

Вопросы к экзамену по курсу "ОПТИКА И АТОМНАЯ ФИЗИКА"

1. Как выглядит полная система уравнений Максвелла для векторов \mathbf{E} и \mathbf{B} в гауссовой системе единиц? Объясните, что называется плотностью свободных зарядов и плотностью связанных зарядов. Что такое вектор поляризации среды? Объясните, что называется плотностью тока свободных зарядов, плотностью тока связанных зарядов и плотностью тока намагничивания. Что такое вектор намагниченности среды? Введите векторы \mathbf{D} и \mathbf{H} и осуществите переход к уравнениям Максвелла в среде. Напишите формулы, которые определяют плотность энергии электромагнитного поля и плотность потока энергии (вектор Пойнтинга) в среде.
2. Как выглядит полная система уравнений Максвелла в среде для векторов \mathbf{E} , \mathbf{D} , \mathbf{B} и \mathbf{H} в гауссовой системе единиц? Объясните, как связаны между собой эти векторы. Постройте решение этих уравнений, которое описывает распространение плоской монохроматической электромагнитной волны в однородной диэлектрической среде. Что называется фазовой скоростью волны? Что называется показателем преломления среды? Объясните, что такое линейно поляризованная плоская волна и циркулярно поляризованная плоская волна.
3. Суперпозиция плоских монохроматических линейно поляризованных электромагнитных волн с близкими частотами распространяется в однородной среде с показателем преломления $n(\omega)$, зависящим от частоты ω волны. Что называется длиной когерентности и временем когерентности для такой суперпозиции волн? Как связаны между собой длина (время) когерентности и разброс по волновым числам (частотам) для волн в суперпозиции? Приведите примеры явлений, в которых существенны такие связи. Покажите, что сигнал конечной протяженности распространяется в пространстве со скоростью (групповой скоростью), отличной от фазовой скорости волн.
4. Суперпозиция плоских монохроматических линейно поляризованных электромагнитных волн с близкими частотами распространяется в однородной среде, состоящей из "газа" осцилляторов с собственной частотой ω_0 . Как зависит показатель преломления такой среды от частоты ω волны? За счет чего показатель преломления может приобрести мнимую часть? К какому эффекту приводит мнимая часть показателя преломления и в чем состоит причина этого эффекта? Что называется нормальной и аномальной дисперсиями? Могут ли фазовая и групповая скорости волн в такой среде превосходить скорость света в вакууме?
5. Суперпозиция плоских монохроматических линейно поляризованных электромагнитных волн с близкими частотами распространяется в однородной среде, состоящей из "газа" свободных заряженных частиц (разреженная плазма). Как зависит показатель преломления такой среды от частоты ω волны? За счет чего показатель преломления может приобрести мнимую часть? К какому эффекту приводит мнимая часть показателя преломления и в чем состоит причина этого эффекта? Приведите примеры таких эффектов. Могут ли фазовая и групповая скорости волн в такой среде превосходить скорость света в вакууме?
6. Плоская монохроматическая линейно поляризованная электромагнитная волна распространяется в диэлектрической среде 1 и падает на плоскую границу с диэлектрической средой 2 по углом α к нормали. Что называется ТЕ- и ТМ-волнами? Напишите уравнения, которые связывают векторы \mathbf{E} , \mathbf{D} , \mathbf{B} и \mathbf{H} в средах 1 и 2. Покажите, что образуются отраженная и преломленная волны с частотами, равными частоте падающей волны. Покажите, что угол отражения β равен углу α , а угол преломления γ связан с α законом Снеллиуса. Рассмотрите подробнее случай падающей ТЕ-волны. Выразите амплитуды рассеянной и преломленной волн через амплитуду падающей волны. Вычислите среднюю энергию, поступающую в единицу времени на выделенный элемент границы двух сред, а также средние энергии, уносимые в единицу времени с этого элемента рассеянной и преломленной волнами. Что называется коэффициентами отражения (R) и прохождения (T) волны через границу двух сред? В приближении, когда магнитные проницаемости двух сред принимаются равными единице, выразите коэффициенты R и T через углы α и γ , т.е. получите формулы Френеля.
7. Плоская монохроматическая линейно поляризованная электромагнитная волна распространяется в диэлектрической среде 1 и падает на плоскую границу с диэлектрической средой 2 по

углом α к нормали. Что называется ТЕ- и ТМ-волнами? Напишите уравнения, которые связывают векторы \mathbf{E} , \mathbf{D} , \mathbf{V} и \mathbf{H} в средах 1 и 2. Покажите, что образуются отраженная и преломленная волны с частотами, равными частоте падающей волны. Покажите, что угол отражения β равен углу α , а угол преломления γ связан с α законом Снеллиуса. Рассмотрите подробнее случай падающей ТМ-волны. Выразите амплитуды рассеянной и преломленной волн через амплитуду падающей волны. Вычислите среднюю энергию, поступающую в единицу времени на выделенный элемент границы двух сред, а также средние энергии, уносимые в единицу времени с этого элемента рассеянной и преломленной волнами. Что называется коэффициентами отражения (R) и прохождения (T) волны через границу двух сред? В приближении, когда магнитные проницаемости двух сред принимаются равными единице, выразите коэффициенты R и T через углы α и γ , т.е. получите формулы Френеля. Что называется углом Брюстера?

8. Плоская монохроматическая электромагнитная волна распространяется в диэлектрической среде 1 и падает на сферическую границу с диэлектрической средой 2. Рассмотрите прохождение луча через сферическую границу в параксиальном приближении. Сформулируйте, что называется параксиальным приближением. Установите связь между углами θ_1 и θ_2 распространения луча по отношению к оси z до и после прохождения сферической границы раздела сред радиуса R в приближении, когда луч проходит через границу на расстоянии x от оси z таким, что $x \ll R$. Что называется матрицей перехода через сферическую границу между средами 1 и 2? Что называется фокусным расстоянием F_{12} сферической границы раздела сред?
9. Будем считать известным, что в параксиальном приближении прохождение луча через сферическую границу сред 1 и 2 описывается матрицей:

$$M_{21} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/F_{12} & n_1/n_2 \end{pmatrix},$$

где $F_{12} = n_2 R / (n_2 - n_1)$, а R есть радиус кривизны сферической границы раздела сред. Что называется тонкой линзой? Получите матрицу перехода через тонкую линзу, сделанную из вещества с показателем преломления n , которая разделяет среды с показателями преломления n_1 и n_2 . Передняя поверхность линзы имеет радиус R_1 , а задняя поверхность – радиус R_2 . Какой формулой определяется фокусное расстояние такой линзы в общем случае и в частном случае, когда $n_1 = n_2 = 1$? Что называется сопряженными точками тонкой линзы? Получите формулу, которая связывает координаты z_A и z_B сопряженных точек A и B в общем случае и в частном случае, когда $n_1 = n_2 = 1$. Что называется фокальной плоскостью линзы?

10. Будем считать известным, что в параксиальном приближении прохождение луча через сферическую границу сред 1 и 2 описывается матрицей:

$$M_{21} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/F_{12} & n_1/n_2 \end{pmatrix},$$

где $F_{12} = n_2 R / (n_2 - n_1)$, а R есть радиус кривизны сферической границы раздела сред. Что называется толстой линзой? Получите матрицу перехода через толстую линзу, сделанную из вещества с показателем преломления n , которая разделяет среды с показателями преломления n_1 и n_2 . Передняя поверхность линзы имеет радиус R_1 , а задняя поверхность – радиус R_2 . Получите формулу для фокусного расстояния толстой линзы.

11. Что называется явлением интерференции волн? Что называется когерентными волнами? Как складываются интенсивности когерентных интерферирующих волн? Рассмотрите подробнее случай, когда в пространстве распространяются две плоские монохроматические волны под малым углом друг к другу. Как должны быть поляризованы эти волны, чтобы эффект интерференции был максимальным? В чем будет проявляться эффект интерференции? Что называется интерференционными полосами? Какой формулой определяется ширина интерференционных полос в рассматриваемом случае?
12. Что называется явлением интерференции волн? Что называется когерентными волнами? Как складываются интенсивности когерентных интерферирующих волн? В чем состоит интерференционный эффект, который приводит к появлению колец Ньютона? Получите формулу,

которая выражает радиусы колец Ньютона для монохроматического света с длиной волны λ . Сколько колец Ньютона будут ясно различимы в случае, когда используются световые волны с длинами волн от λ до $\lambda + \Delta\lambda$?

13. Что называется опытом Юнга по изучению интерференции световых волн? Сколько интерференционных полос будут ясно различимы в случае, когда используются световые волны с длинами волн от λ до $\lambda + \Delta\lambda$? Что называется длиной когерентности падающих световых волн? Что называется шириной когерентности падающих световых волн? Каким должно быть выбрано расстояние между щелями в опыте Юнга для того, чтобы можно было наблюдать интерференционную картину для падающих световых волн с заданной шириной когерентности? Как данное явление может быть использовано для измерения диаметров звезд (звездный интерферометр Майкельсона)?
14. Что называется принципом Гюйгенса–Френеля? В чем состоит явление дифракции Френеля на круглом отверстии для монохроматической волны? Как зависит интенсивность волны, распространяющейся вдоль оси симметрии отверстия, от расстояния b от отверстия и радиуса r отверстия? Что называется зонами Френеля? Получите формулу для радиусов зон Френеля. Что называется зонной пластинкой?
15. Что называется принципом Гюйгенса–Френеля? В чем состоит явление дифракции Френеля на полуплоскости и на прямой щели, вырезанной в плоскости, для плоской монохроматической волны? Что называется зонами Шустера? Получите формулу для ширин зон Шустера. Какими формулами определяется вид спирали Корню? Как используется спираль Корню для вычисления интенсивности волн, прошедших через прямую щель или дифрагированных на крае полуплоскости? Как выглядит тень края полуплоскости с учетом явления дифракции?
16. В чем состоит различие между дифракцией Френеля и дифракцией Фраунгофера? В чем состоит явление дифракции Фраунгофера на прямой щели, вырезанной в плоскости, для плоской монохроматической волны? Как меняется дифракционная картина при изменении соотношения между длиной волны λ и шириной щели h ? Что такое дифракционная решетка? Что называется периодом d дифракционной решетки? Что называется главными максимумами дифракционной решетки? Сколько главных максимумов можно получить для падающего излучения с длиной волны λ ? Какой должна быть решетка, позволяющая разрешить две близкие длины волны λ и $\lambda + \Delta\lambda$? Как ширина h каждой щели дифракционной решетки влияет на общий вид дифракционной картины, создаваемой решеткой?
17. В чем состоит фотоэффект? Какие величины нужно измерять при изучении фотоэффекта для того, чтобы прийти к выводу о существовании квантов электромагнитного излучения (фотонов)? Какие экспериментальные данные позволяют утверждать, что энергия каждого фотона равна $\hbar\omega$? Можно ли извлечь численное значение постоянной Планка \hbar из данных по фотоэффекту? Что называется работой выхода электронов из твердого тела?
18. В чем состоит эффект Комптона? Почему эффект Комптона свидетельствует о том, что кванты электромагнитного излучения обладают не только энергией, но и импульсом. Чему равен импульс фотона? Получите формулу, связывающую длину волны λ' электромагнитного излучения, рассеянного на угол θ в результате взаимодействия со свободными электронами, с длиной волны λ падающего электромагнитного излучения.
19. Что называется моделью Бора для атома водорода? Что называется стационарными состояниями атома в модели Бора? Как происходит излучение атома в соответствии с моделью Бора? Получите формулу, которая определяет те частоты ω , на которых излучает атом водорода. Что называется постоянной Ридберга? Что называется сериями Бальмера, Лаймана и Пашена?
20. Что называется гипотезой де Бройля? Что называется волной де Бройля? Выполните численную оценку длины волны де Бройля для пули массой $m = 9$ г, движущейся со скоростью $v = 700$ м/сек и для электрона с массой $m = 0.9 \cdot 10^{-27}$ г (энергией покоя $mc^2 = 500$ кэВ), разогнанного до энергии $E = 54$ эВ. Сравните эти длины волн с характерным расстоянием между атомами в кристалле $l = 0.3$ нм. Можно ли воспользоваться кристаллом, как дифракционной

решеткой, для проверки гипотезы де Бройля? В чем состоял опыт Джермера и Дэвиссона и каков был его результат?

21. Что называется волной де Бройля? Как частота и волновое число волны де Бройля связаны с энергией и импульсом частиц, которым сопоставляется эта волна? Как связаны между собой фазовая скорость волны де Бройля и скорости частиц? Что представляет собой суперпозиция волн де Бройля с близкими частотами (пакет волн де Бройля)? Какова групповая скорость распространения такой суперпозиции (пакета)? Как связана эта групповая скорость со скоростью частиц? Если длина когерентности интерпретируется как область локализации частицы, то какая связь возникает между неопределенностью координаты частицы и неопределенностью ее импульса?
22. Какое уравнение для волны де Бройля может быть получено с помощью формулы, связывающей энергию E и импульс p свободной нерелятивистской частицы? В чем состоит гипотеза о волновой функции, которая может быть сопоставлена не только свободной частице, но и частице, находящейся в потенциале $U(x)$? В чем состоит статистическая интерпретация волновой функции? Как выглядит уравнение Шредингера для волновой функции нерелятивистской частицы? Что называется оператором импульса \hat{p} и оператором полной энергии частицы \hat{H} (оператором Гамильтона или гамильтонианом)? Покажите, что волна де Бройля является собственной функцией операторов \hat{p} и \hat{H} , причем собственными значениями являются импульс p и энергия E частицы.
23. Как выглядит уравнение Шредингера для волновой функции нерелятивистской частицы? Покажите, что в случае, когда гамильтониан \hat{H} не зависит от времени, волновая функция $\Psi(\mathbf{r}, t)$ может быть представлена в виде произведения функции, зависящей только от t , и функции, зависящей только от \mathbf{r} . Почему частные решения уравнения Шредингера такого вида называют волновыми функциями стационарных состояний? Чем определяются возможные энергии стационарных состояний? Как выглядит общее решение уравнения Шредингера? Покажите, что общее решение уравнения Шредингера для свободной частицы представляет собой суперпозицию (пакет) волн де Бройля.
24. Как выглядит уравнение Шредингера для волновой функции нерелятивистской частицы? Исследуйте одномерное движение частицы с энергией E , падающей на одномерный барьер высотой $U_0 > E$ и шириной a . Что называется коэффициентами отражения (R) и прохождения (T)? Найдите эти коэффициенты. Каким основным фактором определяется коэффициент прохождения частицы сквозь классически запрещенную область в случае, когда барьер достаточно высок (по сравнению с энергией частицы) и широк? Как можно воспользоваться этим результатом для вывода приближенной формулы для коэффициента прохождения частицы сквозь барьер произвольной формы? Приведите пример явления, которое определяется эффектом прохождения частицы сквозь классически запрещенную область.
25. Как выглядит уравнение Шредингера для волновой функции нерелятивистской частицы? Каковы энергии E_n , $n = 1, 2, 3, \dots$, стационарных состояний частицы, совершающей одномерное движение между двух бесконечно высоких потенциальных стенок, находящихся на расстоянии a друг от друга? Как выглядят траектории движения классической частицы с энергией E_n , $n = 1, 2, 3, \dots$, в фазовом пространстве (x, p) ? Чем отличаются друг от друга две соседние траектории? В чем состоит правило Бора–Зоммерфельда определения энергий стационарных состояний частицы, которая движется в одномерном потенциальном поле $U(x)$? Что определяет номер n стационарного состояния? Воспользовавшись правилом Бора–Зоммерфельда, найдите энергии стационарных состояний одномерного гармонического осциллятора с частотой ω .
26. Что называется моделью Бора–Зоммерфельда для атома водорода? Как задача поиска стационарных состояний атома водорода может быть сведена к поиску стационарных состояний для одномерного движения электрона в радиальном направлении? Что называется орбитальным квантовым числом l ? Как зависит эффективная потенциальная энергия электрона $U_{eff}(r)$ от числа l ? Что называется радиальным квантовым числом n_r ? Что определяет число n_r ? Как зависят энергии стационарных состояний от квантовых чисел l и n_r ? Что называется главным

квантовым числом n ? Изобразите качественно графики $U_{eff}(r)$ для $l = 0, 1$ и 2 и энергии (положения) нескольких нижних стационарных уровней при движении электрона с указанными значениями l .

27. Что называется магнитным моментом системы движущихся зарядов (воспользуйтесь гассовой системой единиц)? Как связаны магнитный и угловой моменты для системы движущихся зарядов с одинаковым отношением заряда к массе: $e_i/m_i = e/m$. Что называется нормальным гиромагнитным отношением? Какой магнитный момент создает электрон, движущийся вокруг протона в атоме водорода в модели Бора–Зоммерфельда? Что называется магнетон Бора? Каков собственный угловой момент (спин) электрона? Каков магнитный момент электрона? Почему говорят, что электрон обладает аномальным гиромагнитным отношением? Что называется тонким расщеплением уровней в атоме водорода? Какой вывод о возможных направлениях спина электрона по отношению к выделенной оси (вдоль направления орбитального углового момента электрона) можно сделать, исходя из того, что тонкое расщепление происходит на два подуровня? Какие полные угловые моменты следует приписать атомам водорода, находящимся на определенных подуровнях?
28. Что называется опытом Штерна и Герлаха? Какие типичные результаты получаются в опытах по схеме Штерна и Герлаха? Допустим, что полный угловой момент одного атома мы принимаем равным J (в единицах постоянной Планка \hbar). Какой вывод о возможных величинах J и о возможных проекциях полного углового момента на выделенную ось (вдоль направления градиента магнитного поля) можно сделать по совокупности результатов, полученных в опытах по схеме Штерна и Герлаха? Как формулируется правило сложения угловых моментов j_1 и j_2 в полный угловой момент J (какие значения может принимать число J)?
29. Как можно обобщить (качественно) модель Бора–Зоммерфельда для атома водорода на сложный атом (заряд ядра равен Ze , число электронов равно Z)? Что называется главным, орбитальным, магнитным и спиновым квантовыми числами, характеризующими стационарные состояния электрона в сложном атоме? Что называется принципом Паули и как этот принцип определяет порядок заполнения электронных состояний в сложном атоме? Что называется полным орбитальным моментом электронов L , полным спиновым моментом электронов S и полным угловым моментом электронов (и всего атома) J ? Что называют термом сложного атома, и какими символом обозначается терм? Как выражается магнитный момент атома, находящегося в состоянии $2S+1L_J$, через фактор Ланде

$$g(J) = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)},$$

магнетон Бора и угловой момент J ? Как атомные термы расщепляются во внешнем однородном магнитном поле? В чем состоит эффект Зеемана?

30. Что называется периодическими граничными условиями для электромагнитных волн, распространяющихся в полости объема $V = L_x L_y L_z$? Что называется модами свободного электромагнитного поля в объеме V ? Какими величинами характеризуется каждая мода? Чем определяется энергия, сосредоточенная в моде, в рамках классической электродинамики и в рамках представления о существовании квантов электромагнитного излучения (фотонов)? Какая энергия сосредоточена в моде электромагнитного поля с частотой ω , находящегося в равновесии со стенками полости при температуре T , в рамках классического закона равномерного распределения и в рамках классического закона распределения Больцмана, совмещенного с предположением о существовании фотонов? Чему равно среднее число фотонов в моде с частотой ω равновесного теплового излучения с температурой T ? Выведите формулу Планка для энергии $u(\omega)d\omega$, сосредоточенной в модах с частотами от ω до $\omega + d\omega$ равновесного теплового излучения при температуре T .
31. Считая известной формулу Планка

$$u(\omega)d\omega = \frac{V\hbar\omega^3 d\omega}{\pi^2 c^3 (e^{\hbar\omega/kT} - 1)}$$

для энергии, сосредоточенной в модах с частотами от ω до $\omega + d\omega$ равновесного теплового электромагнитного излучения при температуре T в полости объемом V , найдите полную энергию

теплового излучения. Какой будет плотность потока энергии, выходящего из малого отверстия в тонкой стенке полости в направлении нормали к плоскости отверстия (энергетическая светимость отверстия)? Что называется законом Стефана–Больцмана и постоянной Стефана–Больцмана? Почему эту энергетическую светимость называют светимостью абсолютно черного тела, нагретого до температуры T ? Как связана частота ω_m , на которую приходится максимальная светимость, с температурой T (закон смещения Вина)?

32. Что называется вероятностями спонтанного испускания фотона и индуцированного поглощения фотона в единицу времени атомом? Почему этих двух процессов недостаточно для поддержания теплового излучения в равновесном состоянии? Что называется вероятностью индуцированного испускания фотона в единицу времени атомом? Что называется коэффициентами Эйнштейна? Как получается формула Планка, исходя из представлений о спонтанных и индуцированных переходах в атомах? В чем состоит принцип работы лазера?
33. Как сила света I источника связана с поверхностной яркостью B этого источника? Что принимается за эталонную яркость, или какая сила света принимается равной 1 канделе? Что называется световым потоком Φ ? В каких единицах измеряется световой поток? В чем состоит закон Ламберта, который определяет, какой световой поток уходит в телесный угол $d\Omega$ с площадки S с яркостью B ? Почему плоский источник света кажется одинаково ярким вне зависимости от того, под каким углом на него смотрят? Что называется освещенностью E площадки? В каких единицах измеряется освещенность?

Список литературы

- [1] И.Е.Иродов, Волновые процессы. Основные законы., М., Лаборатория Базовых Знаний, 1999.
- [2] И.Е.Иродов, Квантовая физика. Основные законы., М., Лаборатория Базовых Знаний, 2001.
- [3] Р.Фейнман, Р.Лейтон, М.Сэндс, Фейнмановские лекции по физике, т.1, вып.3 (Излучение, волны, кванты); т.2, вып.6 (Электродинамика), М., Мир, 1965 (1-е изд.), 1977 (2-е изд.).
- [4] Э.Вихман, Квантовая физика, М., Наука, 1974 (1-е изд.), 1977 (2-е изд.) – Берклеевский курс физики, т.4.
- [5] Д.В.Сивухин, Оптика, М., Наука, 1980 (1-е изд.) – Общий курс физики в 5-ти томах, т.4.
- [6] Д.В.Сивухин, Атомная и ядерная физика, М., Наука, 1989 (1-е изд.), МФТИ, 2002 (2-е изд.) – Общий курс физики в 5-ти томах, т.5.
- [7] И.В.Савельев, Волны. Оптика., М., АСТ, 2001 – Курс общей физики в 5-ти книгах, кн.4.
- [8] И.В.Савельев, Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц., М., АСТ, 2001 – Курс общей физики в 5-ти книгах, кн.5.