

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой общей физики ФТИ

 А.М. Лидер

« 27 » 05 2016 г.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3-15

ОПЫТ ФРАНКА И ГЕРЦА

Методические указания к выполнению лабораторной работы
по курсу «Общая физика» по теме «Оптика. Атомная физика»
для студентов всех направлений и специальностей

Томск-2016

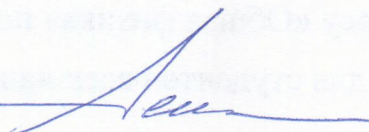
УДК 53 (076.5)

Опыт Франка и Герца. Методические указания к выполнению лабораторной работы № 3 – 15 по курсу «Общая физика» по теме «Оптика. Атомная физика» для студентов всех направлений и специальностей.

Составитель Т.Н. Мельникова

Методические указания рассмотрены и рекомендованы методическим семинаром кафедры общей физики 26.05. 2016 г.

Зав. кафедрой ОФ: А.М. Лидер.



ОПЫТ ФРАНКА И ГЕРЦА

Цель работы: ознакомление с опытом Франка и Герца, определение критического потенциала атома ртути и подтверждение дискретности внутренней энергии атомов, используя идею опыта Франка и Герца.

Приборы и принадлежности: трубка Франка-Герца, заполненная ртутью; нагревательная камера (230 В переменного тока); блок питания (230 В переменного тока); одноканальный цифровой термометр; никель-хром – никелевый погружной датчик с диапазоном измерения от $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $550\text{ }^{\circ}\text{C}$; аналоговый осциллограф (2 x 35 МГц); универсальный цифровой измерительный прибор; система регистрации анодного тока.

КРАТКОЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Спектры излучения разреженных газов (т.е. спектры излучения отдельных невзаимодействующих друг с другом атомов) состоят из отдельных спектральных линий или групп спектральных линий, образующих линейчатый спектр, характерный только для данного газа. Такой вид излучения атомов связан с их внутренним строением.

В результате экспериментов по взаимодействию альфа-частиц с веществом в 1911 году Резерфордом была предложена планетарная модель атома: в центре атома находится положительно заряженное ядро, вокруг которого по замкнутым орбитам движутся электроны.

Однако, с точки зрения классической физики такой атом неустойчив, так как при движении по искривленным траекториям (движении с ускорением) электроны должны непрерывно излучать энергию в виде электромагнитных (световых) волн, следовательно, терять энергию и, в конечном счете, упасть на ядро. Кроме того, частота обращения должна при этих условиях непрерывно меняться, и спектр излучения атома должен быть не линейчатым, а сплошным.

Впервые линейчатый спектр излучения атома описал Нильс Бор в 1913 году. В основу развитой им квантовой теории строения атома Бор положил следующие два постулата:

1. Атом может длительное время находиться только в определенных стационарных состояниях, в которых он не излучает энергии. Стационарным состояниям соответствуют стационарные орбиты, по которым движутся электроны без излучения электромагнитных волн. Стационарными орбитами являются круговые орбиты, для которых выполняется соотношение:

$$m_e v_n r_n = \frac{nh}{2\pi}; \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (1)$$

где n – номер стационарной орбиты, главное квантовое число; $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг – масса электрона; v_n – его скорость на n – ой орбите радиуса r_n ; $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка.

2. При переходе электрона с одной стационарной орбиты на другую излучается или поглощается один фотон (квант энергии электромагнитного поля) с энергией

$$h\nu = E_{n_2} - E_{n_1}, \quad (2)$$

где E_{n_1} и E_{n_2} – энергия стационарных состояний атомов n_1 и n_2 до и после излучения (поглощения). Набор возможных дискретных частот

$$\nu = \frac{E_{n_2} - E_{n_1}}{h} \quad (3)$$

квантовых переходов определяет линейчатый спектр атома.

На основании такого подхода Бор установил выражение для энергии электрона на n – й стационарной орбите атома водорода (простейшего из атомов, существующих в природе, состоящего из ядра и одного электрона).

$$E_n = \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0 h^2} \cdot \frac{1}{n^2} = -\frac{13,5}{n^2} \text{ (эВ)}. \quad (4)$$

Отсюда на основании второго постулата Бор впервые получил выражение для линий спектра атома водорода:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right), \quad (5)$$

где λ – длина волны линии излучения; $R = \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0 h^3 c} = 1,01 \cdot 10^{-7} \text{ м}^{-1}$ –

постоянная Ридберга; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме; n_1 – номер энергетического уровня атома, на который совершает переход электрон, а n_2 – номер уровня, с которого переходит электрон. Это выражение было ранее известно как эмпирическая **обобщенная формула Бальмера**.

Опыты Джеймса Франка и Густава Герца исторически явились одними из первых экспериментальных доказательств **дискретности энергетических уровней атомов**.

Д. Франк и Г. Герц заявили в 1914 г., что электроны, проходящие через пары ртути, передают энергию дискретно, и что это

сопровождается наблюдением эмиссии ультрафиолетовой спектральной линии ртути ($\lambda = 254$ нм). Несколько месяцев спустя Нильс Бор понял, что это было подтверждением разработанной им модели атома.

Таким образом, опыт Франка-Герца с ртутью стал классическим опытом для подтверждения квантовой теории.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКИХ ПОТЕНЦИАЛОВ

Для определения критических потенциалов возбуждения атомов Франк и Герц использовали *метод задерживающего потенциала*.

Используется трехэлектродная лампа (триод), в которой (в отличие от диода) между анодом A и катодом K вставлен третий электрод – сетка C (рис. 1).

Трехэлектродная лампа заполняется парами ртути при давлении около 1 мм рт. ст. ($\approx 133,3$ Па). Величину напряжения U_c между катодом K и сеткой C можно плавно менять с помощью потенциометра, создавая разность потенциалов, ускоряющую электроны, а между сеткой C и анодом A создается слабое тормозящее поле с разностью потенциалов $U_{\text{зап}} = (0,5 \div 1,0)$ В (метод задерживающих потенциалов). При неизменной разности потенциалов между анодом и сеткой снимается зависимость анодного тока I_a от потенциала сетки U_c , изображенная на рис. 2.

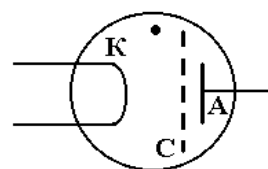


Рис.1

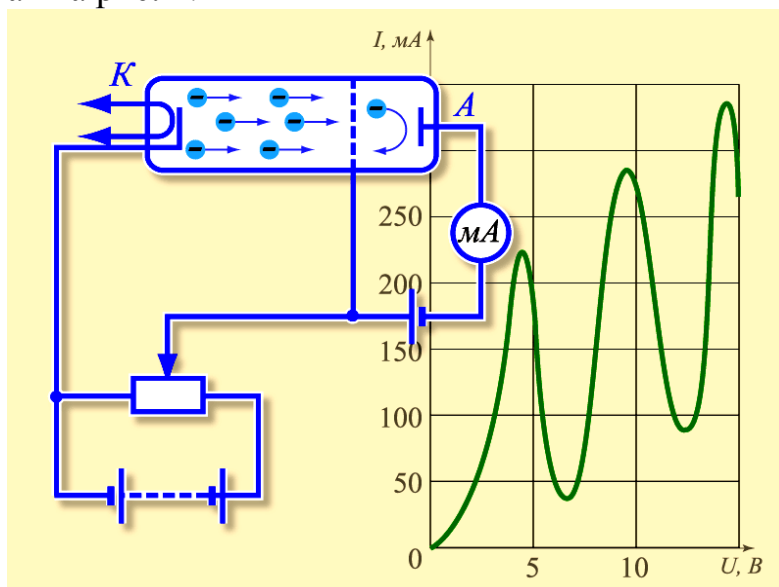


Рис. 2. Схема установки для измерения кривой Франка-Герца для ртути

Электроны под действием напряжения U_c движутся от катода к сетке и испытывают столкновения с атомами ртути. Если состояния атома дискретны, то его внутренняя энергия при неупругом столкновении с электроном также должна изменяться дискретно на значение, равное разности внутренних энергий атома в стационарных состояниях. В этом случае при малых ускоряющих напряжениях U_c энергия электрона, налетающего на атом, недостаточна для того, чтобы перевести его в возбужденное состояние, и происходят только упругие столкновения. При этом электрон почти не теряет энергию, так как масса электрона в тысячи раз меньше массы атома, и **ток лампы растет, как в вакуумном диоде.**

По мере увеличения разности потенциалов между сеткой и катодом энергия электронов увеличивается и, наконец, оказывается достаточной для возбуждения атомов. При таких (неупругих) столкновениях кинетическая энергия налетающего электрона передается одному из атомных электронов, вызывая его переход на ближайший свободный энергетический уровень. Так как между коллектором и сеткой поддерживается небольшое задерживающее напряжение (потенциал коллектора меньше потенциала сетки), **ток коллектора резко уменьшается.** Это происходит потому, что при неупругих соударениях с атомами электроны почти полностью теряют свою энергию и не могут преодолеть задерживающего потенциала (около 1 В) между сеткой и анодом. При дальнейшем увеличении напряжения U_c ток анода вновь возрастает: электроны, испытавшие неупругие соударения, успевают набрать энергию, достаточную для преодоления задерживающего потенциала.

Следующее замедление роста тока происходит, когда часть электронов неупруго сталкивается с атомами два раза: первый раз посередине пути, второй – у сетки, и т.д.

Когда ток падает во второй, третий и т.д. раз, то это значит, что электроны приобрели достаточную энергию, чтобы испытать неупругие столкновения дважды, трижды и т.д. на пути своего движения от нити накала к сетке. В экспериментах с парами ртути, выполненных Франком и Герцем, наблюдается до пяти минимумов. Величина первого критического потенциала равна $\sim 4,9$ В. На графике (рис.2) это значение соответствует первому максимуму тока I_a .

Из опыта следует, что при увеличении ускоряющего потенциала вплоть до 4,9 В анодный ток *возрастает монотонно*, его значение проходит через максимум, затем резко уменьшается и возрастает вновь. Дальнейшие максимумы наблюдаются при 9,8 В и 14,7 В.

Ближайшим к основному, невозбужденному состоянию атома ртути является возбужденное состояние, отстоящее по шкале энергий на 4,9 В. Пока разность потенциалов между катодом и сеткой меньше 4,9 В, электроны, встречая на своем пути атомы ртути, испытывают с ними только упругие соударения. При $e\Delta U = 4,9$ эВ энергия электрона становится достаточной, чтобы вызвать неупругий удар, при котором электрон отдает атому ртути всю кинетическую энергию, возбуждая переход одного из электронов атома из нормального состояния в возбужденное. Электроны, потерявшие свою кинетическую энергию, уже не смогут преодолеть тормозящий потенциал и достигнуть анода. Этим и объясняется резкое падение анодного тока при $e\Delta U = 4,9$ эВ. При значениях энергии, кратных 4,9, электроны могут испытывать с атомами ртути 2, 3, ... неупругих соударения. При этом они полностью теряют свою энергию и не достигают анода, т.е. наблюдается резкое падение анодного тока.

Таким образом, опыт показывает, что электроны передают свою энергию атомам ртути порциями, причем 4,9 эВ – наименьшая возможная порция, которая может быть поглощена атомом ртути в основном энергетическом состоянии.

Следовательно, идея Бора о существовании в атомах стационарных состояний блестяще выдержала проверку экспериментом.

Атомы ртути, получившие при соударении с электронами энергию ε , переходят в возбужденное состояние и должны вернуться в основное, излучая при этом, согласно второму постулату Бора, квант света с частотой $\nu = \frac{\varepsilon}{h}$. По известному значению $\varepsilon = 4,9$ эВ можно вычислить

длину волны светового кванта: $\lambda = \frac{hc}{\varepsilon} \approx 254$ нм. Таким образом, атомы

ртути, бомбардируемые электронами с энергией 4,9 эВ, должны являться источником ультрафиолетового излучения с длиной волны $\lambda \approx 254$ нм, что действительно обнаруживается в опытах.

Т.е., опыт Франка и Герца экспериментально подтверждает не только первый, но и второй постулат Бора и вносит большой вклад в развитие атомной физики.

В результате, на кривой зависимости тока коллектора I_a от натяжения между катодом и сеткой U_c имеется ряд максимумов и минимумов, отстоящих друг от друга на равные расстояния ΔU .



(Следует отметить, что первый минимум достигается не при 4,9 В, а сдвинут на величину, соответствующую так

называемому **контактному напряжению между катодом и сеткой**).

Поскольку электроды лампы, как правило, изготавливаются из разных металлов, между ними возникает **дополнительно внешняя контактная разность потенциалов**. Ее наличие приводит к смещению кривой зависимости тока анода I_a от ускоряющего напряжения U_c влево или вправо на величину этой контактной разности потенциалов. Однако, расстояние между соседними максимумами ΔU на графике при этом не меняется.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

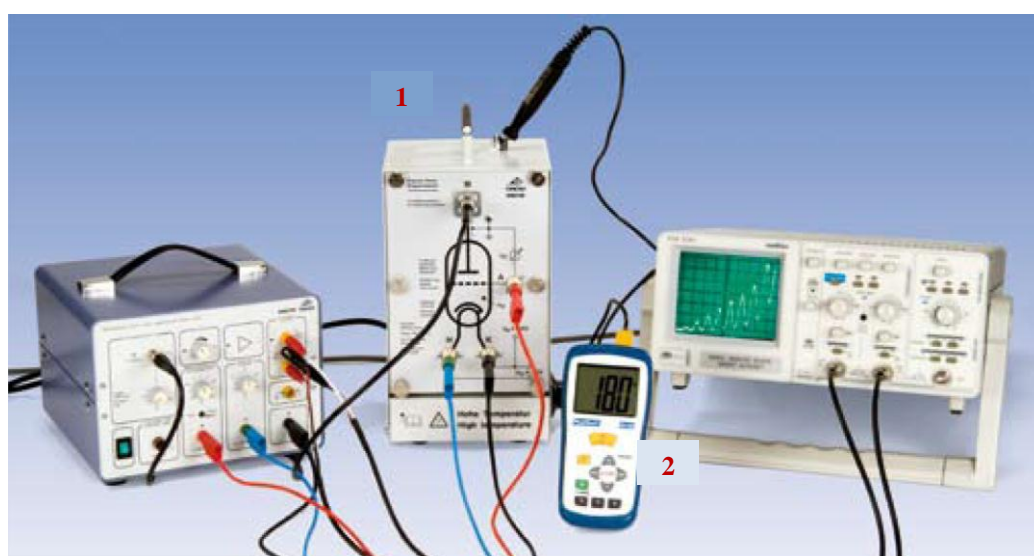


Рис.3

В работе используется лампа, в которую помещается капля ртути. В этом случае измеряется первый критический потенциал возбуждения **атомов ртути**. Для создания необходимого для работы давления насыщенных паров ртути в "ртутной" лампе, лампу помещают вовнутрь электрической печи (1) и нагревают ее до определенной температуры. Величина температуры определяется с помощью электронного термометра (2) (см. рис. 3).

Стеклянная трубка, из которой откачан воздух, имеет катод накала K , сетку C и электрод – мишень A (рис. 4). Электроны вылетают из катода и ускоряются напряжением U в направлении сетки. Проходя через сетку, они достигают мишени и, таким образом, вносят вклад в ток мишени I , если их кинетическая энергия достаточна для того, чтобы преодолеть замедляющее напряжение U_{CA} между сеткой и мишенью.

Ускоряющая разность потенциалов между сеткой C и катодом K создается при помощи напряжения U . На анод, являющийся собирающим электродом, подается отрицательная относительно сетки задерживающая разность потенциалов, равная по величине $U_{CA} \approx (2 \div 2,5) \text{ В}$.

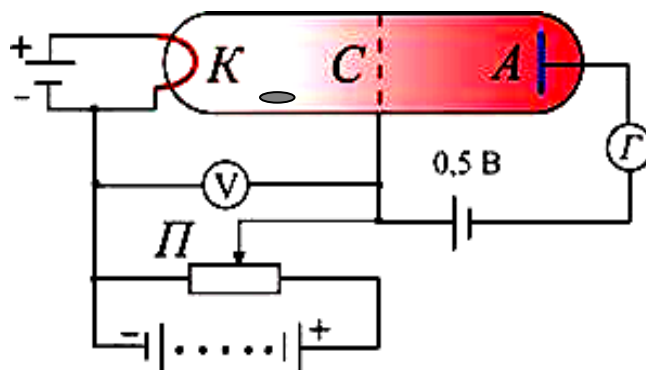


Рис. 3. Зависимость тока мишени I от ускоряющего напряжения U

Ток в анодной цепи имеет малую величину, поэтому в работе для его регистрации используется измерительная система, состоящая из усилителя постоянного тока и вольтметра. Усилитель усиливает величину падения напряжения при прохождении анодного тока по входному сопротивлению усилителя, а вольтметр измеряет эту величину.

Вольтамперную характеристику лампы можно наблюдать на экране осциллографа. Для этого ускоряющая разность потенциалов должна меняться, например, по синусоидальному закону (на источнике питания предусмотрен выход $\sim 50 \text{ В}$), а для регистрации анодного тока лампы осциллограф подключают к сопротивлению, которое устанавливается вместо усилителя постоянного тока. При этом осциллограф регистрирует падение напряжения на сопротивлении при прохождении по сопротивлению анодного тока.

ЗАДАНИЕ

1. Измерьте зависимость тока мишени I от напряжения U между катодом и сеткой.
2. Определите разнесение ΔU максимумов (или минимумов) тока. Определите критический потенциал возбуждения атомов исследуемого газа.
3. Сравните интервалы напряжения с энергиями возбуждения атомов ртути.
4. Определите длину волны излучения, испускаемого атомами ртути.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

1. Изучите теоретическую часть работы.
2. Подготовьте установку к работе:
 - 2.1. Включите в сеть все приборы и прогрейте их в течение $(5 \div 10)$ мин.
 - 2.2. Включите электропечь для нагревания "ртутной" лампы. Для этого установите переключатель, расположенный на боковой панели электропечи, в положение 180-190.
3. Замкните ключ и установите значение напряжения накала, указанное на лампе ($U_n = 9$ В).
4. Установите задерживающую разность потенциалов $U_{CA} \approx (2 \div 2,5)$ В.
5. Проверьте, готова ли "ртутная" лампа к измерениям. Для этого посмотрите визуально по показаниям электронного термометра, температуру внутри лампы. Если она достигла значения $(180 \div 190)^\circ\text{C}$, тогда можно начинать снимать вольтамперную характеристику.

(Дело в том, что если давление насыщенных паров ртути в лампе мало или, наоборот, велико, то минимумы анодного тока в вольтамперной характеристике наблюдаться не будут).

6. Измерьте с помощью усилителя и вольтметра зависимость анодного тока лампы I_a от ускоряющего напряжения U_c . Результаты измерений занесите в таблицу.

Значение анодного тока можно записывать в делениях шкалы (*а не в μA !*). Не имеет смысла снимать точки для построения графика через одинаковые интервалы U_c . На участках монотонного изменения I_a точки можно ставить редко, а в районах максимумов – часто (чтобы не пропустить эти максимумы).

Так как показания вольтметра прямо пропорциональны величине анодного тока в лампе, в работе достаточно построение графика зависимости показаний вольтметра U от величины ускоряющей разности потенциалов U_c .

Таблица

№ п/п	1	2	3	4	5	...	n
$U_c, \text{В}$							
$U (I_a)$							

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. По данным таблицы постройте график $U(I_a) = f(U_c)$.

2. Из графика определите первый потенциал возбуждения ΔU атомов ртути. При определении первого критического потенциала атомов ртути необходимо иметь в виду, что первый максимум не накопится при потенциале неупругого соударения из-за контактной разности потенциалов между катодом и сеткой. Поэтому для определения критического потенциала более правильным будет определение расстояния между соседними максимумами или минимумами на графике.
3. Переведите схему в режим осциллографического измерения и убедитесь, что вольтамперная характеристика имеет такой же вид, что и полученная с помощью вольтметра и амперметра.
4. Пользуясь формулой $\lambda = \frac{hc}{e\Delta U}$, по измеренной величине ΔU определите длину волны излучения, испускаемого атомами ртути. Объясните, почему не наблюдается глазом свечение лампы.
5. Сделайте вывод по работе.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Почему электрон в атоме, вращаясь вокруг ядра по законам классической физики, должен упасть на ядро?
2. Для описания чего Нильс Бор ввел свои квантовые постулаты? Сформулируйте их.
3. В чем сущность опыта Франка и Герца?
4. Поясните метод задерживающего потенциала, с помощью которого Франк и Герц осуществили свой опыт.
5. Какие столкновения электронов с атомами называются упругими и какие – неупругими? На каких участках вольтамперной характеристики имеют место упругие, а на каких – неупругие столкновения?
6. С какой целью на анод подается задерживающее напряжение? Из каких соображений оно выбирается?
7. Что такое первый потенциал возбуждения? Какое состояние атома называется основным, а какое возбужденным?
8. Чем определяется критический потенциал возбуждения атомов?
9. Что понимается здесь под внутренней энергией атома?
10. Какое состояние атома называется основным, возбужденным?
11. Как объясняется существование нескольких минимумов на вольт – амперной характеристике?

12. Дайте современное толкование энергетического уровня электрона в атоме. Что принято называть квантовым хаосом?
13. Чем отличаются вольтамперные характеристики используемой в опыте лампы с парами ртути и без паров ртути?
14. Какую разность потенциалов по величине и знаку прикладывают между катодом и сеткой и для чего?
15. Если давление паров ртути в лампе превышает некоторое значение, то получить вольтамперную кривую с максимумами и минимумами невозможно. Объясните этот эффект.
16. Оцените минимальную скорость, которую должен иметь электрон, чтобы возбудить атом гелия до первого резонансного потенциала?
17. Как, исходя из опыта Франка и Герца, подтвердить дискретность энергии атома?
18. Запишите связь между частотой излучения атома и ускоряющим напряжением?
19. На какую минимальную величину может изменяться внутренняя энергия атома ртути?
20. Как определяется частота светового кванта, который излучает атом ртути при переходе в основное состояние? С какой точностью можно определить его значение?
21. Чему равна полная энергия атома ртути в основном энергетическом состоянии?
22. Чему равен потенциал ионизации для ртути?
23. Найдите длину волны света, излучаемого парами ртути, при возбуждении их бомбардирующими электронами на первый энергетический уровень.
24. Объясните, почему возрастают значения силы тока в максимумах вольтамперной характеристики, полученной в опытах Франка и Герца по изучению неупругих столкновений электронов с атомами паров ртути.
25. Для чего в опыте Франка и Герца служит сетка?

ГЛОССАРИЙ

Альфа-частица (α -частица) – положительно заряженная частица, образованная 2 протонами и 2 нейтронами. Идентична ядру атома гелия-4 (${}^4_2\text{He}$).

Анод — электрод некоторого прибора, присоединённый к положительному полюсу источника питания. Электрический потенциал анода положителен по отношению к потенциалу катода.

Бальмер Иоганн Якоб — швейцарский математик и физик. Открыл в 1885 году спектральную серию водорода.

Вакуумный диод – вакуумная двухэлектродная электронная лампа. Катод диода нагревается до температур, при которых возникает термоэлектронная эмиссия. При подаче на анод отрицательного относительно катода напряжения все эмитированные катодом электроны возвращаются на катод, при подаче на анод положительного напряжения часть эмитированных электронов устремляется к аноду, формируя его ток. Таким образом, диод выпрямляет приложенное к нему напряжение.

Внутренняя энергия атома – сумма кинетической энергии электрона (ядро неподвижно) и потенциальная энергия взаимодействия электрона с ядром.

Возбужденное состояние – неустойчивое состояние (атома, молекулы, атомного ядра и т. д.) с энергией, превышающей энергию основного (нулевого) состояния.

Вольтамперная характеристика (ВАХ) — зависимость тока от приложенного к элементу электрической цепи напряжения или зависимость падения напряжения на элементе электрической цепи от протекающего через него тока.

Длина волны – расстояние между двумя ближайшими друг к другу точками, колеблющимися в одинаковых фазах.

Катод — электрод некоторого прибора, присоединённый к отрицательному полюсу источника тока.

Квант – неделимая порция какой-либо величины в физике (фотон оптического излучения). В основе понятия лежит представление квантовой физики о том, что некоторые физические величины могут принимать только определенные значения (говорят, что физическая величина квантуется).

Квантовый хаос – квантовая механика систем, являющихся хаотическими в классическом пределе.

Критический потенциал – разность потенциалов между катодом и анодом, при которой электроны разрядного тока приобретают энергию, достаточную для возбуждения какого-либо атомного или молекулярного процесса в разрядном промежутке. Возникновение подобных процессов проявляется в нарушении плавного хода вольт-

амперной характеристики разряда (т. е. зависимости силы тока от разности потенциалов).

Линейчатый спектр — оптические спектры испускания и поглощения, состоящие из отдельных спектральных линий.

Метод задерживающего потенциала — электроны, испускаемые катодом, при неупругом соударении с атомами теряют часть своей энергии, приобретенной в ускоряющем поле. Вследствие этого они не могут преодолеть задерживающее поле между сеткой и анодом, что ведет к уменьшению анодного тока при снятии вольт-амперной характеристики трехэлектродной газонаполненной лампы.

Нильс Бор — расстояние между двумя соседними максимумами интенсивности или между двумя соседними минимумами.

Первый потенциал возбуждения — разность потенциалов, сообщающая электрону энергию, равную энергии возбуждения атома.

Постулат — утверждение, принимаемое без доказательств, и служащее основой для построения какой-либо научной теории.

Потенциал ионизации — мера энергии ионизации, которая равна работе вырывания электрона из атома или молекулы и характеризует прочность связи электрона в атоме или молекуле. Потенциал ионизации принято выражать в вольтах, численно он равен энергии ионизации в эВ.

Основное состояние — стационарное квантовое состояние с наименьшей внутренней энергией.

Сетка — третий электрод триода, расположенный между анодом и катодом. Сетка служит для электростатического управления анодным током. Если изменять потенциал сетки, то изменяется электрическое поле и вследствие этого изменяется катодный ток лампы.

Стационарные состояния — состояние квантовой системы, при котором её энергия и другие динамические величины, характеризующие квантовое состояние, не изменяются.

Триод — электронная лампа, имеющая три электрода: термоэлектронный катод (прямого или косвенного накала), анод и одну управляющую сетку.

Фотон — элементарная частица, квант электромагнитного излучения (в узком смысле — света). Это безмассовая частица, способная существовать только двигаясь со скоростью света. Электрический заряд фотона также равен нулю.

Франка - Герца опыт – опыт, доказывающий, что внутренняя энергия атома может принимать лишь дискретные значения. Впервые поставлен в 1913 Дж. Франком и Г. Герцем.

Эмиссия – явление вырывания электронов с поверхности твердых или жидких тел.

Энергетический уровень — фиксированное количество энергии, которой обладают ядро атома, электрон, атом или молекула. Например, внутри атома энергия электронов не изменяется непрерывно. Она выражается в дискретном ряде значений, которые и носят название энергетических уровней.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Тюрин Ю.И. Физика. Ч. 3, Оптика. Квантовая физика: Учебное пособие для технических университетов. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2005.–740 с.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. – М.: Высш. шк., 2002. – 718 с.
3. Савельев И.В. Курс общей физики. Кн.5. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. – М.: АСТ, 2001. – 368 с.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высш. шк, 2002. – 542 с.
5. Шпольский Э.В. Атомная физика. Т.1. Введение в атомную физику. – М.: Наука. 1974. 576 с.