



Задания заключительного этапа
Всероссийской олимпиады студентов «Я – профессионал»
по направлению «Фотоника»

Категория участия «Бакалавриат»

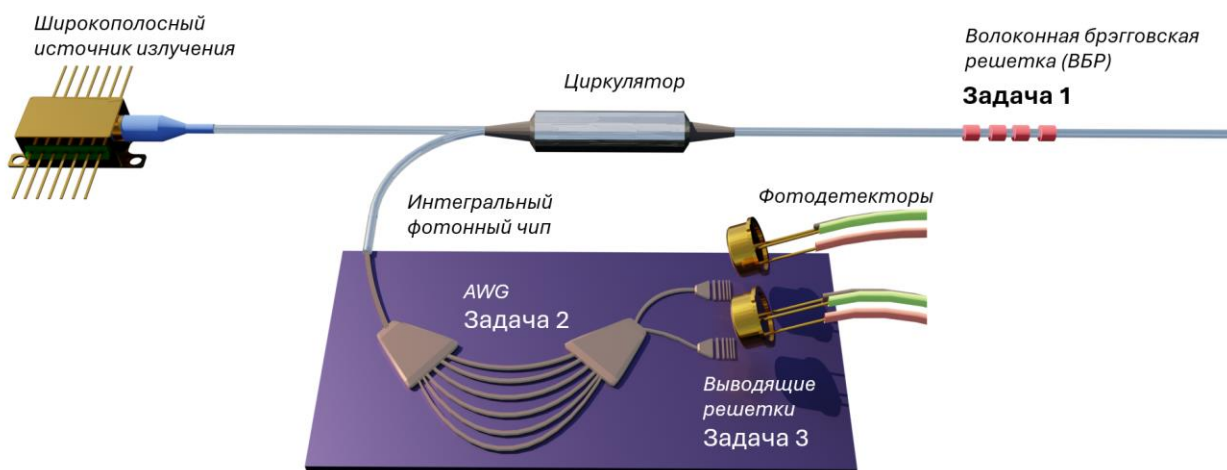


Рисунок 1. Схема распределенного волоконного датчика и системы регистрации (не в масштабе)

Распределенные волоконные датчики температуры и растяжения находят все больше применений в различных отраслях промышленности от мониторинга усталости металлоконструкций и корпусов кораблей до измерения температур в шахтах и скважинах, от контроля утечек трубопроводов, систем охраны периметра и мониторинга сейсмической активности вулканов. Данные системы могут иметь различную реализацию, но они все основаны на одинаковом принципе – свет, распространяясь по оптическому волокну, испытывает возмущение за счет изменения температуры или деформации волокна, которое детектируется измерительным оборудованием. В рамках финального тура олимпиады мы рассмотрим одну из возможных реализаций таких систем и проведем расчет ее основных элементов.

Рассматриваемый волоконный датчик приведен на Рисунке 1. Принцип работы системы следующий: широкополосный источник света (1530-1580 нм) (1) направляет излучение на волоконную брэгговскую решетку (2), которая отражает свет в узком спектральном диапазоне. Отраженный свет попадает на циркулятор, который перенаправляет его на интегральный фотонный чип. Положение максимума спектра отражения смещается под воздействием температуры и растяжения, что регистрируется на специальном элементе, называемом интеррогатор. Интеррогатор исполнен на интегральном фотонном чипе (3), и представляет собой элемент, который делит свет на спектральные составляющие и направляет их в различные волноводы (AWG). Каждый волновод заканчивается выводящей дифракционной решеткой (4), которая выводит свет из интегральной схемы на фотодетектор.

Каждая из задач будет посвящена работе одного из элементов прибора. Решение всех задач позволит понять общий принцип работы систем распределенных волоконных датчиков и систем опроса.

Правила проведения финального этапа:

- 1) Участник может использовать любую математическую программу на персональном компьютере, программный пакет или язык программирования (Python, MatLab, Origin, Excel и др.) для решения задач в рамках олимпиады, а также построения графиков или обработки экспериментальных данных.
- 2) Запрещается использование ПК для любых целей, помимо обозначенных в п. 1, в том числе использование мессенджеров и чатов, в том числе Chat-GPT, любой литературы и информационных сайтов.
- 3) Запрещается использование мобильных телефонов для любых целей. Перед началом этапа телефон следует выключить и сдать.
- 4) Нарушение запрета ведет к замечанию. Два замечания ведут к удалению.
- 5) Ответы вместе с промежуточными выкладками записываются на специальных промаркированных бланках. При сдаче бланки складываются в конверт, в котором были получены и передаются организатору на пункте сбора ответов.
- 6) При необходимости файлы с графиками могут быть загружены на сайт:
https://events.skoltech.ru/ya_prof
Файл должен содержать номер участника и номер задачи: ###_Задача#_1.pdf

Задача 1. Волоконная брегговская решетка (36 баллов)

Оптическое волокно представляет из себя волноводную структуру, которая позволяет передавать световой сигнал практически без потерь на огромные расстояния вплоть до тысяч километров. Основой оптоволоконна выступает сердцевина из оптически прозрачного материала диаметром в несколько микрометров ($d_{core} \approx 9$ мкм) с коэффициентом преломления, слабо превышающим коэффициент оболочки. На основе оптического волокна реализуют множество оптических элементов и устройств. Одним из важных для волоконных датчиков является волоконная брегговская решетка (ВБР), которая представляет собой оптоволоконно, коэффициент преломления сердцевинны которого периодически изменяется вдоль волокна (Рисунок 2). Технологически подобная модуляция как правило реализуется методом лазерной записи. Такая структура позволят получить отражение в узком спектральном диапазоне с центром на длине волны, определяемой прежде всего шириной штриха d .

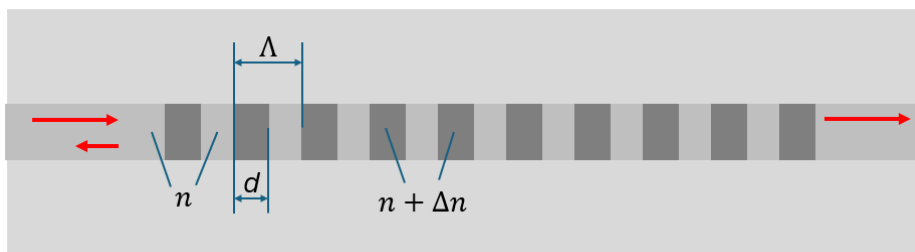


Рисунок 2. Волоконная брегговская решетка

Для слабо отражающих решеток ($R_{max} \ll 1$) с низким контрастом показателя преломления $\Delta n \ll n$ может быть получена приближенная формула, связывающая спектр отражения с числом периодов $\Lambda = 2d$. Вычислите спектр отражения ВБР, считая, что показатель для света, распространяющегося по сердцевине, равен $n = 1.45210$, а наведенный показатель преломления увеличивает значение n на $\Delta n = 3 \times 10^{-5}$. Для решения используйте следующие приближения:

- 1) Для расчета амплитудного коэффициента отражения волноводной моды, падающей из участка волокна с эффективным индексом n_1 на участок с индексом n_2 , можно приближенно использовать формулу Френеля:

$$r_{12} = \frac{E_{\text{отраженная}}}{E_{\text{падающая}}} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}$$

- 2) Рассматриваемая в задаче решетка достаточно короткая, чтобы считать интенсивность распространяющейся по ней волноводной моды постоянной (ослаблением интенсивности можно пренебречь);
- 3) Вторичным отражением волноводной моды, первоначально отраженной от границы между штрихами, можно пренебречь;

Задания:

- 1.1 Определите минимальную ширину штриха d , обеспечивающую максимум отражения на длине волны $\lambda_B = 1550$ нм (5 баллов)
- 1.2 Выведите формулу, связывающую спектр отражения $R(\lambda)$ (т.е. коэффициент отражения по интенсивности как функцию длины волны) и число периодов волоконной решетки N . Если у вас получился ряд или прогрессия – ее необходимо просуммировать (14 баллов)

- 1.3 Приведите формулу для ширины спектра отражения $\Delta\lambda$ (определяемую как расстояние между нулями функции отражения, ближайшими к основному максимуму), а также для максимума отражения как функцию количества периодов (6 баллов)
- 1.4 При каком наименьшем количестве периодов интенсивность отражения в максимуме достигает $R_{max} = 0.05$. Какая при этом ширина спектра? (3 балла)
- 1.5 Считая сдвиг длины волны максимума отражения решетки λ_B по температуре T линейным, найдите коэффициент пропорциональности $\frac{\partial\lambda_B}{\partial T}$ [пм/К], если коэффициент температурного расширения $\frac{\partial L}{L\partial T} = 0.48 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$, а термооптический коэффициент $\frac{\partial n}{\partial T} = 8.5 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$. Приведите формулу и число, округленное до десятых [пм/К] (4 балла)
- 1.6 Считая сдвиг длины волны максимума отражения решетки линейным при малых относительных растяжениях $\varepsilon = dl/l$, найдите зависимость сдвига $\Delta\lambda_B$ от ε , учитывая, что $\frac{\partial n}{n\partial\varepsilon} = -0.2$. Приведите формулу и коэффициент пропорциональности, округленный до десятых [пм/мк ε] (4 балла)

Задача 2. Интегральное измерительное устройство

При использовании ВБР в качестве сенсора, его спектр отражения смещается под воздействием температуры и механических напряжений в области решетки. Отраженная волна попадает на специальное устройство – опросник ВБР, который называется интеррогатор. Интеррогатор может быть реализован на различных принципах, обеспечивающих различную точность измерений. В данной задаче предлагается рассмотреть схему с дифракционной волноводной решеткой (ДВР, AWG, Arrayed Waveguide Grating). ДВР изготавливаются на основе фотонных интегральных схем (ФИС) и представляют собой многоканальные устройства. В конфигурации для использования в сенсорике они имеют один ввод и множество выводов, каждый из которых пропускает свет в определенном ограниченном спектральном диапазоне (Рисунок 3а). Свет в каждом из каналов попадает на фотодетектор, таким образом AWG работает как спектрометр, разрешающая способность которого определяется спектральной функцией пропускания каналов.

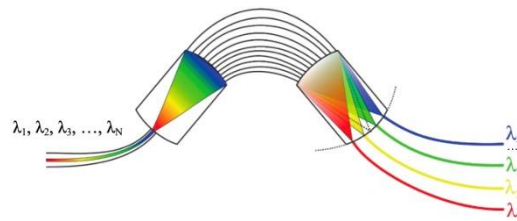


Рисунок 3а. Схема работы AWG

Задача 2.1 Принцип работы AWG (8 баллов)

Входное излучение поступает в центральный входной волновод, затем дифрагирует в области разветвителя из входного волновода в промежуточные волноводы. Длины промежуточных волноводов подобраны таким образом, чтобы проходящее в них излучение приобретало некоторый фазовый набег. В выходном элементе (объединителе) в силу дифракции из нескольких промежуточных волноводов излучение интерферирует конструктивно на определенных углах θ для соответствующих длин волн (рисунок 3б). Длина r -го промежуточного волновода рассчитывается по формуле: $L_r = L_1 + (r - 1)\Delta L$, где L_1 - длина первого волновода, ΔL - разность длин промежуточных волноводов. Конструктивная интерференция при $\theta = 0$ соответствует длине волны λ_c (центральной длине волны) и порядку дифракции m .

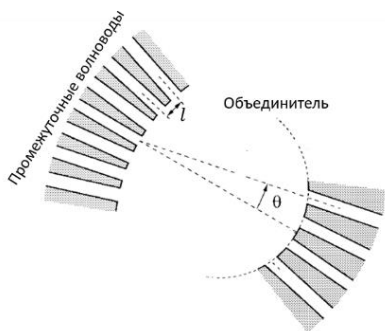


Рисунок 4б. Схема разделения излучения по выходным

В некоторой ДВР центральная длина волны $\lambda_c = 1.54$ мкм, порядок дифракции $m = 20$. Количество промежуточных волноводов равно $N = 20$, а расстояние между ними $l = 2$ мкм (считать, что концы промежуточных волноводов находятся на одной линии, ортогональной к линии $\theta = 0$). Эффективный показатель преломления моды промежуточного волновода $n_a(\lambda) = a\lambda + b_a$. Эффективный показатель преломления объединителя $n_o(\lambda) = a\lambda + b_o$. Параметры принимают следующие значения: $a = -10^6 \text{ м}^{-1}$, $b_a = 4.34$, $b_o = 4.65$. При решении можно использовать приближение малых углов $\sin(\theta) \approx \theta$.

Задание:

2а. Определить минимальный модуль угла θ' , соответствующего направлению конструктивной интерференции на длине волны $\lambda' = 1.55$ мкм (8 баллов)

Задача 2.2 Измерения с AWG (30 баллов)

Рассмотрим систему из двух каналов, расположенных так, что спектр отражения решетки всегда попадает в диапазон между максимумами пропускания каналов. Необходимо рассчитать

спектральную ширину каналов, которая позволит обеспечить заданную точность определения длины волны максимума решетки, используя следующие приближения:

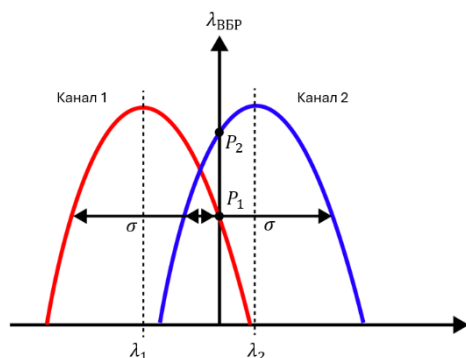


Рисунок 4 Спектры пропускания каналов AWG и спектр ВБР, логарифмический масштаб

1) Нормированный спектр пропускания каналов считать гауссовым:

$$T_i(\lambda) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} * \exp\left(-\frac{(\lambda - \lambda_i)^2}{2\sigma^2}\right)$$

где максимумы пропускания каналов соответствуют длинам волн $\lambda_1 = 1548$ нм и $\lambda_2 = 1552$ нм, а σ определяет ширину окна пропускания и является одинаковым для обоих каналов.

2) Ширину спектра отражения решетки считать пренебрежимо малой по сравнению шириной канала, т.е. мощность в канале пропорциональна функции пропускания канала на длине волны решетки: $P_i = AT_i(\lambda_{ВБР})p_0$.

Коэффициент пропорциональности $A = 0.05$ нм отвечает за спектральные потери от источника до фотодетектора на данном канале, а $p_0 = 0.1$ мВт – отраженная от решетки мощность. Таким образом, измерение мощности в канале позволяет определить спектральное положение решетки.

- 3) Измерения мощности на каждом канале происходят с точностью $\delta P = 5$ нВт, определяемой стабильностью источника излучения и шумами фотодетектора.
- 4) Измерение мощности в двух спектрально пересекающихся каналах позволяет увеличить точность определения длины волны (Рисунок 4). Мы будем рассматривать следующую функцию, использующую значения мощности на каждом из каналов:

$$f(\lambda_{ВБР}) = \frac{P_1(\lambda_{ВБР})}{P_2(\lambda_{ВБР})}$$

Задания:

- 2.1 Используя формулу для среднеквадратичного отклонения, найдите выражение, связывающее ошибку в определении длины волны $\delta\lambda$ с ошибкой измерения мощности на канале δP при использовании функции $f(\lambda_{ВБР})$ (4 баллов)
- 2.2 Определите диапазон значений для спектральной ширины каналов σ [нм], чтобы ошибка в определении длины волны не превышала $\delta\lambda < 0.05$ нм на всем интересующем спектральном диапазоне 1548-1552 нм при использовании функции $f(\lambda_{ВБР})$. Приведите ответ с точностью 0.1 нм (10 баллов)
- 2.3 Рассчитайте, какой максимальный спектральный диапазон может обеспечить аналогичную точность $\delta\lambda < 0.05$ при использовании только одного канала (8 баллов)
- 2.4 В файле data.csv (https://events.skoltech.ru/ya_prof) дана последовательность измерений на каналах 1 и 2, сделанная с шагом в 1 минуту. Известно, что при комнатной температуре (298K) центр ВБР находится на 1548 нм, ширина каждого канала AWG равна 2.5 нм, центр первого канала находится на 1548 нм, а второго – на 1552 нм. Найдите температуру в каждый момент измерения (с точностью до 5 кельвинов), используя коэффициент, найденный в пункте (1.5) (Если пункт (1.5) не решен, используйте 11 [пм/К]). На бланке ответов укажите найденные значения в виде таблицы (8 баллов)

Задача 3. Выводящая дифракционная решетка (26 баллов)

Для измерения мощности излучения в волноводе после AWG, излучение выводится из волновода с помощью специальной дифракционной решетки, которая фокусирует выходящее излучение на фотодетекторе. Такая решетка состоит из периодических субволновых структур, выполненных прямо в волноводном слое (Рисунок 5). За счет периодичности такая структура позволяет изменить проекцию волнового вектора света на величину кратную вектору обратной решетки $\frac{2\pi}{a}$. Таким образом, волноводная мода выводится под углом, определяемым периодом решетки. При плавном изменении периода решетки в пространстве можно добиться эффекта фокусировки излучения над решеткой. Найдите последовательность периодов одномерной дифракционной решетки, на выходе из которой получается сфокусированный пучок, перетяжка которого находится на высоте 200 мкм над решеткой и на расстоянии $x_2=20$ мкм от ее конца как показано на рисунке.

Другие параметры задачи:

Длина решетки $L=40$ мкм,

Длина волны излучения $\lambda = 1.55$ мкм

Эффективный показатель преломления волноводной моды, распространяющейся вдоль решетки, равен

$n_{eff} = 3$ и не зависит от периода решетки

Излучение выходит в воздух

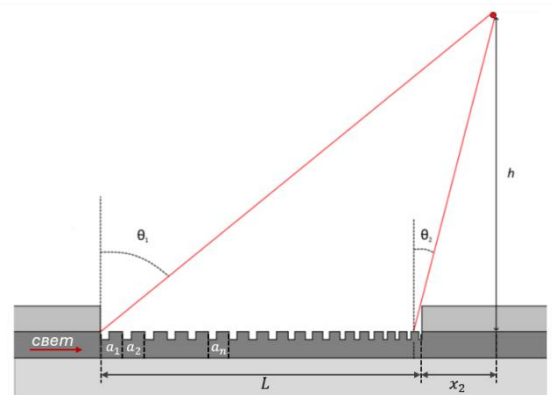


Рисунок 5 Выводящая дифракционная фокусирующая решетка

Задания:

- 3.1 Укажите формулу, связывающую период решетки и угол θ , под которым излучение выходит из решетки (10 баллов)
- 3.2 Предложите формулу для расчета последовательности периодов решетки a_n (10 баллов)
- 3.3 Рассчитайте период первого и последнего штриха (с точностью до 1 нм) (3 балла)
- 3.4 Найдите общее количество штрихов в решетке (3 балла)