

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«УДМУРТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт математики, информационных технологий и физики

Кафедра общей физики

# ОПТИКА

## ОСНОВЫ КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ



СБОРНИК

тестовых заданий по общей физике

Ижевск 2024

УДК 535 (075.8)

ББК 22.34я73

О-627

*Рекомендовано к изданию*

*Учебно-методическим советом УдГУ*

Рецензенты: кандидат физико-математических наук, доцент

Владимир Геннадиевич Лебедев,

доктор педагогических наук, профессор

Татьяна Александровна Снигирева

Составитель: кандидат физико-математических наук, доцент

Сергей Николаевич Костенков

**О-627 Оптика. Основы квантовой физики:** сборник тестовых заданий по общей физике/ сост. С. Н. Костенков. – Ижевск, 2024. – 92 с.

Сборник заданий предназначен для студентов направления подготовки бакалавров «Физика». Он включает в себя задания, предлагаемые для проведения тестирования на практических занятиях и дома самостоятельно, по дисциплинам «Оптика», «Атомная физика» и «Ядерная физика» являющимися разделами курса общей физики. Сборник задач может быть использован в рамках работы по другим дисциплинам близким по своему программному содержанию.

Пособие пригодится студентом направлений подготовки бакалавров «Прикладные математика и физика» при освоении курса общей физики.

УДК 535 (075.8)

ББК 22.34я73

© С. Н. Костенков, сост., 2024

© ФГБОУ ВО «Удмуртский

государственный университет», 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1. Интерференция света. ....	5
2. Дифракция и поляризация света. ....	18
3. Квантовая природ излучения. ....	40
4. Теория атома водорода по Бору. ....	54
5. Элементы квантовой механики. ....	59
6. Квантовые свойства атомов, молекул и твердых тел. ....	67
7. Элементы физики атомного ядра. ....	77
8. Элементы физики элементарных частиц. ....	85
9. Используемая литература. ....	90

*«Где ярче свет – там тени гуще».*

*И. В. Гёте*

## Введение

Цель пособия – обеспечить лично-ориентированный подход к практическим занятиям по общей физике, учитывающий степень подготовки студентов и количество аудиторных часов, выделяемых на лекционные и практические занятия по курсу общей физики. Пособие предназначено для обучения и контроля работы студентов на практических занятиях по разделу «Оптика и квантовая физика».

С целью обеспечения дифференцированного подхода и объективности контроля аудиторной и самостоятельной работы студентов на практических занятиях по оптике и квантовой физике подобраны задачи в рамках тестовых заданий. Они содержат задачи с выбором ответа и задачи с развернутым ответом, отмеченные звездочкой.

При оформлении задач с развернутым ответом необходимо соблюдать следующие требования:

1. Записать краткое условие задачи, выразить все известные величины в одной и той же системе единиц (как правило, в СИ). При необходимости ввести дополнительные постоянные физические величины, приведенные в справочных таблицах.
2. Решение задач следует сопровождать краткими, но исчерпывающими объяснениями. При необходимости дать чертеж или график, выполненные с помощью чертежных принадлежностей.
3. Решать задачу надо в общем виде, выразив искомую величину в буквенных обозначениях, заданных в условии задачи. Произвести вычисления.

При оформлении заданий с выбором ответа необходимо привести номер задачи с указанием подраздела курса и выбранный ответ в буквенном или числовом виде. Необходимо дать краткое без пояснений решение задачи, что позволяет выяснить ход рассуждений студента, степень ошибки или правильного ответа.

# 1. Интерференция света

## Основные формулы и законы

Скорость света в среде  $v = \frac{c}{n}$ , где  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$  – скорость света в вакууме;  $n$  - абсолютный показатель преломления среды.

Оптическая длина пути световой волны  $L = nl$ , где  $l$  – геометрическая длина пути световой волны в среде с показателем преломления  $n$ .

Оптическая разность хода двух световых волн  $\Delta = L_2 - L_1$ .

Зависимость разности фаз от оптической разности хода световых волн  $\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta$ , где  $\lambda_0$  – длина световой волны в вакууме.

Условие интерференционных максимумов  $\Delta = \pm m\lambda_0$ , ( $m = 0, 1, 2, \dots$ ).

Условие интерференционных минимумов  $\Delta = \pm(2m + 1)\frac{\lambda_0}{2}$ , ( $m = 0, 1, 2, \dots$ ).

Координаты максимумов и минимумов интенсивности в опыте Юнга  $x_{max} = \pm m \frac{L}{d} \lambda_0$ ,  $x_{min} = \pm(m + \frac{1}{2}) \frac{L}{d} \lambda_0$ , где  $m = 0, 1, 2, \dots$  - номер интерференционной полосы,  $d$  – расстояние между двумя когерентными источниками, находящимися на расстоянии  $L$  от экрана.

Ширина интерференционной полосы  $\Delta x = \frac{L}{d} \lambda_0$ , где  $\lambda_0$  – длина световой волны в вакууме.

Оптическая разность хода при интерференции в тонких плёнках в проходящем свете:  $\Delta = 2dn \cos r = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}$ , в отражённом свете:  $\Delta = 2dn \cos r + \lambda_0/2 = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} + \lambda_0/2$ , где  $d$  – толщина пленки;  $n$  – показатель преломления;  $\alpha$  – угол падения;  $r$  – угол преломления.

Радиусы светлых колец Ньютона в отраженном свете (или темных в проходящем свете)  $r_m = \sqrt{(m - \frac{1}{2})\lambda_0 R}$ , ( $m = 1, 2, \dots$ ), где  $m$  – номер кольца;  $R$  – радиус кривизны линзы.

Радиусы темных колец Ньютона в отраженном свете (или светлых в проходящем свете)  $r_m = \sqrt{m\lambda_0 R}$ , ( $m = 1, 2, \dots$ ).

В случае «просветления оптики» интерферирующие лучи в отраженном свете гасят друг друга при условии  $n = \sqrt{n_c}$ , где  $n_c$  – показатель преломления стекла;  $n$  – показатель преломления пленки.

Задания.

1.1. Расстояние от щелей до экрана в опыте Юнга равно 1 м. Определить расстояние между щелями, если на отрезке длиной 1 см укладывается 10 темных интерференционных полос. Длина волны равна 0,7 мкм.

- A. [0,63 мм]
- B. [0,70 мм]
- C. [0,07 мм]
- D. [0,063 мм].

1.2. Две когерентные световые волны приходят в некоторую точку пространства с разностью хода 2,25 мкм. Каков результат интерференции в этой точке, если свет: а) красный ( $\lambda = 750$  нм), б) зеленый ( $\lambda = 500$  нм)?

- A. [а) усиление; б) ослабление]
- B. [а) усиление; б) усиление]
- C. [а) ослабление; б) ослабление]
- D. [а) ослабление; б) усиление].

1.3. Разность хода двух интерферирующих лучей монохроматического света  $0,3\lambda$ . Определить разность фаз колебаний.

- A. [ $108^\circ$ ]
- B. [18,84 рад]
- C. [ $1,08^\circ$ ]
- D. [3,14 рад].

1.4. Расстояние между двумя щелями в опыте Юнга равно 1 мм, расстояние от щелей до экрана 3 м, расстояние между максимумами яркости смежных интерференционных полос на экране 1,5 мм. Определить длину волны источника монохроматического света.

- A. [500 нм]
- B. [500 мкм]
- C. [0,5 нм]
- D. [0,05 мкм].

1.5. В опыте Юнга расстояние между щелями равно 1 мм, а расстояние от щелей до экрана равно 3 м. Определить: 1) положение первой светлой полосы; 2) положение третьей темной полосы, если щели освещать монохроматическим светом с длиной волны 0,5 мкм.

- A. [1]  $\pm$  1,5 мм; 2)  $\pm$  5,25 мм]
- B. [1]  $\pm$  5,25 мм; 2)  $\pm$  1,5 мм]
- C. [1]  $\pm$  0,15 мм; 2)  $\pm$  0,525 мм]
- D. [1]  $\pm$  15 мм; 2)  $\pm$  5,25 мм].

1.6. Расстояние между двумя щелями в опыте Юнга равно 0,5 мм. Длина волны света равна 0,6 мкм. Определить расстояние от щелей до экрана, если ширина интерференционных полос равна 1,2 мм.

- A. [1 м]
- B. [0,1 м]
- C. [0,01 м]
- D. [10 м].

1.7. Во сколько раз изменится ширина интерференционных полос на экране в опыте с зеркалами Френеля, если фиолетовый светофильтр (0,4 мкм) заменить красным (0,7 мкм).

- A. [1,75]
- B. [17,5]
- C. [0,175]
- D. [0,0175].

1.8. Во сколько раз увеличится расстояние между соседними интерференционными полосами на экране в опыте Юнга, если зеленый светофильтр ( $\lambda=0,5$  мкм) заменить красным ( $\lambda=0,65$  мкм)?

- A. [в 1,3 раза]
- B. [в 13 раз]
- C. [в 0,13 раза]
- D. [в 130 раз].

1.9. В опыте Юнга отверстия освещались монохроматическим светом длиной волны 600 нм, расстояние между отверстиями 1 мм и расстояние от отверстий до экрана 3 м. Найти положение трех первых полос.

- A. [1,8 мм; 3,6 мм; 5,4 мм]
- B. [18мм; 36 мм; 54 мм]
- C. [0,18 мм; 0,36 мм; 0,54 мм]
- D. [1,8 см; 3,6 см; 5,4 см].

1.10. В опыте с зеркалами Френеля расстояние между мнимыми изображениями источника света равно 0,5 мм, расстояние от них до экрана равно 5 м. В желтом свете ширина интерференционных полос равно 6 мм. Определить длину волны света.

- A. [0,6мкм]
- B. [0,6 мм]
- C. [60 мкм]
- D. [60 нм].

1.11\*. Если в опыте Юнга на пути одного из интерферирующих лучей поместить перпендикулярно этому лучу тонкую стеклянную пластинку ( $n = 1,5$ ), то центральная светлая полоса смещается в положение, первоначально занимаемое пятой светлой полосой. Длина волны света равна  $0,5 \text{ мкм}$ . [ $5 \text{ мкм}$ ]

1.12\*. В опыте Юнга расстояние от щелей до экрана равно  $3 \text{ м}$ . Определить угловое расстояние между светлыми соседними полосами, если третья светлая полоса на экране отстоит от центра интерференционной картины на  $4,5 \text{ мм}$ . [ $5 \cdot 10^{-4} \text{ рад}$ ]

1.13. На стеклянный клин ( $n = 1,5$ ) с малым углом нормально к его грани падает параллельный пучок лучей монохроматического света с длиной волны  $0,698 \text{ мкм}$ . Определить угол между поверхностями клина, если расстояние между двумя соседними интерференционными минимумами в отраженном свете равно  $2 \text{ мм}$ .

A. [ $24''$ ]

B. [ $24'$ ]

C. [ $66'$ ]

D. [ $40'$ ].

1.14. На тонкий стеклянный клин ( $n = 1,5$ ) нормально падает монохроматический свет. Угол клина равен  $4'$ . Определить длину световой волны, если расстояние между двумя соседними интерференционными максимумами в отраженном свете равно  $0,2 \text{ мм}$ .

A. [ $698 \text{ нм}$ ]

B. [ $1396 \text{ нм}$ ]

C. [ $349 \text{ нм}$ ]

D. [ $139,6 \text{ нм}$ ].

1.15. На стеклянный клин ( $n = 1,5$ ) падает нормально пучок света с длиной волны  $0,582 \text{ мкм}$ . Угол клина равен  $20'$ . Какое число темных интерференционных полос приходится на единицу длины клина?

A. [5 полос на 1 см]

B. [5 полос на 1 мм]

C. [4 полосы на 1 мм]

D. [4 полосы на 1 см].

1.16\*. Между двумя плоскопараллельными стеклянными пластинками ( $n = 1,5$ ) положили очень тонкую проволочку. Проволочка находится на расстоянии  $75 \text{ мм}$  от линии соприкосновения пластинок и ей параллельна. В отраженном свете с длиной волны  $0,5 \text{ мкм}$  на верхней пластинке видны интерференционные полосы. Определить толщину проволочки, если на протяжении  $30 \text{ мм}$  насчитывается 16 светлых полос. [10 мкм]

1.17\*. Между двумя плоскопараллельными стеклянными пластинками ( $n = 1,5$ ) на расстоянии  $10 \text{ см}$  от границы их соприкосновения находится проволока диаметром  $0,01 \text{ мм}$ , образуя воздушный клин. Пластины освещаются нормально падающим светом с длиной волны  $0,6 \text{ мкм}$ . Определить ширину интерференционных полос, наблюдаемых в отраженном свете. [3 мм]

1.18\*. Монохроматический свет падает нормально на поверхность воздушного клина, причем расстояние между интерференционными полосами равно  $0,4 \text{ мм}$ . Определите расстояние между интерференционными полосами, если пространство между пластинами, образующими клин, заполнить прозрачной жидкостью с показателем преломления  $n = 1,33$ . [0,3 мм]

1.19. Радиус второго темного кольца Ньютона в отраженном свете равен  $0,4 \text{ мм}$ . Определить радиус кривизны плосковыпуклой линзы, взятой для опыта, если она освещается светом с длиной волны  $0,64 \text{ мкм}$ .

- A. [125 мм]
- B. [1,25 мм]
- C. [12,5 мм]
- D. [125 см].

1.20. Между стеклянной пластинкой и лежащей на ней плосковыпуклой линзой находится жидкость. Найти показатель преломления жидкости, если радиус третьего темного кольца Ньютона при наблюдении в отраженном свете с длиной волны 0,6 мкм равен 0,82 мм. Радиус кривизны линзы равен 0,5 м.

- A. [1,34]
- B. [8,92]
- C. [0,134]
- D. [0,892].

1.21. На стеклянную пластинку положена выпуклой стороной плосковыпуклая линза. Сверху линза освещена монохроматическим светом длиной волны 500 нм. Найти радиус кривизны линзы, если радиус четвертого темного кольца Ньютона в отраженном свете равен 2 мм.

- A. [2 м]
- B. [0,02 м]
- C. [0,2 м]
- D. [1 м].

1.22. Плосковыпуклая стеклянная линза ( $n = 1,5$ ) с фокусом 1 м лежит выпуклой стороной на стеклянной пластинке. Радиус пятого темного кольца Ньютона в отраженном свете равен 1,1 мм. Определить длину световой волны.

- A. [0,484 мкм]
- B. [0,242 мкм]
- C. [48,4 нм]
- D. [613 нм].

1.23. Установка для наблюдения колец Ньютона освещается нормально падающим монохроматическим светом с длиной волны 600 нм. Определить толщину воздушного промежутка в том месте, где в отраженном свете наблюдается первое светлое кольцо.

A. [0,15 мкм]

B. [0,15 мм]

C. [1,5 мкм]

D. [1,5 мм].

1.24. Расстояние между вторым и первым кольцами Ньютона в отраженном свете равно 1 мм. Определить расстояние между десятым и девятым.

A. [0,39 мм]

B. [0,039 мм]

C. [0,78 мм]

D. [0,078 мм].

1.25. Диаметр второго светлого кольца Ньютона при наблюдении в отраженном свете с длиной волны 0,6 мкм равен 1,2 мм. Определить оптическую силу плосковыпуклой линзы, взятой для опыта.

A. [1,25 дптр]

B. [0,125 дптр]

C. [12,5 дптр]

D. [0,0125 дптр].

1.26. Плосковыпуклая линза с оптической силой 2 дптр выпуклой стороной лежит на стеклянной пластинке. Радиус четвертого темного кольца Ньютона в отраженном свете равен 0,7 мм. Определить длину световой волны.

A. [0,49 мкм]

B. [4,9 мкм]

- C. [49 нм]
- D. [049 нм].

1.27. Плосковыпуклая линза радиусом кривизны 4 м выпуклой стороной лежит на стеклянной пластинке. Определить длину волны падающего монохроматического света, если радиус пятого светлого кольца в отраженном свете равен 3 мм.

- A. [0,5 мкм]
- B. [5,0 мкм]
- C. [50 нм]
- D. [0,5 нм].

1.28. Установка для наблюдения колец Ньютона освещается нормально падающим монохроматическим светом с длиной волны 550 нм. Определить толщину воздушного промежутка в том месте, где в отраженном свете наблюдается четвертое темное кольцо.

- A. [1,1 мкм]
- B. [1,1 нм]
- C. [11 мкм]
- D. [11 нм].

1.29. Установка для наблюдения колец Ньютона освещается нормально падающим монохроматическим светом с длиной волны 600 нм. Пространство между линзой и стеклянной пластинкой заполнено жидкостью, и наблюдение ведется в проходящем свете. Радиус кривизны линзы равен 4 м. Определить показатель преломления жидкости, если радиус второго светлого кольца равен 1,8 мм.

- A. [1,48]
- B. [1,11]

C. [1,21]

D. [1,31].

1.30. Плосковыпуклая линза с показателем преломления  $n = 1,6$  выпуклой стороной лежит на стеклянной пластинке. Радиус третьего светлого кольца в отраженном свете с длиной волны  $0,6$  мкм равен  $0,9$  мм. Определить фокусное расстояние линзы.

A. [0,9 м]

B. [9 м]

C. [0,09 м]

D. [9 мм].

1.31. Плосковыпуклая линза с радиусом сферической поверхности  $12,5$  см прижата к стеклянной пластинке. Диаметр десятого темного кольца Ньютона в отраженном свете равен  $1$  мм. Определите длину волны света.

A. [0,2 мкм]

B. [0,2 нм]

C. [2 нм]

D. [20 мкм].

1.32. Установка для наблюдения колец Ньютона освещается монохроматическим светом, падающим нормально. При заполнении пространства между линзой и стеклянной пластинкой прозрачной жидкостью радиусы темных колец в отраженном свете уменьшились в  $1,21$  раза. Определить показатель преломления жидкости.

A. [1,46]

B. [1,26]

C. [1,36]

D. [1,56].

1.33\*. Найти радиус центрального темного пятна колец Ньютона, если между линзой и пластинкой налит бензол ( $n = 1,5$ ). Радиус кривизны линзы равен 1 м. Показатели преломления линзы и пластинки одинаковы. Наблюдение ведется в отраженном свете с длиной волны 589 нм. [0,63 мм]

1.34. На мыльную пленку с показателем преломления  $n = 1,33$  падает по нормали монохроматический свет с длиной волны 0,6 мкм. Отраженный свет в результате интерференции имеет наибольшую яркость. Какова возможная наименьшая толщина пленки?

A. [0,113 мкм]

B. [0,113 нм]

C. [1,13 мкм]

D. [1,13 нм].

1.35. На тонкую пленку в направлении нормали к ее поверхности падает монохроматический свет с длиной волны 500 нм. Отраженный от нее свет максимально усилен вследствие интерференции. Определить минимальную толщину пленки, если показатель преломления материала пленки равен 1,4.

A. [89 нм]

B. [8,9 нм]

C. [0,89 мкм]

D. [89 мкм].

1.36. На тонкую глицериновую пленку толщиной 1,5 мкм нормально к ее поверхности падает белый свет. Определить число длин волн лучей видимого участка спектра ( $0,4 \leq \lambda \leq 0,8$  мкм), которые будут ослаблены в результате интерференции в проходящем свете. Показатель преломления глицерина равен 1,47.

- A. [5]
- B. [6]
- C. [7]
- D. [4].

1.37. На стеклянную пластинку нанесен тонкий слой прозрачного вещества с показателем преломления  $n = 1,3$ . Пластинка освещена параллельным пучком монохроматического света с длиной волны 640 нм, падающим на пластинку нормально. Какую минимальную толщину должен иметь слой, чтобы отраженный пучок имел наименьшую яркость?

- A. [0,123 мкм]
- B. [1,23 мкм]
- C. [12,3 мкм]
- D. [123 мкм].

1.38. Пучок параллельных лучей с длиной волны 0,6 мкм падает под углом  $30^\circ$  на мыльную пленку с показателем преломления  $n = 1,33$ . При какой возможной наименьшей толщине пленки отраженные лучи будут максимально ослаблены интерференцией? Максимально усилены?

- A. [0,243 мкм; 0,122 мкм]
- B. [0,122 мкм; 0,243 мкм]
- C. [2,43 мкм; 1,22 мкм]
- D. [1,22 мкм; 2,43 мкм].

1.39. Пучок белого света падает нормально на стеклянную пластинку, толщина которой равна 0,4 мкм. Показатель преломления стекла равен 1,5. Какие длины волн, лежащие в пределах видимого спектра ( $0,4 \leq \lambda \leq 0,7$  мкм), усиливаются в отраженном пучке?

- A. [0,48 мкм]
- B. [4,8 мкм]

C. [48 мкм]

D.[480 мкм].

1.40. На мыльную пленку с показателем преломления  $n = 1,33$  падает белый свет под углом  $45^\circ$ . При какой наименьшей толщине пленки отраженные лучи будут окрашены в желтый цвет?

A. [0,13 мкм]

B. [1,3 мкм]

C. [13 мкм]

D. [13 нм].

1.41\*. Темной или светлой будет в отраженном свете мыльная пленка толщиной  $d = 0,1\lambda$ ? Пленка находится в воздухе, показатель преломления пленки равен 1,3. Считать, что пучок света падает на пленку нормально. [темной]

1.42\*. Зимой на стеклах трамваев и автобусов образуются тонкие пленки наледи, окрашивающие все видимое сквозь них в зеленоватый цвет. Оценить, какова наименьшая толщина этих пленок (показатель преломления наледи принять равным 1,33). [ $\sim 0,5$  мкм]

1.43\*. На поверхность стеклянного объектива ( $n_1 = 1,5$ ) нанесена тонкая пленка, показатель преломления которой  $n_2 = 1,2$  («просветляющая» пленка). При какой наименьшей толщине этой пленки произойдет максимальное ослабление отраженного света в средней части видимого спектра? [0,115 мкм]

1.44\*. На линзу с показателем преломления  $n = 1,58$  нормально падает монохроматический свет с длиной волны 0,55мкм. Для устранения потерь света в результате отражения на линзу наносится тонкая пленка. Определить: 1) оп-

тимальный показатель преломления для пленки; 2) толщину пленки. [1] 1,26; 2) 109 нм]

1.45\*. Тонкая пленка с показателем преломления  $n=1,5$  освещается светом с длиной волны 600 нм. При какой минимальной толщине пленки исчезнут интерференционные полосы? [100 нм]

## 2. Дифракция и поляризация света

Основные формулы и законы.

Радиус внешней границы  $m$ -й зоны Френеля для сферической волны  $r_m = \sqrt{\frac{ab}{a+b}} m\lambda$ , где  $m$  — номер зоны Френеля;  $\lambda$  — длина волны;  $a$  и  $b$  — расстояния диафрагмы с круглым отверстием соответственно от точечного источника и от экрана, на котором дифракционная картина наблюдается.

Условия дифракционных максимумов и минимумов от одной щели, на которую свет падает нормально:  $a \sin \varphi = \pm(2m + 1)\frac{\lambda}{2}$  - условие максимума,  $a \sin \varphi = \pm 2m\frac{\lambda}{2}$  - условие минимума, ( $m = 1, 2, 3, \dots$ ), где  $a$  — ширина щели;  $\varphi$  — угол дифракции;  $m$  — порядок спектра;  $\lambda$  — длина волны.

Условия главных максимумов и дополнительных минимумов дифракционной решетки, на которую свет падает нормально:  $d \sin \varphi = \pm 2m\frac{\lambda}{2}$  ( $m = 0, 1, 2, \dots$ ) – условие максимума,  $a \sin \varphi = \pm 2k\frac{\lambda}{2}$  ( $k = 1, 2, 3, \dots$ ) – условие минимума,  $d \sin \varphi = \pm m' \frac{\lambda}{N}$  ( $m' = 1, 2, 3, \dots$ , кроме  $0, N, 2N, \dots$ ) – условие добавочных минимумов, где  $d$  — период (постоянная) дифракционной решетки;  $N$  — число штрихов решетки.

Период дифракционной решетки  $d = \frac{1}{N_0}$ , где  $N_0$  — число щелей, приходящихся на единицу длины решетки.

Условие дифракционных максимумов от пространственной решетки (формула Вульфа — Брэггов)  $2d \sin \theta = m\lambda$  ( $m = 1, 2, 3, \dots$ ), где  $d$  — расстояние между атомными плоскостями кристалла;  $\theta$  — угол скольжения.

$$\text{Угловая дисперсия дифракционной решетки } D_\phi = \frac{\delta\phi}{\delta\lambda} = \frac{m}{d \cos \phi}.$$

Разрешающая способность дифракционной решетки  $R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = mN$ , где  $\lambda$ ,  $(\lambda + \delta\lambda)$  — длины волн двух соседних спектральных линий, разрешаемых решеткой;  $m$  — порядок спектра;  $N$  — общее число штрихов решетки.

Закон Малюса  $I = I_0 \cos^2 \alpha$ , где  $I$  — интенсивность плоскополяризованного света, прошедшего через анализатор;  $I_0$  — интенсивность плоскополяризованного света, падающего на анализатор;  $\alpha$  — угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора.

Закон Брюстера  $tg i_B = n_{21}$ , где  $i_B$  — угол падения, при котором отраженный от диэлектрика луч является плоскополяризованным;  $n_{21}$  — относительный показатель преломления второй среды относительно первой.

Угол поворота плоскости поляризации: для оптически активных кристаллов и чистых жидкостей  $\varphi = ad$ ; для оптически активных растворов  $\varphi = [\alpha]Cd$ , где  $d$  — длина пути, пройденного светом в оптически активном веществе;  $\alpha([\alpha])$  — удельное вращение;  $C$  — массовая концентрация оптически активного вещества в растворе.

#### Задания.

2.1. Посередине между точечным источником монохроматического света ( $\lambda = 550$  нм) и экраном находится диафрагма с круглым отверстием. Дифракционная картина наблюдается на экране, расположенном на расстоянии 5 м от источника. Определите радиус отверстия, при котором центр дифракционных колец, наблюдаемых на экране, будет наиболее темным.

А. [1,17 мм]

В. [1,17 м]

- C. [11,7 мм]
- D. [0,117 мм].

2.2 На мыльную пленку с показателем преломления  $n = 1,33$  падает белый свет под углом  $45^\circ$ . При какой наименьшей толщине пленки отраженные лучи будут окрашены в желтый цвет?

- A. [2 м]
- B. [0,2 м]
- C. [0,5 м]
- D. [20 м].

2.3. Определите радиус третьей зоны Френеля, если расстояния от точечного источника света ( $\lambda = 0,6$  мкм) до волновой поверхности и от волновой поверхности до точки наблюдения равны 1,5 м.

- A. [1,16 мм]
- B. [1,5 мм]
- C. [11,6 мм]
- D. [0,6 мм].

2.4. На диафрагму с круглым отверстием диаметром 5 мм падает нормально параллельный пучок света с длиной волны 0,6 мкм. Определите расстояние от точки наблюдения до отверстия, если отверстие открывает: 1) две зоны Френеля; 2) три зоны Френеля.

- A. [1) 5,21 м; 2) 3,47 м]
- B. [1) 5,21 мм; 2) 3,47 м]
- C. [1) 52,1 м; 2) 34,7 м]
- D. [1) 5,21 м; 2) 3,47 мм].

2.5. Определите радиус третьей зоны Френеля для случая плоской волны. Расстояние от волновой поверхности до точки наблюдения равно 1,5 м. Длина волны 0,6 мкм.

- A. [1,64 мм]
- B. [1,5 м]
- C. [16,4 мм]
- D. [0,6 мм].

2.6. Определите радиус четвертой зоны Френеля, если радиус второй зоны Френеля для плоского волнового фронта равен 2 мм.

- A. [2,83 мм]
- B. [2,0 мм]
- C. [28,3 мм]
- D. [2,5 мм].

2.7. Определите радиус первой зоны Френеля, если расстояния от точечного источника света ( $\lambda = 0,5$  мкм) до зонной пластинки и от пластинки до места наблюдения 1 м.

- A. [0,5 мм]
- B. [0,5 м]
- C. [2,5 мм]
- D. [1,0 мм].

2.8. На зонную пластинку падает плоская монохроматическая волна ( $\lambda = 0,5$  мкм). Определите радиус первой зоны Френеля, если расстояние от зонной пластинки до места наблюдения 1 м.

- A. [707 мкм]
- B. [7,07 мкм]

- C. [707 мм]  
D. [70,7 мкм].

2.9. Дифракция наблюдается на расстоянии  $l$  от точечного источника монохроматического света ( $\lambda = 0,5$  мкм). Посередине между источником света и экраном находится непрозрачный диск диаметром 5 мм. Определите расстояние  $l$ , если диск закрывает только центральную зону Френеля.

- A. [50 м]  
B. [0,5 м]  
C. [5,0 м]  
D. [50 мм].

2.10. Какой должна быть ширина щели, чтобы первый дифракционный минимум наблюдался под углом  $90^\circ$  при освещении: 1) красным светом ( $\lambda_1 = 760$  нм)? 2) синим светом ( $\lambda_2 = 440$  нм)?

- A. [1)  $7,6 \cdot 10^{-5}$  см; 2)  $4,4 \cdot 10^{-5}$  см]  
B. [1)  $7,6 \cdot 10^{-8}$  см; 2)  $4,4 \cdot 10^{-8}$  см]  
C. [1)  $7,6 \cdot 10^{-3}$  см; 2)  $4,4 \cdot 10^{-3}$  см]  
D. [1)  $7,6 \cdot 10^{-7}$  см; 2)  $4,4 \cdot 10^{-7}$  см].

2.11. На щель падает нормально монохроматический свет. Угол отклонения лучей, соответствующих второму минимуму, равен  $2^\circ 18'$ . Скольким длинам волн падающего света равна ширина щели?

- A. [ $50\lambda$ ]  
B. [ $20\lambda$ ]  
C. [ $70\lambda$ ]  
D. [ $10\lambda$ ].

2.12. Длина волны падающего на щель нормально монохроматического света укладывается в ширине щели 6 раз. Под каким углом будет наблюдаться третий дифракционный минимум света?

- A.  $[30^\circ]$
- B.  $[90^\circ]$
- C.  $[60^\circ]$
- D.  $[45^\circ]$ .

2.13. На щель шириной 0,1 мм падает нормально монохроматический свет ( $\lambda = 0,6$  мкм). Экран, на котором наблюдается дифракционная картина, расположен параллельно щели на расстоянии 1 м. Определите расстояние между первыми дифракционными минимумами, расположенными по обе стороны центрального максимума.

- A.  $[1,2 \text{ см}]$
- B.  $[0,12 \text{ см}]$
- C.  $[12 \text{ см}]$
- D.  $[1,8 \text{ см}]$ .

2.14. На дифракционную решетку нормально падает монохроматический свет с длиной волны 600 нм. Определите наибольший порядок спектра, полученный с помощью этой решетки, если ее постоянная равна 2 мкм.

- A.  $[3]$
- B.  $[7]$
- C.  $[5]$
- D.  $[9]$ .

2.15. На дифракционную решетку длиной 1,5 мм, содержащую 3000 штрихов, падает нормально монохроматический свет с длиной волны 550 нм. Опреде-

лите: 1) число максимумов, наблюдаемых в спектре дифракционной решетки; 2) угол, соответствующий последнему максимуму.

A. [1) 18; 2)  $81^{\circ}54'$ ]

B. [1) 25; 2)  $60^{\circ}54'$ ]

C. [1) 20; 2)  $45^{\circ}54'$ ]

D. [1) 10; 2)  $30^{\circ}54'$ ].

2.16. Определите число штрихов на 1 мм дифракционной решетки, если углу  $\varphi = 30^{\circ}$  соответствует максимум четвертого порядка для монохроматического света с длиной волны 0,5 мкм.

A. [ $250 \text{ мм}^{-1}$ ]

B. [ $25 \text{ мм}^{-1}$ ]

C. [ $350 \text{ мм}^{-1}$ ]

D. [ $250 \text{ м}^{-1}$ ].

2.17. Период дифракционной решетки 0,005 мм. Определить число наблюдаемых главных максимумов в спектре дифракционной решетки для: 1)  $\lambda = 760$  нм; 2)  $\lambda = 440$  нм.

A. [1) 13; 2) 23]

B. [1) 10; 2) 20]

C. [1) 18; 2) 28]

D. [1) 5; 2) 10].

2.18. Сколько штрихов на 1 мм должна иметь дифракционная решетка, чтобы углу  $\varphi = 90^{\circ}$  соответствовал максимум 5-го порядка для света с длиной волны  $\lambda = 500$  нм?

A. [400]

B. [700]

C. [800]

D. [600].

2.19. На дифракционную решетку с периодом 0,004 мм падает нормально монохроматический свет. При этом главному максимуму четвертого порядка соответствует отклонение от первоначального направления на  $\alpha = 30^\circ$ . Определить длину волны света.

A. [0,5 мкм]

B. [0,7 мкм]

C. [0,8 мкм]

D. [0,4 мкм].

2.20. Длина волны красной линии кадмия равна 6438 Å. Каков угол отклонения линии в спектре первого порядка, если дифракционная решетка имеет 5684 штриха на 1 см? Сколько добавочных минимумов образуется между соседними главными максимумами? Ширина решетки 5 см.

A. [21°28', 28419]

B. [41°28', 38419]

C. [31°28', 38419]

D. [45°28', 28419].

2.21 Монохроматический свет ( $\lambda = 0,6$  мкм) падает нормально на дифракционную решетку, содержащую 400 штрихов на 1 мм. Определить угол отклонения, соответствующий максимуму наивысшего порядка. Найти общее число дифракционных максимумов, которые дает эта решетка.

A. [90°; 9]

B. [45°; 5]

C. [60°; 6]

D. [30°; 3].

2.22. На дифракционную решетку  $D$  нормально к ее поверхности падает параллельный пучок лучей ( $\lambda = 0,5$  мкм). Помещенная вблизи решетки линза  $L$  проектирует дифракционную картину на плоский экран  $\mathcal{E}$ , удаленный от линзы на  $l = 1$  м. Расстояние между двумя максимумами первого порядка, наблюдаемыми на экране,  $s = 20,2$  см. Определить: а) постоянную дифракционной решетки; б) число штрихов на 1 см; в) теоретически возможное число максимумов, которые способна дать решетка; г) угол отклонения лучей, соответствующий последнему дифракционному максимуму.

- A. [а) 4,95 мкм; б) 2020 см<sup>-1</sup>; в) 19; г) 65°24']
- B. [а) 5,95 мкм; б) 3020 мм<sup>-1</sup>; в) 19; г) 45°24']
- C. [а) 6,95 мкм; б) 2020 мм<sup>-1</sup>; в) 19; г) 35°24']
- D. [а) 4,95 мкм; б) 2020 см<sup>-1</sup>; в) 19; г) 75°24'].

2.23. На дифракционную решетку нормально падает монохроматический свет с длиной волны 0,5 мкм. На экран, находящийся от решетки на расстоянии 1 м, с помощью линзы, расположенной вблизи решетки, проецируется дифракционная картина, причем первый главный максимум наблюдается на расстоянии 15 см от центрального. Определите число штрихов на 1 см дифракционной решетки.

- A. [3·10<sup>3</sup> см<sup>-1</sup>]
- B. [2·10<sup>3</sup> см<sup>-1</sup>]
- C. [4·10<sup>3</sup> см<sup>-1</sup>]
- D. [5·10<sup>3</sup> см<sup>-1</sup>].

2.24. На дифракционную решетку нормально к ее поверхности падает монохроматический свет с длиной волны 550 нм. На экран, находящийся от решетки на расстоянии 1 м, с помощью линзы, расположенной вблизи решетки,

проецируется дифракционная картина, причем первый главный максимум наблюдается на расстоянии 12 см от центрального. Определить: 1) период дифракционной решетки; 2) число штрихов на 1 см ее длины; 3) общее число максимумов, даваемых решеткой; 4) угол дифракции, соответствующий последнему максимуму.

A. [1) 4,58 мкм; 2)  $2,18 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$ ; 3) 17; 4)  $73,9^\circ$ ]

B. [1) 5,58 мкм; 2)  $2,18 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$ ; 3) 27; 4)  $83,9^\circ$ ]

C. [1) 3,58 мкм; 2)  $2,18 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$ ; 3) 10; 4)  $63,9^\circ$ ]

D. [1) 4,58 мкм; 2)  $2,18 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$ ; 3) 12; 4)  $63,9^\circ$ ]

2.25. На дифракционную решетку падает нормально свет. При этом максимум второго порядка для линии ( $\lambda_1 = 0,65 \text{ мкм}$ ) соответствует углу  $\alpha_1 = 45^\circ$ . Найти угол, соответствующий максимуму третьего порядка для линии  $\lambda_2 = 0,50 \text{ мкм}$ .

A. [ $54^\circ 40'$ ]

B. [ $74^\circ 40'$ ]

C. [ $64^\circ 40'$ ]

D. [ $44^\circ 40'$ ].

2.26. Имеется дифракционная решетка с 500 штрихами на 1 мм, освещаемая фиолетовым светом ( $\lambda = 0,4 \text{ мкм}$ ). Определить угловое расстояние между максимумами первого порядка.

A. [ $23^\circ 6'$ ]

B. [ $33^\circ 6'$ ]

C. [ $13^\circ 6'$ ]

D. [ $43^\circ 6'$ ].

2.27. Определите длину волны монохроматического света, падающего нормально на дифракционную решетку, имеющую 300 штрихов на 1 мм, если угол между направлениями на максимумы первого и второго порядков составляет  $12^\circ$ .

- A. [644 нм]
- B. [544 нм]
- C. [744 нм]
- D. [444 нм].

2.28. Дифракционная решетка, имеющая 500 штрихов на 1 мм, дает на экране, отстоящем от линзы на 1 м, спектр. Определить, на каком расстоянии друг от друга будут находиться фиолетовые границы ( $\lambda = 0,435$  мкм) спектров второго порядка.

- A. [0,87 м]
- B. [0,57 м]
- C. [0,43 м]
- D. [0,11 м].

2.29. На решетку с постоянной 0,006 мм нормально падает монохроматический свет. Угол между соседними спектрами первого и второго порядков  $\Delta\alpha = 4^\circ 36'$ . Определить длину световой волны. При решении использовать приближенное равенство  $\sin\alpha \approx \alpha$ .

- A. [0,48 мкм]
- B. [0,58 мкм]
- C. [0,68 мкм]
- D. [0,72 мкм].

2.30. Найти наибольший порядок дифракционного спектра желтой линии натрия ( $\lambda = 5890 \text{ \AA}$ ) в дифракционной решетке, содержащей 200 штрихов на 1 мм.

- A. [8]
- B. [18]
- C. [3]
- D. [10].

2.31. При освещении дифракционной решетки белым светом спектры второго и третьего порядков отчасти накладываются друг на друга. На какую длину волны в спектре второго порядка накладывается фиолетовая граница ( $\lambda = 0,4$  мкм) спектра третьего порядка?

- A. [0,6 мкм]
- B. [0,5 мкм]
- C. [0,7 мкм]
- D. [0,4 мкм].

2.32. На дифракционную решетку нормально падает пучок света от газоразрядной трубки, наполненной гелием. На какую линию в спектре четвертого порядка накладывается красная линия гелия ( $\lambda_{кр} = 6,7 \cdot 10^{-5}$  см) спектра третьего порядка?

- A. [ $5,02 \cdot 10^{-5}$  см]
- B. [ $7,02 \cdot 10^{-5}$  см]
- C. [ $6,02 \cdot 10^{-5}$  см]
- D. [ $4,02 \cdot 10^{-5}$  см].

2.33. Дифракционная решетка длиной 5 мм может разрешить в первом порядке две спектральные линии натрия ( $\lambda_1 = 589,0$  нм и  $\lambda_2 = 589,6$  нм). Определить, под каким углом  $\varphi$  в спектре третьего порядка будет наблюдаться свет с  $\lambda_3 = 600$  нм, падающий на решетку нормально.

- A. [ $\varphi = 20^\circ 42'$ ]
- B. [ $\varphi = 40^\circ 42'$ ]
- C. [ $\varphi = 30^\circ 42'$ ]
- D. [ $\varphi = 60^\circ 42'$ ].

2.34. Монохроматический свет нормально падает на дифракционную решетку. Определите угол дифракции, соответствующий максимуму четвертого порядка, если максимум третьего порядка отклонен на  $\varphi_1 = 18^\circ$ .

- A. [ $24^\circ 20'$ ]
- B. [ $44^\circ 20'$ ]
- C. [ $34^\circ 20'$ ]
- D. [ $64^\circ 20'$ ].

2.35. Определите постоянную дифракционной решетки, если она в первом порядке разрешает две спектральные линии калия ( $\lambda_1 = 578$  нм и  $\lambda_2 = 580$  нм). Длина решетки 1 см.

- A. [34,6 мкм]
- B. [24,6 мкм]
- C. [14,6 мкм]
- D. [44,6 мкм].

2.36. Постоянная дифракционной решетки длиной 2,5 см равна 5 мкм. Определите разность длин волн, разрешаемую этой решеткой, для света с длиной волны  $\lambda = 0,5$  мкм в спектре второго порядка.

- A. [50 пм]
- B. [20 пм]
- C. [60 пм]
- D. [30 пм].

2.37. Две дифракционные решетки имеют одинаковую ширину 3 мм, но разные периоды:  $d_1 = 3 \cdot 10^{-3}$  мм и  $d_2 = 6 \cdot 10^{-3}$  мм. Определить их наибольшую разрешающую способность для желтой линии натрия с длиной волны 5896 Å.

- A. [5000; 5000]
- B. [5000; 6000]
- C. [6000; 5000]
- D. [3000; 6000].

2.38. Дифракционная решетка имеет 1000 штрихов и постоянную 10 мкм. Определите: 1) угловую дисперсию для угла дифракции  $30^\circ$  в спектре третьего порядка; 2) разрешающую способность дифракционной решетки в спектре пятого порядка.

- A. [1]  $3,46 \cdot 10^5$  рад/м; 2) 5000]
- B. [1]  $8,46 \cdot 10^5$  рад/м; 2) 4000]
- C. [1]  $6,46 \cdot 10^5$  рад/м; 2) 6000]
- D. [1]  $7,46 \cdot 10^5$  рад/м; 2) 3000].

2.39. Определите длину волны, для которой дифракционная решетка с постоянной 3 мкм в спектре второго порядка имеет угловую дисперсию  $7 \cdot 10^5$  рад/м.

- A. [457 нм]
- B. [570 нм]
- C. [657 нм]
- D. [470 нм].

2.40. Угловая дисперсия дифракционной решетки для  $\lambda = 500$  нм в спектре второго порядка равна  $4,08 \cdot 10^5$  рад/м. Определите постоянную дифракционной решетки.

- A. [5 мкм]
- B. [15 мкм]
- C. [9 мкм]
- D. [12 мкм].

2.41. Определить угловую дисперсию дифракционной решетки для  $\lambda = 5890$  Å в спектре первого порядка. Постоянная решетки  $2,5 \cdot 10^{-4}$  см.

- A.  $[4,16 \cdot 10^5 \text{ рад/м}]$
- B. [4,16 рад/м]
- C.  $[9,16 \cdot 10^5 \text{ рад/м}]$
- D.  $[4,16 \cdot 10^2 \text{ рад/м}]$ .

2.42. Под углом  $\alpha = 30^\circ$  наблюдается четвертый максимум для красной линии кадмия ( $\lambda_{\text{кр}} = 0,644$  мкм). Определить постоянную дифракционной решетки и ее ширину, если она позволяет в условиях задачи различить  $\Delta\lambda = 0,322$  нм.

- A. [5,15 мкм; 3,57 мм]
- B. [15 мкм; 3,57 мм]
- C. [8,15 мкм; 8,57 мм]
- D. [10 мкм; 6,57 мм].

2.43. Длины волн дублета желтой линии в спектре натрия равны 5889,95 и 5895,92 Å. Какую ширину должна иметь решетка, содержащая 600 штрихов на 1 мм, чтобы различить эти линии в спектре первого порядка?

- A. [1,65 мм]
- B. [2,65 мм]
- C. [16,5 мм]
- D. [4,65 мм].

2.44. Рентгеновское излучение с длиной волны  $\lambda = 1,63 \text{ \AA}$  падает на кристалл каменной соли. Найти межплоскостное расстояние кристаллической решетки каменной соли, если дифракционный максимум первого порядка наблюдается при угле скольжения  $17^\circ$ .

A. [2,79  $\text{\AA}$ ]

B. [4,79  $\text{\AA}$ ]

C. [3,79  $\text{\AA}$ ]

D. [5,79  $\text{\AA}$ ].

2.45. Рентгеновское излучение с длиной волны  $2 \text{ \AA}$  падает на монокристалл. Чему равен угол скольжения, если в спектре второго порядка получен максимум? Межплоскостное расстояние кристаллической решетки  $0,3 \text{ нм}$ .

A. [41°49']

B. [71°49']

C. [61°49']

D. [81°49'].

2.46. 1) Определить угол полной поляризации отраженного света для воды ( $n = 1,33$ ), стекла ( $n = 1,6$ ) и алмаза ( $n = 2,42$ ). 2) Как поляризован падающий луч, если в этом случае отраженные лучи отсутствуют?

A. [1)  $i_{\text{воды}}=53^\circ$ ,  $i_{\text{стекла}}=58^\circ$ ,  $i_{\text{алмаза}}=67^\circ30'$  2) плоско поляризован]

B. [1)  $i_{\text{воды}}=63^\circ$ ,  $i_{\text{стекла}}=68^\circ$ ,  $i_{\text{алмаза}}=77^\circ30'$  2) линейно поляризован]

C. [1)  $i_{\text{воды}}=53^\circ$ ,  $i_{\text{стекла}}=68^\circ$ ,  $i_{\text{алмаза}}=67^\circ30'$  2) плоско поляризован]

D. [1)  $i_{\text{воды}}=53^\circ$ ,  $i_{\text{стекла}}=58^\circ$ ,  $i_{\text{алмаза}}=68^\circ30'$  2) линейно поляризован].

2.47. Угол преломления луча в жидкости  $35^\circ$ . Определить показатель преломления жидкости, если известно, что отраженный луч максимально поляризован.

A. [1,4]

B. [1,7]

C. [1,6]

D. [1,5].

2.48. Свет падает под углом полной поляризации на границу раздела двух сред. Какой угол образуют между собой отраженный и преломленный лучи?

A. [90°]

B. [60°]

C. [45°]

D. [30°].

2.49. Предельный угол полного внутреннего отражения для некоторого вещества равен 60°. Чему равен для этого вещества угол полной поляризации? Какова скорость света в этом веществе?

A. [49°6'; 2,6·10<sup>8</sup> м/с]

B. [49°6'; 3,0·10<sup>8</sup> м/с]

C. [59°6'; 2,8·10<sup>8</sup> м/с]

D. [69°6'; 2,6·10<sup>8</sup> м/с].

2.50. Пучок естественного света падает на стекло с показателем преломления 1,73. Определить, при каком угле преломления отраженный от стекла пучок света будет полностью поляризован.

A. [30°]

B. [90°]

C. [60°]

D. [45°].

2.51. Два николя расположены так, что угол между их главными плоскостями составляет  $\varphi = 60^\circ$ . 1). Во сколько раз уменьшится интенсивность естественного света при прохождении его через один николь? 2). Во сколько раз уменьшится интенсивность света при прохождении через оба николя? При прохождении каждого из николей потери на отражение и поглощение составляют 5%.

A. [1) 2,1; 2) 9,1]

B. [1) 5,1; 2) 7,1]

C. [1) 3,1; 2) 8,1]

D. [1) 4,1; 2) 4,1].

2.52. Чему равен угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора, если интенсивность естественного света, прошедшего через эти призмы, уменьшилась в 4 раза? Поглощением света пренебречь.

A. [ $45^\circ$ ]

B. [ $30^\circ$ ]

C. [ $90^\circ$ ]

D. [ $60^\circ$ ].

2.53. Главные плоскости двух призм Николя, поставленных на пути луча, образуют между собой угол  $60^\circ$ . Как изменится интенсивность света, прошедшего через эти призмы, если угол между их плоскостями поляризации станет равным  $30^\circ$ ?

A. [Увеличится в 3 раза]

B. [Увеличится в 5 раз]

C. [Уменьшится в 3 раза]

D. [Уменьшится в 5 раз].

2.54. Во сколько раз ослабляется естественный свет, проходя через два николя, главные плоскости которых составляют угол  $30^\circ$ , если в каждом из николей на отражение и поглощение теряется 10 % падающего на него светового потока?

A. [3,3]

B. [6,6]

C. [5,5]

D. [9,3].

2.55. Между двумя скрещенными поляроидами размещается третий поляроид так, что его главная плоскость составляет угол  $45^\circ$  с главной плоскостью первого поляроида. Как изменится интенсивность естественного света, проходящего через такое устройство? Поглощением света в поляроидах пренебречь.

A. [Уменьшится в 8 раз]

B. [Уменьшится в 4 раза]

C. [Увеличится в 8 раз]

D. [Увеличится в 4 раза].

2.56. Пучок естественного света падает на систему из 4 николей, главная плоскость каждого из которых повернута на угол  $60^\circ$  относительно главной плоскости предыдущего николя. Во сколько раз уменьшится интенсивность света, проходящего через эту систему? Поглощением света пренебречь.

A. [В 128 раз]

B. [В 64 раза]

C. [В 256 раз]

D. [В 12 раз].

2.57. Угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора составляет  $30^\circ$ . Определите изменение интенсивности прошедшего через них света, если угол между главными плоскостями равен  $45^\circ$ .

A. [Уменьшится в 1,5 раза]

B. [Уменьшится в 3 раза]

C. [Увеличится в 1,5 раза]

D. [Увеличится в 1,5 раза].

2.58. Интенсивность естественного света, прошедшего через два николя, уменьшилась в 8 раз. Пренебрегая поглощением света, определите угол между главными плоскостями николей.

A. [ $60^\circ$ ]

B. [ $30^\circ$ ]

C. [ $90^\circ$ ]

D. [ $45^\circ$ ].

2.59. Определите, во сколько раз ослабится интенсивность света, прошедшего через два николя, расположенные так, что угол между их главными плоскостями  $\alpha = 60^\circ$ , а в каждом из николей теряется 8 % интенсивности падающего на него света.

A. [В 9,45 раза]

B. [В 4,45 раза]

C. [В 6,45 раза]

D. [В 5,45 раза].

2.60. Определите, во сколько раз уменьшится интенсивность естественного света, прошедшего через два николя, главные плоскости которых образуют угол в  $60^\circ$ , если каждый из николей как поглощает, так и отражает 5 % падающего на них света.

- A. [В 9,88 раза]
- B. [В 6,66 раза]
- C. [В 2,22 раза]
- D. [В 8,22 раза].

2.61. Естественный свет проходит через поляризатор и анализатор, угол между главными плоскостями которых равен  $\alpha$ . Поляризатор и анализатор как поглощают, так и отражают 10 % падающего на них света. Определите угол, если интенсивность света, вышедшего из анализатора, равна 12 % интенсивности света, падающего на поляризатор.

- A. [52°14']
- B. [92°14']
- C. [72°14']
- D. [32°14'].

2.62. Узкий параллельный пучок рентгеновского излучения с длиной волны  $\lambda = 245$  пм падает на естественную грань монокристалла каменной соли. Определите расстояние между атомными плоскостями монокристалла, если дифракционный максимум второго порядка наблюдается при падении излучения к поверхности монокристалла под углом скольжения  $61^\circ$ .

- A. [0,28 нм]
- B. [0,56 нм]
- C. [1,14 нм]
- D. [0,78 нм].

2.63. Узкий параллельный пучок монохроматического рентгеновского излучения падает на грань кристалла с расстоянием между его атомными плоскостями 0,3 нм. Определите длину волны рентгеновского излучения, если под

углом  $30^\circ$  к плоскости грани наблюдается дифракционный максимум первого порядка.

- A. [300 пм]
- B. [900 пм]
- C. [600 пм]
- D. [150 пм].

2.64. Определите толщину кварцевой пластинки, для которой угол поворота плоскости поляризации монохроматического света определенной длины волны  $\varphi = 180^\circ$ . Удельное вращение в кварце для данной длины волны  $\alpha = 0,52$  рад/мм.

- A. [6,04 мм]
- B. [9,06 мм]
- C. [3,02 мм]
- D. [8,06 мм].

2.65. Раствор глюкозы с массовой концентрацией  $0,21 \text{ г/см}^3$ , находящийся в стеклянной трубке, поворачивает плоскость поляризации монохроматического света, проходящего через раствор, на угол  $24^\circ$ . Определите массовую концентрацию глюкозы в другом растворе в трубке такой же длины, если он поворачивает плоскость поляризации на угол  $18^\circ$ .

- A. [157 кг/м<sup>3</sup>]
- B. [257 кг/м<sup>3</sup>]
- C. [314 кг/м<sup>3</sup>]
- D. [197 кг/м<sup>3</sup>].

2.66. Определить толщину кварцевой пластинки, для которой угол поворота плоскости поляризации света с длиной волны  $\lambda = 500 \text{ нм}$  равен  $\alpha = 48^\circ$ . Постоянная вращений кварца для этой длины волны  $\alpha_0 = 30^\circ/\text{мм}$ .

- A. [1,6 мм]
- B. [0,8 мм]
- C. [3,2 мм]
- D. [3,6 мм].

2.67. Определите удельное вращение раствора сахара, концентрация которого 0,33 г/см<sup>3</sup>, если при прохождении монохроматического света через трубку с раствором угол поворота плоскости поляризации 22°. Длина трубки 10 см.

- A. [6,67°·см<sup>2</sup>/г]
- B. [2,27°·см<sup>2</sup>/г]
- C. [66,7°·см<sup>2</sup>/г]
- D. [4,47°·см<sup>2</sup>/г].

### 3. Квантовая природ излучения

Основные формулы и законы.

Закон Стефана-Больцмана  $R_e = \sigma T^4$ , где  $R_e$  - энергетическая светимость (излучательность) чёрного тела;  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К}^4)$  - постоянная Стефана-Больцмана;  $T$  - температура.

Энергетическая светимость серого тела  $R_T^c = a_T \sigma T^4$ , где  $a_T$  - поглощательная способность серого тела.

Связь энергетической светимости и спектральной плотности энергетической светимости чёрного тела  $R_e = \int_0^\infty r_{\nu,T} d\nu = \int_0^\infty r_{\lambda,T} d\lambda$ .

Закон смещения Вина  $\lambda = \frac{b}{T_{max}}$ , где  $\lambda_{max}$  - длина волны, соответствующая максимальному значению спектральной плотности энергетической светимости чёрного тела,  $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$  - постоянная Вина.

Зависимость максимальной спектральной плотности энергетической светимости чёрного тела от температуры  $(r_{\lambda,T})_{\max} = CT^5$ , где  $C = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{Вт}/(\text{м}^3 \text{К}^5)$ .

Формула Рэлея-Джинса для спектральной плотности энергетической светимости чёрного тела  $r_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT$ , где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{Дж}/\text{К}$  - постоянная Больцмана,  $c = 3 \cdot 10^8 \text{м}/\text{с}$  - скорость света в вакууме,  $\nu$  - частота излучения.

Энергия кванта света (фотона)  $\varepsilon = h\nu = h\frac{c}{\lambda}$ , где  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{Дж} \cdot \text{с}$  - постоянная Планка.

$$\text{Импульс и масса фотона } P = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}, m = \frac{h\nu}{c^2}.$$

Формула Эйнштейна для внешнего фотоэффекта  $h\nu = A + \frac{mV_m^2}{2}$ , где  $A$  - работа выхода электрона из металла,  $\frac{mV_m^2}{2}$  - максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона,  $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{кг}$  - масса электрона. Если  $V = 0$ , то  $h\nu_0 = A$ ,  $hc/\lambda_0 = A$ , где  $\nu_0$ ,  $\lambda_0$  - «красная граница» фотоэффекта, т.е. минимальная частота или максимальная длина волны, при которой возможен фотоэффект.

Связь между кинетической энергией электрона и задерживающим напряжением  $\frac{mV_m^2}{2} = eU_3$ , где  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{Кл}$  - заряд электрона.

Давление света при нормальном падении на поверхность  $P = \frac{E}{c}(1 + \rho) = \varpi(1 + \rho)$ , где  $E$  - энергия всех фотонов, падающих на единицу поверхности в единицу времени,  $\rho$  - коэффициент отражения,  $\varpi$  - объёмная плотность энергии излучения.

Изменение длины волны рентгеновского излучения при комптоновском рассеянии  $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta)$ , где  $\lambda$  и  $\lambda'$  - длины волн падающего и рассеянного излучения,  $m$  - масса электрона,  $\theta$  - угол рассеяния.

Задание.

3.1. Максимум спектральной плотности энергетической светимости Солнца приходится на длину волны 0,48 мкм. Считая, что Солнце излучает как чёрное тело, определить температуру его поверхности и мощность, излучаемую его поверхностью.

- A. [6,04 кК;  $4,58 \cdot 10^{26}$  Вт]
- B. [604 К; 458 Вт]
- C. [6,04 мТ;  $4,58 \cdot 10^{23}$  Вт]
- D. [6,04 мкТ; 4,58 Вт].

3.2. Определить количество теплоты, теряемой  $50 \text{ см}^2$  поверхности расплавленной платины за 1 мин, если поглощательная способность платины 0,8. Температура плавления платины равна  $1770^\circ\text{C}$ .

- A. [237 кДж]
- B. [237 Дж]
- C. [237 мДж]
- D. [237 мкДж].

3.3. Определите, во сколько раз необходимо уменьшить температуру чёрного тела, чтобы его энергетическая светимость ослабилась в 16 раз.

- A. [в 2 раза]
- B. [в 3 раза]
- C. [в 4 раза]
- D. [в 5 раз].

3.4. Энергетическая светимость чёрного тела равна  $10 \text{ кВт/м}^2$ . Определите длину волны, соответствующую максимуму спектральной плотности энергетической светимости этого тела.

- A. [4,47 мкм]
- B. [44,7 мкм]

C. [0,447 мкм]

D. [447 мкм].

3.5. Определите, как и во сколько раз изменится мощность излучения чёрного тела, если длина волны, соответствующая максимуму его спектральной плотности энергетической светимости, сместилась с 720 нм до 400 нм.

A. [увеличилась в 10,5 раз]

B. [уменьшилась в 10,5 раз]

C. [увеличилась в 105 раз]

D. [уменьшилась в 105 раз].

3.6. Чёрное тело находится при температуре 3000 К. При остывании тела длина волны, соответствующая максимуму энергетической светимости, изменилась на 8 мкм. Определите температуру, до которой тело охладилось.

A. [323 К]

B. [323 °C]

C. [3230 К]

D. [32,3 °C].

3.7. Чёрное тело нагрели от температуры 600 К до 2400 К. Определите: 1) во сколько раз увеличилась его энергетическая светимость; 2) на сколько уменьшилась длина волны, соответствующая максимуму спектральной плотности энергетической светимости.

A. [1) в 256 раз; 2) на 3,62 мкм]

B. [1) в 25,6 раз; 2) на 36,5 мкм]

C. [1) в 2,56 раз; 2) на 3,62 мкм]

D. [1) в 0,256 раз; 2) на 3,62 мм].

3.8. В результате нагревания чёрного тела длина волны, соответствующая максимуму спектральной плотности энергетической светимости, сместилась

с 2,7 мкм до 0,9 мкм. Определите, во сколько раз увеличилась: 1) энергетическая светимость тела; 2) максимальная спектральная плотность энергетической светимости тела.

- A. [1] в 81 раз; 2) в 243 раза]
- B. [1] в 8,1 раз; 2) в 24,3 раза]
- C. [1] в 9 раз; 2) в 24,3 раза]
- D. [1] в 81 раз; 2) в 2,43 раза].

3.9. Считая никель чёрным телом, определите мощность, необходимую для поддержания температуры расплавленного никеля 1453 °С неизменной, если площадь его поверхности равна 0,5 см<sup>2</sup>. Потерями энергии пренебречь.

- A. [25,2 Вт]
- B. [25,2 кВт]
- C. [2,25 Вт]
- D. [52,5 Вт].

3.10. Металлическая поверхность площадью 15 см<sup>2</sup>, нагретая до температуры 3000 К, излучает в одну минуту 100 кДж. Определите: 1) энергию, излучаемую этой поверхностью, считая её чёрной; 2) отношение энергетических светимостей этой поверхности и чёрного тела при данной температуре.

- A. [1] 413 кДж; 2) 0,242]
- B. [1] 413 Дж; 2) 0,424]
- C. [1] 413 мДж; 2) 2,42]
- D. [1] 41,3 Дж; 2) 0,422].

3.11. Принимая Солнце за чёрное тело и учитывая, что его максимальной спектральной плотности энергетической светимости соответствует длина волны 500 нм, определите: 1) температуру поверхности Солнца; 2) энергию, излучаемую Солнцем в виде электромагнитных волн за 10 мин; 3) массу, теряемую Солнцем за это время вследствие излучения.

- A. [1) 5,8 кК; 2)  $2,34 \cdot 10^{29}$  Дж; 3)  $2,6 \cdot 10^{12}$  кг]
- B. [1) 58 кК; 2)  $23,4 \cdot 10^{29}$  Дж; 3)  $2,6 \cdot 10^{13}$  кг]
- C. [1) 580 К; 2)  $2,34 \cdot 10^{30}$  Дж; 3)  $26 \cdot 10^{12}$  кг]
- D. [1) 5800 °С; 2)  $234 \cdot 10^{29}$  Дж; 3)  $2,6 \cdot 10^{12}$  кг].

3.12. Мощность излучения чёрного тела равна 34 кВт. Найти температуру этого тела, его поверхность равна  $0,6 \text{ м}^2$ .

- A. [1000 К]
- B. [1000 °С]
- C. [100 °С]
- D. [100 кК].

3.13. Температура вольфрамовой спирали в 25 - ваттной электрической лампочке равна 2450 К. Отношение её излучения к излучению чёрного тела при данной температуре равно 0,3. Найти величину излучающей поверхности спирали.

- A. [ $4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ ]
- B. [ $4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ ]
- C. [ $4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ ]
- D. [ $4 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2$ ].

3.14. Мощность излучения чёрного тела равна  $10^5$  кВт. Найти величину излучающей поверхности тела, если известно, что длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости, равна 700 нм.

- A. [14,4  $\text{см}^2$ ]
- B. [144  $\text{см}^2$ ]
- C. [14,4  $\text{м}^2$ ]
- D. [1,44  $\text{см}^2$ ].

3.15. Найти, какое количество энергии с одного квадратного сантиметра поверхности в одну секунду излучает чёрное тело, если известно, что длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости приходится на длину волны  $4840 \text{ \AA}$ .

A. [7350 Дж]

B. [735 Дж]

C. [735 кДж]

D. [73,5 кДж].

3.16. В каких областях спектра лежат длины волн, соответствующие максимуму спектральной плотности энергетической светимости, если в качестве источника света взять: 1) спираль электрической лампочки ( $T = 3000 \text{ K}$ ); 2) поверхность Солнца ( $T = 6000 \text{ K}$ ); 3) атомная бомба, имеющая в момент взрыва около 10 млн. градусов. Излучение считать близким к излучению чёрного тела.

A. [1) 1 мкм; 2) 500 нм; 3)  $2,9 \text{ \AA}$ ]

B. [1) 10 мкм; 2) 500 мкм; 3)  $2 \text{ \AA}$ ]

C. [1) 10 нм; 2) 5000 нм; 3)  $30 \text{ \AA}$ ]

D. [1) 1 мкм; 2)  $500 \text{ \AA}$ ; 3)  $2,9 \text{ мкм}$ ].

3.17. На сколько процентов увеличится энергетическая светимость чёрного тела, если его температура увеличится на 1 %?

A. [на 4 %]

B. [на 1 %]

C. [на 3 %]

D. [на 2 %].

3.18. Красная граница фотоэффекта для цезия  $6530 \text{ \AA}$ . Определите скорость фотоэлектронов при облучении цезия светом длиной волны  $4000 \text{ \AA}$ .

- A.  $[6,5 \cdot 10^5 \text{ м/с}]$
- B.  $[6,5 \cdot 10^4 \text{ м/с}]$
- C.  $[6,5 \cdot 10^3 \text{ м/с}]$
- D.  $[6,5 \cdot 10^2 \text{ м/с}]$ .

3.19. Определите работу выхода электронов из натрия, если «красная граница» фотоэффекта равна  $5000 \text{ \AA}$ .

- A.  $[2,49 \text{ эВ}]$
- B.  $[24,9 \text{ эВ}]$
- C.  $[249 \text{ эВ}]$
- D.  $[0,249 \text{ эВ}]$ .

3.20. Определите максимальную скорость фотоэлектронов, вырываемых с поверхности металла, если фототок прекращается при задерживающем напряжении  $3,7 \text{ В}$ .

- A.  $[1,14 \text{ Мм/с}]$
- B.  $[1,14 \text{ мм/с}]$
- C.  $[1,14 \text{ км/с}]$
- D.  $[1,14 \text{ м/с}]$ .

3.21. «Красная граница» фотоэффекта для некоторого металла равна  $500 \text{ нм}$ . Определите минимальное значение энергии фотона, вызывающего фотоэффект.

- A.  $[2,49 \text{ эВ}]$
- B.  $[24,9 \text{ эВ}]$
- C.  $[249 \text{ эВ}]$
- D.  $[0,249 \text{ эВ}]$ .

3.22. Калий освещается монохроматическим светом с длиной волны  $400 \text{ нм}$ . Определите наименьшее задерживающее напряжение, при котором фототок прекратится. Работа выхода электронов из калия равна  $2,2 \text{ эВ}$ .

- A. [0,91 В]
- B. [9,1 В]
- C. [91 В]
- D. [0,91 мВ].

3.23. «Красная граница» фотоэффекта для некоторого металла равна 500 нм. Определите: 1) работу выхода электронов из этого металла; 2) максимальную скорость электронов, вырываемых из этого металла светом с длиной волны 400 нм.

- A. [1] 2,49 эВ; 2) 468 км/с]
- B. [1] 24,9 эВ; 2) 468 м/с]
- C. [1] 2,49 Дж; 2) 468 км/с]
- D. [1] 24,9 Дж; 2) 0 468 м/с].

3.24. Длина волны падающего света 400 нм, задерживающее напряжение равно 1,2 В. Определите «красную границу» фотоэффекта.

- A. [652 нм]
- B. [652 Мм]
- C. [65,2 нм]
- D. [652 мм].

3.25. Задерживающее напряжение для платиновой пластины (работа выхода 6,3 эВ) составляет 3,7 В. При тех же условиях для другой пластины задерживающее напряжение равно 5,3 В. Определите работу выхода электронов из этой пластины.

- A. [4,7 эВ]
- B. [47 эВ]
- C. [4,7 Дж]
- D. [47 Дж].

3.26. Фотоны с энергией 5 эВ вырывают фотоэлектроны из металла с работой выхода 4,7 эВ. Определите максимальный импульс, передаваемый поверхности этого металла при вылете электрона.

A.  $[2,96 \cdot 10^{-25} \text{ кг} \cdot \text{м/с}]$

B.  $[2,96 \cdot 10^{-24} \text{ кг} \cdot \text{м/с}]$

C.  $[2,96 \cdot 10^{25} \text{ кг} \cdot \text{м/с}]$

D.  $[2,96 \cdot 10^{24} \text{ кг} \cdot \text{м/с}]$ .

3.27. Определите максимальную скорость фотоэлектронов, вырываемых с поверхности цинка (работа выхода 4 эВ), при облучении излучением с длиной волны 2,47 пм.

A.  $[259 \text{ Мм/с}]$

B.  $[259 \text{ мм/с}]$

C.  $[259 \text{ км/с}]$

D.  $[259 \text{ м/с}]$ .

3.28. Фотоэффект для некоторого металла начинается при частоте падающего света  $6 \cdot 10^{14}$  Гц. Задерживающее напряжение равно 3 В. Определите: 1) работу выхода электронов из этого металла; 2) частоту применяемого излучения.

A.  $[1) 2,48 \text{ эВ}; 2) 1,32 \cdot 10^{15} \text{ Гц}]$

B.  $[1) 24,8 \text{ эВ}; 2) 13,2 \cdot 10^{15} \text{ Гц}]$

C.  $[1) 2,48 \text{ Дж}; 2) 1,32 \cdot 10^{14} \text{ Гц}]$

D.  $[1) 24,8 \text{ Дж}; 2) 13,2 \cdot 10^{14} \text{ Гц}]$ .

3.29. Определите постоянную Планка, если известно, что фотоэлектроны, вырываемые с поверхности некоторого металла светом с частотой  $2,2 \cdot 10^{15}$  Гц, полностью задерживаются напряжением 6,6 В, а вырываемые светом с частотой  $4,6 \cdot 10^{15}$  Гц – напряжением 16,5 В.

A.  $[6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}]$

B.  $[6,5 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}]$

- C.  $[6,7 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}]$
- D.  $[6,4 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}]$ .

3.30. При освещении катода вакуумного фотоэлемента светом с длиной волны 310 нм фототок прекращается при некотором задерживающем напряжении. При увеличении длины волны на 25 % задерживающее напряжение оказывается меньше на 0,8 В. Определите по этим данным постоянную Планка.

- A.  $[6,61 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}]$
- B.  $[6,51 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}]$
- C.  $[6,71 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}]$
- D.  $[6,41 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}]$ .

3.31. Давление света с длиной волны 500 нм на зачернённую поверхность, расположенную перпендикулярно падающим лучам, равно 0,12 мкПа. Определите число фотонов, падающих каждую секунду на  $1 \text{ м}^2$  поверхности.

- A.  $[9,05 \cdot 10^{19}]$
- B.  $[9,05 \cdot 10^{20}]$
- C.  $[9,05 \cdot 10^{21}]$
- D.  $[9,05 \cdot 10^{18}]$ .

3.32. На идеально отражающую поверхность площадью  $5 \text{ см}^2$  за время 3 мин нормально падает монохроматический свет, энергия которого 9 Дж. Определите световое давление, оказываемое на поверхность.

- A.  $[667 \text{ нПа}]$
- B.  $[667 \text{ пПа}]$
- C.  $[667 \text{ мкПа}]$
- D.  $[667 \text{ мПа}]$ .

3.33. Определите давление света на стенки электрической 150 - ваттной лампочки, принимая, что вся потребляемая мощность идёт на излучение и стенки

лампочки отражают 15 % падающего на них света. Считать лампочку сферическим сосудом радиуса 4 см.

A. [28,6 мкПа]

B. [28,6 мПа]

C. [28,6 нПа]

D. [28,6 Па].

3.34. Давление света с длиной волны 500 нм на зачернённую поверхность, расположенную перпендикулярно падающему излучению, равно 0,15 мкПа.

Определите число фотонов, падающих на поверхность площадью  $10 \text{ см}^2$  за 1 с.

A. [ $4,52 \cdot 10^{17}$ ]

B. [ $4,52 \cdot 10^{18}$ ]

C. [ $4,52 \cdot 10^{19}$ ]

D. [ $4,52 \cdot 10^{20}$ ].

3.35. На поверхность площадью  $100 \text{ см}^2$  ежеминутно падает 63 Дж световой энергии. Определите величину светового давления в случаях, когда поверхность: 1) полностью отражает все лучи; 2) полностью поглощает все падающие на неё лучи.

A. [1)  $7 \cdot 10^{-7}$  Па; 2)  $3,5 \cdot 10^{-7}$  Па]

B. [1)  $3,5 \cdot 10^{-7}$  Па; 2)  $7 \cdot 10^{-7}$  Па]

B. [1)  $7 \cdot 10^{-5}$  Па; 2)  $3,5 \cdot 10^{-5}$  Па]

D. [1)  $3,5 \cdot 10^{-5}$  Па; 2)  $7 \cdot 10^{-5}$  Па].

3.36. Пучок света с длиной волны  $4900 \text{ \AA}$ , падая нормально на поверхность, производит давление  $5 \cdot 10^{-6}$  Па. Сколько квантов света падает ежесекундно на единицу площади этой поверхности? Коэффициент отражения света равен 0,25.

A. [ $2,9 \cdot 10^{21}$ ]

B. [ $2,9 \cdot 10^{22}$ ]

C.  $[2,9 \cdot 10^{23}]$

D.  $[2,9 \cdot 10^{24}]$ .

3.37. На идеально отражающую плоскую поверхность нормально падает свет с длиной волны 0,55 мкм. Мощность излучения составляет 0,45 Вт. Определите: 1) число фотонов, падающих на поверхность за время 3 с; 2) силу давления, испытываемую этой поверхностью.

A. [1)  $3,73 \cdot 10^{18}$ ; 2) 3 нН]

B. [1)  $3,73 \cdot 10^{19}$ ; 2) 3 мН]

C. [1)  $3,73 \cdot 10^{20}$ ; 2) 3 мкН]

D. [1)  $3,73 \cdot 10^{21}$ ; 2) 3 нН]

3.38. На зеркало с идеально отражающей поверхностью  $1,5 \text{ см}^2$  падает нормально свет от электрической дуги. Определите импульс, полученный зеркалом, если плотность потока световой энергии, падающей на него, равна  $10 \text{ Вт/см}^2$ , а продолжительность освещения 1 с.

A.  $[10^{-7} \text{ кг} \cdot \text{м/с}]$

B.  $[10^{-8} \text{ кг} \cdot \text{м/с}]$

C.  $[10^{-9} \text{ кг} \cdot \text{м/с}]$

D.  $[10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м/с}]$ .

3.39. Поток излучения с длиной волны  $5000 \text{ \AA}$  падает нормально на плоскую зеркальную поверхность и давит на неё с силой  $10^{-8} \text{ Н}$ . Определите число фотонов, ежесекундно падающих на эту поверхность.

A.  $[3,78 \cdot 10^{18}]$

B.  $[3,78 \cdot 10^{19}]$

C.  $[3,78 \cdot 10^{20}]$

D.  $[3,78 \cdot 10^{21}]$ .

3.40. Рентгеновские лучи с длиной волны  $0,708 \text{ \AA}$  испытывают комптоновское рассеяние на парафине. Найдите длину волны рентгеновских лучей, рассеянных в направлении: 1)  $\theta = \pi/2$ ; 2)  $\theta = \pi$ .

A. [1)  $0,732 \text{ \AA}$ ; 2)  $0,756 \text{ \AA}$ ]

B. [1)  $0,756 \text{ \AA}$ ; 2)  $0,732 \text{ \AA}$ ]

C. [1)  $0,024 \text{ \AA}$ ; 2)  $0,048 \text{ \AA}$ ]

D. [1)  $0,732 \text{ нм}$ ; 2)  $0,756 \text{ нм}$ ].

3.41. Какова длина волны рентгеновского излучения, если при комптоновском рассеянии этого излучения графитом под углом  $60^\circ$  длина волны рассеянного излучения оказалась равной  $2,54 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ ?

A. [0,242  $\text{ \AA}$ ]

B. [0,242 нм]

C. [0,242 пм]

D. [0,242 м].

3.42. Рентгеновские лучи с длиной волны  $0,2 \text{ \AA}$  испытывают комптоновское рассеяние под углом  $90^\circ$ . Определите: 1) изменение длины волны рентгеновских лучей при рассеянии; 2) энергию электрона отдачи; 3) импульс электрона отдачи.

A. [1)  $0,024 \text{ \AA}$ ; 2)  $6,6 \cdot 10^3 \text{ эВ}$ ; 3)  $4,4 \cdot 10^{-23} \text{ кг}\cdot\text{м/с}$ ]

B. [1)  $0,024 \text{ м}$ ; 2)  $6,6 \cdot 10^3 \text{ Дж}$ ; 3)  $4,4 \cdot 10^{-24} \text{ кг}\cdot\text{м/с}$ ]

C. [1)  $0,024 \text{ нм}$ ; 2)  $6,6 \cdot 10^2 \text{ эВ}$ ; 3)  $4,4 \cdot 10^{-25} \text{ кг}\cdot\text{м/с}$ ]

D. [1)  $0,024 \text{ пм}$ ; 2)  $6,6 \cdot 10^2 \text{ Дж}$ ; 3)  $4,4 \cdot 10^{-26} \text{ кг}\cdot\text{м/с}$ ].

3.43. В явлении Комптона энергия падающего фотона распределяется поровну между рассеянным фотоном и электроном отдачи. Угол рассеяния равен  $90^\circ$ . Определите энергию и импульс рассеянного фотона.

A. [ $2,6 \cdot 10^5 \text{ эВ}$ ;  $9,3 \cdot 10^{-12} \text{ кг}\cdot\text{м/с}$ ]

B. [ $2,6 \cdot 10^6 \text{ эВ}$ ;  $9,3 \cdot 10^{-13} \text{ кг}\cdot\text{м/с}$ ]

C.  $[2,6 \cdot 10^7 \text{ эВ}; 9,3 \cdot 10^{-14} \text{ кг} \cdot \text{м/с}]$

D.  $[2,6 \cdot 10^8 \text{ эВ}; 9,3 \cdot 10^{-14} \text{ кг} \cdot \text{м/с}]$ .

3.44. Энергия рентгеновских лучей равна 0,6 МэВ. Определите энергию электрона отдачи, если известно, что длина волны рентгеновских лучей после комптоновского рассеяния изменилась на 20 %.

A. [0,1 МэВ]

B. [0,01 МэВ]

C. [0,1 пэВ]

D. [0,1 эВ].

3.45. Фотон с энергией 1,025 МэВ рассеялся на первоначально покоящемся свободном электроны. Определите угол рассеяния фотона, если длина волны рассеянного фотона оказалась равной 2,43 пм.

A.  $[60^\circ]$

B.  $[90^\circ]$

C.  $[45^\circ]$

D.  $[30^\circ]$ .

#### 4. Теория атома водорода по Бору

Основные формулы и законы.

Первый постулат Бора (постулат стационарных состояний)  $m_e v r_n = n \frac{h}{2\pi}$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ), где  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг – масса электрона,  $v$  – скорость электрона на  $n$  – й орбите, радиус которой равен  $r_n$ ,  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка.

Второй постулат Бора (правило частот)  $h\nu = E_n - E_m$ , где  $E_n, E_m$  – энергии стационарных состояний атома соответственно до и после излучения (поглощения),  $\nu$  – частота излученного (поглощенного) кванта энергии.

Обобщенная формула Бальмера, описывающая серии в спектре водорода:  $\nu = R \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ , где  $\nu$  – частота спектральных линий в спектре атома водорода;  $R = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ 1/с}$  – постоянная Ридберга;  $m$  – определяет серию линий в спектре атома водорода:  $m = 1$  – серия Лаймана (расположена в ультрафиолетовой части спектра);  $m = 2$  – серия Бальмера (расположена в видимой части спектра);  $m = 3$  – серия Пашена;  $m = 4$  – серия Брэкета;  $m = 5$  – серия Пфунда;  $m = 6$  – серия Хэмфри,  $n = m + 1$  – определяет отдельные линии соответствующей серии  $m$ .

Радиус  $n$  – й орбиты электрона в атоме водорода:  $r_n = n^2 \frac{\hbar^2 4\pi\epsilon_0}{m_e e^2}$ , где  $\hbar = h/2\pi = 1,055 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$  – постоянная Планка;  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$  – электрическая постоянная;  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$  – заряд электрона,  $m_e$  – масса электрона.

Энергия  $n$  – го стационарного состояния  $E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{m_e e^2}{8h^2 \epsilon_0^2}$ , где  $n$  – номер стационарной орбиты.

Энергия электрона в атоме водорода:  $E_n = \frac{E_i}{n^2}$ , где  $E_i$  – энергия ионизации атома водорода.

Потенциал ионизации  $\varphi = E_i/e$ .

Потенциал возбуждения  $\varphi_n = \frac{E_{n+1} - E_1}{e}$ .

### Задания

4.1. Определите радиусы первых трех стационарных орбит в атоме водорода.

- A.  $[0,53 \cdot 10^{-10} \text{ м}; 2,12 \cdot 10^{-10} \text{ м}; 4,77 \cdot 10^{-10} \text{ м}]$
- B.  $[4,77 \cdot 10^{-10} \text{ м}; 0,53 \cdot 10^{-10} \text{ м}; 2,12 \cdot 10^{-10} \text{ м}]$
- C.  $[0,53 \cdot 10^{-10} \text{ м}; 4,77 \cdot 10^{-10} \text{ м}; 2,12 \cdot 10^{-10} \text{ м}]$
- D.  $[2,12 \cdot 10^{-10} \text{ м}; 0,53 \cdot 10^{-10} \text{ м}; 0,75 \cdot 10^{-10} \text{ м}]$ .

4.2. Определите скорости электрона на первых трех стационарных орбитах.

A. [ $2,19 \cdot 10^6$  м/с;  $1,1 \cdot 10^6$  м/с;  $0,73 \cdot 10^6$  м/с]

B. [ $3,1 \cdot 10^6$  м/с;  $5,2 \cdot 10^6$  м/с;  $7,3 \cdot 10^6$  м/с]

C. [ $0,1 \cdot 10^6$  м/с;  $0,3 \cdot 10^6$  м/с;  $0,5 \cdot 10^6$  м/с]

D. [ $1,0 \cdot 10^6$  м/с;  $0,7 \cdot 10^6$  м/с;  $0,4 \cdot 10^6$  м/с].

4.3. Определите период обращения электрона на первой стационарной орбите в атоме водорода.

A. [ $1,43 \cdot 10^{-16}$  с]

B. [ $2,86 \cdot 10^{-16}$  с]

C. [ $4,86 \cdot 10^{-16}$  с]

D. [ $5,86 \cdot 10^{-16}$  с].

4.4. Определите угловую скорость электрона на первой стационарной орбите в атоме водорода.

A. [ $4,4 \cdot 10^{16}$  рад/с]

B. [ $5,6 \cdot 10^{16}$  рад/с]

C. [ $6,7 \cdot 10^{16}$  рад/с]

D. [ $7,8 \cdot 10^{16}$  рад/с].

4.5. Определите кинетическую, потенциальную и полную энергии электрона на первой стационарной орбите в атоме водорода.

A. [ $21,76 \cdot 10^{-19}$  Дж;  $- 43,52 \cdot 10^{-19}$  Дж;  $- 21,76 \cdot 10^{-19}$  Дж]

B. [ $- 21,76 \cdot 10^{-19}$  Дж;  $43,52 \cdot 10^{-19}$  Дж;  $21,76 \cdot 10^{-19}$  Дж]

C. [ $31,76 \cdot 10^{-19}$  Дж;  $41,75 \cdot 10^{-19}$  Дж;  $53,76 \cdot 10^{-19}$  Дж]

D. [ $21,76 \cdot 10^{-19}$  Дж;  $43,52 \cdot 10^{-19}$  Дж;  $21,76 \cdot 10^{-19}$  Дж].

4.6. Определите наибольшую и наименьшую длины волн в серии Лаймана.

A. [ $121,6$  нм;  $91,2$  нм]

B. [ $102,6$  нм;  $91,2$  нм]

C. [656,3 нм; 102,6 нм]

D. [434,0 нм; 121,6 нм].

4.7. Определите наибольшую и наименьшую частоты волн в серии Бальмера.

A. [ $0,82 \cdot 10^{15}$  Гц;  $0,45 \cdot 10^{15}$  Гц]

B. [ $3,29 \cdot 10^{15}$  Гц;  $2,46 \cdot 10^{15}$  Гц]

C. [ $3,29 \cdot 10^{15}$  Гц;  $0,82 \cdot 10^{15}$  Гц]

D. [ $2,46 \cdot 10^{15}$  Гц;  $0,82 \cdot 10^{15}$  Гц].

4.8. Определите потенциал ионизации и первый потенциал возбуждения атома водорода.

A. [13,6 В; 10,2 В]

B. [10,2 В; 13,6 В]

C. [21,1 В; 15,3 В]

D. [27,2 В; 20,4 В].

4.9. Максимальная длина волны спектральной линии в серии Лаймана равна 0,122 мкм. Полагая, что постоянная Ридберга неизвестна, определите максимальную длину волны в серии Бальмера.

A. [0,656 мкм]

B. [0,852 мкм]

C. [0,102 мкм]

D. [0,486 мкм].

4.10. 1) Какую наименьшую энергию (в электронвольтах) должны иметь электроны, чтобы при возбуждении атомов водорода ударами этих электронов появились все линии всех серий спектра водорода? 2) Какую наименьшую скорость должны иметь эти электроны?

A. [13,6 эВ;  $2,2 \cdot 10^6$  м/с]

B. [10,2 эВ;  $1,8 \cdot 10^6$  м/с]

C. [27,2 эВ;  $3,1 \cdot 10^6$  м/с]

D. [10,2 эВ;  $2,2 \cdot 10^6$  м/с].

4.11\*. Используя теорию Бора, определите орбитальный магнитный момент электрона, движущегося по первой орбите атома водорода.

A. [ $0,93 \cdot 10^{-23}$  А·м<sup>2</sup>]

B. [ $2,8 \cdot 10^{-23}$  А·м<sup>2</sup>]

C. [ $1,8 \cdot 10^{-23}$  А·м<sup>2</sup>]

D. [ $0,45 \cdot 10^{-23}$  А·м<sup>2</sup>].

4.12. Предполагая, что в опыте Франка и Герца вакуумная трубка наполнена не парами ртути, а разреженным атомарным водородом, определите, через какие интервалы ускоряющего потенциала возникнут максимумы на графике зависимости силы анодного тока от ускоряющего потенциала.

A. [10,2 В]

B. [4,9 В]

C. [13,6 В]

D. [9,8 В].

4.13\*. Атомарный водород освещается ультрафиолетовым излучением с длиной волны 100 нм. Определите, какие спектральные линии появятся в спектре излучения атомарного водорода.

A. [ $\lambda_{1,2} = 121,6$  нм;  $\lambda_{1,3} = 102,6$  нм;  $\lambda_{2,3} = 656,3$  нм]

B. [ $\lambda_{2,3} = 656,3$  нм;  $\lambda_{2,4} = 486$  нм;  $\lambda_{2,5} = 434$  нм]

C. [ $\lambda_{1,2} = 121,6$  нм;  $\lambda_{2,3} = 656,3$  нм;  $\lambda_{2,4} = 486$  нм]

D. [ $\lambda_{1,2} = 121,6$  нм;  $\lambda_{1,3} = 102,6$  нм;  $\lambda_{2,4} = 486$  нм].

4.14. В спектре излучения атомарного водорода интервал между двумя линиями, принадлежащими серии Бальмера, составляет  $1,71 \cdot 10^{-7}$  м. Определите с помощью этой величины постоянную Ридберга.

4.15. Основываясь на том, что энергия ионизации атома водорода равна 13,6 эВ, определите в электронвольтах энергию фотона, соответствующую самой длинноволновой линии серии Пашена.

A. [0,48 эВ]

B. [1,89 эВ]

C. [10,2 эВ]

D. [6,31 эВ].

## 5. Элементы квантовой механики

Основные формулы и законы.

Длина волны де Бройля  $\lambda = \frac{h}{p}$ , где  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$  – постоянная Планка,  $p$  – импульс частицы.

Связь импульса частицы с кинетической энергией  $T$  -  $p = \frac{\sqrt{T(T+2mc^2)}}{c}$ ,

где  $m$  – масса частицы. При малых скоростях  $p = \sqrt{2mT}$ .

Соотношение неопределенностей Гейзенберга  $\begin{cases} \Delta x \Delta p_x \geq \hbar/2 \\ \Delta y \Delta p_y \geq \hbar/2, \\ \Delta z \Delta p_z \geq \hbar/2 \end{cases}$

$\Delta E \Delta t \geq \hbar/2$ , где  $\Delta x, \Delta p, \Delta E, \Delta t$  – соответственно неопределенности координаты, импульса, энергии и времени,  $\hbar = h/2\pi$ .

Нестационарное уравнение Шредингера  $i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi + U\Psi$ .

Уравнение Шредингера для стационарных состояний  $\Delta \Psi + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U)\Psi = 0$ , где  $\Psi = \Psi(r, t)$  – волновая функция микрочастицы,  $E$  – полная энергия микрочастицы,  $U = U(x, y, z)$  – потенциальная энергия частицы,  $\vec{r}$  – пространственная координата ( $\vec{r} = \vec{r}(x, y, z)$ ),  $t$  – время,  $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$  – оператор Лапласа (записан в декартовых координатах),  $m$  – масса микрочастицы,  $\hbar$  – постоянная Планка,  $i = \sqrt{-1}$  – мнимая единица.

Одномерное уравнение Шредингера для стационарных состояний  $\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U)\Psi(x) = 0$ .

Условие нормировки волновой функции  $\int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi(x)|^2 dx = 1$  ( $\int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi(\vec{r})|^2 dV = 1$ ).

Плотность вероятности  $\frac{dW(x)}{dx} = |\Psi(x)|^2$  ( $\frac{dW(\vec{r})}{dV} = |\Psi(\vec{r})|^2$ ), где  $dW(x)$  – вероятность того, что частица может быть обнаружена вблизи точки с координатой  $x$  на участке  $dx$ .

Вероятность обнаружения частицы в интервале от  $x_1$  до  $x_2$   $W = \int_{x_1}^{x_2} |\Psi(x)|^2 dx$ .

Решение уравнения Шредингера для одномерного, бесконечно глубокого, прямоугольного потенциального ящика шириной  $l$  ( $0 \leq x \leq l$ )  $\Psi(x) = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin \frac{\pi n}{l} x$  (собственная нормированная волновая функция)  $E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{2ml^2}$  (собственное значение энергии), где  $n$  – главное квантовое число ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ).

В области  $0 \leq x \leq l$   $U = \infty$  и  $\Psi(x) = 0$ .

Коэффициент прозрачности прямоугольного потенциального барьера  $D = D_o \exp \left[ -\frac{2}{\hbar} \sqrt{2m(U - E)} l \right]$ , где  $D_o$  – коэффициент прозрачности барьера (коэффициент прохождения).

Энергия квантового осциллятора  $E = (n + \frac{1}{2}) \hbar \omega$ , где  $n$  – главное квантовое число ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ),  $\omega$  – циклическая частота.

Для частиц с целочисленными спинами (бозонов) справедлива статистика Бозе-Эйнштейна, а для частиц с полужелыми спинами (фермионов) справедлива статистика Ферми-Дирака. Обобщенное уравнение для квантовых статистик  $\langle N_i \rangle = \frac{1}{e^{(E_i - \mu)/(kT)} \pm 1}$ , где  $\langle N_i \rangle$  – среднее число частиц в состоянии с номером  $i$ ,  $E_i$  – энергия частицы в этом состоянии;  $\mu$  – так называемый химический потенциал, определяемый из условия  $\sum \langle N_i \rangle = N$ , т. е. сумма всех частиц равна полному числу  $N$  частиц в системе, знак минус (-) перед единицей

в знаменателе соответствует статистике бозонов (распределению Бозе-Эйнштейна, а знак плюс (+) соответствует статистике фермионов (распределению Ферми - Дирака).

#### Задания.

5.1. Вычислите длину волны де Бройля для протона, прошедшего разность потенциалов  $U = 10$  В.

- A. [9,1 пм]
- B. [91 пм]
- C. [0,91 пм]
- D. [4,55 нм].

5.2. При какой скорости электрона дебройлевская длина волны будет равна:  
а) 500 нм; б) 0,1 нм? (В случае электромагнитных волн первая длина волны соответствует видимой части спектра, вторая – рентгеновским лучам).

- A. [ $1,46 \cdot 10^3$  м/с;  $0,73 \cdot 10^7$  м/с]
- B. [ $0,73 \cdot 10^3$  м/с;  $1,46 \cdot 10^7$  м/с]
- C. [ $2,92 \cdot 10^3$  м/с;  $1,46 \cdot 10^7$  м/с]
- D. [ $1,46 \cdot 10^7$  м/с;  $2,92 \cdot 10^3$  м/с].

5.3. Кинетическая энергия электрона равна удвоенному значению его энергии покоя. Вычислите длину волны де Бройля для такого электрона.

- A. [86 пм]
- B. [43 пм]
- C. [172 пм]
- D. [344 пм].

5.4. На грань кристалла никеля падает под углом  $64^\circ$  к поверхности грани параллельный пучок электронов, движущихся с одинаковой скоростью. Принимая расстояние между атомными плоскостями кристалла равным 200 пм,

определите скорость электронов, если они испытывают дифракционное отражение первого порядка.

- A. [2 Мм/с]
- B. [1 Мм/с]
- C. [0,5 Мм/с]
- D. [4 Мм/с].

5.5 Скорость протона составляет  $(8,880 \pm 0,012) \cdot 10^5$  м/с. С какой максимальной точностью можно измерить его положение?

- A. [13 пм]
- B. [26 пм]
- C. [65 пм]
- D. [40 пм].

5.6. Исходя из того, что радиус атома имеет величину порядка 0,1 нм, оцените скорость движения электрона в атоме водорода.

- A. [ $\Delta v = 5,8 \cdot 10^5$  м/с;  $v \sim 10^6$  м/с]
- B. [ $\Delta v = 5,8 \cdot 10^6$  м/с;  $v \sim 10^7$  м/с]
- C. [ $\Delta v = 5,8 \cdot 10^4$  м/с;  $v \sim 10^5$  м/с]
- D. [ $\Delta v = 11,6 \cdot 10^6$  м/с;  $v \sim 10^7$  м/с].

5.7. Пуля массой 12 г вылетает из ружейного ствола со скоростью 450 м/с. Положение пули известно с точностью до 0,55 см (радиус ствола). Какая длина волны соответствует пуле и чему равна минимальная определенность ее скорости?

- A. [ $1,2 \cdot 10^{-34}$  м;  $8 \cdot 10^{-31}$  м/с]
- B. [ $1,2 \cdot 10^{-31}$  м;  $8 \cdot 10^{-34}$  м/с]
- C. [ $6 \cdot 10^{-34}$  м;  $1,6 \cdot 10^{-31}$  м/с]
- D. [ $2,4 \cdot 10^{-34}$  м;  $10^{-32}$  м/с].

5.8\*. Длина волны излучаемого атомом водорода фотона равна 121,6 нм. Принимая время жизни возбужденного состояния  $\Delta t = 10^{-8}$  с, определите отношение естественной ширины энергетического уровня, на который был возбужден электрон, к энергии, излученной атомом.

A.  $[\frac{\Delta E}{E} = 3 \cdot 10^{-9}]$

B.  $[\frac{\Delta E}{E} = 3 \cdot 10^{-7}]$

C.  $[\frac{\Delta E}{E} = 3 \cdot 10^{-5}]$

D.  $[\frac{\Delta E}{E} = 5 \cdot 10^{-6}]$ .

5.9. Волновая функция, описывающая движение электрона в основном состоянии атома водорода, имеет вид:  $\Psi(r) = Ae^{-r/a_0}$ , где  $A$  – нормировочный коэффициент волновой функции,  $r$  – расстояние электрона от ядра,  $a_0$  – первый боровский радиус. Определите наиболее вероятное расстояние электрона от ядра в основном состоянии.

A.  $[a_0]$

B.  $[a_0/2]$

C.  $[2a_0]$

D.  $[a_0/\sqrt{2}]$ .

5.10\*. Волновая функция, описывающая движение микрочастицы, имеет вид:  $\Psi(r) = \frac{A}{r} e^{-r/a}$ , где  $A$  – нормировочный коэффициент волновой функции,  $r$  – расстояние этой частицы до силового центра,  $a$  – некоторая постоянная, имеющая размерность длины. Определите среднее расстояние  $\langle r \rangle$  частицы от силового центра.

A.  $[\langle r \rangle = \frac{a}{2}]$

B.  $[\langle r \rangle = \sqrt{3}a]$

C.  $[\langle r \rangle = 2a]$

D.  $[\langle r \rangle = \sqrt{2}a]$ .

5.11. Запишите стационарное уравнение Шредингера для свободной частицы, которая движется вдоль оси  $x$ , а также определите посредством его решения собственные значения энергии. Что можно сказать об энергетическом спектре свободной частицы?

A.  $[E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}, \text{ спектр непрерывный}]$

B.  $[E_n = n\hbar\omega, \text{ спектр дискретный}]$

C.  $[E_n = (n + \frac{1}{2})\hbar\omega, \text{ спектр дискретный}]$

D.  $[E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{2ml^2}, \text{ спектр дискретный}]$ .

5.12. Электрон в бесконечно глубоком одномерном прямоугольном потенциальном ящике находится в основном состоянии. Какова вероятность обнаружения электрона в средней трети ящика?

A. [0,609]

B. [0,5]

C. [0,195]

D. [0,091].

5.13. Волновая функция  $\Psi(x) = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin \frac{\pi}{l} x$  описывает основное состояние частицы в бесконечно глубоком прямоугольном потенциальном ящике шириной  $l$ . Вычислите вероятность нахождения частицы в малом интервале  $\Delta l = 0,2l$  в двух случаях: 1) вблизи стенки ( $0 \leq x \leq \Delta l$ ); 2) в средней части ящика ( $l/2 - \Delta l/2 \leq x \leq l/2 + \Delta l/2$ ).

A. [0,052; 0,4]

B. [0,026; 0,2]

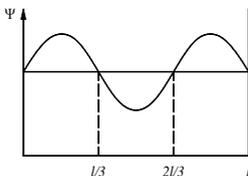
C. [0,1; 0,4]

D. [0,052; 0,8].

5.14. Электрон находится в бесконечно глубоком одномерном прямоугольном потенциальном ящике шириной  $l$ . Вычислите наименьшую разность энергий двух соседних энергетических уровней (в электронвольтах) электрона в двух случаях: 1)  $l = 1$  мкм; 2)  $l = 0,1$  нм.

- A. [ $1,1 \cdot 10^{-12}$  эВ; 110 эВ]
- B. [ $1,1 \cdot 10^{-16}$  эВ; 1,1 эВ]
- C. [ $0,55 \cdot 10^{-13}$  эВ; 55 эВ]
- D. [ $5,5 \cdot 10^{-12}$  эВ; 1,1 эВ].

5.15. Вероятность обнаружить частицу на участке (a, b) одномерного потенциального ящика с бесконечно высокими стенками вычисляется по формуле  $W = \int_a^b |\Psi(x)|^2 dx$ . Если  $\Psi$  - функция имеет вид, указанный на рисунке справа, то вероятность обнаружить частицу на участке  $l/6 \leq x \leq 5l/6$ , где  $l$  – ширина ящика, равна.



- A. [2/3]
- B. [1/3]
- C. [4/3]
- D. [5/6].

5.16. Пучок электронов с энергией  $E = 15$  эВ встречает на своем пути потенциальный барьер высотой  $U = 20$  В и шириной  $l = 0,1$  нм. Определите коэффициент прозрачности потенциального барьера (коэффициент прохождения)  $D$  и коэффициент отражения  $R$  электронов от барьера ( $R + D = 1$ ).

- A. [ $D = 0,1$ ;  $R = 0,9$ ]
- B. [ $D = 0,9$ ;  $R = 0,1$ ]

C. [D = 0,5; R = 0,5]

D. [D = 0,2; R = 0,8].

5.17. Частица массой  $m$  движется в одномерном потенциальном поле  $U(x) = \frac{kx^2}{2}$  (гармонический осциллятор). Собственная волновая функция основного состояния гармонического осциллятора имеет вид  $\Psi(r) = Ae^{-ax^2}$ , где  $A$  – нормировочный коэффициент;  $a$  – положительная постоянная. Используя уравнение Шредингера, определите: 1) постоянную  $a$ ; 2) энергию частицы в этом состоянии.

A. [ $a = \frac{m\omega}{2\hbar}$ ;  $E_0 = \frac{\hbar\omega}{2}$ ]

B. [ $a = \frac{m\omega}{\hbar}$ ;  $E_0 = \frac{\hbar\omega}{2}$ ]

C. [ $a = \frac{m\omega}{2\hbar}$ ;  $E_0 = \hbar\omega$ ]

D. [ $a = \frac{m\omega}{\hbar}$ ;  $E_0 = 2\hbar\omega$ ].

5.18. Покажите, что при  $kT \gg E_i$  (малом параметре вырождения) квантовые распределения Бозе-Эйнштейна и Ферми-Дирака переходят в классическое распределение Максвелла – Больцмана, то есть бозонный и фермионный газы приобретают свойства классического идеального газа.

A. [ $e^{\frac{\mu}{kT}} \approx A \ll 1$ ;  $\langle N_i \rangle = A e^{\frac{-E_i}{kT}}$ ].

5.19. Для каких квантовых частиц характерна знаковая неоднозначность волновой функции и какие значения спина имеют эти частицы?

A. [фермионов; имеют полуцелые значения спина]

B. [бозонов; имеют целые значения спина].

5.20. Для каких квантовых частиц характерна знаковая однозначность волновой функции и какие значения спина имеют эти частицы?

А. [бозонов; имеют целочисленные значения спина]

В. [фермионов; имеют полуцелочисленные значения спина].

## 6. Квантовые свойства атомов, молекул и твердых тел

### Основные формулы и законы.

Волновые функции связанных состояний ( $E < 0$ ) атома водорода имеют вид:  $\Psi_{n,l,m}(r, \theta, \phi) = R_{n,l}(r)Y_{l,m}(\theta, \phi)$ , где  $n$  – главное квантовое число ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ),  $l$  – орбитальное (азимутальное) квантовое число ( $l = 0, 1, 2, \dots, (n - 1)$ ),  $m$  – магнитное квантовое число ( $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$ ),  $R_{n,l}(r)$  – радиальные функции, а  $Y_{l,m}(\theta, \phi)$  – сферические функции.

Квантовые числа  $n, l, m$  являются характеристиками микросостояния частицы, в том числе и электрона в атоме водорода, и появляются при решении нерелятивистского уравнения Шредингера.

Квантовое магнитное спиновое число  $m_s$  ( $m_s = \pm 1/2$ ) электрона появляется лишь при решении релятивистского уравнения Дирака, т. е. спин является релятивистской характеристикой.

Принцип Паули: в атоме два электрона не могут находиться в одном и том же квантовом состоянии (определяемом набором четырех квантовых чисел  $n, l, m, m_s$ ).

Электронная конфигурация атома в основном состоянии  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} \dots$ , где числа ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) соответствуют главному квантовому числу, которое задает электронные слои (оболочки) K, L, M, N, ..., а буквы латинского алфавита s, p, d, f соответствуют орбитальному квантовому числу ( $l = 0, 1, 2, 3$ ), которое задает s, p, d, f – состояния (электронные подоболочки) атома, числа над s, p, d, f соответствуют числу электронов в соответствующих состояниях.

Закон Мозли  $\nu = R(z - \sigma)^2 \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ , где  $\nu$  – характеристические частоты спектра;  $R = 3,29 \cdot 10^{15}$  1/с – постоянная Ридберга;  $z$  – заряд ядра атома в отно-

сительных единицах;  $\sigma$  - постоянная экранирования;  $m$  и  $n$  - квантовые числа, соответствующие энергетическим уровням, между которыми совершается переход электрона в атоме.

При  $\sigma = 0$  формула закона Мозли обращается в формулу, описывающую линейчатые спектры водородоподобных атомов  $\nu = Rz^2 \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ .

При  $\sigma = 0$  и  $z = 1$  формула закона Мозли совпадает с обобщенной формулой Бальмера для линейчатого спектра атома водорода.

Частоты излученного или поглощенного электромагнитного кванта молекулярного спектра  $\nu = \frac{1}{h} (\Delta W_{\text{эл.}} + \Delta W_{\text{кол.}} + \Delta W_{\text{вр.}})$ , где  $\Delta W_{\text{эл.}}$ ,  $\Delta W_{\text{кол.}}$  и  $\Delta W_{\text{вр.}}$  - разности энергий двух соответственно электронных, колебательных и вращательных уровней.

Средняя энергия квантового одномерного осциллятора  $\langle E \rangle = E_0 + \frac{\hbar\omega}{e^{\hbar\omega/kT} - 1}$ , где  $E_0 = \frac{1}{2}\hbar\omega$  - нулевая энергия;  $\hbar$  - постоянная Планка;  $\omega$  - круговая частота колебаний осциллятора;  $k$  - постоянная Больцмана;  $T$  - термодинамическая температура.

Молярная внутренняя энергия системы, состоящей из невзаимодействующих квантовых осцилляторов  $E_m^{\text{вн.}} = \frac{3}{2}R\theta_E + \frac{3R\theta_E}{e^{\frac{\theta_E}{T}} - 1}$ , где  $R$  - молярная газовая постоянная;  $\theta_E = \frac{\hbar\omega}{k}$  - характеристическая температура Эйнштейна.

Молярная теплоемкость кристаллического твердого тела в области низких температур (предельный закон Дебая)  $C_m = \frac{12\pi^4}{5} R \left( \frac{T}{\theta_D} \right)^3 = 234R \left( \frac{T}{\theta_D} \right)^3$  ( $T \ll \theta_D$ ), где  $\theta_D = \frac{\hbar\omega_{\text{max}}}{k}$  - характеристическая температура Дебая.

Распределение свободных электронов в металле по энергиям при 0 К  $dn(E) = \frac{dV(E)}{V} = \frac{1}{2\pi^2} \left( \frac{2m}{\hbar^2} \right)^{3/2} E^{1/2} dE$ , где  $dn(E)$  - концентрация электронов, энергия которых заключена в пределах от  $E$  до  $E + dE$ ;  $m$  - масса электрона. Это выражение справедливо при  $E < E_F$  ( $E_F$  - энергия или уровень Ферми).

Энергия Ферми в металле при  $T = 0$  К  $E_F(0) = \frac{\hbar^2}{2m} (3\pi^2 n)^{2/3}$ , где  $n$  – концентрация электронов в металле.

$$\text{Средняя энергия электронов } \langle E \rangle = \frac{3E_F}{5}.$$

Удельная проводимость собственных полупроводников  $\gamma = \gamma_0 \exp(-\Delta E/2kT)$ , где  $\Delta E$  – ширина запрещенной зоны;  $\gamma_0$  – константа.

Сила тока в р-п – переходе  $I = I_0(\exp(eU/kT) - 1)$ , где  $I_0$  – предельное значение силы обратного тока;  $U$  – внешнее напряжение, приложенное к р-п – переходу.

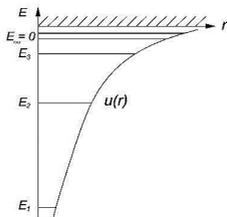
Связь между глубиной  $u$  потенциальной ямы и работой выхода  $A$  из металла и полупроводника  $U = E_{max}$ , где  $E_{max}$  – максимальная энергия электрона в яме.

Внутренняя контактная разность потенциалов  $U_{12} = \frac{E_{F1} - E_{F2}}{e}$ , где  $E_{F1}$  и  $E_{F2}$  – энергия Ферми соответственно для первого и второго металла или полупроводника;  $e$  – заряд электрона.

### Задания.

6.1. Уравнение Шредингера для стационарных состояний электрона, находящегося в атоме водорода, задается в декартовых координатах уравнением  $\Delta\Psi + \frac{2m}{\hbar} \left( E - \frac{e}{4\pi\epsilon_0 r} \right) \Psi = 0$ . Представьте: 1) собственные значения энергии, удовлетворяющие уравнению; 2) график потенциальной энергии взаимодействия электрона с ядром; 3) возможные дискретные значения энергии на этом графике. 1)

$$E_n = \frac{me^4}{32\pi^2\epsilon_0^2\hbar^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots; \quad 2) \text{ смотрите рисунок; } 3) \text{ смотрите рисунок.}$$

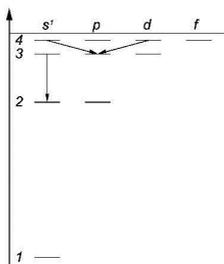


6.2. От каких квантовых чисел зависят соответственно радиальная  $R(r)$  и сферическая  $Y(\theta, \varphi)$  функции, входящие в волновую функцию связанных состояний атома водорода?

- A.  $[n, l, m]$
- B.  $[n, m, l, m_s]$
- C.  $[n, m_s, l, n]$ .

6.3. На рисунке справа схематически представлена система энергетических уровней атома водорода. Правилами отбора запрещены переходы:

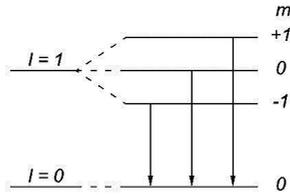
- A.  $[3s \rightarrow 2s]$
- B.  $[4s \rightarrow 3p]$
- C.  $[2p \rightarrow 2s]$
- D.  $[4f \rightarrow 3p]$ .



6.4. Пользуясь условными обозначениями состояний электрона в атоме водорода, запишите переходы, приводящие к возникновению серии Бальмера.

- A.  $[ns \rightarrow 2p; nd \rightarrow 2p]$  ( $n = 3, 4, \dots$ )
- B.  $[np \rightarrow 1s]$  ( $n = 2, 3, \dots$ )
- C.  $[nf \rightarrow 3d]$  ( $n = 4, 5, \dots$ ).

6.5. Постройте и объясните диаграмму, иллюстрирующую расщепление энергетических уровней и спектральных линий (с учетом правил отбора) при переходах между состояниями с  $l = 1$  и  $l = 2$ .  $p$  – состояние:  $l = 1, m = 0, \pm 1$ ;  $s$  – состояние:  $l = 0, m = 0$ ;  $\Delta l = \pm 1, \Delta m = 0, \pm 1$ .



6.6. Нормированная волновая функция, описывающая  $1s$  – состояние электрона в атоме водорода, имеет вид  $\Psi_{1,0,0} = \frac{1}{\sqrt{\pi a_0^3}} e^{-r/a_0}$ , где  $a_0$  – первый боровский радиус. Определите среднюю потенциальную энергию электрона в поле ядра. [ $\langle U \rangle = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{a_0} = -27,2$  эВ].

6.7. Определите, во сколько раз орбитальный момент импульса электрона, находящегося в  $d$  – состоянии, больше, чем для электрона в  $p$  – состоянии.

- A. [1,73]
- B. [2,43]
- C. [ $\infty$ ]
- D. [3,33].

6.8. Запишите электронную конфигурацию атома фосфора с вакансией в  $2p$  – подоболочке.

- A. [ $1s^2 2s^2 2p^5 3s^2 3p^3$ ]
- B. [ $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$ ]
- C. [ $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1 3p^3$ ].

6.9. Запишите квантовые числа, определяющие внешний, или валентный, электрон в основном состоянии атома алюминия.

- A. [ $n = 3, l = 1, m = 0, \pm 1; m_s = \pm 1/2$ ]
- B. [ $n = 3, l = 0, m = 0; m_s = \pm 1/2$ ].

6.10. Определите наименьшую длину волны рентгеновского излучения, если рентгеновская трубка работает при напряжении  $U = 30$  кВ.

A. [41,3 пм]

B. [20,6 пм]

C. [10,3 пм]

D. [8,3 пм].

6.11. Считая, что формула закона Мозли с достаточной степенью точности дает связь между характеристическими частотами рентгеновского спектра и порядковым номером элемента, из которого сделан антикатод, найдите наибольшую длину волны К-серии рентгеновских лучей, даваемых трубкой с антикатодом из: 1) железа, 2) меди, 3) молибдена, 4) серебра, 5) тантала, 6) вольфрама, 7) платины. Для К – серии постоянная экранирования  $\sigma = 1$ .

[1) 194 пм; 2) 154 пм; 3) 71,2 пм; 4) 56,3 пм; 5) 22 пм; 6) 21,4 пм; 7) 19 пм]

6.12. Определите постоянную экранирования для L – серии рентгеновских лучей, если известно, что при переходе электрона в атоме вольфрама с M – на L – слой испускаются рентгеновские лучи с длиной волны 143 пм.

A. [ $\sigma = 5,5$ ]

B. [ $\sigma = 0$ ]

C. [ $\sigma = 1$ ]

D. [ $\sigma = 0,5$ ].

6.13. Определите порядковый номер элемента в периодической системе элементов Д.И. Менделеева, если граничная (наибольшая) частота К – серии характеристического рентгеновского излучения составляет  $5,55 \cdot 10^{18}$  Гц.

A. [ $z = 42$ , молибден]

B. [ $z = 56$ , барий].

6.14. При переходе электрона в атоме с L – на K – оболочку испускаются рентгеновские лучи с длиной волны 78,8 пм. Какой это атом? Для K – серии постоянная экранирования  $\sigma = 1$ .

A. [ $z = 40$ , цирконий]

B. [ $z = 53$ , йод]

C. [ $z = 30$ , цинк].

6.15. В излучении звезды обнаружен водородоподобный спектр, длины волн которого в 4 раза меньше, чем у атомарного водорода. Определите элемент, которому принадлежит данный спектр.

A. [ $z = 2$ , гелий]

B. [ $z = 3$ , литий]

C. [ $z = 4$ , бериллий].

6.16. Молекулярные спектры состоят из трех видов полос: 1) вращательных; 2) колебательно-вращательных и 3) электронно-колебательных, которые в свою очередь состоят из большого числа тесно расположенных линий. В эксперименте и в теории проявляется значительное различие в разности энергий двух соответственно электронных, колебательных и вращательных уровней, между которыми разрешены переходы электрона в соответствии с правилами отбора, причем  $\Delta W_{\text{эл.}} > \Delta W_{\text{кол.}} > \Delta W_{\text{вр.}}$ . Определите, какие полосы будут наблюдаться соответственно на 1) длинноволновой и 2) коротковолновой границах молекулярного спектра при возбуждении всех приведенных выше полос полосатого спектра молекулы.

A. [1) вращательные; 2) электронно-колебательные]

B. [1) колебательно-вращательные; 2) электронно-колебательные]

C. [1) вращательные; 2) колебательно-вращательные].

6.17. Высокая монохроматичность лазерного излучения обусловлена относительно большим временем жизни электронов в метастабильном состоянии ~

$10^{-3}$  с. Учитывая, что постоянная Планка  $h = 0,66 \cdot 10^{-15}$  эВ, определите ширину метастабильного уровня.

A.  $[0,33 \cdot 10^{-12}$  эВ]

B.  $[1,5 \cdot 10^{-12}$  эВ]

C.  $[0,33 \cdot 10^{-18}$  эВ]

D.  $[1,5 \cdot 10^{-18}$  эВ].

6.18. Система, состоящая из  $N = 10^{20}$  трехмерных осцилляторов, находится при температуре  $T = \theta_E$  ( $\theta_E = 250$  К). Определить энергию системы.

A. [1,49 Дж]

B. [0,49 Дж]

C. [2,49 Дж]

D. [1,20 Дж].

6.19. Используя квантовую теорию теплоемкости Эйнштейна, определите удельную теплоемкость при постоянном объеме алюминия при температуре 200 К. Характеристическую температуру Эйнштейна принять для алюминия равной 300 К.

A. [770 Дж/кг·К]

B. [257 Дж/кг·К]

C. [1540 Дж/кг·К].

6.20. Определите теплоту, необходимую для нагревания кристалла калия массой 200 г от температуры  $T_1 = 4$  К до температуры  $T_2 = 5$  К. Принять характеристическую температуру Дебая для калия  $\theta_D = 100$  К и считать условие  $T \ll \theta_D$  выполненным.

A. [0,92 Дж]

B. [1,84 Дж]

C. [0,31 Дж]

D. [9,2 Дж].

6.21. Определите в электронвольтах максимальную энергию фонона, который может возбуждаться в кристалле калия, характеризуемом температурой Дебая  $\theta_D = 100$  К.

- A. [0,0086 эВ]
- B. [0,025 эВ]
- C. [0,03 эВ]
- D. [0,0043 эВ].

6.22. Оцените среднюю энергию свободных электронов в металлах при абсолютном нуле температур, если средняя концентрация электронов проводимости в металлах составляет  $5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ .

- A. [3 эВ]
- B. [5 эВ]
- C. [6 эВ]
- D. [9 эВ].

6.23. Металлы литий и цинк приводят в соприкосновение друг с другом при температуре  $T = 0$  К. Чему будет равна возникающая контактная разность потенциалов? Какой из этих металлов будет иметь более высокий потенциал? ( $\rho_{\text{Li}} = 0,53 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho_{\text{Zn}} = 7,15 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ).

- A. [ $U_{12} = 0,8$  В; Li]
- B. [ $U_{12} = 0,01$  В; Zn]
- C. [ $U_{12} = 8$  В; Li]
- D. [ $U_{12} = 0,1$  В; Zn].

6.24. Докажите, что уровень Ферми в собственном полупроводнике действительно расположен в середине запрещенной зоны.

- A. [ $E_F = \frac{\Delta E}{2}$ ]
- B. [ $E_F = \frac{\Delta E}{4}$ ]
- C. [ $E_F = \frac{\Delta E}{3}$ ].

6.25. Кремниевый образец, ширина  $\Delta E$  запрещенной зоны в котором равна 1,1 эВ, нагревают от температуры  $t_1 = 0$  °С до температуры  $t_2 = 10$  °С. Во сколько раз возрастает его удельная проводимость  $\gamma$ ?

A. [в 2,28]

B. [в 0,23]

C. [в 22,8]

D. [в 1,14].

6.26. При нагревании германиевого кристалла от температуры 0 °С до температуры 10 °С его удельная проводимость возрастает в 1,49 раза. По приведенным данным определите ширину запрещенной зоны кристалла германия.

A. [0,72 эВ]

B. [1,1 эВ]

C. [1,5 эВ]

D. [4,7 эВ].

6.27. Предположим, что р-п – переход находится при 0 °С и при прямом напряжении 0,1 В, а его сопротивление равно 10 Ом. Каково сопротивление перехода, если поменять полярность напряжения?

A. [692 Ом]

B. [6920 Ом]

C. [69,2 Ом]

D. [138,4 Ом].

6.28. Прямое напряжение, приложенное к р-п – переходу, равно 0,1 В. Во сколько раз возрастет сила тока через переход, если изменить температуру от  $T_1 = 300$  К до  $T_2 = 273$  К?

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{[\exp(4,237)-1]}{[\exp(4,14)-1]} = 1,1$$

6.29. Глубина потенциальной ямы  $U$  металла составляет 10 эВ, а максимальная энергия электрона  $E_{\max}$ , отсчитанная от дна ямы, равна 6 эВ. Определите уровень Ферми  $E_F$  и работу выхода  $A$  электрона в этом металле.

А. [ $E_F = 6$  эВ;  $A = 4$  эВ]

В. [ $E_F = 4$  эВ;  $A = 6$  эВ]

С. [ $E_F = 3$  эВ;  $A = 2$  эВ].

6.30. На рисунке изображены зонные схемы полупроводников разного типа проводимости. Какая схема соответствует полупроводникам  $p$  – типа и  $n$  – типа примесной проводимости и собственной проводимости.

А. [с, b, a]

В. [a, b, c]

С. [b, a, c]

Д. [с, a, b].

## 7. Элементы физики атомного ядра

Основные формулы и законы.

Массовое число ядра (число нуклонов в ядре)  $A = Z + N$ , где  $Z$  – зарядовое число (число протонов);  $N$  – число нейтронов.

Радиус ядра с массовым числом  $A$  равен  $R = 1,23 \cdot 10^{-15} A^{1/3}$  м.

Дефект массы ядра  $\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - \frac{A}{2}m_{\alpha}$  где  $m_p$ ,  $m_n$  и  $\frac{A}{2}m_{\alpha}$  – соответственно масса протона, нейтрона и ядра.

Если взять не массу ядра  $\frac{A}{2}m_{\alpha}$ , а массу атома (изотопа)  $\frac{A}{2}m$  и вместо массы протона массу атома водорода  $\frac{1}{2}m_H$ , то  $\Delta m = Z\frac{1}{2}m_H + (A - Z)m_n - \frac{A}{2}m$ .

Энергия связи и удельная энергия связи  $E_{\text{св}} = \Delta mc^2$ ,  $E_{\text{уд}} = E_{\text{св}}/A$ .

Если массы измерять в а.е.м., то  $E_{\text{св}} = 931\Delta m$  (МэВ), так как  $1 \text{ а.е.м.} \cdot c^2 = 931,5 \text{ МэВ}$ .

Закон радиоактивного распада  $dN = -\lambda N dt$  или  $N = N_0 e^{-\lambda t}$ , где  $dN$  - число ядер, распадающихся за время  $dt$ ;  $N$  - число ядер, не распавшихся к моменту времени  $t$ ;  $N_0$  - число ядер в начальный момент времени ( $t = 0$ );  $\lambda$  - постоянная радиоактивного распада.

$$\text{Период полураспада } T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}.$$

Среднее время жизни радиоактивного ядра  $\tau = 1/\lambda$

Активность радиоактивного изотопа  $A = -dN/dt = \lambda N$  или  $A = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t}$ .

Правила смещения для  $\alpha$  - распада  ${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + {}^4_2 \text{He}$ .

Правила смещения для  $\beta^-$  - распада  ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + {}^0_{-1} e + {}^0_0 \bar{\nu}_e$ .

Правила смещения для  $\beta^+$  - распада  ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + {}^0_{+1} e + {}^0_0 \nu$ .

Энергетический эффект ядерной реакции (в МэВ)  $Q = 931,5 [\sum m_i - \sum m_j]$ , где  $\sum m_i$  - сумма масс (в а.е.м.) исходных реагентов,  $\sum m_j$  - сумма масс (в а.е.м.) продуктов реакции.

Основные дозиметрические величины:

Поглощенная доза излучения  $D_n = \Delta E_{\text{погл}}/m$ ;

Экспозиционная доза  $D_3 = q/m$  ( $1 \text{ p} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$ ).

Биологический эквивалент рентгена ( $1 \text{ бэр} = 10^{-9} \text{ Дж/кг}$ ).

Мощность дозы излучения  $P_n = D_n/\Delta t$  или  $P_3 = D_3/\Delta t$ , где  $\Delta t$  - длительность облучения.

### Задания.

7.1. Определите плотность частиц (нуклонов) ядерного вещества, выражаемую числом нуклонов в  $1 \text{ см}^3$ , если в ядре с массовым числом  $A$  все нуклоны плотно упакованы в пределах его радиуса. Используя вычисленную плотность частиц ядерного вещества, определите плотность массы нейтронной звезды, если все нейтроны плотно упакованы в пределах всего объема звезды ( $m_n = 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ ). [ $8,7 \cdot 10^{37} \text{ см}^{-3}$ ;  $1,46 \cdot 10^{17} \text{ кг/м}^3$ ].

7.2. Определите энергию и удельную энергию связи для ядер изотопов 1) гелия: а)  ${}^4_2\text{He}$ ; б)  ${}^3_2\text{He}$ ; 2) урана: а)  ${}^{235}_{92}\text{U}$ ; б)  ${}^{238}_{92}\text{U}$ . Какие выводы можно сделать на основе вычисленных значений энергии и удельной энергии связи?

1) [28,4 МэВ; 7,1 МэВ/нуклон; 7,8 МэВ; 2,6 МэВ/нуклон]

2) [1786 МэВ; 7,6 МэВ/нуклон; 1804 МэВ; 7,58 МэВ/нуклон].

7.3. Определите удельную энергию связи для ядер: 1) дейтерия  ${}^2_1\text{D}$ ; 2) гелия  ${}^4_2\text{He}$ ; 3) лития  ${}^7_3\text{Li}$ ; 4) кислорода  ${}^{16}_8\text{O}$ ; 5) алюминия  ${}^{27}_{13}\text{Al}$ ; 6) железа  ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ ; 7) ксенона  ${}^{131}_{54}\text{Xe}$ ; 8) золота  ${}^{198}_{79}\text{Au}$ ; 9) урана  ${}^{238}_{92}\text{U}$ ; 10) Изобразите графически зависимость удельной энергии связи  $E_{\text{уд}}$  от массового числа  $A$ .

[1,11 МэВ/нуклон; 2) 7,08 МэВ/нуклон; 3) 5,61 МэВ/нуклон; 4) 7,98 МэВ/нуклон; 5) 9,34 МэВ/нуклон; 6) 9,30 МэВ/нуклон; 7) 9,40 МэВ/нуклон; 8) 7,92 МэВ/нуклон; 9) 7,58 МэВ/нуклон]

Примечание: для решения задач 7.2 и 7.3 используйте массы протона и нейтрона (в а.е.м.):  $m_p = 1,00728$ ;  $m_n = 1,00867$ , а также используйте ниже-приведенную таблицу.

Изотоп	Масса (а.е.м.)	Изотоп	Масса (а.е.м.)	Изотоп	Масса (а.е.м.)
${}^1_1\text{H}$	1,00814	${}^7_3\text{Li}$	7,01823	${}^{131}_{54}\text{Xe}$	130,94662
${}^2_1\text{D}$	2,01740	${}^{16}_8\text{O}$	15,99491	${}^{198}_{79}\text{Au}$	198,03048
${}^3_2\text{He}$	3,01699	${}^{27}_{13}\text{Al}$	25,99008	${}^{235}_{92}\text{U}$	235,11750
${}^4_2\text{He}$	4,00387	${}^{56}_{26}\text{Fe}$	5,92264	${}^{238}_{92}\text{U}$	238,12522

7.4. Зная постоянную распада  $\lambda$  ядра, определите вероятность  $W$  того, что ядро распадается за промежуток времени от 0 до  $t$ .

$$[W = \Delta N/N_0 = 1 - e^{-\lambda t}].$$

7.5. Период полураспада некоторого радиоактивного изотопа  $T_{1/2} = 2$  с. Определить вероятность  $W$  того, что ядро не распадется на промежутке  $t$ , равном 10 с.

A.  $[W = \Delta N/N_0 = e^{-\lambda t} = 0,31]$

B.  $[W = \Delta N/N_0 = e^{-\lambda t} = 0,62].$

7.6\*. Определите, сколько ядер в  $m_0 = 5$  мг радиоизотопа церия  ${}^{144}_{58}\text{Ce}$  распадается в течение промежутков времени: 1)  $\Delta t = 1$  с; 2)  $\Delta t = 1$  год. Период полураспада радиоизотопа церия  ${}^{144}_{58}\text{Ce}$   $T = 285$  суток.

A.  $[1) 6 \cdot 10^{11}; 2) 1,25 \cdot 10^{19}]$

B.  $[1) 1,25 \cdot 10^{11}; 2) 6 \cdot 10^{19}].$

7.7. Образец содержит 1000 радиоактивных атомов (изотопов) с периодом полураспада  $T$ . Сколько атомов останется через промежуток  $T/2$ ?

A. [250]

B. [500]

C. [125]

D. [1000].

7.8. За какое время произойдет распад 2 мг полония  ${}^{210}_{84}\text{Po}$ , если в начальный момент его масса 0,2 мг?

A. [28,5 мин]

B. [57 мин]

C. [14,3 мин]

D. [7,1 мин].

7.9. Сколько ядер распадается за 1 с в куске урана  ${}^{238}_{92}\text{U}$  массой 1 кг? Какая активность этого урана?

A.  $[\Delta N = 1,236 \cdot 10^7$  распадов/с;  $A = 0,33$  мКи]

B.  $[\Delta N = 0,618 \cdot 10^7$  распадов/с;  $A = 0,165$  мКи].

7.10. Что больше – среднее время жизни  $\tau$  радиоактивного ядра или период полураспада  $T_{1/2}$ ?

- A. [ $\tau$  больше  $T_{1/2}$  в 1,44 раза]
- B. [ $\tau$  меньше  $T_{1/2}$  в 1,44 раза]
- C. [ $\tau$  больше  $T_{1/2}$  в 2 раза]
- D. [ $T_{1/2}$  больше  $\tau$  в 2 раза].

7.11. Чтобы определить возраст древней ткани, найденной в одной из египетских пирамид, была определена концентрация в ней атомов радиоуглерода  $^{13}_6\text{C}$ . Она оказалась соответствующей 9,2 распадам в минуту на один грамм углерода. Концентрация  $^{13}_6\text{C}$  в живых растения соответствует 14 распадам в минуту на один грамм углерода. Период полураспада  $T_{1/2}$   $^{13}_6\text{C}$  равен 5730 лет.

Исходя из этих данных, оцените возраст древней ткани.

- A. [ $3,5 \cdot 10^3$  лет]
- B. [ $1,75 \cdot 10^3$  лет]
- C. [ $7 \cdot 10^3$  лет].

7.12. Пользуясь таблицей Менделеева и правилами смещения, определите, в какой элемент превращается радий  $^{226}_{88}\text{Ra}$  после пяти  $\alpha$  – и четырех  $\beta^-$  – распадов.

- A. [ $^{206}_{82}\text{Pb}$ ]
- B. [ $^{207}_{82}\text{Pb}$ ]
- C. [ $^{202}_{80}\text{Hg}$ ]
- D. [ $^{205}_{82}\text{Pb}$ ].

7.13. Определите высоту кулоновского потенциального барьера для  $\alpha$  – частицы в ядре полония  $^{200}_{84}\text{Po}$ . Покоившееся ядро полония испускает  $\alpha$  – частицу с кинетической энергией  $T_\alpha = 5,77$  МэВ. За счет какого эффекта  $\alpha$  – частица вылетает из ядра?

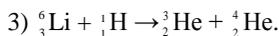
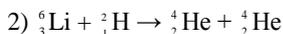
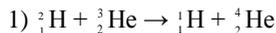
А. [26,6 МэВ; туннельный эффект]

В. [22,5 МэВ; туннельный эффект].

7.14. Используя принцип неопределенности в виде  $\Delta r \Delta p \geq \hbar/2$ , покажите, что электрон не может находиться внутри атомного ядра

( $\hbar = 0,66 \cdot 10^{-15}$  эВ·с). [ $\Delta r = 0,33$  эВ·с/м;  $E = 99$  МэВ  $\geq 10$  МэВ].

7.15. Определите энергию, выделяющуюся при следующих реакциях:



Примечание: при решении задачи используйте таблицу, приведенную к задачам 5.2 и 5.3;  $m_{{}^6_3\text{Li}} = 6,01703$  а.е.м.

А. [1) 18,3 МэВ; 2) 22,4 МэВ; 3) 4,02 МэВ]

В. [1) 22,4 МэВ; 2) 18,3 МэВ; 3) 8,04 МэВ].

7.16. Предположим, что для преодоления электростатического отталкивания два дейтрона  ${}^2_1\text{H}$  должны сблизиться до  $10^{-14}$  м. Определите высоту электростатического потенциального барьера в МэВ. До какой температуры нужно нагреть дейтерий, чтобы преодолеть потенциальный барьер?

А. [0,14 МэВ;  $5,6 \cdot 10^6$  К]

В. [1,4 МэВ;  $5,6 \cdot 10^7$  К].

7.17. Ядро урана  ${}^{238}_{92}\text{U}$ , захватывая быстрый нейтрон, превращается в радиоактивный изотоп урана, который претерпевает  $\beta^-$  – распад, и превращается в трансурановый элемент, который в свою очередь также претерпевает  $\beta^-$  – распад, в результате чего образуется плутоний. Запишите все эти процессы в виде ядерных реакций.

7.18. Ядро урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$ , захватывая тепловой нейтрон, делится на изотопы стронция и ксенона с массовыми числами 95 и 139, второй из которых, являясь радиоактивным, претерпевает  $3\beta^-$  – распада. Запишите реакцию деления, а также цепочку  $\beta^-$  – распадов.

7.19. Французские ученые Ирэн и Фредерик Жолио – Кюри, открывшие искусственную радиоактивность, подвергли бомбардировке  $\alpha$  – частицами бор  ${}_{5}^{10}\text{B}$ , алюминий  ${}_{13}^{27}\text{Al}$  и магний  ${}_{12}^{24}\text{Mg}$ . Запишите соответствующие ядерные реакции. Напомним, что при данных реакциях возникают нейтроны.

7.20. Сколько энергии выделится при ядерном делении 1 кг урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$  в урановом реакторе (или в атомной бомбе)? Какое количество угля необходимо сжечь для получения такого же количества теплоты (калорийность угля принять равной 29,3 МДж/кг)? Считать, что средняя энергия, выделяющаяся при делении одного ядра урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$ , составляет 200 МэВ.

- А.  $[5,13 \cdot 10^{26} \text{ МэВ}; 2,8 \cdot 10^6 \text{ кг}]$   
В.  $[0,513 \cdot 10^{26} \text{ МэВ}; 2,5 \cdot 10^5 \text{ кг}]$ .

7.21. Энергия излучения Солнца возникает вследствие цепочки термоядерных реакций, конечным результатом которых является превращение четырех ядер водорода в одно ядро гелия. Термоядерные реакции, происходящие в водородной бомбе и в предполагаемых установках по мирному использованию термоядерных реакций, в общем сводятся к тому же. Определите, какое количество воды можно было бы нагреть от  $0^\circ\text{C}$  до кипения за счет превращения в гелий 4 г водорода.

- А.  $[\approx 1,54 \cdot 10^6 \text{ кг}]$   
В.  $[\approx 1,54 \cdot 10^5 \text{ кг}]$   
С.  $[\approx 1,5 \cdot 10^7 \text{ кг}]$   
D.  $[\approx 0,77 \cdot 10^6 \text{ кг}]$ .

7.22. Для сравнения биологического действия различных видов излучения используется коэффициент относительной биологической активности (КОБА). Он показывает, во сколько раз действие данного излучения сильнее биологического действия  $\gamma$ -излучения при равных видах поглощенной энергии. Ниже приведен КОБА для различных видов радиоактивных излучений. Подберите соответствующие значения КОБА для: 1) рентгеновских лучей и  $\beta$ -частиц; 2)  $\alpha$ -частиц; 3) нейтронов.

А. [1]

В. [1 - 10]

С. [10 - 20].

7.23. Какую дозу радиоактивного излучения измеряют соответствующие дозиметрические приборы?

А. [поглощенную дозу излучения]

Б. [экспозиционную дозу излучения].

7.24. Скорость нарастания цепной реакции задается формулой  $\frac{dN}{dt} = \frac{N(k-1)}{T}$ , откуда  $N = N_0 e^{(k-1)t/T}$ , где  $N_0$  - число нейтронов в начальный момент времени;  $N$  - число нейтронов в момент времени  $t$ ;  $T$  - среднее время жизни одного поколения;  $k$  - коэффициент размножения нейтронов. Определите, во сколько раз увеличится число нейтронов в цепной ядерной реакции за время  $t = 10$  с, если среднее время жизни  $T$  одного поколения составляет 80 мс, а коэффициент размножения нейтронов  $k = 1,002$ .

А. [ $N/N_0 = 1,284$ ]

В. [ $N/N_0 = 12,84$ ]

С. [ $N/N_0 = 0,642$ ]

Д. [ $N/N_0 = 6,42$ ].

7.25. Характер зависимости  $n$  числа нейтронов в момент  $t$  цепной ядерной реакции деления тяжелых ядер, как следует из формулы, приведенной в задаче 5.24, определяется знаком выражения  $(k - 1)$ . Различают: 1) развивающуюся; 2) затухающую; 3) самоподдерживающуюся реакции. Как называются режимы соответствующих цепных ядерных реакций? Какие значения  $k$  им соответствуют?

А. [надкритический:  $k > 1$ ]

В. [критический:  $k = 1$ ]

С. [подкритический:  $k < 1$ ].

## 8. Элементы физики элементарных частиц

Задания.

8.1. Из приведенных ниже характеристик элементарных частиц отберите: 1) одинаковые как по величине, так и по знаку характеристики частиц и их античастиц;

2) одинаковые по величине, но противоположные по знаку характеристики частиц и их античастиц.

А. [масса]

В. [электрический, барионный и лептонный заряды]

С. [спин]

Д. [магнитный момент]

Г. [время жизни]

Е. [странность, спиральность].

8.2. Электрон и позитрон, имеющие одинаковые кинетические энергии, равные 240 кэВ, при соударении превратились в два одинаковых фотона. Определите энергию фотона и соответствующую ему длину волны.

А. [750 кэВ; 1,65 пм]

В. [240 кэВ; 5,12 пм]

С. [1500 кэВ; 0,83 пм]

Д. [480 кэВ; 2,56 пм].

8.3. Среди фундаментальных элементарных частиц, указанных в правой колонке таблицы, выберите частицы, относящиеся к соответствующим классам частиц из приведенных в левой колонке.

1. Лептоны	А. Электрон.
2. Кварки	Б. Мюон.
3. Кванты фундаментальных полей взаимодействия	В. Фотон. Г. Тау-лептон. Д. Шесть типов кварков по аромату, в каждом из которых различают три цвета. Е. Электронное нейтрино. Ж. Мюонное нейтрино. З. Промежуточные векторные бозоны. И. Гравитон. К. Глюоны. Л. Тау – нейтрино.

8.4. Из фундаментальных элементарных частиц, указанных в задании 8.3, выберите частицы, являющиеся:

- 1) фермионами;
- 2) бозонами.

8.5. Фундаментальным физическим взаимодействиям: 1) электромагнитному; 2) гравитационному; 3) слабому; 4) сильному подберите соответствующие кванты фундаментальных полей взаимодействия, приведенные ниже.

А. [Гравитон]

В. [Глюон]

C. [ $W^\pm$  – частицы и  $Z$  – частицы]

D. [Фотон].

8.6. На какие подгруппы частиц из приведенных ниже подразделяется многочисленная группа адронов, т. е. частиц, состоящих из кварков и участвующих в сильном взаимодействии?

A. [Барионы]

B. [Мезоны]

C. [Гипероны (странные барионы)]

D. [Резонансы]

E. [Лептоны].

8.7. В приведенной ниже сводке законов сохранения в физике элементарных частиц выберите законы сохранения, справедливые: 1) для всех видов фундаментальных взаимодействий; 2) для электромагнитного; 3) для слабого; 4) для сильного взаимодействий.

A. Сохранение полной энергии.

B. Сохранение полного импульса.

B. Сохранение полного момента импульса.

Г. Сохранение электрического заряда.

Д. Сохранение барионов.

E. Сохранение лептонов.

Ж. Зарядовая независимость (или сохранение изотопического спина).

З. Сохранение странности.

И. Симметрия античастиц.

К. Сохранение четности.

Л. CP – инвариантность.

М. CPT – инвариантность.

Н. Инвариантность относительно обращения времени.

О. Сохранение очарования.

8.9. Радиус действия нуклон – нуклонных сил составляет примерно  $1,5 \cdot 10^{-15}$  м. Какую массу должна иметь виртуальная частица, чтобы обеспечить такой радиус действия? Какие частицы являются ее реальным отображением? (при решении задачи используйте принцип неопределенности Гейзенберга в виде  $\Delta t \Delta p \geq \hbar$ , виртуальную частицу считайте ультрарелятивистской).

A. [ $m \approx 0,23 \cdot 10^{-27}$  кг  $\geq 250 m_e$ ;  $\pi$  - мезоны (пионы)].

8.10. Нейтральный  $\pi^0$  мезон ( $\pi^0$ ), распадаясь, превращается в два одинаковых  $\gamma$  - фотона. Принимая массу пиона равной  $264 m_e$ , определите энергию каждого из возникших фотонов. Кинетической энергией и импульсом мезона пренебречь.

A. [67,6 МэВ]

B. [135,1 МэВ]

C. [33,8 МэВ]

D. [270,3 МэВ].

8.11. Выбрав из четырех типов нейтрино ( $\nu_e, \tilde{\nu}_e, \nu_\mu, \tilde{\nu}_\mu$ ) правильное, напишите недостающие обозначения (x) в каждой из приведенных реакций и в случае бета – распада свободного нейтрона:

$$1) x + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^1_1\text{p} + {}^0_{-1}\text{e};$$

$$2) x + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^1_1\text{p} + \mu^-;$$

$$3) x + {}^1_1\text{p} \rightarrow {}^1_0\text{n} + {}^0_{+1}\text{e};$$

$$4) {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^1_1\text{p} + {}^0_{-1}\text{e} + x.$$

A. [ ${}^0_0\nu_e; {}^0_0\nu_\mu; {}^0_0\tilde{\nu}_e; {}^0_0\tilde{\nu}_e$ ]

B. [ ${}^0_0\tilde{\nu}_e; {}^0_0\nu_\mu; {}^0_0\nu_e; {}^0_0\nu_e$ ]

C. [ ${}^0_0\tilde{\nu}_\mu; {}^0_0\tilde{\nu}_e; {}^0_0\nu_e; {}^0_0\tilde{\nu}_e$ ].

8.12. Определите, какие из приведенных ниже процессов разрешены законом сохранения лептонного числа:

1)  $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$ ;

2)  $k^- \rightarrow \tilde{\nu}_\mu + \mu^-$ ;

3)  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + e^+ + e^-$ ;

4)  $\mu^- \rightarrow \nu_\mu + e^- + \tilde{\nu}_e$ .

8.13. Установите, запрещены или нет перечисленные ниже реакции. Если есть запрет, то укажите, с нарушением какого закона сохранения он связан.

1)  $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^0$ ;

2)  $p + \tilde{p} \rightarrow \mu^+ + e^-$ ;

3)  $n \rightarrow p + e^- + \nu_e$ ;

4)  $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$ .

[Нарушаются законы сохранения: 1) электрического заряда; 2) мюонного и электронного лептонных чисел; 3) электронного лептонного числа; 4) энергии.]

## **Используемая литература**

1. Волькенштейн В.С. Сборник задач по общему курсу физики. Изд. доп. и перераб. – СПб: Издательство «Специальная литература»; Издательство «Лань», 1999. – 328 с.
2. Трофимова Т.И. Сборник задач по курсу физики для вузов. – 3-е изд.- М.: ООО «Издательский дом «ОНИКС 21 век»»; ООО «Издательство «Мир и Образование»», 2003. – 384 с.

*«Дойдя до конца,  
люди смеются над страхами,  
мучившими их в начале»*

*Пауло Коэльо.*

*Учебное издание*

Составитель  
Сергей Николаевич Костенков

ОПТИКА  
ОСНОВЫ КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ

СБОРНИК  
тестовых заданий по общей физике

*Авторская редакция*

Отпечатано с оригинал-макета заказчика

Подписано в печать 23.09.2024. Формат 60x84/16.

Усл. печ. л. 5,35. Уч.-изд. л. 4,23.

Тираж 10 экз. Заказ № 1697.

Типография  
Издательского центра «Удмуртский университет»  
426034, Ижевск, ул. Университетская, 1, корп. 2.  
Тел. 68-57-18