

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4.5а

ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ПОСТУЛАТОВ БОРА.

Цель работы: Изучение сериальных закономерностей в спектре излучения водорода и оценка постоянной Ридберга; изучение опыта Франка и Герца и экспериментальное определение первого потенциала возбуждения атомов криптона.

Приборы и принадлежности: манометрическая лампа ПМИ-2, заполненная криптоном, измерительное устройство, электронный осциллограф, спектроскоп трехтрубный, спектральная трубка с атомарным водородом, высоковольтный источник «Спектр» с блоком питания 8 В, лампа для подсветки шкалы спектроскопа с блоком питания.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение атомных спектров явилось ключом к познанию внутренней структуры атомов. Эксперимент показал, что отдельные линии спектров излучения и поглощения газообразных веществ расположены не беспорядочно, а образуют так называемые серии, то есть группы линий, частоты которых подчиняются определенной закономерности. Наиболее простой эта закономерность оказывается у спектра водорода. Благодаря работам Бальмера (1885 г.), а затем Ридберга и Ритца было установлено, что для всех длин волн λ спектра водорода справедливо следующее выражение:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad (1)$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$ – натуральные числа, определяющие спектральную серию, $m = n + 1, n + 2, \dots$ – числа, определяющие отдельные линии в каждой серии; λ – длина волны.

Постоянная R , получившая название постоянной Ридберга, определена с высокой точностью благодаря тщательным измерениям длин волн спектра излучения атома водорода.

Известны следующие *серии спектральных линий* излучения атома водорода, названные в честь их первооткрывателей:

- $n = 1$ – серия Лаймана (ультрафиолетовое излучение);
- $n = 2$ – серия Бальмера (видимый свет);
- $n = 3$ – серия Пашена (инфракрасное излучение);
- $n = 4$ – серия Брэкетта (инфракрасное излучение);
- $n = 5$ – серия Пфунда (инфракрасное излучение) и т. д.

Схема линий серии Бальмера спектра атома водорода приведена на рис. 1. На рисунке символами $H_\alpha, H_\beta, H_\gamma, H_\delta$ обозначены первые четыре линии этой серии (только они попадают в видимую часть спектра), а $H_{гр}$ указывает коротковолновую границу серии, соответствующую в формуле (1) значениям $n = 2$ и $m \rightarrow \infty$.

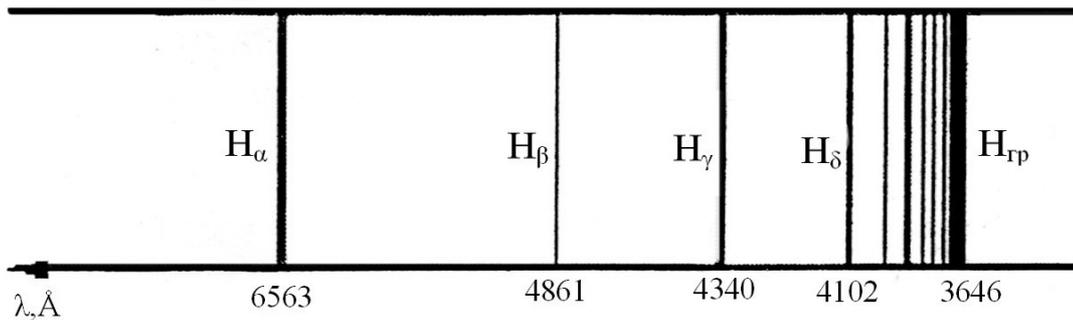


Рис.1.

Развивая идею Планка о том, что энергия излучается и поглощается отдельными порциями – квантами, причем каждая порция пропорциональна частоте излучения, Бор связал излучение и поглощение атомом кванта энергии $h\nu$ (ν – частота излучения, h – постоянная Планка) с переходом атома из одного стационарного состояния с энергией E_m в другое состояние – с энергией E_n :

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

Находясь в стационарном состоянии, атом согласно постулату Бора не излучает энергии. По теории Бора энергия атома водорода в стационарном состоянии равна:

$$E_n = -\frac{e^4 m_e}{8\epsilon_0^2 h^2} \cdot \frac{1}{n^2},$$

при этом частота излучения при переходе из состояния n в состояние m определяется выражением:

$$\nu_{nm} = \frac{e^4 m_e}{8\epsilon_0^2 h^3} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) = \frac{c}{\lambda} \quad (2)$$

Здесь e и m_e – заряд и масса электрона.

Сопоставление (2) с формулой Бальмера-Ритца (1) дает возможность выразить постоянную Ридберга через универсальные константы – заряд и массу электрона (e и m_e), скорость света c и постоянную Планка h :

$$R = \frac{e^4 m_e}{8\epsilon_0^2 ch^3} \quad (3)$$

Одним из простых опытов, убедительно подтверждающих квантовые свойства атомов, связанные с дискретностью их энергий, является эксперимент, впервые выполненный в 1913 г. **Дж. Франком и Г. Герцем**.

Идея опытов заключается в следующем. Атомы или молекулы разреженного газа «обстреливают» потоком электронов заданной энергии. Такой поток получают, ускоряя электроны в электрическом поле. Электроны могут испытывать с атомами столкновения двух видов – упругие и неупругие. Исследуют распределение скоростей (или энергий) электронов до и после столкновения.

Для исследований использовался метод задерживающего потенциала, суть которого заключается в следующем. В сосуде, заполненном разреженным газом, имеются катод, сетка и анод (рис. 2). Между катодом и сеткой прикладывают разность потенциалов U_{KC} ,

ускоряющую электроны (энергия электронов равна eU_{KC}). Между сеткой и анодом прикладывают задерживающую разность потенциалов U_{CA} и в дальнейшем поддерживают ее неизменной. Значение U_{CA} выбирают таким, чтобы электроны, почти полностью потерявшие свою энергию вследствие неупругих столкновений, не попадали на анод. В опыте измеряют зависимость анодного тока I_A от U_{KC} – вольтамперную характеристику.

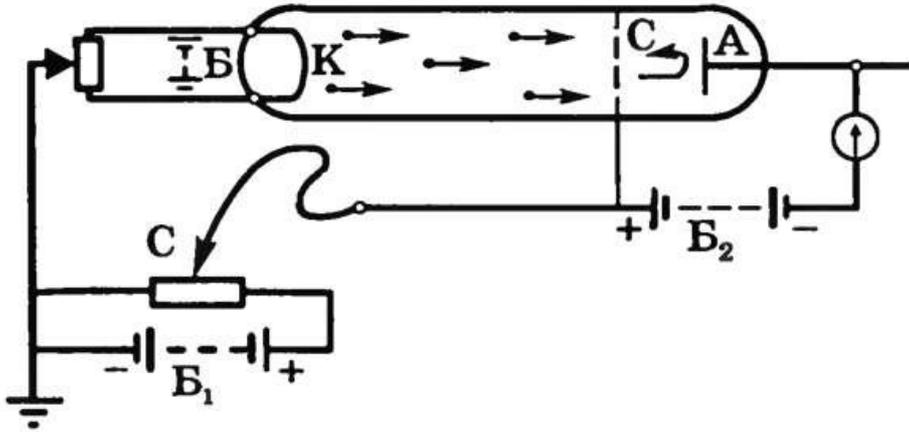


Рис.2

Если энергия электронов меньше энергии, необходимой для перехода атомов газа в первое возбужденное состояние, то рассеяние электронов на атомах происходит практически без потери энергии, так как масса электрона много меньше массы атома. То есть электроны испытывают *упругие столкновения*. Такие электроны, пролетев сетку лампы, легко преодолеют слабое тормозящее поле между сеткой и анодом – и обеспечат протекание тока в анодной цепи. При увеличении напряжения U_{KC} ток в цепи анода будет монотонно возрастать.

При разности потенциалов $U_{KC} \geq U_{кр}$, называемой первым *критическим потенциалом возбуждения* или *резонансным потенциалом*, энергия электронов становится достаточной для перехода атомов на первый возбужденный уровень. В этом случае значительная их часть испытывает неупругие столкновения с атомами, сопровождающиеся заметной потерей энергии. Медленные (после неупругих столкновений) электроны, неспособные преодолеть задерживающий потенциал, не доходят до анода – анодный ток резко уменьшается.

При дальнейшем повышении ускоряющего напряжения зона неупругих столкновений отодвигается от сетки к катоду, и на оставшемся до сетки пути электроны успевают набрать энергию, достаточную для преодоления тормозящего поля между сеткой и анодом – анодный ток вновь растет. Если потенциал на сетке еще больше увеличивать, то электроны могут после первого неупругого соударения с одними атомами испытать на пути к сетке второе, третье и т.д. неупругие столкновения с другими атомами. В результате на кривой $I_A = f(U_{KC})$ зависимости анодного тока от ускоряющего напряжения наблюдаются резко выраженные спады при значениях ускоряющего напряжения U_{KC} , кратных критическому потенциалу $U_{кр}$. В экспериментах с ртутью, выполненных Франком и Герцем, наблюдалось до пяти минимумов анодного тока (на рис. 3 показаны первые три спада).

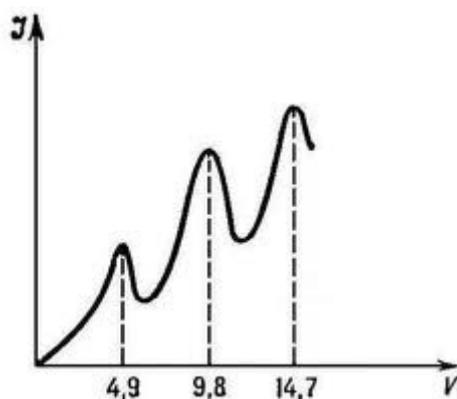


Рис. 3

Эти опыты подтвердили предположение Бора о квантовании энергии атома. Расстояние ΔU между этими спадами по шкале ускоряющего напряжения связано с энергией возбуждения ΔW атома соотношением

$$\Delta W = W_1 - W_0 = eU_{кк} .$$

Энергия возбуждения атома обычно выражается в электрон-вольтах.

Другой важный результат опыта Франка и Герца с атомами ртути связан с испусканием ультрафиолетового света с длиной волны $\lambda = 256$ нм, которое начинается, как только разность потенциалов между катодом и сеткой достигает значения $U_{кр} = 4,9$ В. Это излучение можно наблюдать, если колбу лампы изготовить из кварца или стекла, пропускающего ультрафиолетовое излучение. Если до неупругого соударения атом находился в основном (невозбужденном) состоянии с энергией W_0 , то после него он переходит в первое возбужденное состояние, характеризующееся большим значением энергии W_1 . Из этого состояния атом, спустя небольшой промежуток времени, переходит в основное состояние, испуская фотон с энергией $h\nu$, в точности совпадающей с энергией $eU_{кр}$, которой обладал электрон перед неупругим столкновением с атомом.

Таким образом, результаты опыта Франка и Герца подтвердили справедливость постулата Бора о существовании стационарных состояний атомов и постулата об излучении.

Лабораторная работа состоит из двух частей.

В первой части работы проводится наблюдение спектра испускания водорода и оценка величины постоянной Ридберга.

Вторая часть работы посвящена экспериментальному определению первого потенциала возбуждения атомов криптона посредством эффекта Франка и Герца.

ЧАСТЬ 1. Наблюдение спектра испускания водорода и оценка величины постоянной Ридберга.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В работе для наблюдения спектра испускания водорода используют трехтрубный спектроскоп Бунзена (фото 1). Схема его устройства показана на рисунке 4. Спектроскоп состоит из трех основных частей: коллиматора K , призмы P и зрительной трубы T .

Исследуемый источник света помещается перед щелью коллиматора. Сформированный линзой L_1 пучок попадает на призму. Благодаря дисперсии пучки света, соответствующие различным частотам спектра излучения источника, после призмы идут по разным направлениям. Каждый такой пучок собирается объективом L_2 зрительной трубы. Спектр

рассматривается через окуляр L_3 . В третьей вспомогательной трубе находится шкала $Ш$, освещенная лампочкой. Шкала расположена в фокальной плоскости линзы L_4 . Изображение шкалы получается в фокальной плоскости линзы L_2 и четко видно в окуляре (фото 2). Шкала градуирована в длинах волн (нанометрах).

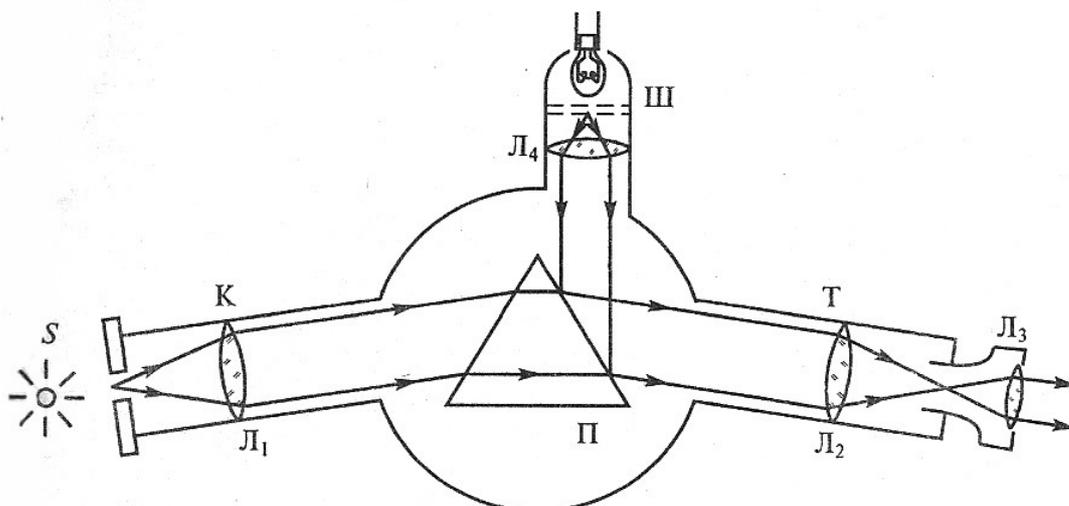


Рис. 4.



Фото 1

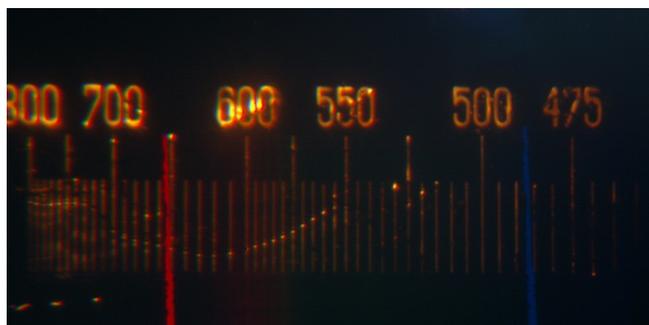


Фото 2

Спектральная трубка, содержащая атомарный водород при давлении порядка 1 мм рт.ст., устанавливается вертикально в корпусе высоковольтного источника питания. Разряд происходит между электродами, впаянными по концам трубки. Для наблюдения спектра служит средняя суженная часть трубки, так как в этой части интенсивность излучения наибольшая. Необходимое для возникновения разряда напряжение подводится к электродам трубки от высоковольтного источника "СПЕКТР", в кожух которого вставляется исследуемая трубка. Питание для "СПЕКТРА" подается от выпрямителя ВС-4-12 (8 В).

ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Включите высоковольтный источник питания спектральной трубки (тумблером ВКЛ на передней панели выпрямителя В-4-12).
2. Получите спектр излучения водорода в поле зрения спектроскопа. Отрегулируйте ширину входной щели спектроскопа таким образом, чтобы спектральные линии, наблюдаемые в спектроскоп, были достаточно узкими.
3. Определите длины волн для четырех линий в спектре излучения водорода.

4. Сравните измеренные значения длин волн с табличными.
5. Зарисуйте в тетради цветными карандашами наблюдаемый спектр.
6. По результатам измерений и формуле (1) вычислите значение постоянной Ридберга.
7. По формуле (3) вычислите теоретическое значение R . Сравните полученные результаты.
8. По результатам измерений и вычислений заполните таблицу 1.

Таблица 1.

№	Цвет линии	$\lambda_{\text{эксп}}$, (Å)	$\lambda_{\text{теор}}$, (Å)	n	m	$R_{\text{эксп}}$, (1/см)	$R_{\text{эксп.ср}}$, (1/см)	$R_{\text{теор}}$, (1/см)
1								
2								
3								
4								

ЧАСТЬ 2. Экспериментальное определение первого потенциала возбуждения атомов криптона.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Блок-схема экспериментальной установки (фото 3) представлена на рис.5.



Фото 3

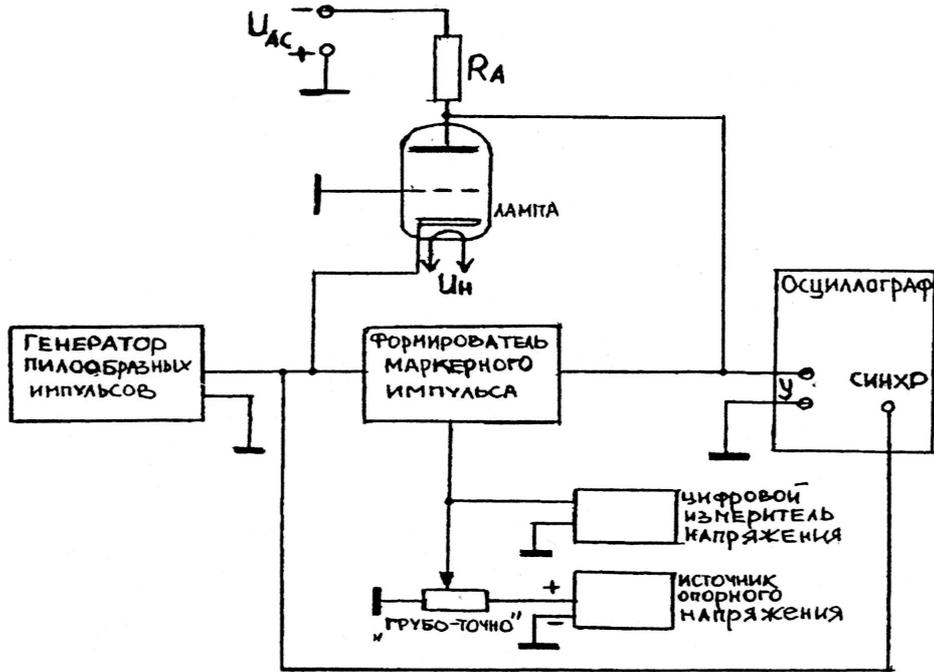


Рис. 5

Для наблюдения кривой резонансного возбуждения используется трехэлектродная лампа, выполненная на базе манометрической лампы ПМИ-2, и заполненная парами криптона.

С генератора пилообразного напряжения, расположенного в корпусе измерительного устройства, на катод лампы подаются импульсы напряжения U_{KC} амплитудой примерно 40 В. Этими же импульсами осуществляется запуск развертки осциллографа. На лампу от стабилизированных источников постоянного напряжения (находящихся внутри корпуса измерительного устройства) подается также регулируемое напряжение накала U_n и запирающее напряжение U_{AC} , которые обеспечивают нормальный режим работы лампы. Анодный ток лампы I_A преобразуется измерительным устройством в напряжение, пропорциональное току: $U_A = I_A R$, и подается на вход «Y» осциллографа.

При синхронности напряжения развертки осциллографа и сетевого напряжения U_{KC} (а следовательно, и напряжения, снимаемого с сопротивления R) на экране осциллографа наблюдается неподвижное изображение вольтамперной характеристики (зависимость анодного тока от напряжения U_{KC}) с одним или несколькими минимумами (фото 4).

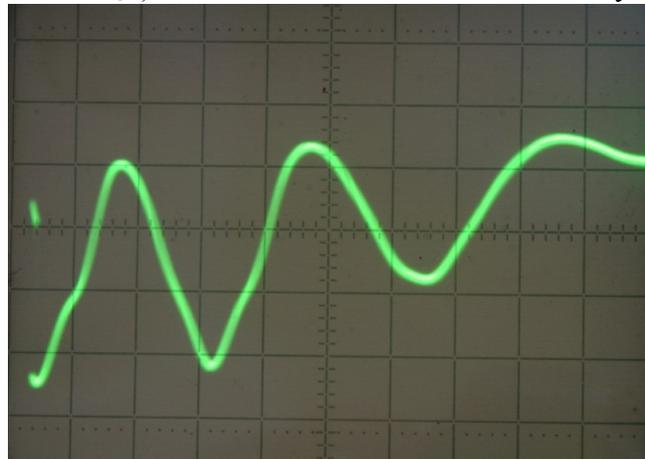


Фото 4

Число максимумов или минимумов на этой кривой зависит от величины амплитуды пилообразного напряжения, подаваемого на сетку лампы. Если амплитудное напряжение равно критическому, электроны испытывают одно неупругое соударение, чему соответствует появление первого минимума на вольтамперной характеристике. Если напряжение на сетке равно удвоенному критическому потенциалу, на кривой появляется второй минимум, вызванный тем, что электрон может испытать два неупругих столкновения и т.д.

Измерительное устройство формирует при этом на экране осциллографа маркер, который можно перемещать по экрану осциллографа при помощи ручек ГРУБО и ТОЧНО. При наведении маркера на интересующие точки отображаемого графика, происходит совпадение опорного напряжения и мгновенного пилообразного напряжения, что позволяет измерять напряжение $U_{КС}$ с помощью цифрового измерителя напряжения.

Следует иметь в виду, что положение первого максимума вольтамперной характеристики может отличаться от первого потенциала возбуждения из-за влияния контактной разности потенциалов между катодом и сеткой на неизвестную величину, которую вольтметр не показывает. Однако эта ошибка легко исключается, если величину резонансного потенциала определять по расстоянию (в вольтах) между соседними максимумами.

Измеряя напряжение, соответствующее появлению первого и второго максимумов на вольтамперной характеристике, можно определить расстояние (в электронвольтах) между энергетическим уровнями $\Delta W = W_1 - W_0$.

ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Установите на осциллографе развертку **2 ms/дел** и усиление **0,1 В/дел**.
2. Включите осциллограф и с помощью ручек «БАЛАНС», « \updownarrow », « \leftrightarrow » установите развертку луча на экране осциллографа.
3. Включите измерительное устройство. При этом должна засветиться исследуемая лампа. Выдержите лампу во включенном состоянии в течение 10 минут для установления рабочего режима лампы.
4. Установите «ВНУТРЕННИЙ» режим синхронизации осциллографа. Отрегулируйте синхронизацию осциллографа для получения устойчивой картины на экране.
5. При помощи ручек «ГРУБО» и «ТОЧНО» перемещайте маркер по осциллограмме, совмещая левый край маркера с характерными точками (максимумами) и проведите измерение $U_{КС}$ по индикатору измерительного устройства.
6. Запишите показания вольтметра при появлении первого и второго максимумов тока.
7. Измерения повторите 3-4 раза.
8. Исходя из полученных данных определите первый резонансный потенциал $U_{кр}$ и разность значений энергии атома криптона на основном и первом возбужденном уровнях.
9. Пользуясь полученным значением ΔW , вычислите длину волны резонансного излучения криптона.
10. По окончании работы выключите измерительное устройство тумблером «Выкл» на задней панели измерительного устройства. Выключите осциллограф.
11. По результатам измерений и вычислений заполните таблицу 2.

Таблица 2.

$U_{\text{макс 1}}$ (В)	$U_{\text{макс 1}}$ средн. (В)	$U_{\text{макс 2}}$ (В)	$U_{\text{макс 2}}$ средн. (В)	$U_{кр}$ (В)

ΔW эксп (эВ)	$\lambda_{\text{рез.}}$ (Å)	

ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ

1. Почему модель атома, предложенная Резерфордом, оказалась несостоятельной?
2. Сформулируйте постулаты Бора.
3. Что такое серии излучения? Покажите на схеме энергетических уровней атома водорода переходы, соответствующие серии Бальмера.
4. Запишите формулу Бальмера для серии Лаймана и Пашена.
5. Как с помощью постулатов Бора объяснить линейчатые спектры атомарных газов?
6. Какие спектральные серии содержит спектр поглощения атома водорода?
7. В чем состоят опыты Франка и Герца и какой вывод следует из них?
8. Какими способами можно перевести атом в возбужденное состояние?
9. Что называют потенциалом возбуждения и как определить второй потенциал возбуждения атома водорода?
10. Что такое потенциал ионизации и чему он равен у атома водорода?
11. Найдите длину волны границы серии Бальмера.