

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Университет ИТМО»

Факультет лазерной фотоники и оптоэлектроники

Образовательная программа Лазеры для информационно-коммуникационных систем

Направление подготовки (специальность) 12.03.05 Лазерная техника и лазерные технологии

О Т Ч Е Т

о производственной преддипломной практике

Тема задания: Разработка фотоприемной части восходящего канала связи по технологии Li-Fi

Обучающийся: Лапа Николай Андреевич L3430

Руководитель практики от университета: Козырева Ольга Андреевна, ассистент института перспективных систем передачи данных Университета ИТМО

Санкт-Петербург
2021

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1 Типы компонентов	7
1.1 Фотодиоды	7
1.2 Линзы	8
2 Моделирование оптической системы	9
2.1 Базовая система	9
2.2 Базовая система с собирающей линзой	11
2.3 Исследование диаграммы направленности приёмника	14
3 Экспериментальные исследования системы	17
Заключение	20
Список использованных источников	21
Приложение А Результаты симуляции	

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

РЧ — радио частоты.

VLC (visible light communication) — связь по видимому свету.

ИК — инфракрасный.

LED (Light emitting diode) — светодиод.

PLC (Power-line communication) — связь по электросети.

PoE (Power over Ethernet) — питание через Ethernet.

RGB (Red-green-blue) — красный-синий-зелёный.

MIMO (Multiple-input-multiple-outputs) — несколько входов и выходов.

IM/DD (Intensity modulation and direct detection) — модуляция интенсивности и прямое детектирование.

OFDM (Orthogonal frequency division multiplexing) — мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов.

OWC (Optical wireless communication) — оптическая беспроводная коммуникация.

Li-Fi — light fidelity.

Wi-Fi — wireless fidelity.

ВВЕДЕНИЕ

Спустя тридцать лет после появления первых коммерческих мобильных коммуникационных систем, беспроводная связь эволюционировала в обыкновенное удобство как газ или электричество. Экспоненциальный рост в мобильном трафике в течение последних трёх десятилетий привел к масштабному разворачиванию беспроводных систем. Как следствие, ограниченный доступный РЧ-диапазон является объектом постоянного переиспользования и межканальной интерференции, что значительно ограничивает ёмкость сетей. Таким образом, было много различных предупреждений о грядущем «кризисе РЧ спектра» [1], так как требования к передачи мобильных данных продолжают расти, в то время как спектральная эффективность сетей насыщается, даже несмотря на введение новых стандартов и значительный технологический прогресс в этой области. По оценкам, к 2022 году более 77 эксабайтов (10^{60} байт) трафика будет передаваться через мобильные устройства каждый месяц (около одного зеттабайта в год) [2]. В середине прошлого десятилетия было предложено использование связи по видимому свету (VLC) в качестве потенциального решения для избежания «кризиса РЧ спектра».

В течение прошлого десятилетия значительные усилия были направлены на изучение альтернативных частей электро-магнитного спектра, которые потенциально смогут разгрузить большую часть трафика из загруженного РЧ диапазона. Было продемонстрировано использование миллиметровых волн в коммуникации в 28 ГГц диапазоне, а так же использование видимого и ИК света. Это особенно полезно, так как освещение – удобство, которое имеется практически в любой жилой среде и для которого существует готовая инфраструктура. Использование видимого света для высокоскоростных линий связи становится возможно из-за использования LED. В этом смысле концепт комбинирования функций освещения и коммуникации позволяет экономить энергию (и деньги) и сократить углеродный след. Во-первых, установка точек доступа является достаточно тривиальной задачей, так как можно переиспользовать уже существующую инфраструктуру с использованием готовых технологий, таких как связь по электросети (PLC) и питание через Ethernet (PoE). Во-вторых, так как освещение обычно работает в по-

мещениях даже в течение светлого времени суток, дополнительное питание передатчиков будет незначительным. Кроме того, открывается возможность использования Li-Fi для Интернета Вещей – большого количества умных бытовых устройств, каждому из которых необходимо интернет-соединение для корректной работы. В настоящее время они используют Wi-Fi или проприетарные стандарты связи, что приводит к ещё большей загрузке РЧ-сети и ухудшению совместимости между друг другом. Помимо этого, видимый свет включает в себя сотни ТГц свободного канала, что на четыре порядка больше, чем полный РЧ спектр до 30 ГГц, включая миллиметровый спектр. Оптическое излучение, в общем, не интерферирует с другими радио волнами и не мешает работе чувствительного электрического оборудования. Таким образом, свет идеален для беспроводного покрытия в местах, чувствительных к электро-магнитному излучению (например, больницы, самолёты, топливно-химические и атомные электростанции и другие). Помимо этого, так как свет не может проникать через непрозрачные поверхности (стены), создается более высокий уровень безопасности соединения. Эта же особенность может быть использована для избежания интерференции между двумя соседними сетями.

В течение последних десяти лет, было проведено значительное количество исследований об улучшении скорости передачи между двумя устройствами с использованием существующих светодиодов в лабораторных условиях. В 2012 году была достигнута скорость передачи данных выше 1 Гб/с с использованием белых фосфорных LED [3], и 3.4 Гб/с с помощью красно-сине-зелёного (RGB) LED [4]. Также была продемонстрирована [5] схожая гигабитная система с белым фосфорным LED в виде матрицы 4 на 4 в конфигурации несколько входов и выходов (MIMO). Теоретическая структура для достижимой ёмкости модуляции интенсивности и прямого детектирования (IM/DD) с использованием мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM) была показана в [6]. Для успешной реализации системы мобильной связи необходима готовая сетевая система. Это и есть то, что называется Li-Fi – сетевое мобильное высокоскоростное VLC решение для беспроводной связи [7]. Гарольд Хаас, которому принадлежит идея создания Li-Fi [8], предлагает использовать Li-Fi как комплиментар-

ную сеть для облегчения нагрузки на РЧ спектр, так как значительная часть нагрузки на текущие Wi-Fi сети сможет быть перемещена на Li-Fi сети.

1 ТИПЫ КОМПОНЕНТОВ

1.1 Фотодиоды

Выбор компонентов для определённого сценария использования определяется требованиями, выдвигаемыми к данной системе. Для фотодиода это может быть: интервал длин волн, которые он может детектировать, скорость отклика, фоточувствительность, сила темнового тока, тип корпуса. Это важно, так как существует значительное количество стандартных компонентов с различными стандартными корпусами, материалами полупроводника, характеристиками. Например, рассмотрим некоторые фотодиоды, представленные на сайте производителя Thorlabs (рисунок 2.1).

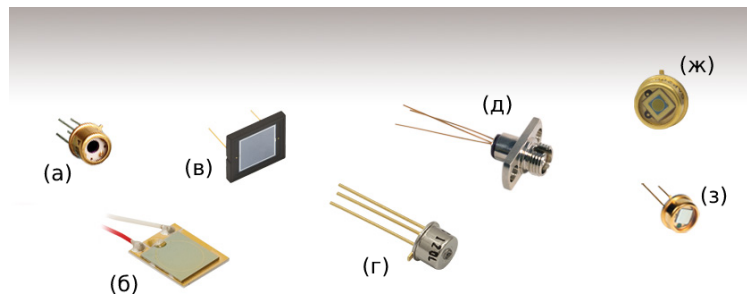


Рисунок 1.1 — Некоторые виды полупроводниковых PIN-фотодиодов, представленных на сайте производителя Thorlabs

а) DSD2 – двух-зонный фотодиод из Si/InGaAs, кремний находится над InGaAs, за счёт этого фотодиод имеет очень широкий интервал детектируемых длин волн (400-1100 нм для Si и 1000-1800 нм для InGaAs), размеры фотодиода: 5.07 мм² для Si, 1.77 мм² для InGaAs, тип корпуса TO-5;

б) FDG05 – фотодиод из Ge, интервал детектируемых длин волн 800-1800 нм, размеры фотодиода: 19.6 мм², выращен на керамической подложке, поэтому не имеет конкретного типа корпуса;

в) FDS10X10 – большой кремниевый фотодиод с интервалом детектируемых длин волн 340-1100 нм, с размерами фотодиода 100 мм². Аналогично предыдущему выращен на керамической подложке;

г) FGA01 – InGaAs фотодиод с высокой скоростью, типовым корпусом, интервал детектируемых длин волн 800–1700 нм, размеры фотодиода 0.01 мм², имеет стандартный корпус TO-46 и сферическую линзу;

д) FGA01FC – тот же предыдущий фотодиод, но с корпусом, позволяющим подключение к оптоволокну;

е) FGA21 – большой быстрый InGaAs фотодиод с интервалом детектируемых длин волн 800-1700 нм, размерами фотодиода 3.1 мм², тип корпуса TO-5;

ж) FDG03 – большой Ge фотодиод в стандартном корпусе TO-5, интервал детектируемых длин волн 800-1800 нм, размер фотодиода 7.1 мм².

1.2 Линзы

Аналогично и для линз существуют различные параметры, которые влияют на характеристики и места применения конкретных линз: габаритные размеры, тип линзы (собирающая/рассеивающая), материал линзы (коэффициент преломления влияет на фокусное расстояние линзы), радиусы кривизны поверхностей (аналогично влияют на фокусное расстояние), толщина линзы по оси, наличие просветляющего покрытия и его материал (наличие покрытия повышает коэффициент пропускания линзы для конкретных длин волн, определяемых материалом покрытия).

Так как для улучшения приёмной части системы есть смысл собирать лучи, падающие на приёмник, была выбрана собирающая линза. Большинство её параметров не имеют значения, так как единственными ограничениями оказываются прозрачный на выбранной длине волны материал и фокусное расстояние, позволяющее разместить активную область фотодиода в фокусе (активная область находится внутри корпуса). Остальные параметры влияют на фокусное расстояние, однако от него будут зависеть габаритные размеры всего приёмного устройства в Li-Fi системе. Исходя из этих ограничений, для моделирования была выбрана выпукло-плоская собирающая линза из оптического стекла K8, прозрачного в ближнем ИК диапазоне. Более подробное описание параметров линзы приведено в разделе 4.

2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

2.1 Базовая система

В качестве источника излучения был выбран ИК лазерный диод FPL1055T с длиной волны излучения 1550 нм, мощностью излучения в импульсном режиме 300 мВт, поперечной расходимостью 28° и боковой расходимостью 15° [43]. Выбранный фотодиод – FDGA05 с пиковой длиной волны 1550 нм (регистрируемый диапазон длин волн 800-1700 нм), фоточувствительностью 0.95 А/Вт, площадью активной области 0.196 мм² и материалом сенсора InGaAs [44].

Для моделирования оптической системы использовался пакет Zemax OpticStudio 21.1.2. Рассмотрим задание параметров компонентов системы (рисунки 4.1):

Object Type	Comment	Ref Object	Inside Of	X Position	Y Position	Z Position	Tilt About X	Tilt About Y	Tilt About Z	Material	# Layout Rays	Analysis Ra	Power(Watts)	Wavelength	Color #	Asigmatism	X-Divergence	X-SuperGauss	Y-Divergence	Y-SuperGauss
1	Source Diode	FPL1055T	0	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	10	SE+06	0.300	0	0	0.000	12.740	1.000	23.781	1.000
2	Annulus	FDGA05	0	0	0.000	0.000	2000.000	0.000	0.000	0.000	2.300	2.300	1.250	1.250						
3	Cylinder Pipe	FDGA05	2	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.300	4.800	2.300							
4	Detector Surface	FDGA05	2	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.250	0.000	16	8	0	0	0	0

Рисунок 2.1 — Задание параметров оптической системы в Zemax

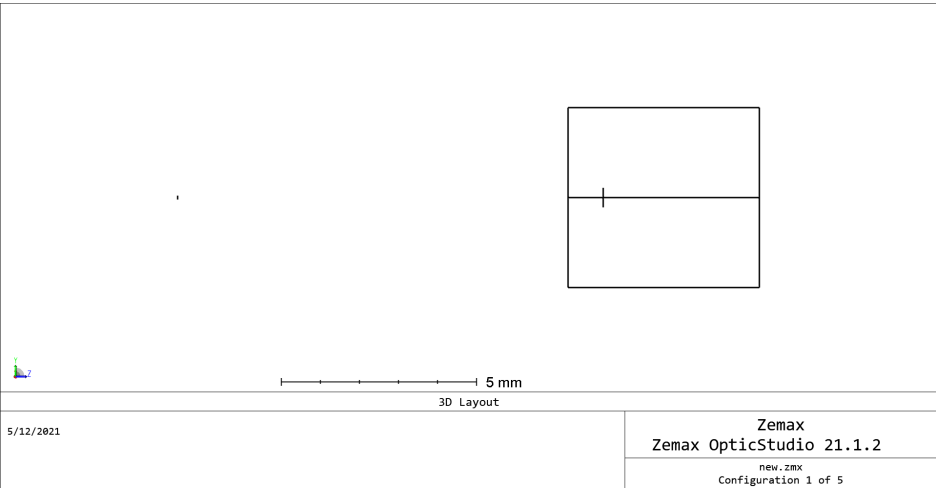


Рисунок 2.2 — Вид системы сбоку; слева – площадка лазерного диода, справа – фотодиод в корпусе; расстояние между лазерным диодом и корпусом фотодиода 10 мм

Первые 11 колонок (до колонки «# Layout Rays») универсальны для всех объектов в Zemax: тип объекта, комментарий, референтный объект, нахождение внутри другого объекта, X, Y и Z координаты, наклон вокруг осей

X, Y и Z, материал объекта (где применимо). Далее идут специфические для объекта параметры:

Для лазерного диода: количество лучей для рендеринга и для расчётов (выбираются произвольно), мощность источника (выбрана в соответствии с [43]), номер длины волны (задаётся список используемых длин волн, задана только одна – 1550 нм, поэтому в ячейке стоит ноль – выбор любой длины волны из списка), цвет лучей на рендере, астигматизм (расстояние, на которое смещено распределение излучения в плоскости XZ), расходимость α_x для направления OX, супер-гауссов коэффициент G_x в направлении OX, расходимость α_y и супер-гауссов коэффициент G_y для направления OY.

Супер-гауссов коэффициент показывает отличие профиля интенсивности данного пучка от профиля интенсивности Гауссова пучка – чем он больше, тем ближе профиль интенсивности излучения к прямоугольному профилю [45]. Для обоих направлений был выбран супер-гауссов коэффициент $G_{x,y} = 1$ (Гауссово распределение интенсивности). Следуя документации Zemax, можно рассчитать $\alpha_{x,y}$ следующим образом:

$$\alpha_{x,y} = \frac{\theta_{\text{fwhm}}}{\sqrt{2 \ln(2)}},$$

где θ_{fwhm} – угол расходимости из [43].

Два следующих объекта формируют корпус фотодиода: круг с отверстием и трубка. Для круга с отверстием задаются радиусы отверстия и самого круга по большой и малой полуосям. Их значения соответствуют размерам реального лазерного диода [44]. Его положение задаётся относительно лазерного диода. Для трубки задаются радиусы начала и конца, длина. Радиусы равны и взяты из документации к фотодиоду, длина взята произвольной, положение задаётся относительно круга с отверстием. Этого достаточно для данного моделирования, так как стекло, закрывающее активную область от физического воздействия влияет пренебрежимо слабо на ход лучей и оптическую мощность на приёмнике, а всё, что находится за активной областью не влияет на модель вообще. Виды фотодиода приведены на рисунке 4.3.

Для фотодиода заданы размеры апертуры (взяты из документации), количество угловых и радиальных зон оставлены по умолчанию и необходимы для расчётов в симуляции. Положение фотодиода задаётся относительно

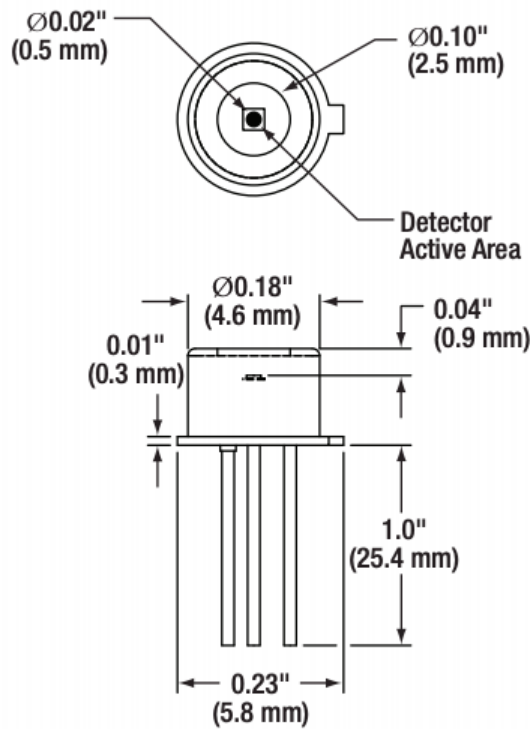


Рисунок 2.3 — Виды сверху и спереди фотодиода FDGA05 [44]

круга с отверстием и соответствует положению фотодиода в корпусе. Вид системы сбоку представлен на рисунке 4.2.

Для анализа системы зададим $5 \cdot 10^6$ лучей, проведём трассировку лучей и получим оптическую мощность, полученную на фотодиоде. Анализ будем производить для различных расстояний между лазерным диодом и фотоприёмником. Результаты всех симуляций приведены в приложении А в таблице А.1. Построим график зависимости оптической мощности от расстояния (рисунок 4.4).

Эту зависимость можно аппроксимировать функцией $f(x) = \frac{1}{R^2}$, так как зависимость оптической мощности от расстояния подчиняется закону обратных квадратов. Лучшим образом для этого подходит функция $f(x) = \frac{0.615}{(x+1.639)^2} - 2.049 \cdot 10^{-4}$ (показана на графике пунктирной зелёной линией, результаты симуляции показаны синими точками).

2.2 Базовая система с собирающей линзой

Далее добавим в систему собирающую сферическую линзу, конфигурация системы приведена на рисунке 4.5.

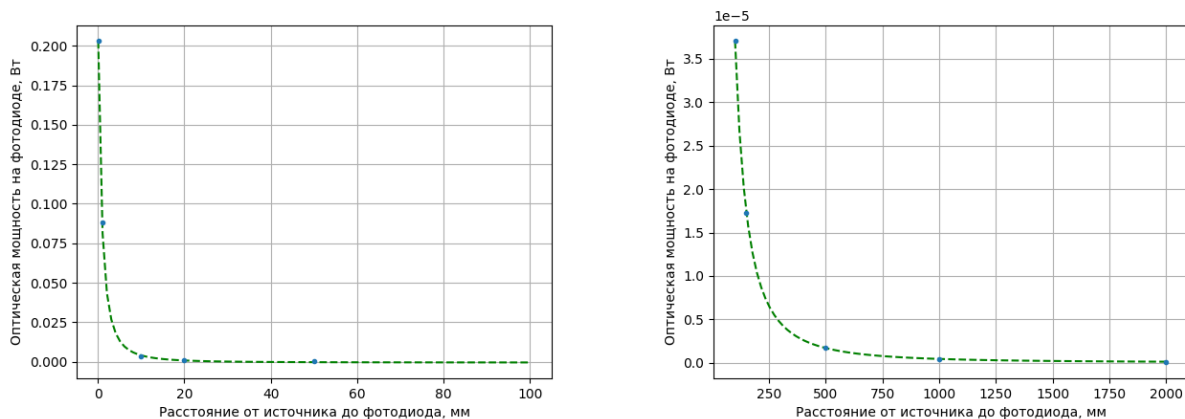


Рисунок 2.4 — Зависимость оптической мощности на фотодиоде от расстояния между лазерным диодом и фотодиодом: результаты симуляции показаны синими точками, аппроксимирующая функция показана зелёной пунктирной линией

	Object Type	Comment	Ref Object	Inside Of	X Position	Y Position	Z Position	Tilt About X	Tilt About Y	Tilt About Z	Material	Radius 1	Conic 1	Clear 1	Edge 1	Thickness	Radius 2	Conic 2	Clear 2	Edge 2
1	Source Diode	FPL1055T	0	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-	10	5E+06	0.300	0	0	0.000	12.740	1.000	23.781
2	Annulus	FDGA05	0	0	0.000	0.000	100.000	0.000	0.000	0.000	ABSORB	2.300	2.300	1.250	1.250					
3	Cylinder Pipe	FDGA05	2	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	ABSORB	2.300	4.900	2.300						
4	Standard Lens		2	0	0.000	0.000	-15.860	0.000	0.000	0.000	LZ_K8	8.500	0.000	6.500	6.500	3.300	0.000	0.000	6.500	6.500
5	Detector Surface	FDGA05	2	0	0.000	0.000	0.900	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000	0.250	0.000	16	8	0	0	0

Рисунок 2.5 — Задание параметров оптической системы с линзой в Zemax

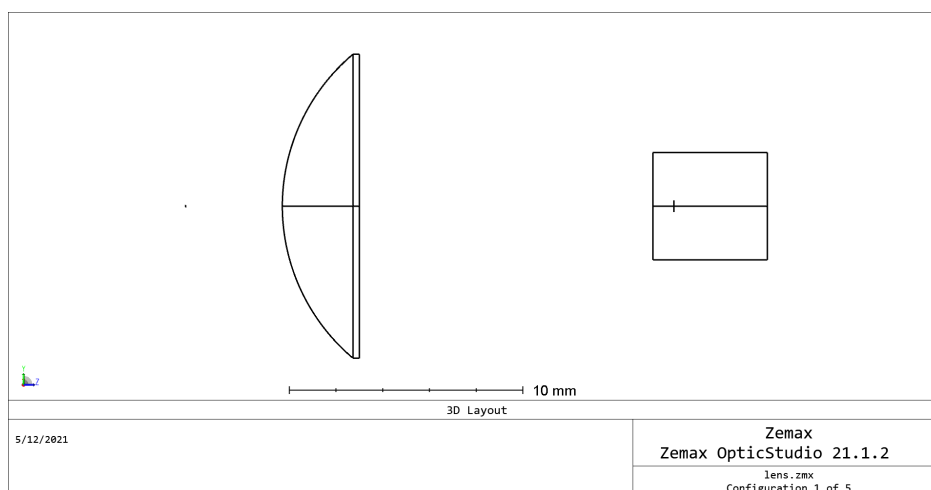


Рисунок 2.6 — Вид системы сбоку; слева – площадка лазерного диода, по середине – собирающая линза, справа – фотодиод в корпусе; расстояние между лазерным диодом и корпусом фотодиода 20 мм

Рассмотрим параметры линзы: зададим положение линзы относительно круга с отверстием, аналогично положению фотодиода. Материал линзы – оптическое стекло K8 с показателем преломления $n = 1.507$ на длине волны $\lambda = 1550$ нм. Линза плоско-выпуклая с радиусом кривизны поверхности

$R = 8.5$ мм, толщиной линзы $d = 3.3$ мм. Очевидно, что фокусной расстояние этой линзы (по формуле 4.1) $f = 16.76$ мм.

$$\frac{1}{f} = \frac{n - 1}{R} \quad (2.1)$$

Тогда для лучшей фокусировки лучей необходимо поместить фотодиод в фокус линзы, то есть необходимо поместить линзу на расстоянии 15.86 мм от корпуса фотодиода (фотодиод находится на расстоянии 0.9 мм от поверхности корпуса) – рисунок 4.5. Вид системы с боку представлен на рисунке 4.6. Аналогично двум предыдущим случаям, будем менять расположение линзы относительно фотодиода и наблюдать за изменением оптической мощности на приёмнике. Все результаты симуляции приведены в приложении А в таблице А.2. График результатов приведен на рисунке 4.7.

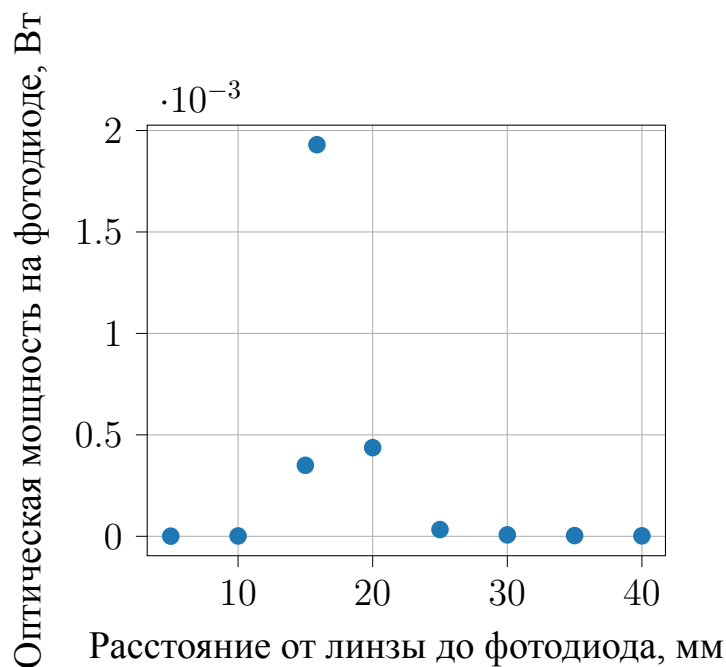


Рисунок 2.7 — Зависимость оптической мощности на фотодиоде от расстояния между собирающей линзой и фотодиодом: результаты симуляции показаны синими точками

По графику видно, что действительно наибольшая оптическая мощность на фотодиоде наблюдается при нахождении фотодиода в фокусе линзы.

2.3 Исследование диаграммы направленности приёмника

Для более полного представления о характеристиках фотодиода составим нормированный график оптической мощности в зависимости от направления источника излучения. Для этого заменим лазерный диод на плоский прямоугольный источник (Source Rectangle в Zemax) – рисунок 4.8, вид системы с боку приведён на рисунке 4.9.

	Object Type	Mount Z	Material	# Layout Rays	# Analysis Rays	Power(Watts)	Wavelength	Color #	X Half Width	Y Half Width	Source Distan	Cosine Expon	Gauss Gx	Gauss Gy
1	Source Rectangle	0.00		100	5E+06	1000.000	0	0	6.500	6.500	0.000	0.000	1.000E+20	1.000E+20
2	Annulus	0.00	ABSO...	2.300	2.300	1.250	1.250							
3	Cylinder Pipe	0.00	ABSO...	2.300	4.900	2.300								
4	Standard Lens	0.00	LZ_K8	8.500	0.000	6.500	6.500	3.300	0.000	0.000	6.500	6.500		
5	Detector Surface	0.00		0.000	0.000	0.250	0.000	16	8	0	0	0	0	0.000

Рисунок 2.8 — Задание параметров оптической системы с плоским прямоугольным источником в Zemax

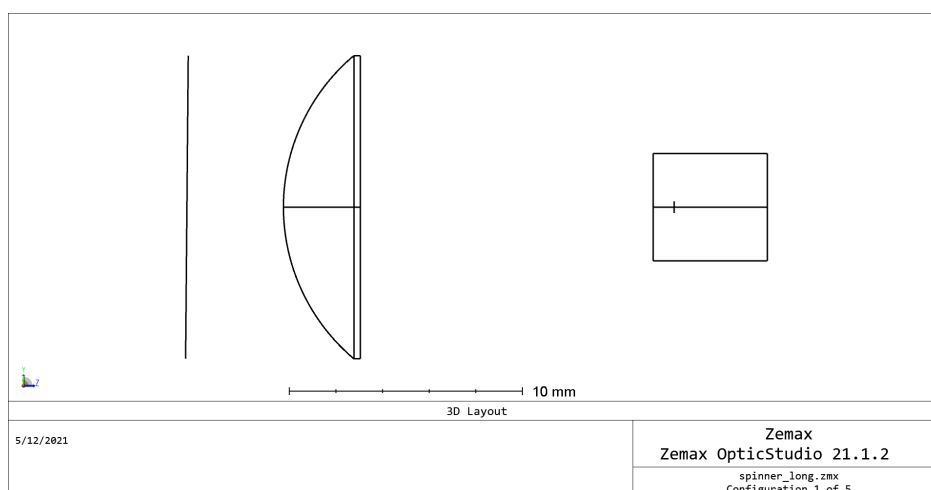


Рисунок 2.9 — Вид системы сбоку; слева – площадка плоского источника излучения, справа – фотодиод в корпусе; расстояние между лазерным диодом и корпусом фотодиода 20 мм

Параметры задаются аналогично параметрам лазерного диода в разделе 4.1. Зададим размеры источника 13x13 мм (квадрат со стороной, равной диаметру линзы). Для создания параллельного пучка излучения зададим супер-гауссовы параметры $G_{x,y}$: чем больше эти параметры, тем более узким выходит пучок. Были выбраны значения $G_{x,y} = 10^{20}$, в результате чего пучок лучей оказывается достаточно параллельным для выбранного расстояния [46]:

$$I(l, m) \approx I_0 \exp(-G_x l^2 - G_y m^2), G_x = G_y \gg l, m \Rightarrow I(l, m) \approx I_0 \quad (2.2)$$

где l и m – направляющие косинусы вдоль OX и OY соответственно. Величина мощности не важна, так как будем нормировать графики по максимальному значению. Будем вращать источник вокруг OX (в одну сторону, так как система полностью симметрична относительно плоскости ZOX ; вращаем с шагом в 1°) и трассировать лучи. Результаты всех симуляций приведены в приложении А в таблице А.3. Построим график зависимости оптической мощности от угла поворота источника (рисунок 4.10).

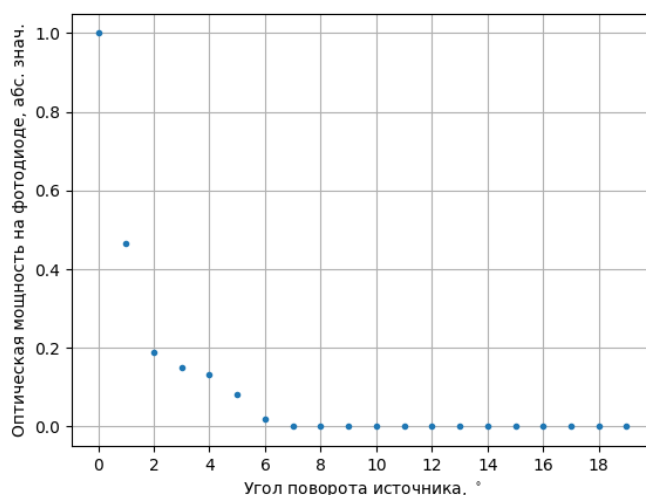


Рисунок 2.10 — График зависимости нормированной оптической мощности на приёмнике от угла поворота источника (система с линзой)

Аналогично проведём моделирование системы без линзы. Результаты всех симуляций приведены в приложении А в таблице А.4, график зависимости оптической мощности от угла поворота источника представлен на рисунке 4.11.

По результатам изменения параметров видно, что самая высокая оптическая мощность достигается при наименьшем расстоянии между фотодиодом и лазерным диодом или при установке собирающей линзы на расстоянии от фотодиода, равном фокусному. Однако даже в наилучших случаях оптическая мощность значительно меньше, чем мощность излучения источника (0.203 Вт и 0.00193 Вт соответственно, против 0.3 Вт источника). Очевидно,

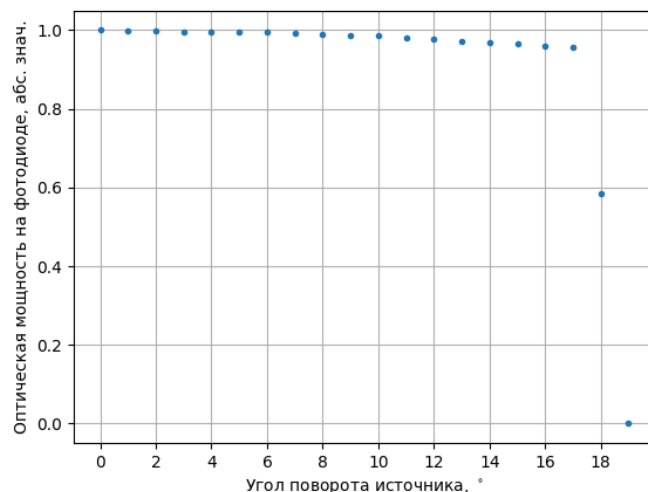


Рисунок 2.11 — График зависимости нормированной оптической мощности на приёмнике от угла поворота источника (система без линзы)

что необходима дополнительная оптическая система для коллимации лучей источника и для фокусировки лучей у приёмника для уменьшения оптических потерь системы и для создания системы, в которой возможно передавать информацию.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ

Как уже было сказано в предыдущем разделе 4, в качестве приёмника был выбран фотодиод FDGA05. Рассчитаем пропускную способность f_{BW} этого фотодиода по данным производителя [44]:

$$f_{BW} = \frac{1}{2\pi R_L C_j}, \quad (3.1)$$

где $R_L = 50$ Ом – сопротивление нагрузки, $C_j = 10$ пФ = 10^{-11} Ф – ёмкость фотодиода. Тогда $f_{BW} = 3.1831 \cdot 10^8$ Гц = 318.31 МГц.

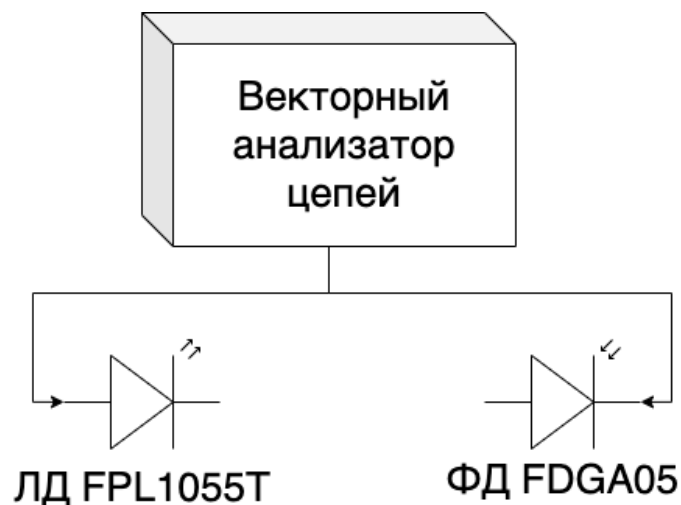


Рисунок 3.1 — Схема экспериментальной установки, использованной для проведения измерения ёмкости фотодиода FDGA05. Здесь ЛД и ФД – лазерный и фото диоды соответственно



Рисунок 3.2 — Фотодиод FDGA05, распаянный на плате с SMA разъёмом, вид спереди

Экспериментально подтвердим это значение. Для этого соберём экспериментальную установку, состоящую из фотодиода FDGA05 [44] и лазерного диода FPL1055T [43]. Оба компонента распаяны на платы (рисунки 5.2, 5.3) для подключения к векторному анализатору цепей Rohde Schwarz



Рисунок 3.3 — Фотодиод FDGA05 (слева) и лазерный диод FPL1055T (справа), распаянные на платах с SMA разъёмом, вид сверху

ZVA 40 через SMA разъем (собранная установка аналогична установке представлена на рисунке 5.4: на ней показаны лазерный диод FPL1055T слева и фотодиод, использованный в работе [47], схематично экспериментально показана на рисунке 5.1).



Рисунок 3.4 — Собранная экспериментальная установка с лазерным диодом FPL1055T и фотодиодом, использованным в работе [47]

К первому порту векторного анализатора цепей подключен лазерный диод, ко второму – фотодиод. Для расчёта пропускной способности необходимо измерить ёмкость фотодиода экспериментально. Сделаем это при помощи измерения комплексного коэффициента отражения векторным анализатором (полученная диаграмма Смита приведена на рисунке 5.5).

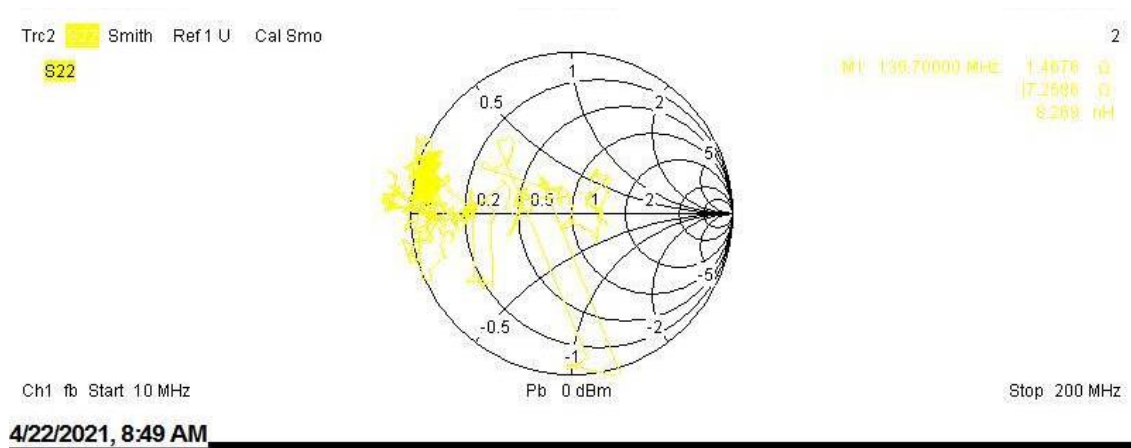


Рисунок 3.5 — Диаграмма Смита для фотодиода

По измеренным данным не удаётся демодулировать сигнал из-за большого коэффициента отражения. Это связано с тем, что в сверх высокочастотный тракт ничего не проходит, так как нет согласования фотодиода по высоким частотам. С точки зрения работы в высокочастотном тракте, фотодиод представляет собой рассогласованную по сопротивлению нагрузку, поэтому сигнал переотражается и без схемы согласования не удаётся детектировать высокочастотный сигнал и исследовать амплитудно-частотную характеристику.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом выпускной квалификационной работы являются модель оптической системы в программе Zemax OpticStudio. В ходе работы был проведён обзор существующей коммерчески доступной компонентной базы, на примере производителя Thorlabs, выбран фотодетектор, построена модель оптической системы с ним, проведено исследование зависимости оптической мощности на нём в зависимости от различных параметров системы, был проведён эксперимент с целью рассчитать ширину полосы пропускания фотодиода.

В ходе работы было показано, что возможно создание Li-Fi сети с использованием стандартных компонентов, что позволит увеличить скорость внедрения и популяризации технологии, инфракрасной длины волны для восходящего сигнала, что является безопасным для человека, не мешает в освещении и позволяет увеличить мощность источника излучения для повышения качества передаваемого сигнала и скорости передачи информации. Была построена модель оптической системы, которая позволяет исследовать зависимость оптической мощности, улавливаемой фоточувствительной площадкой фотоприёмника в зависимости от различных параметров системы – углы расходимости источника, угол поворота источника, расстояние между источником и приёмником, мощность источника.

В дальнейшем работу можно продолжить: при использовании схемы согласования, возможно измерить ёмкость фотодиода и рассчитать его полосу пропускания, исследовать возможность и целесообразность использования светофильтров и просветляющего покрытия на оптике (фокусирующая линза, защитное стекло фотоприёмника) для улучшения качества связи или уменьшения необходимой мощности излучения источника.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Study on the future UK spectrum demand for terrestrial mobile broadband applications : Rep. / Ofcom : 2013. — Jun.
2. Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2017–2022 : Rep. / Cisco : 2019. — Feb. — Access mode: <https://s3.amazonaws.com/media.mediapost.com/uploads/CiscoForecast.pdf> (online; accessed: May 31, 2021).
3. 1-Gb/s Transmission Over a Phosphorescent White LED by Using Rate-Adaptive Discrete Multitone Modulation / A. M. Khalid, G. Cossu, R. Corsini et al. // IEEE Photonics Journal. — 2012. — Oct. — Vol. 4, no. 5. — P. 1465–1473.
4. 3.4 Gbit/s visible optical wireless transmission based on RGB LED / G. Cossu, A. M. Khalid, P. Choudhury et al. // Optics Express. — 2012. — Dec. — Vol. 20, no. 26. — P. B501. — Access mode: <https://doi.org/10.1364/oe.20.00b501>.
5. Azhar A., Tran T., O'Brien D. A Gigabit/s Indoor Wireless Transmission Using MIMO-OFDM Visible-Light Communications // IEEE Photonics Technology Letters. — 2013. — Jan. — Vol. 31, no. 6. — P. 918–929.
6. Dimitrov S., Haas H. Information rate of ofdm-based optical wireless communication systems with nonlinear distortion // Journal of Lightwave Technology. — 2013. — Vol. 31, no. 6. — P. 918–929.
7. VLC: Beyond Point-to-Point Communication / B. Harald, S. Nikola, T. Dobroslav et al. // IEEE Communications Magazine. — 2014.
8. What is LiFi? / Harald Haas, Liang Yin, Yunlu Wang, Cheng Chen // J. Lightwave Technol. — 2016. — Mar. — Vol. 34, no. 6. — P. 1533–1544. — Access mode: <http://jlt.osa.org/abstract.cfm?URI=jlt-34-6-1533>.
9. Thorlabs. — Laser Diode FPL1055T Spec Sheet, 2016. — Aug. — Access mode: <https://www.thorlabs.com/drawings/431d34f9a58391b2-C25CF7A0-910A-7323-5050EC316F2FD190/FPL1055T-SpecSheet.pdf> (online; accessed: May 31, 2021).

10. Thorlabs. — Photo Diode FDGA05 Spec Sheet, 2017. — Feb. — Access mode: <https://www.thorlabs.com/drawings/431d34f9a58391b2-C25CF7A0-910A-7323-5050EC316F2FD190/FDGA05-SpecSheet.pdf> (online; accessed: May 31, 2021).
11. Paschotta R. Flat-Top Beams // Encyclopedia of Laser Physics and Technology. — 2008. — Oct. — Access mode: https://www.rp-photonics.com/flat_top_beams.html (online; accessed: May 31, 2021).
12. Zemax. — Zemax OpticStudio 21.1 User Manual, 2021. — Jan.
13. Wireless local data transmission network through LED lighting compatible with IEEE 802.11 protocol communication systems / O. A. Kozyreva, I. S. Polukhin, D. S. Shiryayev et al. // Journal of Physics: Conference Series. — 2019. — Jun. — Vol. 1236. — P. 012085. — Access mode: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1236/1/012085>.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
РЕЗУЛЬТАТЫ СИМУЛЯЦИИ

Таблица А.1 — Результаты симуляции оптической системы в Zemax, зависимость оптической мощности на фотодиоде от расстояния между лазерным диодом и фотодиодом

№	Расстояние между лазерным диодом и фотодиодом, мм	Оптическая мощность на фотодиоде, Вт
1	0.1	$2.03 \cdot 10^{-1}$
2	1	$8.82 \cdot 10^{-2}$
3	10	$3.33 \cdot 10^{-3}$
4	20	$8.97 \cdot 10^{-4}$
5	50	$1.49 \cdot 10^{-4}$
6	100	$3.70 \cdot 10^{-5}$
7	150	$1.73 \cdot 10^{-5}$
8	500	$1.80 \cdot 10^{-6}$
9	1000	$4.80 \cdot 10^{-7}$
10	2000	$6.00 \cdot 10^{-8}$

Таблица А.2 — Результаты симуляции оптической системы в Zemax, зависимость оптической мощности на фотодиоде от расстояния между собирающей линзой и фотодиодом

№	Расстояние между линзой и фотодиодом, мм	Оптическая мощность на фотодиоде, Вт
1	5	$7.47 \cdot 10^{-7}$
2	10	$1.66 \cdot 10^{-6}$
3	15	$3.50 \cdot 10^{-4}$
4	15.86	$1.93 \cdot 10^{-3}$
5	20	$4.37 \cdot 10^{-4}$
6	25	$3.32 \cdot 10^{-5}$
7	30	$7.06 \cdot 10^{-6}$
8	35	$3.52 \cdot 10^{-6}$
9	40	$2.30 \cdot 10^{-6}$

Таблица А.3 — Результаты симуляции оптической системы в Zemax, зависимость оптической мощности на фотодиоде от угла поворота источника (система с линзой)

№	Угол поворота источника, °	Оптическая мощность на фотодиоде, Вт
1	0	$1.82 \cdot 10^{-1}$
2	1	$8.47 \cdot 10^{-2}$
3	2	$3.42 \cdot 10^{-2}$
4	3	$2.74 \cdot 10^{-2}$
5	4	$2.41 \cdot 10^{-2}$
6	5	$1.50 \cdot 10^{-2}$
7	6	$3.42 \cdot 10^{-3}$
8	7	0

Таблица А.4 — Результаты симуляции оптической системы в Zemax, зависимость оптической мощности на фотодиоде от угла поворота источника (система без линзы)

№	Угол поворота источника, °	Оптическая мощность на фотодиоде, Вт
1	0	$1.13 \cdot 10^{-2}$
2	1	$1.13 \cdot 10^{-2}$
3	2	$1.13 \cdot 10^{-2}$
4	3	$1.13 \cdot 10^{-2}$
5	4	$1.13 \cdot 10^{-2}$
6	5	$1.13 \cdot 10^{-2}$
7	6	$1.13 \cdot 10^{-2}$
8	7	$1.13 \cdot 10^{-2}$
9	8	$1.12 \cdot 10^{-2}$
10	9	$1.12 \cdot 10^{-2}$
11	10	$1.12 \cdot 10^{-2}$
12	11	$1.11 \cdot 10^{-2}$
13	12	$1.11 \cdot 10^{-2}$
14	13	$1.10 \cdot 10^{-2}$
15	14	$1.10 \cdot 10^{-2}$
16	15	$1.09 \cdot 10^{-2}$
17	16	$1.09 \cdot 10^{-2}$
18	17	$1.08 \cdot 10^{-2}$
19	18	$6.62 \cdot 10^{-3}$
20	19	0