

Вопросы к рассмотрению на практических занятиях по 1 теме:

1. Фазовая и групповая скорости в ОМ ОВ. Показатель преломления и групповой показатель преломления. Связи между этими величинами.
2. Дисперсия групповых скоростей и коэффициент хроматической дисперсии. Связь между ними.
3. Связь между $\Delta\lambda$ и $\Delta\nu$.
4. Физический смысл дисперсионной длины.
5. Паразитная частотная модуляция – «чирпинг». Физический смысл. Изменение частоты внутри импульса. Максимальное значение.
6. Нормальная и аномальная дисперсия.
7. Чирпинг источников излучения.
8. Расчеты расширения импульсов в ОМ ОВ одного типа с учетом «чирпинга» источника.
9. Расчеты компенсации хроматической дисперсии в стандартном ОМ ОВ с помощью компенсирующего ОВ DCF.
10. Оптимальная компенсация дисперсии с учетом «чирпинга» источника и компенсирующего ОВ DCF.

Эти вопросы можно рассматривать, как задачи, которые можно решать на доске в аудитории или в виде индивидуальных заданий.

Цикл лабораторных работ по исследованию хроматической дисперсии и способов ее компенсации.

Вопросы к рассмотрению на практических занятиях по 2 теме:

1. Проявления нелинейности в законе Ома.

Какие причины, по Вашему мнению, могут привести к нелинейной связи между током и напряжением?

1. Изменение сопротивления под действием протекающего тока, т. е с повышением температуры.

2. Изменение сопротивления под действием приложенного напряжения за счет электрического пробоя окружающего воздуха.

При большом токе в резисторе выделяется большая мощность, которая приводит к его нагреву и повышению температуры. Удельное сопротивление практически всех проводниковых и полупроводниковых материалов изменяется с изменением температуры и характеризуется температурным коэффициентом сопротивления (ТКС). У проводников ТКС положительный, а для полупроводников он может иметь различные знаки. Линейная зависимость между током и напряжением нарушается. Обычная электрическая лампа накаливания, представляющая собой металлическую спираль в стеклянной колбе имеет одно сопротивление, когда она холодная и высокое после ее включения. Переходной процесс изменения тока через лампу после ее включения описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений для электрических и теплофизических величин.

2. Примеры нелинейных явлений и устройств в электронике и оптике.
3. Параметры электромагнитной волны: частота, длина волны в вакууме и в прозрачной среде, фаза, постоянная распространения. Связь между напряженностями электрического и магнитного поля в электромагнитной волне.
4. Интенсивность излучения, связь с напряженностью электрического поля. Интенсивности различных источников излучения.
5. Поляризация диэлектриков электрическим полем низких частот и полем электромагнитной волны. Электронная, ионная и ориентационная поляризация.
6. Дипольный момент атома. Поляризованность.
7. Основные векторы электромагнитного поля: напряженность электрического поля, поляризованность, вектор электрического смещения (электрической индукции). Их связь.
8. Процессы взаимодействия электромагнитной волны с атомом. Силы, действующие на электрон. Уравнение движения электрона. Решение для амплитуды колебаний электрона и зависимости диэлектрической восприимчивости от частоты.
9. Нормальная и аномальная дисперсия определяются для фазовых скоростей. Показать, что нормальная и аномальная дисперсия в ОМ ВВ определяются по другому, т.е. для групповой скорости.
10. Зависимости реальной и мнимой составляющих диэлектрической восприимчивости линейной среды от частоты. Физический смысл.
11. Внутриатомное электрическое поле. Энергия ионизации. Параметр нелинейности.
12. Зависимость поляризованности в нелинейных средах от напряженности электрического поля в электромагнитной волне для изотропных сред.
13. Квадратично-нелинейные среды. Генерация 2 гармоники. Выпрямление света.
14. Установки для генерации 2 гармоники.
15. Кубично-нелинейные среды.
16. Фотолюминисценция. Однофотонные процессы.
17. Фотолюминисценция. Многофотонные процессы.
18. Рэлеевское рассеяние света. Физические процессы.
19. Рассеяние Рамана. Стоксово и антистоксово излучение.

20. Рассеяние Манделъштамма и Бриллюэна.

21. Классификация нелинейных явлений.

Эти вопросы можно рассматривать вместе со студентами, привлекая их к обсуждению, а также в виде задач, которые можно решать на доске в аудитории или в виде индивидуальных заданий.

Лабораторной работы по этой теме не предусмотрено.

Вопросы к рассмотрению на практических занятиях по 3 теме:

1. Что понимают под самовоздействием? Какие явления относят к самовоздействиям?
2. Как проявляется эффект Керра при распространении электромагнитной световой волны?
3. При каких параметрах среды наблюдается самофокусировка и дефокусировка?
4. Что происходит со световым пучком, распространяющимся в однородной линейной среде?
5. Как проявляется условие полного внутреннего отражения для параксиальных лучей в пучке?
6. Пояснить физический смысл формул: $\theta_d = \frac{0.6I \cdot \lambda}{n_0 \cdot 2a_0}$, $\theta_0 < \arccos\left(\frac{n_0}{n_0 + n_2 \cdot I}\right)$
7. Задача. Определить мощность излучения пучка, в котором выполняются условия самоканализации пучка.
Дано $a_0=4$ мкм, $n_0=1.5$, $\lambda=1.5$ мкм, $n_2=3 \cdot 10^{-20}$ м²/Вт
Решение. Условие самоканализации: $\cos(\theta_d)=n_0/(n_0+n_2 I)$
 $I=P/(\pi a_0^2)$
8. Что такое - эффективная площадь сердцевины ОВ? Как определяется? Как зависит от длины волны?
9. Что такое эффективная длина ОВ? Как зависит от длины волны, коэффициента затухания и длины ОВ?
10. Что такое нормированная частота? Является ли она параметром ОВ? Условие одномодового режима?
11. Что такое радиус модового поля? Зависимость от длины волны, нормированной частоты? Распределение интенсивности в поперечном сечении ОВ?
12. Уравнение распространения волны для напряженности электрического поля и интенсивности с учетом эффекта Керра? Поясните, почему в уравнениях используются два времени t и T ?
13. Что такое нелинейный набег фазы? Зависимость от расстояния и от T ?
14. Максимальный нелинейный набег фазы. Зависимость от длины ОВ и входящей в ОВ мощности.
15. Коэффициент нелинейности ОВ. От чего зависит?
16. Суть явления фазовой самомодуляции? В чем проявляется? Как изменяется форма импульса и его спектр, если хроматической дисперсией можно пренебречь?
17. Классификация одномодовых ОВ с точки зрения нелинейных параметров?
18. Отклонения частоты внутри гауссовского импульса? Как обосновать, что это линейная частотная модуляция?
19. Понятие и количественная оценка чирпинга?
20. Что такое супергауссовский импульс? Обоснуйте, что его форма и нелинейный набег фазы совпадают по форме?
21. Объясните изменения во времени нелинейного набег фазы и изменения частоты для гауссовского и супергауссовского импульсов?
22. Частотные спектры гауссовских и супергауссовских импульсов при больших максимальных набеге фазы? Количество пиков на спектрограммах?
23. Что такое нелинейная длина ОВ? Что такое дисперсионная длина? От каких параметров ОВ они зависят?
24. Особенности первого режима распространения света в ОВ? Границы его существования?
25. Особенности второго режима распространения света в ОВ? Границы его существования?

26. Особенности третьего режима распространения света в ОВ? Границы его существования?
27. Особенности четвертого режима распространения света в ОВ? Границы его существования?
28. Проанализируйте изменение параметров оптического импульса в ОВ за счет хроматической дисперсии, фазовой самомодуляции и их совместного действия.
29. Суть явления фазовой кросс модуляции? В чем проявляется? Как изменяется форма импульса и его спектр.
30. Нелинейный набег фазы в одном канале ОВ для двух и многих каналов?
31. Как проявляется фазовая кроссмодуляция на работе ВОСС?

Эти вопросы можно рассматривать вместе со студентами, привлекая их к обсуждению, а также в виде задач, которые можно решать на доске в аудитории или в виде индивидуальных заданий.

Лабораторная работа по этой теме будет и она будет совмещена с исследованием четырехволнового смешения (4 тема).

Вопросы для практических занятий по 4 теме

1. Расчет значений комбинационных частот, возникающих при четырехволновом смешении (ЧВС).
2. Количество комбинационных частот, возникающих в системах DWDM.
3. Количество помех, попадающих в один канал волоконно-оптической системы связи с DWDM.
4. Общее количество помех ЧВС, которые попадают в N – канальную DWDM систему.
5. Определение мощности комбинационной помехи ЧВС.
6. Эффективная длина оптического волокна (ОВ).
7. Определение фазового рассогласования для комбинационной помехи ЧВС.
8. Расчет эффективности ЧВС для комбинационной помехи.
9. Расчеты отношения помехи ЧВС к сигналу.
10. Моделирование спектра излучения на выходе ОВ с учетом ЧВС.

К практическим занятиям по 5 теме

Пример 2. Оценка коэффициента перекрытия. В оптических предусилителях применяются волокна с предельно малым радиусом сердцевины ($R \approx 1,0 \dots 1,4$ мкм, $NA = 0,3 \dots 0,4$). Для $R=1$ мкм и $NA=0,4$ с помощью (5.5) получаем: $r_{pm} / R \approx 0,98$ на $\lambda_p=980$ нм и $r_{pm} / R \approx 1,48$ на $\lambda_p=1480$ нм. Подставив полученные значения r_{pm} / R в (5.4), находим коэффициенты перекрытия: $\Gamma \approx 0,65$ на $\lambda_p=980$ нм и $\Gamma \approx 0,46$ на $\lambda_p=1480$ нм.

В оптических усилителях мощности (бустерах) для уменьшения потерь из-за эффектов нелинейного гашения люминесценции применяются волокна с относительно большим радиусом сердцевины и малой числовой апертурой ($R \approx 1,6 \dots 2,6$ мкм, $NA \approx 0.15 \dots 0.2$) [4]. Для $R=2$ мкм и $NA=0.2$ с помощью (5.5) и (5.4) находим: $\Gamma \approx 0.65$ на $\lambda_p=980$ нм и $\Gamma=0.46$ на $\lambda_p=1480$ нм.

Значения коэффициентов перекрытия для бустеров получились такими же, как и для предусилителей. Объясняется это тем, что числовая апертура в бустере была выбрана в 2 раза меньшей, и соответственно радиус модового пятна получился в 2 раза больше. А так как радиус сердцевины в бустере тоже в 2 раза больше, то отношение r_{pm} / R и величина коэффициента перекрытия остались теми же. Средняя же интенсивность излучения в оптическом усилителе при той же оптической мощности получается в 4 раза меньшей, так как площадь сердцевины волокна πR^2 у него была выбрана в 4 раза меньше.

Пример 3. Оценка вероятности переходов. Вероятность спонтанных переходов определяется временем жизни ионов в метастабильном состоянии 2: $W_{sp} = 1 / \tau_{sp}$. Для типичного значения $\tau_{sp}=12$ мс получаем: $W_{sp} \approx 80$ 1/с. Вероятность вынужденных переходов дается выражениями: $W_{iz} = \frac{\Gamma \cdot \sigma_{iz} \cdot P}{\pi \cdot R^2 \cdot h \cdot \nu}$ и $W_{pg} = \frac{\sigma_{pg} \cdot \langle I \rangle}{h \cdot \nu} = \frac{\Gamma \cdot \sigma_{pg} \cdot P}{\pi \cdot R^2 \cdot h \cdot \nu}$. Для накачки на $\lambda_p=980$ нм $\Gamma_p=0,65$, а $\sigma_{pg}=2,7 \times 10^{-25}$ м², $h\nu_p=2 \times 10^{19}$ Дж. При $R=1$ мкм (предусилитель) и типичном значении мощности накачки $P_p=10$ мВт получаем: $W_{pg} = 2.7 \times 10^3$ 1/с. Зная вероятности переходов, получим (из условия $W_{pg}=W_{sp}$) выражение для пороговой мощности накачки: $P_{pr} = \frac{h \cdot \nu_p \cdot \pi \cdot R^2}{\Gamma_p \cdot \sigma_{pg} \cdot \tau_{sp}} \approx 0,3$ мВт. Для накачки на $\lambda_p=1480$ нм $\Gamma_p=0,46$, $\sigma_{iz}=0,5 \times 10^{-25}$ м², $\sigma_{pg}=1.5 \times 10^{-25}$ м², $h\nu_p=1,3 \times 10^{19}$ Дж. При тех же значениях R и P_p получаем: $W_{iz} = 5,5 \times 10^2$ 1/с и $\langle W_{pg} \rangle = 1,65 \times 10^3$ 1/с.

Пример 4. Оценка коэффициента усиления при полной инверсии. Максимальное значение коэффициента усиления, как видно из (5.14), достигается при полной инверсии ($\langle n_2 \rangle = 1$) и равно: $G(dB) = 4.34 \cdot g^* L \cong 4.34 \cdot \Gamma_c \cdot N \cdot \sigma_{iz} \cdot L$. Максимальная плотность концентрации ионов эрбия в волокне $N \approx 10^{25}$ м⁻³, сечение рассеяния в максимуме спектра испускания $\sigma_{iz} \cong 4 \cdot 10^{-25}$ м² ($\lambda_c=1530$ нм), $\Gamma_c \approx 0,4$ (пример 2). Полагая $L = 10$ м, получаем оценку: $G(dB)=70$ дБ ($G/L=7$ дБ/м).

Оценка в примере 4 явно завышена, так как мы положили $\langle n_2 \rangle = 1$ и пренебрегли, таким образом, эффектами насыщения сигнала и спонтанного излучения. Например, пусть мощность входного сигнала составляет всего лишь - 30 дБм. Тогда при $G(dB)=70$ дБ выходная мощность сигнала составит 40 дБм, что намного больше типичного значения мощности накачки EDFA (~20 дБм).

Пример 5. Оценка коэффициента усиления в режиме насыщения сигнала. Будем исходить из условия, что плотность потока фотонов сигнала на выходе усилителя не превышает суммарной плотности потока фотонов сигнала и накачки на входе в усилитель: $F_c(vых) < F_c(вх) + F_p$. Отсюда, учитывая, что $G = P_c(vых) / P_c(вх) = F_c(vых) / F_c(вх)$, находим:

$G < 1 + F_p / F_c(\text{вх}) = 1 + (\lambda_p / \lambda_c) P_p / P_c(\text{вх})$. При $\lambda_p = 1480$ нм, $\lambda_c = 1530$ нм, $P_p = 100$ мВт, $P_c(\text{вх}) = 1$ мкВт (-30 дБм) коэффициент усиления получается на два порядка меньше, чем в предыдущей оценке: $G < 10^5$ ($G(\text{дБ}) < 50 \text{дБ}$).

Но в этой оценке мы не учитывали влияние эффекта самонасыщения усилителя спонтанным излучением.

Вопросы для практических занятий по теме 6

1. Расчеты мощности рэлеевского рассеяния.
2. Расчеты мощности спонтанного рассеяния Манделъштамма-Бриллюэна.
3. Вынужденное рассеяние Манделъштамма-Бриллюэна (ВРМБ). Классическое описание. Электрострикция. Эффект Доплера.
4. Квантовое описание ВРМБ. Бриллюэновский сдвиг частоты.
5. Пороговое значение мощности для ВРМБ.
6. Ширина спектра излучения ВРМБ.
7. Усилительная способность ВРМБ.
8. Схема оптического усилителя ВРМБ.
9. Система дифференциальных уравнений, описывающих оптический усилитель ВРМБ.
10. Влияние ВРМБ на качество связи в ВОСС.
11. Моделирование процессов распространения оптических сигналов в ОВ с учетом ВРМБ.

Вопросы для практических занятий по теме 7

1. Расчеты мощности рэлеевского рассеяния.
2. Расчеты мощности спонтанного рассеяния Рамана.
3. Вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР) Рамана. Квантовое описание.
4. Стоксовы и антистоксовы составляющие рассеянного излучения. Сдвиг по частоте.
5. Пороговое значение мощности для ВКР.
6. Ширина спектра излучения ВКР.
7. Усилительная способность ВКР.
8. Схема оптического усилителя Рамана.
9. Система дифференциальных уравнений, описывающих оптический усилитель Рамана.
10. Влияние ВКР на качество связи в ВОСС.
11. Моделирование процессов распространения оптических сигналов в ОВ с учетом ВКР.
12. Сравнение ВКР и ВРМБ.