



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Физика»

Практикум
по дисциплине «Физика»

Лабораторная работа О-28

**Опыт Франка-Герца
по определению энергии
возбуждения атома неона**

Авторы
Беликова Т.С.,
Мардасова И.В.,
Шкиль Т.В.

Ростов-на-Дону, 2019

Аннотация

Лабораторная работа предназначена для студентов инженерных направлений подготовки всех форм обучения, в программу учебного курса которых входит выполнение лабораторных работ по физике.

Авторы

к.ф.-м.н., доцент Беликова Т.С.,
к.ф.-м.н., доцент Мардасова И.В.,
к.ф.-м.н., доцент Шкиль Т.В.

Оглавление

Краткая теория	4
Описание экспериментальной установки	10
Порядок выполнения работы	12
Контрольные вопросы	15
Список литературы	15

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА О-28

Опыт Франка-Герца по определению энергии возбуждения атома неона

Цель работы: определение первого потенциала возбуждения и энергии возбуждения атома неона.

Оборудование: блок питания; электронная лампа в защитном кожухе, заполненная неонам; персональный компьютер; соединительные кабели.

Краткая теория

Современные представления о строении атомов сформировались в результате многочисленных экспериментальных исследований. На основании опытов по рассеиванию α – частиц Резерфордом была предложена ядерная (или планетарная) модель атома.

Согласно Резерфорду, атом представляет собой систему зарядов, в центре которой расположено тяжелое положительное ядро с зарядом Ze (Z – число протонов, e – заряд протона) размером $\sim 10^{-14}$ м, вокруг которого по орбитам движутся Z электронов.

Нильс Бор наделил ядерную модель атома Резерфорда новыми квантовыми свойствами. Для этого Бору пришлось ввести предположения, противоречащие классической механике и электродинамике, доказать которые он был не в состоянии и назвал их постулатами.

Первый постулат Бора (постулат стационарных состояний): электрон в атоме может находиться только в некоторых определенных устойчивых *стационарных* состояниях. В стационарном состоянии атом не излучает и не поглощает энергию. Стационарным состояниям соответствуют стационарные орбиты электронов, для которых момент импульса электрона равен целому кратному от $\hbar = \frac{h}{2\pi}$:

$$m_e v r_n = n \hbar \text{ – правило квантования орбит,}$$

где m_e – масса электрона,

v – скорость электрона на орбите радиуса r_n ,

n – номер орбиты электрона,

$h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка.

Название дисциплины

Второй постулат Бора (правило частот): при переходе атома из одного стационарного состояния с энергией E_n в другое – с энергией E_m происходит излучение или поглощение кванта с энергией

$$h\nu = E_n - E_m,$$

где ν – частота фотона.

Все возможные значения энергии атома, которыми он может обладать, называют *энергетическими уровнями*. Энергетические уровни атома изображают в виде горизонтальных прямых, расположенных друг относительно друга на расстояниях, пропорциональных разности энергий атома [1].

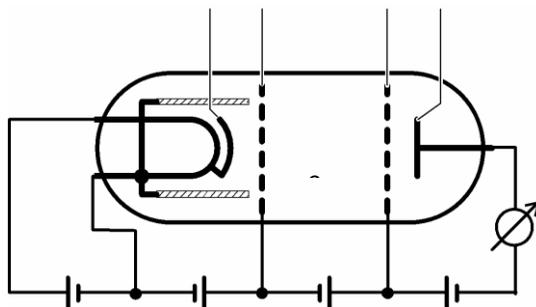
Используя теорию Бора и схему энергетических уровней, легко объяснить процессы испускания и поглощения излучения атомом.

Чтобы атом получил возможность излучать, его нужно возбудить, т.е. перевести электрон на более высокий энергетический уровень (нагреванием, освещением и т. д.). В возбужденном состоянии атом неустойчив и через $t \sim 10^{-8}$ с переходит на более близкую к ядру орбиту, испуская квант электромагнитного излучения (фотон) с энергией $E = h\nu$.

Экспериментальное подтверждение постулатов было получено в опытах немецких учёных Джеймса Франка и Густава Герца, которые, начиная с 1913 г., изучали соударение электронов с атомами паров и газов. За эти исследования в 1925 г. Франк и Герц были удостоены Нобелевской премии с формулировкой «за прямое экспериментальное подтверждение существования дискретных энергетических уровней в атоме».

Идея опытов была такова: для обнаружения стационарных состояний нужно исследовать поведение атома при передаче ему определённых количеств энергии. Если стационарные состояния существуют, то для возбуждения атома ему нужно передать энергию, превышающую разность энергий двух стационарных состояний. При передаче меньшей энергии атом не возбуждается [2]. Передача атомам энергии осуществлялась при бомбардировке их электронами, ускоренными электрическим полем.

Принципиальная схема экспериментальной установки, используемой в данной работе, представлена на рис. 1.



Р

рис. 1

В электронной лампе, заполненной неоном при давлении 10^3 Па, расположены четыре плоскопараллельных электрода: оксидированный катод косвенного накала K , две сетки C_1 и C_2 и анод A ; U_n – напряжение накала катода. Испущенные катодом электроны незначительно ускоряются между катодом K и сеткой C_1 небольшим ($\sim 2-3$ В) напряжением U_3 , попадают в ускоряющее поле между сетками C_1 и C_2 , создаваемое напряжением U_1 , и достигают анода; возникает анодный ток. Между сеткой C_2 и анодом A подаётся задерживающее напряжение U_2 , поэтому электроны, прошедшие через сетку C_2 с малыми скоростями, отбрасывается обратно к сетке, оседают на ней и не дают вклада в анодный ток.

Отличие данной установки от классической схемы опытов Франка и Герца заключается в наличии дополнительной сетки C_1 , уменьшающей влияние пространственного заряда электронного облака вокруг катода. Напряжение U_3 эффективно удаляет электроны из прикатодной области.

При движении в межсеточном пространстве электроны испытывают соударения с атомами неона. Оказалось, что эти соударения могут быть упругими и неупругими в зависимости от кинетической энергии электрона, которую он приобрёл, пройдя ускоряющую разность потенциалов U_1 :

Название дисциплины

$$\frac{m_e v^2}{2} = eU_1, \quad (1)$$

где m_e – масса, $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ – заряд, v – скорость электрона.

Упругими называются такие соударения, при которых электрон отскакивает от атома, почти не изменяя величины скорости и энергии (поскольку масса электрона во много раз меньше массы атома). При неупругих соударениях значительная часть энергии электрона передаётся атому, который при этом возбуждается.

Согласно боровской теории, каждый атом может получить только определённую энергию, переходя при этом в одно из возбуждённых состояний. Если в атомах действительно существуют стационарные состояния, то электроны, неупруго сталкиваясь с атомами, должны терять энергию дискретно, определёнными порциями, равными разности энергий соответствующих стационарных состояний атома.

Первым потенциалом возбуждения U_{B1} называется разность потенциалов, которую должен пройти электрон в ускоряющем электрическом поле, чтобы накопить энергию, необходимую для перевода атома из невозбуждённого в первое возбуждённое состояние.

Энергия, соответствующая такому переходу, называется энергией возбуждения:

$$E_B = eU_{B1}. \quad (2)$$

Снимая зависимость анодного тока I_A от ускоряющего напряжения U_1 , обнаруживают, что при увеличении U_1 сила тока сначала монотонно возрастает, но при $U_1 = U_{B1}$ резко падает. При дальнейшем росте напряжения U_1 сила тока вновь начинает увеличиваться, но при $U_1 = 2U_{B1}$ наблюдается повторное резкое падение силы тока. Третий спад тока соответствует значению $U_1 = 3U_{B1}$ (рис. 2).

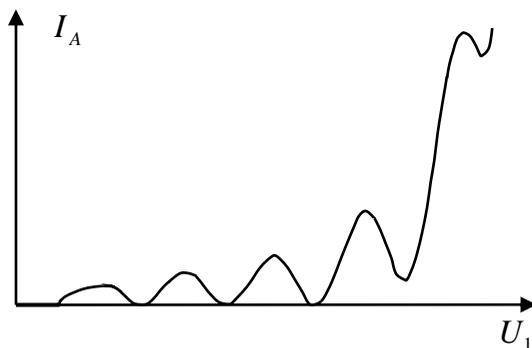


Рис. 2

Такая зависимость $I_A = f(U_1)$ объясняется следующим образом. Пока энергия электрона меньше энергии возбуждения атома, $eU_1 < eU_{B1}$, соударения электронов с атомами происходят упруго, они достигают анода и создают ток I_A . С ростом U_1 , согласно (1), увеличивается скорость, с которой электроны достигают сетки C_2 , растёт число электронов, проскочивших сетку, и, следовательно, сила тока увеличивается. При $eU_1 = eU_{B1}$ энергия электронов становится достаточной, чтобы вызвать неупругое соударение, при котором электрон отдаёт атому всю свою кинетическую энергию и переводит его в возбуждённое состояние.

Электроны, потерявшие кинетическую энергию, уже не смогут преодолеть тормозящее поле U_2 между сеткой C_2 и анодом и достигнуть анода. Этим и объясняется первое резкое падение анодного тока (рис. 2).

При значениях энергии, кратных величине eU_{B1} , электроны могут испытывать с атомом 2, 3, ... неупругих соударения; в каждом таком случае должно наблюдаться резкое падение тока. Второй спад тока на рис. 2 соответствует электронам, испытавшим два неупругих столкновения и т.д.

Следует иметь в виду, что положение первого спада вольтамперной характеристики (ВАХ) на рис. 2 может отличаться от истинного значения U_{B1} из-за наличия контактной разности потенциалов между катодом и

Название дисциплины

сеткой. Влияние системной погрешности, обусловленной этим фактором, можно исключить, если определять U_{B1} по расстоянию между соседними максимумами или соседними минимумами.

Для преодоления задерживающего поля имеет значение не модуль скорости электронов, а только её продольная (направленная вдоль поля) составляющая. Величина этой составляющей различна для вылетающих из катода электронов и меняется при их упругих соударениях с атомами, поэтому каждый провал имеет на ВАХ конечную ширину. Форма провалов зависит от геометрии электродов и давления газа в сосуде.

Атомы, возбуждённые при неупругих соударениях, через очень небольшой промежуток времени ($\sim 10^{-8}$ с) возвращаются в основное состояние, излучая квант энергии

$$h\nu = eU_{B1}.$$

Зная U_{B1} , можно рассчитать частоту ν и длину волны λ излучения:

$$\nu = \frac{eU_{B1}}{h}, \quad \lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{ch}{eU_{B1}}. \quad (3)$$

где $c = 3 \cdot 10^8 \frac{м}{с}$ – скорость

света в вакууме.

Теория Бора была важным этапом в развитии атомной физики; она позволила рассчитать спектры атома водорода и водородоподобных атомов, однако не давала возможность объяснить спектр даже гелия, следующего за водородом в таблице элементов. Рассчитать спектры многоэлектронных атомов стало возможным только в рамках квантовой механики.

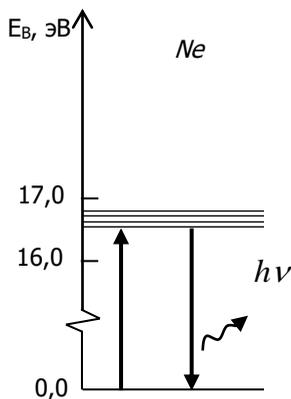


Рис. 3

Атом неона, как любого инертного газа, в основном (невозбуждённом состоянии) имеет заполненную валентную электронную оболочку. Согласно квантовой механике, первое возбуждённое состояние представляет собой группу из четырёх близко расположенных уровней с энергией возбуждения от 16,619 эВ до 16,848

эВ (различающихся величиной спинового и полного моментов электрона) [3]. Фрагмент схемы энергетических уровней неона приведён на рис. 3. Стрелки соответствуют переходу атома из основного в первое возбужденное состояние и последующего его возвращению в основное состояние, сопровождающееся испусканием фотона с энергией $h\nu$.

Описание экспериментальной установки

На рис. 4 представлен общий вид установки, состоящей из заполненной неоном электронной лампы в защитном кожухе 1, блока питания и управления 2 и персонального компьютера (ПК) 3. Компьютер с программным обеспечением «PHYWE Measure» выполняет роль устройства управления, сбора и обработки данных. Принципиальная схема и принцип действия электронной лампы рассмотрены в разделе «Краткая теория». При выполнении работы значения напряжения накала U_H , напряжения U_3 и тормозящего напряжения U_2 остаются постоянными; рекомендуемые значения: $U_H = 8B$, $U_2 = 7B$, $U_3 = 3B$.

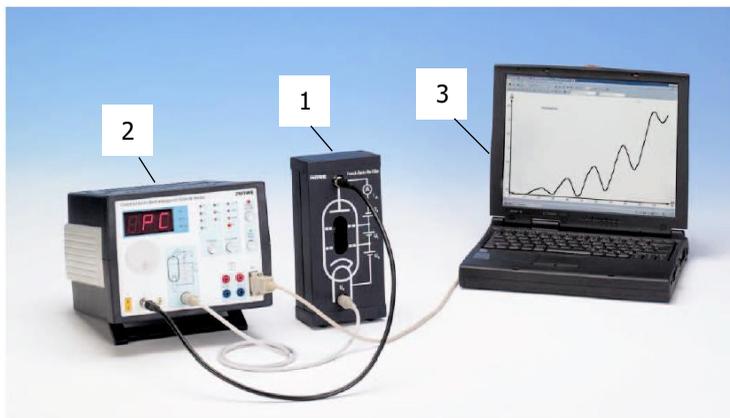


Рис. 4

Ускоряющее напряжение U_1 в ходе эксперимента монотонно возрастает от нулевого до максимально возможного значения 99,9 В.

При выполнении лабораторной работы категорически запрещается превышать указанные значения напряжений, так как это может привести к выводу лабораторной установки из строя. Чтобы избежать повреждения элементов электронной лампы в случае превышения анодным

Название дисциплины

током максимального значения 50 нА, величина тока ограничивается блоком управления на данном уровне и через 7 секунд происходит автоматическое отключение лампы от цепи питания. Для возобновления измерений необходимо уменьшить значения U_3 и (или) U_H .

Блок питания и управления 2 выполняет функции программируемого источника рабочих напряжений для электронной лампы, цифрового измерителя анодного тока I_A и устройства сопряжения с персональным компьютером. Внешний вид лицевой панели блока представлен на рис. 5.

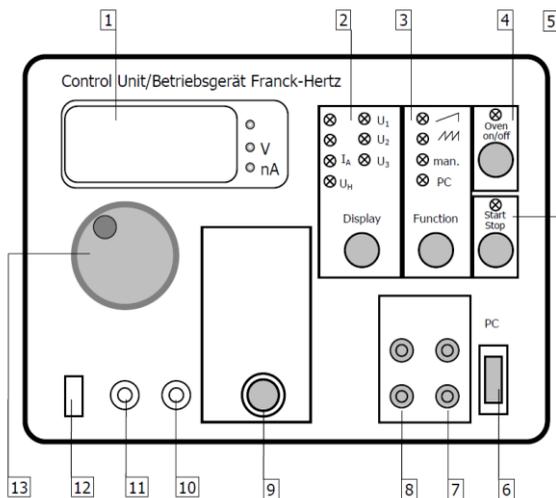


Рис. 5

Функциональное назначение элементов лицевой панели следующее.

1 – трёхразрядный цифровой индикатор для вывода значений напряжений и анодного тока;

2 – блок кнопки «Display», определяющий выбор параметра, выводимого на индикатор 1: I_A – анодный ток, U_H – напряжение накала катода, U_1 – ускоряющее напряжение, U_2 –задерживающее напряжение, U_3 – управляющее напряжение;

3 – блок кнопки «Function» – выбор режима проведения измерений:  – работа с самописцем,  – работа с осциллографом, «man» – ручной режим, «PC» – измерение под управлением персонального компьютера;

Название дисциплины

- 4 – кнопка «Oven on/off» – в данной работе не используется;
- 5 – кнопка «Start/Stop» – запуск и прекращение измерений;
- 6 – девятиконтактный разъём стандарта RS-232 для соединения блока управления с персональным компьютером;
- 7 и 8 – пары гнезд аналоговых выходов Y и X, в данной работе не используются;
- 9 – многоконтактный разъём с выходными напряжениями блока управления;
- 10 – контакт заземления;
- 11 – вход для подключения коаксиального кабеля для измерения анодного тока;
- 12 – разъём для подключения термопары (не используется);
- 13 – поворотный регулятор для задания выходных напряжений блока управления.

Сетевой тумблер расположен на задней панели блока.

Порядок выполнения работы

1. Подключить установку к сети.
2. Тумблером на задней панели включить блок питания.
3. С помощью кнопки «Function» выбрать режим измерений «PC».
4. Включить компьютер и запустить программу «Measure».
5. В линейке инструментов выбрать «Прибор», затем в появившемся перечне программ - «Эксперимент Франка-Герца».
6. В открывшемся окне параметров измерений проверить настройки, которые должны быть активированы, и значения параметров:

Режим – автоконтроль;

Каналы – ток I_A ;

Дисплей – U_1 и I_A .

Параметры: падение напряжения 99,9 V;

напряжения $U_2 = 7$ V;

$$U_3 = 3$$
 V;

$$U_1 = 8$$
 V.

Нажать «Далее».

Название дисциплины

7. На экране ПК открываются окна для вывода значений $U_1(V)$ и $I_A(nA)$.

Нажать «Начало измерений».

После завершения измерений в автоматическом режиме на экране ПК появляется график $I_A = f(U_1)$, т. е. вольтамперная характеристика (ВАХ).

8. Для математической обработки ВАХ – нахождения её экстремумов и выведения на экран значений U_1 , соответствующих максимумам и минимумам полученной кривой, нажать пиктограмму «Анализ кривой» . В открывшемся окне курсор «допуск» вывести в крайнее левое положение, нажать «отобразить результат» и закрыть окно.

9. Записать с экрана в таблицу значения анодного тока I_m и напряжения U_m , соответствующие максимумам и минимумам ВАХ (m – номер экстремума).

10. Для повторного запуска программы навести курсор на пиктограмму – «Новое измерение»  (красный кружок в верхнем левом углу).

11. Закрыть программу, выключить ПК и блок питания.

Таблица

m	I_m , нА	U_m , В	U_{B1} , В	ΔU_{B1} , В	δU_{B1} , %	E_B , эВ	ΔE_B , эВ	δE_B , %
максимумы								
						-	-	
минимумы								
						-	-	
среднее значение								

Название дисциплины

Задание 1. Определение первого потенциала возбуждения и энергии возбуждения атома неона.

1. Вычислить по данным таблицы первый потенциал возбуждения как разность между двумя соседними экстремумами ВАХ одного и того же типа:

$$U_{B1} = U_m - U_{m-1},$$

где m – номер максимума (или минимума).

2. Рассчитать по формуле (2) энергию возбуждения атома в электрон-вольтах (эВ). При таком расчёте заряд электрона принимается равным 1.

$$E_B = eU_{B1}.$$

3. Рассчитать среднее значение $\langle U_{B1} \rangle$, абсолютные и относительные погрешности:

$$\langle U_{B1} \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{B1i},$$

$$\Delta U_{B1i} = |\langle U_{B1} \rangle - U_{B1i}|,$$

$$\langle \Delta U_{B1} \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta U_{B1i},$$

$$\delta U_{B1} = \frac{\langle \Delta U_{B1} \rangle}{\langle U_{B1} \rangle} \cdot 100\%.$$

4. Повторить п.3 для энергии возбуждения E_B .

5. Записать окончательный результат в виде

$$U_{B1} = \langle U_{B1} \rangle \pm \langle \Delta U_{B1} \rangle,$$

$$E_B = \langle E_B \rangle \pm \langle \Delta E_B \rangle.$$

6. Сравнить полученный для E_B результат с данными, приведёнными на рис. 3; сделать вывод о результатах выполненного исследования.

Задание 2. Определение частоты и длины волны излучаемых фотонов.

Используя среднее значение $\langle U_{B1} \rangle$, рассчитать частоту и длину волны излучения по формулам (3); заряд электрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

$$\nu = \frac{e \langle U_{B1} \rangle}{h}, \quad \lambda = \frac{ch}{e \langle U_{B1} \rangle}.$$

Название дисциплины

Задание 3. Построение вольтамперной характеристики опыта.

1. Построить оси координат для I_A (в интервале от 0 до 30 нА) и U_1 (в интервале от 0 до 80 В), см. рис. 2.
2. Нанести на координатную сетку положения точек экстремумов согласно данным таблицы.
3. Соединить экстремумы плавными линиями и сравнить полученную вольтамперную характеристику с рис. 2.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой атом согласно ядерной модели?
2. Сформулируйте постулаты Бора.
3. Какова была цель опытов Франка и Герца?
4. В чём заключалась идея их опытов?
5. Какие соударения называются упругими? неупругими?
6. Что называется первым потенциалом возбуждения атома?
7. Что представляет собой энергия возбуждения атома? Чему она равна?
8. Чему равна кинетическая энергия электрона, прошедшего в электрическом поле ускоряющую разность потенциалов U ?
9. Как связаны между собой частота и длина волны? Как они связаны с первым потенциалом возбуждения атома, если излучение обусловлено переходом из первого возбужденного в основное состояние?
10. Какой вывод можно сделать по результатам опыта Франка и Герца?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высшая школа, 2015.
2. Аюста В. и др., «Основы современной физики», - М.: Просвещение, 1981.
3. Физические величины: Справочник/ А.П.Бабичев, Н.А.Батушкина, А.М.Братковский и др., Энергоиздат, 1991.



Название дисциплины