

С. Н. Былин¹, В. В. Лубский¹✉

Применение дифракционного элемента в качестве разветвителя в оптической модели связи

Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: vvl0777@mail.ru

Аннотация. Данная работа посвящена исследованию применения полимерной рельефной решетки в качестве оптического разветвителя при передаче сигналов через оптический волновод. Определена величина деполяризации световой волны, прошедшей через оптический волновод.

Ключевые слова: дифракционная решетка, оптический разветвитель

S. N. Bylin¹, V. V. Lubsky¹✉

Application of a diffractive element as a splitter in an optical communication model

¹Siberian State University of Telecommunications and Information Science,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: vvl0777@mail.ru

Abstract. This work is devoted to the study of the use of a polymer relief grating as an optical splitter when transmitting signals through an optical waveguide. The value of depolarization of a light wave passed through an optical waveguide is determined.

Keywords: diffraction grating, optical splitter

Введение

Дифракционный оптический элемент представляет собой пропускающую или отражающую пластинку с тонким фазовым микрорельефом, рассчитанным в рамках теории дифракции [1]. Современные методы электронно-лучевой литографии и нанофотоники позволяют создавать миниатюрные решетки с субволновыми периодами, открывая возможности для их интеграции в чипы и квантовые устройства. С появлением волоконно-оптических технологий и систем спектрального уплотнения (WDM) в 1980-х годах дифракционные решетки нашли новое применение в телекоммуникациях [2,3]. Они стали сердцем демультиплексоров, разделяющих десятки световых каналов в одном волокне, что обеспечило экспоненциальный рост пропускной способности интернет-магистралей.

Параллельно с демультиплексорами дифракционные решетки начали использовать и в оптических разветвителях, хотя их роль здесь принципиально иная. Если демультиплексоры избирательно разделяют сигналы по длине волны, то разветвители равномерно распределяют оптическую мощность между не-

сколькими выходами без спектральной селективности [4]. Такие устройства стали ключевыми элементами пассивных оптических сетей (PON), где один сигнал от центрального узла делится между десятками абонентов. Однако в гибридных решениях, например, WDM-разветвителях, дифракционные решетки комбинируют обе функции: они разделяют сигнал по каналам, а затем распределяют их по отдельным ветвям, что особенно востребовано в гибридных сетях GPON/XGS-PON.

Конструкции разветвителей могут быть различными, например, сварными, с расщеплением пучка зеркалами, с вращающимся зеркалом, на основе дифракционной решетки (рис.1) [5].

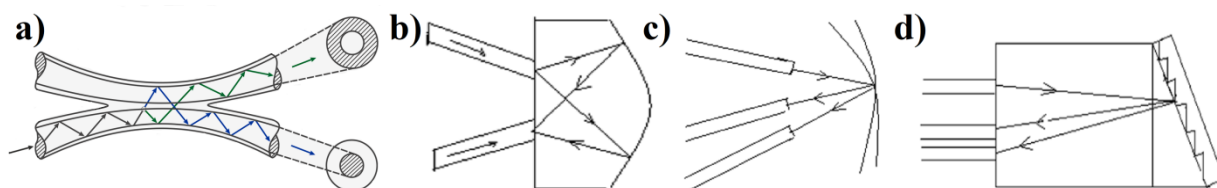


Рис. 1. Оптические разветвители: сварной (а), с неподвижным зеркалом (b), с подвижным зеркалом (с), с дифракционной решеткой (d)

Благодаря совершенствованию технологий нанесения периодических структур, разветвители на основе дифракционных решеток достигли высокой эффективности и миниатюризации. Это позволило интегрировать их не только в магистральные линии, но и в потребительское оборудование, например, модули для дата-центров или компактные сенсоры. В последние годы возрос спрос на компактные и экономичные дифракционные разветвители. Цель данной работы – исследовать возможность использования недорогих полимерных дифракционных решеток с рельефной структурой в качестве эффективных разветвителей.

Экспериментальная часть

Разработанная и изготовленная модель оптико-электронного устройства, предназначенного для передачи аудио сигналов через оптический канал с использованием дифракционного разветвителя, представлена на рис. 2. Структурная схема этой установки показана на рис. 3.

Устройство включает следующие электрические компоненты.

1) Блок питания устройства, состоящий двух независимых источников (АКБ 2) и обеспечивающий стабильное напряжение для всех компонентов. Для питания предусилителей и усилителя 2 применены три последовательно соединенных литий-ионных аккумулятора емкостью 2500 мА · ч каждый, формирующие общее напряжение 11,1 В. Усилитель 1 и Bluetooth-модуль питаются от отдельного литий-ионного аккумулятора (3,7 В, 2500 мА · ч, АКБ 1) через повышающий DC-DC преобразователь, стабилизирующий напряжение до 5 В.

2) Bluetooth модуль, XY-BT-MINI-770, служащий для беспроводной передачи аудиосигнала со смартфона на систему по протоколу Bluetooth 4.1, частота 2,4 ГГц, скорость передачи до 1 Мбит/с. Модуль преобразует аналоговый аудиосигнал в цифровой формат и передает его через UART- интерфейс.

3) Встроенный цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), обеспечивающий восстановление аналогового сигнала для дальнейшей обработки. Усилитель 1 на базе биполярного транзистора КТ816А р-п-р, работающий в режиме класса А, обеспечивает линейное усиление аудиосигнала с минимальными искажениями. Статический коэффициент передачи по току более 25, обратный ток коллектора не более 0,1 мА, максимальный ток коллектора 3 А.

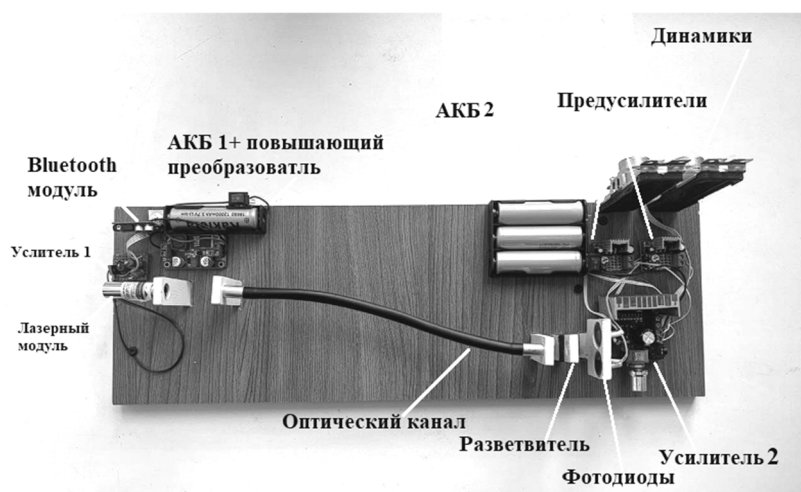


Рис. 2. Модель устройства передачи аудио сигналов

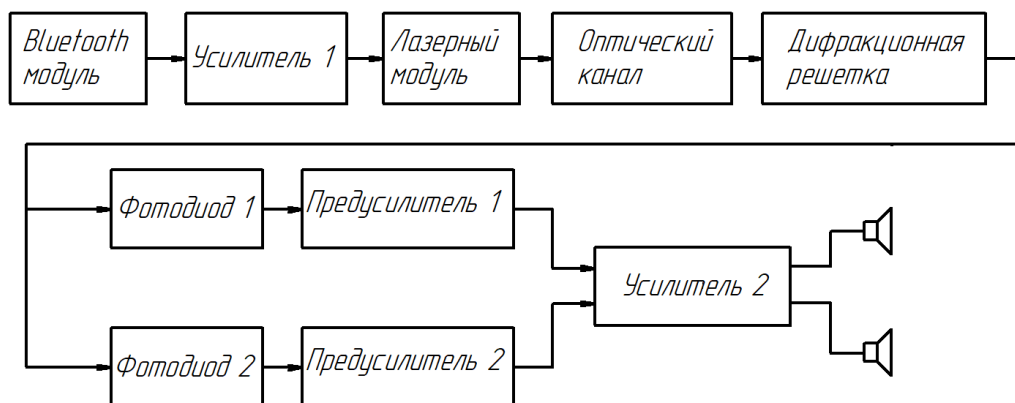


Рис. 3. Структурная схема модели устройства передачи аудио сигналов

4) Предусилитель, представленный одноканальным модулем усиления мощности на микросхеме TDA2030A. Предназначен для усиления слабого сигнала с фотодиода. Максимальная выходная мощность 18 Вт, Питание 6-12 В.

5) Усилитель 2, представленный модулем на микросхеме TDA7297. Модуль имеет два канала по 15 Вт каждый, питание 9-12В, амплитудно-частотная

характеристика захватывает весь слышимый диапазон 20-20000 Гц, рабочий ток 2 А, выходное сопротивление 4 Ом, размер платы 53 x 50 x 41 мм.

6) Для воспроизведения аудиосигналов использовались два динамика Y2898-01 4 Ом 5 Вт.

Оптическая система устройства включает в себя следующие компоненты.

1) Точечный лазерный модуль со стабилизацией тока, предназначенный для преобразования электрического сигнала в модулированное оптическое излучение. Лазерный диод, с длиной волны $\lambda = 650$ нм, мощностью 5 мВт и максимальным током 40 мА (питание 3-5 В), работает в режиме прямой модуляции. Размер лазерного модуля 36x12 мм. Внешний вид представлен на рис. 4.



Рис. 4. Точечный лазерный модуль

2) Оптический канал, представленный волноводом, состоящим из множества оптических волокон. Внешний вид оптического волновода показан на рис. 5. Особое внимание уделялось углу ввода излучения в волокна, который составлял 15° – это значение было выбрано для минимизации потерь на вводе сигнала в оптический волновод.

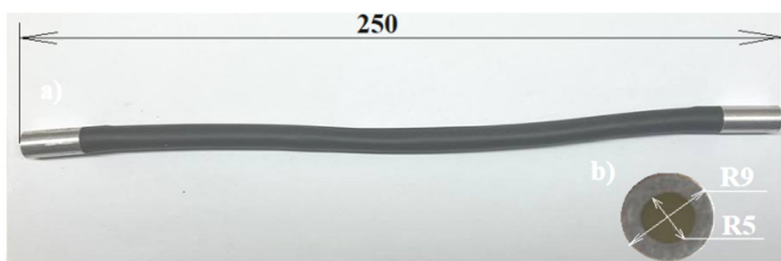


Рис. 5. Оптический волновод, фронтальная сторона (a), вид с боку (b)

3) Дифракционный элемент в виде рельефной решетки, предназначенной для распределения интенсивности лазерного излучения между двумя каналами.

4) Два фотодиода ФД-24К, предназначенные для преобразования дифрагировавшего оптического излучения на дифракционном элементе в

электрический сигнал. Темновой ток не более 2,5 мкА, область спектральной фоточувствительности 0,4-1,1 мкм.

Для определения количественных характеристик рельефной решетки была собрана оптическая система, включающая лазерный модуль с длиной волны $\lambda = 520$ нм, решетку и экран, расположенный на расстоянии $L = 16$ см от решетки. Лазерный луч, падающий перпендикулярно на решетку, формировал на экране дифракционную картину с четко выраженными максимумами (рис. 6). Измеренное отклонение первого порядка ($m=1$) составило $y = 9,7$ см. В первом приближении рельефная решетка может быть представлена в виде тонкой дифракционной решетки. Согласно уравнению главных максимумов интенсивностей тонкой дифракционной решетки, при периоде решетки d , угле отклонения φ дифрагировавшей световой волны, был найден период тонкой решетки, равный $d \approx 1 \cdot 10^{-6}$ м, а количество штрихов на миллиметр составило $N \approx 1000$.

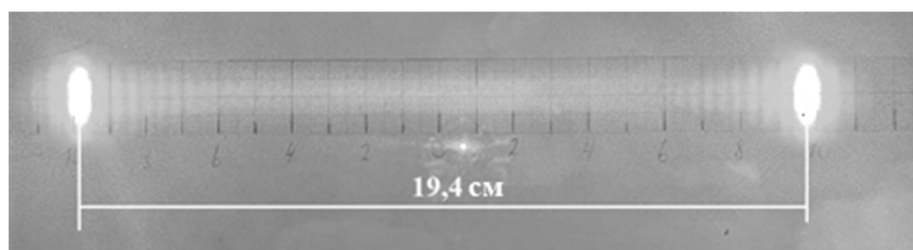


Рис. 6. Дифракционная картина с четко выраженными максимумами интенсивности

Для регистрации дифракционных максимумов в модели устройства, фотодиоды размещались на экране, расположенном на расстоянии $L_1 = 15$ мм от решетки. Линейное отклонение луча x в первом порядке определялось из соотношения (1)

$$x = L_1 \cdot \operatorname{tg}(\varphi_1), \quad (1)$$

где угол дифракции $\varphi_1 = 40,5^\circ$, а отклонение $x = 12,8$ мм.

В ходе проведения измерений линейное отклонение луча первого порядка на дифракционной картине (рис. 7) составило $x = 12 \text{ мм} \pm 1 \text{ мм}$. Погрешность обусловлена ограниченной точностью измерительной системы.

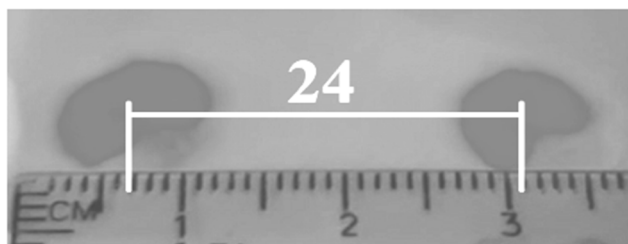


Рис. 7. Дифракционная картина

Для оценки влияния поляризационных эффектов на передачу оптического сигнала был проведен ряд экспериментов с использованием поляризатора. Измерения выходного сигнала проводились с помощью фотодиода ФД-24К, регистрирующего мощность излучения через выходное напряжение в трех ключевых конфигурациях: лазер-поляризатор-фотодиод (первое подключение); лазер-поляризатор-волокно-фотодиод (второе подключение); лазер-волокно-поляризатор-фотодиод (третье подключение). Результаты эксперимента показали значительную зависимость эффективности передачи от поляризационного состояния лазерного излучения. При первом подключении напряжение на фотодиоде варьировалось от 0,01 до 0,28 В, в зависимости от угла поворота поляризатора, показывая высокую степень поляризации лазерного излучения ($P=93\%$), тогда как без поляризатора выходное напряжение стабильно составляло 0,32 В. При втором подключении диапазон регистрируемых напряжений составил 0,01 – 0,17 В, что также демонстрирует высокую степень поляризации ($P=80\%$). При третьем подключении диапазон регистрируемых напряжений составил 0,08 – 0,12 В, что соответствует снижению степени поляризации до $P=20\%$, при отсутствии поляризатора значение напряжения на фотодиоде достигало 0,24 В.

Заключение

Разработана и изготовлена модель оптико-электронного устройства, интегрирующая лазерные модули, фотодиоды и усилители, доказала возможность интеграции таких решений в устройства связи и передачи аудиосигналов через оптический канал с использованием дифракционного разветвителя. Экспериментально подтверждена эффективность использования дифракционного элемента в виде полимерной рельефной решетки в качестве оптического разветвителя для передачи аудиосигналов. Получена высокая степень деполяризации с 93% до 20% после прохождения лазерного излучения по оптическому каналу. Полученные результаты демонстрируют перспективность использования полимерных рельефных решеток в качестве недорогих дифракционных элементов для гибридных систем, обеспечивающих спектральное разделение и распределение сигналов. Такие решения представляют особый интерес для GPON/XGS-PON сетей, дата-центров, портативной электроники, а также беспилотных летательных аппаратов, где критически важны энергоэффективность, компактность и малый вес оптических компонентов.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность Батомункуеву Юрию Цыдыповичу за ценные замечания и консультации, а также за поддержку при выполнении работы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Настас А. М., Иову М. С. Исследование влияния глубины рельефа на дифракционную эффективность отражающей и пропускающей рельефно-фазовых дифракционных решеток // Журнал технической физики. – 2015. – Т. 85. – №. 7. – С. 133-134.

2. Наливайко В. И., Пономарева М. А. Анализ характеристик волноводного устройства для объединения внешних оптических пучков // Оптика и спектроскопия. – 2023. – Т. 131. – №. 1. – С. 95-99.
3. Расчет дифракционного поля в слоистой среде, освещаемой через фазовую маску / А. Б. Сотский, С. О. Парашков, В. И. Соколов, Л. И. Сотская // Оптика и спектроскопия. – 2016. – Т. 121, № 6. – С. 983-994. – DOI 10.7868/S0030403416120254. – EDN XGWCDN.
4. Базакуца П.В., Боев М.А., Никитин А.И. Исследование спектральных характеристик оптических разветвителей // Фотон-экспресс. 2019. №ВКВО. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-spektralnyh-harakteristik-opticheskikh-razvetviteley> (дата обращения: 02.05.2025).
5. Оптические компоненты и системы [Электронный ресурс] // XDW. – URL: <https://xdw.ru/rubrics/27/> (дата обращения 01.05.2025).
6. Оптические разветвители: что это и где применяется [Электронный ресурс] // Компонент ЛТД. – URL: https://componentltd.ru/technical_inforamation/articles/opticheskie-razvetviteli-chto-eto-i-gde-primenyaetsya/ (дата обращения 01.05.2025).

© С. Н. Былин, В. В. Лубский, 2025