

ОПЫТ ФРАНКА И ГЕРЦА

Цель работы: экспериментальное определение резонансных напряжений, вычисление энергии электронных переходов и длины волны, соответствующей данному переходу.

Приборы и принадлежности: трёхэлектродная лампа ПМИ-2 на штативе, электронный вольтметр, электронный осциллограф.

Объект измерений: резонансные напряжения, соответствующие электронным переходам в газе.

Средства измерений: электронный вольтметр, электронный осциллограф.

Введение

В истории создания современной теории строения атома важное значение имели опыты по рассеянию альфа-частиц тонкими металлическими фольгами, на основе которых Резерфордом была предложена планетарная модель атома. Однако классическая теория этой модели оказалась не в состоянии объяснить установленные к тому времени закономерности излучения атомов. Выход из создавшегося затруднения был предложен Бором, отказавшимся от применения к атому законов классической электродинамики.

Опираясь на идею о квантах, высказанную Планком при объяснении закономерностей теплового излучения, Бор развил квантовую теорию строения атома, которая применима к атому водорода и к так называемой водородоподобной системе, состоящей из ядра с зарядом Ze и одного электрона, вращающегося вокруг ядра. Такую систему называют также изоэлектронной водороду. Примерами подобных систем являются ионы He^+ , Li^{++} и др.

Теоретическая часть

В основе теории Бора лежат следующие постулаты.

Первый постулат Бора (постулат стационарных состояний): *существуют некоторые стационарные состояния атома, находясь в которых он не излучает энергии. В этих состояниях*

атомные системы обладают энергиями, образующими дискретный ряд: E_1, E_2, \dots, E_n . Такие состояния характеризуются устойчивостью; всякое изменение энергии в результате поглощения или испускания электромагнитного излучения (а также в результате соударения) может происходить только при скачкообразном переходе системы из одного состояния в другое.

Второй постулат Бора (правило частот) устанавливает, что при переходе атома из одного стационарного состояния в другое испускается или поглощается один фотон. Излучение происходит при переходе атома из состояния с большей энергией в состояние с меньшей энергией (при переходе электрона с орбиты, удаленной от ядра, на более близкую к ядру орбиту). Напротив, поглощение фотона сопровождается переходом атома в состояние с большей энергией. Этому соответствует переход электрона на более удаленную от ядра орбиту. Изменение энергии атома, связанное с излучением или поглощением фотона, пропорционально частоте ν . Если ΔE – изменение энергии атома в результате этих процессов, то энергия кванта:

$$\Delta E = h\nu. \quad (1)$$

Правило частот Бора может быть записано иначе. Если E_n и E_m – энергия атома в двух стационарных состояниях с номерами n и m соответственно, то:

$$E_m - E_n = h\nu_{mn}. \quad (2)$$

При $E_m < E_n$ происходит излучение фотона, при $E_m > E_n$ – его поглощение.

Третий постулат Бора (правило квантования орбит) утверждает, что в стационарном состоянии атома электрон, двигаясь по круговой орбите, должен иметь квантованные значения момента импульса, удовлетворяющие условию:

$$L_n = mv_n r_n = \frac{nh}{2\pi}, \quad (3)$$

где: $n = 1, 2, 3..$ – номер стационарной орбиты; m – масса электрона; v_n – скорость; r_n – радиус орбиты; $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж · с – постоянная Планка.

Постулаты Бора резко противоречат требованиям классической электродинамики. Так, например, по первому постулату атомы не излучают энергию, при этом предполагается, что входящие в атомы электроны движутся с ускорением (центростремительным), частоты фотонов ν , испускаемых атомами, и согласно третьему постулату не имеют ничего общего с частотами обращения электронов вокруг ядер, а второй постулат вообще невозможно интерпретировать в рамках классической физики.

Постулаты Бора нашли непосредственное подтверждение в опытах Франка и Герца по изучению столкновений электронов, ускоряемых электрическим полем, с атомами инертных газов и паров металлов. Эти элементы использовались потому, что их атомы не проявляют склонности к захвату электронов и образованию отрицательных ионов.

В опытах Франка и Герца было обнаружено, что электроны могут испытывать с атомами столкновения двух типов:

- *упругие столкновения*, при которых электрон отскакивает от атома без потери энергии и лишь меняет направление движения;
- *неупругие столкновения*, при которых электрон отдает большую часть своей кинетической энергии (или даже всю энергию) атому, и, следовательно, резко уменьшает свою скорость; при этом атом переходит в возбужденное состояние.

Упругие столкновения имеют место, когда кинетическая энергия электронов меньше разности энергий основного $E_1(n = 1)$ и первого возбужденного состояния $E_2(n = 2)$ атома: в этом случае электроны практически не передают атомам энергии. Если же кинетическая энергия электронов становится равной:

$$\Delta E_{21} = E_2 - E_1, \quad (4)$$

то электроны испытывают неупругие столкновения, в результате которых атом переходит в первое возбужденное состояние.

Из этого состояния атом через некоторое, очень короткое время (около 10^{-7} с), переходит в основное состояние, испуская фотон с энергией (e – заряд электрона):

$$\Delta E_{21} = h\nu_{21} = eU_1, \quad (5)$$

которой обладал электрон перед неупругим столкновением с атомом. В соответствии с этим потенциал U_1 называется первым

критическим потенциалом возбуждения, или резонансным потенциалом, а частота ν_1 – резонансной частотой.

Если электронам сообщить достаточно большую энергию, то при неупругих столкновениях они могут перевести атом во второе $E_3(n = 3)$, третье $E_4(n = 4)$ и более высокие возбужденные состояния с энергиями, соответствующими более высоким энергетическим уровням атома. При этом выполняются соотношения:

$$\Delta E_{31} = E_3 - E_1 = h\nu_{31} = eU_2, \quad (6)$$

$$\Delta E_{41} = E_4 - E_1 = h\nu_{41} = eU_3. \quad (7)$$

Соответственно потенциал U_2 называется вторым потенциалом возбуждения, U_3 – третьим потенциалом возбуждения и т. д.

Таким образом, атом либо вообще не поглощает энергию (испытывая упругое соударение с электроном), либо поглощает ее, но в количестве, равном разности энергий двух стационарных состояний.

Опыты Франка и Герца послужили непосредственным обоснованием постулатов Бора о дискретности стационарных состояний атомов. Они позволили установить для ряда атомов значения энергии, необходимые для перевода атома из одного устойчивого состояния в другое. Полученные из этих опытов длины волн излучения некоторых газов, приводимые в табл. 1, с большой степенью точности совпадают с данными спектроскопических измерений.

Таблица 1

Длины волн инертных газов

<i>Элемент</i>	<i>Гелий</i>	<i>Неон</i>	<i>Ксенон</i>	<i>Криптон</i>
Длина волны, нм	62,5 60,3	74,3 58,5	147,0 109,8	123,6 87,8

Методика проведения измерений и описание установки

Определение второго, третьего и следующих потенциалов возбуждения представляет значительную экспериментальную трудность и требует применения специальной аппаратуры. Первый же, резонансный потенциал можно определить с помощью

простого устройства, представляющего собой трёхэлектродную лампу, заполненную парами металла или инертным газом. Для доказательства существования неупругих соударений и определения значения потенциала, при котором они наблюдаются, удобно использовать метод задерживающего поля. Электрическая схема соответствующей установки представлена на **Рис. 1**.

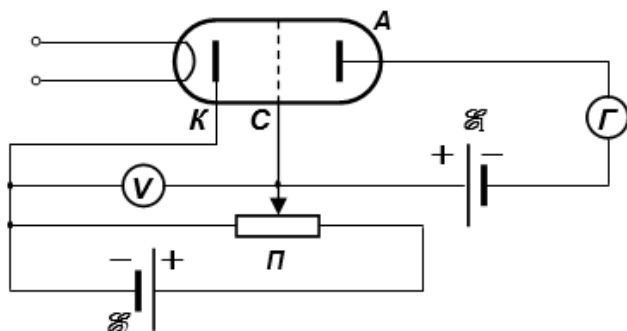


Рис. 1. Электрическая схема установки

Электроны, испускаемые накалившимся катодом **К**, ускоряются электрическим полем между катодом и сеткой **С** и направляются к аноду **А**, который в данном случае является собирающим электродом (коллектором). Между сеткой и коллектором создаётся слабое тормозящее поле. Поэтому только те электроны, которые обладают кинетической энергией, достаточной для преодоления тормозящего поля, достигнут коллектора и создадут ток, регистрируемый гальванометром **Г**. Если постепенно увеличивать ускоряющий потенциал с помощью потенциометра **П** и одновременно измерять ток с помощью гальванометра, то в результате получается вольтамперная характеристика, изображенная на **Рис. 2**.

Начальный участок этой характеристики имеет вид, обычный для вольтамперных характеристик (ВАХ) термоэлектронных приборов. Но при потенциале U_1 ток внезапно резко падает, а затем вновь начинает возрастать до потенциала U_2 , при котором вновь обнаруживается резкое падение тока и новое его возрастание до потенциала U_3 . Так, например, в случае, если опыт проводится в

парах ртути, то тогда оказывается, что: $U_1 = 4,1 \text{ В}$, $U_2 = 9,0 \text{ В}$, $U_3 = 13,9 \text{ В}$.

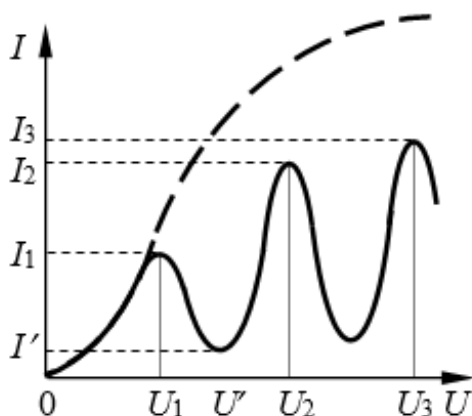


Рис. 2. Вольтамперная характеристика лампы

Таким образом, вся кривая представляет собой ряд острых максимумов, отстоящих друг от друга на расстоянии, соответствующем $4,9 \text{ В}$.

Истолкование максимумов на вольтамперной характеристике не представляет особых затруднений. До тех пор, пока энергия электрона не достигает $\Delta E_{21} = eU_1$, он испытывает с атомами газа упругие соударения, и ток возрастает с увеличением потенциала по обычному закону. При потенциале U_1 удар становится неупругим, электрон отдает при соударении атому всю энергию. Эти электроны не попадают на коллектор, и ток резко уменьшается.

Если энергия электронов заметно превосходит $\Delta E \gg eU_1$, то такие электроны, потеряв часть своей энергии при неупругом столкновении, сохраняют достаточный избыток энергии и потому, несмотря на наличие положительно заряженной сетки, достигают коллектора, а значит, при увеличении напряжения ток начинает возрастать. Если ускоряющий потенциал достаточно велик, так что $U > U_1$, то на оставшемся пути электрон может испытать еще одно или два (в зависимости от величины U) неупругих соударения, в результате которых атом также переходит в

первое возбужденное состояние. В этом и заключается причина периодического повторения максимумов.

Величина энергии $\Delta E_{21} = eU_1$ характеризует атомы газа, заполняющего лампу. Меньшую энергию атомы воспринять не могут, так как при такой энергии бомбардирующих их электронов удар происходит вполне упруго; энергию же ΔE_{21} они воспринимают полностью. Но это и означает в согласии с первым постулатом Бора, что атом рассматриваемого элемента может обладать не любыми значениями энергии, а только избранными. Для сравнения на **Рис. 2** пунктиром изображена вольтамперная характеристика не газонаполненной, а обычной вакуумной электронной лампы.

Для выполнения настоящей работы могут использоваться два варианта лабораторной установки. В первом варианте получаемая картина чередующихся максимумов и минимумов вольтамперной характеристики газонаполненной трёхэлектродной лампы ПМИ-2 наблюдается на экране электронно-лучевого осциллографа, во втором варианте результаты измерений выводятся на монитор персонального компьютера.

Вариант 1: с использованием электронно-лучевого осциллографа, **Рис. 3.**

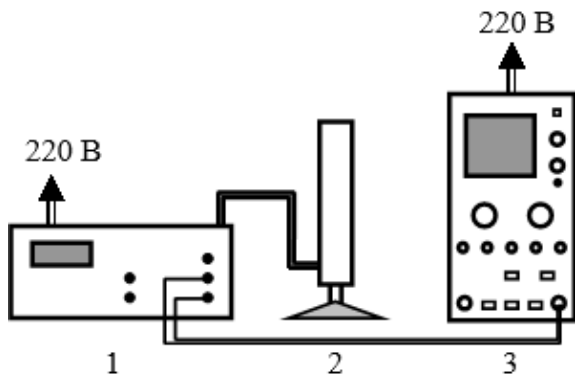


Рис. 3. Схема лабораторной установки: 1 – измерительное устройство; 2 – трёхэлектродная лампа ПМИ-2; 3 – электронный осциллограф

Измерительное устройство 1 формирует пилообразное напряжение амплитудой около 40 В, которое подаётся на участок катод – сетка лампы, задерживающее напряжение сетка – анод, а также переменное напряжение, мгновенное значение которого пропорционально силе анодного тока в рассматриваемый момент времени.

Кроме этого, одновременно с пилообразным напряжением, подаваемым на лампу, измерительное устройство 1 формирует на экране осциллографа на фоне вольтамперной характеристики узкий добавочный пик – маркер-метка (**Рис. 4**), который можно перемещать по экрану осциллографа ручками ГРУБО и ТОЧНО, расположенными на лицевой панели измерительного устройства (**Рис. 5**). При наведении маркера на интересующие точки регистрируемой картины на табло измерительного устройства отображаются значения соответствующего напряжения U , которые и следует регистрировать.



Рис. 4. Метка на экране осциллографа



Рис. 5. Табло измерительного устройства 1

Примеры картин, наблюдаемых на экране осциллографа в процессе измерений, представлены на **Рис. 6 - Рис. 11**.

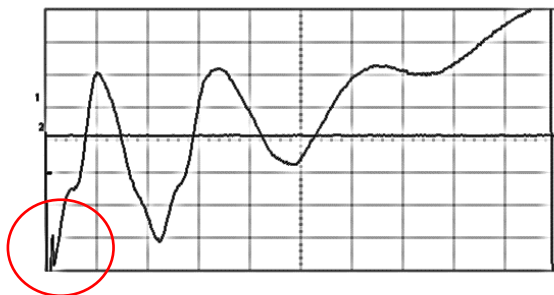


Рис. 6. Картина ВАР при оптимальной развёртке по времени. В левом нижнем углу виден пик, соответствующий метке $U = 0$.

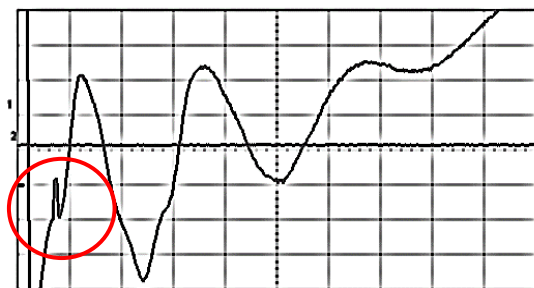


Рис. 7. Положение метки соответствует напряжению $U = 1,9$ В.

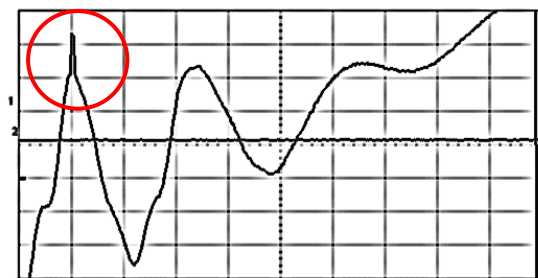


Рис. 8. Положение метки соответствует напряжению U_1 – *первый максимум*.

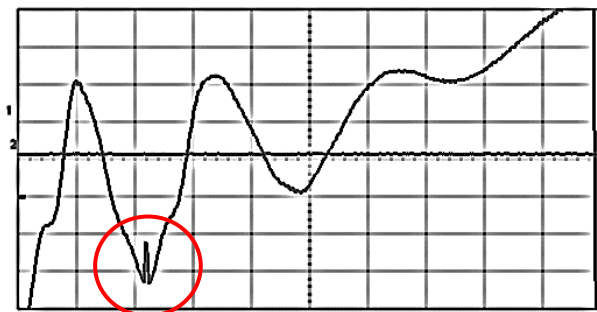


Рис. 9. Положение метки соответствует напряжению $U' > U_1$.

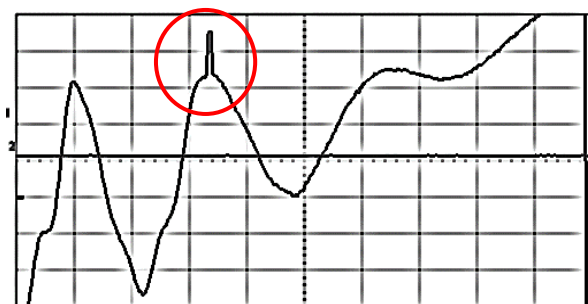


Рис. 10. Положение метки соответствует напряжению U_2 – *второй максимум*.

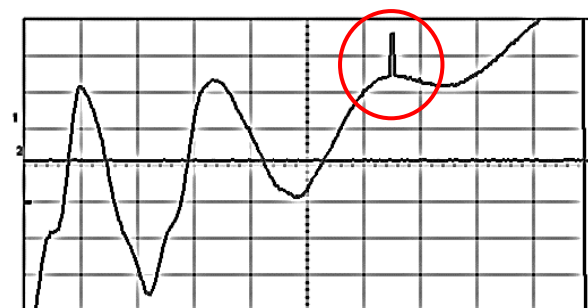


Рис. 11. Положение метки соответствует напряжению U_3 – *третий максимум*.

Вариант 2: с использованием аналого-цифрового преобразователя PCSCOPE и персонального компьютера, **Рис. 12.**

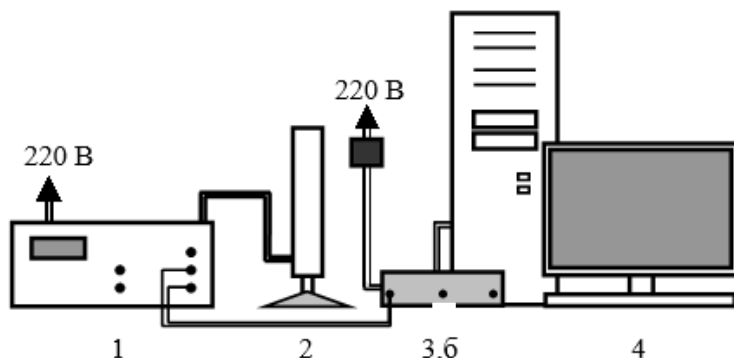


Рис. 11. Схема лабораторной установки: 1 – измерительное устройство; 2 – трёхэлектродная лампа ПМИ-2; 3 – аналого-цифровой преобразователь; 4 – персональный компьютер.

Измерительное устройство 1 формирует пилообразное напряжение амплитудой около 40 В, которое подаётся на участок катод – сетка лампы, задерживающее напряжение сетка – анод, а также переменное напряжение, мгновенное значение которого пропорционально силе анодного тока в рассматриваемый момент времени. Одновременно с пилообразным напряжением, подаваемым на ламп 2, измерительное устройство 1 формирует на мониторе компьютера 4 на фоне вольтамперной характеристики узкий добавочный пик – маркер, который можно перемещать по экрану, вращая регуляторы ГРУБО и ТОЧНО, расположенные на лицевой панели измерительного устройства. При наведении маркера на интересующие точки регистрируемой картины на табло измерительного устройства отображаются значения соответствующего напряжения U , которые и следует регистрировать.

Последовательность включения компьютера для запуска рабочего режима, показана на **Рис. 12 – Рис.17.**

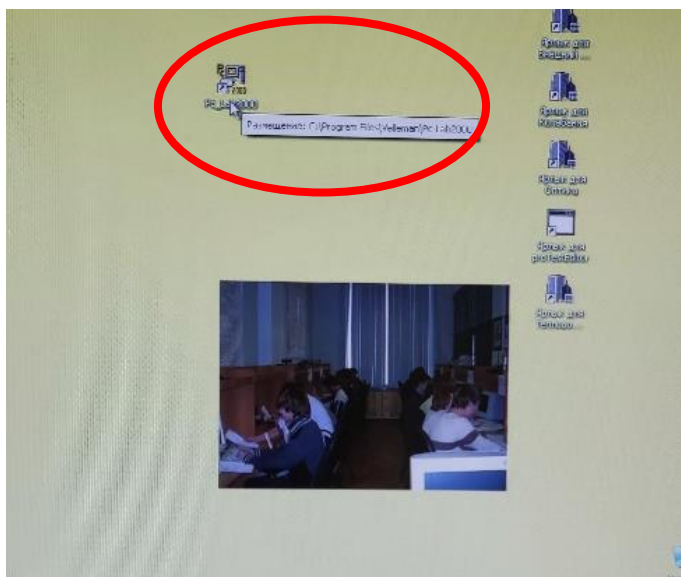


Рис. 12. Запуск программы для выполнения работы

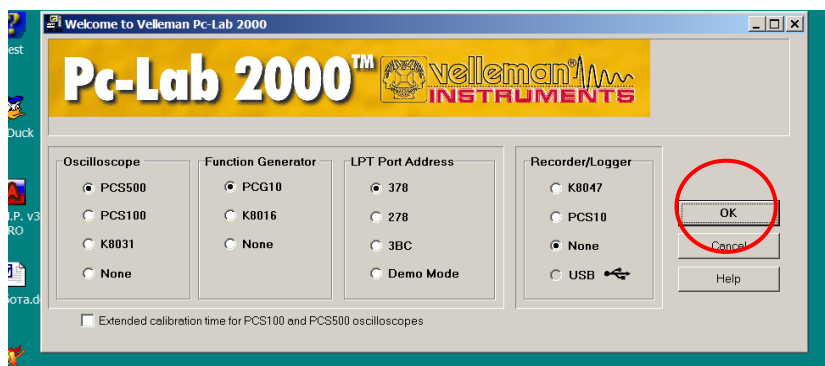


Рис. 13. Меню, высвечивающееся на экране после вызова программы Pc_Lab2000, следует нажать «OK»



Рис. 14. Проверить на измерительном устройстве канал подключения: CH1 или CH2.

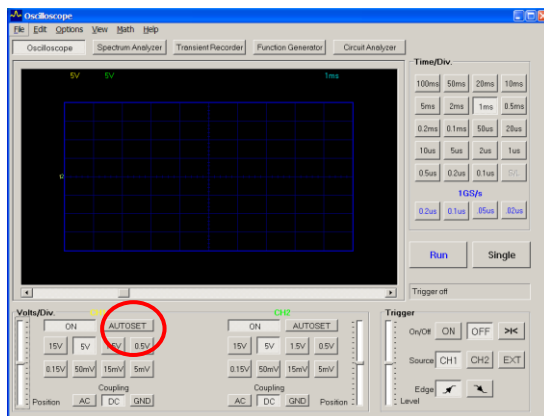


Рис. 15. Меню, высвечивающееся после вхождения в программу Pc_Lab2000 (сигнал еще не регистрируется). Для начала работы с программой следует нажать клавишу «AUTOSET» в левой части панели (в массиве клавиш **CH1**). Программа автоматически подбирает масштабы по амплитуде и по времени.

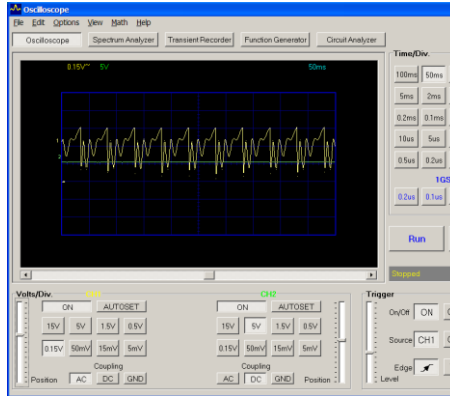


Рис. 16. После автозапуска программы развёртка по вертикали и по горизонтали не всегда оптимальна (иногда масштаб мал).

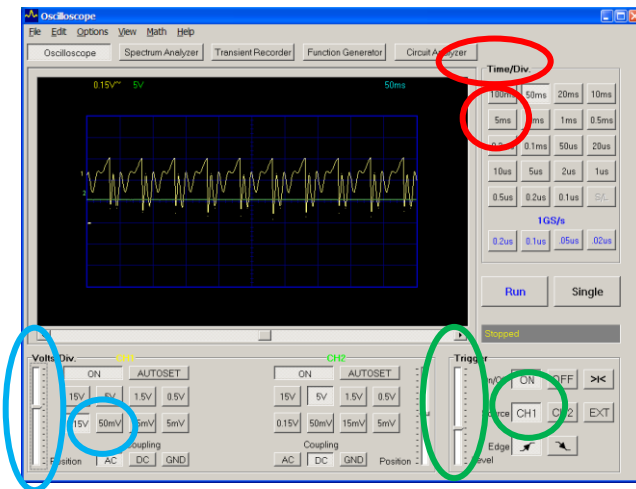


Рис. 16. Необходима следующая настройка:

- 1) установить оптимальное время развёртки (клавиша **5 ms** в группе клавиш Time/Div);
- 2) установить необходимое усиление (клавиша **50 mV** в группе клавиш Volts/Div канала CH1);
- 3) ползковыми регуляторами Volts/Div на канале **CH1** и **Trigger** переместить изображение в центр экрана.

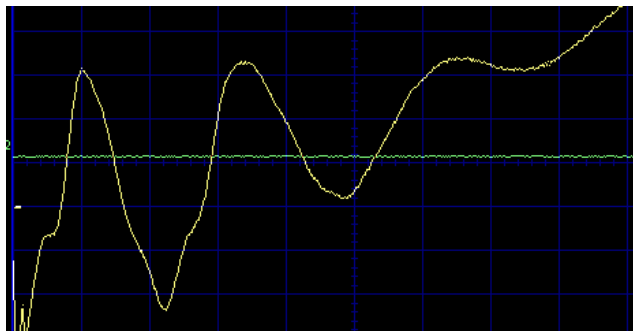


Рис. 17. Пример ВАХ, с которой следует начинать измерения

Порядок выполнения работы

1. Подготовьте установку к работе:

1.1. подсоедините лампу ПМИ-2 в металлическом корпусе к измерительному устройству;

1.2. подключите измерительное устройство ко входу «Y» электронного осциллографа (или компьютера) специальным кабелем;

1.3. проверьте наличие заземления измерительного устройства и осциллографа;

1.4. если измерения проводятся на осциллографе, установите следующие значения пределов ручек регулировки осциллографа: длительность – 3 мс; делитель: 0,5 В/дел; синхронизация – внутренняя; яркость – в крайнее левое положение;

1.5. включите измерительное устройство и осциллограф (компьютер) в сеть и дайте установке прогреться 10 минут.

2. С помощью регулировок частоты развёртки и чувствительности усилителя вертикального отклонения луча осциллографа добейтесь устойчивого изображения картины ВАХ лампы.

Если работа выполняется на компьютере, вызовите программу Pc_Lab2000 из опции «Пуск», после чего запустите эту программу, выполнив операции на **Рис. 12 – Рис. 17**.

3. Вращая ручки метки ГРУБО и ТОЧНО на передней панели измерительного устройства, установите метку на экране напротив каждого из трёх наблюдаемых максимумов вольтамперной

характеристики и запишите в таблицу 2 соответствующие значения напряжения (U_1 , U_2 и U_3).

Таблица 2

Экспериментальные результаты

№	В				
	U_{1i}	U_{2i}	U_{3i}	$\langle U_2 \rangle - \langle U_1 \rangle$	$\langle U_3 \rangle - \langle U_2 \rangle$
1	$U_{11} =$	$U_{21} =$	$U_{31} =$		
2	$U_{12} =$	$U_{22} =$	$U_{32} =$		
3	$U_{13} =$	$U_{23} =$	$U_{33} =$		
$\langle U \rangle$	$\langle U_1 \rangle =$	$\langle U_2 \rangle =$	$\langle U_3 \rangle =$		
Приборная погрешность измерения напряжения $\Delta U_{\text{пр}} =$					В

4. Вычислить средние значения резонансных напряжений, как средние арифметические величины:

$$\langle U_k \rangle = \frac{U_{k1} + U_{k2} + U_{k3}}{3}, \quad (8)$$

где k – номер соответствующего резонансного потенциала.

5. Вычислить разность средних резонансных напряжений.

6. Вычислить разность энергий двух стационарных состояний при переходах: $n = 2 \rightarrow n = 1$; $n = 3 \rightarrow n = 2$:

$$\Delta E_{21} = e(\langle U_2 \rangle - \langle U_1 \rangle), \quad (9)$$

$$\Delta E_{32} = e(\langle U_3 \rangle - \langle U_2 \rangle), \quad (10)$$

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

7. Энергия кванта перехода из одного стационарного состояния в другое связана с длиной волны следующим образом:

$$\Delta E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (11)$$

Выразим длину волны из уравнения (10):

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E} \quad (12)$$

8. Вычислить длину волны, соответствующую данному переходу:

$$\langle \lambda_{21} \rangle = \frac{hc}{\Delta E_{21}}, \quad (13)$$

$$\langle \lambda_{32} \rangle = \frac{hc}{\Delta E_{32}}, \quad (14)$$

где: $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж · с – постоянная Планка; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света.

9. Вычислить абсолютную погрешность измерения длины волны по нижеприведенным формулам. Определение длины волны в данной работе – это косвенные измерения.

10. Абсолютная погрешность измерения $\Delta \lambda_{21}$.

$$\Delta \lambda_{21} = \left| \frac{\partial \lambda}{\partial U_1} \right| \Delta U_1 + \left| \frac{\partial \lambda}{\partial U_2} \right| \Delta U_2 = \frac{hc(\Delta U_1 + \Delta U_2)}{e(\langle U_2 \rangle - \langle U_1 \rangle)}, \quad (15)$$

где ΔU_1 и ΔU_2 – абсолютные погрешности измерений соответствующих резонансных напряжений вычисляются следующим образом:

$$\Delta U_1 = t_{p,n} \sqrt{\frac{(\langle U_1 \rangle - U_{11})^2 + (\langle U_1 \rangle - U_{12})^2 + (\langle U_1 \rangle - U_{13})^2}{3(3-1)}}, \quad (16)$$

$$\Delta U_2 = t_{p,n} \sqrt{\frac{(\langle U_2 \rangle - U_{21})^2 + (\langle U_2 \rangle - U_{22})^2 + (\langle U_2 \rangle - U_{23})^2}{3(3-1)}}, \quad (17)$$

где $t_{p,n} = 4,3$ – коэффициент Стьюдента (доверительная вероятность $p = 0,95$, число опытов $n = 3$).

11. Аналогично вычисляют абсолютную погрешность для $\Delta \lambda_{32}$.

$$\Delta \lambda_{32} = \left| \frac{\partial \lambda}{\partial U_2} \right| \Delta U_2 + \left| \frac{\partial \lambda}{\partial U_3} \right| \Delta U_3 = \frac{hc(\Delta U_2 + \Delta U_3)}{e(\langle U_3 \rangle - \langle U_2 \rangle)}, \quad (18)$$

$$\Delta U_3 = t_{p,n} \sqrt{\frac{(\langle U_3 \rangle - U_{31})^2 + (\langle U_3 \rangle - U_{32})^2 + (\langle U_3 \rangle - U_{33})^2}{3(3-1)}}. \quad (19)$$

12. Прежде, чем подставлять значения погрешностей измерений напряжения (ΔU_1 , ΔU_2 и ΔU_3) в формулы для вычисления $\Delta \lambda_{21}$ и $\Delta \lambda_{32}$, необходимо сравнить эти значения с приборной погрешностью измерения напряжения $\Delta U_{\text{пр}}$. Если какая-либо из ошибок (ΔU_1 , ΔU_2 , ΔU_3) окажется меньше $\Delta U_{\text{пр}}$, то в формуле для расчёта $\Delta \lambda$ следует использовать вместо этой ошибки именно $\Delta U_{\text{пр}}$.

13. Записать результат измерений для каждой длины волны перехода в следующем виде: $\lambda_{ki} = \langle \lambda_{ki} \rangle \pm \Delta \lambda_{ki}$.

14. Вычислить среднюю длину волны:

$$\langle \lambda \rangle = \frac{\lambda_{21} + \lambda_{32}}{2} \quad (20)$$

14. Пользуясь табл. 1, определите, какой газ заполняет лампу ПМИ-2.

Контрольные вопросы

1. Дайте формулировку постулатов Бора.
2. Изложите сущность опытов Франка и Герца.
3. Каким образом получают неподвижное изображение осциллограмм с максимумами на экране осциллографа?
4. Как, зная энергию перехода атома с основного уровня на возбужденный, определить частоту поглощаемого кванта?
5. Рассчитайте, исходя из теории Бора, радиусы электронных орбит водородоподобного атома.
6. Покажите, что целое число n , входящее в формулу второго постулата Бора, равно числу длин волн де Бройля, укладывающихся на длине круговой орбиты.

Рекомендуемая литература

1. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Курс физики. – М.: Высш. шк., 2000. – С. 294.

2. Шпольский Э.В. Атомная физика. – М.: Наука, 1974. – Т. 1, С. 294.
3. Селезнёв В.А., Тимофеев Ю.П. Методические указания к вводному занятию в лабораториях кафедры физики. – М.: МИИТ, 2006.