сетке с энергией:

$$\frac{mV^2}{2} = eU_{\text{уск}}$$

Пройдя сетку, электроны попадают в пространство между сеткой и анодом, где поле мало и скорость движения электроном будет практиче-

ски постоянной. Если энергия электронов на пути от сетки к аноду не меняется, то все электроны пролетят сетку и достигнут анода, и по мере увеличения напряжения величина анодного тока I_a возрастает (см. рис. 2.2). Мы имеем участок кривой OA — обычная вольт-амперная характеристика электронных приборов.

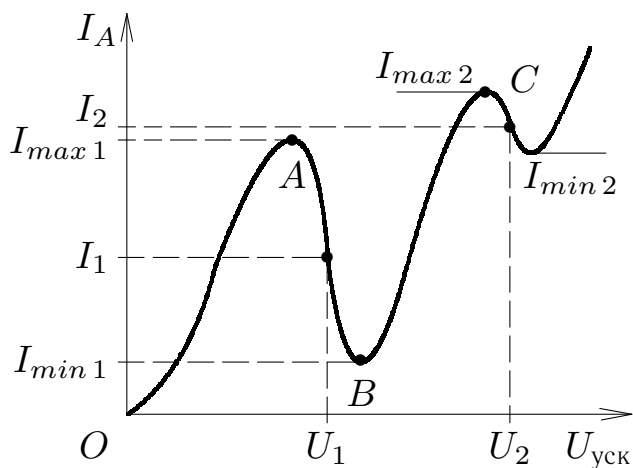


Рис. 2.2

Таким образом, кривая состоит из острых максимумов, отстоящих друг от друга на расстояние $4,9 В$ для ртути (участок BC). Такими образом, кривая состоит из острых максимумов, отстоящих друг от друга на расстояние $4,9 В$ для ртути.

Такой вид кривой говорит о том, что до тех пор, пока энергия электрона не достигла $4,9 эВ$, электрон испытывает с атомами ртути упругие столкновения, не теряет энергию и достигает анода — ток в цепи растет.

При потенциале в $4,9 В$ столкновения электронов с атомами становятся неупругими, и электрон отдает при столкновении атому ртути всю свою энергию. Такие потерявшие энергию электроны уже не смогут пролететь сетку (она их притянет, так как кинетическая энергия, а следовательно и скорость электронов очень незначительна) и не достигнут анода, что дает резкое снижение тока. Если же энергия электрона заметно превосходит $4,9 эВ$, то такие электроны потеряв часть своей энергии при неупругом ударе, все же обладают достаточной энергией, чтобы преодолеть потенциал сетки и достигнуть анода. При энергии электрона равной $9,8 эВ$, $14,7 эВ$ и т.д. электроны претерпевают неупругие соударения дважды и трижды, что дает второй и третий максимумы.

Таким образом, для атомов ртути энергия в $4,9 эВ$ имеет особое значение. Меньшую или большую (не кратную $4,9 эВ$) энергию атомы ртути не воспринимают, то есть атом ртути может обладать не любым запасом энергии, а только строго определенным. Такой ход кривой вольтамперной

Так будет обстоять дело до тех пор, пока разность потенциалов между катодом и сеткой $U_{уск}$ не достигнет определенной величины (в опыте с парами ртути это $4,9 В$). Как только ускоряющий потенциал $U_{уск}$ достигнет этой величины, анодный ток резко убывает (участок AB), а затем опять при дальнейшем увеличении $U_{уск}$ начинает возрастать до по-

3. Порядок выполнения работы

характеристики и доказывает существование дискретных уровней энергии в атоме. Ускоряющий потенциал $4,9 \text{ В}$ называется *первым потенциалом возбуждения*. Как показали опыты, при неупругих ударах газ или пары металла начинают светиться и излучать в пространство совершенно определенные для данного газа спектральные линии с частотой ν , которую можно определить из следующего соотношения:

$$h\nu = eU_1$$

В данной лабораторной работе свечение газа слабо заметно (у разных ламп газ светится с разной интенсивностью).

Практическое замечание. Так как катод и сетка лампы сделаны из различных металлов, то вольтамперная характеристика, в данном случае, будет сдвинута относительно идеальной характеристики на величину контактной разности потенциалов, то есть первый максимум на характеристике будет соответствовать первому потенциалу возбуждения только с учетом поправки на контактную разность потенциалов. Поэтому первый потенциал возбуждения следует определять как разницу между первым и вторым максимумом:

$$\phi_1 = U_2 - U_1$$

где U_1 и U_2 — первый и второй потенциалы возбуждения с "примесью" контактной разности потенциалов;
 ϕ_1 — первый потенциал возбуждения "в чистом виде".

Значения первых потенциалов ϕ_1 возбуждения инертных газов:

Гелий	-	21,6 В	Криптон	-	9,9 В
Неон	-	16,6 В	Ксенон	-	8,3 В
Аргон	-	11,5 В			

3. Порядок выполнения работы

Задание 1. Ознакомиться с описанием, конструкцией и принципом действия лабораторной установки.

Задание 2. Снятие вольтамперной характеристики газонаполненной лампы.

Работа выполняется сначала с лампой Л1, а затем с лампой Л2. Установите напряжение задержки $U_{\text{зад}} \approx 4,6 \text{ В}$. Тумблер режима измерений поставьте в положение "=".

Перед началом работы установку следует настроить. Настройка заключается в регулировке тока накала лампы. Порядок следующий.

1. Подключите мультиметр для измерения $U_{\text{уск}}$ и установите $U_{\text{уск}} \approx 38 \text{ В}$ для Л1 или $U_{\text{уск}} \approx 29 \text{ В}$ для Л2 в районе второго максимума.
2. Увеличивая ток накала, добейтесь появления анодного тока (около 0,5 шкалы микроамперметра).
3. Регулируя в небольших пределах $U_{\text{уск}}$, добейтесь максимальных показаний анодного микроамперметра.
4. Изменяя ток накала, установите стрелку анодного микроамперметра в последнюю четверть шкалы.
5. Выставьте напряжение на сетке $U_{\text{уск}} = 0$.

Лабораторная установка готова к снятию вольтамперной характеристики

$$I_a = f(U_{\text{уск}}).$$

Значение анодного тока можно записывать в делениях шкалы (*а не в $\mu\text{А}$!*). Точки для построения графика не имеет смысла снимать через одинаковые интервалы $\Delta U_{\text{уск}}$. На участках монотонного изменения I_a точки можно ставить редко, а в районах максимумов — часто (чтобы не пропустить эти максимумы).

Выберите масштаб для I_a и $U_{\text{уск}}$ и постройте график зависимости

$$I_a = f(U_{\text{уск}}).$$

По графику определите первый потенциал возбуждения для атомов He (Л₁) или Ne (Л₂).

$$I_1 = \frac{I_{\text{max1}} + I_{\text{min1}}}{2}; \quad I_2 = \frac{I_{\text{max2}} + I_{\text{min2}}}{2}.$$


Используя формулу $h\nu = e\phi_1$, подсчитайте длину волны излучаемого возбужденными атомами света.

Задание 3. Получение на экране осциллографа вольтамперной характеристики.

Вольтамперную характеристику типа приведенной на рис. 2.2 можно получить на экране осциллографа. Для этого сигналы "X" и "Y" с

3. Порядок выполнения работы

установки подайте на соответствующие входы осциллографа. Подключите мультиметр для измерения $U_{\text{уск}}$ и установите напряжение на сетке немного (на $3 \div 5 \text{ В}$) больше второго потенциала возбуждения (второго максимума).

Тумблер режима измерений поставьте в положение "  ". Мультиметром контролируйте ток накала.

На осциллографе отключите генератор развертки и поставьте коэффициент отклонения канала "Y" 1 В/дел .

Включите осциллограф. После прогрева на экране должна появиться горизонтальная линия. Отрегулируйте яркость и фокусировку, и поместите линию в нижнюю часть экрана. Плавно увеличивая ток накала до $\sim 1,3 \text{ А}$ (приблизительно), наблюдайте появление анодного тока на вольтамперной характеристике.

Внимание! Из-за особенностей устройства данной лабораторной установки, вольтамперная характеристика на экране будет рисоваться справа-налево!

Подбирая $I_{\text{н}}$, $U_{\text{уск}}$, $U_{\text{зад}}$, получите удобную для наблюдения вольтамперную характеристику. Продемонстрируйте ее преподавателю.

4. Контрольные вопросы

1. В чем заключаются постулаты Бора?
2. Что такое потенциал возбуждения атома?
3. Каким путем может быть вызвано возбуждение атомов газа?
4. Каков физический смысл упругого и неупругого соударения электронов с атомом?
5. Для чего в опыте Франка и Герца служит сетка?
6. Объяснить ход вольтамперной характеристики в опыте Франка и Герца?
7. Покажите, что первый потенциал возбуждения атома ртути $4,9 \text{ В}$ соответствует наиболее интенсивной линии в ее спектре ($253,7 \text{ нм}$).
8. Как влияет на ход вольтамперной характеристики величина задерживающего потенциала?