

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. Ломоносова

Физический факультет
кафедра общей физики и физики конденсированного состояния

Методическая разработка
по общему физическому практикуму

Лаб. работа № 135

ОПЫТ ФРАНКА И ГЕРЦА

Описание составили д.ф.м.н. Антошина Л.Г. и асс. Мичурин А.В.

Москва 2012 г.

Подготовил методическое пособие к изданию доц. Авксентьев Ю.И.

ОПЫТ ФРАНКА И ГЕРЦА

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В 1911 г. английский физик Э. Резерфорд на основе излучения рассеяния α -частиц атомами тяжелых элементов предложил планетарную модель атома, состоящего из тяжелого ядра и окружающих его электронов. Согласно этой модели, в центре атома находится положительно заряженное ядро, в котором сосредоточена почти вся масса атома; вокруг ядра вращаются по орбитам отрицательно заряженные электроны. Рассмотрение такого движения на основе классических представлений приводило к парадоксальному результату – невозможности существования стабильных атомов: согласно классической электродинамике, электрон не может устойчиво двигаться по орбите, поскольку вращающийся электрический заряд, двигаясь с ускорением, должен излучать электромагнитные волны и, следовательно, терять энергию. Радиус орбиты электрона должен непрерывно уменьшаться, и за время $\sim 10^{-8}$ с он должен упасть на ядро. Это означало, что законы классической физики неприменимы к движению электронов в атоме, так как атомы не только существуют, но и весьма устойчивы.

Выход из затруднения был предложен в 1913 г. датским физиком Нильсом Бором, отказавшимся от применения к атому законов классической электродинамики. Бор предположил, что в случае атома Резерфорда непрерывное излучение, требуемое классической электродинамикой, не имеет места.

Свои соображения Бор сформулировал в виде двух постулатов.

1. Электрон в атоме водорода может находиться не в любых, а лишь в строго определенных дискретных энергетических состояниях, соответствующих его движению по строго определенным дозванным круговым орбитам. При движении по дозванным орбитам электрон не излучает и не поглощает энергии, поэтому указанные орбиты и соответствующие им энергетические состояния называются стационарными. Стационарные орбиты определяются следующим условием: момент импульса движения электрона на них является целым кратным некоторой постоянной величины \hbar , т.е.

$$m_e v r = I_n \omega_n = n \hbar,$$

где m_e – масса электрона, v – скорость электрона на орбите, r – радиус орбиты, n – номер орбиты, \hbar – постоянная Планка, I_n – момент инерции электрона на орбите, ω_n – угловая скорость электрона на этой орбите. Число n называется главным квантовым числом.

2. Электрон может излучать или поглощать энергию только при скачкообразных переходах с одной стационарной орбиты на другую, при этом поглощение энергии происходит при переходах электрона с орбит, более близких к ядру, на орбиты, более удаленные от него, а излучение при обратных переходах. Энергия излучается и поглощается дискретными порциями, квантами,

величина которых равна разности полных энергий электрона E_n и E_m на стационарных орбитах, между которыми совершается переход

$$\hbar\omega = E_n - E_m,$$

где ω - частота излучаемого (или поглощаемого) кванта.

Как видно из приведенных формулировок постулатов Бора, оба они находятся в принципиальном противоречии с представлениями классической электродинамики о движении зарядов. Действительно, согласно этим постулатам, электрон может двигаться с ускорением и при этом не излучать, частоты излучения ω никак не связаны с частотами его обращения по орбитам ω_n , устойчивое движение электрона возможно почему-то лишь с определенными величинами момента импульса на некоторых определенных расстояниях от ядра и невозможно на других расстояниях. Однако такая необычность постулатов Бора является всего лишь отражением своеобразия реальных законов, управляющих движением микрочастиц в особых условиях, условиях микромира.

Существование дискретных энергетических уровней атома подтверждается опытами, осуществленными в 1914 г. Франком и Герцем. Схема их установки приведена на рис.1. В трубке, заполненной парами ртути под небольшим давлением (~ 1 мм.рт.ст.), имелись три электрода: катод K , сетка C и анод A . Электроны, вылетающие из катода вследствие термоэлектронной эмиссии, ускорялись разностью потенциалов U_{KC} , приложенной между катодом и сеткой. Эту разность потенциалов можно было плавно менять с помощью потенциометра Π .

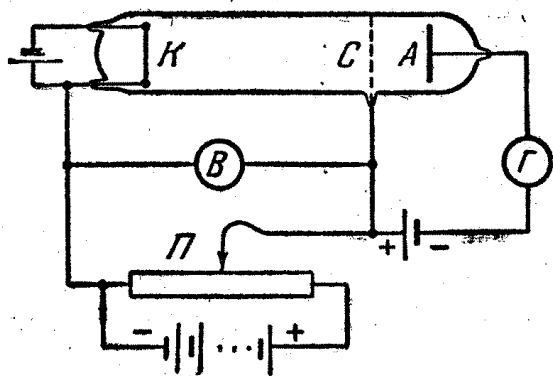


Рис. 1

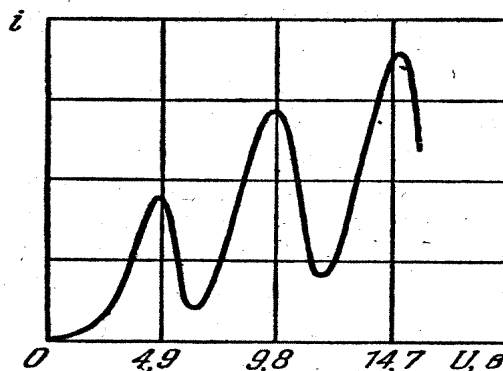


Рис. 2

Между сеткой и анодом создавалось слабое электрическое поле (разность потенциалов порядка $0,5$ В), тормозившее движение электронов к аноду.

Исследовалась зависимость силы тока I_a в цепи анода от напряжения U_{KC} между катодом и сеткой. Сила тока измерялась гальванометром Γ , напряжение – вольтметром B . Полученные результаты представлены на рис.2. Видно, что сила тока вначале монотонно возрастала, достигая максимума при

$U = 4,9 \text{ В}$, после чего с дальнейшим увеличением U резко падала, достигая минимума, и снова начинала расти. Максимумы силы тока повторялись при U , равном $9,8 \text{ В}$; $14,7 \text{ В}$ и т.д.

Такой ход кривой объясняется тем, что столкновения электронов с атомами могут быть упругими и неупругими. При упругих столкновениях сохраняется суммарная кинетическая энергия частиц, а изменение кинетической энергии каждой из них зависит от соотношения масс (здесь и далее тяжелый и медленный атом, по сравнению с лёгким и быстрым электроном, будем считать покоящимся до и после столкновения). При неупругом столкновении электрона и атома кинетическая энергия электрона изменяется на величину, равную изменению внутренней энергии атома. Изменение кинетической энергии электрона равно энергии перехода ΔE_1 :

$$W_{до} - W_{после} = \Delta E_1$$

Возбуждение атома (увеличение его внутренней энергии) может произойти лишь тогда, когда кинетическая энергия относительного движения электрона и атома будет превышать энергию перехода.

До тех пор, пока энергия относительного движения электрона меньше ΔE_1 , соударения между электроном и атомом ртути носят упругий характер, при которых кинетическая энергия электронов не изменяется, причем, поскольку масса электрона во много раз меньше массы атома ртути, энергия электрона при столкновении практически не изменяется. Часть электронов попадает на сетку, остальные же, проскочив через сетку, достигают анода, создавая ток I_a в цепи гальванометра G . Чем больше $U_{кс}$, тем больше скорость, с которой электроны достигают сетку, и тем, следовательно, больше будет сила тока I_a .

Когда энергия относительного движения, накапливаемая электроном в промежутке катод – сетка, достигает значения ΔE_1 , соударения становятся неупругими, т.е. электроны при ударах об атомы передают им энергию ΔE_1 и продолжают затем двигаться с меньшей скоростью. Поэтому число электронов, достигающих анода, уменьшается. Например, при $U = 5,3 \text{ эВ}$ электрон сообщает атому энергию, соответствующую $4,9 \text{ эВ}$ (первый потенциал возбуждения атома ртути), и продолжает двигаться с энергией $0,4 \text{ эВ}$. Если даже такой электрон окажется между сеткой и анодом, он не сможет преодолеть задерживающее напряжение $0,5 \text{ В}$ и будет возвращен обратно на сетку.

В какую форму переходит энергия, потерянная электроном и воспринятая атомом ртути? Атомы, получившие при соударении с электроном энергию ΔE_1 , переходят в возбужденное состояние, из которого они спустя время порядка 10^{-8} с возвращаются в основное состояние, излучая фотон $\omega = \Delta E_1 / \hbar$.

При напряжении, превышающем $9,8 \text{ В}$, электрон на пути катод-анод может дважды претерпеть неупругое соударение с атомами ртути, теряя при этом энергию $9,8 \text{ эВ}$, вследствие чего сила тока I_a снова начинает уменьшаться. При еще большем напряжении возможны трехкратные неупругие со-

ударения электронов с атомами, что приводит к возникновению максимума при $U_{кс}=14,7 В$ и т.д.

Опыт Франка и Герца показал, что внутренняя энергия атома не может изменяться непрерывно, а принимает определенные дискретные значения (квантуется). Впервые поставленный в 1913 г немецкими физиками Дж.Франком и Г.Герцем, опыт сыграл важную роль в экспериментальном подтверждении квантовой теории атома Н. Бора.

Аналогичные опыты были выполнены и с другими, в первую очередь с одноатомными благородными газами (He, Ne, Ar и др.) и парами одноатомных металлов. Все они привели к таким же результатам и позволили установить для этих атомов значения энергии, необходимые для перевода атома из одного устойчивого состояния в другое.

Наилучшая оценка глубокой важности этих опытов для теории атома сделана самим Бором, подчеркнувшим, что эти опыты обосновывают гипотезу о дискретных стационарных состояниях атома. Бор пишет: *«При рассмотрении подобных опытов едва ли можно освободиться от впечатления, что мы имеем дело с непосредственным и независимым доказательством реальности особых стационарных состояний, к предположению о существовании которых нас привели закономерности сериальных спектров».*

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Лампа

Роль трубки в данной работе выполняет лампа специальной конструкции.

Устройство лампы показано на рис. 3. Нить накала (1) одновременно

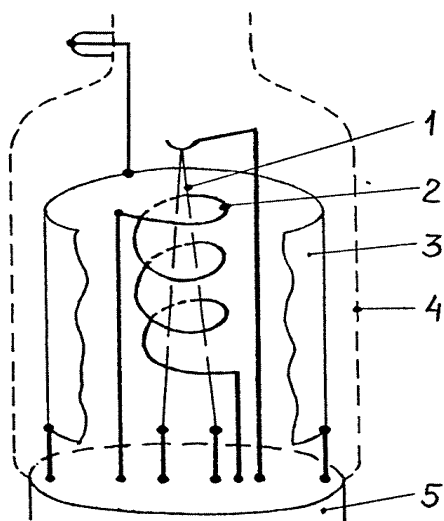


Рис. 3

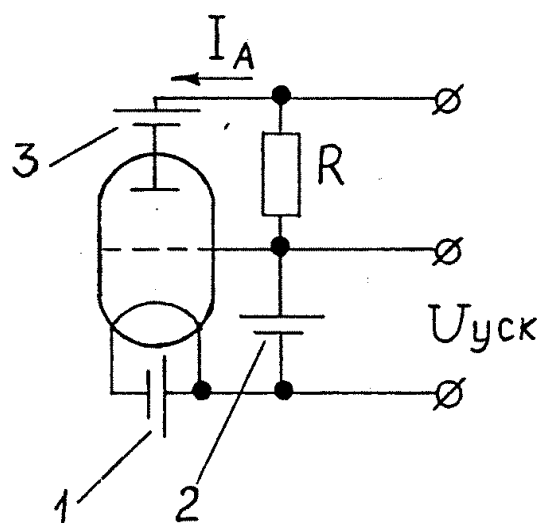


Рис. 4

является катодом лампы. Сетка 2 выполнена в виде спирали, навитой вокруг нити накала. Вокруг сетки расположен цилиндрический анод 3. Стеклоный баллон лампы 4 установлен на цоколе 5. Контакты катода и сетки выведены на ножки цоколя, анод соединен с колпачком на баллоне лампы.

Принципиальная схема включения лампы приведена на рис.4. Она же

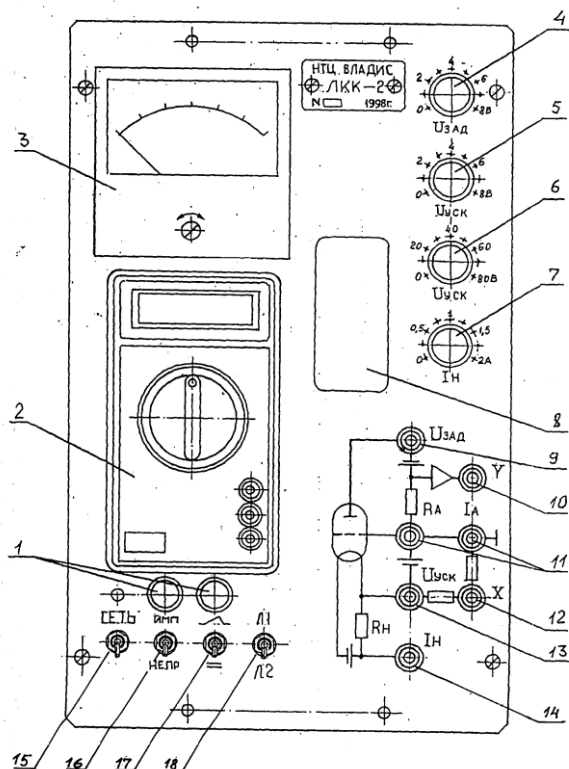


Рис. 5

воспроизведена на лицевой панели установки (рис.5). Регулируемый источник тока накала 1 позволяет установить ток, при котором получается удобная для измерений вольтамперная характеристика лампы. Между катодом и сеткой включен источник ускоряющего напряжения 2. Для получения вольтамперной характеристики на экране осциллографа этот источник переводится в режим, при котором его напряжение изменяется по пилообразному закону с частотой 15-20 Гц. Потенциал анода относительно сетки устанавливается отрицательным с помощью источника задерживающего напряжения 3. Значение этого напряжения регулируется в пределах от 0 В до 6 В ручкой со шкалой на панели установки. Для измерения анодного тока измеряют падение напряжения на резисторе R, включенном последовательно с анодом.

но с анодом.

В установке размещены две лампы, наполненные различными газами. Для их поочередного исследования аноды и сетки ламп соединены параллельно и подключены к измерительной системе, а нити накала включены

	Номер установки			
	25	28	29	38
Лампа Л1	He (гелий)	Ar (аргон)	Ne (неон)	He (гелий)
Лампа Л2	Ar (аргон)	He (гелий)	He (гелий)	Ne (неон)
Лампа Л2	Ar (аргон)	He (гелий)	He (гелий)	Ne (неон)

последовательно, при этом одна из них закорочена, и соответствующая лампа не работает. Выбор лампы производится тумблером “Л1/Л2” 18 (рис. 5) на передней панели блока. Наполнение ламп указано в паспорте установки. Номера ламп и их наполнение указаны также в таблице.

Исследуемые лампы можно видеть в окне 8. Стрелочный измерительный прибор 3 измеряет анодный ток I_A (предел шкалы прибора – 100 мкА).

Ручка 4 “ $U_{зад}$ ” устанавливает значение задерживающего напряжения в соответствии с надписями на шкале, расположенной вокруг ручки. Значения $U_{зад}$ и $U_{уск}$ измеряются мультиметром 2 на гнездах установки 9 и 13 относительно общего провода схемы, выведенного на два гнезда “ \perp ” 11.

На гнездо 10 “Y” выведено напряжение, пропорциональное анодному току I_A (коэффициент пропорциональности $0,1 В/мкА$, максимальное напряжение $10 В$ соответствует току $100 мкА$).

На гнездо 12 “X” выведено напряжение, пропорциональное ускоряющему напряжению $U_{уск}$ (коэффициент пропорциональности $0,1$; максимальному напряжению $10 В$ соответствует ускоряющее напряжение $100 В$).

Контроль тока накала осуществляется путём измерения напряжения на резисторе $R_H = 1,00 Ом$ между гнездами “ I_H ” 14 и “ $U_{уск}$ ” 13. Значение измеренного напряжения в вольтах равно значению тока в амперах.

Мультиметр

В настоящей работе для измерения постоянного напряжения используется мультиметр, который выведен на лицевой панели установки. Органы управления мультиметром показаны на рис.6.

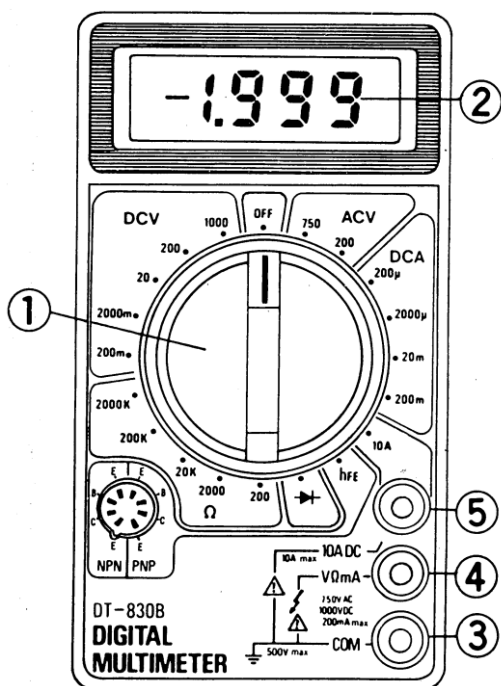


Рис. 6

Этот прибор позволяет измерять величины постоянного и переменного тока и напряжения, а также сопротивления в широком интервале значений. Режимы работы прибора выбираются вращением ручки 1. Различные сектора переключателя отвечают различным режимам работы прибора, а каждое отдельное положение определяет предел измерений. Так, например, положение ручки переключателя “20” в секторе “DCV” переводит прибор в режим измерения постоянного напряжения (direct current voltage) с предельным значением $20 В$. Для обозначения положений переключателя мы будем использовать сокращённую запись вида “DCV/20”.

Измерение напряжений, токов и со-

противлений производится, подключением прибора в цепь через гнёзда 3 и 4. Гнездо 5

Осциллограф

предназначено для измерения больших токов и в настоящей работе не используется. В настоящей работе будет использован только режим измерения постоянного напряжения (сектор DCV).

Для наглядного наблюдения зависимости анодного тока от ускоряющего напряжения в настоящей работе используется осциллограф.

Подробно устройство осциллографа рассматривается в описании к лабораторной работе № 64. Основным узлом осциллографа является электронно-лучевая трубка, состоящая из электронной пушки с системой фокусировки пучка, отклоняющих пластин и экрана, покрытого люминофором. В электронной пушке формируется пучок электронов. Электроны, попадая на экран, вызывают свечение люминофора. На пути от пушки до экрана электроны проходят между двумя парами отклоняющих пластин. При подаче напряжения на отклоняющие пластины, между ними возникает постоянное электрическое поле, которое искривляет траекторию движения электрона, электроны начинают попадать в другую точку экрана, и светящееся пятно сдвигается на расстояние, пропорциональное напряжению, приложенному к отклоняющим пластинам. Каждая из пар пластин отклоняет пучок в определённом направлении: вертикальные (X -пластины) создают горизонтальное поле и отклоняют пучок в горизонтальной плоскости, вертикальные (Y -пластины) отклоняют пучок в вертикальной плоскости. При изменении напряжений на указанных парах пластин, светящаяся точка смещается по экрану осциллографа. Обычно это движение происходит достаточно быстро и повторяется строго периодически, в таких случаях человек видит не светящуюся точку, а кривую, которую она описывает.

В настоящей работе осциллограф подключается к установке таким образом, что на X -пластины подаётся ускоряющее напряжение, а на Y -пластины напряжение, пропорциональное анодному току лампы, которое снимается с сопротивления R_A (см. рис. 5). Чтобы сформировать полную зависимость $I_A(U_{\text{уск}})$ $U_{\text{уск}}$ изменяется во времени пилообразно (линейно от нулевого значения до некоторого максимального значения с последующим резким падением к нулевому значению) с частотой $15-20$ Гц. При этом луч описывает на экране осциллографа кривую зависимости $I_A(U_{\text{уск}})$.

Включение установки

1. Убедиться, что все четыре ручки управления режимом работы прибора на передней панели (I_H 7, $U_{\text{уск}}$ (точно) 5, $U_{\text{уск}}$ (грубо) 6, $U_{\text{зад}}$ 4) повернуты до упора против часовой стрелки.
2. Включить установку тумблером "СЕТЬ".
3. Перевести тумблер "ИМП/НЕИП" в положение "ИМП".
4. Включить осциллограф (утопить желтую кнопку на передней панели осциллографа). После прогрева на экране должна появиться горизонтальная линия развёртки. Если развёртка не появилась, то обратитесь к лаборанту.
5. Подключить провода к мультиметру. Черный провод подключается ко входу 3 мультиметра "СОМ", красный провод – ко входу 4 "V Ω mA" (рис. 6).

Проведение измерений

Подбор режима работы установки: тока накала (I_H) и задерживающего напряжения ($U_{\text{зад}}$); наблюдение зависимости анодного тока лампы от напряжения на её сетке на экране осциллографа.

1. Тумблер 17, изменяющий режим работы "автоматическое/ручное" ($-\wedge/=$), перевести в верхнее положение – "автоматическое" ($-\wedge$).
2. Тумблером 18 выбрать рабочую лампу "Л1".
3. Включить мультиметр в электрическую цепь установки для измерения тока накала лампы. Для этого: выбрать режим работы мультиметра $DCV/20$ – отметка 20 в части шкалы DCV (direct current voltage); подсоединить черный щуп к гнезду 13; красный щуп – к гнезду 14 (рис.5).

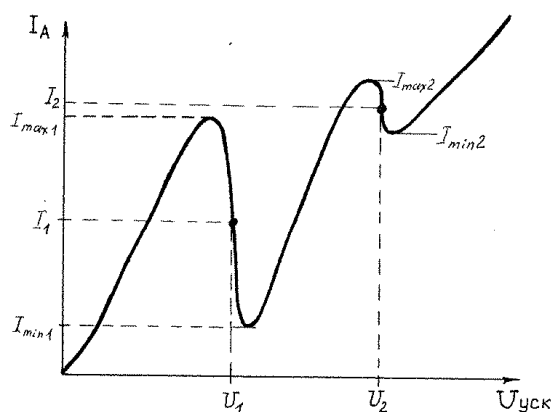


Рис. 7

щуп к гнезду 13; красный щуп – к гнезду 14 (рис.5).

После этого напряжение, показываемое мультиметром будет численно равно току накала катода, т.к. сопротивление $R_H = 1,00 \text{ Ом}$.

4. Подать на осциллограф напряжения развертки. Серый провод – в гнездо 11 "⊥", щуп – в гнездо 10 "Y".

5. Поворачивая ручку 7 " I_H ", выставить ток накала 1.27 А (т.е. мультиметр

покажет значение 1.27 В). При этом катод выбранной лампы нагреется и начнет светиться, что можно будет

видеть в окошке 8.

6. Вывести $U_{УСК}$ на максимум, переведя обе ручки " $U_{УСК}$ " в крайнее правое положение.

7. Путём изменения задерживающего напряжения $U_{зад}$ ручкой 4 и корректировкой тока накала (ручкой 7) добиться появления на экране осциллографа зависимости анодного тока лампы от ускоряющего напряжения на сетке, аналогично кривой, показанной на рис. 7 с ярко выраженными минимумами и максимумами. Занесите значение тока I_H в таблицу (стр. 12).

Упражнение

ТОЧНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЙ МИНИМУМОВ И МАКСИМУМОВ

ВНИМАНИЕ: Выполняя это упражнение, не изменяйте значений тока накала I_H и задерживающего напряжения $U_{зад}$ (положения ручек 4 и 7). Этим вы нарушите подобранный вами режим работы лампы.

8. Переведите тумблер 17 "автоматическое/ручное" ($-\wedge/=$) в нижнее положение – "ручное" ($-\wedge$).

9. Включите мультиметр в электрическую цепь установки для измерения I_A . Для этого: выберите режим работы мультиметра $DCV/200$; подсоедините красный щуп к гнезду 11 .

10. С помощью ручек 5 и 6 регулировки $U_{уск}$ сведите величину $U_{уск}$ к минимальному значению и начинайте медленно увеличивать его, наблюдая за током анода по показаниям стрелочного прибора 3. Значения $U_{уск}$, отвечающие первому максимуму, первому минимуму, второму максимуму и второму минимуму тока анода, запишите в таблицу.

11. Тумблером 18 выбрать рабочую лампу "Л2". Повторите все измерения для второй лампы, начиная с п.3.

Определение первого потенциала

Первый («резонансный») потенциал возбуждения атомов газа

$\varphi_1 = U_1 - U_2$, заполняющего лампу, определяется как разность ускоряющих напряжений U_1 и U_2 , соответствующих первому и второму крутому спаду анодного тока (см. рис.6). Потенциал, соответствующий наиболее быстрым спадам анодного тока определяется для значения токов I_1 и I_2 , которые вычисляются по формулам:

$$I_1 = (I_{max1} + I_{min1})/2;$$

$$I_2 = (I_{max2} + I_{min2})/2.$$

Полученные результаты занесите в таблицу:

№ лампы наполн.	I_H , А $U_{3,В}$	I_{max1} , мкА	I_{min1} , мкА	I_1 , мкА	U_1 , В	I_{max2} , мкА	I_{min2} , мкА	I_2 , мкА	U_2 , В	φ_1 , В
Л1										
Л2										

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. пособие. В 5 кн. Кн.5. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. - 4-е изд., перераб. - М.: Наука. Физматлит. 1998. - 368 с.
Часть II. Атомная физика.
Глава 3. Боровская теория атома.
§ 3.2. Модель атома Томпсона.

§ 3.3. Опыты по рассеянию α -частиц. Ядерная модель атома.

§ 3.4. Постулаты Бора. Опыт Франка и Герца.