

Федеральное агентство по образованию  
ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет – УПИ»

## **ОПЫТ ФРАНКА И ГЕРЦА**

Методические указания к лабораторному практикуму  
по курсу «Атомная физика»  
для студентов дневной формы обучения  
физико-технического факультета

1,0 уч.-изд. л.

1,04 усл. печ. л.

Екатеринбург  
2007

20.06.2007

УДК 537.533.74

Составители: А.В. Чукин, О.В. Денисова, А.Ю. Денисов

Научный редактор: д-р физ.-мат. наук А.Н. Кислов

ОПЫТ ФРАНКА И ГЕРЦА: методические указания к лабораторному практикуму по курсу «Атомная физика» для студентов дневной формы обучения физико-технического факультета / А.В. Чукин, О.В. Денисова, А.Ю. Денисов. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007, 18с.

Методические указания предназначены для использования студентами всех специальностей физико-технического факультета при выполнении лабораторных работ в рамках практикума «Атомная физика». Студенты знакомятся с особенностями неупругого рассеяния электронов на атомах газа. Расширяют свои представления о корпускулярно волновом дуализме вещества. Изучают дискретную структуру энергетических уровней в атоме.

Приведены порядок выполнения работы и вопросы для самоконтроля.

Библиогр.: 8. Табл.: 1. Рис.5.

Подготовлено кафедрой «Теоретическая физика и прикладная математика»

©ГОУ ВПО Уральский государственный  
технический университет-УПИ, 2007

## ВВЕДЕНИЕ

Начало XX века в физике ознаменовалось бурным развитием исследований, которые легли в основу квантовой механики и теории строения атома.

В 1900 г. Макс Планк, рассматривая задачу о равновесном излучении черного тела, ввел (чуждую классической физике) гипотезу о том, что излучение и поглощение света веществом происходит не непрерывно, а отдельными порциями или «квантами».

Развивая идеи Планка, в 1905 г. Альберт Эйнштейн предположил, что дискретность присуща не только взаимодействию излучения с веществом, но и излучению вообще.

Наконец, в 1913 г. Нильс Бор применил принцип дискретности энергии к атомным системам. Бор сформулировал результаты своей работы в виде постулатов. По первому постулату Бора атомная система может находиться только в определенных, стационарных состояниях. Испускание или поглощение квантов, согласно второму постулату Бора, происходит при переходах атома из одного стационарного состояния в другое. Оба эти постулата резко противоречат требованиям классической электродинамики, согласно которой движущаяся заряженная частица должна непрерывно излучать энергию. Поэтому первоначально теория Бора встретила скептическое отношение физического сообщества.

Мощным подтверждением справедливости теории Бора и доказательством дискретности атомных уровней стали данные, полученные Джеймсом Франком и Густавом Герцем в результате опытов с электрон-атомными столкновениями (1912 – 1914 г.). Любопытно, что при постановке экспериментов и при обсуждении данных в оригинальных работах авторов теория Бора даже не упоминалась. Тем не менее, значение экспериментов оказалось столь большим, что вскоре после общественного признания теории Бора (Нобелевская премия по физике, 1922 г.) Нобелевскую премию в 1925 г. получили и авторы опытов, как отмечалось в официальном сообщении

Нобелевского комитета, «за прямое экспериментальное подтверждение существования дискретных энергетических уровней в атоме».

Целью данной лабораторной работы является повторение опыта Франка-Герца на примере столкновений электронов с атомами гелия и экспериментальное определение энергий первого критического потенциала и ионизации гелия.

## ДИСКРЕТНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УРОВНИ АТОМОВ

В основе развитой Бором квантовой теории строения атома лежат два постулата:

1. Атомы и атомные системы могут длительно пребывать только в таких состояниях, в которых они не поглощают и не излучают энергии, несмотря на происходящие в них движения заряженных частиц. В этих состояниях системы обладают внутренними энергиями, образующими дискретный ряд значений:  $E_1, E_2, \dots, E_n$ .

2. При переходе из одного стационарного состояния, характеризуемое энергией  $E_m$ , в другое, с энергией  $E_n$ , атомы поглощают или испускают квант излучения строго определенной частоты:  $\nu = (E_m - E_n)/h$ , где  $h = 6,6261 \cdot 10^{-27}$  эрг·сек – постоянная Планка.

Несмотря на то, что эти постулаты противоречат принципам классической физики и в начале вызывали споры и сомнения, впоследствии в рамках квантовой теории удалось не только обосновать наличие дискретных энергетических уровней у атомов, но и рассчитывать спектры – значения энергий, которыми может обладать атом. Пример энергетических схем для атомов ртути и гелия приведен на рис.1.

Изменение внутренней энергии атома может происходить только в результате полного перехода (скачком) между состояниями и равно разности энергий этих состояний. Переход из состояния с большей энергией (возбужденное состояние) в состояние с меньшей энергией может быть спонтанным или индуцированным внешним полем и сопровождается

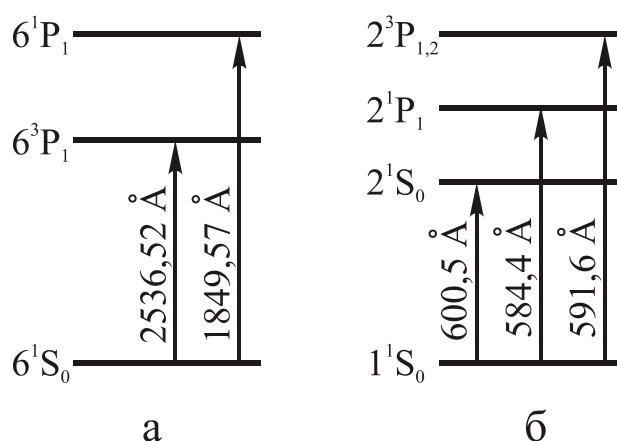


Рис. 1. Схемы уровней энергии атома ртути (а) и гелия (б)

излучением. Обратный переход из состояния с меньшей энергией в состояние с большей, может происходить как под действием излучения, определенной частоты, так и в результате передачи атому энергии, например, при столкновении его с электроном.

При этом следует различать два типа столкновений: упругие и неупругие. При упругих столкновениях не изменяется внутренняя энергия взаимодействующих частиц, а изменение кинетической энергии каждой из них зависит от соотношения их масс. При неупругом столкновении внутренняя энергия сталкивающихся частиц изменяется на величину, равную изменению кинетической энергии. Поскольку атом гораздо массивнее электрона при неупругом соударении кинетическая энергия электрона передается атому, который в свою очередь переходит из одного состояния в другое, изменяя свою внутреннюю энергию. Очевидно, что неупругое столкновение электрона с атомом может произойти, только если кинетическая энергия относительного движения электрона и атома будет превышать энергию перехода. В противном случае, столкновение будет упругим, и электрон будет изменять лишь направление своего движения.

В результате неупругих столкновений кинетическая энергия налетающего электрона передается одному из атомных электронов, вызывая его переход на свободный энергетический уровень (возбуждение) или совсем отрывая его от атома (ионизация). Чтобы установить факт возбуждения атомов, можно наблюдать, например, испускаемое

возбужденными атомами оптическое излучение или изменение коэффициента поглощения для данной спектральной линии, или другое связанное с возбуждением явление. Однако самый чувствительный метод – наблюдение за изменением энергии электронов в пучке, испытавшем столкновение с атомами.

## ОПЫТ ФРАНКА-ГЕРЦА

Идея опыта, подтверждающего дискретность атомных состояний, состоит в следующем. Исследуя распределение электронов по скоростям после их соударения с атомами газа, убедиться в том, что атомы способны воспринимать энергию электронов лишь порциями, равными энергиям перехода из основного в возбужденное состояние.

Для проведения этого опыта Франком и Герцем была использована установка, состоящая из колбы, заполненной парами ртути, через которую пропусклся электрический ток. На рисунке 2 представлена упрощенная схема эксперимента. Электроны, испускаемые разогретым катодом  $K$ , разгонялись постоянным электрическим полем и направлялись к пластинке  $A$ , перед которой располагалась сетка  $N$ . Гальванометр (на схеме микроамперметр), соединенный с пластинкой, измерял её ток. Назначение сетки, заряженной слабо положительно относительно пластинки ( $\sim 0,5$  В), заключалось в вылавливании электронов почти полностью потерявших свою энергию в результате неупругих соударений.

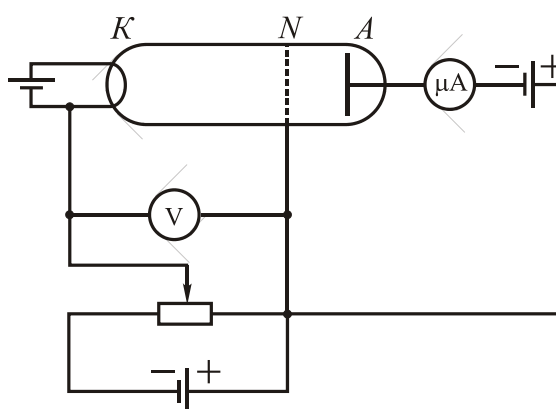


Рис.2. Схема опыта Франка-Герца.  $K$  – катод,  $A$  – анод,  $N$  – сетка

Изменяя приложенный к катоду ускоряющий потенциал можно регулировать кинетическую энергию электронов и измерять с помощью гальванометра ток, созданный электронами после столкновения с атомами в зависимости от их кинетической энергии, т.е. снимать вольтамперную характеристику (ВАХ). При увеличении ускоряющего потенциала в опытах Франка-Герца ток первоначально возрастал (рис. 3), подобно обычной вольтамперной характеристики термоэлектронных приборов. Но при потенциале примерно 4,1 В ток внезапно резко падал, затем вновь начинал возрастать до потенциала 9 В, при котором снова резко падал. Таким образом, вся кривая представляла собой ряд чередующихся максимумов, расстояние между которыми составляло 4,9 В.

Смещение первого максимума можно объяснить контактной разностью потенциалов, возникающей из-за различия материалов катода и анода. Она добавляется к ускоряющему потенциалу и эффективно сдвигает всю вольтамперную характеристику влево, не изменяя при этом расстояние между максимумами.

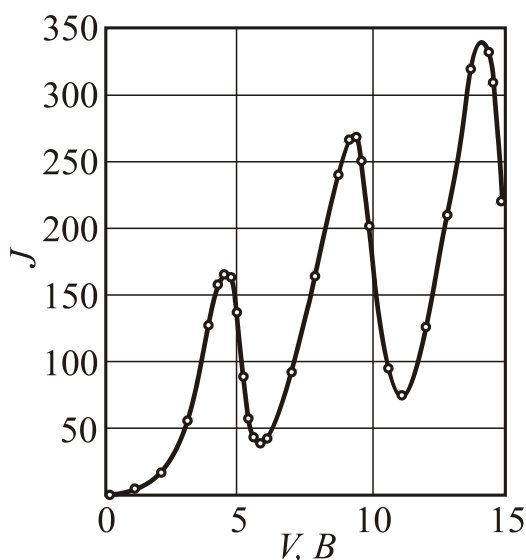


Рис. 3. Зависимость тока гальванометра от ускоряющей разности потенциалов

Такой вид вольтамперной характеристики легко объясняется теорией Бора. Как видно из схемы энергетических линий ртути (рис. 1), основное состояние атома —  $6^1S_0$ , первое возбужденное —  $6^3P_0$ . При переходе из

возбужденного в основное состояние излучается фотон с длиной волны  $2536,52 \text{ \AA}$ , что соответствует энергии  $4,9 \text{ эВ}$ . Энергия, сообщенная электрону ускоряющей разностью потенциалов  $V$ , равна  $eV$ , где  $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$  – заряд электрона. До тех пор пока энергия электронов недостаточна для возбуждения атома, т.е. меньше величины критического потенциала  $4,9 \text{ В}$ , соударения происходят упруго, и ток нарастает с увеличением потенциала. Однако, при потенциале  $4,9 \text{ В}$  удар становится неупругим, и электроны теряют всю свою энергию, передавая её атомам ртути. Эти электроны не попадут на пластинку, т.к. они будут «выловлены» сеткой, и ток пластинки резко упадет (рис. 3).

Если энергия электронов превышает критический потенциал, то они после неупругого столкновения с атомами будут обладать энергией достаточной для преодоления запирающего потенциала между сеткой и пластинкой, и ток вновь начнет нарастать.

При достаточно больших ускоряющих потенциалах электрон на пути к пластинке может испытать не одно, а несколько неупругих столкновений с атомом ртути. В этом и заключается причина повторяющихся максимумов вольтамперной характеристики (рис.3).

Энергия  $4,9 \text{ эВ}$  имеет особое значение для атомов ртути. Если энергия налетающего электрона меньше этого значения, атомы не могут поглотить её, удар происходит упруго. Энергия, равная  $4,9 \text{ эВ}$ , поглощается атомами полностью, что доказывает существование строго определенных уровней энергии, в соответствии с постулатами Бора.

Таким образом, опытами Франка и Герца было установлено, что критическое значение энергии, которую атом поглощает при возбуждении, оказалось в точности равным энергии кванта, который атом испускает, возвращаясь в основное состояние. *Разность потенциалов, сообщающая электрону энергию, равную энергии возбуждения атома, называют критическим потенциалом атома, численно равным энергии возбуждения атома, выраженной в электрон-вольтах.*



Первые критические потенциалы необходимые для перехода атома из основного в первое возбужденное состояние найдены не только для ртути, но и для других атомов (см. таблицу 1). Кроме того, можно определить и потенциалы ионизации, т.е. такие значения энергии, которые необходимо передать, чтобы отделить от атома электрон, находящегося в определенном энергетическом состоянии (таблица 1).

Таблица 1

Элемент	Атомный номер	Первый критический потенциал, эВ	Первый ионизационный потенциал, эВ
He	2	21	24,45
Na	11	2,12	5,116
K	19	1,63	4,32
Hg	80	4,9	10,39

Принципиально важно, что данные эксперименты могут быть проведены только с одноатомными газами. Если электрон сталкивается с молекулой, становится возможной передача энергии во вращательное и колебательное движение молекулы, кванты которого значительно меньше квантов электронного возбуждения. В этом случае для наблюдения уменьшения энергии электронов требуются гораздо более тонкие методы. Поэтому обычно для воспроизведения опытов Франка-Герца используют пары металлов (ртуть, щелочные металлы) и инертные газы (неон, аргон).

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В данной лабораторной работе измеряется первый критический и ионизационный потенциалы атома гелия методом задерживающего потенциала.

Экспериментальная установка состоит из:

- Блока управления с трехэлектродной лампой ПМИ-2, наполненной гелием, расположенной в защитном кожухе на верхней крышке блока;
- Двухканального осциллографа для получения ВАХ при динамическом режиме измерений;

- Цифровых вольтметра и амперметра для получения ВАХ при статическом режиме измерений.

Причем тиратрон позволяет получать вольтамперную характеристику в статическом и динамическом режимах измерения (рис. 4).

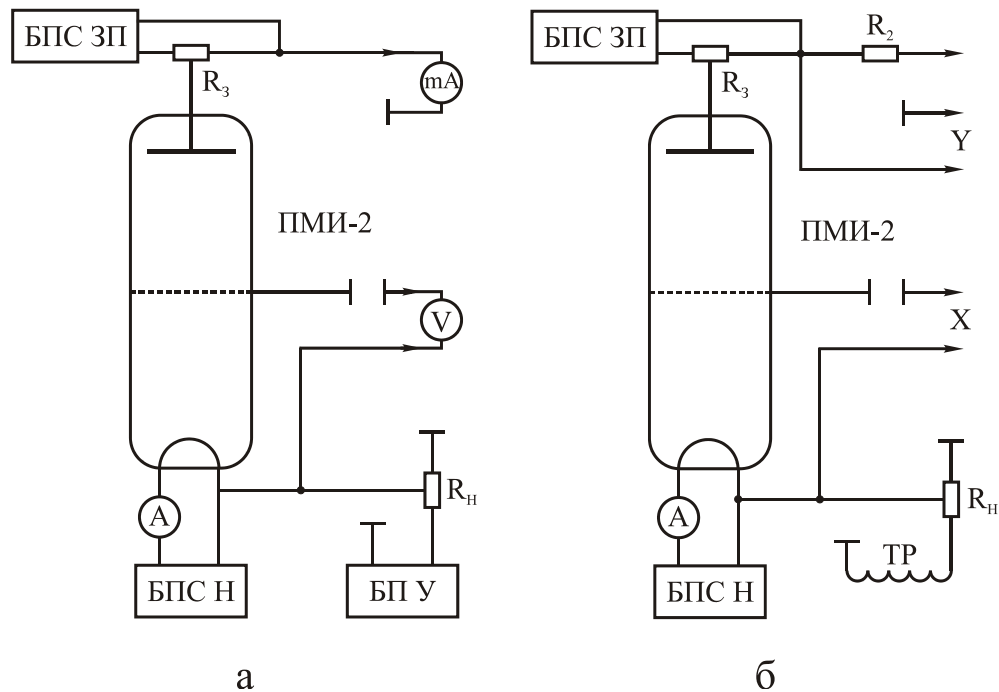


Рис.4. Схема работы тиратрона: статический (а) и динамический (б)

Источником электронов в лампе является вольфрамовый катод  $K$ , нагреваемый переменным током. Напряжение накала подается от встроенного стабилизированного источника питания «БПС Н» к соответствующим электродам лампы. В качестве анода используется двойная спираль, окружающая катод  $A$ . Роль коллектора, сетки  $N$ , играет полый металлический цилиндр, соосный с катодом и анодом. Ускоряющее напряжение подается на анод от встроенного источника питания «БП У». Величина этого напряжения регулируется ручкой  $9 U_a$  расположенной на передней панели основного прибора (рис. 5).

Задерживающий потенциал подается от встроенного стабилизированного источника питания «БПС ЗП». Величина этого потенциала регулируется ручкой  $6 U_3$  и может принимать дискретные значения от 1 до 10 В.

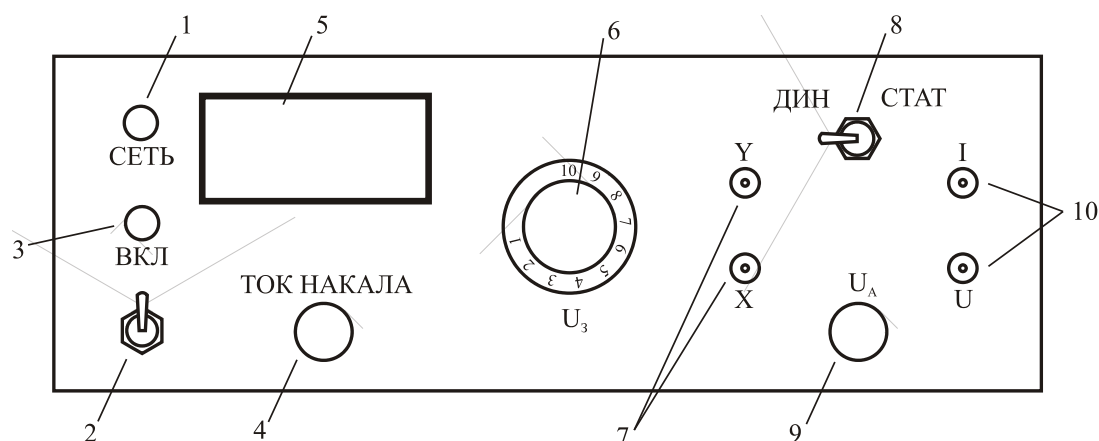


Рис. 5. Внешний вид передней панели блока управления

На рисунке указаны: 1 – индикатор подключения сети 220 В; 2 – тумблер включения питания прибора; 3 – индикатор включения питания прибора; 4 – ручка регулировки тока накала; 5 – индикатор тока накала; 6 – ручка установки задерживающего потенциала; 7 – разъёмы для подключения осциллографа при динамическом режиме измерений; 8 – тумблер переключения между динамическим и статическим режимами измерений; 9 – ручка регулировки ускоряющего напряжения; 10 – разъёмы для подключения вольтметра и миллиамперметра при статическом режиме измерений.

С помощью тумблера 8 можно изменять схему работы, переходя в статический или динамический режим измерений.

При динамическом режиме работы ускоряющий потенциал подается с трансформатора ТР, а ток коллектора регистрируется осциллографом, подключенным к нагрузочному сопротивлению  $R_2$ .

При статическом режиме наблюдения для регистрации вольтамперной характеристики служат цифровые амперметр и вольтметр.

В ходе эксперимента измеряется анодный ток, в зависимости от ускоряющего потенциала, потенциал сетки подбирается таким образом, чтобы вольтамперная характеристика имела четкие максимумы. Как только ускоряющий потенциал достигнет критического значения для атомов гелия, в районе сетки появится область, в которой электроны будут испытывать неупругие столкновения. При этом электроны, потерявшие энергию, будут

выловлены сеткой, и анодный ток резко упадет. При дальнейшем повышении ускоряющего потенциала область неупругих столкновений отодвинется к катоду и, если на оставшемся пути электроны смогут набрать энергию достаточную для преодоления задерживающего потенциала, ток снова начнет расти. Как только ускоряющий потенциал превысит значение, равное удвоенному критическому, картина повторится – появится вторая область неупругих столкновений в районе сетки, второй провал тока на вольтамперной характеристике и т. д. Критический потенциал атома гелия определяется как разность потенциалов между максимумами тока.

Концентрация атомов газа и температура существенно влияют на результат опыта и «остроту» пиков вольтамперной характеристики. В данной установке концентрация подобрана для наилучшего наблюдения первых критических потенциалов. Регистрация более высоких уровней возбуждения требует изменения конструкции лампы.

Экспериментально определенные величины ускоряющего напряжения нужно поправлять на контактную разность потенциалов между катодом и анодом. Контактная разность возникает из-за того, что работа выхода электрона из катода, как правило, меньше, чем из анода. Тем не менее, контактная разность сдвигает шкалу напряжений равномерно. Поэтому, если на вольтамперной характеристике наблюдаются два и более последовательных провала, соответствующих возбуждению одного и того же уровня, разность потенциалов между соседними пиками дает точное значение энергии возбуждения. Определенная таким образом энергия возбуждения позволяет найти контактную разность потенциалов как разницу между значением энергии возбуждения и координатой первого пика. В свою очередь найденная контактная разность может быть использована для коррекции в измерениях потенциала ионизации.

Потенциал ионизации определяют как ускоряющий потенциал, при котором наблюдается резкое нарастание тока, вызванное ионизацией атомов и освобождением дополнительных электронов.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Вывести все ручки управления на блоке управления в крайнее левое положение, а ручку установки задерживающего потенциала на значение 1 В.
2. Установить тумблер переключения режимов измерений 8 в положение «ДИН» (динамический режим).
3. Включить питание осциллографа, цифрового миллиамперметра и вольтметра.
4. Включить питание блока управления тумблером 2. Дать прогреться приборам в течение 5 минут.
5. Установить ручки 4 (ток накала  $I_n$ ), 9 (анодное напряжение  $U_a$ ) и 11 (задерживающее напряжение  $U_z$ ) в средние положения. Получить устойчивую картину вольт-амперной характеристики на экране осциллографа. Развертка луча производится справа налево.
6. **Плавно** увеличить анодное напряжение и подрегулировать ток накала так, чтобы ВАХ на экране осциллографа имела отчетливые максимумы и минимумы. Значение тока накала отображается на индикаторе 5.
7. Записать значение тока накала  $I_{n(опт)}$ , соответствующее оптимальной картине ВАХ.
8. Проследить за ходом ВАХ при изменении задерживающего потенциала и тока накала.
9. Измерив расстояние между соседними минимумами и соседними максимумами, оценить энергию первого возбужденного состояния атома гелия по их среднему значению.
10. Перевести тумблер 8 в положение «СТАТ» (статический режим).
11. Ручкой 6 установить задерживающее напряжение  $U_z = 4$  В.
12. **Плавно** увеличивая анодное напряжение  $U_a$  ручкой 9, снять ВАХ

лампы. Анодное напряжение  $U_a$  и ток коллектора  $I_k$  определяются по показаниям цифровых вольтметра и амперметра. Уточнить положения максимумов и минимумов ВАХ.

13. Снять ВАХ еще при двух значениях задерживающего напряжения  $U_z = 4 \text{ В}, 9 \text{ В}$ .

14. Построить зависимости  $I_k = f(U_a)$  при  $U_a = \text{const}$ . По построенным ВАХ определить энергию возбуждения первого уровня атома гелия. Оценить ошибку измерения. Сравнить результаты измерений, полученные при динамическом и статическом методах измерений.

15. Определить длину волны излучения, соответствующую измеренной энергии возбуждения. Используя схему энергетических уровней для гелия (рис. 1б), определите какой переход (между какими энергетическим уровнями) осуществляется в результате эксперимента.

16. Оценить энергию ионизации атома гелия.

17. Оценить достоверность полученных результатов (сравните их с табличными данными).

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ**

1. Почему для опыта Франка-Герца нельзя использовать многоатомные газы?
2. Почему с точки зрения законов классической физики атом не может быть устойчивой системой?
3. Сформулируйте постулаты Бора.
4. Покажите прямым расчётом, что в условиях эксперимента можно не учитывать теплового движения атомов гелия в лампе.
5. Какие соударения частиц называются абсолютно упругими, какие - неупругими? Запишите закон сохранения энергии для абсолютно упругого и для неупругого соударения двух тел.
6. При каком условии происходят только упругие столкновения с атомами

- газа в лампе, и при каком условии возможны неупругие столкновения?
7. Покажите прямым расчетом, что при рассмотрении столкновений электронов с атомом в данной работе можно не учитывать изменение кинетической энергии атома как целого.
  8. Нарисуйте принципиальную электрическую схему измерения вольтамперной характеристики лампы в опыте Франка - Герца в статическом режиме. Объясните назначение элементов схемы и принцип действия установки.
  9. Что такое резонансный потенциал возбуждения? Как он определяется в данной работе? Как можно определить резонансный потенциал атома, если в эксперименте наблюдается только один минимум на вольтамперной характеристике? Какая при этом допускается систематическая ошибка?
  10. Покажите, как по результатам измерения вольтамперной характеристики можно определить контактную разность потенциалов между катодом и ускоряющей сеткой?
  11. Что такое первый ионизационный потенциал атома? При каком ускоряющем напряжении в лампе начнут появляться ионы?
  12. Какие изменения необходимо внести в установку, для того чтобы можно было зафиксировать второй критический потенциал?

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Шпольский Э. В. Атомная физика: Изд. 6-е, испр. М: Наука, 1974. Т. 1: Введение в атомную физику. С. 294-312.
2. Сивухин Д. В. Атомная и ядерная физика: Учеб. пособие: В 2-х ч. М: Наука, 1986. Ч. 1: Атомная физика. С. 80-87.
3. Тригг Дж. Решающие эксперименты в современной физике. М.: Мир, 1974. С. 84-91.
4. Герц Г. Из первых лет квантовой физики // УФН. 1977. **122**. Вып. 3. С. 497-

511.

5. Hanne G. F. What really happens in the Franck-Hertz experiment with mercury?  
// *Am. J. Phys.* 1988. 56. P. 696-700.
6. Robson R. E., Li B., White R. D. Spatially periodic structures in electron swarms and the Franck-Hertz experiment // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 2000. 33. P. 507-520.
7. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т. 111. Электричество. — М.: Наука, 1983. §110.
8. Гольдин Л. Л., Новикова Г. И. Введение в атомную физику. — М.: Паука. 1988.



## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ДИСКРЕТНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УРОВНИ АТОМОВ	4
ОПЫТ ФРАНКА-ГЕРЦА	6
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА	9
ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ	13
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ	14
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	15