

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

Н. Д. Хатьков
Д. В. Окунев

ОСНОВЫ КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Методические указания по практическим и самостоятельным занятиям для студентов
технических направлений подготовки и специальностей

Томск
2024

УДК 53.06
ББК 22.348
Х-25

Рецензент:

Перин А. С., доцент кафедры сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники ТУСУР канд. техн. наук

Хатьков Николай Данилович

Х-25 Основы квантовых вычислений: методические указания по практическим и самостоятельным занятиям / Н. Д. Хатьков, Д. В. Окунев, – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2024. – 58 с.

Приведены методические указания по выполнению практических работ по курсу «Основы квантовых вычислений». Практические работы выполняются на кафедре сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники и предназначены для всех форм обучения, обучающихся по направлениям технических направлений подготовки и специальностей.

Одобрено на заседании каф. СВЧКР, протокол № 8 от 20.05.2024 г.

УДК 53.06
ББК 22.348

© Хатьков Н. Д., Окунев Д. В.
© Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2024

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, благодаря быстрому развитию нового направления - оптической электроники, появились и новые возможности в области вычислений. Соединив в себе возможности как оптики, так в электроники, оптическая электроника способна решать задачи, которые ранее было невозможно решить устройствами на дискретных локальных в пространстве элементах. Появление лазеров, их непрерывное совершенствование и быстрое освоение в промышленном масштабе, привело к созданию принципиально новых приборов в самых разнообразных областях науки и техники (физика, химия, медицина, электроника, связь и т.п.). Применение приборов и методов оптической и квантовой электроники во всех этих областях, позволило получить совершенно новые результаты, способствуя тем самым дальнейшему прогрессу.

Оптические процессы настолько разнообразны, что достаточно трудно выделить, какой то отдельно в области приложений, поскольку чаще всего они взаимосвязаны — генерация излучения и его усиление, прохождение светом разнообразных сред, дифракционные эффекты, модуляция, детектирование, обработка и пр. Целый набор подобных процессов представлен в практической работе с лазерным микрофоном, чувствительная мембрана которого, может находиться, как внутри его конструкции, так и вне ее. Его применение возможно не только в спецтехнике, устройствах связи, но и в дистанционной диагностике целостности вибрирующих поверхностей на технических производствах, где непосредственный контакт сенсоров с поверхностью затруднен.

Многообразие свойств оптических технологий позволило также способствовать развитию высокоскоростных оптических вычислений — разработке оптических процессоров. Следует отметить, что вычисления могут быть организованы, как с помощью большого количества носителей информации - потоков квантов, так и отдельных единичных квантовых частиц.

Первая часть практических работ содержит следующее. Ввод и вывод информации в эти устройства, также осуществляется на основе разнообразных физических оптических эффектов. Для их изучения необходимо провести практическую работу по анализу оптического излучения видеосенсорами, особенностью их работы. Так же необходимо на практике определить параметры модуляторов света в оптической системе. Формирование оптического излучения в выходной плоскости оптического процессора можно изучить на практическом примере с простейшими транспарантами, как в одномерном случае с цилиндрической оптикой, так и в двухмерном со сферической оптикой. Вопросы фильтрации оптических изображений с применением Фурье оптики так же будут затронуты.

Наиболее удобно, для оценки параметров отдельных видов оптических схем и конструкций, использовать математические модели. Поэтому для практической работы будет использован пакет Mathcad.

Вторая часть практических работ использует для вычислений отдельные квантовые частицы, где информация в них содержится в их выделенном состоянии. Квантовые вычисления на практических занятиях проводятся на эмуляторе квантового компьютера Quirk, который находится в свободном доступе.

В данном пособии приведены указания к выполнению практических работ по курсу «Основы квантовых вычислений». Для каждого практического занятия есть краткие теоретические сведения для выполнения, примеры и набор индивидуальных заданий для студентов в том числе и для самостоятельной работы.

Методические указания по практическим занятиям и самостоятельной работе предназначены для студентов технических специальностей.

1 ЛАЗЕРНЫЙ МИКРОФОН

Цель работы:

Определение характеристик и технической возможности работы лазерного микрофона в различных условиях.

1.1 Краткие теоретические сведения

1.1.1 История лазерного микрофона

Техника использования луча света для удалённой звукозаписи была, вероятно, придумана Львом Терменом в СССР в или до 1947 года, когда он разработал и начал использовать прослушивающую систему «Буря» (рисунок 1.1). Она работала, используя инфракрасный луч (не лазерный), чтобы на расстоянии фиксировать вибрации оконного стекла. Лаврентий Берия, глава КГБ, использовал устройство «Буря» для слежки за американским, французским и британским посольствами в Москве.

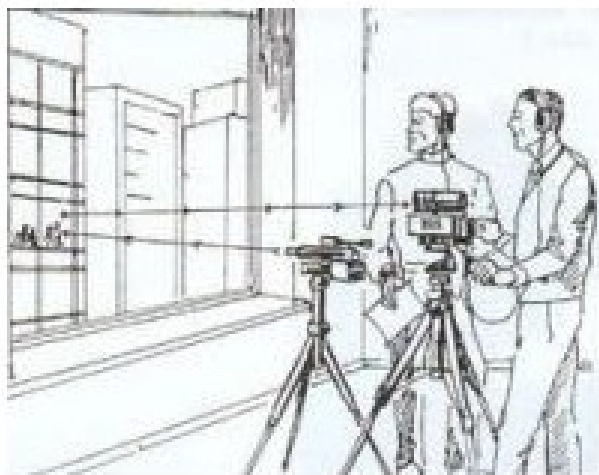


Рисунок 1.1 – Пример использования подслушивающей системы «Буря»

1.1.2 Оптоволоконный микрофон

Оптоволоконный микрофон (рисунок 1.2) преобразует акустические волны в электро-сигналы, реагируя на изменения интенсивности света вместо регистрации изменений в ёмкостном сопротивлении или магнитных полях, в отличие от традиционных микрофонов.



Рисунок 1.2 – Оптоволоконный микрофон

Во время использования свет из лазерного источника проходит по оптическому волокну, подсвечивая поверхность отражающей диафрагмы. Звуковые вибрации диафрагмы модулируют интенсивность света, отражающегося от диафрагмы, в определённом направлении. Затем промодулированный свет проходит через следующий пучок оптоволоконна к фотоприёмнику, который трансформирует свет в аналоговый или цифровой аудио-сигнал, готовый к трансляции или записи (рисунок 1.3).

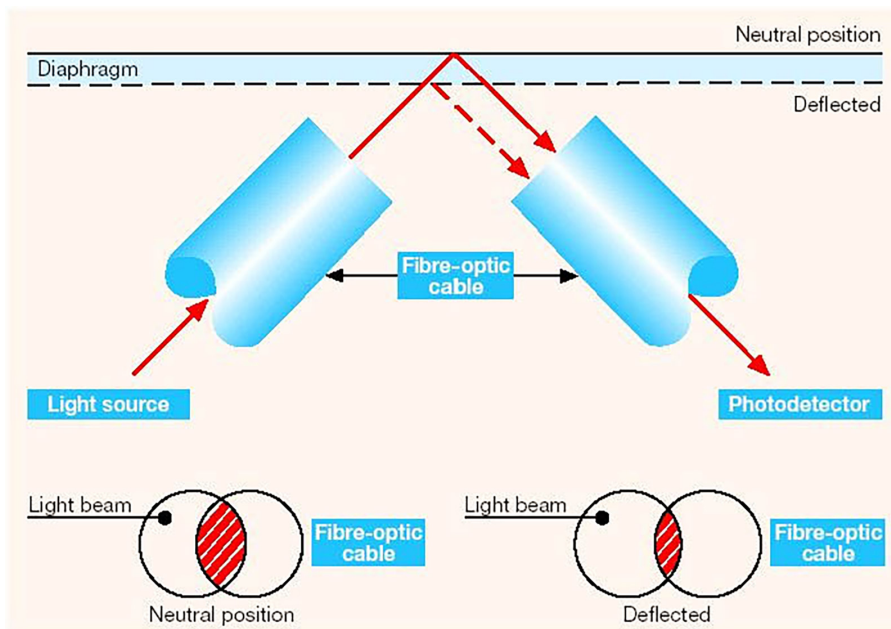


Рисунок 1.3 – Схема работы оптоволоконного микрофона]

Оптоволоконные микрофоны обладают высоким динамическим и частотным диапазонами и сравнимы с высокоточными классическими микрофонами. Оптоволоконные микрофоны (ОВМ) не реагируют на воздействие электрических, магнитных, электростатических или радиационных полей. Поэтому ОВМ идеально подходят для использования в местах, где использование традиционных микрофонов неэффективно или опасно (например, в газовых турбинах или в магнитно-резонансных томографах (МРТ)).

ОВМ надёжны, устойчивы к изменениям температуры и влажности рабочей среды, а также могут быть произведены для работы с конкретным импедансом. Дистанция между лазерным источником микрофона и его фотоприёмником может достигать нескольких километров без каких-либо предусилителей или других электронных устройств, что делает ОВМ пригодным для промышленного контроля и удалённого наблюдения.

ОВМ используются в очень узких сферах применения, например, в таких, как инфразвуковое наблюдение и фильтрация шума. Особенно они полезны в медицине: в радиологии медработники и пациент могут общаться в условиях мощного магнитного поля. Другая сфера применения — наблюдение за промышленным оборудованием, звуковая калибровка и измерение, высокоточная звукозапись и обеспечение правопорядка. [1]

1.1.3 Лазерный микрофон

Лазерный микрофон — устройство скрытого наблюдения, использующее лазерный луч для того, чтобы фиксировать звуковые вибрации в отдалённых объектах. Эта технология может быть использована для прослушки с минимальным риском обнаружения (рисунок 1.4).

Обычно объект, на который направляют луч, расположен внутри комнаты, где происходит разговор, и может быть любым предметом, способным вибрировать в ответ на колеба-

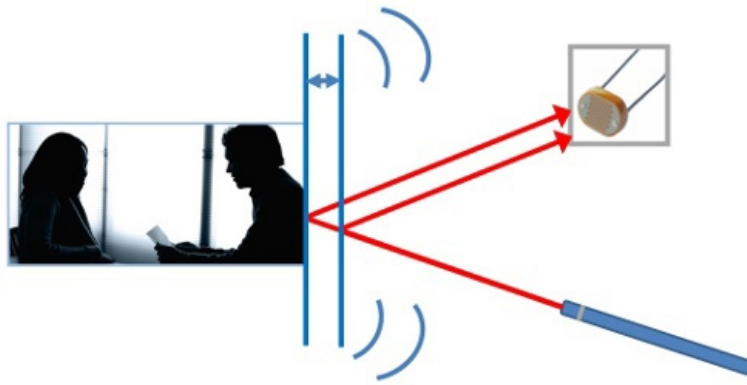


Рисунок 1.4 – Прослушка с помощью лазерного микрофона

ния давления, вызываемые шумами в комнате (например, картина на стене). Больше подходят объекты с гладкой поверхностью. Лазерный луч, будучи направленным в комнату через окно, отражается от объекта в приёмник, который конвертирует его в аудиосигнал. Также луч может быть отражён и от самого окна. Часто лазерные микрофоны изображаются в художественных фильмах как приспособления, используемые шпионами, поскольку они могут быть применены для улавливания звука на расстоянии. Лазерный луч наводится на поверхность оконного стекла или на другую плоскую поверхность, находящуюся под воздействием звука. Вибрации этой поверхности изменяют угол отражения луча, и движение лазерной точки возвращённого луча фиксируется и трансформируется в аудио-сигнал.



Рисунок 1.5 – Лазерный микрофон

В более надёжной и дорогой версии возвращённый свет разделяется и передаётся на интерферометр, который фиксирует движения поверхности по изменениям оптической длины пути отражённого луча. Эта версия требует использования крайне стабильного лазера и точной оптики. Мельчайшие изменения в дистанции, проходимой лучом после того, как он отразится от вибрирующего объекта, фиксируются интерференционно. Интерферометр конвертирует эти отклонения в изменения интенсивности, и при помощи электроники изменения преобразуются в сигналы, которые могут быть превращены в звук.

Владелец сайта GlobalSecurity.org Джон Пайк рассказал, что лазерные микрофоны были использованы для того, чтобы выяснить, действительно ли Осам Бен Ладен находился в хижине в городе Абботтабад в Пакистане, наряду со шпионскими беспилотниками и разведы-

вательными спутниками. Хотя в ЦРУ предполагали, что он прятался в ней на момент проведения операции по его ликвидации, они не могли получать визуальную информацию, подтверждающую это. Визуальные данные с разведывательных устройств были использованы, чтобы определить, сколько человек находилось в хижине, а затем при помощи лазерных микрофонов было установлено, что в ней находился ещё один человек, не замеченный ранее. Это было сделано при помощи лазеров, отражённых от оконных стёкол, которые сработали, как диафрагмы. Оперативные работники ЦРУ не могли расслышать, о чём говорили внутри, но они смогли различить отдельные голоса по высотам и интонациям. Исходя из этой информации, они пришли к выводу, что внутри был кто-то, не замеченный ранее, и это позволило им предположить, что Бен Ладен был внутри здания.

Тем не менее, существует контрмера в виде особых световых сенсоров, способных фиксировать свет, исходящий от луча. Стекло с волнистой поверхностью также может послужить защитой от прослушки лазерным микрофоном, поскольку он плохо работает с такой поверхностью. Существуют лазерные микрофоны, использующие лазерный луч и дым или пар для того, чтобы фиксировать вибрации в воздухе («Микрофон для фиксирования твёрдых частиц в потоке, функционально основанный на паре лазерных фотоэлементов и движущемся потоке дыма или пара на пути лазерного луча»). Колебания давления, вызванные звуковыми волнами, вызывают возмущения в дыму, которые, в свою очередь, вызывают изменения в количестве лазерного света, достигающего фотоприёмника [2].

1.2 Задание по самостоятельной работе

В рамках задания по самостоятельной работе необходимо:

1) Сделать выводы по результатам обсуждения конструкции лазерного микрофона на следующих форумах:

- <https://community.livejournal.com/-setecastronomy/3445.html?nojs=1>

- <http://biorezonans.mybb.ru/viewtopic.php?id=18>

2) Начертить блок схему лазерного микрофона вашей конструкции;

3) Сделать расчет оптической схемы по исходным данным, которые необходимы вашей конструкции в приближении геометрической оптики.

Исходные данные:

Длины волн – 0.44 мкм, 0.54 мкм, 0.63 мкм, 1.0 мкм, 2.0 мкм (здесь нужно выбрать конкретную марку лазера в том числе).

Распределение интенсивности света по сечению луча принять равномерным.

Максимальное расстояние до объекта облучения – 300 м.

Угол расхождения луча определяется, как отношение длины волны света к апертуре лазерного луча.

Максимальное изменение амплитуды вибрации в центре поверхности окна под действием громкого звука – 20 мкм.

Форма окна прямоугольная, размером 1.5 м x 2 м.

Размер пятна в фокусе линзы определяется следующим соотношением:

$$\Delta t \approx 1.22 \frac{\lambda}{D} \cdot f. \quad (1.1)$$

Скорость звука – 300 м/с.

Ветра нет.

4) Сделать обзор и привести аналоги готовых или разрабатываемых конструкций лазерных микрофонов;

5) Подготовить отчет согласно требованиям ОС ТУСУРа.

1.3 Контрольные вопросы

- 1) Какие устройства необходимы для оптоволоконного микрофона?
- 2) Как работает лазерный микрофон?
- 3) Как работает оптоволоконный микрофон?
- 4) Какие преимущества имеют оптоволоконные микрофоны перед традиционными микрофонами?
- 5) На какой длине волны лазера можно произвести незаметное прослушивание лазерным микрофоном?
- 6) Какие факторы неблагоприятно влияют на прослушивание лазерным микрофоном?

2 АНАЛИЗ ИСТОЧНИКОВ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ВИДЕОСЕНСОРОВ

Цель работы:

Определение параметров световых распределений, полученных от источников когерентного и некогерентного излучений с помощью видеосенсора камеры смартфона.

2.1 Краткие теоретические сведения

2.1.1 Пластиковое оптическое волокно

Первое пластиковое оптическое волокно было изготовлено еще в 1960-х годах компанией DuPont. Потери в первых пластиковых волокнах были на уровне 1000 дБ/км. Совершенствование технологии позволило снизить величину затухания до нескольких сотен дБ/км, что, тем не менее, не шло ни в какое сравнение с затуханием, которое было достигнуто в кварцевом волокне (около 1 дБ/км). К началу 1990-х кварцевое волокно стало активно использоваться для передачи на дальние расстояния, а в не протяженных низкоскоростных линиях связи главенствовали традиционные линии из меди. Все это привело к тому, что разработка и производство пластикового оптоволоконна практически прекратилось. Однако последующее увеличение потока передаваемой информации, появление все большего числа систем, требующих передачи цифрового сигнала на короткие расстояния, а также развитие автоматизации промышленных процессов, привело к тому, что оптическое волокно стало все больше использоваться в коротких линиях связи, особенно там, где медные линии не обеспечивали качественной передачи информации. При этом ставилась задача создать среду для передачи сигнала, обладающую всеми преимуществами оптического волокна, но в то же время имеющую конкурентоспособную стоимость в сравнении с медными линиями. И в этот момент разработчики снова обратили внимание на пластиковое оптическое волокно. Структура и особенности пластикового волокна. Пластиковое оптическое волокно представляет собой многомодовое оптоволоконно большого диаметра, сердцевина и оболочка которого изготовлены из полимерных материалов.

Химический состав используемых полимеров, геометрические размеры и профиль показателя преломления сильно варьировались на протяжении последнего полувека. Некоторые из разработок были стандартизированы. Так, стандарт IEC-60793-2-40 выделяет восемь типов пластикового волокна, отличающихся своей структурой и, как следствие, оптическими характеристиками. Однако наибольшее распространение получило пластиковое волокно с диаметром сердцевины и оболочки 980/1000 мкм и ступенчатым показателем преломления. Внешняя защитная оболочка обычно имеет диаметр 2,2 мм. В качестве материала сердцевины используется полиметилметакрилат (PMMA) – материал, известный также под названиями оргстекло, акрил, плексиглас и т.д.

Внешняя оболочка, как правило, изготавливается из полиэтилена (рисунок 2.1).



Рисунок 2.1 – Структура пластикового оптического волокна

В пластиковом оптоволокне, диаметр которого значительно превосходит диаметр кварцевого волокна (стандартное многомодовое кварцевое волокно имеет размеры 50/125 мкм), одновременно может распространяться огромное число пространственных мод оптического излучения. Это число может достигать нескольких миллионов. Числовая апертура пластикового волокна (NA) имеет величину около 0,5. Одномодовое пластиковое волокно не производится. Оптические свойства полимерных материалов обуславливают значительное возрастание потерь в пластиковом волокне по сравнению с кварцевым.

Типичный спектр затухания пластикового волокна изображен на рисунке 2.2 Как видно, минимумы затухания POF находятся в видимом диапазоне (520, 560 и 650 нм) и имеют значения от 100 до 200 дБ/км. Отметим, что при использовании вместо PMMA перфторированных полимеров в качестве материала сердцевины минимум потерь смещается в ИК диапазон (около 1300 нм). Большое количество распространяемых мод способствует межмодовой дисперсии и уширению распространяемого сигнала во времени.

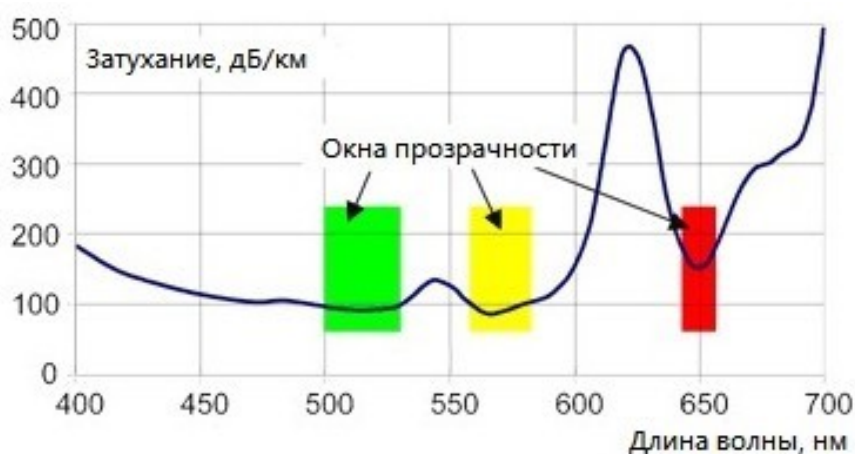


Рисунок 2.2 – Спектральная характеристика затухания в пластиковом оптическом волокне

Для систем оптической связи используются лазеры, у которых с одного торца резонатора излучается 5-20 мВт при ширине полоскового контакта 1020 мкм. Такое значение мощности является разумным компромиссом между величиной тока накачки, требуемой мощностью излучения и сроком службы излучателя. Если увеличить ширину полоскового контакта до 100 мкм, то излучение с одного торца может достигнуть 100 мВт.

Типичная диаграмма направленности оптического излучения ЛД показана на рисунке 2.3.

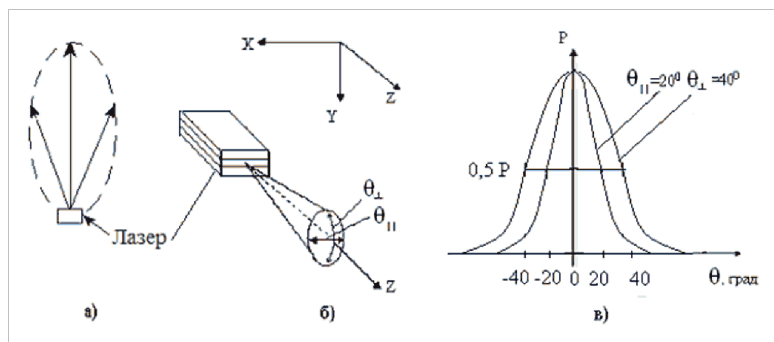


Рисунок 2.3 – Диаграмма направленности и характер оптического излучения лазерного диода: а–диаграмма направленности; б–конус излучения; в–зависимость излучаемой мощности от угла во взаимно перпендикулярных направлениях

2.2 Светоизлучающие диоды

Светодиод (LED – light emission diode) – это полупроводниковый элемент, в котором при прохождении электрического тока создается видимое глазу оптическое излучение. В настоящее время такие устройства используются практически в любом приборе: телефоны, бытовая техника, автомобили, светильники и многие другие. Led-элементы потребляют гораздо меньше энергии, что важно для энергосбережения.

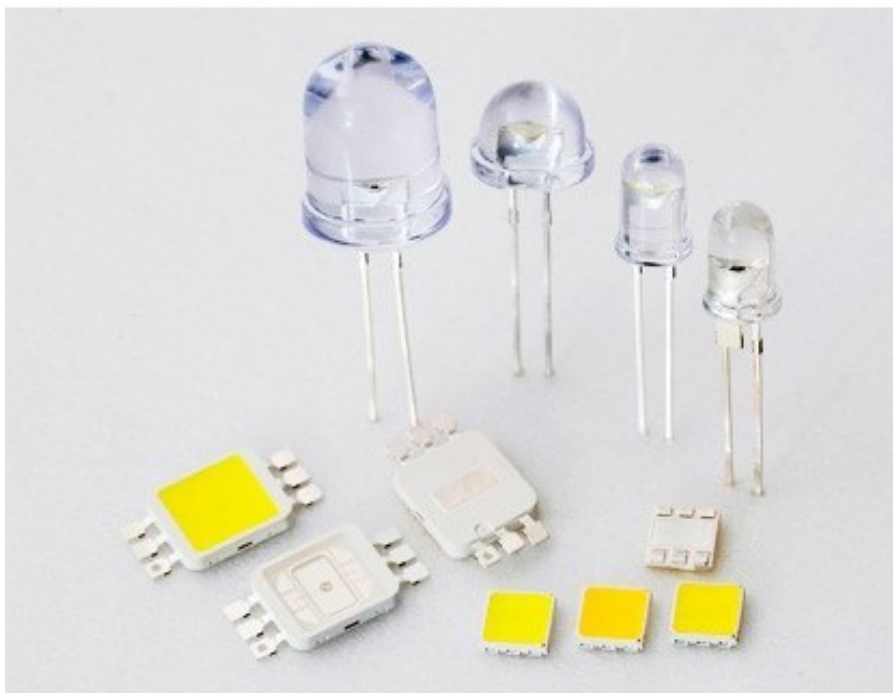


Рисунок 2.4 – Набор светодиодов



Рисунок 2.5 – Светодиоды разного спектра излучения

2.2.1 Описание установки

Для получения фотографий изображений от источников света использовались две схемы: рисунок 2.6 и рисунок 2.7. В качестве видеосенсора с высокими техническими характеристиками использовалась видеочамера смартфона. Были получены следующие фотографии.

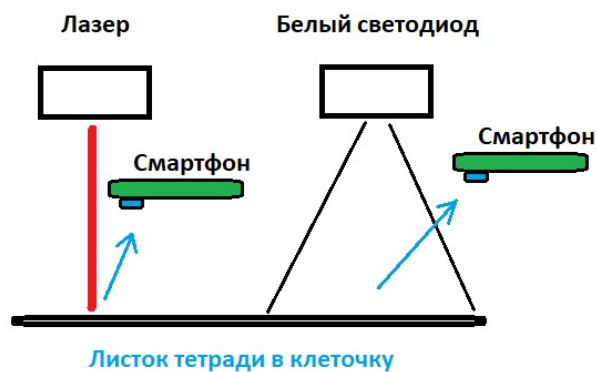


Рисунок 2.6 – Схема получения фотографий световых лучей от когерентного и некогерентного источников света

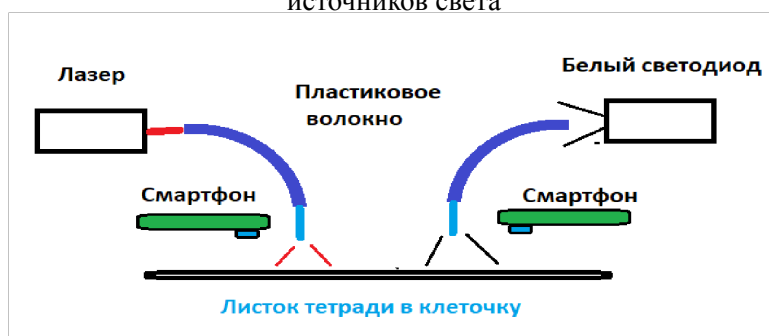


Рисунок 2.7 – Схема получения фотографий световых лучей от когерентного и некогерентного источников света после пластикового оптического волокна



Рисунок 2.8 – Распределение света в луче полупроводникового лазера на расстоянии 20 м



Рисунок 2.9 – Распределение света в луче белого светодиода на расстоянии 5 см

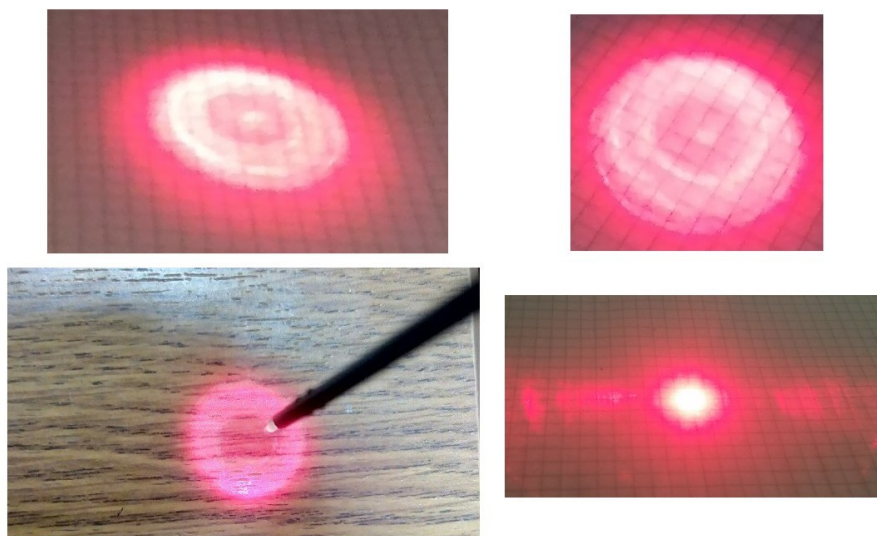


Рисунок 2.10 – Распределение света лазерного излучения после его прохождения через пластиковый волновод при разных условиях фотосъемки

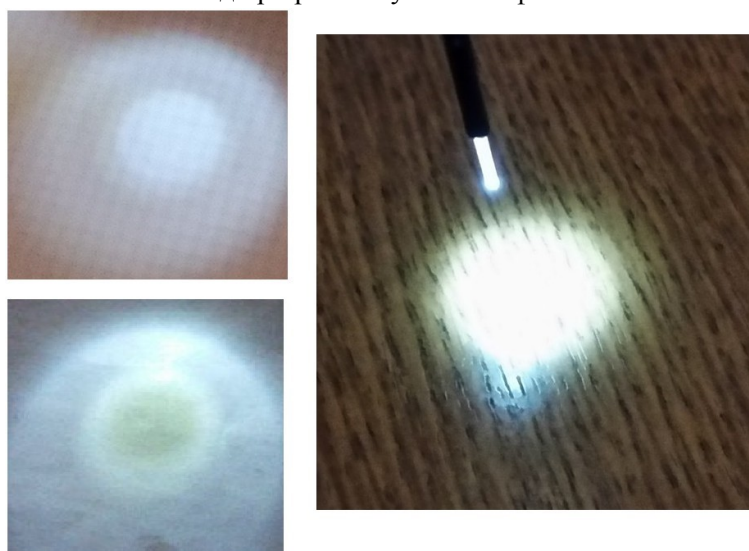


Рисунок 2.11 – Распределение света от белого светодиода после его прохождения через пластиковый волновод при разных условиях фотосъемки

Исходный набор изображений в бинарном формате представлен в архивном файле — для работы необходимо их брать оттуда. Для получения зависимостей необходимо использовать MathCad или другое программное обеспечение.

2.2.2 Получение сечения интенсивности света оптического пятна

Для того, чтобы получить сечение интенсивности света оптического пятна в программе Mathcad, необходимо проделать следующие действия:

1) Загрузить изображение.

Для загрузки изображения в среду Mathcad, необходимо разместить изображение в одну папку с файлом проекта или прописать путь в функции READ_IMAGE.

2) Занесем изображение «Adres» в переменную Mass и отобразим ее (рисунок 2.12):

$$\text{Mass} := \text{READ_IMAGE}(\text{"Adres"})$$



Mass

Рисунок 2.12 – Вывод изображение светового пятна в программе Mathcad

3) Получим параметры изображения из массива Mass, а именно высоту и ширину изображения:

$H := \text{rows}(\text{Mass}) - 1$ – ширина;

$L := \text{cols}(\text{Mass}) - 1$ – высота.

4) Получим график интенсивности света по горизонтали:

$\text{Sechenie} := \text{floor}\left(\frac{H}{2}\right) - 20$;

$i := 0..H$;

$j := 0..L$.

Из данных приведенных выше создадим массив Mass2, выведем на экран (рисунок 2.13) и построим график по сечению(рисунок 2.14):

$\text{Mass2}_{i,j} := \text{if}(i = \text{Sechenie}, 255, \text{Mass}_{i,j})$.



Mass2

Рисунок 2.13 – Вывод изображения «Adres» с горизонтальным сечением в среде Mathcad

5) Поскольку по высоте пятно находится не по центру изображения, поэтому необходимо подобрать высоту горизонтального сечения:

$\text{Sechenie} := \text{floor}\left(\frac{H}{2}\right) - 0$

$\text{Mass2}_{i,j} := \text{if}(i = \text{Sechenie}, 255, \text{Mass}_{i,j})$

Выведем на экран получившиеся изображения (рисунки 2.15-2.16):

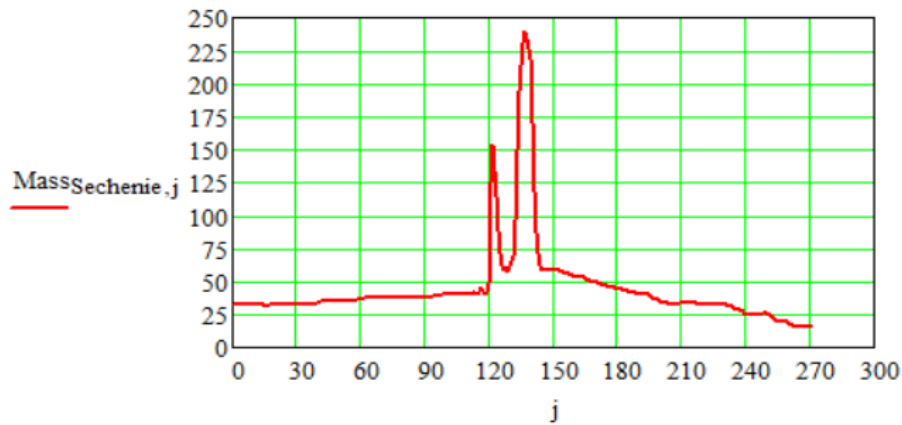


Рисунок 2.14 – График интенсивности по центру сечения изображения



Mass2

Рисунок 2.15 – Вывод изображения «Adre» с горизонтальным сечением смещенным на центр пятна в среде Mathcad

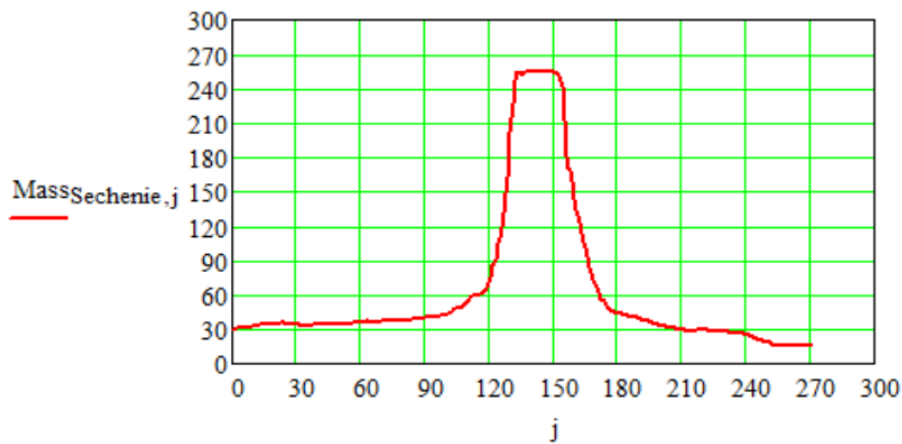


Рисунок 2.16 – График интенсивности по центру сечения пятна

2.3 Задание по самостоятельной работе

1) Получить по двум координатам графики зависимостей интенсивности света по сечению луча (рисунок 2.8) (два лазера). Определить по ним угловую расходимость источников излучения.

2) Получить по двум координатам графики зависимостей интенсивности света по сечению луча светодиода – рисунок 2.9. Определить по ним угловую расходимость источника излучения.

3) Исследовать и построить зависимости распределения когерентного излучения света, прошедшего через пластиковый волновод с целью выявления работы, как видеосенсора, так и пластикового волновода — рисунок 2.10.

4) Исследовать и построить зависимости распределения некогерентного излучения света, прошедшего через пластиковый волновод с целью выявления работы, как видеосенсора, так и пластикового волновода — рисунок 2.11.

5) Сделать выводы и оформить отчёт.

Примечание:

Исходные фотографии и пример получения графиков сечений, находятся в прилагаемом архивном файле, который выдает преподаватель. Пароль от архива: tusur.

2.4 Контрольные вопросы

- 1) Какой диаметр сердцевины у пластикового оптического волокна?
- 2) В чем различие между пластиковым и кварцевым оптическими волокнами?
- 3) Какие параметры влияют на величину затухания в пластиковом оптическом волокне?
- 4) Какую числовую апертуру имеет пластиковое оптическое волокно?
- 5) Назовите окна прозрачности для пластикового оптического волокна.
- 6) Чем светодиод отличается от лазерного диода?
- 7) Почему при съемке пятна от лазера, на фотографии пятно выглядит белым?
- 8) Какие параметры необходимо учесть при получении сечения интенсивности света оптического пятна?

3 РАСЧЕТ ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕТА В ФОКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ ЛИНЗЫ ДЛЯ ТРАНСПАРАНТА С ПРЯМОУГОЛЬНЫМИ ОТВЕРСТИЯМИ

3.1 Краткие теоретические сведения

Оптическая схема когерентно-оптического устройства представлена на рисунке 3.1.

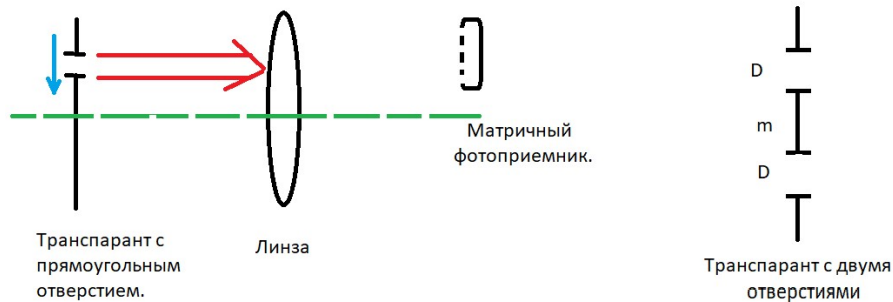


Рисунок 3.1 – Оптическая схема расположения транспаранта и матричного фотоприемника на фокусном расстоянии от линзы

В этой схеме когерентный свет падает на транспарант с отверстием, после которого он идет на линзу, а затем в фокальной плоскости детектируется фотоматрицей. Требуется определить распределение света на матричном фотоприемнике, когда используется транспарант с двумя одинаковыми отверстиями размером D и расстоянием между ними m , причем весь транспарант может смещаться по вертикали вниз на расстояние L . В качестве примера, приведем расчет в системе Mathcad для транспаранта с одним отверстием. Для существенного ускорения расчетов, необходимо использовать дискретное преобразование Фурье в виде `fft` – функции, элементы входного вектора должны быть обязательно кратны 2, согласно ее описанию в справочном документе.

Определим число элементов вектора — длина транспаранта:

$$N := 1024$$

Зададим индекс вектора:

$$i := 0..N - 1$$

Установим смещение от оптической оси и размер отверстия на транспаранте:

$$zadergka := 100$$

$$dlitelnost := 10$$

Сформируем функцию транспаранта с использованием условного оператора:

$$\text{Signal}_i := \text{if}(i \geq zadergka \wedge i \leq zadergka + dlitelnost, 1, 0)$$

В результате получим распределение света на входе оптической линзы в следующем виде (рисунок 3.2):

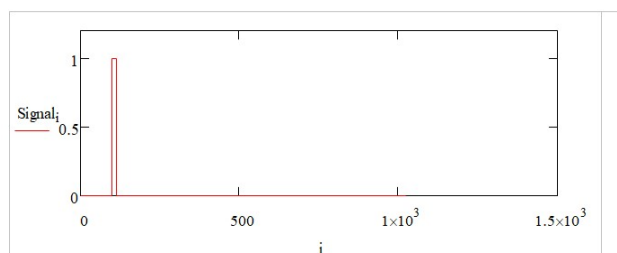


Рисунок 3.2 – Распределение функции транспаранта

Чтобы получить распределение света на выходе линзы в ее фокальной плоскости, необходимо использовать функцию fft:

$$\text{SpektrKomplex} := \text{fft}(\text{Signal})$$

Однако здесь, выходной вектор будет комплексный, описывающий распределение электрического поля световых волн. Чтобы получить интенсивность света, необходимо получить квадрат модуля:

$$j := 0 \dots \text{rows}(\text{SpektrKomplex}) - 1$$

$$\text{MoshnostSpektra}_j := (|\text{SpektrKomplex}_j|)^2$$

При этом, необходимо ввести новый индекс вектора j , поскольку после дискретного преобразования число отсчетов уменьшается в два раза для этой функции, согласно ее описанию. В результате можно получить симметричную половину распределения света в фокальной плоскости линзы относительно оптической оси (рисунок 3.3):

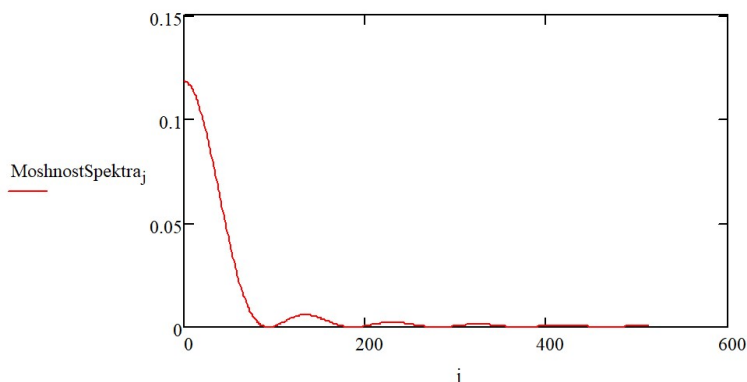


Рисунок 3.3 – Симметричная часть светового распределения в фокальной плоскости линзы от транспаранта с одним отверстием размером $D=10$

3.2 Задание по самостоятельной работе

Для выполнения задания необходимо изучить влияние размера отверстия на ширину светового пятна в фокальной плоскости линзы.

Также необходимо выполнить;

- Сформировать функцию второго транспаранта с двумя отверстиями, выбрав вариант из таблицы 3.1.

Таблица 3.1 – Варианты заданий

Номер варианта	D	m	L
1, 8, 15	20	20	15~25
2, 9, 16	15	82	15~35
3, 10, 17	17	26	15~45
4, 11, 18	18	28	9~15
5, 12, 19	12	25	8~25
6, 13, 20	14	24	12~25
7, 14, 21	15	23	5~25

- Получить распределение света для второго транспаранта, причем меняя L в указанных пределах, получить зависимости.

- Сделать выводы и сформировать отчет с графиками, документом Mathcad.

3.3 Контрольные вопросы

- 1) Что такое транспарант?
- 2) Что происходит со светом после того, как он проходит через транспарант с отверстием?
- 3) Как формируется функция транспаранта?
- 4) Чем когерентная оптическое устройство будет отличаться от некогерентного?
- 5) Что будет происходить с распределением функции транспаранта при изменении параметра L ?
- 6) Чем будет отличается световое распределение транспаранта с двумя отверстиями от транспаранта с одним отверстием?
- 7) Как влияет размер отверстия транспаранта на ширину светового пятна в фокальной плоскости линзы?

4 РАСЧЕТ КОГЕРЕНТНО-ОПТИЧЕСКОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В ОПТИЧЕСКОМ КАСКАДЕ

4.1 Краткие теоретические сведения

Оптическая схема когерентно-оптического устройства представлена на рисунке 4.1.

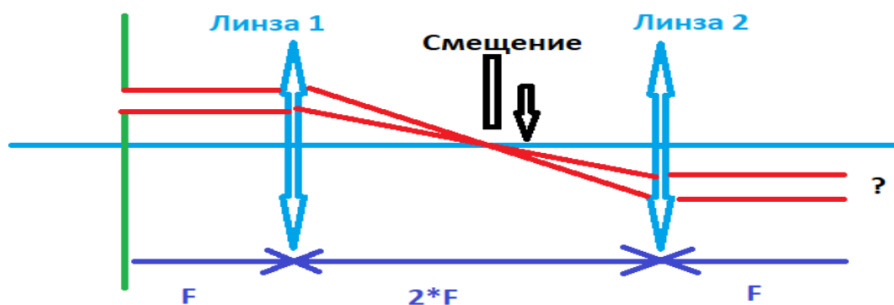


Рисунок 4.1 – Оптическая схема расположения пространственного фильтра, перекрывающего часть спектра в зависимости от смещения

В этой схеме когерентный свет падает на транспарант с отверстием, после которого он идет на линзу, а затем в фокальной плоскости частично или полностью перекрывается пространственным фильтром. Требуется определить распределение света на матричном фотоприемнике, расположенном в фокальной плоскости линзы 2. В качестве примера, приведем расчет в системе Mathcad для входного транспаранта с одним отверстием, расположенного перед линзой 1. Для существенного ускорения расчетов, необходимо использовать дискретное преобразование Фурье в виде `cfft` - функции.

В Mathcad входят два типа функций для дискретного преобразования Фурье: `fft/iff` и `cfft/icfft`. Эти функции дискретны: они берут в качестве аргументов и возвращают векторы и матрицы. Они не могут быть использованы с другими функциями.

Используйте функции `fft` и `iff`, если выполнены следующие два условия:

- аргументы вещественны;
- вектор данных имеет 2^m элементов.

Пара функций `cfft/icfft` не использует симметрию в преобразовании. По этой причине необходимо использовать их для комплексных данных. Так как вещественные числа – подмножество комплексных чисел, можно также использовать пару `cfft/icfft` для вещественных чисел. Второе условие требуется, потому что пара функций `fft/iff` использует высоко эффективный алгоритм быстрого преобразования Фурье. Для этого вектор аргумента, используемого с `fft`, должен иметь 2^m элементов. В функциях `cfft/icfft` использован алгоритм, который допускает в качестве аргументов как матрицы, так и векторы произвольного размера. Когда эта пара функций используется с матрицей в качестве аргумента, вычисляется двумерное преобразование Фурье.

Обратите внимание, что, если использована функция `fft` для прямого преобразования, необходимо использовать функцию `iff` для обратного. Аналогично, если для прямого преобразования использована `cfft`, то для обратного необходимо использовать `icfft`.

Различные формулировки определения преобразования Фурье используют различные нормировочные коэффициенты и соглашения о знаке перед мнимой единицей в показателе экспоненты прямого и обратного преобразований. Функции `fft`, `iff`, `cfft` и `icfft` используют $1/\sqrt{N}$ как нормировочный коэффициент и положительный показатель степени в прямом преобразовании [3]. Функции `FFT`, `IFFT`, `CFFT` и `ICFFT` используют $1/N$ как нормировочный коэффициент

и отрицательный показатель степени в прямом преобразовании. Необходимо использовать эти функции попарно. Например, если используется CFFT в прямом преобразовании, необходимо использовать ICFFT в обратном.

cfft – это быстрое преобразование Фурье комплексных данных, в которое возвращает массив того же размера, что и аргумент.

Расчеты аналогичны предыдущему заданию, но используют немного другие функции cfft – прямое преобразование Фурье, icfft – обратное преобразование Фурье, соответствующее cfft, возвращает массив того же размера, что и аргумент.

4.1.1 Пример выполнения функций cfft и icfft в Mathcad

Для выполнения задания введем начальные переменные в mathcad:

$N := 1024$

$L := 35$

$i := 0..N-1$

$D := 20$

Определим сигнал на входной плоскости первой линзы (рисунок 4.2):

$Signal_i := \text{if}[L \leq i \leq (L + D), 1, 0]$

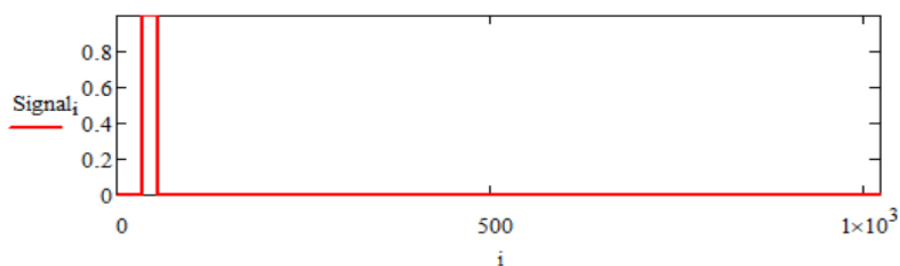


Рисунок 4.2 – Сигнал на входе первой линзы

Далее определяем распределение света в уже в фокальной плоскости первой линзы.

$\text{Complex_Linza1} := \text{cfft}(\text{Signal})$ – комплексный спектр электромагнитной волны.

$j := 0..\text{rows}(\text{Complex_Linza1})-1$.

$\text{Svet_Linza1}_j := (|\text{Complex_Linza1}_j|)^2$ – интенсивность света

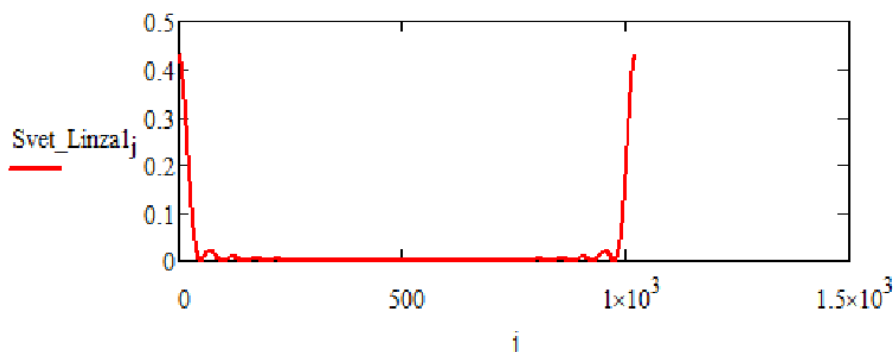


Рисунок 4.3 – Интенсивность света в фокальной плоскости линзы 1

Далее осуществляем смещение шторку (рисунок 4.1) в фокальной плоскости первой линзы.

$\text{smex} := 20$ – величина смещения по вертикали от начала оптической оси.

$\text{Filtr}_j := \text{if}(j \geq \text{smex} \wedge j \leq \text{rows}(\text{Svet_Linza1}) - \text{smex}, 0, 1)$.

После смещения осуществляется фильтрация оптического излучения в фокусе линзы.

$\text{ComplexF_Linza1}_j := \text{Complex_Linza1}_j \cdot \text{Filtr}_j$ – комплексный спектр электромагнитной волны.

$\text{SvetF_Linza1}_j := (|\text{ComplexF_Linza1}_j|)^2$ – интенсивность света.

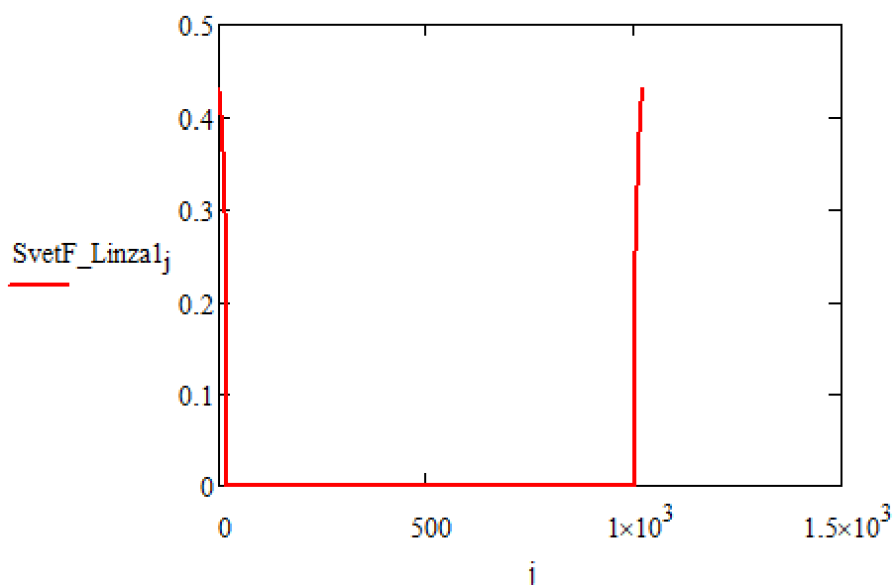


Рисунок 4.4 – Интенсивность света в фокальной плоскости линзы 1 после использования пространственного фильтра

Определим оптическое излучение на выходе второй линзы.

$\text{ComplexF_Linza2} := \text{icfft}(\text{ComplexF_Linza1})$ – комплексный спектр электромагнитной волны.

$\text{SvetF_Linza2}_j := (|\text{ComplexF_Linza2}_j|)^2$.

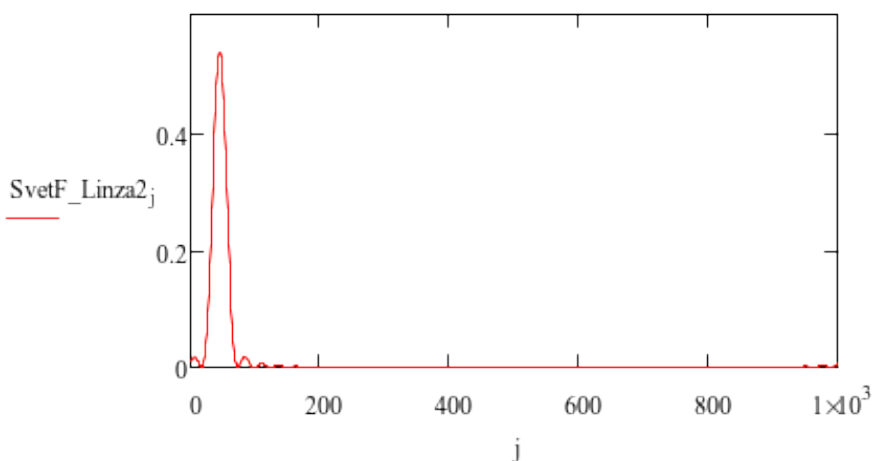


Рисунок 4.5 – Интенсивность света в фокальной плоскости линзы 2 после использования пространственного фильтра

4.2 Задание по самостоятельной работе

В рамках индивидуального задания необходимо:

- изучить влияние величины смещения пространственного фильтра на форму оптического распределения на выходе линзы 2;
- сформировать функцию второго транспаранта с двумя отверстиями, выбрав вариант из таблицы 4.1, аналогично предыдущему практическому заданию. Построить зависимости.

Таблица 4.1 – Варианты выполнения заданий

Номер варианта	D	m	L
1, 8, 15	20	20	15-25
2, 9, 16	15	28	15-35
3, 10, 17	17	26	15-45
4, 11, 18	18	28	9-15
5, 12, 19	12	25	8-25
6, 13, 20	14	24	12-25
7, 14, 21	15	23	5-25

- Сделать выводы и сформировать отчет с графиками и документом Mathcad.

4.3 Контрольные вопросы

- 1) Что такое пространственный фильтр и как он влияет на распределение света?
- 2) Как будет выглядеть интенсивность света в фокальной плоскости линзы, после использования пространственного фильтра и почему?
- 3) Что делает функция cfft в Mathcad?
- 4) Что делает функция icfft в Mathcad?
- 5) В чем разница между функциями cfft/icfft и fft/iff?
- 6) Как на вход линзы задать сигнал синусоидальной формы?

5 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЛИНЕЙКИ ФОТОПРИЕМНИКА В АКУСТООПТИЧЕСКОМ АНАЛИЗАТОРЕ СПЕКТРА

5.1 Краткие теоретические сведения

Оптическая схема когерентно-оптического устройства представлена на рисунке 5.1.

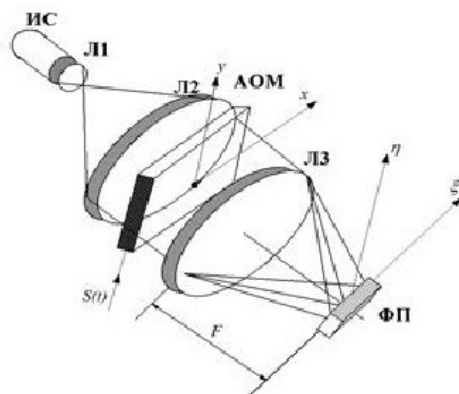


Рисунок 5.1 – Оптическая схема акустооптического анализатора спектра

Спектральный анализ основан на трансформирующих свойствах линзы и представляет собой наиболее естественную процедуру обработки сигналов в оптических системах. В ее состав входят: источник освещения - лазер, коллиматор, состоящий из пары сферических линз Л1 и Л2, АОМ, в который вводится подлежащий спектральному анализу электрический сигнал $S(t)$, трансформирующая линза Л3, выполняющая пространственное преобразование Фурье. В фокальной плоскости этой линзы наблюдается спектр сигнала, для регистрации которого обычно применяются ФП того или иного типа. В качестве трансформирующей могут быть использованы также цилиндрическая линза или астигматическая пара линз. При этом вдоль оси x распределение дифрагировавшего на АОМ света представляет спектр сигнала, а вдоль оси y строится в определенном масштабе изображение апертуры АОМ.

Для соответствующих расчетов, параметры дифракции можно получить по ниже приведенной ссылке: Брэгговский угол определяется зависимостью:

$$\sin \theta_B = \lambda_0 / 2\Lambda. \quad (5.1)$$

В режиме дифракции Брэгга необходимо выполнение условиям:

$$i \gg \Lambda^2 / \lambda. \quad (5.2)$$

Тонкая решетка, называется решеткой Рамана-Ната, а толстой, решетка Брэгга. На основе этих эффектов создаются модуляторы и дефлекторы света [4].

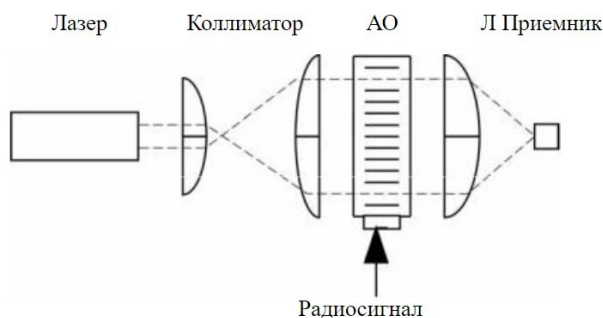


Рисунок 5.2 – Проекция конструкции акустооптического анализатора спектра на плоскость

5.2 Задание по самостоятельной работе

Задание 1.

Используя функционал практической работы №3 ввести гармонический импульсный сигнал вместо импульса и определить зависимость положения максимума интенсивности света в фокальной плоскости линзы от частоты гармонического сигнала.

Задание 2.

Определить разрешающую способность оптической системы (отличие одного сигнала от другого на минимальную частоту) для использования линейки дискретных фотодиодов в фокальной плоскости линзы, необходимых для определения частоты сигнала, при одинаковом размере одного из фотодиодов для трех разных линеек с размерами в виде 4, 10, 40 отсчетов, каждый.

- Сделать выводы по проделанной работе.
- Составить отчет по правилам оформления ТУСУРа.

5.3 Контрольные вопросы

- 1) Что такое акустооптический анализатор спектра?
- 2) Какие элементы входят в состав оптической схемы акустооптического анализатора спектра?
- 3) Какие условия необходимы для получения дифракции Брэгга?
- 4) Чем отличается решетка Брэгга от Рамана-Ната?
- 5) Как в акустооптическом модуляторе образуется решетка?
- 6) Что в оптической системе делает коллиматор?

6 ФИЛЬТРАЦИЯ 2D ИЗОБРАЖЕНИЙ

6.1 Краткие теоретические сведения

В реальности транспарант располагается в на плоскости. Представляет определенный интерес осуществить фильтрацию 2D изображений и определить типы фильтров, которые изменяют отфильтрованное изображение (рисунок 6.1).

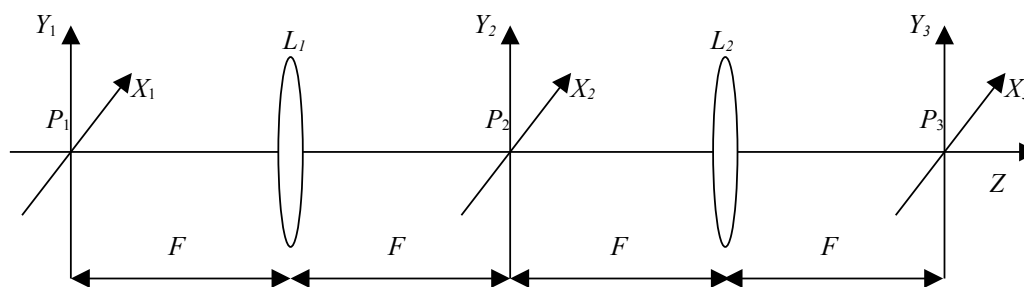
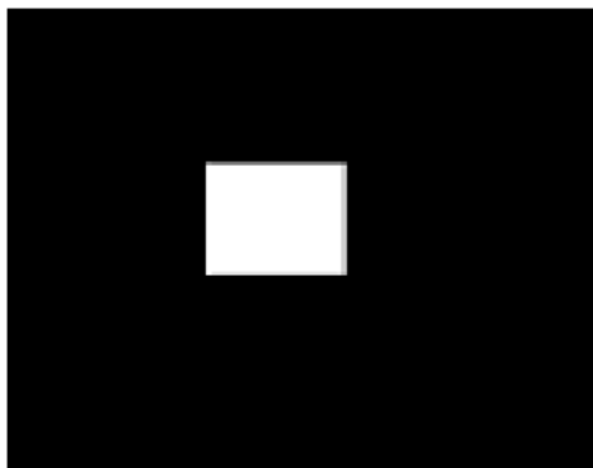


Рисунок 6.1 – Оптическая схема Фурье-преобразования

6.2 Пример когерентнооптической 2D пространственной фильтрации

В программе Mathcad загружается изображение Test3.bmp с помощью команды READBMP (рисунок 6.2) и считываем размеры изображения с помощью команд `rows` и `cols`.

```
Transparant:=READBMP(Test3.bmp)
```



Transparant

```
rows(Transparant) = 130
```

размер сторон

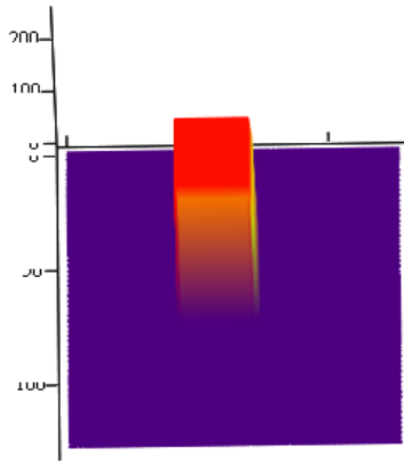
```
cols(Transparant) = 128
```

Рисунок 6.2 – Добавление изображения в Mathcad

Отобразим изображение на 3D графике

Произведем распределение света в фокальной плоскости линзы. Для этого зададим переменную **SpektrTransparant** и применим комплексное преобразование Фурье.

```
SpektrTransparant:=cfft(Transparant) – комплексный спектр электромагнитной волны.
```

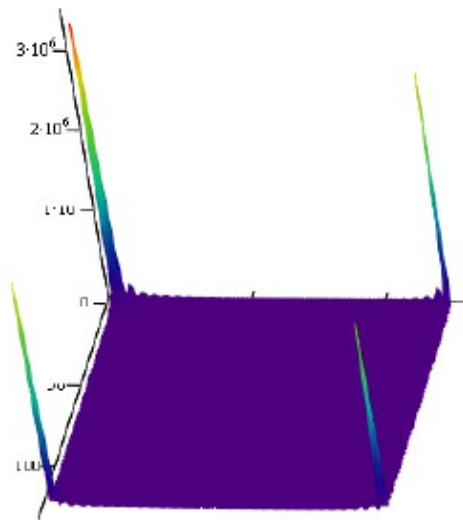


Transparent

Рисунок 6.3 – 3D представление транспаранта «Test3.bmp»

```
i:=0..rows(SpektrTransparent)-1;
j:= 0..cols(SpektrTransparent)-1.
```

$\text{Spektr}_{i,j} := (|\text{SpektrTransparent}_{i,j}|)^2$ – интенсивность света.
 Отобразим получившийся спектр на 3D графике (рисунок 5.4)



Spektr

Рисунок 6.4 – нтенсивность света в фокальной плоскости линзы L_1 , требующая коррекции из-за специфики использования быстрого преобразования Фурье

Приведем пространственный спектр к реальному (рисунок 5.5)

```
sp:=preobr1(Spektr)
```

```

preobr1(Matr) :=
  Nx ← floor( (rows(Matr) / 2) )
  Ny ← floor( (cols(Matr) / 2) )
  for i ∈ 0..Nx-1
    for j ∈ 0..Ny-1
      spi+Nx,j+Ny ← Matri,j
  for i ∈ 0..Nx-1
    for j ∈ 0..Ny-1
      spi,j ← MatrNx+i-1,Ny+j-1
  for i ∈ 0..Nx-1
    for j ∈ 0..Ny-1
      spi+Nx,j ← Matri,Ny+j-1
  for i ∈ 0..Nx-1
    for j ∈ 0..Ny-1
      spi,j+Ny ← Matri+Nx-1,j
  sp

```

Рисунок 6.5 – Приведение пространственного спектра к реальному

В итоге получаем скорректированное изображение в фокальной плоскости линзы (рисунок 5.6).

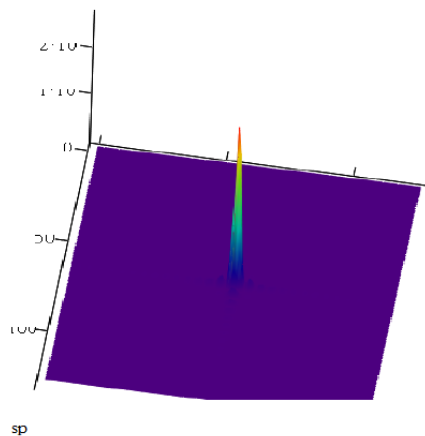


Рисунок 6.6 – Интенсивность света во второй фокальной плоскости линзы

Осуществим распределение света в фокальной плоскости второй линзы:

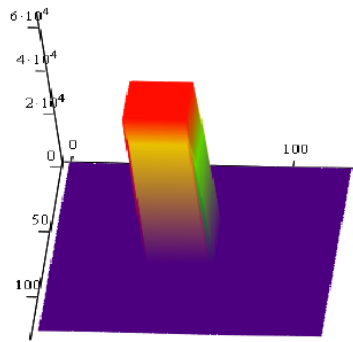
$\text{complex_Linza2} := \text{icfft}(\text{SpektrTransparant})$ – комплексный спектр электромагнитной вол-

НЫ.

$i := 0..\text{rows}(\text{complex_Linza2})-1$

$j := 0..\text{cols}(\text{complex_Linza2})-1$

$\text{Linza2}_{i,j} := (|\text{complex_Linza2}_{i,j}|)^2$ – интенсивность света.



Linza2

Рисунок 6.7 – Интенсивность света в фокальной плоскости второй линзы

6.3 Задание по самостоятельной работе

- Нарисовать в графическом редакторе несколько характерных изображений, соответствующих узкополосному и широкополосному пространственному спектру.

- Осуществить фильтрацию изображений, используя математическую модель оптического каскада для двух-линзовой конструкции, представленной в примере.

6.4 Контрольные вопросы

- 1) Чем изображение с узкополосным спектром отличается от изображения с широкополосным спектром?
- 2) Приведите примеры изображений с узкополосным спектром.
- 3) Приведите примеры изображений с широкополосным спектром.
- 4) Какая команда используется для загрузки изображения в программу Mathcad?
- 5) Как осуществляется фильтрация 2D изображений?

7 АКУСТООПТИЧЕСКИЙ МОДУЛЯТОР СВЕТА

Акустооптический модулятор (АОМ) предназначен не только для изменения интенсивности входящего в него лазерного луча, но и возможностью управления его направлением распространения. Модуляция может быть цифровой (ON / OFF) или аналоговой (синусоидальная, линейная, случайная и т.д.). Один и тот же акустический модулятор можно применять в разных системах модуляции, например, при гетеродинном способе модуляции. Однако, чаще всего встречается случай амплитудной модуляции. Модулятор имеет свои достоинства и недостатки. Один из недостатков, это искажения импульсов света, которые возникают при прохождении акустических фронтов через конечную апертуру падающего пучка.

Цель работы заключается в расчете основных параметров акустооптического модулятора.

7.1 Расчет акустооптического модулятора

В данном разделе приводится пример расчета акустооптического модулятора (рисунок 7.1).

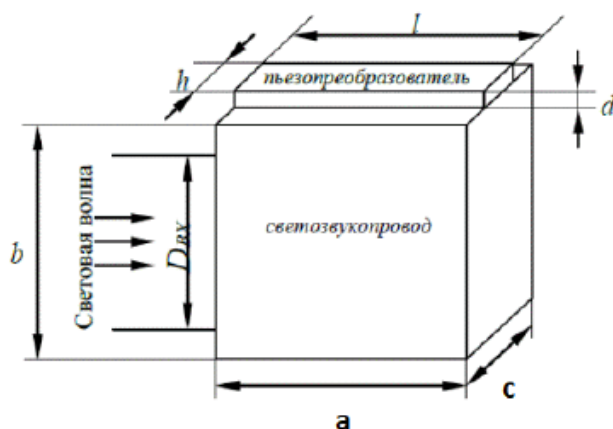


Рисунок 7.1 – Геометрическое изображение АОМ

Необходимо рассчитать:

- геометрические размеры пьезопреобразователя (ПП) и светозвукопровода (СвЗвПр);
- функциональные параметры: ширину входного потока пучка, $D_{ВХ}$

Исходные данные:

- длина волны светового потока пучка - $\lambda_0 = 0,63$ мкм;
- центральная частота - $f_0 = 50$ МГц;
- разрешающая способность - $\delta f = 1$ МГц;
- дифракционная эффективность - $\eta_{d0} = 90$ %;

Материал пьезопреобразователя – ниобат лития LiNbO_3 ;

- тип ультразвуковой волны (УЗВ) – продольная;
- относительная проницаемость среды - $\epsilon_r = 27,5$;
- плотность - $\rho = 4640$ кг/м³;
- коэффициент электромеханической связи - $K_{ЭЛ} = 0,17$;
- скорость звука в среде - $v_{ср} = 7330$ м/с;

Материал светозвукопровода – парателлуриит TeO_2 ;

- коэффициент оптического поглощения - $\alpha = 3$ Нп/м;
- показатель преломления среды - $n_0 = 2,26$;

- плотность среды – $\rho = 5720 \text{ кг/м}^3$;
- скорость распространения акустической волны – $v_{\text{ак}} = 650 \text{ м/с}$;
- коэффициент акустического поглощения – $\alpha_{\text{ак}} = 50 \text{ дБ/см}$;
- коэффициент акустического качества - $M_2 = 800 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$;
- упругооптический коэффициент – $\rho = 0,18$;
- агрегатное состояние среды – твердое.

Расчет геометрических размеров

Найдем длину волны ультразвукового поля в светозвукопроводе (7.1):

$$\Lambda_0 = \frac{v_{\text{ак}}}{f_0} = \frac{650}{50 \cdot 10^6} 13 \text{ мкм}, \quad (7.1)$$

где $v_{\text{ак}}$ – скорость распространения акустической волны в СвЗвПр.

Определим угол падения оптического луча на модулятор (7.2):

$$\sin \theta_{\text{Б}} \approx \theta_{\text{Б}} = \frac{\lambda_0}{2\Lambda_0 \cdot n_0} = \frac{0,63 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 13 \cdot 10^{-6} \cdot 2,26} = 0,011 \text{ рад}. \quad (7.2)$$

По условию дифракции Брэгга, параметр дифракции Q_0 на несущей частоте f_0 должен быть намного больше 1 (7.3):

$$Q_0 = \frac{2\pi \cdot l \cdot \lambda_0}{\Lambda_0^2} \gg 1. \quad (7.3)$$

Из выражения (7.3) находим l – длину пути оптического луча в ультразвуковом поле (7.4):

$$l \gg \frac{\Lambda_0^2}{2\pi \cdot \lambda_0} = \frac{(13 \cdot 10^{-6})^2}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,63 \cdot 10^{-6}} = 42,7 \text{ мкм}. \quad (7.4)$$

Если выбрать $l < 1,5 \text{ мм}$, то эффективность дифракции будет очень маленькой. С другой стороны при $l > 7 \text{ мм}$ появляется дополнительная неоднородность ультразвукового поля из-за естественной расходимости светового пучка. Учитывая эти условия, выбираем $l = 2 \text{ мм}$.

Выбрав оптимальную длину, вновь определим диапазон акустических частот (он не должен сильно отличаться от заданного) (7.5):

$$\Delta f = \frac{2v_{\text{ак}}^2 \cdot n_0}{f_0 \cdot \lambda_0 \cdot l} = \frac{2 \cdot 650^2 \cdot 2,26}{50 \cdot 0,63 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^{-3}} = 30 \text{ МГц}. \quad (7.5)$$

Найдем ширину оптического луча, взаимодействующего со звуковой волной, h ;

$$h \approx \frac{1}{8}l = \frac{1}{8} \cdot 2 \text{ мм} = 0,25 \text{ мм} = 250 \text{ мкм}. \quad (7.6)$$

ПП представляет собой резонатор, поэтому выбираем толщину его, равную половине длины волны возбуждаемого им ультразвукового поля;

$$d = \frac{\Lambda_0}{2} = \frac{13}{2} = 6,5 \text{ мкм}. \quad (7.7)$$

Размер СвЗвПр выбирается исходя из размеров ПП.

Длину СвЗвПр выбираем равную длине ПП $a = l = 2 \text{ мм}$.

Ширина СвЗвПр должна быть больше чем ширина ПП, $c > h$. Выбираем $c = 2 \text{ мм}$.

Высота СвЗвПр должна быть больше ширины входного светового пучка, $b > D_{\text{вх}}$.

$D_{\text{вх}}$ можно найти из выражения (7.8):

$$D_{\text{ВХ}} = \frac{v_{\text{ак}}}{6 \cdot \delta f} = \frac{650}{6 \cdot 10^6} = 0,7 \text{ мм.} \quad (7.8)$$

Тогда высоту СвЗвПр выбираем $b = 2 \text{ мм}$.

7.2 Задание по самостоятельной работе

Необходимо определить параметры модулятора для длины волны оптического излучения, которая определяется коэффициентом по номеру списка в группе №N и частоты синусоидального сигнала:

- длина волны оптического излучения $\lambda = 0.63 \text{ мкм} \cdot \text{№N}/10$;
- частота синусоидального сигнала $f = 50 \text{ МГц} \cdot \text{№N}/10$;
- остальные данные взять из примера расчета;
- сделать выводы по полученным данным;
- составить отчет.

7.3 Контрольные вопросы

- 1) Что такое акустооптический модулятор?
- 2) Где применяется акустооптический модулятор?
- 3) Какие функции выполняет пьезопреобразователь в акустооптическом модуляторе?
- 4) Каких размеров должен быть пьезопреобразователь и почему?
- 5) Из каких соображений выбирается размер светозвукопровода?

8 РАСЧЕТ ДЛИНЫ ОПТИЧЕСКОГО ПУТИ В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ

Цель работы: провести анализ влияния оптических свойств многомодового волокна на параметры оптического сигнала.

8.1 Краткие теоретические сведения

Внедрение оптических приборов и методов исследования в различные области науки и техники приводит к необходимости изучения всех свойств оптических материалов и технологии формообразования их преломляющих и отражающих поверхностей, а также создания новых технологий, направленных на увеличение производительности изготовления оптических элементов.

К оптическим материалам, используемым в передающих трактах оптических и оптико-электронных устройств, отличающихся сложностью схемных решений, предъявляется ряд специфических требований [5]. В первую очередь – это широкий спектральный диапазон, используемый для передачи информации. Долгое время основная информация в оптических приборах передавалась только в видимой области спектра, скорее все поэтому оптические бесцветные стёкла разрабатывались таким образом, что их область прозрачности лежала в интервале длин волн 380 нм-2400 нм. В дальнейшем появились оптические материалы (кварцевое оптическое стекло), прозрачные в ультрафиолетовой и ближней инфракрасной области спектра. К одним из первых изготовленных оптических стёкол относятся цветные стекла, которые долгое время использовались лишь в качестве декоративных, но в последнее столетие их часто используют для коррекции состава передаваемого излучения, т. е. устранения из состава проходящего излучения некоторого спектра.

Возрастающий интерес к работе в инфракрасной области спектра приводит к тому, что в качестве материалов для оптических элементов используются инфракрасные оптические стекла и кристаллы, как природные, так и искусственно выращенные. Кристаллы обладают рядом физикохимических особенностей, которые следует учитывать как при формообразовании оптических элементов, так и при эксплуатации оптических систем, в состав которых входят такие детали.

Появление новых направлений в оптике, таких как лазерная, волоконная оптика, голография, интегральная оптика, привело к созданию принципиально новых оптических и оптико-электронных устройств, отличающихся сложностью схемных решений, использующих оптические материалы с неизвестными ранее свойствами. К таким материалам относятся фотохромные стёкла, ситаллы, поликристаллы и ряд других, процесс разработки стёкол с особыми свойствами продолжается и в настоящее время.

Требования, как к качеству материалов, так и к точности конструктивных параметров оптических элементов постоянно возрастают. Требования к светотехническим характеристикам оптических элементов изображаются на чертежах. Следует помнить, что чертежи оптических элементов имеют ряд отличий от других чертежей, на которых изображены детали. На этих чертежах указываются требования допустимые категории и классы нормируемых параметров оптических материалов, из которых изготавливаются оптические элементы, светотехнические требования к качеству поверхности и точности изготовления формы и взаимного расположения преломляющих и отражающих поверхностей, а также контролируемые выходные характеристики оптических элементов.

Вместе с тем оптическая технология имеет ряд специфических особенностей. Одна из них, в частности, заключается в том, что допуски на основные конструктивные параметры оптических элементов, в отличие от деталей из других конструкционных материалов, связаны с

волновой природой света. Согласно критерию Релея, для обеспечения высокого качества изображения, волновые aberrации оптической системы не должны превышать $\lambda/4$. Рассчитываемые исходя из этого допуски на параметры элементов оказываются на 1-3 порядка выше по сравнению с назначаемыми на детали из конструкционных материалов.

Такие точности не могут быть достигнуты с помощью традиционных методов обработки, используемых в технологии приборостроения (точение, хонингование и др.). Единственным способом их обеспечения в настоящее время является поверхностный притир. При всей внешней простоте это сложный пограничный процесс, в котором участвует большое число технологических факторов требующих квалифицированного управления формообразованием.

Высокие требования к точности оптических элементов определяют необходимость использования прецизионных средств технологического контроля - интерференционных, фотоэлектрических, автоколлимационных, голографических, теневых и других. Специфика процессов механической обработки во многом определяется физико-химическими свойствами оптических материалов, которые отличаются хрупкостью, широким диапазоном твердости (от относительно мягких до близких к твердости алмаза), различной химической устойчивостью, вплоть до разрушаемых влагой атмосферы, способностью к упругой деформации при малых нагрузках. Некоторые имеют низкую термостойкость и могут разрушаться при незначительном температурном градиенте. Эти особенности свойств оптических материалов также усложняют процессы формообразования, ограничивают, а во многих случаях и исключают, использование традиционных для технологии приборостроения обрабатываемых и вспомогательных материалов, инструмента, способов закрепления заготовок и других.

Процесс формообразования оптических деталей часто состоит из нескольких этапов, каждый из которых включает в себя переходы, изменяющие габариты деталей, поэтому определение габаритов заготовок оптической детали является достаточно специфической операцией. При формообразовании оптических деталей используются различные инструменты и абразивы, вследствие чего необходимо рассчитывать размер заготовки для каждой операции с учётом величины удаляемого с заготовки материала. Расчёт осуществляется для каждой операции (предварительное шлифование, тонкое шлифование и полирование). Оптические элементы редко обрабатываются индивидуально, за исключением крупногабаритных деталей. Обычно одновременно обрабатывается несколько оптических элементов одной формы и размеров из одного материала, как при мелкосерийном, так массовом производстве.

Для этого положение оптические элементы фиксируется заданным способом на определённом приспособлении, такая фиксация деталей называется «сборка блока». Перед сборкой необходимо рассчитать расположение деталей на приспособлении для того, чтобы съём материала осуществлялся одинаково со всех деталей, и абразивы и смазочно-охлаждающая жидкость равномерно распределялась по всем поверхностям. Завершающей операцией формообразования является стачивание углов, которые образуются между поверхностями оптического элемента. Эта операция необходима для уменьшения напряжения в оптическом материале.

С усложнением оптических систем изменились и конструктивные формы поверхностей деталей. Появился класс деталей с не сферическими поверхностями - параболическими, гиперболоидическими, коническими и др. Особенность таких поверхностей заключается в наличии у них максимум одной си симметрии, что не позволяет использовать обработку методом притира в его классическом виде и существенно усложняет процесс формообразования. Возникает необходимость программирования износа по зонам поверхности. При этом для каждого типа поверхности, как сами программы, так и пути их реализации различны. Для формирования таких поверхностей и решения ряда других технологических задач используют физические методы обработки оптических материалов, в частности ионное полирование деталей в вакууме.

Многие компоненты оптических систем состоят из нескольких соединённых вместе деталей. Соединение осуществляют способами, которые отличаются от применяемых в техно-

логии приборостроения. Для этой цели используют склеивание специальными (оптическими) клеями, действие сил молекулярного сцепления, химическое взаимодействие поверхностных слоев и др.

8.1.1 Бесцветное оптическое стекло

Отличительные признаки оптического стекла.

Оптическим называют однородное стекло любого химического состава, которое обладает постоянством свойств во всей своей массе и их повторяемостью от плавки к плавке. Одним из главных отличительных признаков оптического стекла от промышленных стекол является однородность. Достигают ее специальными приемами механического перемешивания стекломассы во время варки и термической обработкой готового стекла – тонким оптическим отжигом. Следующим отличительным признаком оптического стекла считается прозрачность. Высоким качеством обладают стекла, показатель ослабления которых менее $4 \cdot 10^{-3} \text{см}^{-1}$, для некоторых систем такое качество неудовлетворительно, в этом случае применяются стекла с показателем ослабления $(1..2) \cdot 10^{-3} \text{см}^{-1}$. Для волоконнооптических линий необходимы сверхпрозрачные стекла ($2 \cdot 10^{-5} \text{см}^{-1}$ и менее). Третьим отличительным признаком оптических стекол является широкий интервал значений показателя преломления – от 1,44 до 2,35 и строгая воспроизводимость его величины независимо от времени и места изготовления стекла.

Типы и марки бесцветного оптического стекла.

Бесцветное стекло делится на две группы – кроны и флинты, в свою очередь внутри каждой группы стекла делятся на типы, а типы делятся на марки. В основу классификации положены значения показателя преломления и коэффициента дисперсии оптических бесцветных стекол. Признаком принадлежности к тому или иному типу является положение стекла на диаграмме $n_e - v_e$ (рисунок 8.1)

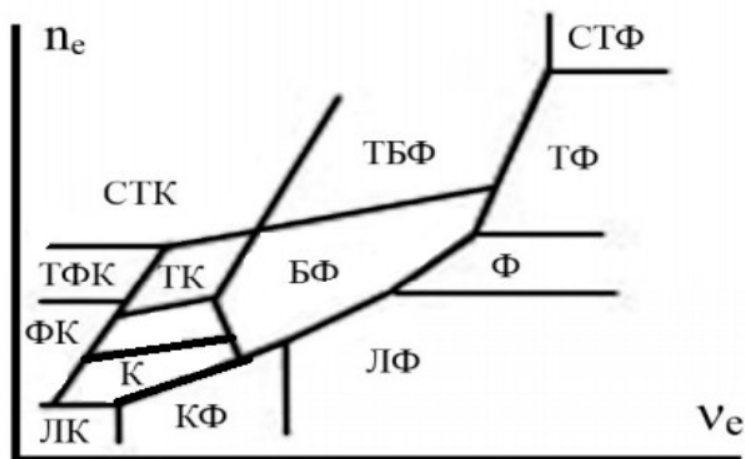


Рисунок 8.1 – Диаграмма «показатель преломления» - «коэффициент дисперсии»

Участки стекол одного типа, как правило, ограничены предельным содержанием главных компонентов, а именно ВаО и Al_2O_3 для кронов (К) и РbО для флинтов (Ф). Только стекла особых кронов (ОК) и особых флинтов (ОФ) могут располагаться на разных участках соответственно кронов и флинтов. Каждому стеклу определенного химического состава присвоена марка, состоящая из обозначения типа и порядкового номера разработки, например, К8, ТК14, Ф5, СТК12 и др. Основную массу в объеме всего перерабатываемого бесцветного стекла составляет стекло марки К8. По статистике из общей номенклатуры оптических стекол около 80 % объема производства относится всего к 10 маркам, 10 % к другим 10, менее используемым. Остальные 10 % соответствуют выпуску более чем 70 марок.

Показатели качества оптического бесцветного стекла.

Стекло одной марки, но разных партий варок может отличаться от установленных для него значений показателя преломления n_e и средней дисперсии $n'_F - n'_C$. Несоответствие фактических значений расчетным приводит к возникновению аберраций, исправление которых при конструировании оптической системы было сделано по номинальным значениям оптических постоянных. Более того, у линз изменяются фокусные расстояния и отрезки, что усложняет, иногда и исключает, возможность юстировки прибора. По величине отклонений n_e $n'_F - n'_C$ и ОСТ 3-3514-85 предусматривает 5 категорий оптического бесцветного стекла.

У оптических бесцветных стёкол нормируют также однородность партии по показателю преломления и средней дисперсии, то есть степень равенства их значений у всех заготовок. Установлены 4 класса однородности партии по показателю преломления и 2 класса однородности по средней дисперсии. Практически ни одно стекло нельзя сварить без пузырей. Пузыри представляют собой замкнутые полости в стекле, заполненные газом различной степени разрежения, или включающие в себя неоднородный материал. Состав газов зависит от химического и шихтного состава стекол и условий варки. Существует несколько источников образования пузырей: химические реакции, протекающие при термическом разложении сырьевых шихтных материалов, сам материал сосуда для варки, попадание в стекломассу инородных тел (кусочки керамики, частицы сажи).

Пузырность характеризуется диаметром наибольшего пузыря в заготовке и средним числом пузырей в 1 кг сырьевого стекла. Размер максимального пузыря существенен с точки зрения его видимости, а число пузырей с точки зрения вероятности из вскрытия на поверхности детали при формообразовании оптического элемента. Выделяют 9 категорий пузырности по размеру пузырей (1, 1а, 2, 3... 8). Также в зависимости от среднего числа пузырей диаметром более 0,03 мм в 1 кг сырьевого стекла предусмотрены 6 классов (А, Б... Е).

Пузыри вносят ряд дефектов в работу оптического прибора, в частности вызывают рассеяние света, образование местных ошибок, что не позволяет наносить на поверхность детали рисунок, портят чистоту зрения, активные тела лазеров при наличии включений разрушаются в процессе накачки. Для снятия напряжений внутри стекла, возникающих при остывании заготовок, используется операция тонкого отжига. Эта операция состоит из 4 этапов, заключительным является ответственное охлаждение. На этапе ответственного охлаждения отжигаемого стекла, в нем, из-за неизбежных перепадов температуры между внутренними и наружными областями, возникают напряжения. После охлаждения до комнатной температуры, внутренние области оказываются под действием растягивающих, а внешние – сжимающих напряжений. Если температура стекла постоянна, то напряжения не меняются. Поэтому они носят название постоянных или остаточных. Напряженное состояние стекла вызывает двойное лучепреломление. Оценивают его по разности хода обыкновенного и необыкновенного лучей поляризованного света отнесенной к единице (1 см) толщины стекла. Разность хода является мерой остаточных напряжений. Вместе с тем она характеризует качество отжига стекла. Связь между двойным лучепреломлением и напряжениями устанавливается через коэффициент пропорциональности B – оптический коэффициент напряжения (ОКН). У стекол разных марок ОКН различен. Поэтому при равных остаточных напряжениях величина двойного лучепреломления может быть неодинаковой. Остаточные напряжения в стекле являются источником оптической неоднородности и вызывают деформацию поверхностей заготовок в процессе механической обработки. Двойное лучепреломление способно вызвать двоение изображения подобно одноосному кристаллу, величина двоения будет невелика, а также искажение волнового фронта. По величине двойного лучепреломления, с учетом ОКН, стекло серии «0» по ГОСТу 3514-94, разделено на пять категорий (1-5). Выбор категории определяется требованиями к оптической однородности и точности формы поверхности детали. Например, стекло 1-й категории используют для изготовления объективов микроскопов, где должна быть исключена деформация поверхностей,

вызываемая остаточными напряжениями, а стекла 3-5 категории используют для изготовления сеток, шкал, лимбов, где требования к точности формы поверхностей низкие, так как детали работают в узком пучке света. Перемешивание стекло-массы в процессе варки не обеспечивает её однородности. В расплаве образуются потоки, направленные так, что вдоль оси сосуда стекло-масса поднимается вверх, захватывая пограничные слои с поверхности и стенок сосуда и в результате образуются химические неоднородности, называемые свилими. Свили представляются собой тонкие прослойки стекла, которые отличаются от остальной массы химическим составом, а, следовательно, и величиной показателя преломления. Так как эта разность мала, то невооруженным глазом свили не видны. Установлены 2 категории свильности, различающиеся условиями контроля и 2 класса (А и Б), различающиеся числом направлений просмотра заготовки. Класс А 11 предусматривает два взаимно перпендикулярных направления просмотра, класс Б – одно. Свили вызывают деформацию волнового фронта, проходящего через деталь, нарушают чистоту поля зрения, могут стать источником разрушения детали, вызывают астигматизм. Также нормируется оптическая однородность стекла, которая характеризует степень постоянства показателя преломления в объеме материала заготовки. При постоянной температуре и данной длине волны излучения, показатель преломления должен быть одинаков в каждом элементарном объеме стекла. Непостоянство данной характеристики стекла вызывает деформацию волнового фронта, следствием которой является снижение разрешающей способности системы, ухудшение качества изображения. Критерием оценки однородности стекла размером до 250 мм по величине разрешающей способности является численное значение угла φ разрешения дифрактометра, в параллельный пучок которого введена заготовка, к теоретическому углу φ_0 разрешения самой установки (ГОСТ 3518-80). В зависимости от величины этого отношения стекло разделено на 5 категорий (1-5). Распространение регулярного светового потока, вошедшего в стекло, сопровождается его последовательным ослаблением. Отношение потока Φ_x , прошедшего пути « \gg » к потоку Φ_0 в начале пути называют коэффициентом пропускания.

$$\tau_x = \frac{\Phi_x}{\Phi_0}. \quad (8.1)$$

Коэффициент пропускания подчиняется показательному закону:

$$\tau_x = e^{-\varepsilon x}. \quad (8.2)$$

Численное значение показателя ослабления ε (в см^{-1}) показывает долю светового потока, теряющегося при прохождении им слоя стекла толщиной 1 см.

Если $\varepsilon \ll 1$, то после разложения показательной функции в ряд можно принять: $\tau = 1 - \varepsilon x$.

Ослабление светового потока вызывают два независимых и по существу разных явления – поглощения и рассеяние. Поглощение заключается в том, что часть потока, проходящего через стекло необратимо переходит в собственную энергию атомов и молекул и, в итоге, в тепло. Рассеяние заключается в том, что часть энергии регулярного светового потока, который распространяется по законам геометрической оптики непрерывно уходит в виде диффузного потока, распространяясь по всем направлениям. Оно является следствием микрон неоднородностей среды, то есть неодинаковой величиной показателя преломления участков, находящихся на расстояниях, сравнимых с длиной волны или меньших её. Рассеяние света понижает яркость изображения и создает фон, который снижает контрастность изображения. Потери света в стекле нормируют через показатель ослабления ε_A , представляющий собой величину, обратную расстоянию, на котором потом излучения от источника А, образующего параллельный пучок, ослабляется в результате поглощения и рассеяния в 10 раз. Установлено 8 категорий (1 - 8), характеризующихся показателем ослабления.

8.1.2 Ввод излучения в оптическое волокно

На рисунке 8.2 представлено прохождение лучей света в оптическом волокне. Лучи света могут распространяться, как вдоль оси оптического волокна, так и под небольшим углом к ней. Из этого следует, что оптические пути распространения волокна одного и того же оптического импульса будут разными (рисунок 8.3).

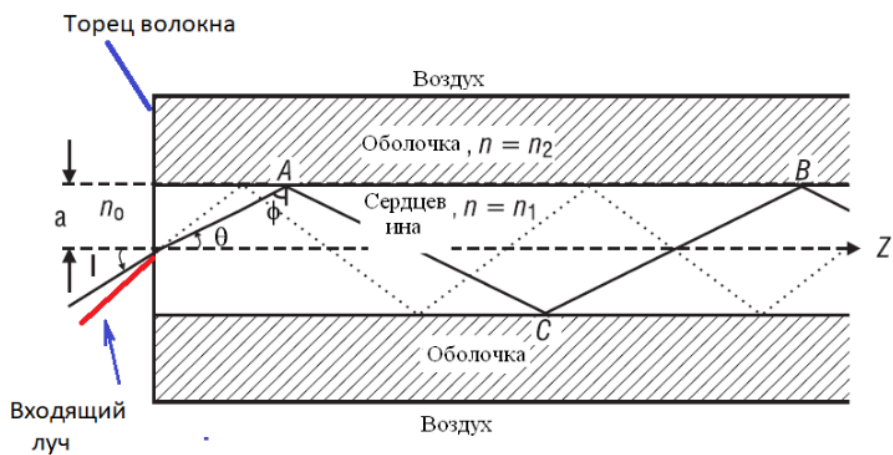


Рисунок 8.2 – Распространение луча света в оптическом волокне в приближении геометрической оптики

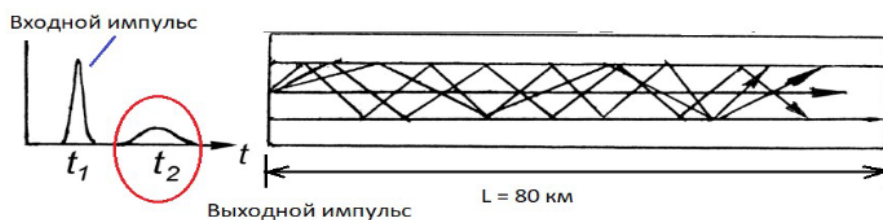


Рисунок 8.3 – Влияние среды распространения в виде оптической направляющей системы на длительность светового импульса

Вследствие этого, представляет определенный интерес оценка ухудшения пропускной способности оптической линии связи, если для нее используется не атмосфера, а оптическая направляющая среда в виде оптического волокна. Для расчетов, очевидно, что согласно распространению оптических лучей (рисунок 8.2), необходимо определить внутренний угол падения оптического луча в волокне с помощью закона Снеллиуса. Закон Снеллиуса описывает преломление света на границе двух прозрачных сред. Также применим и для описания преломления волн другой природы, например звуковых. Закон был открыт в начале XVII века голландским математиком Снеллиусом. Несколько позднее опубликован (и, возможно, независимо переоткрыт) Рене Декартом. Угол падения света на поверхность связан с углом преломления соотношением

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2, \quad (8.3)$$

где n_1 – показатель преломления среды, из которой свет падает на границу раздела; θ_1 – угол падения света – угол между падающим на поверхность лучом и нормалью к поверхности; n_2 – показатель преломления среды, в которую свет попадает, пройдя границ раздела; θ_2 – угол преломления света – угол между прошедшим через поверхность лучом и нормально к поверхности.

Если $n_1 \sin \theta_1 > n_2$, имеет место полное внутреннее отражение (преломленный луч отсутствует, падающий луч полностью отражается от границы раздела сред)

Следует заметить, что в случае анизотропных сред (например, кристаллов с низкой симметрией или механически деформированных твердых тел) преломление подчиняется несколько более сложному закону. При этом возможна зависимость направления преломленного луча не только от направления падающего, но и от его поляризации. Также следует заметить, что закон Снеллиуса не описывает соотношение интенсивностей и поляризаций падающего, преломленного и отраженного лучей. Закон Снеллиуса хорошо определен для случая «геометрической оптики», то есть в случае, когда длина волны достаточно мала по сравнению с размерами преломляющей поверхности, вообще же говоря работает в рамках приближенного описания, каковым и является геометрическая оптика.

8.2 Задание по самостоятельной работе

Для выполнения работы, необходимо: выбрать вариант, представленный в таблице 8.1 согласно списку группы; определить разницу во временной задержке переднего фронта оптического импульса для его лучей света распространяющихся под углом и вдоль оптической оси волновода, который лежит ровно на поверхности по всей длине.

Параметры многомодового волновода следующие:

- диаметр сердцевины $d = 50$ мкм;
- внутренний показатель преломления $n_1 = 1,47 - 1,57$;
- длина $L = 80$ км.

Параметры, которые зависят от устройства, осуществляющего ввод оптического сигнала в волокно:

Таблица 8.1 – Варианты для выполнения индивидуального задания

Номер варианта задания	Длина волны света λ мкм	угол падения θ (градусы)
1	0,44	12
2	0,44	10,2
3	0,44	9,25
4	0,44	8
5	0,53	12
6	0,53	10,2
7	0,53	9,25
8	0,53	8
9	0,63	12
10	0,63	10,2
11	0,63	9,25
12	0,63	8
13	1,01	12
14	1,01	10,2
15	1,01	9,25
16	1,01	8

- Сделать вывод о пропускной способности данной линии связи.
- Результаты расчетов оформить в отчете, согласно требованиям, предъявляемым к отчетам.
- Название файла отчета должно содержать фамилию и группу.

8.3 Контрольные вопросы

- 1) Какие требования предъявляются к оптическим материалам, используемым в передающих трактах оптических и оптико-электронных устройств?
- 2) Какие свойства отличают оптическое стекло от промышленных стекол?
- 3) Какие диапазоны длин волн прозрачности имеют оптические бесцветные стекла?
- 4) Какие материалы используются в качестве оптических элементов в инфракрасной области спектра?
- 5) Какие особенности формообразования оптических элементов следует учитывать при использовании кристаллов?
- 6) Какие новые направления в оптике привели к созданию принципиально новых оптических и оптико-электронных устройств?
- 7) Какие методы обработки используются для достижения высокой точности оптических элементов?
- 8) Какие особенности свойств оптических материалов усложняют процессы формообразования?
- 9) Какие особенности распространения оптических лучей в оптическом волокне и как это влияет на пропускную способность линии связи?
- 10) Что такое закон Снеллиуса и как он используется для описания преломления света на границе двух прозрачных сред?

9 ФОРМИРОВАНИЕ ЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ НА ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТАХ

9.1 Краткие теоретические сведения

9.1.1 Волноводные логические элементы

Волноводный модулятор представляет собой интерференционный прибор, осуществляющий амплитудную модуляцию входного оптического сигнала, представляющего собой линейно поляризованное световое излучение лазера. Входной волновод модулятора разветвляется на два параллельных канала, которые затем снова сливаются, образуя выходной волновод. Волновод изготавливается из материала, обладающего электрооптическим эффектом. Обе ветви волновода симметричны, поэтому входной световой сигнал на разветвлении делится на две равные по амплитуде волны, которые далее распространяются по параллельным каналам с относительным сдвигом фаз. Разность фаз этих волн определяется электрическим напряжением, приложенным к управляющим электродам. Логическая «1» отождествляется со значением напряжения U_0 , а двоичный «0» - с нулевым потенциалом. Таким образом, если напряжение U_0 приложено к четному числу управляющих электродов, то волны, сходящиеся в выходном разветвлении усиливают друг друга, образуя выходной оптический сигнал с амплитудой, практически равной амплитуде входного сигнала, который принимается за единичный сигнал. В противном случае волны практически полностью гасят друг друга, образуя нулевой выходной сигнал.

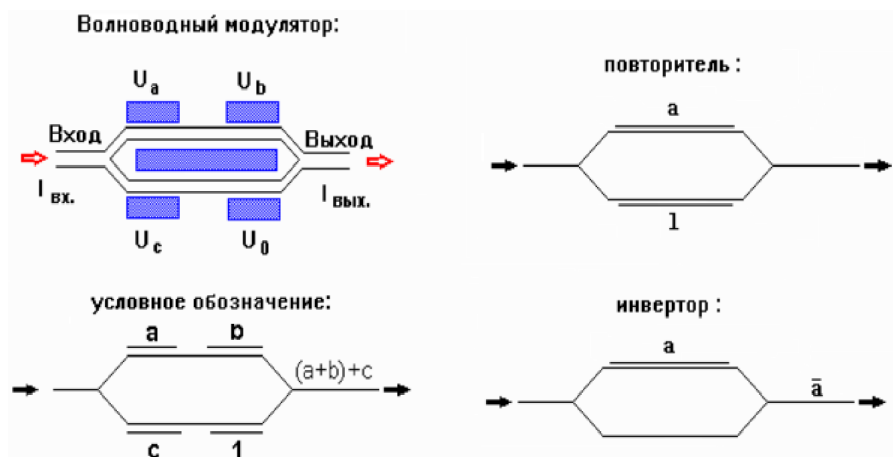


Рисунок 9.1 – Условные обозначения интегрально-оптических логических схема



Рисунок 9.2 – Реализация сложных логических функций

9.2 Задание по самостоятельной работе

- Используя функционал оптических логических элементов, реализовать на их основе аналог логической электронной схемы, представленной на рисунке 9.3.

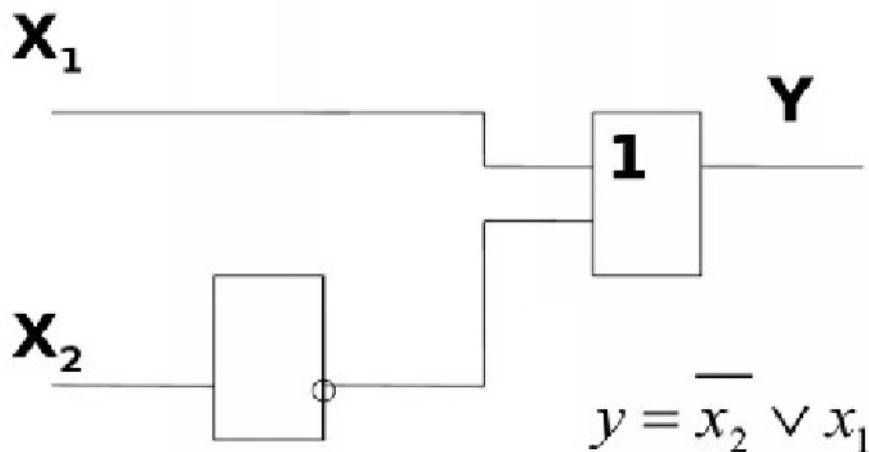


Рисунок 9.3 – Электронная логическая схема

- Используя оптическую созданную схему построить ее топологию с наличием управляющих электродов U_a, U_b, \dots аналогично, как это показано на рисунке 9.1. При этом на топологии должны быть указаны и проводники идущие от торцевого разъема к электродам (организация топологии, как на печатных платах).

- Оформить отчет и сделать выводы

9.3 Контрольные вопросы

- 1) Что представляет собой волноводный модулятор и как он работает?
- 2) Как входной световой сигнал делится на две волны в волноводе модулятора?
- 3) Как управляющие электроды влияют на разность фаз волн в волноводе?
- 4) Как определяется логическая «1» и «0» в волноводном модуляторе?
- 5) Как волны взаимодействуют друг с другом на выходе модулятора и как это влияет на выходной сигнал?

10 ПРОГРАММИРОВАНИЕ АДДИТИВНОЙ ФУНКЦИИ В ДВОИЧНОМ КОДЕ НА КВАНТОВОМ КОМПЬЮТЕРЕ, ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭМУЛЯТОРА QUIRK

Цель работы заключается в программировании простой математической функции на эмуляторе квантового компьютера.

Ввод исходных данных в квантовый компьютер зависит от их типа — цифровые (логические) в виде 0 и 1, либо аналоговые. Одна из проблем подобного ввода заключается в свойствах кубита — он имеет не только два вида данных действительных 0 и 1 и комплексных данных i , а также набор углов, которые представляются сферой Блоха рисунок 10.1

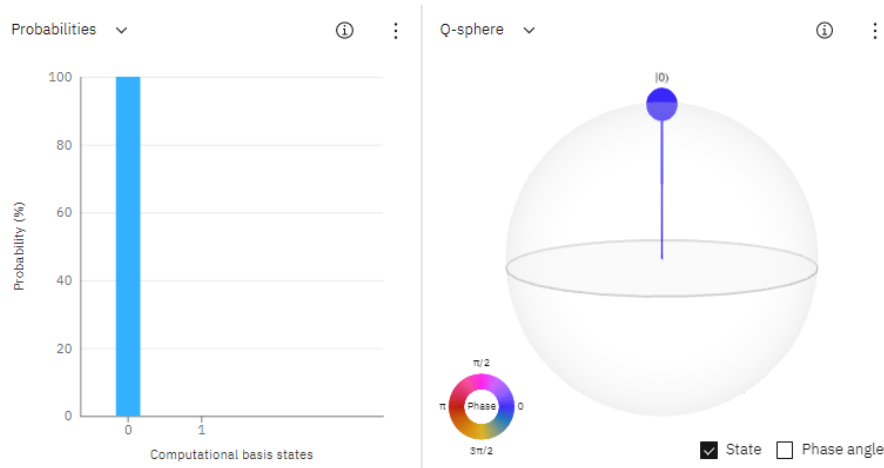


Рисунок 10.1 – Представление двоичного Probabilities и аналогового Q-sphere чисел на диаграммах в интерфейсе квантового компьютера

Для знакомства с особенностями ввода данных будем использовать эмулятор квантового компьютера. По сравнению с классическим компьютером трудности ввода обусловлены наличием неопределенности состояния кубита, поэтому изначально проводят его инициализацию с помощью соответствующего квантового оператора рисунок 10.2.

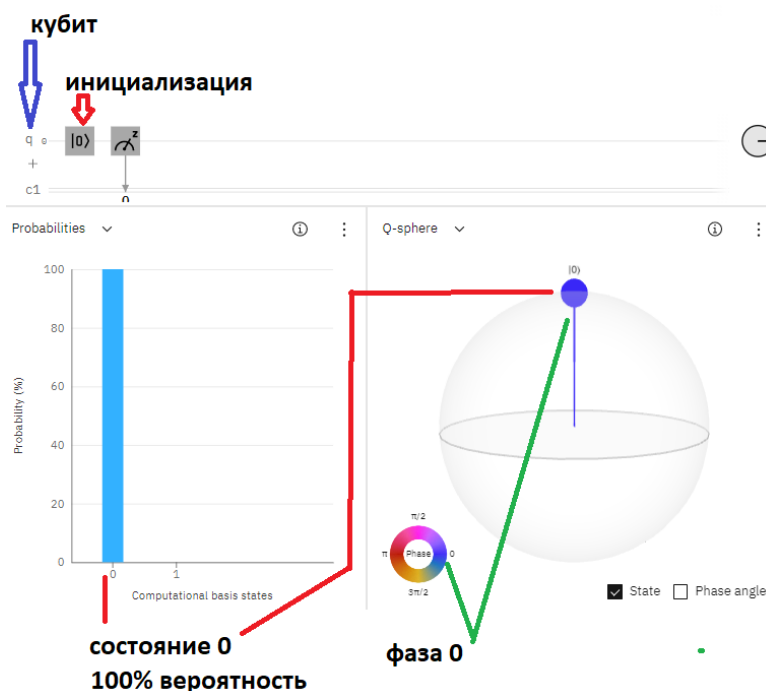


Рисунок 10.2 – Инициализация кубита и определение его состояния

Для изменения состояния кубита используем NOT гейт рисунок 10.3.

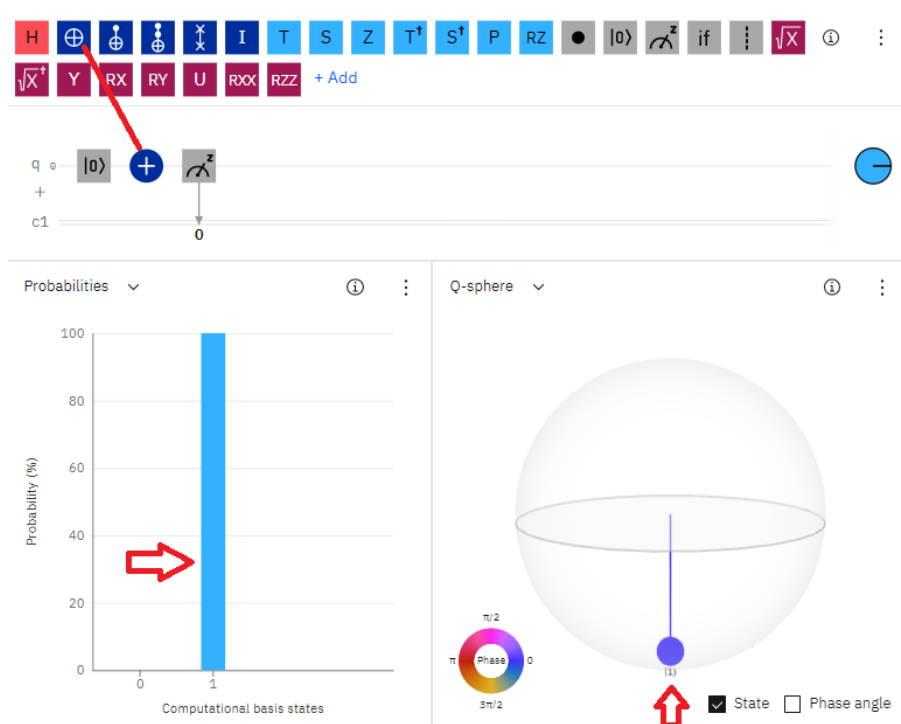


Рисунок 10.3 – Изменение состояния кубита с помощью гейта NOT

[Open in Quantum Lab](#)

```

1  from qiskit import QuantumRegister, ClassicalRegister, QuantumCircuit
2  from numpy import pi
3
4  qreg_q = QuantumRegister(1, 'q')
5  creg_c = ClassicalRegister(1, 'c')
6  circuit = QuantumCircuit(qreg_q, creg_c)
7
8  circuit.reset(qreg_q[0])
9  circuit.x(qreg_q[0])
10 circuit.measure(qreg_q[0], creg_c[0])

```

Рисунок 10.4 – Программный код, соответствующий изменению состояния одного кубита с помощью гейта NOT

Воспользовавшись данным свойством, можно вводить в компьютер цифровые данные в виде двоичного кода, например, цифру 2, квантовая схема для которой представлена на рисунке 10.5. При этом необходимо обратить внимание на сферу Блоха, на которой видно расположение вектора в горизонтальном направлении и относительно от этого направления нулевой фазой. Все это связано с добавлением второго кубита, играющего роль второго разряда в двоичном коде и операциями над ним. Кроме того следует отметить, что эмулятор представляет результаты индикаций состояний кубитов по определенной траектории, соответствующей вычислительному процессу, поэтому информация, отражаемая на сфере Блоха, соответствует информации о последнем кубите в цепочке вычислений. Это легко проверить, если использовать для анализа полученной квантовой схемы отладчик. Он вызывается кнопкой «Inspect» рисунок 10.6.

Следует отметить, что в некоторых случаях необходимо устанавливать барьер, поскольку в это время над кубитом не производится никаких операций. Барьер просто в одних случаях

делает возможность получить паузу, а в других может обрамлять законченный блок вычислений чисто для удобства чтения квантовой схемы. Сам он никаких операций не производит.

Если использовать подобный подход, то для ввода двоичных данных потребуется достаточно много кубитов, например, если числа 32 разрядные, то для вектора из 100 цифр их потребуется 3200. Компьютеры с подобным числом кубитов пока только еще создаются.

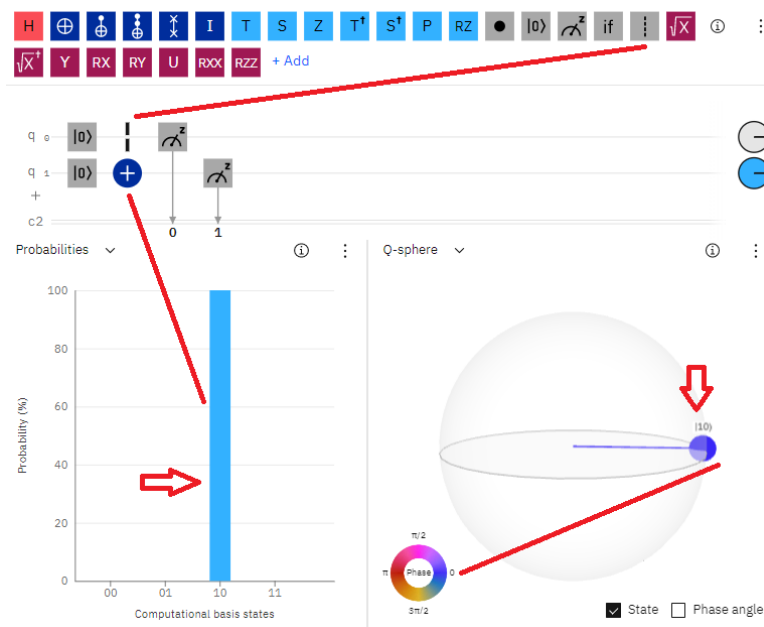


Рисунок 10.5 – Результат ввода двоичной цифры 2 в квантовый компьютер

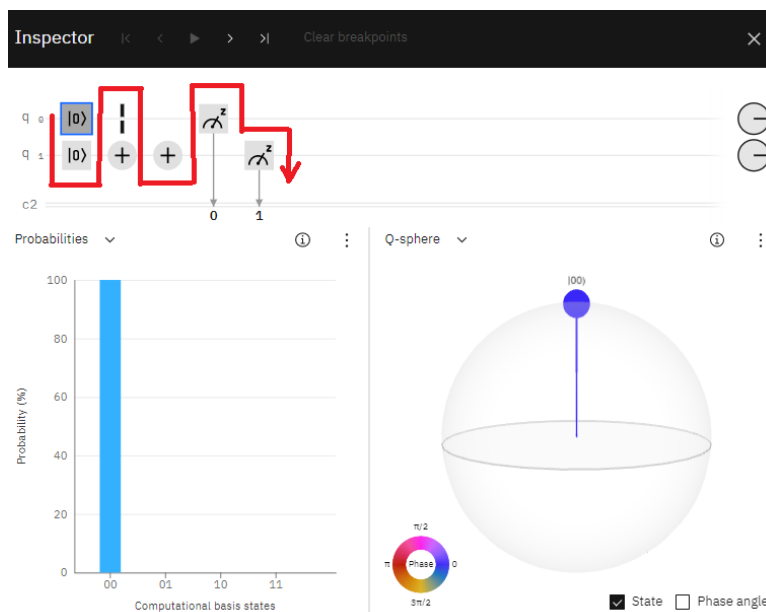


Рисунок 10.6 – Траектория пути работы отладчика квантовой схемы (показано начало работы с состояния первого кубита)

Необходимо обратить внимание еще на один аспект — индикация кубитов на сфере Блоха. На рисунке 10.5 видно, что вектор лежит горизонтально для второго кубита и начальная фаза у него нулевая. Следовательно, тот диаметр, который показан, принадлежит второму кубиту. Это означает, что сфера Блоха отображает одновременно состояния всех кубитов с учетом положительных и отрицательных фаз расположения векторов. Добавим в схему к двум кубитам еще 3 и получим следующую картину сферы Блоха (рисунок 10.7).

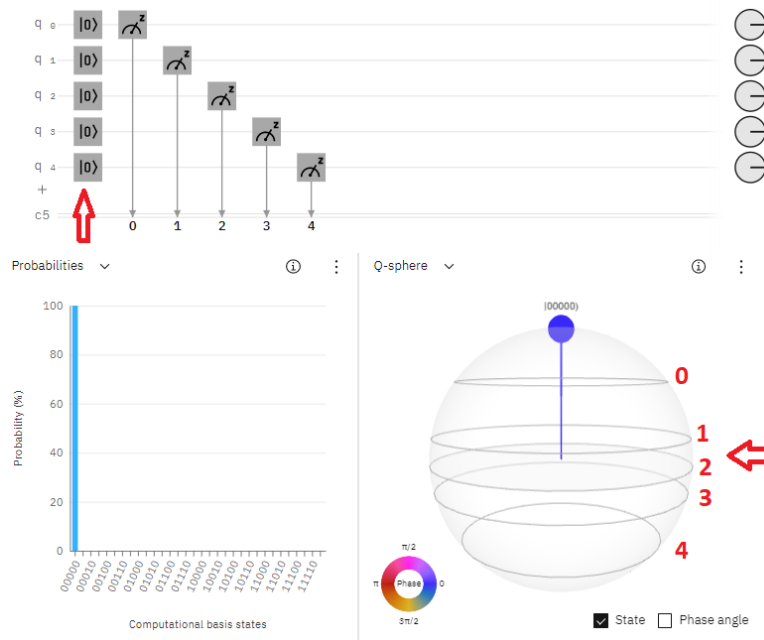


Рисунок 10.7 – Общий вид сферы Блоха для квантовой схемы из 5 кубитов

При большом количестве кубитов оценка значений их состояний по данной сфере становится затруднительной задачей, но для отладки квантовой схемы этого представления вполне достаточно. Для определения, какое из сечения принадлежит конкретному кубиту, может использоваться гейт Адамара. Его основное свойство устанавливать кубит в неопределенное состояние 0 или 1, а это означает и соответствующие положения вектора на сфере Адамара (рисунок 10.8).

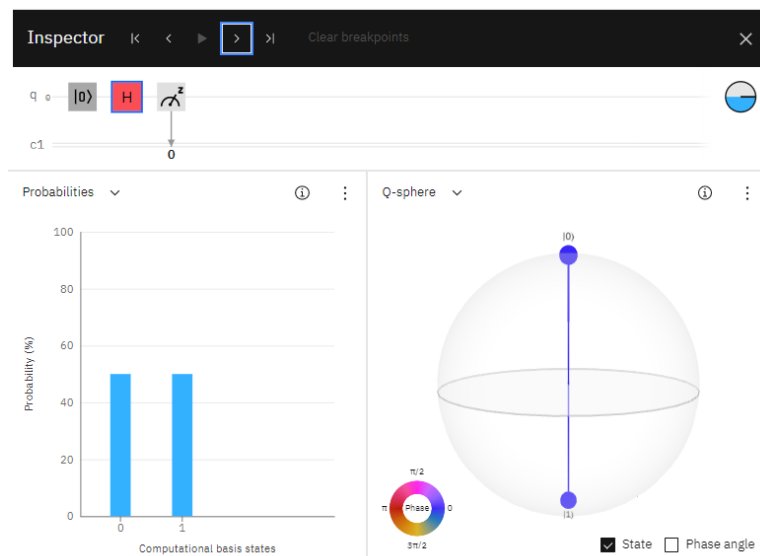


Рисунок 10.8 – Состояние сферы Блоха после работы гейта Адамара для одного кубита

Другим способом ввода информации в квантовый компьютер может быть изменение фаз вектора состояния кубита на сфере Блоха (рисунок 10.9). Для этого есть несколько возможностей, например гейт Rx позволяет изменять только угол θ . Для того, чтобы изменить его значение, необходимо использовать правую клавишу мышки, чтобы вызвать соответствующее меню (рисунок 10.10) и отредактировать угол в радианах, установив свое значение. При этом есть и другие гейты, позволяющие менять углы. Результатом работы гейта Rx для угла $\pi/2$

в отладочном режиме станет сфера Блоха (рисунок 10.11). При этом изменится и вероятность нахождения кубита в том или ином состоянии — оно будет неопределенным.

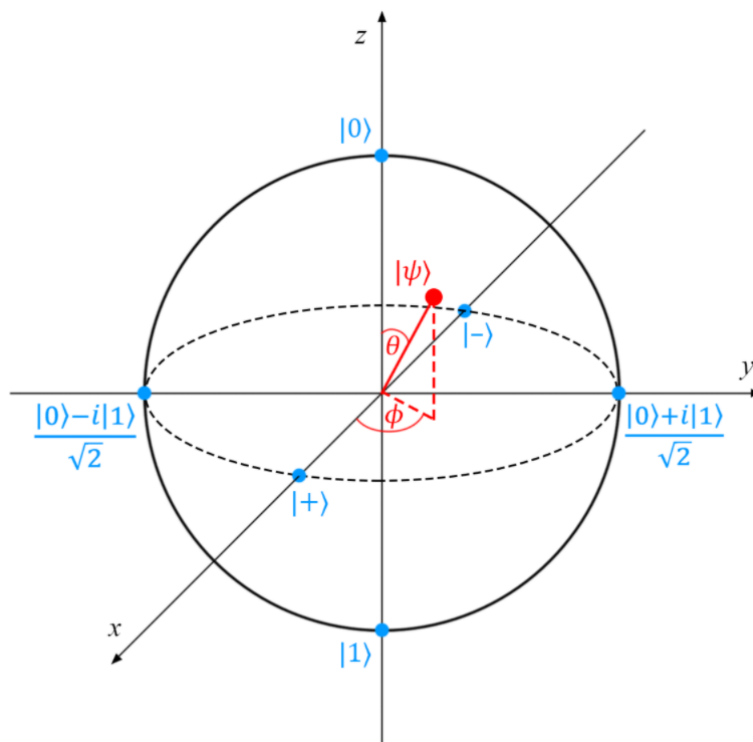


Рисунок 10.9 – Общий вид Сферы Блоха с координатами и граничными обозначениями вектора состояния кубита в координатах XYZ

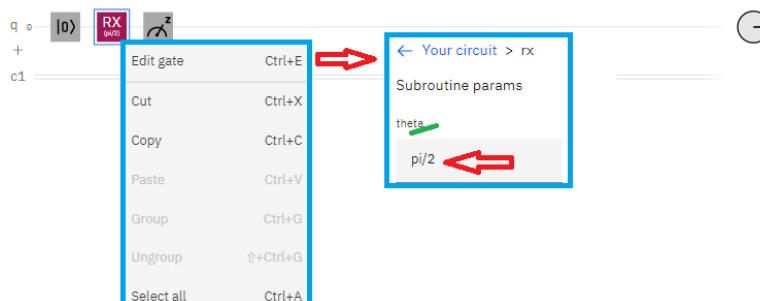


Рисунок 10.10 – Установка фазы theta для гейта Rx

Причем геометрическое отображение угла на сфере Блоха не является соответствующим, а только окрашено в нормированной цветовой гамме, так предложили разработчики этого интерфейса. Это необходимо иметь ввиду при интерпретации результатов вычислений. Если пронормировать величину угла на число π , то получим рабочий диапазон чисел $[-1,1]$ во входных данных. Есть еще одна особенность при вводе аналоговых данных, которая хорошо видна на рисунке 10.12 на примере схемы, состоящей из двух кубитов. При вводе разных углов theta для кубитов, результирующая диаграмма вероятностей принимает вид, который оказывается только пропорционален введенным значениям, а не соответствует им. Это оказывает свое влияние проблема нормировки всех состояний кубитов, которое в целом должно обладать вероятностью равной 100 %. Это также необходимо учитывать при вводе и выводе данных.

В результате ввод аналоговых данных позволяет реализовать аналоговый расчет с гораздо меньшим числом кубитов, чем в двоичном коде – для вектора из 100 чисел потребуется 100 кубитов, а может и в два раза меньше, если использовать второй угол.

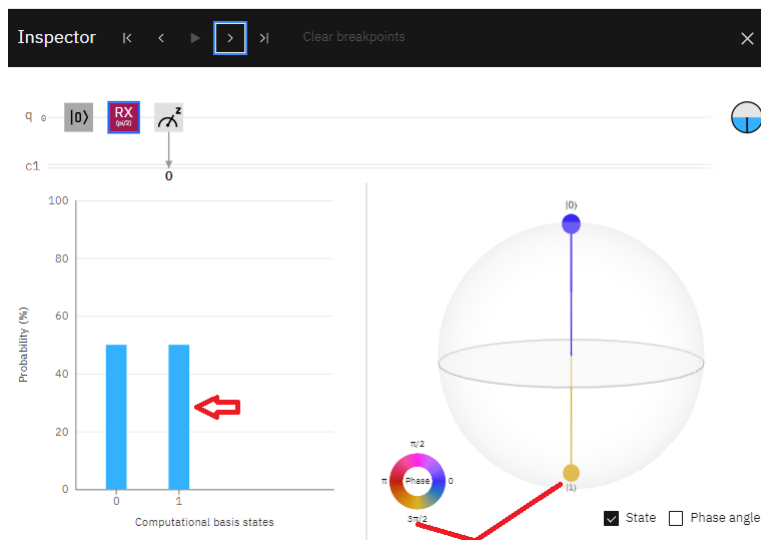


Рисунок 10.11 – Работа гейта Rx со значением $\theta = \pi/2$

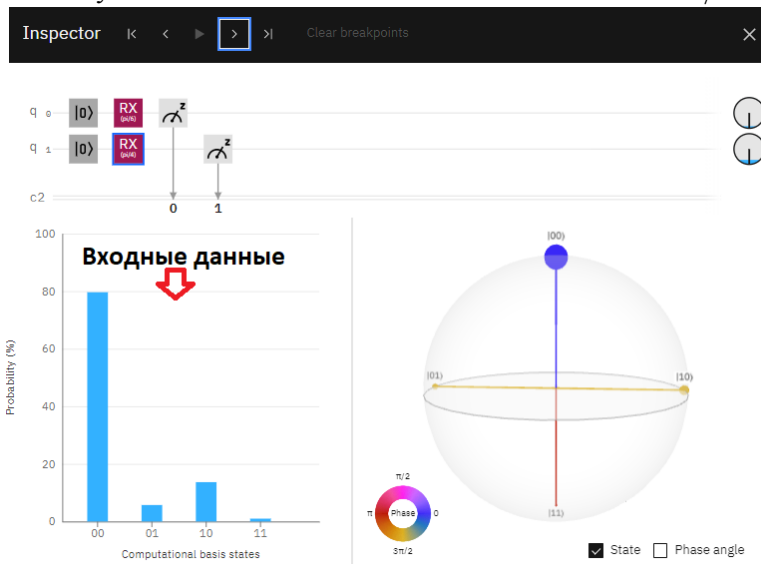


Рисунок 10.12 – Ввод аналоговых данных в квантовую схему

На сайте <https://habr.com/ru/company/sberbank/blog/343308/> в статье про квантовые вычисления приведён пример квантовой схемы. По замыслу автора статьи квантовая схема должна выполнять двоичное сложение 2-х битного числа и числа 3 (112). В статье приведён скриншот схемы, составленной в построителе схем на сайте IBM Quantum (рисунок 10.13).

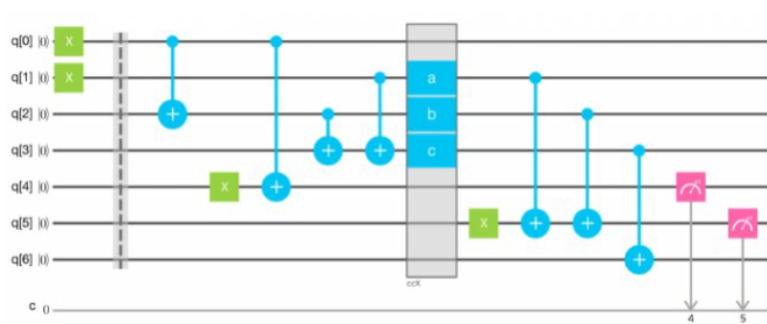


Рисунок 10.13 – Схема вычисления суммы 2-х битного числа и константы

Схема реализована на 7-ми кубитах. В $q[0]$ и $q[1]$ задаётся значение слагаемого. На рисунке 10.13 два квантовых оператора NOT в крайнем левом столбце задают значение слагаемого равное 11_2 . В $q[2]$ и $q[3]$ хранятся значения переносов, полученных при сложении младших и старших битов слагаемых соответственно. В $q[4]$, $q[5]$ и $q[6]$ формируется значение результата сложения. Большой прямоугольник в центре схемы — квантовый оператор CCNOT с управляющими кубитами $q[1]$ и $q[2]$, и управляемым кубитом $q[3]$. Предложенная схема была составлена и проверена на работоспособность в квантовом эмуляторе Quirk. Пример проверки представлен на рисунках 10.14-10.17. Видно, что схема вполне работоспособна и корректно вычисляет двоичную сумму произвольного 2-х битного числа и числа $3(11_2)$.

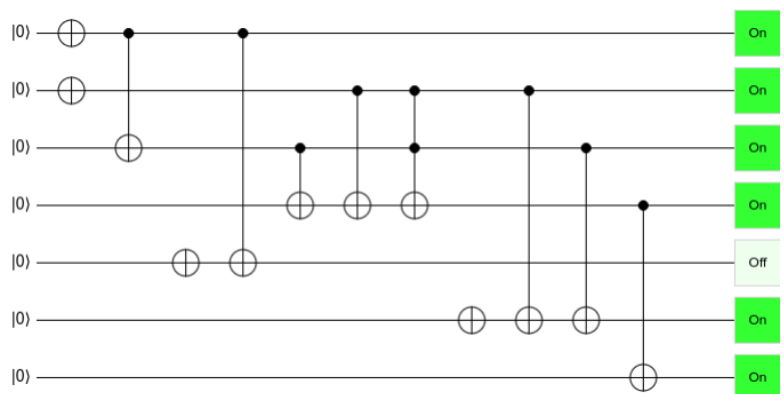


Рисунок 10.14 – Результат работы квантовой схемы для слагаемого 3: $3 + 3 = 6$ ($11_2 + 11_2 = 110_2$)

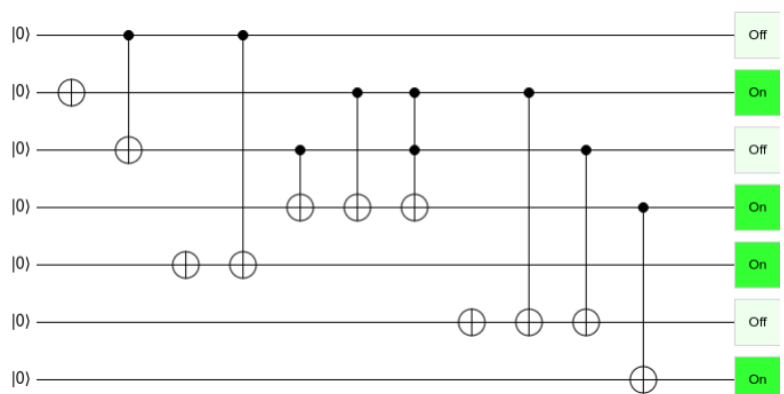


Рисунок 10.15 – Результат работы квантовой схемы для слагаемого 2: $2 + 3 = 5$ ($10_2 + 11_2 = 101_2$)

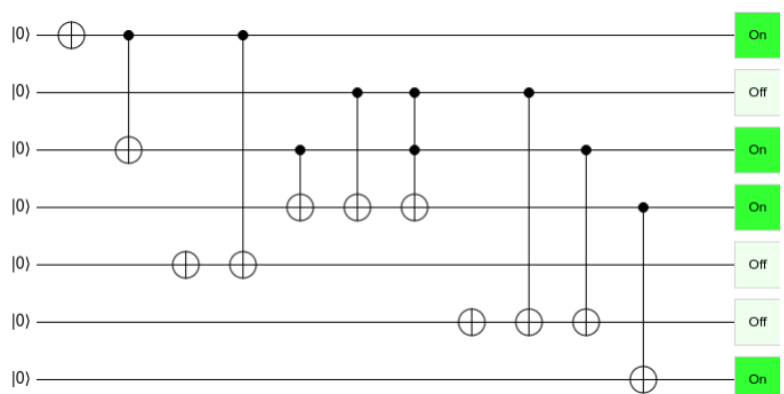


Рисунок 10.16 – Результат работы квантовой схемы для слагаемого 1: $1 + 3 = 4$ ($01_2 + 11_2 = 100_2$)

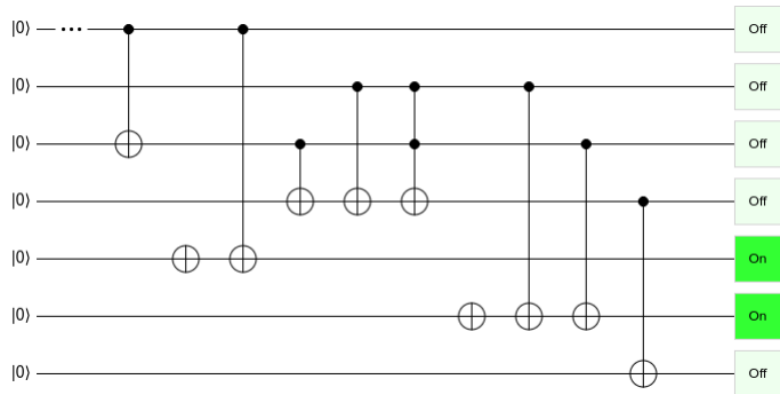


Рисунок 10.17 – Результат работы квантовой схемы для слагаемого $0:0 + 3 = 3$ ($00_2 + 11_2 = 011_2$)

10.1 Задание по самостоятельной работе

Для начала работы необходимо ознакомиться с общим описанием и исходниками эмулятора Quirk [].

The Circuit Editing Area

Almost all the time you spend in Quirk will be spent staring at the circuit editing area:

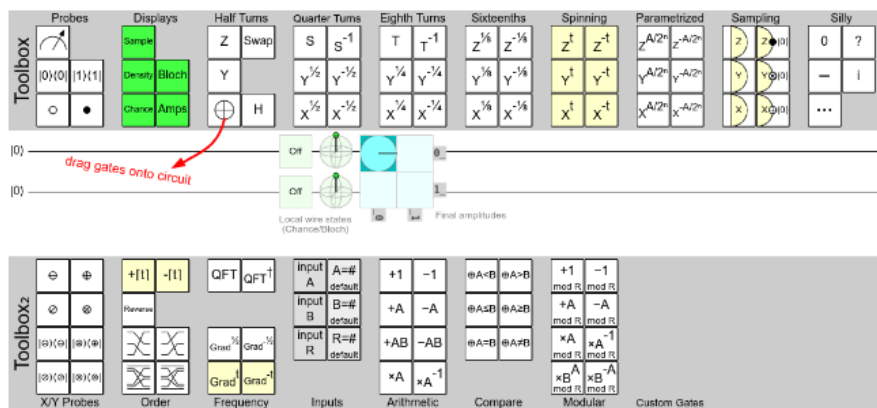


Рисунок 10.18 – Интерфейс Quirk эмулятора квантового компьютера

Сохраните файл и на основе сохраненного файла файла:

Quirk with Circuit - 7 wires, 33 ops, X•X•X•X•X••X•••X•••X•••...html, представленного в приложении к разделу, построить квантовую схему, в которой исходные переменные A и B, имеют 3 разряда. В случае, если данную схему окажется построить невозможно, указать причину технических трудностей для реализации данной схемы, при этом показать состояние схемы до момента возникновения проблем.

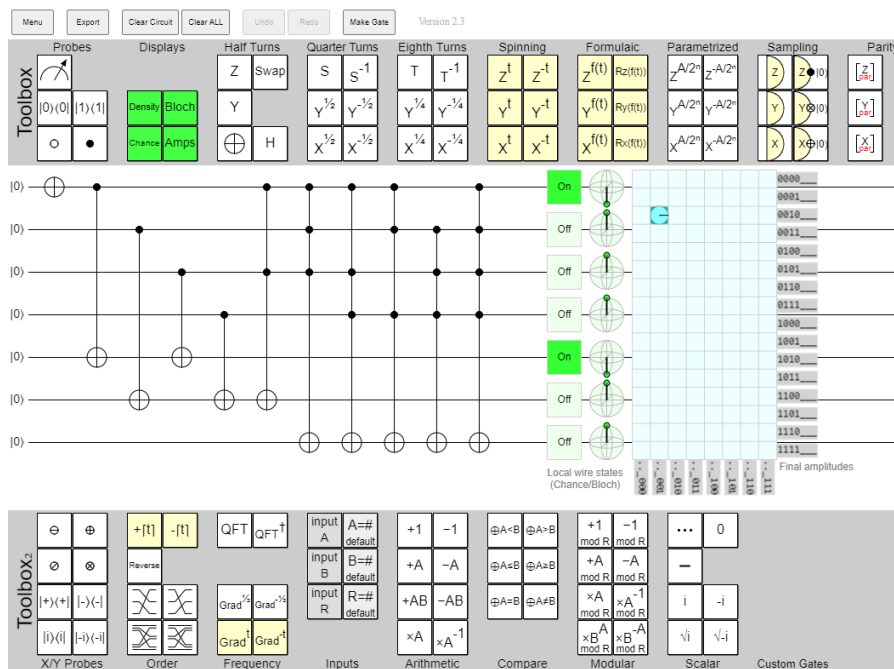


Рисунок 10.19 – Исходное изображение квантовой схемы, содержащей функцию двоичного сложения двух разрядных чисел

- Сформировать на основе пояснений к скриншотам интерфейса эмулятора.
- В архиве отчета должно быть несколько файлов – файл отчета, файлы квантовых схем эмулятора Quirk.

10.2 Контрольные вопросы

- 1) Какие типы данных можно ввести в квантовый компьютер?
- 2) Какие проблемы возникают при вводе аналоговых данных в квантовый компьютер?
- 3) Как инициализируется кубит в квантовом компьютере?
- 4) Как работает гейт NOT в квантовом компьютере?
- 5) Как работает гейт CNOT в квантовом компьютере?
- 6) Как установить барьер в квантовой схеме?
- 7) Сколько кубитов потребуется для ввода 32-разрядного числа в квантовый компьютер?
- 8) Как изменяется состояние кубита с помощью гейта Адамара?
- 9) Как изменить фазу вектора состояния кубита на сфере Блоха?
- 10) Как вводятся аналоговые данные в квантовую схему?
- 11) Как проверить работоспособность квантовой схемы?

11 ПОИСК ДВОИЧНОГО ЧИСЛА НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА ГРОВЕРА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КВАНТОВОГО ЭМУЛЯТОРА QUIRK

Цель работы.

Оптимизационный поиск двоичного числа на квантовом компьютере.

Построение квантовой схемы поиска двоичного числа с 3 кубитами.

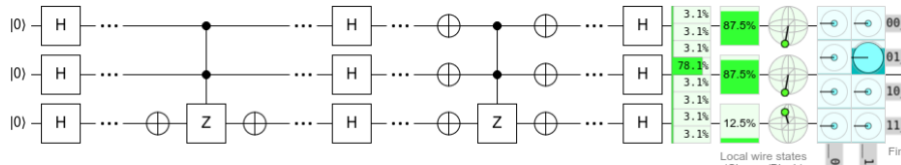


Рисунок 11.1 – Схема поиска двоичного числа 011₂ на 3-х кубитах

Схему поиска двоичного числа можно условно поделить на три части: инициализацию, оракул и отражение. Инициализация (рисунок 11.2) применяется к начальному значению кубитов $|000\rangle$ и создаёт однородную суперпозицию:

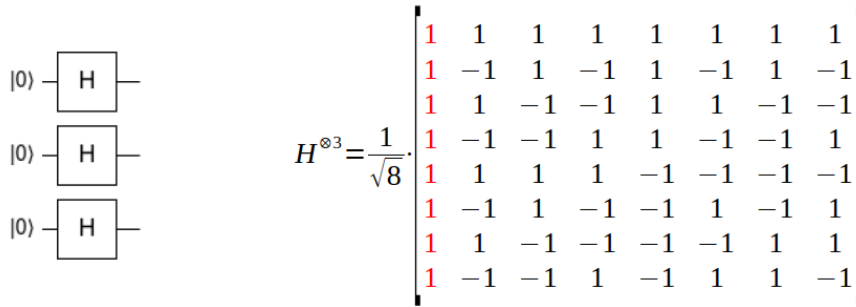


Рисунок 11.2 – Инициализация алгоритма поиска

$$H^{\otimes 3}|000\rangle = \frac{1}{\sqrt{8}} \cdot (|000\rangle + |001\rangle + |010\rangle + |011\rangle + |100\rangle + |101\rangle + |110\rangle + |111\rangle) \quad (11.1)$$

Оракул (рисунок 11.3) меняет знак состояния $|110\rangle$ на противоположный:

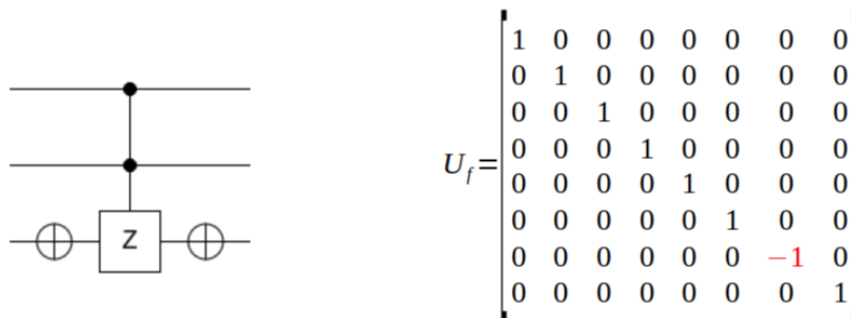


Рисунок 11.3 – Оракул для поиска состояния $|110\rangle$

$$U_f \left(\frac{1}{\sqrt{8}} \cdot (|000\rangle + |001\rangle + |010\rangle + |011\rangle + |100\rangle + |101\rangle + |110\rangle + |111\rangle) \right) = \frac{1}{\sqrt{8}} \cdot (|000\rangle + |001\rangle + |010\rangle + |011\rangle + |100\rangle + |101\rangle - |110\rangle + |111\rangle) \quad (11.2)$$

Отражение (рисунок 11.4) выполняет отражение амплитуд состояний относительно их среднего арифметического:

– К кубитам применяются операторы Адамара:

$$H^{\otimes 3} \left(\frac{1}{\sqrt{8}} \cdot (|000\rangle + |001\rangle + |010\rangle + |011\rangle + |100\rangle + |101\rangle - |110\rangle + |111\rangle) \right) = \quad (11.3)$$

$$= \frac{1}{4} \cdot (3 \cdot |000\rangle - |001\rangle + |010\rangle + |011\rangle + |100\rangle + |101\rangle - |110\rangle - |111\rangle)$$

– Затем к кубитам применяются операторы Паули X:

$$X^{\otimes 3} \left(\frac{1}{4} \cdot (3 \cdot |000\rangle - |001\rangle + |010\rangle + |011\rangle + |100\rangle + |101\rangle - |110\rangle - |111\rangle) \right) = \quad (11.4)$$

$$= \frac{1}{4} \cdot (-|000\rangle - |001\rangle + |010\rangle + |011\rangle + |100\rangle + |101\rangle - |110\rangle + 3 \cdot |111\rangle)$$

– Далее к кубитам применяется управляемый оператор Паули Z, 1-й и 2-й кубит — управляющие, а 3-й — управляемый:

$$U_0 \left(\frac{1}{4} \cdot (-|000\rangle - |001\rangle + |010\rangle + |011\rangle + |100\rangle + |101\rangle - |110\rangle + 3 \cdot |111\rangle) \right) = \quad (11.5)$$

$$= \frac{1}{4} \cdot (-|000\rangle - |001\rangle + |010\rangle + |011\rangle + |100\rangle + |101\rangle - |110\rangle - 3 \cdot |111\rangle)$$

– Затем к кубитам снова применяются операторы Паули X:

$$X^{\otimes 3} \left(\frac{1}{4} \cdot (-|000\rangle - |001\rangle + |010\rangle + |011\rangle + |100\rangle + |101\rangle - |110\rangle - 3 \cdot |111\rangle) \right) = \quad (11.6)$$

$$= \frac{1}{4} \cdot (-3 \cdot |000\rangle - |001\rangle + |010\rangle + |011\rangle + |100\rangle + |101\rangle - |110\rangle - |111\rangle)$$

– К кубитам снова применяются операторы Адамара:

$$H^{\otimes 3} \left(\frac{1}{4} \cdot (-3 \cdot |000\rangle - |001\rangle + |010\rangle + |011\rangle + |100\rangle + |101\rangle - |110\rangle - |111\rangle) \right) = \quad (11.7)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{32}} \cdot (-|000\rangle - |001\rangle - |010\rangle - |011\rangle - |100\rangle - |101\rangle - 5 \cdot |110\rangle - |111\rangle)$$

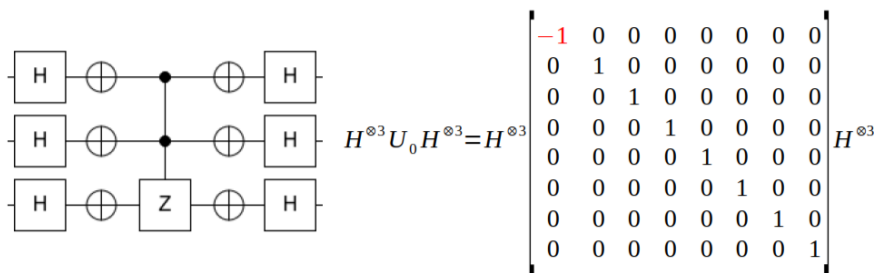


Рисунок 11.4 – Отражение амплитуд состояний

По полученному после отражения вектору состояний видно, что при измерении возможными являются все 8 состояний. Вероятности состояний отличаются. Наибольшую вероятность имеет искомое состояние $|110\rangle$: $100\% \cdot 5/32 = 78.125\%$. Все остальные состояния имеют относительно небольшую вероятность: $100\% \cdot 1/32 = 3.125\%$, однако суммарно шанс ошибиться достаточно велик: 21.875% .

Для повышения вероятности получения искомого значения 011_2 ($|w\rangle = |110\rangle$) в схему была добавлена ещё одна итерация алгоритма (рисунок 11.5). Для наглядности операторы оракула и отражения были объединены в пользовательские операторы с именами Oracle и Amplifier соответственно.

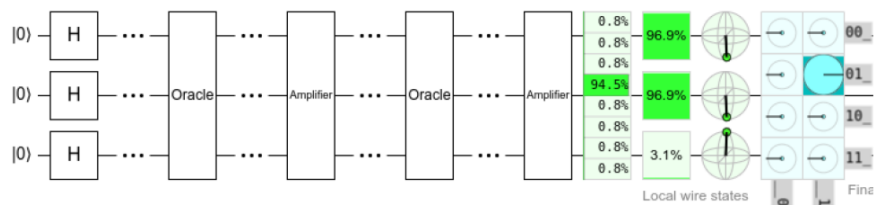


Рисунок 11.5 – Две итерации алгоритма Гровера

После добавления ещё одной итерации вероятность получить искомое состояние $|110\rangle$ увеличилось примерно до 94.5% .

11.1 Задание по самостоятельной работе

– На основе файла schema1...:

Schema1 - 2 wires, 25 ops, HH.....XX•ZXX.....HH.....ZZ•Z.....H...

построить квантовую схему, в которой поиск осуществляется с 3 кубитами. Исходное двоичное число выбрать самостоятельно.

– На основе файла schema2...:

Schema2- 4 wires, 54 ops, XXXXHHHHChance.....Z•••H...

осуществить следующие операции:

а) добавить еще один кубит, модифицируя схему для поиска заданного числа 1011, а затем получить зависимость нарастания амплитуды от номера каскада, определив тем самым необходимое количество каскадов для решения задачи;

б) попробовать решить проблему получения гейта anti-control CNOT из CNOT на схеме, а также построить зависимости нарастания амплитуды для разных предлагаемых пусть и не оптимальных вариантов.

11.2 Контрольные вопросы

- 1) Что такое оракул и как он работает?
- 2) Что такое отражение и как оно влияет на амплитуды состояний?
- 3) Что такое квантовая схема поиска двоичного числа?
- 4) Сколько кубитов используется в квантовой схеме поиска двоичного числа?
- 5) Что такое алгоритм Гровера и как он используется в данной схеме?
- 6) Как изменяется вероятность получения искомого состояния при добавлении еще одной итерации алгоритма Гровера?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью практических занятий является изучение студентами компонентов квантовой электроники на частных примерах, которые отражают ее основные технические характеристики и показывают возможности современных квантовых технологий.

В составе оптического оборудования имеются активные и пассивные элементы и имеется их достаточно большое разнообразие. Все их свойства за короткий период времени изучить трудно, поэтому здесь представлены основные когерентно-оптические устройства, как с точки зрения использования в качестве носителя информации массовые когерентные потоки квантов, так и одиночный квант. В качестве приложений рассматриваются проблемы от проектирования лазерных удаленных сенсоров вибраций и до моделирования квантовых логических схем для использования возможностей квантового компьютера.

Знание характеристик выпускаемых промышленностью оптических элементов квантовой электроники необходимо будущим специалистам при проектировании, эксплуатации квантовых аналоговых и цифровых устройств.

Выполнение практических заданий способствует развитию навыков практического применения полученных теоретических знаний, понять физическую сущность процессов и явлений в квантовых устройствах, закрепить в памяти основные формулы, значения и порядок величин основных параметров.

Важную роль в подготовке будущих специалистов, в приобретении ими практических навыков, играет самостоятельная работа. Данное учебное пособие в том числе предназначено и для самостоятельной работы. При выполнении практических и самостоятельных заданий, требуется получения дополнительной информации, ее последующего самостоятельного осмысления и дальнейшего применения на практике.

Методическое пособие предназначено для студентов очной, заочной и дистанционной форм обучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1) Оптоволоконный микрофон. – Текст : электронный // Лазерный портал : [сайт]. – URL: http://www.laserportal.ru/content_937 (Дата обращения: 12.05.2024).
- 2) Лазерные микрофоны. – Текст : электронный // Лазерный портал : [сайт]. – URL: http://www.laserportal.ru/content_935 (Дата обращения: 12.05.2024).
- 3) Дискретные преобразования. – Текст : электронный // exponenta.ru образовательный математический сайт : [сайт], – 2017. – http://old.exponenta.ru/SOFT/MATHCAD/UsersGuide/chapter12/12_4.asp (Дата обращения 18.05.2024)
- 4) Щука, А. А. Электроника. Учебник для вузов. В 4 частях. Часть 3. Квантовая и оптическая электроника : учебник для вузов / А. А. Щука, А. С. Сигов ; ответственный редактор А. С. Сигов. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2024. — 117 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-01870-7.
- 5) Губанова, Л. А., Оптические технологии. Учебно-методическое пособие / Л. А. Губанова, Ю. А. Константинова – СПб : Университет ИТМО, 2018. – 62 с.
- 6) How to use Quirk – Текст : электронный // GitHub : [сайт]. – 2020. – URL: <https://github.com/Strilanc/Quirk/wiki/How-to-use-Quirk> (Дата обращения: 12.05.2024).

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1 ЛАЗЕРНЫЙ МИКРОФОН	4
1.1 Краткие теоретические сведения	4
1.1.1 История лазерного микрофона	4
1.1.2 Оптоволоконный микрофон	4
1.1.3 Лазерный микрофон	5
1.2 Задание по самостоятельной работе	7
1.3 Контрольные вопросы	8
2 АНАЛИЗ ИСТОЧНИКОВ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ВИДЕО- СЕНСОРОВ	9
2.1 Краткие теоретические сведения	9
2.1.1 Пластиковое оптическое волокно	9
2.2 Светоизлучающие диоды	11
2.2.1 Описание установки	11
2.2.2 Получение сечения интенсивности света оптического пятна	13
2.3 Задание по самостоятельной работе	15
2.4 Контрольные вопросы	16
3 РАСЧЕТ ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕТА В ФОКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ ЛИНЗЫ ДЛЯ ТРАНСПАРАНТА С ПРЯМОУГОЛЬНЫМИ ОТВЕРСТИЯМИ	17
3.1 Краткие теоретические сведения	17
3.2 Задание по самостоятельной работе	18
3.3 Контрольные вопросы	19
4 РАСЧЕТ КОГЕРЕНТНО-ОПТИЧЕСКОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В ОПТИЧЕСКОМ КАСКАДЕ	20
4.1 Краткие теоретические сведения	20
4.1.1 Пример выполнения функций cfft и icfft в Mathcad	21
4.2 Задание по самостоятельной работе	22
4.3 Контрольные вопросы	23
5 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЛИНЕЙКИ ФОТОПРИЕМНИКА В АКУСТООПТИЧЕСКОМ АНАЛИЗАТОРЕ СПЕКТРА	24
5.1 Краткие теоретические сведения	24
5.2 Задание по самостоятельной работе	25
5.3 Контрольные вопросы	25
6 ФИЛЬТРАЦИЯ 2D ИЗОБРАЖЕНИЙ	26
6.1 Краткие теоретические сведения	26
6.2 Пример когерентнооптической 2D пространственной фильтрации	26
6.3 Задание по самостоятельной работе	29
6.4 Контрольные вопросы	29
7 АКУСТООПТИЧЕСКИЙ МОДУЛЯТОР СВЕТА	30
7.1 Расчет акустический модулятора	30
7.2 Задание по самостоятельной работе	32
7.3 Контрольные вопросы	32
8 РАСЧЕТ ДЛИНЫ ОПТИЧЕСКОГО ПУТИ В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ	33
8.1 Краткие теоретические сведения	33

8.1.1	Бесцветное оптическое стекло	35
8.1.2	Ввод излучения в оптическое волокно	38
8.2	Задание по самостоятельной работе	39
8.3	Контрольные вопросы	40
9	ФОРМИРОВАНИЕ ЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ НА ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТАХ . . .	41
9.1	Краткие теоретические сведения	41
9.1.1	Волноводные логические элементы	41
9.2	Задание по самостоятельной работе	42
9.3	Контрольные вопросы	42
10	ПРОГРАММИРОВАНИЕ АДДИТИВНОЙ ФУНКЦИИ В ДВОИЧНОМ КОДЕ НА КВАН- ТОВОМ КОМПЬЮТЕРЕ, ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭМУЛЯТОРА QUIRK	43
10.1	Задание по самостоятельной работе	50
10.2	Контрольные вопросы	51
11	ПОИСК ДВОИЧНОГО ЧИСЛА НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА ГРОВЕРА ПРИ ИСПОЛЬ- ЗОВАНИИ КВАНТОВОГО ЭМУЛЯТОРА QUIRK	52
11.1	Задание по самостоятельной работе	54
11.2	Контрольные вопросы	54
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	55
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	56