

Министерство образования и науки Российской Федерации
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
Северо-Западный государственный заочный
технический университет

Кафедра физики

Физика

Задание на контрольную работу 5
«Квантовая физика»

Методические указания к выполнению контрольной работы

Факультеты:

радиоэлектроники, технологии и автоматизации управления в машиностроении, энергетический, технологии веществ и материалов, информатики, экономики и управления на автомобильном транспорте

Направление подготовки дипломированного специалиста и отнесенных к нему специальностей 650000 – техника и технологии
Направление подготовки бакалавра 550000 – технические науки

Санкт-Петербург
2004

Утверждено редакционно-издательским советом университета

УДК 53(07)

Физика: Задание на контрольную работу 5 «Квантовая физика»
методические указания к выполнению контрольной работы. – СПб.: СЗТУ,
2004.- 36с.

Задание на контрольную работу по дисциплине «Физика» разработано в соответствии с требованиями государственных образовательных стандартов высшего профессионального образования по направлению подготовки дипломированного специалиста и отнесенных к нему специальностей 650000 – «Техника и технологии» и направлению подготовки бакалавров 550000 – «Технические науки».

Методический сборник включает задание на контрольную работу 5 «Квантовая физика». В сборнике содержатся рекомендации к решению задач и оформлению контрольной работы, основные законы и формулы, примеры решения задач и некоторые справочные материалы.

Рассмотрено на заседании кафедры физики 4 марта 2004 г.; одобрено методической комиссией факультета системного анализа и естественных наук 13 мая 2004 г.

Рецензенты: кафедра физики Санкт-Петербургского государственного технического университета технологии и дизайна (зав. кафедрой К.Г.Иванов, д-р физ.-мат. наук, проф.); В.М.Грабов, д-р физ.-мат. наук, проф. каф. физики Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена.

Научный редактор: Н.А.Тупицкая, канд. физ.-мат. наук, доц. каф. физики СЗТУ.

Составители: Ю.А.Карташов, канд. техн. наук, проф.; Д.Г.Летенко, канд. физ.-мат. наук, доц.; С.В.Михайлова, канд. пед. наук, доц.; В.А. Подхалюзин, канд. техн. наук, доц.; Н.А.Тупицкая, канд. физ.-мат. наук, доц.; А.Б.Федорцов, д-р физ.-мат. наук, проф.

© Северо-Западный государственный заочный технический университет, 2004.

Введение

В процессе изучения дисциплины «Физика» студенты выполняют пять контрольных работ. Решение физических задач является необходимой практической основой изучения дисциплины «Физика».

Основной целью выполнения контрольных работ является выработка у студентов приемов и навыков решения контрольных задач из разных областей физики, помогающих студентам решать в дальнейшем инженерные задачи.

Контрольные работы несут в себе функцию закрепления, развития и углубленного освоения основных положений теории. Решение задач способствует приобщению студентов к самостоятельной творческой работе. При решении задач студент должен самостоятельно осуществить ряд мыслительных операций, опираясь на имеющиеся у него знания и умения. Контрольные работы позволяют проверить степень усвоения студентами основных разделов теоретического курса.

1. Общие требования к оформлению контрольной работы

При оформлении контрольных работ условия задач в контрольных работах переписываются полностью, без сокращений. Решения задач должны сопровождаться краткими, но исчерпывающими пояснениями с обязательным использованием рисунков, выполненных чертежными инструментами. Для замечаний преподавателя на страницах тетради оставляются поля и интервалы между задачами (не менее 5 см). В конце каждой контрольной работы необходимо указать, каким учебным пособием пользовался студент (название учебного пособия, автор, год издания).

Решение задач рекомендуется выполнять в следующей последовательности:

1. Ввести буквенные обозначения всех используемых физических величин.
2. Под рубрикой "Дано" кратко записать условие задачи с переводом значений всех величин в одну систему единиц - СИ.
3. Сделать (если это необходимо) чертеж, поясняющий содержание задачи и ход решения.
4. Сформулировать физические законы, на которых базируется решение задачи, и обосновать возможность их использования.
5. На основе сформулированных законов составить уравнение или систему уравнений, решая которую можно найти искомые величины.

6. Решить уравнение и получить в общем виде расчетную формулу, в левой части которой стоит искомая величина, а в правой - величины, данные в условии задачи.

7. Проверить единицы измерения полученных величин по расчетной формуле и тем самым подтвердить ее правильность.

8. Произвести вычисления. Для этого необходимо все значения величин в единицах СИ подставить в расчетную формулу и выполнить вычисления (с точностью не более 2-3 значащих цифр).

9. При подстановке в расчетную формулу, а также при записи ответа числовые значения величин следует записывать как произведение десятичной дроби с одной значащей цифрой перед запятой на соответствующую степень десяти. Например, вместо 6340 надо записать $6,34 \cdot 10^3$.

Выполненные контрольные работы сдаются на рецензию преподавателю по крайней мере за одну неделю до экзамена по физике. После рецензирования вносятся исправления в решение задач в соответствии с замечаниями преподавателя. Исправленные решения помещаются в конце тетради с контрольными работами, которые сдаются на повторную рецензию.

Зачет по каждой контрольной работе принимается преподавателем в процессе собеседования по правильно решенной и прорецензированной контрольной работе.

В каждой контрольной работе следует решить восемь задач. Номера задач определяются по табл. 5 в соответствии с номером своего варианта. Номер варианта соответствует последней цифре шифра студента.

Контрольные работы выполняются в школьной тетради, на обложке которой приводятся сведения о студенте (фамилия, имя, отчество, факультет, шифр, номер специальности), а также номер контрольной работы, номер варианта и номера всех задач контрольной работы.

Библиографический список

Основной:

1. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики.- М.: Высш.шк., 1989.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. - М.: Высш. шк., 1985 и др. годы изданий.
3. Трофимова Т.И., Павлова З.Г. Сборник задач по курсу физики с решениями. -М.:Высш. шк.,1999 и др.годы изданий.

Дополнительный:

4. Савельев И.В. Курс общей физики.- М.: Наука, 1989 и др. годы изданий.
5. Чертов А.Г., Воробьев А.А. Задачник по физике.- М.: Интеграл-Пресс, 1997, 1981.
6. Изергина Е.Н., Петров Н.И. Все решения к «Сборнику задач по общему курсу физики» В.С.Волькенштейн: В 2 кн. -М.:Олимп, 1999.
7. Трофимова Т.И. Физика. 500 основных законов и формул: Справочник. -М.:Высш. шк., 2000.
8. Физика. Основные законы и формулы: Руководство к решению задач / Карташов Ю.А., Попов И.В. - СПб.: СЗПИ, 1998.
9. Климчицкая Г.Л., Шабаетов В.М. Элементы квантовой механики и атомной физики. Текст лекций.- СПб.: СЗПИ, 1992.
10. Физика твердого тела: Текст лекций / Комаровских К.Ф., Арешкин А.Г., Карташов Ю.А. и др.-СПб.: СЗПИ, 1993.
11. Иванов В.Г., Федорцов А.Б. Основные единицы измерения оптического излучения: Текст лекций. - СПб.: СЗПИ, 1992.
12. Иванов В.Г., Торчинский И.А., Харламова В.Б. Основы квантовой оптики: Текст лекций.- СПб.: СЗПИ, 1993.
13. Федорцов А.Б. Радиационная безопасность: Учеб. пособие. - СПб.: СЗПИ, 1996.
14. Шерстюк А.И. Физика твердого тела: Письменные лекции.- СПб.:СЗТУ, 2003.

2.Контрольная работа 5 «Квантовая физика»

2.1.Методические указания к выполнению контрольной работы 5

В контрольную работу 5 включены задачи по темам: “Квантовая оптика”, “Физика твердого тела”, “Физика атома и атомного ядра”.

Тема “Квантовая оптика” представлена задачами на законы теплового излучения, внешнего фотоэффекта.

В рамках темы “Элементы квантовой механики” представлены задачи на соотношение неопределенностей в квантовой физике, определение длины волны де Бройля.

По теме “Физика твердого тела” в контрольную работу включены задачи на расчет электропроводности полупроводников.

По теме “Физика атома и атомного ядра” даны задачи по расчету энергии связи ядра атома, законы радиоактивного распада и по применению атомной энергии в народном хозяйстве.

Все дополнительные данные задач находятся в справочных таблицах приложений.

Таблица 5

| Вариант | Номера задач | | | | | | | |
|---------|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 0 | 501 | 511 | 521 | 531 | 541 | 551 | 561 | 571 |
| 1 | 502 | 512 | 522 | 532 | 542 | 552 | 562 | 572 |
| 2 | 503 | 513 | 523 | 533 | 543 | 553 | 563 | 573 |
| 3 | 504 | 514 | 524 | 534 | 544 | 554 | 564 | 574 |
| 4 | 505 | 515 | 525 | 535 | 545 | 555 | 565 | 575 |
| 5 | 506 | 516 | 526 | 536 | 546 | 556 | 566 | 576 |
| 6 | 507 | 517 | 527 | 537 | 547 | 557 | 567 | 577 |
| 7 | 508 | 518 | 528 | 538 | 548 | 558 | 568 | 578 |
| 8 | 509 | 519 | 529 | 539 | 549 | 559 | 569 | 579 |
| 9 | 510 | 520 | 530 | 540 | 550 | 560 | 570 | 580 |

Задачи 501 ... 510 относятся к теме “Тепловое излучение”. Для решения этих задач необходимо изучить тему “Тепловое излучение” по учебникам [1], с. 400...403 или [2], с. 292...295.

Задачи 511 ... 520 относятся к теме “Внешний фотоэффект”. Приступая к решению этих задач, необходимо ознакомиться с данной темой по учебникам [1], с. 410...411 или [2], с. 301...303.

Задачи 521 ... 530 относятся к теме “Строение атома. Теория Бора”. Для решения этих задач необходимо ознакомиться с конкретными физическими понятиями, законами и формулами данной темы по учебникам [1], с. 444...452 или [2], с. 386...389.

Задачи 531...540 относятся к теме “Физика твердого тела”. Для их решения целесообразно изучить данную тему по учебникам [1], с. 514...523 или [2], с.442...452.

Задачи 541...580 охватывают темы строения атомного ядра, законы радиоактивного распада. Приступая к решению этих задач, необходимо ознакомиться с данной темой по учебникам [1], с. 532...535 или [2], с. 466...472.

2.2. Основные законы, формулы, примеры решения задач

Квантовая оптика

Поток Φ , излучаемый (поглощаемый) телом, равен:

$$\Phi = \frac{W}{t}, \quad (1)$$

где W -энергия, излучаемая (поглощаемая) телом, t -время.

R_e - энергетическая светимость (излучательность) равна:

$$R_e = \frac{d\Phi}{dt}. \quad (2)$$

Закон Стефана-Больцмана

$$R_e = \sigma T^4, \quad (3)$$

где R_e - энергетическая светимость (излучательность) абсолютно черного тела; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт / (м²· К⁴) - постоянная Стефана-Больцмана, T – термодинамическая температура Кельвина.

Первый закон Вина (закон смещения Вина)

$$\lambda_m = b / T, \quad (4)$$

где λ_m - длина волны, на которую приходится максимум излучения абсолютно черного тела; $b = 2,90 \cdot 10^{-3}$ м·К - постоянная первого закона Вина.

Второй закон Вина

$$(r_{\lambda,T})_{max} = b' T^5, \quad (5)$$

где $(r_{\lambda,T})_{max}$ - максимальная спектральная плотность энергетической светимости абсолютно черного тела; $b' = 1,3 \cdot 10^{-5}$ Вт / (К⁵·м³) - постоянная второго закона Вина.

Энергия фотона

$$\varepsilon = h\nu \quad \text{или} \quad \varepsilon = \hbar\omega \quad (6),$$

где h - постоянная Планка; $\hbar = h/2\pi$ - приведенная постоянная Планка; ν - частота фотона; $\omega = 2\pi\nu$ - циклическая частота.

Импульс фотона

$$p = mc = h/\lambda. \quad (7)$$

Формула Эйнштейна для фотоэффекта

$$h\nu = A + E_{max}^{(k)}, \quad (8)$$

где $h\nu$ – энергия фотона, падающего на поверхность металла; A -работа выхода электрона; $E_{max}^{(k)}$ - максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов.

Красная граница фотоэффекта

$$\nu_0 = A/h \quad \text{или} \quad \lambda_0 = hc/A, \quad (9)$$

где ν_0 и λ_0 - минимальная частота света и соответствующая длина волны, при которых еще возможен фотоэффект.

Примеры решения задач

Пример 1

Длина волны, на которую приходится максимум энергии в спектре излучения черного тела, 0,58 мкм. Определить энергетическую светимость (излучательность) поверхности тела.

Дано:

$$\lambda_m = 0,58 \text{ мкм} = 5,8 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

R_e - ?

Решение. Энергетическая светимость R_e абсолютно черного тела в соответствии с законом Стефана-Больцмана пропорциональна четвертой степени термодинамической температуры и выражается формулой

$$R_e = \sigma T^4, \quad (1)$$

где σ - постоянная Стефана-Больцмана; T - термодинамическая температура.

Температуру T можно вычислить с помощью закона Вина

$$\lambda_m = b / T, \quad (2)$$

где b - постоянная закона смещения Вина.

Используя формулы (2) и (1), получаем

$$R_e = \sigma (b / \lambda_m)^4.$$

Произведем вычисления

$$R_e = 5,67 \cdot 10^{-8} \left(\frac{2,90 \cdot 10^{-3}}{5,8 \cdot 10^{-7}} \right)^4 \text{ Вт/м}^2 = 3,54 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2 = 35,4 \text{ МВт/м}^2.$$

Пример 2

Работа выхода материала фотокатода равна 3,4эВ. Какова должна быть максимальная длина волны излучения, падающего на фотокатод, если фототок прекращается при разности потенциалов 1,2В?

Дано:

$$A_{\text{вых}} = 3,4 \text{ эВ}$$

$$U_3 = 1,2 \text{ в}$$

$$\lambda_{\text{max}} - ?$$

Решение. Запишем уравнение Эйнштейна для фотоэффекта

$$\varepsilon = A_{\text{вых}} + E_{\text{кин}}^{\text{max}},$$

где ε - энергия фотонов, падающих на поверхность фотокатода; $A_{\text{вых}}$ - работа выхода электрона, $E_{\text{кин}}^{\text{max}}$ - максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов.

Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов равна потенциальной энергии задерживающего электрического поля, т.е.

$$E_{\text{кин}}^{\text{max}} = eU_3,$$

где e - заряд электрона; U_3 - задерживающая разность потенциалов. Минимальная энергия фотонов, при которой возможен фотоэффект, равна $\varepsilon = h \frac{c}{\lambda_{\text{max}}}$, где

λ_{max} - максимальная длина волны фотоэлектронов.

Подставим полученные соотношения в уравнение Эйнштейна, получим

$$h \frac{c}{\lambda_{\text{max}}} = A_{\text{вых}} + eU_3, \text{ откуда находим } \lambda_{\text{max}}:$$

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{hc}{A_{\text{вых}} + eU_3}$$

Подставим численные значения

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{6,610^{-34} \cdot 310^8}{5,4 \cdot 10^{-19} + 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,2} = 2,710^{-7} \text{ м}$$

Физика атома

Боровская теория для атома водорода и водородоподобных ионов.

Момент импульса электрона (правило квантования орбит)

$$L_n = m v_n r_n = n \hbar, \quad (1)$$

где m - масса электрона; v_n - скорость электрона на n -й орбите; r_n - радиус n -й стационарной орбиты; $\hbar = h/2\pi$ - приведенная постоянная Планка; $n=1,2,\dots$ - главное квантовое число.

Радиус n -й стационарной орбиты

$$r_n = \frac{a_0}{Z} n^2, \quad (2)$$

где a_0 - радиус первой Боровской орбиты в атоме водорода; Z - порядковый номер элемента в таблице Менделеева.

Полная энергия электрона на n -й орбите

$$E_n = - \frac{E_i Z^2}{n^2}, \quad (3)$$

где $E_i = Rhc$ - энергия ионизации атома водорода.

Энергия, излучаемая или поглощаемая атомом (ионом)

$$E = h\nu = E_{n_2} - E_{n_1} = Z^2 E_i \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right), \quad (4)$$

где n_1 и n_2 - квантовые числа, соответствующие энергетическим уровням, между которыми совершается переход электрона.

Спектроскопическое волновое число

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

где λ - длина волны фотона, R - постоянная Ридберга.

Примеры решения задач

Пример 1

Электрон в атоме водорода перешел с четвертого энергетического уровня на второй. Определить энергию испущенного при этом фотона.

Дано:

$$n_1 = 4$$

$$n_2 = 2$$

ε_ϕ - ?

Решение. Для определения энергии фотона воспользуемся сериальной формулой для водородоподобных ионов

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

где λ - длина волны фотона; R - постоянная Ридберга; Z - заряд ядра в относительных единицах (при $Z=1$ формула переходит в серийную формулу для водорода); n_1 - номер орбиты, на которую перешел электрон; n_2 - номер орбиты, с которой перешел электрон (n_1 и n_2 - главные квантовые числа).

Энергия фотона ε_{ϕ} выражается формулой

$$\varepsilon_{\phi} = hc/\lambda.$$

Поэтому умножив обе части равенства (1) на hc , получим выражение для энергии фотона

$$\varepsilon_{\phi} = hc/\lambda = RhcZ^2 \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right).$$

Так как Rhc есть энергия ионизации E_i атома водорода, то

$$\varepsilon_{\phi} = E_i Z^2 \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right).$$

Вычисления выполним во внесистемных единицах. Подставляя данные из условия: $E_i = 13,6$ эВ; $Z = 1$; $n_1 = 2$; $n_2 = 4$, получим

$$\varepsilon_{\phi} = 13,6 \cdot 1^2 \cdot (1/2^2 - 1/4^2) \text{ эВ} = 13,6 \cdot 3/16 \text{ эВ} = 2,25 \text{ эВ}.$$

Пример 2

Электрон в ионе гелия (He^+) находится в основном состоянии. Определить кинетическую, потенциальную и полную энергии электрона на орбите.

Дано:

He^+

$n = 1$

$E_{\text{кин}} - ?$ $E_{\text{пот}} - ?$

Решение. Согласно теории Бора, кинетическая энергия электрона на стационарной орбите номера n определяется

$$E_{\text{кин}} = \frac{mv_n^2}{2},$$

а потенциальная энергия

$$E_{\text{пот}} = - \frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r_n},$$

где Z - заряд ядра (порядковый номер элемента в таблице Менделеева), v_n и r_n - скорость электрона и радиус орбиты соответственно.

Радиус орбиты номера n равен

$$r_n = \frac{n^2}{Z} r_o, \quad (1)$$

а скорость электрона на орбите определяется выражением (в соответствии с правилом квантования орбит)

$$v_n = \frac{n\hbar}{mr_n}, \quad (2)$$

или, учитывая формулу (1),

$$v_n = \frac{Zh}{mr_o n}. \quad (3)$$

На орбите центростремительная сила F равна силе Кулона $\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_o r_n^2}$, связывающей электрон с ядром,

$$F = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_o r_n^2}.$$

Поэтому потенциальная энергия электрона может быть представлена в виде

$$E_{\text{пот}} = -\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_o r_n^2} = -mv_n^2 = -2E_{\text{кин}}.$$

При этом полная энергия электрона на орбите равна

$$E = E_{\text{пот}} + E_{\text{кин}} = -E_{\text{кин}}.$$

Находим кинетическую энергию в соответствии с формулой (3)

$$E_{\text{кин}} = \frac{mv_n^2}{2} = \frac{Z^2 \hbar^2}{2mr_n^2 n^2}.$$

Учитывая, что $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34}$ Дж·с, $m = 0,911 \cdot 10^{-30}$ кг, $r_o = 0,529 \cdot 10^{-10}$ м, для гелия $Z = 2$ и условие $n = 1$, получим

$$E_{\text{кин}} = \frac{4 \cdot (1,05)^2 \cdot 10^{-68}}{2 \cdot 0,911 \cdot 10^{-30} (0,529)^2 \cdot 10^{-20}} = 8,63 \cdot 10^{-18} \text{ Дж} = \frac{8,63 \cdot 10^{-18}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 54,4 \text{ эВ},$$

$$E_{\text{пот}} = -2E_{\text{кин}} = -108,8 \text{ эВ}, \quad E = -E_{\text{кин}} = -54,4 \text{ эВ}.$$

Отметим, что полная энергия электрона в основном состоянии ($n = 1$) может быть записана в виде

$$E = -Z^2 E_i,$$

где E_i - энергия ионизации атома водорода, равная 13,6 эВ.

Подставляя в это выражение $Z = 2$, получим выше найденное значение энергии $E = -54,4$ эВ.

Элементы квантовой механики

Длина волны де Бройля

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{2\pi\hbar}{p}, \quad (1)$$

где p - импульс частицы.

В релятивистском случае

$$p = \frac{1}{c} \sqrt{(2E_o + E_k)E_k}, \quad (2)$$

где E_o - энергия покоя частицы, E_k - кинетическая энергия частицы, равная

$$E_k = m_o c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right), \quad (3)$$

где m_o - масса частицы, v - скорость частицы.

В нерелятивистском случае

$$p = m_o v = \sqrt{2m_o E_k}, \quad (4)$$

где кинетическая энергия частицы $E_k = \frac{m_o v^2}{2}$. (5)

Соотношения неопределенностей:

а) для координаты и импульса $\Delta p_x \Delta x \geq \hbar/2$, (6)

где Δp_x - неопределенность проекции импульса на ось x ,
 Δx - неопределенность координаты x ;

б) для энергии и времени $\Delta E \Delta t \geq \hbar/2$, (7)

где ΔE - неопределенность энергии; Δt - время жизни квантовой системы в данном энергетическом состоянии.

Примеры решения задач

Пример 1

Электрон, начальной скоростью которого можно пренебречь, прошел ускоряющую разность потенциалов U . Найти длину волны де Бройля для двух случаев: 1) $U_1 = 51$ В; 2) $U_2 = 510$ кВ.

Дано:

электрон

$$U_1 = 51 \text{ В}$$

$$U_2 = 510 \text{ кВ} = 5,1 \cdot 10^5 \text{ В}$$

λ - ?

Решение. Длина волны де Бройля λ для частицы зависит от ее импульса p и определяется формулой

$$\lambda = \frac{h}{p}, \quad (1)$$

где h - постоянная Планка.

Импульс частицы можно определить, если известна ее кинетическая энергия E_k . Связь импульса с кинетической энергией различна для нерелятивистского случая (когда кинетическая энергия частицы много меньше энергии ее покоя) и для релятивистского случая (когда кинетическая энергия сравнима с энергией покоя частицы).

В нерелятивистском случае

$$p = \sqrt{2m_0 E_k}, \quad (2)$$

где m_0 - масса частицы.

В релятивистском случае

$$p = \frac{1}{c} \sqrt{(2E_0 + E_k)E_k}, \quad (3)$$

где $E_0 = m_0 c^2$ - энергия покоя частицы.

Формула (1) с учетом соотношений (2) и (3) запишется:

в нерелятивистском случае

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_0 E_k}}, \quad (4)$$

в релятивистском случае

$$\lambda = \frac{h}{\frac{1}{c} \sqrt{(2E_o + E_k)E_k}} . \quad (5)$$

Сравним кинетические энергии электрона, прошедшего заданные в условии задачи разности потенциалов $U_1 = 51$ В и $U_2 = 510$ кВ, с энергией покоя электрона и, в зависимости от этого, решим, которую из формул -(4) или -(5) следует применить для вычисления длины волны де Бройля.

Как известно, кинетическая энергия электрона, прошедшего ускоряющую разность потенциалов U , равна

$$E_k = eU.$$

В первом случае

$E_k = eU_1 = 51$ эВ = $0,51 \cdot 10^{-4}$ МэВ, что много меньше энергии покоя электрона.

Следовательно, в этом случае можно применить формулу (4). Для упрощения расчетов заметим, что $E_k = 10^{-4} m_o c^2$. Подставив это выражение в формулу (4), перепишем ее в виде

$$\lambda_1 = \frac{h}{\sqrt{2m_o \cdot 10^{-4} \cdot m_o c^2}} = \frac{10^2}{\sqrt{2}} \cdot \frac{h}{m_o c} .$$

Учтя, что $h/m_o c$ есть комптоновская длина волны Λ , получим

$$\lambda_1 = \frac{10^2}{\sqrt{2}} \Lambda .$$

Так как $\Lambda = 2,43$ нм, то

$$\lambda_1 = \frac{10^2}{\sqrt{2}} 2,43 \text{ нм} = 171 \text{ нм} .$$

Во втором случае кинетическая энергия

$$E_k = eU_2 = 510 \text{ кэВ} = 0,51 \text{ МэВ},$$

т.е. равна энергии покоя электрона. В этом случае необходимо применить релятивистскую формулу (5). Учтя, что $E_k = 0,51 \text{ МэВ} = m_o c^2$, по формуле (5) найдем

$$\lambda_2 = \frac{h}{\frac{1}{c} \sqrt{(2m_o c^2 + m_o c^2)m_o c^2}} = \frac{h}{\sqrt{3m_o^2 c^2}} ,$$

$$\text{или } \lambda_2 = \frac{\Lambda}{\sqrt{3}} .$$

Подставив значение Λ и произведя вычисления, получим

$$\lambda_2 = \frac{2,43}{\sqrt{3}} \text{ пм} = 1,40 \text{ пм.}$$

Пример 2

Кинетическая энергия электрона в атоме водорода составляет величину порядка 10 эВ. Используя соотношение неопределенностей, оценить минимальные размеры атома.

Дано:

$$E_k = 10 \text{ эВ}$$

$$l_{\min} - ?$$

Решение. Соотношение неопределенностей для координаты и импульса имеет вид $\Delta p_x \Delta x \geq \hbar/2$, где Δp_x - неопределенность импульса частицы (электрона); Δx - неопределенность координаты частицы (в данном случае электрона); $\hbar = h/2\pi$ - приведенная постоянная Планка h .

Из соотношения неопределенностей следует, что чем точнее определяется положение частицы в пространстве, тем более неопределенным становится импульс, а следовательно, и энергия частицы. Пусть атом имеет линейные размеры l , тогда электрон атома будет находиться где-то в пределах области с неопределенностью

$$\Delta x = l/2.$$

Соотношение неопределенностей можно записать в этом случае в виде

$$\frac{l}{2} \Delta p \geq \frac{\hbar}{2},$$

откуда

$$l \geq \frac{\hbar}{\Delta p}.$$

Физически разумная неопределенность импульса Δp_x , во всяком случае, не должна превышать значение самого импульса p , т. е. $\Delta p \leq p$.

Импульс p связан с кинетической энергией E_k соотношением

$$p = \sqrt{2mE_k}.$$

Заменим Δp значением $\sqrt{2mE_k}$ (такая замена не увеличит l).
Перейдем к равенству

$$l_{\min} = \frac{2\hbar}{\sqrt{2mE_k}}.$$

Подставив числовые значения и произведя вычисления, получим

$$l_{\min} = \frac{2 \cdot 1,05 \cdot 10^{-34}}{\sqrt{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10}} \text{ м} = 1,16 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 116 \text{ пм}.$$

Физика твердого тела

Удельная электропроводность полупроводника

$$\gamma = e(nb_n + pb_p), \quad (1)$$

где e - заряд электрона, n и p - концентрация носителей заряда (подвижных электронов и дырок), b_n и b_p - подвижности электронов и дырок.

В случае проводимости одного типа одним из слагаемых в выражении (1) можно пренебречь. Для собственного полупроводника следует положить $n = p$.

Зависимость удельной электропроводности собственного полупроводника от температуры

$$\gamma = \gamma_0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right), \quad (2)$$

где ΔE - ширина запрещенной зоны полупроводника; γ_0 - константа, почти не зависящая от температуры; k - постоянная Больцмана.

При незначительном изменении удельного сопротивления вблизи комнатной температуры

$$\rho = 1/\gamma = \rho_0 (1 + \beta t), \quad (3)$$

где ρ_0 - удельное сопротивление при 0°C ; β - температурный коэффициент; t - температура в $^\circ\text{C}$.

Холловская разность потенциалов равна

$$U_H = R_H \frac{B}{a} I, \quad (4)$$

где B - индукция магнитного поля, a - толщина образца; I - сила тока в образце; R_H - постоянная Холла. Для полупроводника с кристаллической решеткой типа алмаза (Ge, Si) постоянная Холла равна

$$R_H = \frac{3\pi}{8e} \frac{nb_n^2 - pb_p^2}{(nb_n + pb_p)^2}. \quad (5)$$

Постоянную Холла для собственного полупроводника можно получить из этого выражения, считая $n = p$; для электронного – $n \gg p$, для дырочного – $p \gg n$.

Примеры решения задач

Пример 1

До какой температуры нужно нагреть образец из арсенида галлия, находящегося при температуре 0°C , чтобы его проводимость возросла в 4 раза?

Дано:
 $T=273\text{K}$
 $\gamma/\gamma=4$

$T=?$

Решение. Удельная проводимость полупроводников связана с температурой соотношением

$$\gamma = \gamma e^{-\Delta E/kT},$$

где γ – постоянная; ΔE – ширина запрещенной зоны; k – постоянная Больцмана.

Таким образом, $\frac{\gamma}{\gamma} = \frac{e^{-\Delta E/kT}}{e^{-\Delta E/kT}} = \exp\left[\frac{\Delta E}{k}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right] = 4$.

Прологарифмируем выражение и получим

$$\frac{\Delta E}{k}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right) = \ln 4,$$

откуда
$$T_2 = \left(\frac{1}{T_1} - \frac{\kappa \ln 4}{\Delta E}\right)^{-1}.$$

Полагая для арсенида галлия $\Delta E=1,43$ эВ, произведем вычисления

$$T_2 = \left(\frac{1}{273} - \frac{1,3810^{-23} * 2 * 0,69}{1,43 * 1,610^{-19}}\right)^{-1} = 300\text{K}.$$

Пример 2

Некоторый примесный полупроводник имеет решетку типа алмаза и обладает только дырочной проводимостью. Определить концентрацию носителей и их подвижность, если постоянная Холла равна $3,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{Кл}$. Удельная проводимость полупроводника 110 См/м .

Дано:

p - полупроводник

$$R_H = 3,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{Кл}$$

$$\gamma = 110 \text{ См/м}$$

$$n_p - ? \quad b_p - ?$$

Решение. Концентрация p дырок связана с постоянной Холла, которая для полупроводников с решеткой типа алмаза, обладающих носителями только одного знака, выражается формулой

$$R_H = \frac{3\pi}{8} \frac{1}{ep},$$

где e - элементарный заряд.

Отсюда

$$p = \frac{3\pi}{8} \frac{1}{eR_H}. \quad (1)$$

Выпишем все величины в единицах СИ: $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл; $R_H = 3,8 \cdot 10^{-4}$ м³/Кл. Подставим числовые значения величин в формулу (1) и произведем вычисления

$$p = \frac{3 \cdot 3,14}{8} \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3,8 \cdot 10^{-4}} \text{ м}^{-3} = 1,19 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}.$$

Удельная проводимость γ полупроводников выражается формулой

$$\gamma = e(n b_n + p b_p), \quad (2)$$

где n и p - концентрации электронов и дырок; b_n и b_p - их подвижности.

При отсутствии электронной проводимости первое слагаемое в скобках равно нулю и формула (2) примет вид

$$\gamma = e p b_p.$$

Отсюда искомая подвижность

$$b_p = \frac{\gamma}{ep}. \quad (3)$$

Подставим в (3) выражение p по формуле (1)

$$b_p = \frac{8}{3\pi} \gamma R_H. \quad (4)$$

Подставив в (4) значения γ и R_H в единицах СИ и произведя вычисления, получим

$$b_p = \frac{8}{3 \cdot 3,14} 110 \cdot 3,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с}) = 3,6 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с}).$$

Физика атомного ядра

Обозначение ядер

$${}^A_Z X,$$

где X - химический символ элемента, A - массовое число (число нуклонов в ядре)

$$A = Z + N,$$

Z - зарядовое число (число протонов), N - число нейтронов.

Закон радиоактивного распада

$$N = N_0 \exp(-\lambda t), \quad (1)$$

где N - число ядер, нераспавшихся к моменту времени t ; N_0 - число ядер в начальный момент времени ($t = 0$), λ - постоянная распада.

Зависимость периода полураспада от постоянной распада

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}. \quad (2)$$

Число ядер, распавшихся за время t ,

$$\Delta N = N_0 - N = N_0 (1 - e^{-\lambda t}). \quad (3)$$

В случае, если интервал времени Δt , за который определяется число распавшихся ядер, много меньше периода полураспада $T_{1/2}$, то

$$\Delta N \approx \lambda N \Delta t. \quad (4)$$

Среднее время жизни τ радиоактивного ядра, т.е. интервал времени, за который число нераспавшихся ядер уменьшается в e раз,

$$\tau = \frac{1}{\lambda}. \quad (5)$$

Число атомов N , содержащихся в радиоактивном изотопе,

$$N = \frac{m N_A}{\mu}, \quad (6)$$

где m - масса изотопа, μ - молярная масса, N_A - постоянная Авогадро.

Активность A радиоактивного изотопа

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t}, \quad (7)$$

где dN - число ядер, распавшихся за интервал времени dt , A_0 - активность изотопа в начальный момент времени.

В системе СИ единица активности препарата - *беккерель* (Бк)

1 Бк = 1 распад/с .

Внесистемная единица активности - *кюри* (Ки)

$$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк.}$$

1 *Кюри* - это активность препарата изотопа радия-226 массой 1 г.

Дефект массы ядра

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n - m_{\text{я}}, \quad (8)$$

где m_p - масса протона, m_n - масса нейтрона, $m_{\text{я}}$ - масса ядра.

Энергия связи ядра

$$E_{\text{св}} = \Delta m \cdot c^2, \quad (9)$$

где m - дефект массы ядра, c - скорость света в вакууме.

Во внесистемных единицах энергия связи ядра равна

$$E_{\text{св}} = 931 \cdot \Delta m \text{ МэВ},$$

где дефект массы Δm выражен в а.е.м., 931 - коэффициент пропорциональности (1 а.е.м. \sim 931 МэВ).

Удельная энергия связи равна $E_{\text{св}}/A$ [МэВ/нуклон].

Примеры решения задач

Пример 1

Вычислить дефект масс, энергию связи и удельную энергию связи, приходящуюся на один нуклон в ядре ${}_{29}^{63}\text{Cu}$.

Решение:

Дефект массы

$\Delta M = Z \cdot m_p + N \cdot m_n - M_{\text{я}}$, где m_p - масса протона, m_n - масса нейтрона, Z -количество протонов, N -количество нейтронов в ядре, $M_{\text{я}}$ – масса ядра атома.

Так как $m_{\text{я}} = m_{\text{атома}} - Zm_e$, где m_e - масса электрона, то вследствие того, что $m_e \ll m_{\text{я}}$, массу ядра можно считать равной массе атома изотопа.

$$Z = 29$$

$$N = A - Z = 63 - 29 = 34$$

$$\Delta M = (29 \cdot 1,00783 + 34 \cdot 1,00866 - 62,92960) \text{ а.е.м.} = 0,59191 \text{ а.е.м.}$$

$$1 \text{ а.е.м.} = 1,6605655 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

$$\Delta M = 0,59191 \text{ а.е.м.} \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \frac{\text{кг}}{\text{а.е.м.}} = 0,98257 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

$$E_{\text{связи}} = \Delta M \cdot c^2 = 0,98257 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ м/с})^2 = 8,84314 \cdot 10^{-11} \text{ Дж}$$

$$\text{так как } 1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

$$E_{\text{св.}} = 5,527 \cdot 10^8 \text{ эВ} = 552 \text{ МэВ}$$

Энергия связи, приходящаяся на 1 нуклон

$$\frac{E_{\text{св.}}}{A} = \frac{552 \text{ МэВ}}{63 \text{ нуклона}} = 8,76 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$$

Примечание

Ответ 552 МэВ можно было получить короче, если учесть, что энергетический эквивалент 1 а.е.м. равен 931,5 МэВ, тогда $E_{\text{св.}} = 0,59191 \text{ а.е.м.} \cdot 931,5 \text{ МэВ} = 552 \text{ МэВ}$.

$$1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

$$1,6605655 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot (2,998 \cdot 10^8 \text{ м/с}) = 14,92517 \cdot 10^{-11} \text{ Дж} = 931,5 \text{ МэВ}.$$

Пример 2

Определить начальную активность радиоактивного препарата магния-27 массой 0,2 мкг, а также его активность через 6 часов.

Дано:

$$m = 0,2 \text{ мкг} = 2 \cdot 10^{-10} \text{ кг}$$

$$t = 6 \text{ ч} = 2,16 \cdot 10^4 \text{ с}$$

$$T_{1/2} = 10 \text{ мин} = 600 \text{ с}$$

$$A_0 - ? \quad A - ?$$

Решение. Активность A изотопа характеризует скорость радиоактивного распада и определяется отношением числа dN ядер, распавшихся за интервал времени dt , к этому интервалу

$$A = - \frac{dN}{dt}, \quad (1)$$

знак "-" показывает, что число N радиоактивных ядер с течением времени убывает.

Чтобы найти dN/dt , воспользуемся законом радиоактивного распада

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (2)$$

где N - число радиоактивных ядер, содержащихся в изотопе, в момент времени t , N_0 - число радиоактивных ядер в момент времени, принятый за начальный ($t=0$), λ - постоянная радиационного распада.

Продифференцируем выражение (2) по времени

$$dN/dt = -\lambda N_0 e^{-\lambda t}. \quad (3)$$

Исключив из формул (1) и (3) dN/dt , находим активность препарата в момент времени t

$$A = \lambda N_0 e^{-\lambda t}. \quad (4)$$

Начальную активность A_0 препарата получим при $t = 0$

$$A_0 = \lambda N_0. \quad (5)$$

Постоянная радиоактивного распада λ связана с периодом полураспада $T_{1/2}$ соотношением

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \quad (6)$$

Число N_o радиоактивных ядер, содержащихся в изотопе, равно произведению постоянной Авогадро N_A на количество вещества ν данного изотопа

$$N_o = \nu N_A = \frac{m}{\mu} N_A, \quad (7)$$

где m - масса изотопа, μ - молярная масса.

С учетом выражений (6) и (7) формулы (5) и (4) принимают вид:

$$A_o = \frac{m}{\mu} \frac{\ln 2}{T_{1/2}} N_A, \quad (8)$$

$$A = \frac{m}{\mu} \frac{\ln 2}{T_{1/2}} N_A \exp\left(-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t\right). \quad (9)$$

Произведя вычисления и учитывая, что $T_{1/2} = 600$ с; $\ln 2 = 0,693$; $t = 6$ ч = $63,6 \cdot 10^3$ с = $2,16 \cdot 10^4$ с, получим

$$A_o = \frac{0,2 \cdot 10^{-9}}{27 \cdot 10^{-3}} \frac{0,693}{600} 6,02 \cdot 10^{23} \text{ Бк} = 5,13 \cdot 10^{12} \text{ Бк} = \frac{5,13 \cdot 10^{12}}{3,7 \cdot 10^{10}} = 138 \text{ Ки},$$

$$A = A_o \exp\left(-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t\right) = 138 \exp\left(-\frac{0,693}{600} \cdot 2,16 \cdot 10^4\right) = 170 \text{ Бк} = 46 \cdot 10^{-10} \text{ Ки}.$$

Пример 3

Определить массовый расход урана-235 в ядерном реакторе атомной электростанции. Тепловая мощность электростанции равна 10 МВт, КПД электростанции составляет 20%. Считать, что при каждом акте деления ядра урана-235 выделяется энергия 200 МэВ.

Дано : $N_{\text{теп}} = 10 \text{ МВт} = 1,0 \text{ Вт}$

$\eta = 20\%$

$E = 200 \text{ МэВ} = 3,2 \text{ Дж}$

$m = ?$

Решение:

КПД электростанции определяется из соотношения:

$$\eta = \frac{N_{\text{эл}}}{N_{\text{теп}}} \cdot 100\%, \text{ откуда находим электрическую мощность станции:}$$

$$N_{\text{эл}} = \frac{N_{\text{теп}}}{0,2} = \frac{1 \cdot 10^7}{0,2} = 5 \cdot 10^7 \text{ Вт}.$$

Вычислим работу электростанции в сутки:

$$N_{\text{эл}} = \frac{A_{\text{эл}}}{t} \Rightarrow A_{\text{эл}} = N_{\text{эл}} \cdot t = 5 \cdot 10^7 \cdot 86400 = 4,32 \cdot 10^{12} \text{ Дж.}$$

Исходя из этих данных, найдем число распавшихся атомов N за сутки:

$$N = \frac{A_{\text{эл}}}{E} = \frac{4,32 \cdot 10^{12}}{3,2 \cdot 10^{-11}} = 1,35 \cdot 10^{23}.$$

Для определения массового расхода применим формулу:

$$m = \frac{m}{\mu} N_A, \text{ где } N - \text{ количество атомов, } \mu - \text{ молярная масса урана}$$

($\mu = 235 \cdot 10^{-3}$ кг/моль), N_A – число Авогадро ($6,02 \cdot 10^{23}$ моль $^{-1}$)

$$\Rightarrow m = \frac{N \cdot \mu}{N_A} = \frac{1,35 \cdot 10^{23} \cdot 235 \cdot 10^{-3}}{6,02 \cdot 10^{23}} = 53 \cdot 10^{-3} \text{ кг} = 53 \text{ г.}$$

2.3. Задание на контрольную работу 5

501. Абсолютно черное тело имеет температуру 500 К. Какова будет температура тела, если в результате нагревания поток излучения увеличится в 5 раз? Исходя из формулы Планка, изобразить графически начальный и конечный спектры излучения.

502. Температура абсолютно черного тела равна 2000 К. Определить длину волны, на которую приходится максимум спектра энергии излучения, и спектральную плотность энергетической светимости для этой длины волны.

503. Определить температуру и энергетическую светимость абсолютно черного тела, если максимум энергии спектра излучения приходится на длину волны 600 нм.

504. Из смотрового окошечка печи излучается поток 4 кДж/мин. Определить температуру печи, если площадь окошечка равна 8 см 2 .

505. Поток излучения абсолютно черного тела равен 10 кВт, а максимум спектра излучения приходится на длину волны 0,8 мкм. Определить площадь излучающей поверхности.

506. Как и во сколько раз изменится поток излучения абсолютно черного тела, если максимум видимого спектра излучения переместится с красной границы спектра 780 нм на фиолетовую 390 нм?

507. Вычислить энергию (кВт ч), излучаемую за сутки с площади 0,5 м 2 нагревателя, температура которого 70 °С. Считать, что нагреватель излучает как серое тело с коэффициентом поглощения 0,3.

508. Печь, потребляющая мощность 1 кВт, имеет отверстие площадью 100 см^2 . Определить долю мощности, рассеиваемую стенками печи, если температура ее внутренней поверхности равна 1000 К.

509. При остывании абсолютно черного тела максимум его спектра излучения сместился на 500 нм. На сколько градусов остыло тело? Начальная температура тела 2000 К.

510. Определить мощность, необходимую для накаливания вольфрамовой нити электролампы длиной 10 см и диаметром нити 1 мм до температуры 3000 К. Потерями тепла на теплопроводность и конвекцию пренебречь.

511. Красная граница фотоэффекта для цинка составляет 310 нм. Определить максимальную кинетическую энергию (в *электрон-вольтах*) фотоэлектронов и задерживающую разность потенциалов, если на цинк падает ультрафиолетовое излучение с длиной волны 200 нм.

512. На поверхность калия падает ультрафиолетовое излучение с длиной волны 150 нм. Определить максимальную кинетическую энергию (в *электрон-вольтах*) фотоэлектронов и задерживающую разность потенциалов.

513. Фотон с энергией 10 эВ выбивает электроны из серебряной пластины. Определить импульс, полученный пластиной, если принять, что направления импульсов фотона и фотоэлектрона перпендикулярны поверхности пластины.

514. На фотоэлемент с катодом из лития падает ультрафиолетовое излучение с длиной волны 200 нм. Найти наименьшее значение задерживающей разности потенциалов, прекращающее фототок.

515. Какова должна быть длина волны излучения, падающего на платиновую пластину, если максимальная скорость фотоэлектронов равна 3 Мм/с?

516. Ультрафиолетовое излучение с длиной волны 0,25 мкм, направленное на металлическую пластину, вызывает фототок, который прекращается при минимальной задерживающей разности потенциалов 0,96 В. Определить работу выхода электрона из металла.

517. На поверхность металла падает ультрафиолетовое излучение с длиной волны 0,1 мкм. Красная граница фотоэффекта равна 0,3 мкм. Какая доля энергии фотона расходуется на сообщение электрону кинетической энергии?

518. На поверхность лития падает рентгеновское излучение с длиной волны 1 нм. Определить максимальную скорость фотоэлектронов. Можно ли пренебречь работой выхода электрона?

519. Какова красная граница фотоэффекта для меди, натрия, золота и цезия. (табл. 6 приложение).

520. Красная граница фотоэффекта для вольфрама равна 275 нм. Определить задерживающую разность потенциалов для электронов, вырывааемых из вольфрама светом с длиной волны 180 нм.

521. Определить радиус, частоту и скорость обращения электрона для первой орбиты по теории Бора, а также энергию ионизации для атома гелия.

522. Найти наибольшую и наименьшую длины волн в видимой области спектра излучения атома водорода.

523. Вычислить по теории Бора радиус второй стационарной орбиты и скорость электрона на этой орбите для атома водорода.

524. Атом водорода в основном состоянии поглотил квант света с длиной волны 0,1215 мкм. Определить радиус электронной орбиты возбужденного атома водорода.

525. В водородоподобном ионе лития электрон перешел с четвертого энергетического уровня на второй. Определить энергию кванта и длину волны излучения, испущенного ионом.

526. Вычислить по теории Бора радиус второй стационарной орбиты и скорость электрона на этой орбите для однозарядного иона гелия.

527. Электрон в атоме водорода движется по первой орбите. Найти скорость электрона и длину волны де Бройля. Сравнить длину волны де Бройля с периметром орбиты. Нужно ли учитывать волновые свойства электрона при изучении движения электрона в атоме водорода?

528. Определить энергию фотона, испускаемого при переходе электрона в атоме водорода с третьего энергетического уровня на основной уровень.

529. Вычислить по теории Бора период вращения электрона в атоме водорода, находящегося на втором энергетическом уровне.

530. Электрон в атоме водорода находится на третьем энергетическом уровне. Определить в *электрон-вольтах* полную энергию электрона.

531. Определить неопределенность координаты электрона, движущегося в атоме водорода со скоростью $2,0 \cdot 10^6$ м/с, если относительная неопределенность скорости равна 0,1. Сравнить полученную неопределенность с диаметром атома водорода, вычисленным по теории Бора для основного состояния, и указать, применимо ли понятие траектории в данном случае.

532. Электрон с кинетической энергией 10 эВ находится в металлической пылинке диаметром 1 мкм. Оценить (в *процентах*) относительную неопределенность скорости электрона.

533. Если допустить, что неопределенность координаты движущейся частицы равна дебройлевской длине волны, то какова будет относительная неопределенность импульса этой частицы?

534. Используя соотношение неопределенностей, оценить низший энергетический уровень электрона в атоме водорода. Принять диаметр атома равным 0,1 нм.

535. Определить длину волны де Бройля для протона, движущегося со средней квадратичной скоростью при $T=300$ К.

536. α -частица движется в однородном магнитном поле с индукцией 5 мТл по окружности радиусом 0,8 м. Определить длину волны де Бройля α -частицы.

537. Длина волны де Бройля протона равна 2 нм. Какую ускоряющую разность потенциалов прошел протон?

538. Найти длину волны де Бройля электрона, имеющего кинетическую энергию 0,2 МэВ.

539. Кинетическая энергия нейтрона равна 2 МэВ. Определить длину волны де Бройля нейтрона.

540. Кинетическая энергия протона равна его энергии покоя. Определить длину волны де Бройля для такого протона.

541. Как изменится удельное сопротивление чистого арсенид-галлиевого образца при нагреве его от комнатной температуры до 400 К?

542. Определить ширину запрещенной зоны полупроводниковой пластины, если при нагревании от 0 до 10 градусов Цельсия её удельное сопротивление уменьшилось в 2,28 раз. Из какого материала изготовлена пластина?

543. Перпендикулярно однородному магнитному полю, индукция которого равна 0,1 Тл, помещена тонкая пластинка из примесного кремния. Ширина пластинки соответствует 4 см. Определить плотность тока, при которой холловская разность потенциалов достигнет значения 0,5 В. Постоянную Холла для кремния принять равной $0,3 \text{ м}^3/\text{Кл}$.

544. Удельное сопротивление кремния p -типа равно 10^{-2} Ом·м. Определить концентрацию дырок и их подвижность. Принять постоянную Холла равной $4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{Кл}$.

545. Тонкая пластинка из кремния шириной 2 см расположена перпендикулярно силовым линиям однородного магнитного поля с индукцией 0,5 Тл. При плотности тока $2 \text{ мкА}/\text{мм}^2$, направленного вдоль

пластины, холловская разность потенциалов оказалась равной 2,8 В. Определить концентрацию носителей тока. Сравнить с табличными данными.

546. Концентрация носителей тока в чистом кремнии равна $5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Определить сопротивление кремниевого стержня длиной 2 см и сечением 1 мм^2 . Сравнить с табличными данными.

547. Вычислить постоянную Холла для кремния, если его удельное сопротивление равно $6,2 \cdot 10^2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

548. Кристалл из чистого германия, ширина запрещенной зоны которого равна 0,72 эВ, нагревают от температуры $0 \text{ }^\circ\text{C}$ до температуры $15 \text{ }^\circ\text{C}$. Во сколько раз возрастает его удельная проводимость?

549. При нагревании кристалла из чистого кремния от температуры $0 \text{ }^\circ\text{C}$ до температуры $10 \text{ }^\circ\text{C}$ его удельная проводимость возрастает в 2,28 раза. По этим данным определить ширину запрещенной зоны кристалла кремния.

550. Найти удельное сопротивление чистого германиевого образца при температуре $100 \text{ }^\circ\text{C}$, если при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ оно составляет величину $0,5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

551. Вычислите дефект массы и энергию связи ядра кислорода $^{17}_8\text{O}$.

552. Какую минимальную работу нужно совершить, чтобы разделить ядро атома углерода на три одинаковые частицы?

553. Найти дефект массы и энергию связи трития ^3_1H . Какой процент от энергии покоя ядра составляет его энергия связи?

554. Какую минимальную работу надо совершить, чтобы разбить ядро кальция $^{40}_{20}\text{Ca}$ на отдельные протоны и нейтроны?

555. Найти энергию связи и удельную энергию связи алюминия $^{27}_{13}\text{Al}$.

556. Найти энергию связи ^2_1H и ^3_2He . Какое из этих ядер более устойчиво?

557. Вычислить энергию, необходимую для разделения ядра ^7_3Li на нейтроны и протоны.

558. Определить энергию, которая может выделиться при образовании из протонов и нейтронов, содержащихся в грамме гелия ^4_2He .

559. Найдите минимальную энергию и частоту гамма-кванта, способного разбить ядро дейтерия ^2_1H на протон и нейтрон.

560. Определить дефект массы и энергию связи ядра ${}^7_{14}\text{N}$. Какая энергия связи приходится на один нуклон?

561. Определить, какая доля радиоактивного изотопа ${}^{225}_{89}\text{Ac}$ распадается в течение 6 суток.

562. Активность некоторого изотопа за 10 суток уменьшилась на 20%. Определить период полураспада этого изотопа.

563. Определить массу изотопа ${}^{131}_{53}\text{I}$ имеющего активность, равную 37 ГБк.

564. Найти среднюю продолжительность жизни атома радиоактивного изотопа кобальта ${}^{60}_{27}\text{Co}$.

565. Счетчик α -частиц, установленный вблизи радиоактивного изотопа, при первом измерении регистрировал 1400 частиц в минуту, а через 4 часа только 400 частиц. Определить период полураспада изотопа.

566. Во сколько раз уменьшится активность изотопа ${}^{32}_{15}\text{P}$ через 20 суток?

567. На сколько процентов уменьшится активность изотопа ${}^{27}_{12}\text{Mg}$ за 7 минут?

568. Определить число ядер, распадающихся в течение времени: 1) $t_1 = 1$ мин; 2) $t_2 = 5$ сут, - в радиоактивном изотопе фосфора ${}^{32}_{15}\text{P}$ массой, равной 1 мг.

569. Из каждого миллиона атомов радиоактивного изотопа каждую секунду распадается 200 атомов. Определить период полураспада изотопа.

570. Найти период полураспада радиоактивного изотопа, если его активность за 10 суток уменьшилась на 24% по сравнению с первоначальной.

571. Мощность двигателя атомного судна составляет 15 МВт, его КПД равен 30%. Определить месячный расход ядерного горючего при работе этого двигателя. Считать, что при каждом акте деления ядра урана-235 выделяется энергия 200 МэВ.

572. Найти электрическую мощность атомной электростанции, расходующей 0,1 кг урана-235 в сутки, если КПД станции равен 16%. Считать энергию, выделяющуюся при одном акте деления ядра урана-235, равной 200 МэВ.

573. Определить массовый расход урана-235 в ядерном реакторе атомной электростанции. Тепловая мощность электростанции равна 10 МВт, КПД электростанции составляет 20%. Считать, что при каждом акте деления ядра урана-235 выделяется энергия 200 МэВ.

574. Найти убыль массы ТВЭЛ-ов (стержней, содержащих ядерное горючее) атомной электростанции мощностью 150 МВт, в течение года. КПД электростанции составляет 20%.

575. Определить КПД двигателя атомного судна мощностью 20 МВт, если месячный расход ядерного горючего при работе этого двигателя составляет 2,23 кг урана-235. Считать, что при каждом акте деления ядра урана-235 выделяется энергия 200 МэВ.

576. Найти тепловую мощность атомного реактора, расходующего 0,1 кг урана-235 в сутки. Считать энергию, выделяющуюся при одном акте деления ядра урана-235, равной 200 МэВ.

577. Определить суточный расход ядерного горючего при работе двигателя атомного судна мощностью 25 МВт, если его КПД составляет 28%. Считать, что при каждом акте деления ядра урана-235 выделяется энергия 200 МэВ.

578. Найти электрическую мощность атомной электростанции при условии убыли массы ТВЭЛ-ов (стержней, содержащих ядерное горючее) 1 грамм в сутки. КПД станции равен 16%.

579. Определить КПД двигателя атомного судна мощностью 20 МВт, если суточный расход ядерного горючего при работе этого двигателя составляет 75 г урана-235. Считать, что при каждом акте деления ядра урана-235 выделяется энергия 200 МэВ.

580. Мощность двигателя атомного судна составляет 15 МВт, его КПД равен 30%. Определить месячный расход ядерного горючего при работе этого двигателя. Считать, что при каждом акте деления ядра урана-235 выделяется энергия 200 МэВ.

ПРИЛОЖЕНИЯ

1. Масса, заряд и энергия покоя некоторых частиц

| Частица | Масса, кг | Заряд, Кл | Энергия покоя, МэВ |
|-------------------|-----------------------|------------------------|--------------------|
| Электрон | $9,11 \cdot 10^{-31}$ | $-1,60 \cdot 10^{-19}$ | 0,511 |
| α -частица | $6,64 \cdot 10^{-27}$ | $3,2 \cdot 10^{-19}$ | |
| Протон | $1,67 \cdot 10^{-27}$ | $1,60 \cdot 10^{-19}$ | 938 |

2. Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименования

| Приставка | | | Приставка | | |
|--------------|-------------|-----------|--------------|-------------|------------|
| Наименование | Обозначение | Множитель | Наименование | Обозначение | Множитель |
| экса | Э | 10^{18} | деци | д | 10^{-1} |
| пэта | П | 10^{15} | санتي | с | 10^{-2} |
| тера | Т | 10^{12} | милли | м | 10^{-3} |
| гига | Г | 10^9 | микро | мк | 10^{-6} |
| мега | М | 10^6 | нано | н | 10^{-9} |
| кило | к | 10^3 | пико | п | 10^{-12} |
| гекто | г | 10^2 | фемто | ф | 10^{-15} |
| Дека | да | 10^1 | атто | а | 10^{-18} |

3. Греческий алфавит

| Обозначения букв | Названия букв | Обозначения букв | Названия букв |
|-----------------------|---------------|---------------------|---------------|
| A, α | альфа | N, ν | ню |
| B, β | бета | Ξ , ξ | кси |
| Γ , γ | гамма | O, \omicron | омикрон |
| Δ , δ | дельта | Π , π | пи |
| E, ϵ | эпсилон | P, ρ | ро |
| Z, ζ | дзета | Σ , σ | сигма |
| H, η | эта | T, τ | тау |
| Θ , θ | тхэта | Y, υ | ипсилон |
| I, ι | йота | Φ , ϕ | фи |
| K, κ | каппа | X, χ | хи |
| Λ , λ | ламбда | Ψ , ψ | пси |
| M, μ | ми | Ω , ω | омега |

4. Некоторые физические постоянные (округленные значения)

| Физическая постоянная | Обозначение | Значение |
|----------------------------------|--------------|--|
| Постоянная Авогадро | N_A | $6,02 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹ |
| Постоянная Планка | h | $6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж с |
| Постоянная Больцмана | K | $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К |
| Скорость света в вакууме | c | $3,0 \cdot 10^8$ м/с |
| Электрическая постоянная | ϵ_0 | $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м |
| Магнитная постоянная | μ_0 | $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м |
| Постоянная Стефана-Больцмана | σ | $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м ² ·К ⁴ |
| Постоянная закона смещения Вина | b | $2,90 \cdot 10^{-3}$ м·К |
| Элементарный заряд | e | $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл |
| Постоянная Ридберга | R | $1,1 \cdot 10^7$ м |
| Радиус Бора | r_0 | $2,43 \cdot 10^{-12}$ м |
| Энергия ионизации атома водорода | E_i | $2,18 \cdot 10^{-18}$ Дж |
| Атомная единица массы | а.е.м. | $1,66 \cdot 10^{-27}$ кг |

5. Относительные атомные массы некоторых элементов

| Элемент | Химический символ | A |
|----------|-------------------|----|
| Азот | N | 14 |
| Аргон | Ar | 40 |
| Водород | H | 1 |
| Гелий | He | 4 |
| Кислород | O | 16 |
| Неон | Ne | 20 |
| Углерод | C | 12 |

6. Работа выхода электрона

| Металл | Работа выхода ($T=293\text{ K}$) | Металл | Работа выхода ($T=293\text{ K}$) |
|--------|---------------------------------------|---------|---------------------------------------|
| | эВ | | эВ |
| Золото | 4,3 | Натрий | 2,4 |
| Калий | 2,2 | Платина | 6,3 |
| Литий | 2,3 | Серебро | 4,7 |
| Медь | 4,4 | Цезий | 2,0 |

7. Электрические характеристики некоторых полупроводников (температура комнатная)

| Тип полупровод- ника | Ширина запрещенной зоны | Удельное сопротивле- ние | Подвижность | |
|----------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------|-------|
| | ΔE | | Электроны | Дырки |
| | эВ | Ом м | $\text{м}^2/\text{В с}$ | |
| Собственный германий | 0,66 | 0,5 | 0,39 | 0,19 |
| Собственный кремний | 1,1 | $6,2 \cdot 10^2$ | 0,15 | 0,05 |
| Арсенид галлия | 1,43 | | 0,85 | 0,042 |

8. Характеристики некоторых радиоактивных изотопов

| Элемент | Обозначение | Период полураспада |
|---------|-------------------|--------------------|
| Фосфор | ${}_{15}^{32}P$ | 14,3 суток |
| Углерод | ${}_{6}^{14}C$ | 5570 лет |
| Магний | ${}_{12}^{27}Mg$ | 10 минут |
| Иод | ${}_{5}^{131}I$ | 8 суток |
| Кобальт | ${}_{27}^{60}Co$ | 5,3 года |
| Иридий | ${}_{77}^{192}Ir$ | 78 дней |
| Радий | ${}_{88}^{226}Ra$ | 1590 лет |
| Актиний | ${}_{89}^{225}Ac$ | 10 суток |

9. Некоторые соотношения между единицами измерения физических величин

| Физическая величина | Соотношение между единицами измерения |
|--------------------------|--|
| Длина | $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$ |
| Масса | $1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ $1 \text{ тонна} = 10^3 \text{ кг}$ |
| Время | $1 \text{ сутки} = 8,64 \cdot 10^4 \text{ сек}$ $1 \text{ год} = 3,16 \cdot 10^7 \text{ сек}$ |
| Работа, энергия, теплота | $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ $1 \text{ кВт.ч} = 3,6 \cdot 10^5 \text{ Дж}$ |

10. Массы атомов некоторых химических элементов

| Название элемента | Атомный номер | Символ и массовое число | Масса атома а.е.м. |
|-------------------|---------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| Протон | | 1_1p | 1,00783 |
| Нейтрон | | 1_0n | 1,00866 |
| Водород | 1 | 1_1H 2_1H 3_1H | 1,00783 2,01410 3,01605 |
| Гелий | 2 | 3_2He 4_2He | 3,011603 4,00260 |
| Кислород | 8 | ${}^{17}_8O$ | 16,99913 |
| Азот | 7 | ${}^{14}_7N$ | 14,00307 |
| Литий | 3 | 7_3Li | 7,01600 |
| Алюминий | 13 | ${}^{27}_{13}Al$ | 26,98145 |
| Кальций | 20 | ${}^{40}_{20}Ca$ | 39,96259 |
| Медь | 29 | ${}^{63}_{29}Cu$ | 62,92960 |

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| Введение | 3 |
| 1. Общие требования к оформлению контрольной работы | 3 |
| 2. Контрольная работа №5 «Квантовая физика» | 5 |
| 2.1. Методические указания к выполнению контрольной работы №5 | 6 |
| 2.2. Основные законы, формулы, примеры решения задач | 8 |
| 2.3. Задание на контрольную работу №5 | 24 |
| Приложения | 31 |