

Лабораторная работа 49.1



Опыт Франка - Герца

Методическое руководство

Москва 2014 г.

Опыт Франка - Герца

1. Цель лабораторной работы

Цель работы: изучение строения атома и квантовой теории постулатов Бора.

2. Задачи лабораторной работы

Задача: экспериментальное определение первого потенциала возбуждения атомов аргона.

3. Экспериментальное оборудование, приборы и принадлежности



Рис. 1



Рис. 2

Лабораторная установка (рис.1) представляет собой заключенные в металлический корпус источники питания для многоэлектродной вакуумной лампы (рис.2), установленной за съемной панелью правой боковой стороны установки. На лицевую панель установки (рис.1) вынесены необходимые переключатели, ручки регулировок напряжений и измерительные приборы – амперметр и вольтметр с тремя разными шкалами.

К приборам и принадлежностям относятся компьютер, необходимое программное обеспечение, соединительный кабель и встроенные в лабораторную установку датчики тока и напряжения.

4. Теоретическая часть

В конце XIX века и начале XX столетия в физике были проведены эксперименты, которые сыграли решающую роль в переходе от классических представлений к идеям современной физики и легли в основу квантовой механики и атомной теории.

Как выяснилось, спектры излучения разреженных газов (т.е. спектры отдельных невзаимодействующих друг с другом атомов) состоят из отдельных спектральных линий, образуя т.н. линейчатый спектр. Теоретически линейчатый спектр излучения объяснил Нильс Бор в 1913 году, сформулировав два постулата развитой им квантовой теории строения атома:

1. Атом может длительное время находиться в определенных стационарных состояниях. В этом состоянии электроны атома движутся по стационарным орбитам, не излучая при этом энергию в виде электромагнитной волны. Эти орбиты соответствуют следующим соотношениям:

$$m_e v_n r_n = n \frac{h}{2\pi}; \quad n = 1, 2, 3, \dots,$$

где n – номер стационарной орбиты или главное квантовое число; $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг – масса электрона; v_n – его скорость на n -ой орбите радиуса r_n , $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка.

2. При переходе электрона с одной стационарной орбиты на другую излучается или поглощается один фотон (квант электромагнитного излучения) с энергией

$$h\nu = E_{n2} - E_{n1},$$

где E_{n2}, E_{n1} – энергии стационарных состояний атомов до и после излучения (поглощения). Набор всевозможных дискретных частот $\nu = (E_{n2} - E_{n1})/h$ квантовых переходов определяет линейчатый спектр атомов.

Наиболее непосредственным и поразительным экспериментальным подтверждением существования дискретных уровней энергии изолированных атомов, постулированных теорией Бора, явились опыты Франка-Герца (1912-1914 гг.). За эту работу им в 1925 году была присуждена Нобелевская премия.

Дискретность атомных уровней проявляется во многих явлениях и в первую очередь в опытах по возбуждению и ионизации атомов в результате столкновения с электронами. Столкновения бывают как упругие, так и неупругие, в соответствии с изменением начальной кинетической энергии. Если сумма кинетических энергий двух частиц до соударения равна сумме кинетических энергий этих частиц после соударения, хотя и распределены эти энергии между ними по-другому, то столкновение является упругим. Если же часть кинетической энергии пойдет на изменение внутреннего состояния одного из сталкивающихся тел, то такое столкновение является неупругим. Так как масса электрона значительно меньше массы атома, то его

кинетическая энергия при упругом столкновении с атомом меняется незначительно, а происходит только изменение направления скорости.

Для доказательства существования неупругих столкновений Франком и Герцем был проведен целый ряд опытов. Схема одного из вариантов установки, с помощью которой проводились такие опыты, приведена на рис.3. Основной частью установки является трубка, заполненная исследуемым газом (у Франка и Герца это были пары ртути) при небольшом давлении. Внутри трубки находится катод К, являющийся эмиттером электронов, сетка С1, анод А и коллектор – С2.

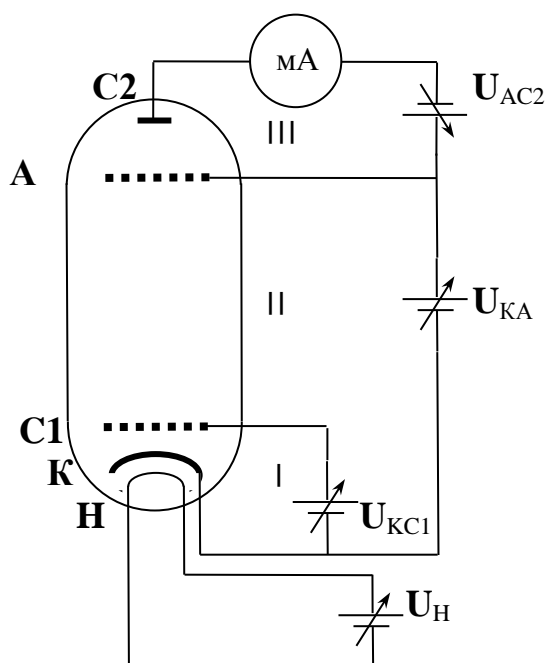


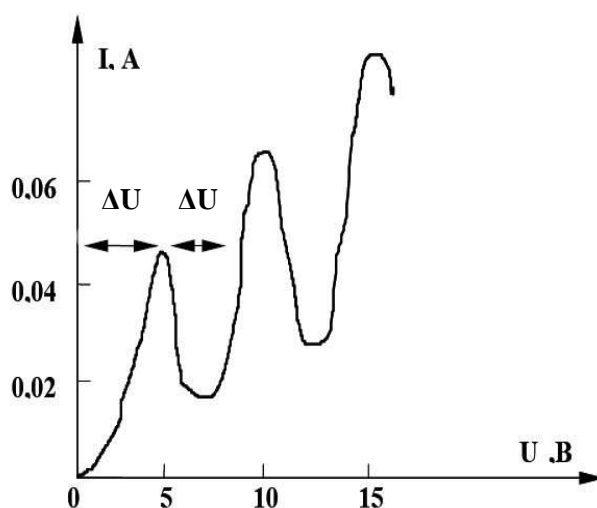
Рис. 3

Разогретый с помощью накальной нити Н катод за счет термоэлектронной эмиссии испускает электроны. Приложенная между катодом К и сеткой С1 (область I) разность потенциалов U_{KC1} порядка 3÷4,5 В компенсирует прикатодную разность потенциалов, возникающую за счет пространственного отрицательного заряда, сформированного вблизи катода облачком вылетевших электронов. Между катодом К и анодом А прикладывается разность потенциалов U_{KA} . Двигаясь от катода к аноду в электрическом поле, электроны постепенно набирают энергию. Снимается зависимость силы тока I в коллекторе С2 от U_{KA} . Между коллектором С2 и анодом А, прикладываются небольшая (порядка нескольких вольт) замедляющая разность потенциалов. Ускоренные электроны испытывают соударения с атомами газа в области II. При малых ускоряющих напряжениях U_{KA} энергия электрона, налетающего на атом, недостаточна для того, чтобы

перевести его в возбужденное состояние, и происходят только упругие столкновения. При этом электрон практически не теряет энергию из-за своей существенно меньшей по сравнению с атомом массы. Ток лампы монотонно растет с ростом $U_{КА}$. По мере увеличения разности потенциалов энергия электронов увеличивается и, наконец, оказывается достаточной для возбуждения атомов. Это происходит в конце участка разгона, вблизи анода А. При таких неупругих столкновениях кинетическая энергия налетающего электрона передается атому разряженного газа, вызывая переход одного из его электронов с основного на ближайший свободный энергетический уровень. Так как между коллектором и анодом поддерживается небольшое задерживающее напряжение (потенциал коллектора меньше потенциала анода), ток коллектора резко уменьшается, поскольку при неупругих соударениях с атомами электроны почти полностью теряют свою энергию и не могут преодолеть задерживающего потенциала. В этом случае электроны после неупругих столкновений оседают на аноде. Если энергия электронов после соударения достаточна для преодоления замедляющего потенциала в области III, то они попадут на коллектор С2. Следовательно, показания миллиамперметра зависят от потери электронами энергии при ударе.

При дальнейшем увеличении напряжения $U_{КА}$ ток коллектора вновь возрастает, поскольку электроны после неупругого столкновения успевают набрать энергию, достаточную для преодоления задерживающего потенциала.

Следующие замедление роста происходит, когда часть электронов неупруго сталкиваются с атомами два раза: первый раз посередине пути, второй – у сетки (анода) А, и т.д. Таким образом на кривой зависимости тока коллектора от напряжения между катодом и анодом А наблюдается ряд



Кривая зависимости анодного тока от ускоряющей разности потенциалов. Опыт Франка-Герца

Рис. 4

максимумов и минимумов, отстоящих друг от друга на равные расстояния

ΔU . Эти расстояния определяют значения энергии перехода атома из основного состояния в ближайшее возбужденное состояние. Эта характерная разность ΔU носит название **первый потенциал возбуждения**

В опыте наблюдался (рис.4) монотонный рост I при увеличении ускоряющего потенциала вплоть до 4,9 в, то есть электроны с энергией $E < 4,9$ эВ испытывали упругие соударения с атомами ртути (Hg) и внутренняя энергия атомов не менялась. При значении $U_{KA} = 4,9$ в (и кратных ему значениях 9,8 в, 14,7 в) появлялись резкие спады тока. Это определённым образом указывало на то, что при этих значениях U_{KA} соударения электронов с атомами носят неупругий характер, т. е. энергия электронов достаточна для возбуждения атомов Hg. При кратных 4,9 эВ значениях энергии электроны могут испытывать неупругие столкновения несколько раз. Таким образом, опыт Франка - Герца показал, что спектр поглощаемой атомом энергии не непрерывен, а дискретен, минимальную порцию которой, равную 4,9 эВ, может поглотить атом Hg. Значение длины волны $\lambda = 253,7$ нм свечения паров Hg, возникавшее при $U_{KA} > 4,9$ В, оказалось в соответствии со вторым постулатом Бора

На установках, аналогичной описанной выше, можно производить измерения первых и более высоких потенциалов возбуждения для различных атомов, а также измерять ионизационные потенциалы. Ионизационным потенциалом называется энергия ионизации (энергия, необходимая для отрыва электрона от атома), деленная на заряд электрона.

Измерение ионизационных потенциалов наиболее удобно проводить, измеряя ток положительных ионов, возникающих в результате ионизации атомов электронным ударом. Для проведения таких измерений нужно увеличить разность потенциалов между сеткой и анодом, создав в этом зазоре достаточно большое поле, задерживающее для электронов и ускоряющее для положительных ионов. При такой постановке опыта амперметр регистрирует появление анодного тока только при значениях U_{KA} , превышающих ионизационный потенциал.


5. Описание лабораторной установки




Рис.4

В предлагаемом для проведения опыта в вакуумной лампе находится разреженный газ. На рис. 4 показаны выведенные на лицевую панель переключатель датчика напряжений, ручки регулировок напряжений U_{KC1} (Сетка 1), U_{AC2} (Сетка 2) и U_{KA} (Анод), переключатель режимов накала катода, а также переключатель выбора коэффициента усиления тока коллектора. Диапазоны допустимых значений сеточных напряжений указаны на лицевой панели прибора. На правой боковой поверхности корпуса имеется таблица с рекомендованными для данной установки параметрами.

6. Порядок проведения лабораторной работы

1. Подключите с помощью кабеля измерительный канал лабораторной установки к USB – входу компьютера.
2. Убедитесь, что регулятор напряжения анода «Анод» находится в минимальном (крайне левом) положении. Включите установку и дайте прогреться вакуумной лампе течение 5 минут, установив напряжение питания нити накала, равное 4,5 В (рекомендовано в таблице на правой боковой поверхности корпуса).
3. Включите компьютер и запустите программу «Практикум по общей физике». На панели устройств выберите соответствующий сценарий проведения эксперимента (Alt+C) .

4. Переключая «Сетка1 – Сетка2 – Анод» и вращая соответствующие регуляторы «Сетка1» и «Сетка2», установите величины сеточных напряжений и множителя тока в соответствии с рекомендациями таблицы:
 $U_{KC1} = 2,5 \text{ В}$; $U_{AC2} = 9 \text{ В}$; множитель тока – 10^{-9} .
5. Запустите измерения, выбрав на панели инструментов кнопку «Запустить измерения» . На экране появится соответствующее окно для вольтамперной характеристики.
6. Выберите положение «Анод» на переключателе «Сетка1 – Сетка2 – Анод». Вращая регулятор напряжения анода «Анод», изменяющего напряжение U_{KA} (от 0 до 100 В), постройте вольтамперную характеристику (рис. 5). Повышение напряжения следует немедленно прекратить, если значение тока резко возросло и вышло за рамки экрана.

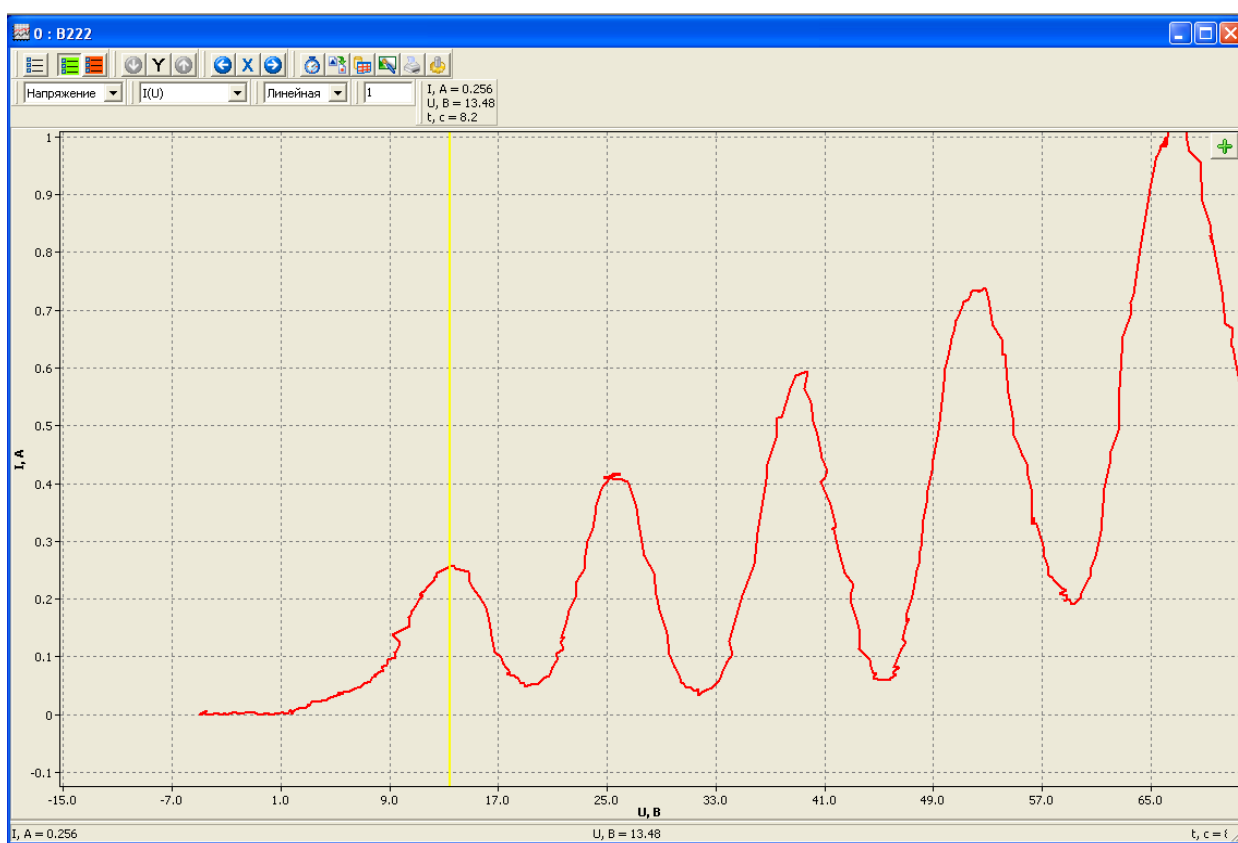



Рис. 5

7. По окончании эксперимента остановите измерения, нажав на кнопку «Стоп»  и верните напряжение на промежутке «анод – катод» к нулевому значению.

7. Обработка результатов измерений

1. Подведите указатель мыши к первому максимуму ВАХ. Установите в этом месте жёлтый вертикальный маркер, нажав левую кнопку мыши.

- Зафиксируйте значение напряжения $U(1)$, появившееся в нижней части окна с графиком.
- Установите маркер на втором максимуме ВАХ и выпишите значение напряжения $U(2)$. Точно так же поступите и с остальными максимумами зависимости тока от напряжения.
 - Вычислите первый потенциал возбуждения атомов исследуемого газа по формуле:

$$\Delta U = U_{i+1} - U_i$$

- и найдите среднее значение полученной величины.
- По таблице 1 определите каким газом заполнена трубка.
 - При возбуждении атомов исследуемого газа происходит последующее излучение фотона с длиной волны λ , которую легко можно вычислить, используя закон сохранения энергии. Электрон, проходя ускоряющую разность потенциалов, набирает энергию $e \cdot \Delta U$, которую передаёт атому инертного газа. Атом переходит в возбуждённое состояние, излучая длину волны λ . Таким образом:

$$h \frac{c}{\lambda} = e \cdot \Delta U \quad (1)$$

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.

Посчитайте длину волны λ (в нм) излучаемого фотона с помощью формулы (1).

Определите к какой области видимого спектра относится полученное излучение.

ПОТЕНЦИАЛ ВОЗБУЖДЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ГАЗОВ

Таблица 1

Газ	H ₂	He	Ne	Ar	Kr	Xe	Hg	Cs
ΔU , В	11,2	20,9	16,6	11,6	10,0	8,5	4,9	1,4

8. Контрольные вопросы

1. Какие постулаты выдвинул Бор в теории атома водорода?
2. Какие проблемы атомной физики и каким образом пытался разрешить Н.Бор с помощью своих постулатов?
3. Как де Бройль объяснил правило Бора квантования орбит электрона в атоме водорода?
4. Охарактеризуйте физическую сущность и значимость в атомной физике опытов Франка и Герца?
5. Почему на вольтамперной характеристике лампы в опыте Франка-Герца наблюдаются неоднократные спады анодного тока?
6. Почему анодный ток в опыте уменьшается в минимумах не до нуля?
7. Какие столкновения электронов с атомами называются упругими, а какие – неупругими? На каких участках вольтамперной характеристики имеют место упругие, а на каких – неупругие столкновения?
8. С какой целью на коллектор подается задерживающее напряжение? Из каких соображений оно выбирается?
9. Почему энергия электрона в атоме квантуется?
10. Какие состояния атома называются стационарными?
11. Чем основное состояние атома отличается от возбужденного?
12. Что такое первый потенциал возбуждения? Какое состояние атома называется основным, а какое возбужденным?
13. Что такое потенциал ионизации? Чем он отличается от потенциала возбуждения? Какой из них больше, а какой меньше?
14. Как необходимо настроить лабораторную установку, чтобы измерить потенциал ионизации?
15. Возможно ли на используемой лабораторной установке измерять последующие за первым потенциалы возбуждения?