

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет»

Пермский инновационный территориальный кластер  
волоконно-оптических технологий «ФОТОНИКА»

# **ПРИКЛАДНАЯ ФОТОНИКА**

---

## **APPLIED PHOTONICS**

Т. 11, № 2

Издательство  
Пермского национального исследовательского  
политехнического университета  
2024

УДК 621.383

П75

Публикуются статьи, содержащие фундаментальные и прикладные результаты исследований в области лазерной оптики, в том числе связанные с исследованиями в области технологии и свойств оптических компонентов, источников, приемников и преобразователей оптического излучения, оптических коммуникаций, оптических датчиков и информационных систем, лазерных технологий обработки материалов, фотоники в биологии и медицине, радиофотоники.

Предназначено для научных сотрудников, специализирующихся в области фотоники и оптоэлектронного приборостроения, студентов старших курсов направлений «Фотоника и оптоэлектроника», «Приборостроение», «Лазерная техника», «Волоконная оптика».

**Главный редактор:** *С.Л. Семенов*, д-р физ.-мат. наук, руководитель НЦВО РАН (Москва, Россия)

**Заместитель главного редактора:** *В.П. Первадчук*, д-р техн. наук, профессор (Пермь, Россия)

**Ответственный за выпуск:** *А.Н. Кондрашов*, к.ф.-м.н., доцент кафедры «Общей физики» ФГАОУ ВО ПГНИУ, заведующий исследовательской лаборатории сенсорики и перспективных средств измерения (г. Пермь, Россия)

**Ответственный секретарь:** *Д.Б. Владимирова*, канд. физ.-мат. наук, доцент (Пермь, Россия)

**Редакционная коллегия:**

*Ю.Н. Кульчин*, акад. РАН (Владивосток, Россия)

*В.П. Матвеев*, акад. РАН (Пермь, Россия)

*М.П. Федорук*, акад. РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор (Новосибирск, Россия)

*С.А. Бабин*, чл.-корр. РАН (Новосибирск, Россия)

*В.В. Шпак*, заместитель Министра промышленности и торговли РФ (Москва, Россия)

*А.А. Аполонский*, канд. физ.-мат. наук (Новосибирск, Россия)

*Н.А. Гиптиус*, д-р физ.-мат. наук, профессор (территория Инновационного центра «Сколково», Россия)

*В.П. Драчев*, канд. физ.-мат. наук (территория Инновационного центра «Сколково», Россия)

*В.В. Криштон*, д-р физ.-мат. наук, профессор (Пермь, Россия)

*И.А. Лобач*, канд. физ.-мат. наук (Новосибирск, Россия)

*О. Г. Морозов*, д-р техн. наук, профессор (Казань, Россия)

*О.Е. Наний*, д-р физ.-мат. наук, профессор (Москва, Россия)

*В.П. Первадчук*, д-р техн. наук, профессор (Пермь, Россия)

*А.В. Перминов*, д-р физ.-мат. наук, доцент (Пермь, Россия)

*Д.И. Семенов*, д-р физ.-мат. наук, профессор (Ульяновск, Россия)

*С.Л. Семенов*, д-р физ.-мат. наук, руководитель НЦВО РАН (Москва, Россия)

*А.В. Суй*, д-р физ.-мат. наук, профессор (Долгопрудный, Россия)

*А.Л. Толстик*, д-р физ.-мат. наук, профессор (Минск, Республика Беларусь)

*С.К. Турицын*, канд. физ.-мат. наук, профессор (Бирмингем, Англия)

*А.А. Фотиади*, канд. физ.-мат. наук (Ульяновск, Россия)

*В.Б. Цветков*, д-р физ.-мат. наук, профессор (Москва, Россия)

*В.Я. Шур*, д-р физ.-мат. наук, профессор (Екатеринбург, Россия)

*Ю.В. Чеботаревский*, д-р физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

*Zinan Wang* (王子南), Professor (Chengdu, China)

*Zhiyong Zhao* (赵志勇), Associate Professor (Wuhan, China)

Журнал «Прикладная фотоника (*Applied Photonics*)» зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор), свидетельство ПИ № ФС 77 – 59184 от 3 сентября 2014 г.

Периодическое печатное издание (выходит 4 раза в год).

Учредитель – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Адрес учредителя, издателя, редакции и типографии:

614990, Пермский край, г. Пермь, Комсомольский просп., д. 29.

Тел. +7 (342) 2-198-340, e-mail: [photonics.appl.jrn@gmail.com](mailto:photonics.appl.jrn@gmail.com).

# СОДЕРЖАНИЕ

---

*С.С. Коган, О.Е. Наний, В.Н. Трещиков*

Высокоскоростные оптические каналы перспективных  
волоконно-оптических транспортных сетей OTN/DWDM.  
Часть 2. Дальность связи, спектральная эффективность  
и символная скорость .....5

*С. Семенов, В. Щербаков*

Использование достижений в области разработки и производства  
оптического волокна при разработке и конструировании  
волоконно-оптических изделий .....26

*К.А. Овчинников, Д.Г. Гилев, В.В. Криштоп*

Определение температурного коэффициента изменения  
полувонового напряжения фазового модулятора на  $\text{LiNbO}_3$  .....36

*П.О. Якушенко*

Комплексный показатель преломления при нелинейных эффектах.....49

*А.А. Ольхова, А.А. Патрикеева, М.А. Бутяева,*

*П.П. Омельченко, Б.К. Шульга, М.М. Сергеев*

Лазерная модификация структуры и оптических свойств  
двухслойных пленок Ag-PbSe .....58

# CONTENTS

---

<i>S.S. Kogan, O.E. Nanii, V.N. Treshchikov</i> High-speed optical channels of advanced optical transport networks OTN/DWDM. Part 2: Communication range, spectral efficiency and symbol rate .....	5
<i>S.L. Semjonov, V.V. Shcherbakov</i> Application of advances in the development and production of optical fiber in the development and design of fiber optic devices.....	26
<i>K.A. Ovchinnikov, D.G. Gilev, V.V. Krishtop</i> Determination of temperature coefficient of change half-wave voltage phase modulator on LiNbO <sub>3</sub> .....	36
<i>P.O. Yakushenkov</i> Complex refractive index with the presence of nonlinear effects.....	49
<i>A.A. Olkhova, A.A. Patrikeeva, M.A. Butyaeva, P.P. Omelchenko, B.K. Shulga, M.M. Sergeev</i> Structure and optical properties laser modification of the Ag-PbSe films .....	58

УДК 621.395.741

**С.С. Коган<sup>1</sup>, О.Е. Наний<sup>1,2</sup>, В.Н. Трещиков<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ООО «Т8», Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
Москва, Российская Федерация

## **ВЫСОКОСКОРОСТНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ КАНАЛЫ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЕЙ OTN/DWDM**

### **ЧАСТЬ 2. ДАЛЬНОСТЬ СВЯЗИ, СПЕКТРАЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ И СИМВОЛЬНАЯ СКОРОСТЬ**

В цикле статей представлены аналитические материалы по пропускной способности и эволюции форматов модуляции оптических каналов ВОСП OTN/DWDM (часть 1), по дальности связи, спектральной эффективности и символьной скорости оптических каналов ВОСП OTN/DWDM (часть 2).

**S.S. Kogan<sup>1</sup>, O.E. Nani<sup>1,2</sup>, V.N. Treshchikov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>T8 LLC, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup>Faculty of Physics, Moscow Lomonosov University, Moscow, Russian Federation

## **HIGH-SPEED OPTICAL CHANNELS OF ADVANCED OPTICAL TRANSPORT NETWORKS OTN/DWDM**

### **PART 2: COMMUNICATION RANGE, SPECTRAL EFFICIENCY AND SYMBOL RATE**

The series of articles presents analytical materials on the throughput and evolution of modulation formats of OTN/DWDM optical channels (part 1), on the communication range, spectral efficiency and symbol rate of OTN/DWDM optical channels (part 2).

### **Введение**

Двумя важными направлениями развития волоконно-оптической связи являются следующие: увеличение пропускной способности и дальности передачи по каналам оптических транспортных систем

OTN/DWDM. В первой части статьи рассмотрена эволюция форматов модуляции оптических каналов, обеспечивающая быстрый рост пропускной способности ВОСП OTN/DWDM. Показано, что переход к форматам модуляции более высокого порядка увеличивает достижимую скорость передачи информации, но ограничивает максимальную дальность связи. Во второй части статьи рассмотрена взаимосвязь форматов модуляции, дальности связи, спектральной эффективности и символьной скорости оптических каналов ВОСП OTN/DWDM.

### **Дальность связи по оптическим каналам ВОСП**

Переход к форматам модуляции QAM более высокого порядка при сохранении символьной скорости и при одинаковой средней мощности сигнала приводит к увеличению скорости передачи и спектральной эффективности оптического канала (длины волны), но существенно сокращает дальность передачи. При одинаковой средней мощности сигнала при переходе, например от DP-QPSK к DP-16QAM (DP – Dual Polarization), сокращение дальности связано с увеличением плотности расположения точек созвездия на амплитудно-фазовой диаграмме и уменьшением евклидова расстояния между точками созвездия. В результате усложняется различение точек созвездия на фоне шумов. Четырехкратное увеличение количества точек созвездия (при переходе от DP-QPSK до DP-16QAM, или от DP-16QAM до DP-64QAM, или от DP-64QAM до DP-256QAM) уменьшает дальность связи примерно до 25 %.

Скорость передачи данных пропорциональна произведению символьной скорости на символьную эффективность. Символьная эффективность ( $SmE$ ) – это количество бит, передаваемых каждым символом сигнала:  $SmE = \log_2 m$ , где  $m$  – число различных значений, которые может принимать каждый символ с равной вероятностью. Новые форматы модуляции, в которых вероятности реализации различных значений символа не одинаковы (например, PCS, Probabilistic Constellation Shaping), а также гибридные форматы, будут рассмотрены в отдельной статье.

В случае наиболее широко распространенных форматов mQAM каждый символ определенной поляризации может принимать  $m$  значений, где  $m$  – это число точек созвездия сигнала mQAM. Каждый символ при использовании формата модуляции mQAM переносит  $\log_2 m$  битов. В современных системах оптической связи информация передается одновременно и независимо по двум поляризациям, что позволяет

увеличить скорость передачи в 2 раза. Форматы модуляции, использующие две поляризации для передачи mQAM сигналов, обозначают DP mQAM или PM (Polarization Multiplexing) mQAM (в зарубежной литературе оба обозначения одинаково широко используются и эквивалентны). Удвоение скорости очевидно при рассмотрении каждого символа формата DP-mQAM как результат поляризационного мультиплексирования (PM) двух независимых, ортогонально поляризованных mQAM символов.

Увеличение числа точек созвездия в 4 раза по каждой поляризации увеличивает символьную эффективность  $SmE$  на 2 бита:

$$SmE(4m) = \log_2(4m) = \log_2 m + \log_2(4) = SmE(m) + 2 .$$

Следовательно, при последовательном переходе к более высоким уровням модуляции с учетверением числа « $m$ » число бит, передаваемых каждым символом, увеличивается на два в каждой поляризации (на 4 в двух поляризациях), но относительный прирост скорости передачи данных уменьшается (рис. 1):

- при переходе от DP-QPSK (DP-4QAM) к DP-16QAM число бит/символ увеличивается с 4 до 8, т.е. скорость передачи данных увеличивается на 100 %;
- при переходе от DP-16QAM к DP-64QAM число бит/символ увеличивается с 8 до 12, т.е. скорость передачи данных увеличивается на 50 %;
- при переходе от DP-64QAM к DP-256QAM число бит/символ увеличивается с 12 до 16, т.е. скорость передачи данных увеличивается только на 33 %.

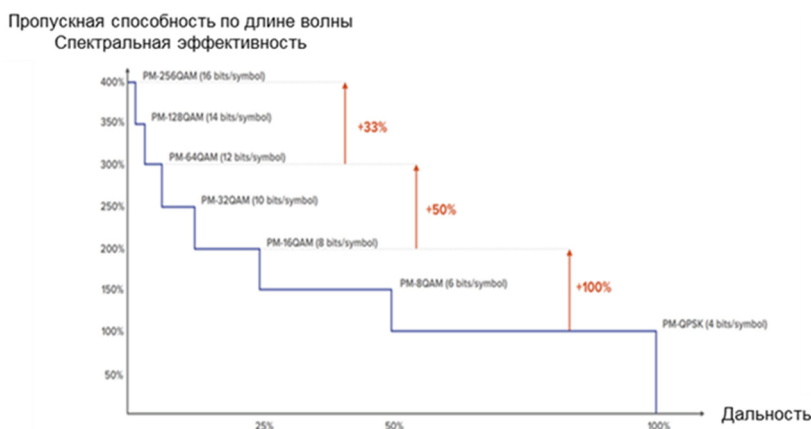


Рис. 1. Снижение дальности связи при увеличении порядка формата модуляции [14]

Необходимо добиваться компромисса между уровнем мощности сигнала в оптическом канале (длине волны) и уровнем мощности шумов, возникающих в результате нелинейных взаимодействий NLIN, такими как четырехволновое смешение FWM (Four-wave Mixing), фазовая самомодуляция SPM (self-phase modulation) и фазовая кросс-модуляция XPM (cross-phase modulation).

Увеличение мощности сигнала позволяет увеличить отношение мощности сигнала к мощности линейного шума ASE, не зависящей от мощности сигнала. Однако рост нелинейных искажений сигнала с ростом мощности сигнала приводит к тому, что уменьшение коэффициента ошибок с ростом мощности сначала замедляется, затем достигает минимума и при дальнейшем увеличении мощности начинает расти.

В современных когерентных ВОЛС без компенсации дисперсии на физическом уровне воздействие нелинейных эффектов на сигнал можно с высокой точностью описать как возникновение нелинейного шума, мощность которого  $P_{NLI}$  растет пропорционально кубу мощности сигнала  $P_S$ , умноженному на коэффициент нелинейности  $\eta$ :

$$P_{NLI} = \eta P_S^3.$$

При малой мощности сигнала в формуле

$$SNR = \frac{P_S}{P_{ASE} + P_{NLI}} = \frac{P_S}{P_{ASE} + \eta P_S^3}$$

нелинейным шумом можно пренебречь, но по мере увеличения мощности нелинейный шум быстро растет. Существует оптимальная мощность, при которой SNR достигает максимума.

Дальность передачи в ВОЛС ограничена затуханием мощности оптического излучения в волокне, для компенсации которого используются оптические усилители EDFA. Однако периодическое усиление сигнала сопровождается накоплением шума усиленного спонтанного излучения (ASE), ведущим к уменьшению SNR с увеличением протяженности ВОЛС. Увеличение мощности сигнала для обеспечения увеличения SNR ограничено ростом нелинейных искажений с ростом мощности сигнала. По мере увеличения дальности передачи необходимо уменьшать порядок формата модуляции, а следовательно, скорость передачи и спектральную эффективность. Поскольку используются QAM-форматы с конечным числом порядка (4QAM или QPSK, 8QAM,



16QAM, 64QAM, ...), то скорость передачи информации при смене формата модуляции меняется резко. Лучшая гранулярность (детализация) по скорости и дальности передачи данных при сохранении фиксированной сетки частот [14] достигается при использовании гибридного формата модуляции QAM, а именно TDHMF (Time-Domain Hybrid Modulation Format), или форматов с неодинаковыми вероятностями реализации различных значений символов типа PCS. Такие форматы будут рассмотрены в отдельной публикации.

### **Спектральная эффективность оптических каналов ВОСП**

Спектральная эффективность (SE, Spectral Efficiency) оптического канала равна отношению скорости передачи информации  $C_{BCh}$  к ширине полосы  $B_{Ch}$  канала:

$$SE_{Ch} = C_{BCh} / B_{Ch}.$$

Поскольку символьная скорость пропорциональна ширине (равна в теоретическом пределе) полосе  $B$  сигнала, то увеличить спектральную эффективность можно только увеличением символьной эффективности, т.е. числом бит, передаваемых одним символом. Максимальная теоретическая спектральная эффективность группового WDM канала в реальных условиях подчиняется неравенству  $SE_{WDM} \leq SE_{Ch}$ .

Связано это со следующими причинами:

- форма спектра реального оптического канала не является прямоугольной, а имеет переходную область (область спада) на границах;
- каналы практически невозможно располагать вплотную, нужна небольшая «защитная» полоса – промежуток между оптическими каналами, необходимый для предотвращения перекрестных помех;
- несогласованностью между шириной спектра канала и шагом DWDM сетки частот.

Кроме того, спектральная эффективность каждого канала уменьшается с ростом избыточности алгоритма FEC.

### **Символьная скорость оптических каналов ВОСП**

В когерентных системах связи хроматическая и поляризационная модовая дисперсии практически не ограничивают дальность, поскольку цифровая обработка сигнала на приемной стороне канала позволяет

исключить их деструктивное влияние. Имеются два важных параметра, которыми можно манипулировать:

- символьная скорость передачи, т.е. количество символов, передаваемых в секунду,
- формат модуляции, который определяет количество бит на символ, т.е. символьную эффективность.

Символьная скорость – это общее количество элементов сигнала (символов), передаваемых за одну секунду. Единица измерения «Бод» (символ в секунду) названа по имени Эмиля Бодо, изобретателя кода Бодо.

Битовая скорость – это общее количество битов, передаваемых за одну секунду, или скорость передачи данных при отсутствии ошибок. Единица измерения «бит/с».

Теоретически увеличение символьной скорости позволяет пропорционально увеличить скорость передачи данных на определенной длине волны с минимальным влиянием на дальность связи. При увеличении символьной скорости расширяется спектр сигнала, но сохраняется спектральная эффективность. Повышение символьной скорости передачи сопровождается снижением затрат на передачу каждого бита данных, включая затраты на энергопотребление, а также физических размеров приемопередатчиков (трансиверов), в широком диапазоне изменений дальности связи, эксплуатационных расходов за счет меньшего количества спектральных каналов, которые необходимо предоставлять и которыми надо управлять.

Развитие технологий, применяемых при производстве быстродействующих цифровых сигнальных процессоров (ЦСП), постепенно снимает физические ограничения на увеличение символьной скорости. Максимальная битовая скорость передачи данных без ошибок (пропускная способность) связана с максимальной символьной скоростью (равной ширине полосы оптического сигнала) следующим выражением (формула Шеннона):

$$C_{DWDM} = B_{DWDM} \log_2 (1 + SNR_{Chanal}) \equiv B_{DWDM} SE_{max}.$$

Необходимость обнаружения и исправления ошибок снижает скорость передачи данных при уменьшении SNR, поскольку растет доля передаваемых битов, используемых для обнаружения и исправления ошибок. Формат модуляции определяет число переданных битов, но не

все они несут полезную нагрузку. Дополнительная (служебная) информация, необходимая для работы FEC, располагается в заголовке цикла OTUk линейного сигнала OTN. Коэффициент избыточности – это отношение битов FEC к битам передаваемых данных. Последние версии высокопроизводительных FEC спроектированы с использованием 15–25 % дополнительных служебных битов в заголовке цикла OTN. При использовании SD FEC размер заголовка сигнала OTUk (количество байтов заголовка) увеличивается до 20 % вместо 7 % для алгоритма предыдущих поколений HD FEC, но при этом достигается кодовое усиление до 9,5–10 дБ (т.е. дополнительное повышение кодового усиления на 1–2 дБ), что соответствует увеличению дальности связи на 20–40 % по сравнению с HD FEC.

Новые технологии изготовления СБИС на кремниевой пластине позволили увеличить символьную скорость с 30 до более чем 60 ГБод всего за три поколения эволюции ЦСП. Параллельно происходило масштабирование от начальной четырехпозиционной (квадратурной) фазовой манипуляции (QPSK), позволяющей передавать 2 бита на символ по каждой поляризации (канал 100G), до 16QAM, способной передавать 4 бита на символ по каждой поляризации (канал 200G). После десятилетия инноваций когерентные модемы сегодня способны реализовать такую модуляцию высокого порядка, как, например, 64QAM с передачей 6 битов на символ по каждой поляризации [2].

Ширина спектра оптического канала прямо пропорциональна символьной скорости передачи. Кроме того, надо также учитывать форму спектра на краю частотного диапазона, т.е. ширину зоны спада спектра, как показано на рис. 2. Например, при символьной скорости 32 ГБод со спадом 10 % ширина спектра канала равна 35,2 ГГц.

Следует отметить, что повышение символьной скорости:

- не может повысить спектральную эффективность отдельного канала. Но с учетом необходимости использования защитных полос спектральная эффективность DWDM-сигнала при увеличении символьной скорости может увеличиться, поскольку станет меньше защитных полос;

- не может обеспечить переход к более высоким скоростям передачи с сохранением фиксированных сеток частот 50 и 100 ГГц для оптических каналов.



Рис. 2. Ширина спектра канала пропорциональна символьной скорости передачи [14]

Разработка оборудования (передатчиков, приемников, цифровых сигнальных процессоров) ориентированного на все более высокие символьные скорости продолжается и для их классификации предложено деление на поколения [15–17]:

- 30–60 ГБод для каналов 100–200 Гбит/с (Gen30, поколение 30),
- 60–90 ГБод для каналов 400–600 Гбит/с (Gen60, поколение 60),
- 90–120 ГБод для каналов 600–800 Гбит/с (Gen90, поколение 90),
- 120–180 ГБод для каналов 800–1200 Гбит/с (Gen120, поколение 120).
- 180 ГБод и более для каналов 1600–3200 Гбит/с (Gen180, поколение 180)

При переходе ко все более высоким символьным скоростям требуется использование ЦСП, выполненных с использованием все более совершенной технологии (табл. 1).

В табл. 2 и на рис. 3 показано, насколько увеличиваются пропускная способность и спектральная эффективность канала и как сокращается дальность связи при переходе к более высоким порядкам формата модуляции с сохранением символьной скорости и, следовательно, ширины спектра оптического канала.

Рассмотрим два сценария увеличения скорости передачи со 100 до 200 Гбит/с:

- в первом сценарии увеличение достигается заменой формата DP QPSK форматом DP 16QAM с сохранением символьной скорости

и удвоением символьной эффективности. В этом случае в DWDM-системе связи удваиваются спектральная эффективность и скорость передачи информации, однако дальность передачи падает в 4 раза (до 25 % от первоначальной);

Таблица 1

Классификация поколений ЦСП по символьной скорости [16]

	Gen30		Gen60		Gen90	Gen120/Gen180	
	2010	2015	2017	2020	2020	2023/24	2023/2024
Максимальная скорость передачи	100-200 Гбит/с		400 – 600 Гбит/с		600-800 Гбит/с	1.2/1.6 Тбит/с	800 Гбит/с
Символьная скорость (Бод)	30-60 ГБод		60-90 ГБод		90-120 ГБод	120-180 ГБод 180 ГБод и выше	
Основные технологии	Фазовая модуляция (QPSK); Много-уровневая модуляция (16 QAM и 8 QAM); Формирование спектра по Найквисту; SD FEC		Интеллектуальные методы модуляции (PCS, Hybrid, до 64 QAM); SD FEC Телеметрия в реальном времени; Совместимые сменны модули-приемопередатчики		Поднесущие с формированием спектра по Найквисту; SD FEC CPO (Co-Packaging)		
Толщина пленок при КМОП технологии	65/40 нм	16 нм	16 нм	5-7 нм	5-7 нм	3-5 нм	
Примеры ЦСП	Infinaera ICE4; NOKIA PSE-2s; NEL ExaSPEED 100; Acacia AC400; Huawei OptiXtreme H3	CFP; Acacia CFP2DCO; CISCO+ CFP2ACO; NOKIA PSE-2c; OptiXtreme G6	Ciena WLAI; NOKIA PSE-3s; Acacia SC1200; NEL ExaSPEED TERA; Huawei OptiXtreme H6	400 ZR/ZR+; OpenZR+; OpenROADM; 400G CFP	Ciena WL5e; Infinaera ICE6; NOKIA PSE-5s; Huawei OptiXtreme H7	Ciena WL6e; Acacia Jannu CIM8; NOKIA PSE-6s; Fujitsu NEL GAIA	

Таблица 2

Снижение дальности связи при переходе к форматам модуляции более высокого порядка с сохранением символьной скорости [18]

	Количество точек на звездной диаграмме	Уменьшение дальности связи	Увеличение бит/ символ по каждой поляризации
QPSK → 16QAM	x 4 (4 → 16)	75% (100% → 25%)	100% (2 → 4)
16QAM → 64QAM	x 4 (16 → 64)	75% (25% → 6.25%)	50% (4 → 6)
64QAM → 256QAM	x 4 (64 → 256)	75% (6.25% → 1.5625%)	33% (6 → 8)

– во втором сценарии увеличение скорости передачи информации достигается при удвоении символьной скорости и сохранении формата модуляции (DP QPSK). В этом случае скорость передачи информации в DWDM-системе связи, спектральная эффективность и дальность передачи не изменяются.

При удвоении символьной скорости до 64 ГБод с переходом к формату модуляции QPSK для каналов 200G мощность шума ASE удваивается из-за увеличения вдвое полосы частот канала с 35 до 70 ГГц (в связи с удвоением символьной скорости), однако дальность действия можно сохранить, удвоив мощность сигнала (+3 дБ) при сохранении той же

спектральной плотности мощности и, следовательно, при сохранении того же уровня нелинейностей, как и для канала 100G с форматом модуляции DP-QPSK.

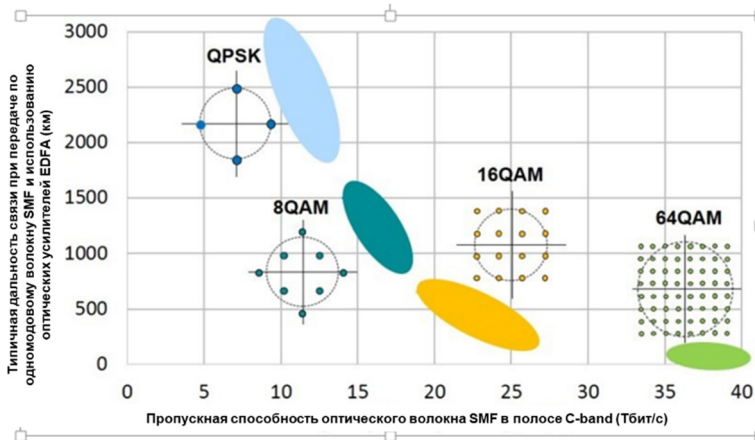


Рис. 3. Снижение дальности связи при переходе к форматам модуляции более высокого порядка с сохранением символьной скорости [19]

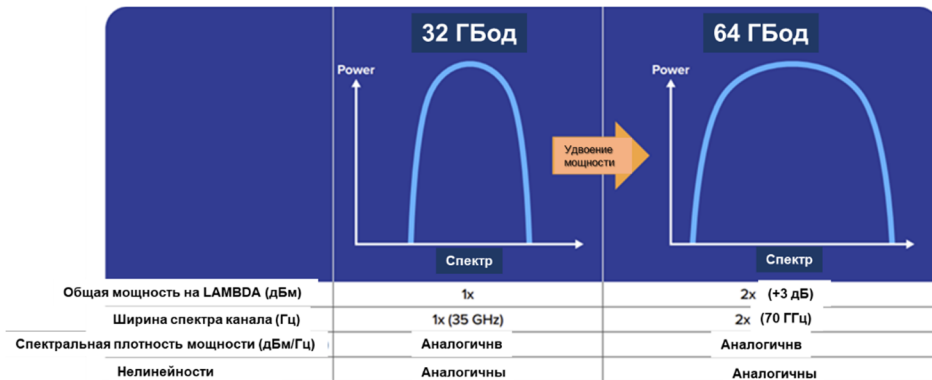


Рис. 4. Спектр сигнала при удвоении символьной скорости с 32 до 64 ГБод [20]

### Реализация высокоскоростных оптических каналов в перспективных ВОСП

Протяженность каналов 200 Гбит/с использованием формата модуляции QPSK и символьной скорости 64 ГБод, примерно, в 4 раза превышает протяженность каналов 200G с использованием формата модуляции 16QAM и символьной скорости 32 ГБод. При этом ширина полосы частот канала расширится с 50 до 75 ГГц, а дальность связи увеличится до нескольких тысяч километров.

На городских (METRO) сетях для каналов 400 Гбит/с можно использовать формат модуляции 16 QAM (4 бита на символ на каждую поляризацию) и символьную скорость 60–70 ГБод. При этом ширина полосы частот канала составит порядка 75 ГГц, а дальность связи на однопролетных участках (сети взаимодействия ЦОД) составит 80–120 км.

На протяженных магистральных сетях с многочисленными оптическими участками OTS (multi-haul) для каналов 400G можно использовать формат модуляции QPSK с 2 битами на символ на каждую поляризацию и символьной скоростью 120–140 ГБод, при этом ширина полосы частот канала составит порядка 150 ГГц, а дальность связи достигнет нескольких тысяч километров.

На городских (METRO) сетях для каналов 800 Гбит/с можно использовать формат модуляции DP-16QAM с 4 битами на символ на каждую поляризацию и символьной скоростью порядка 130–140 ГБод, при этом ширина полосы частот канала составит порядка 150 ГГц, а дальность связи на однопролетных участках (сети взаимодействия ЦОД) составит порядка 80–100 км.

Рекордные результаты по дальности передачи 6600 км для оптического канала 800 Гбит/с при символьной скорости порядка 130 ГБод показаны компанией NOKIA с использованием ЦСП NOKIA PSE-6s на подводной (submarine) сети компании Orange [17]. Дальность связи для канала 800 Гбит/с на наземных сетях – более 2000 км [20].

Кремниевые-фотонные (SiP) модули CSTAR (DSP-agnostic Silicon Photonics COSA transmitter and receiver) компании NOKIA представляют собой оптический интерфейс когерентной оптической сборки COSA (Coherent Optical Subassembly) для использования как в сменных, так и встраиваемых модулях-приемопередатчиков цифровой когерентной оптики (DCO). Оптика Silicon Photonics CSTAR используется либо в виде автономных модулей COSA, либо в составе интегрированных многочиповых модулей. Они обеспечивают оптический интерфейс для когерентных трансиверов.

Модули CSTAR используются в сменных DCO как компании NOKIA, так и сторонних производителей для каналов 100, 400 и 800 Гбит/с в конструктивном исполнении QSFP-DD и CFP2. Кроме того, модуль цифровой когерентной оптики (DCO) компании NOKIA, в который интегрированы новейший когерентный ЦСП PSE-6s и PIC CSTAR, при символьной скорости порядка 130–140 ГБод поддерживает скорость передачи данных порядка 1,2 Тбит/с.

В DCO компании NOKIA используется ЦСП PSE6s с вероятностным формированием созвездий (PCS) третьего поколения, с кодом обнаружения и исправления ошибок FEC, с плавно регулируемой скоростью передачи данных и встроенным оптическим усилителем.

Компания Asacia поделилась результатами трех испытаний ЦСП CIM 8 [21] с символьной скоростью 140 ГБод на реальных сетях, которые проводились, совместно с компаниями:

- Adtran и NYSERNet (канал 800G, дальность 2220 км);
- China Mobile и ZTE (канал 400G, дальность 5616 км);
- Windstream Wholesale (канал 1T, дальность 540 км).

Компания Adtran (ADVA) успешно завершила полевые испытания оптического канала 800 Гбит/с на одной несущей протяженностью 2220 км на наземной сети (с использованием ЦСП Asacia CIM-8 с символьной скоростью 140 ГБод). Испытания проводились на сети некоммерческой организации NYSERNet, которая была основана сообществом высшего образования Нью-Йорка для продвижения науки и образования. В ходе этого полевого испытания тестовый маршрут проходил через 14 узлов ROADM по участкам (OTS, Optical Transport Section), построенным на оптических волокнах как G.652, так и G.655 [22].

Рекордные результаты по дальности передачи для оптического канала 1,2 Тбит/с при символьной скорости порядка 140–150 ГБод и ширине полосы частот канала 150 ГГц достигнуты компаниями Fujitsu [23] 336 км и NOKIA [24] 118 км.

Первой решения с символьной скоростью 200ГБод практически реализовала компания Ciena. Было показано, что использование 3-нм КМОП процесса для изготовления ЦСП Ciena WaveLogic 6 Extreme (WL6e) [25] обеспечивает значительные преимущества в характеристиках и энергопотреблении по сравнению с 5-нм КМОП процессом, и позволяет обеспечить развертывание 1,6-терабитных решений в 2024 г. Компания сообщила также о положительном результате испытаний когерентного передатчика CDM (Coherent Driver Modulator) и когерентного приемника ICR (Integrated Coherent Receiver), поддерживающих символьную скорость 200 ГБод.

ЦСП Ciena WaveLogic™ 6 Nano нацелено на реализацию линейных интерфейсов 400–800G, а также на внедрение этого ЦСП в сменные оптические когерентные линейные модули-приемопередатчики для систем DWDM в соответствии с Соглашением о внедрении интерфейса



OIF 800ZR [26]. Для канала с интерфейсом 800ZR с полосой частот порядка 150 ГГц на сети в конфигурации «точка – точка» ЦСП WL6n обеспечивает дальность связи не менее 120 км. Дополнительные улучшения позволяют увеличить дальность связи на городских сетях до 500 км, что соответствует рекомендациям ITU-T/Open ROADM MSA.

Оператор сети Southern Cross готовится стать первым оператором подводного кабельного телевидения, предполагающим при расширении сети Southern Cross (SX) NEXT от Сиднея до Лос-Анджелеса организовать оптический канал 800 Гбит/с через Тихий океан. С использованием WL6s планируется реализовать оптический канал 800 Гбит/с на подводной сети протяженностью более 12 500 км, обеспечивая надежные, энергоэффективные соединения с высокой пропускной способностью для поддержки, например, услуг 400GbE от Southern Cross [27].

На протяженных магистральных сетях с многочисленными оптическими участками OTS (multi-haul) для каналов 800G можно использовать формат модуляции DP-QPSK с 2 битами на символ на каждую поляризацию и символьной скоростью порядка 260 ГБод, при этом ширина полосы частот канала составит порядка 300 ГГц. Пока нет сведений о полевых испытаниях подобных систем.

Рекордный результат по дальности связи более 100 км для оптического канала более 2Тбит/с с символьной скорости порядка 260 ГБод был представлен на ECOC 2022 компанией NOKIA Bell Labs в сотрудничестве с компанией Keysight. В эксперименте использован I/Q-модулятор на основе ниобата лития LiNbO<sub>3</sub> (thin film lithium niobate I/Q modulator) с полосой частот 110 ГГц по уровню 3 дБ [28].

Компания EFFECT Photonics, ведущий разработчик высоко интегрированных оптических решений, в октябре 2023 г. объявила об успешной проверке своего перестраиваемого лазера InP, основного компонента pITLA (Pico Integrated Tunable Laser Assembly), полностью интегрированного в фотонную интегральную схему PIC (Photonic Integrated Circuit), т.е. полностью реализованного в виде монолитной интегрированной InP PIC. Это решение было представлено на стенде компании EFFECT Photonics на выставке ECOC 2023 [29].

На OFC-2024 [30] было доложено о создании нового I/Q-модулятора на основе фосфида индия InP (NTT Innovative Devices Corporation in Japan) для высокоскоростных оптических когерентных каналов и достижения скорости передачи порядка 1,8 Тбит/с с дальностью порядка

80 км по стандартному одномодовому волокну в полосе C+L при физических размерах модулятора  $11,9 \times 29,8 \times 4,35 \text{ mm}^3$ .

### Выводы

На протяженных магистральных сетях для оптических каналов с форматом модуляции DP-QPSK потребуется (с учетом необходимости передачи порядка 20 % служебных данных для SD FEC) символьная скорость более [31]:

- 125 ГБод для оптических каналов с пропускной способностью 400 Гбит/с;
- 250 ГБод для оптических каналов с пропускной способностью 800 Гбит/с.

Основной тенденцией в развитии оптических когерентных ВОСП OTN/DWDM является повышение их канальной скорости при сохранении дальности за счет увеличения символьной скорости при сохранении числа значений «*m*», принимаемых символами формата модуляции DP-*m*QAM. Платой за такое развитие является расширение спектра частот, занимаемого оптическим каналом. Кроме того, придется переходить от фиксированной сетки FixedGrid, например 100 и 50 ГГц, к гибкой сетке частот FlexGrid.

Спектральную эффективность можно увеличить только увеличением символьной эффективности, т.е. числом бит, передаваемых одним символом. При сохранении числа значений «*m*», принимаемых символами формата модуляции DP-*m*QAM, символьная эффективность не изменяется. Повышение символьной скорости не может повысить спектральную эффективность отдельного канала. Но при увеличении символьной скорости отдельных каналов спектральная эффективность DWDM группового сигнала может увеличиться, поскольку количество оптических каналов уменьшится и станет меньше защитных полос между ними. Следует также учесть, что спектральная эффективность оптического канала снижается с ростом избыточности алгоритма FEC.

При использовании форматов модуляции с неравными вероятностями реализации значений символов PCS (Probabilistic Constellation Shaping), а также при использовании гибридных форматов появляется возможность, с одной стороны, плавно, без изменения символьной скорости, изменять символьную (и спектральную) эффективность и

дальность связи, а с другой стороны, выбрать оптимальную символьную скорость, а затем использовать алгоритм PCS для получения желаемой скорости передачи данных по оптическому каналу (длине волны) [32]. Более высокая символьная скорость передачи в алгоритме PCS позволяет достичь максимума пропускной способности и дальности связи для оптического канала (длины волны) при снижении затрат и энергопотребления в пересчете на бит. Форматы модуляции, использующие PCS, и гибридные форматы будут рассмотрены в отдельной публикации.

### **Список литературы**

1. Оптическая революция в системах связи и ее социально-экономические последствия / В.А. Конышев, А.В. Леонов, О.Е. Наний, В.Н. Трешиков, Р.Р. Убайдуллаев // Прикладная фотоника. – 2016. – Т. 3, № 16. – С. 15–27.
2. Meeting the demand for optical bandwidth over the next decade. – NOKIA 2023. – URL: <https://www.nokia.com/blog/meeting-the-demand-for-optical-bandwidth-over-the-next-decade/>
3. What the FEC? – URL: <https://www.nokia.com/blog/what-the-fec/>
4. Nearing the Shannon Limit: Terabit Coherent Optical Networks / Sterling Perrin // A Heavy Reading WP (Nokia). – 2022. – URL: [https://www.lightreading.com/webinar.asp?webinar\\_id=2082](https://www.lightreading.com/webinar.asp?webinar_id=2082)
5. Statistical Assessment of Open Optical Networks / Emanuele Virgillito, Alessio Ferrari, Andrea D'Amico, Vittorio Curri. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/344745779\\_Statistical\\_Assessment\\_of\\_Open\\_Optical\\_Networks](https://www.researchgate.net/publication/344745779_Statistical_Assessment_of_Open_Optical_Networks)
6. Amplified Spontaneous Emission (ASE) Article. – URL: <https://www.fiberlabs.com/glossary/amplified-spontaneous-emission/>
7. Кусайкин, Д. Волокна будущих петабитных сетей / Д. Кусайкин. – URL: <https://nag.ru/material/30950>
8. Кусайкин, Д. Одно/мало/многомодовые волокна, в чем соль? / Д. Кусайкин. – URL: <https://nag.ru/material/31187#:~:text=Маломодовые%20волокна%2C%20по%20сути%2C%20представляют,распространение%20небольшого%20количества%20пространственных%20мод.>
9. Наний, О.Е. Анализ форматов модуляции для систем DWDM со скоростью 40 Гбит/с / О.Е. Наний, В.Н. Трешиков // Вестник связи – 2012. – № 1. – С. 35–38.
10. Наний, О.Е. Когерентные системы связи / О.Е. Наний // LIGHTWAVE Russian Edition – 2008. – № 4. – С. 23–27.
11. Леонов, А.В. Тенденции развития когерентных систем связи в 2010–2025 гг. / А.В. Леонов, В.Н. Трешиков, Р.Р. Убайдуллаев // Фотон-экспресс. – 2019. – № 8 (160). – С. 4–7.

12. Коган, С.С. Эволюция решений с обнаружением и исправлением ошибок в оптических каналах OTN/DWDM. Ч. 1: Мониторинг оптических каналов и критерии эффективности кодов с коррекцией ошибок / С.С. Коган // Первая миля/Last mile». – 2023. – № 7. – С. 56–61.

13. Коган, С.С. Эволюция решений с обнаружением и исправлением ошибок в оптических каналах OTN/DWDM. Ч. 2: Эволюция поколений и совместимые алгоритмы FEC / С.С. Коган // Первая миля/Last mile. – 2023. – № 8. – С. 52–58.

14. Infinera. Baud Rate, Modulation, and Maximizing Coherent Optical Performance. White Paper. – URL: <https://www.infinera.com/wp-content/uploads/Baud-Rate-Modulation-and-Maximizing-Coherent-Optical-Performance-0294-WP-RevA-0921.pdf>

15. Signal AI. OFC 2024 Preview. – URL: <https://signal.ai/2024/03/ofc-2024-preview/>

16. Signal AI. 400ZR vs 800G – Classifying Coherent Technology. – 2021. – URL: <https://signal.ai/2021/10/400zr-vs-800g-classifying-coherent-technology/>

17. GEN120+ Coherent Trials and Deployments. – URL: <https://signal.ai/2023/11/gen120-coherent-trials-and-deployments>

18. Infinera. Faster, further, smoother: the case for probabilistic constellation shaping. White Paper. – 2020. – URL: <https://www.infinera.com/wp-content/uploads/Probabilistic-Constellation-Shaping-0257-WP-RevB-0620.pdf>

19. Кобышев, В. Развитие волоконно-оптических информационных сетей DWDM DCI / В. Кобышев, О. Наний, В.Н. Трещиков // Первая миля / Last mile. – 2019. – № 4. – С. 46–50.

20. Nokia PSE-6s super-coherent optics. – URL: [https://onestore.nokia.com/asset/213067?\\_ga=2.247108996.1097776829.1712562568-730815896.1614834341](https://onestore.nokia.com/asset/213067?_ga=2.247108996.1097776829.1712562568-730815896.1614834341)

21. Acacia Completes CIM 8 Trials with Adtran, Windstream & China Mobile. – URL: <https://www.thefastmode.com/technology-solutions/30996-acacia-completes-cim-8-trials-with-adtran-windstream-china-mobile>

22. Adtran breaks industry record for single-carrier 800G long-haul transport. Press-release. – URL: <https://investors.adtran.com/news-and-events/press-release-details/2023/Adtran-breaks-industry-record-for-single-carrier-800G-long-haul-transport/default.aspx>

23. Fujitsu offers 1.2-Tbps 1FINITY Ultra Optical System. – URL: <https://www.lightwaveonline.com/network-design/dwdm-roadm/article/14290314/fujitsu-offers-12-tbps-1finity-ultra-optical-system>

24. Nokia and GlobalConnect demonstrate record 1.2Tb/s coherent transmission over a single wavelength in live network. – URL: <https://www.nokia.com/about-us/news/releases/2023/02/23/nokia-and-globalconnect-demonstrate-record-12tbs-coherent-transmission-over-a-single-wavelength-in-live-network/>

25. Ciena Unveils WaveLogic 6, Industry's First 1.6Tb/s Coherent Optic Solution. – URL: <https://newswire.telecomramblings.com/2023/02/ciena-unveils-wavelogic-6-industrys-first-1-6tb-s-coherent-optic-solution-2/>

26. WaveLogic™ 6 Nano: Achieving Leading Performance at the Lowest Power Consumption with 400G–800G Pluggables. – URL: <https://www.ciena.com/insights/infobriefs/wavelogic-6-nano-achieving-leading-performance-at-the-lowest-power-consumption-with-400g-800g-pluggables>

27. Southern Cross Targets Pacific Record with Ciena's WaveLogic 6. – URL: <https://www.ciena.com/about/newsroom/press-releases/southern-cross-targets-pacific-record-with-cienas-wavelogic-6>

28. Keysight and NOKIA Bell Labs Achieve Record Symbol Rate of 260 GBaud Transmission in Coherent Communications. – URL: <https://www.bar-chart.com/story/news/10345135/keysight-and-nokia-bell-labs-achieve-record-symbol-rate-of-260-gbaud-transmission-in-coherent-optical-communications>

29. EFFECT Photonics Verifies Fully Integrated InP PIC for World's Smallest Digital ITLA for Coherent Applications. – URL: <https://effectphotonics.com/press-releases/worlds-smallest-digital-itla-for-coherent-applications/>

30. OFC-2024, 24 – 28 March 2024 at the San Diego Convention Center. New data speed record on optical fiber. – URL: <https://www.ofcconference.org/en-us/home/news-and-press/press-releases/2024/new-data-speed-record-on-optical-fiber/>

31. Optical networks move to metro 800G and long haul 400G. – URL: <https://www.5gtechnologyworld.com/optical-networks-move-to-metro-800g-and-long-haul-400g/>

32. Manabu, Arikawa. Wide range rate adaptation of QAM-based probabilistic constellation shaping using a fixed FEC with blind adaptive equalization / Manabu Arikawa, Masaki Sato, Kazunori Hayashi // *Optics Express*. – 2020. – Vol. 28, iss. 2. – P. 1300–1315. – URL: <https://opg.optica.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-28-2-1300&id=425782>

## References

1. Konyshov V.A., Leonov A.V., Nanii O.E., Treshchikov V.N., Ubaidullaev R.R. Opticheskaja revoliutsiia v sistemakh svyazi i ee sotsial'no-ekonomicheskie posledstviia [Optical revolution in communications systems and its social and economic impact]. *Applied Photonics*, 2016, vol. 3, no. 1, pp. 15-27.

2. Meeting the demand for optical bandwidth over the next decade, available at: <https://www.nokia.com/blog/meeting-the-demand-for-optical-bandwidth-over-the-next-decade> (accessed 27 May 2024).

3. What the FEC, available at: <https://www.nokia.com/blog/what-the-fec> (accessed 29 May 2024).

4. Nearing the Shannon Limit: terabit coherent optical networks, available at: [https://www.lightreading.com/webinar.asp?webinar\\_id=2082](https://www.lightreading.com/webinar.asp?webinar_id=2082) (accessed 29 May 2024).
5. Virgillito E., Ferrari A., D'Amico A., Curri V. Statistical assessment of open optical networks, available at: [https://www.researchgate.net/publication/344745779\\_Statistical\\_Assessment\\_of\\_Open\\_Optical\\_Networks](https://www.researchgate.net/publication/344745779_Statistical_Assessment_of_Open_Optical_Networks) (accessed 30 May 2024).
6. Amplified spontaneous emission, available at: <https://www.fiberlabs.com/glossary/amplified-spontaneous-emission> (accessed 30 May 2024).
7. Kusaikin D. Volokna budushchikh petabitnykh setei, available at: <https://nag.ru/material/30950> (accessed 10 June 2024).
8. Kusaikin D. Odno/malo/mnogo-modovye volokna, v chem sol', available at: <https://nag.ru/material/31187> (accessed 10 June 2024).
9. Nanii O.E., Treshchikov V.N. Analiz formatov moduliatsii dlia sistem DWDM so skorost'iu 40 Gbit/s [Analysis of modulation formats for 40 Gbit/s DWDM systems]. *Vestnik svyazi*, 2012, no. 1, pp. 35-38.
10. Nanii O.E. Kogerentnye sistemy svyazi [Coherent communication systems]. *Lightwave Russian Edition*, 2008, no. 4, pp. 23-27.
11. Leonov A.V., Treshchikov V.N., Ubaidullaev R.R. Tendentsii razvitiia kogerentnykh sistem svyazi v 2010–2025 gg. [Trends in the development of coherent communication systems in 2010-2025]. *Foton-Express*, 2019, vol. 160, no. 8, pp. 4-7.
12. Kogan S.S. Evoliutsiia reshenii s obnaruzheniem i ispravleniem oshibok v opticheskikh kanalakh OTN/DWDM. Chast' 1. Monitoring opticheskikh kanalov i kriterii effektivnosti kodov s korrektsiei oshibok [Evolution of solutions with error detection and correction in OTN/DWDM optical channels. Part 1. Optical channel monitoring and performance criteria for error correcting codes]. *Last Mile*, 2023, no. 7, pp. 56-61.
13. Kogan S.S. Evoliutsiia reshenii s obnaruzheniem i ispravleniem oshibok v opticheskikh kanalakh OTN/DWDM. Chast' 2. Evoliutsiia pokolenii i sovmeshtimye algoritmy FEC [Evolution of solutions with error detection and correction in OTN/DWDM optical channels. Part 2. Generational evolution and FEC compatible algorithms]. *Last Mile*, 2023, no. 8, pp. 52-58.
14. Baud rate, modulation, and maximizing coherent optical performance, available at: <https://www.infinera.com/wp-content/uploads/Baud-Rate-Modulation-and-Maximizing-Coherent-Optical-Performance-0294-WP-RevA-0921.pdf> (accessed 14 June 2024).
15. OFC 2024 preview, available at: <https://cignal.ai/2024/03/ofc-2024-preview> (accessed 14 June 2024).
16. 400ZR vs 800G – Classifying coherent technology, available at: <https://cignal.ai/2021/10/400zr-vs-800g-classifying-coherent-technology> (accessed 14 June 2024).
17. GEN120+ coherent trials and deployments, available at: <https://cignal.ai/2023/11/gen120-coherent-trials-and-deployments> (accessed 14 June 2024).

18. Faster, further, smoother: the case for probabilistic constellation shaping, available at: <https://www.infinera.com/wp-content/uploads/Probabilistic-Constellation-Shaping-0257-WP-RevB-0620.pdf> (accessed 14 June 2024).

19. Konyshov V., Nani O., Treshchikov V.N. Razvitie volokonno-opticheskikh informatsionnykh setei DWDM DCI [Development of fiber optic DWDM DCI information networks]. *Last Mile*, 2019, no. 4, pp. 46-50.

20. Nokia PSE-6s super-coherent optics, available at: <https://onestore.nokia.com/asset/213067?ga=2.247108996.1097776829.1712562568-730815896.1614834341> (accessed 15 June 2024).

21. Acacia completes CIM 8 trials with Adtran, Windstream & China Mobile, available at: <https://www.thefastmode.com/technology-solutions/30996-acacia-completes-cim-8-trials-with-adtran-windstream-china-mobile> (accessed 15 June 2024).

22. Adtran breaks industry record for single-carrier 800G long-haul transport, available at: <https://investors.adtran.com/news-and-events/press-release-details/2023/Adtran-breaks-industry-record-for-single-carrier-800G-long-haul-transport/default.aspx> (accessed 15 June 2024).

23. Fujitsu offers 1.2-Tbps 1FINITY Ultra Optical System, available at: <https://www.lightwaveonline.com/network-design/dwdm-roadm/article/14290314/fujitsu-offers-12-tbps-1finity-ultra-optical-system> (accessed 15 June 2024).

24. Nokia and GlobalConnect demonstrate record 1.2Tb/s coherent transmission over a single wavelength in live network, available at: <https://www.nokia.com/about-us/news/releases/2023/02/23/nokia-and-globalconnect-demonstrate-record-12-tbs-coherent-transmission-over-a-single-wavelength-in-live-network> (accessed 15 June 2024).

25. Ciena unveils WaveLogic 6, industry's first 1.6Tb/s coherent optic solution, available at: <https://newswire.telecomramblings.com/2023/02/ciena-unveils-wavelogic-6-industrys-first-1-6tb-s-coherent-optic-solution-2> (accessed 18 June 2024).

26. WaveLogic™ 6 Nano: achieving leading performance at the lowest power consumption with 400G–800G pluggables, available at: <https://www.ciena.com/insights/infobriefs/wavelogic-6-nano-achieving-leading-performance-at-the-lowest-power-consumption-with-400g-800g-pluggables> (accessed 18 June 2024).

27. Southern Cross targets pacific record with Ciena's WaveLogic 6, available at: <https://www.ciena.com/about/newsroom/press-releases/southern-cross-targets-pacific-record-with-cienas-wavelogic-6> (accessed 18 June 2024).

28. Keysight and Nokia Bell Labs achieve record symbol rate of 260 GBaud transmission in coherent communications, available at: <https://www.bar-chart.com/story/news/10345135/keysight-and-nokia-bell-labs-achieve-record-symbol-rate-of-260-gbaud-transmission-in-coherent-optical-communications> (accessed 18 June 2024).

29. EFFECT Photonics verifies fully integrated InP PIC for world's smallest digital ITLA for coherent applications, available at: <https://effectphotonics.com/press-releases/worlds-smallest-digital-itla-for-coherent-applications> (accessed 18 June 2024).

30. New data speed record on optical fiber, available at: <https://www.ofconference.org/en-us/home/news-and-press/press-releases/2024/new-data-speed-record-on-optical-fiber> (accessed 18 June 2024).

31. Optical networks move to metro 800G and long haul 400G, available at: <https://www.5gtechnologyworld.com/optical-networks-move-to-metro-800g-and-long-haul-400g> (accessed 18 June 2024).

32. Arikawa M., Sato M., Hayashi K. Wide range rate adaptation of QAM-based probabilistic constellation shaping using a fixed FEC with blind adaptive equalization. *Optics Express*, 2020, vol. 28, no. 2, pp. 1300-1315.

#### **Сведения об авторах**

##### **КОГАН С.С.**

*e-mail: kogan@t8.ru*

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, советник генерального директора, Компания ООО «Т8» по формированию технической стратегии, г. Москва, Санкт-Петербург

##### **НАНИЙ О.Е.**

*e-mail: naniy@t8.ru*

Доктор физико-математических наук, профессор физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, заместитель генерального директора, Компания ООО «Т8» по научной работе, г. Москва

##### **ТРЕЩИКОВ В.Н.**

*e-mail: vt@t8.ru*

Доктор технических наук, генеральный директор Компании ООО «Т8», г. Москва

#### **About the authors**

##### **S.S. KOGAN**

*e-mail: kogan@t8.ru*

Ph. D in telcommunication, Advisor to the General Director on the formation of a technical strategy of T8 LLC, Moscow & Saint Petersburg

##### **O.E. NANIY**

*e-mail: naniy@t8.ru*

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Faculty of Physics, Moscow Lomonosov University, Deputy General Director for scientific work of T8 LLC, Moscow

##### **V.N. TRESHCHIKOV**

*e-mail: vt@t8.ru*

Doctor of Technical Sciences, General Director of T8 LLC, Moscow



**Финансирование.** Работа не имела спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов** равноценный.

**Получена:** 02.04.2024

**Одобрена:** 05.04.2024

**Принята к публикации:** 08.04.2024

**Financing.** The work was not sponsored.

**Conflict of Interest.** The authors declare no conflict of interest.

**The authors' contribution is equal.**

**Received:** 02/04/2024

**Approved:** 05/04/2024

**Accepted for publication:** 08/04/2024

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Коган, С.С. Высокоскоростные оптические каналы перспективных волоконно-оптических транспортных сетей OTN/DWDM. Ч. 2. Дальность связи, спектральная эффективность и символьная скорость / С.С. Коган, О.Е. Наний, В.Н. Трещиков в // Прикладная фотоника. – 2024. – Т. 11, № 2. – С. 5–25.

Please cite this article in English as: Kogan S.S., Nanii O.E., Treshchikov V.N. High-speed optical channels of advanced optical transport networks OTN/DWDM. Part 2: Communication range, spectral efficiency and symbol rate. *Applied Photonics*, 2024, vol. 11, no. 2, pp. 5–25.

УДК 620.174.25

**С. Семенов<sup>1</sup>, В. Щербаков<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова РАН – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук», Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup>АО «Центр ВОСПИ», Москва, Российская Федерация

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДОСТИЖЕНИЙ В ОБЛАСТИ РАЗРАБОТКИ И ПРОИЗВОДСТВА ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА ПРИ РАЗРАБОТКЕ И КОНСТРУИРОВАНИИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ**

Габариты изделий на основе оптического волокна ограничиваются чувствительностью оптоволокна к макроизгибам, приводящим к росту оптических потерь при малых радиусах изгиба. Появление типов волокна с малыми макроизгибными потерями позволяет существенно уплотнить монтаж. Однако при этом может возникнуть опасность разрушения волокна в местах изгиба в течение срока службы изделия из-за механической усталости. В статье на основе использования модели статической усталости кварцевого стекла получено простое выражение для оценки вероятности разрушения волокна при длительном напряжении на изгибе в зависимости от длины изогнутого участка, радиуса изгиба и величины влажности, с учетом результата проверочного испытания под нагрузкой, проведенного изготовителем волокна. Обсуждается возможность повышения механической надежности кварцевого волокна путем нанесения герметичного углеродного покрытия. Использование полученных выражений при конструировании позволяет уменьшить габариты оптоволоконных изделий без риска снижения их надежности.

**Ключевые слова:** оптическое волокно, оптические потери на макроизгибах, механическая надежность, проверочный тест, влияние влажности, допустимый радиус изгиба, углеродное покрытие.

**S.L. Semjonov<sup>1</sup>, V.V. Shcherbakov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Dianov Fiber Optics Research Center – branch of Prokhorov  
General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences

<sup>2</sup>JSC “Center VOSPI”

## **APPLICATION OF ADVANCES IN THE DEVELOPMENT AND PRODUCTION OF OPTICAL FIBER IN THE DEVELOPMENT AND DESIGN OF FIBER OPTIC DEVICES**

The dimensions of devices based on optical fiber are limited by the sensitivity of the optical fiber to macrobending, which leads to an increase in optical losses at small bending radii. New types of fibers with low macrobending losses make it possible to significantly tighten the dimensions. However, there may be a risk of fiber failure at bending points during the life of the product due to mechanical fatigue. In the article, based on the use of a static fatigue model of silica glass, a simple expression is obtained to estimate the probability of fiber failure under long-term bending stress depending on the length of the bent section, bend radius and humidity, taking into account the result of a proof-test carried out by the fiber manufacturer. The possibility of increasing the mechanical reliability of silica fiber by applying a hermetical carbon coating is discussed. The use of the obtained expressions in design makes it possible to reduce the dimensions of fiber optic products without the risk of reducing their reliability.

**Keywords:** optical fiber, macrobending optical loss, mechanical reliability, proof-test, influence of humidity, permissible bending radius, carbon coating.

На современном этапе развития волоконно-оптической техники наблюдается интенсивная специализация типов оптического волокна (ОВ) для применения в различных областях оптической связи, позволяющая достигнуть наилучших результатов. Процесс развития ОВ отражает выпуск международных стандартов на оптическое волокно, которых с 1980 г. к настоящему времени ИТУ-Т уже выпустил восемь: G.651 – G.657.

Появление в последние годы ОВ с низкими потерями на макроизгибах открывает ряд новых возможностей применения ОВ. В табл. 1 и 2 приведены параметры ОВ этого типа, выпускаемых ведущей мировой волоконной компанией Corning (США).

Использование ОВ с низкими потерями на макроизгибах позволяет существенно уменьшить размеры волоконно-оптических изделий, размеры которых определяются диаметром колец ОВ с минимальным радиусом изгиба. Из этих таблиц можно выбрать тип волокна, обеспечивающего наименьшие дополнительные затухания на рабочей длине волны при радиусе изгиба 7,5 или 5 мм. Кольца ОВ диаметром 15 или 10 мм позволяют разработчику существенно уплотнить монтаж, но при

этом возникает вопрос, а как долго такой монтаж будет надежно работать? Не разрушится ли кварцевое волокно при таком крутом изгибе в течение заданного срока службы?

Таблица 1

## Одномодовые ОВ

Характеристики	LEAF®	SMF-28e+®LL	SMF-28®ULL	SMF-28®Ultra	ClearCurve®	
					LBL	ZBL
Прирост затухания						
При изгибе @1625 нм, радиус 30 мм, 100 витков	<0,05 дБ	<0,03 дБ	<0,05 дБ		<0,4 дБ	
При изгибе @1550 нм, радиус 25 мм, 100 витков		<0,03 дБ	<0,05 дБ	<0,01 дБ	<0,8 дБ	
При изгибе @1550 нм, радиус 16 мм, 1 виток	<0,50 дБ	<0,03 дБ	<0,1 дБ			<0,10 дБ
При изгибе @1550 нм, радиус 10 мм, 1 виток				<0,5		<0,30 дБ
При изгибе @1625 нм, радиус 10 мм, 1 виток				<1,5		

*Примечание:* <sup>1</sup>Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова, Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, руководитель; <sup>2</sup>АО «Центр ВОСПИ», технический директор.

Разработчики привыкли, что минимальный допустимый радиус изгиба оптических кабелей для внутриблочного и межблочного монтажа обычно устанавливается равным 20 (или 10) диаметрам кабеля, что гарантирует надежную работу волокна на срок более 25 лет, но когда монтаж выполняется ОВ без дополнительного покрытия, ОВ в буферном покрытии диаметром 0,9 мм, или ОВ, уложенным в фуркационную трубку диаметром 0,9 мм, насколько справедливо это правило?

Таблица 2

## Многомодовые ОВ

InfiniCor® 300		ClearCurve		
		ОМ4	ОМ3	ОМ2
Прирост затухания				
При изгибе @850 нм, радиус 37,5 мм, 100 витков	<0,5 дБ	При изгибе @850 нм, радиус 37,5 мм, 100 витков	<0,5 дБ	<0,05 дБ
При изгибе @1300 нм, радиус 37,5 мм, 100 витков	<0,5 дБ	При изгибе @1300 нм, ра- диус 37,5 мм, 100 витков	<0,5 дБ	<0,15 дБ
		При изгибе @850 нм, радиус 15 мм, 2 витка		<0,1 дБ
		При изгибе @1300 нм, ра- диус 15 мм, 12 витка		<0,3 дБ
		При изгибе @850 нм, радиус 7,5 мм, 2 витка		<0,2 дБ
		При изгибе @1300 нм, ра- диус 7,5 мм, 2 витка		<0,5 дБ

Изготовитель ОВ обычно проверяет его прочность, перематывая его с натяжением, обеспечивающим его кратковременное удлинение на 1 или 2 % (обычный или двойной proof test) и определяет количество обрывов  $N_p$  на единицу длины. Чем совершеннее технология производства ОВ, тем меньше слабых точек на волокне, приводящих к его обрыву при нагружении. Лучшие производители ОВ достигают в последние годы единиц обрывов на десятки километров даже при 2%-ном натяжении. Поэтому ОВ, используемое для монтажа, длина которого составляет единицы метров, имеет очень низкую вероятность разрушения даже при малых радиусах изгиба. Оценка этой вероятности и представляет для нас интерес.

В свое время Мицунага и др. [1] вывели следующее соотношение для оценки вероятности  $F$  разрушения во время эксплуатации в зависимости от времени эксплуатации световода  $t_s$  под нагрузкой  $\sigma_s$  после перематки под нагрузкой  $\sigma_p$ :

$$F = 1 - \exp \left[ -N_p L \left\{ \left[ \left( 1 + \frac{\sigma_s^n t_s}{\sigma_p^n t_p} \right) \frac{1}{1+C} \right]^{\frac{m}{n-2}} - 1 \right\} \right], \quad (1)$$

где  $t_p$  – длительность действия нагрузки при перематке,  $N_p$  – среднее число обрывов на единицу длины световода при перематке,  $L$  – длина

световода, для которой делается оценка,  $m$  – статистический параметр Вейбулла,  $n$  – параметр статической усталости,  $C$  – параметр, учитывающий время снятия нагрузки во время контрольной перемотки (как правило,  $C \ll 1$ , и им можно пренебречь).

Формула (1) получила широкое распространение, однако она выводилась с помощью простого степенного закона в предположении, что параметры статической усталости  $n$  и  $B$ , характеризующие скорость роста микротрещин, одинаковы при перемотке световодов и во время эксплуатации. Эксплуатация световодов обычно происходит в значительно менее благоприятных условиях (например, при повышенной влажности), чем перемотка.

Ранее нами было обнаружено, что при изменении влажности параметр статической усталости  $n$  остается практически неизменным ( $\sim 20$ ), а относительные изменения параметра  $B$  (измерение абсолютного значения которого вызывает большие затруднения) приводят к сокращению времени до разрушения при одной и той же нагрузке при увеличении относительной влажности [2]. В частности, было получено, что при увеличении относительной влажности с 30 до 100 % время до разрушения сокращалось в 18 раз [3].

Таким образом, учитывая вышеприведенные соображения, можно получить более удобное приближенное выражение для вероятности разрушения:

$$F \approx N_p \cdot L \cdot \frac{m}{n-2} \cdot \left( \frac{\sigma_s}{\sigma_p} \right)^n \cdot \frac{t_s}{t_p} \cdot \frac{1}{\beta}, \quad (2)$$

где  $\beta$  – коэффициент, учитывающий уменьшение срока службы в случае увеличении относительной влажности при эксплуатации по сравнению с условиями при контрольной перемотке под нагрузкой.

Максимальная величина рабочей нагрузки при изгибе волокна  $\sigma_s$  (действующая в течение срока эксплуатации  $t_s$ ) определяется его диаметром  $d$  и радиусом его изгиба  $R$ :

$$\sigma_s = d E / (2R + d) E, \quad (3)$$

где  $E$  – модуль Юнга кварцевого стекла,  $E = 74$  ГПа.

Типичные нагрузки при испытательной перемотке –  $\sigma_p = 1,4$  ГПа (при удлинении  $\varepsilon_p = 2$  %, или силе натяжения 16,4 Н на волокно

с  $d = 125$  мкм), или  $\sigma_p = 0,7$  ГПа (при удлинении  $\varepsilon_p = 1$  %, или натяжении 8,4 Н).

Для консервативной оценки вероятности разрушения до конца срока службы можно выбрать следующие параметры:

срок службы  $t_s = 25$  лет  $= 0,8 \times 10^9$  с,

$k$  – число колец ОВ радиуса  $R$  волокна с  $d = 125$  мкм,

$t_p = 1$  с – время действия нагрузки при тестовой перемотке,

$N_p = 0,01$  м<sup>-1</sup> – число обрывов при контрольной перемотке (в среднем 1 обрыв на 100 м),

$n = 20$  – параметр статической усталости волокна с обычным уретанакрилатным покрытием,

$m = 2$  – типичный статистический параметр Вейбулла на уровне удлинения при перемотке 1–2 %,

$\beta = 0,055$  ( $=1/18$ ) – параметр, учитывающий уменьшение срока службы при максимально возможном увеличении относительной влажности,

$L = 2\pi R \cdot k$  – длина изогнутого ОВ, находящегося под рабочей нагрузкой  $\sigma_s$ .

С использованием выражения (2) рассчитана следующая табл. 3.

Таблица 3

Вероятность разрушения в течение 25 лет ОВ, испытанного перемоткой с 2%-ным удлинением

$R$ , мм		5	10	15	20	25
$F$	$k = 1$	$>1$	$8 \times 10^{-5}$	$3,6 \times 10^{-8}$	$1,5 \times 10^{-10}$	$2,2 \times 10^{-12}$
	$k = 2$	$>1$	$1,6 \times 10^{-4}$	$7,2 \times 10^{-8}$	$3,0 \times 10^{-10}$	$4,4 \times 10^{-12}$

Из таблицы легко видеть, что ОВ, прошедшее 2 % proof test, можно укладывать как с одним, так и с двумя витками радиусом 10 мм без опасения его разрушения за 25 лет.

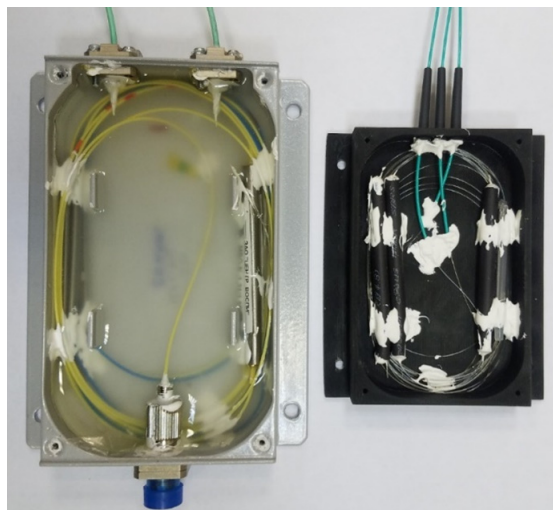
Однако расчеты показывают, что при  $R = 5$  мм даже волокно с  $N_p = 10^{-4}$  м<sup>-1</sup> (один обрыв на 10 км) и 2%-ной перемоткой имеет высокую вероятность разрушиться за 25 лет эксплуатации.

Согласно выражению (2), при использовании волокна, прошедшего только 1 % proof test, вероятность отказа повышается в  $2^{20} = 10^6$  раз (табл. 4). При этом изгиб с  $R = 10$  мм на срок 25 лет становится недопустимым, а с  $R = 15$  сомнительным.

Таблица 4

Вероятность разрушения в течение 25 лет ОВ, испытанного перемоткой с 1%-ным удлинением

$R$ , мм		5	10	15	20	25
$F$	$k = 1$	>1	>1	$3,6 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-4}$	$2,2 \times 10^{-6}$
	$k = 2$	>1	>1	$7,2 \times 10^{-2}$	$3,0 \times 10^{-4}$	$4,4 \times 10^{-6}$



а

б

Рис. Монтаж двухкаскадного мультиплексора 1310/1550 на сварных ответвителях: а – с  $R_{\text{мин}} = 30$  мм; б – с  $R_{\text{мин}} = 20$  мм; использовалось ОВ, прошедшее 1 % proof test (см. табл. 4)

Использование возможности уменьшения радиуса изгиба при монтаже волоконно-оптического устройства проиллюстрировано на рис. 1, где радиус изгиба уменьшен с 30 до 20 мм без влияния на результирующие характеристики устройства и с допустимым снижением вероятности отказа.

Какие есть пути повышения механической долговечности изогнутого кварцевого ОВ?

Значительного повышения долговечности можно добиться, защищая ОВ от действия влаги, путем герметизации в объеме с осушенным газом или погружая в среду влагозащитного геля, как и поступают изготовители полевых и магистральных кабелей и оптоволоконных линий задержки. Но есть и более радикальные методы.



Исследования, проведенные в НЦВО РАН, показывают, что защита оптического волокна герметизирующим карбоновым покрытием позволяет получить параметр статической усталости  $n = 100 \dots 150$  [4]. Для оценок долговечности также подходит выражение (2), но только с использованием других величин параметров статической усталости:  $n = 100$  и  $\beta = 1$ . Это покрытие радикально повышает долговечность, и при этом покрытие волокно будет вполне надежным даже при изгибах с  $R < 5$  мм (табл. 5). Следует учитывать, однако, что малая толщина герметизирующего покрытия требует его дополнительной защиты от механических повреждений полимерным покрытием и защиты от пробоя разрядами электростатики при перемотке волокна.

Таблица 5

Вероятность разрушения ОВ с карбоновым покрытием ( $n = 100$ ), испытанного перемоткой с 2%-ным удлинением

$R$ , мм		4	5	10	15	20	25
$F$	$k = 1$	$<10^{-8}$	$<10^{-15}$	$<10^{-15}$	$<10^{-15}$	$<10^{-15}$	$<10^{-15}$
	$k = 2$	$<10^{-8}$	$<10^{-15}$	$<10^{-15}$	$<10^{-15}$	$<10^{-15}$	$<10^{-15}$

Поскольку технология нанесения карбонового покрытия освоена в России в АО ПНППК (г. Пермь), есть реальная возможность получить супернадёжное монтажное волокно для использования в миниатюрных волоконных изделиях и фотонных интегральных схемах.

В заключение необходимо отметить, что все выкладки и выводы, изложенные в данной статье, применимы только к волокну, не прошедшему очистку от полимерного покрытия и не имеющему его повреждений.

### Список литературы

1. Mitsunaga, Y. Reliability assurance for long-length optical fibre based on proof testing / Y. Mitsunaga, Y. Katsuyama, Y. Ishida // Electronics Letters. – 1981. – Vol. 17(16). – P. 567–568. DOI: 10.1049/el:19810398
2. Механическая надёжность волоконных световодов / В.А. Богатырев, М.М. Бубнов, С.Д. Румянцев, С.Л. Семенов // Труды ИОФАН СССР. Т. 23. – М.: Наука, 1990. – С. 66–93.
3. Mechanical reliability of polymer-coated and hermetically coated optical fibers based on proof testing / V.A. Bogatyryov, M.M. Bubnov, E.M. Dianov, S.D. Rumjantsev, S.L. Semjonov // Optical Engineering. – 1991. – Vol. 30(6). DOI: 10.1117/12.55866

## References

1. Mitsunaga Y., Katsuyama Y., Ishida Y. Reliability assurance for long-length optical fibre based on proof testing. *Electronics Letters*, 1981, vol. 17, no. 16, pp. 567-568.
2. Bogatyrev V.A., Bubnov M.M., Rumiantsev S.D., Semenov S.L. Mekhanicheskaya nadezhnost' volokonnykh svetovodov. Trudy Instituta Obshchei Fiziki Akademii Nauk. Moscow: Nauka, 1990, vol. 23, pp. 66-93.
3. Bogatyryov V.A., Bubnov M.M., Dianov E.M., Rumjantsev S.D., Semjonov S.L. Mechanical reliability of polymer-coated and hermetically coated optical fibers based on proof testing. *Optical Engineering*, 1991, vol. 30, no. 6.

### Сведения об авторах

#### СЕМЕНОВ С.Л.

*e-mail: sls@fo.gpi.ru*

Руководитель НЦВО ИОФ РАН, доктор физико-математических наук, Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова РАН – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (НЦВО ИОФ РАН), Москва, Российская Федерация.

#### ЩЕРБАКОВ В.В.

*e-mail: vospi@bk.ru*

Технический директор, кандидат технических наук, АО «Центр ВОСПИ», Москва, Российская Федерация.

### About the authors

#### S.L. SEMJONOV

*e-mail: sls@fo.gpi.ru*

Doctor of Sciences, Director of Dianov Fiber Optics Research Center – branch of Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation.

#### V.V. SHCHERBAKOV

*e-mail: vospi@bk.ru*

Ph. D., Technical Director of JSC “Center VOSPI”, Moscow, Russian Federation.

**Финансирование.** Работа не имела спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов.** Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

**Получена:** 05.04.2024

**Одобрена:** 09.04.2024

**Принята к публикации:** 10.04.2024

**Financing.** The work was not sponsored.

**Conflict of Interest.** The authors declare no conflict of interest.

**Author Contributions.** All authors have made an equivalent contribution to the publication.

**Received:** 05/04/2024

**Approved:** 09/04/2024

**Accepted for publication:** 10/04/2024

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Семенов, С.Л. Использование достижений в области разработки и производства оптического волокна при разработке и конструировании волоконно-оптических изделий / С.Л. Семенов, В.В. Щербаков // Прикладная фотоника. – 2024. – Т. 11, № 2. – С. 26–35.

Please cite this article in English as: Semjonov S.L., Shcherbakov V.V. Application of advances in the development and production of optical fiber in the development and design of fiber optic devices. *Applied Photonics*, 2024, vol. 11, no. 2, pp. 26-35.

УДК 621.372

**К.А. Овчинников, Д.Г. Гилев, В.В. Криштоп**

Пермская научно-производственная приборостроительная компания,  
Пермь, Российская Федерация  
Пермский национальный исследовательский политехнический  
университет, Пермь, Российская Федерация

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ИЗМЕНЕНИЯ ПОЛУВОЛНОВОГО НАПРЯЖЕНИЯ ФАЗОВОГО МОДУЛЯТОРА НА $\text{LiNbO}_3$**

Проведены измерения полувонового напряжения интегрально-оптического фазового модулятора на  $\text{LiNbO}_3$  в диапазоне температур от  $-40$  до  $+60$  °С. Измерения проводились двумя методами с применением интерферометра Саньяка и Маха–Цандера. Температурные коэффициенты изменения полувонового напряжения, полученные в экспериментах, согласуются с теоретическими.

**Ключевые слова:** интегрально-оптический модулятор, ниобат лития, схема интегрально-оптическая многофункциональная, фазовый модулятор, полувоновое напряжение.

**K.A. Ovchinnikov, D.G. Gilev, V.V. Krishtop**

Perm Scientific and Production Instrument-Making Company,  
Perm, Russian Federation  
Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## **DETERMINATION OF TEMPERATURE COEFFICIENT OF CHANGE HALF-WAVE VOLTAGE PHASE MODULATOR ON $\text{LiNbO}_3$**

Measurements of the half-wave voltage of the integrated-optical phase modulator on  $\text{LiNbO}_3$  were carried out in the temperature range from  $-40$  to  $+60$  °C. The measurements were carried out by two methods using the Sagnac and Mach-Zehnder interferometers. The temperature coefficients of the half-wave voltage change obtained in the experiments agree with the theoretical ones.

**Keywords:** integrated-optical modulator, lithium niobate, multifunctional integrated-optical circuit, phase modulator, half-wave voltage.

## **Введение**

Фазовые модуляторы сейчас находят большое применение в сфере телекоммуникаций, квантовых коммуникаций и т.д., особое место занимают фазовые модуляторы СИОМ (схемы интегрально-оптические многофункциональные), используемые при разработке и производстве волоконно-оптических датчиков, таких как волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) или резонаторные волоконно-оптические гироскопы (РВОГ) [1–3]. Величина полуволнового напряжения в таких модуляторах является важным параметром, поскольку определяет величину фазового смещения оптического сигнала при подаче напряжения на модулятор [4]. В ВОГ положение рабочей точки определяет чувствительность будущего изделия и изменение полуволнового напряжения смещает рабочую точку, что может отражаться на итоговых параметрах ВОГ [5].

Последние годы много исследований посвящено разработке и исследованию резонаторных волоконно-оптических гироскопов (РВОГ), и на данный момент разработано множество схем РВОГ. Многие из разработанных схем работают на высококогерентном излучении и включают в себя интегрально-оптические фазовые модуляторы [6–8]. Недавно представлены РВОГ, работающие на широкополосном излучении с применением фазовой модуляции [9–11]. Для корректной работы обоих видов схем необходима стабильная работа фазового модулятора во всем температурном диапазоне.

Измерение полуволнового напряжения фазовых модуляторов является важным этапом при проектировании оптических устройств. Методы измерения зависят от конкретного типа модулятора и требуемой точности. Для наиболее точного определения применяются такие устройства, как фазометры, векторные анализаторы или анализаторы спектра. Часто бывает, что выбор метода ограничен доступным оборудованием. В данной статье рассмотрены простые методы измерения полуволнового напряжения при разных температурах с применением источников излучения разной степени когерентности, генератора электрических сигналов, фотоприёмного модуля и осциллографа.

В данной работе проводится измерение величины полуволнового напряжения СИОМ на ниобате лития ( $\text{LiNbO}_3$ ) в диапазоне температур от  $-40$  до  $+60$  °С двумя методиками.

## 1. Объект исследования

СИОМ представляет собой интегрально-оптическую схему, состоящую из системы канальных оптических волноводов и параллельной им системы электродов (рис. 1). Топология СИОМ представляет собой симметричный Y-разветвитель для деления входной оптической мощности в равных пропорциях (50/50). Около волноводов, образующих Y-разветвитель, напыляют электроды. Поскольку ниобат лития, из которого изготовлен СИОМ, является электрооптическим материалом, показатель преломления которого является функцией приложенного к ним электрического поля, то при подаче напряжения на электроды происходит изменение показателя преломления в волноводах [12]. Выходное излучение из-за различия показателей преломления в плечах Y-делителя приобретает разность фаз.

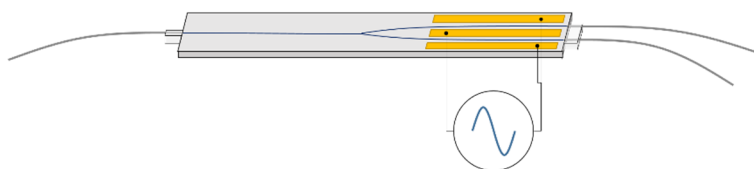


Рис. 1. Топология СИОМ

Для  $\text{LiNbO}_3$  изменение показателя преломления  $\Delta n$  линейно пропорционально приложенному электрическому полю  $E$ :

$$\Delta n = \alpha_{EO} E, \quad (1)$$

где  $\alpha_{EO}$  – линейный электрооптический коэффициент волновода, определяемый материалом.

Важным параметром модулятора является полуволновое напряжение  $V_\pi$  [12], которое определяется как напряжение, необходимое для изменения фазы оптического сигнала на  $\pi$ .  $V_\pi$  можно найти как

$$V_\pi = \frac{\lambda d}{2\alpha_{EO} L}, \quad (2)$$

где  $L$  и  $d$  – длина электродов и расстояние между электродами соответственно,  $\lambda$  – длина волны оптического излучения.

Электрооптический коэффициент волновода, в свою очередь, можно определить, как

$$\alpha_{EO} \approx -\frac{1}{2} n_e^3 r_{33}, \quad (3)$$

где  $n_e$  – показатель преломления ниобата лития для необыкновенного луча,  $r_{33}$  – электрооптический коэффициент ниобата лития.

При изменении температуры основной вклад в изменение полуволнового напряжения будут вносить изменение показателя преломления  $n_e$  и электрооптического коэффициента ниобата лития. Зависимость полуволнового напряжения  $V_\pi$  от температуры  $T$  можно записать как

$$V_\pi(T) = V_{\pi 0} + \frac{dV_\pi}{dT} T, \quad (4)$$

где  $V_{\pi 0}$  – полуволновое напряжение модулятора при температуре  $0^\circ\text{C}$ .

Изменение полуволнового напряжения с температурой запишется так:

$$\frac{dV_\pi}{dT} = \frac{\lambda d}{2L} \frac{d(1/\alpha_{EO})}{dT} = -V_{\pi 0} \frac{1}{\alpha_{EO}} \frac{d\alpha_{EO}}{dT}. \quad (5)$$

В свою очередь, изменение электрооптического коэффициента волновода с температурой примет вид:

$$\frac{d\alpha_{EO}}{dT} = -\frac{1}{2} E_z \frac{dn_e^3}{dT} r_{33} - \frac{1}{2} E_z n_e^3 \frac{dr_{33}}{dT} = \alpha_{EO} \left( \frac{3}{n_e} \frac{dn_e}{dT} + \frac{1}{r_{33}} \frac{dr_{33}}{dT} \right). \quad (6)$$

Таким образом, учитывая (5) и (6), уравнение (4) примет вид:

$$V_\pi(T) = V_{\pi 0} (1 + \kappa T), \quad (7)$$

где  $\kappa$  – температурный коэффициент полуволнового напряжения, который можно записать так:

$$\kappa = - \left( \frac{3}{n_e} \frac{dn_e}{dT} + \frac{1}{r_{33}} \frac{dr_{33}}{dT} \right). \quad (8)$$

Величина показателя преломления  $n_e$  ниобата лития для длины волны 1550 нм составляет 2,138,  $dn_e/dT$  – температурный коэффициент показателя преломления и составляет  $3,91 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  [13], а величина  $\frac{1}{r_{33}} \frac{dr_{33}}{dT}$  составляет  $4,9 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$  [14]. Таким образом, температурный коэффициент полуволнового напряжения  $\kappa \approx -5,2 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ .

## 2. Методики измерения

### 2.1. Интерферометр Маха – Цандера

Для измерения полуволнового напряжения СИОМ собирается интерферометр Маха – Цандера, образованный фазовым модулятором и волоконным делителем (С1), как показано на рис. 2.



Рис. 2. Схема интерферометра Маха – Цандера для измерения полуволнового напряжения

С генератора подается пилообразное напряжение, амплитуда которого значительно превышает значение полуволнового напряжения. На фотоприемнике (ФП) наблюдается гармонический сигнал, представляющий передаточную характеристику интерферометра (рис. 3) [15]. Разница напряжений пилообразного сигнала между моментами времени, когда интерференционная картина достигает минимального значения, соответствует удвоенному значению полуволнового напряжения.

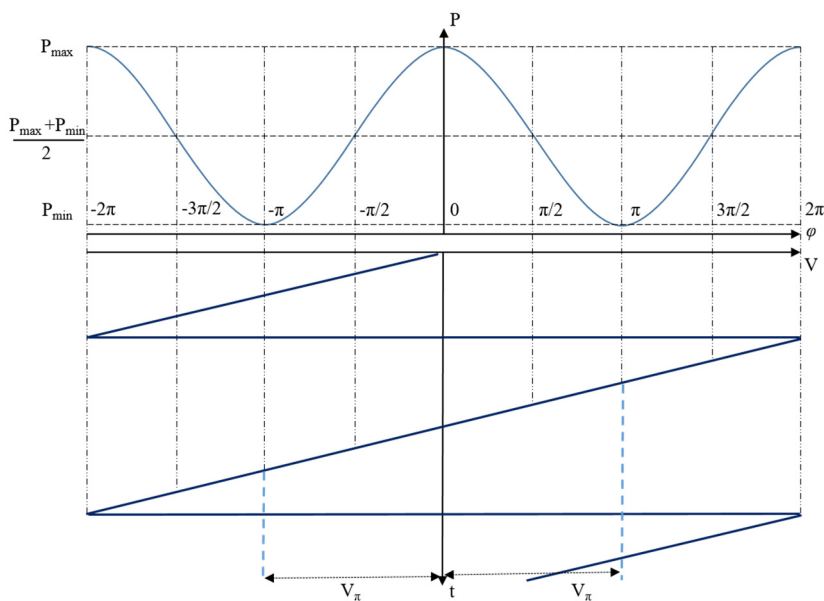


Рис. 3. Передаточная характеристика интерферометра и связь с подаваемой пилообразной модуляцией на СИОМ



Данный метод позволяет получить не только значение полуволнового напряжения, но также самой передаточной характеристики интерферометра. Использование лазерного источника обусловливается высокой длиной когерентности, поскольку при создании волоконного интерферометра сложно соблюсти равенство плеч интерферометра [16]. В случае использования широкополосного источника излучения может возникнуть ситуация, когда интерференционная картина не будет наблюдаться из-за превышения максимальной разницы между плечами интерферометра, определяемой длиной когерентности. Так, например, при использовании суперлюминесцентного диода (СЛД) с центральной длиной волны 1550 нм и шириной спектра 10 нм длина когерентности составит 240 мкм. Такая длина когерентности не позволит провести измерение с волоконным интерферометром Маха – Цандера, т.е. СЛД не пригоден для такого метода измерений.

## 2.2. Интерферометр Саньяка

Второй метод основан на применении интерферометра Саньяка, представленного на рис. 4 [17], в котором излучение от СЛД проходит через циркулятор (С2), затем разделяется на два пучка в СИОМ. Далее оба пучка проходят по волоконному контуру (ВК) во встречных направлениях и снова возвращаются в СИОМ, где объединяются и после прохождения через С2 интерферируют на ФП.

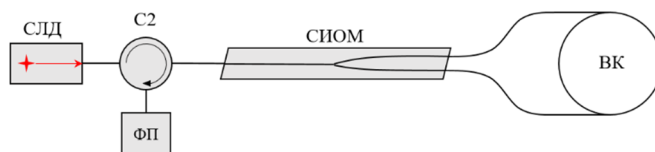


Рис. 4. Схема интерферометра Саньяка для измерения полуволнового напряжения

С генератора подается прямоугольный сигнал на собственной частоте интерферометра. Собственная частота определяется длиной ВК как [4]

$$f_p = \frac{1}{2\Delta\tau} = \frac{c}{2nL}, \quad (9)$$

где  $\Delta\tau$  – время обхода контура,  $c$  – скорость света в вакууме,  $n$  – показатель преломления волокна,  $L$  – длина ВК.

Амплитуда сигнала модуляции  $A_{\text{mod}}$  при измерениях изменяется между двумя положениями:

- $A_{\text{mod}_1} < V_\pi$ , при этом мощность на фотоприемнике  $P_1$ :  $P_{\text{min}} < P_1 < P_{\text{max}}$ ;
- $A_{\text{mod}_2} > V_\pi$ , при этом  $A_{\text{mod}_2}$  подбирается таким образом, что мощность на фотоприемнике  $P_2 = P_1$ .

Среднее значение между  $A_{\text{mod}_1}$  и  $A_{\text{mod}_2}$  будет соответствовать значению  $V_\pi$  (рис. 5).

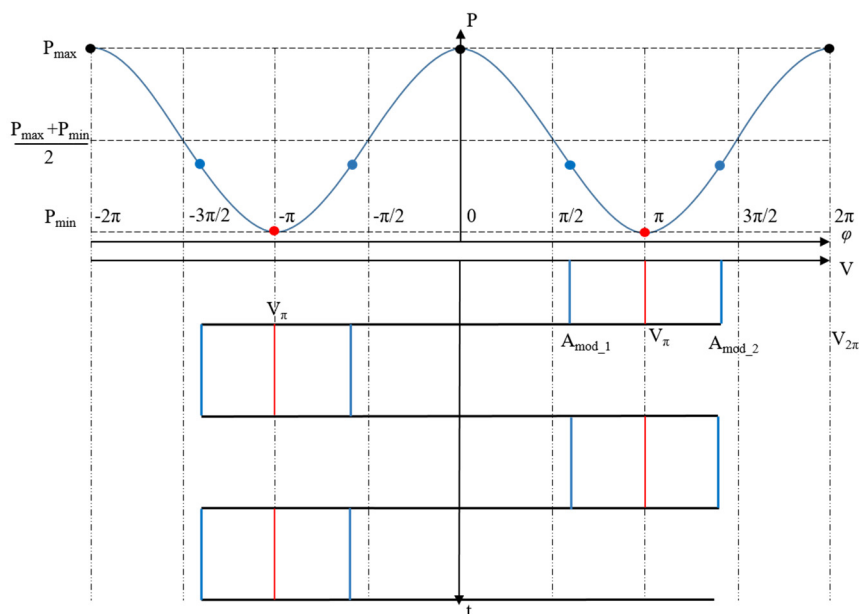


Рис. 5. Передаточная характеристика интерферометра Саньюка и связь с подаваемой прямоугольной модуляцией

Для большей точности  $A_{\text{mod}_1}$  и  $A_{\text{mod}_2}$  следует выбирать вблизи напряжения, соответствующего разности фаз  $\pi/2$ , поскольку в этой области проявляется наибольшая чувствительность.

Данный метод позволяет использовать широкополосное излучение, поскольку интерферирующее излучение проходит один и тот же путь, но в разных направлениях, и разность хода, вызванная различием длин оптических путей, не возникает. Узкополосное лазерное излучение с большой длиной когерентности в данном случае, из-за наличия обратного рассеяния и отражения, вызывает паразитную интерференцию, которая вносит изменения в форму сигнала и, соответственно, большую погрешность в измерения [18].

### 3. Результаты эксперимента

В ходе эксперимента проведены измерения полуволнового напряжения СИОМ двумя методиками в диапазоне температур  $-40 \dots +60$  °С. СИОМ помещался в термокамеру, внутри которой температура изменялась в диапазоне от  $-40$  до  $+60$  °С с шагом в  $10$  °С. Исследуемый образец выдерживался час на каждом шаге для установления постоянной температуры внутри камеры и вокруг СИОМ. По данным измерениям построены графики зависимости  $V_{\pi}(T)$ , приведенные на рис. 6.

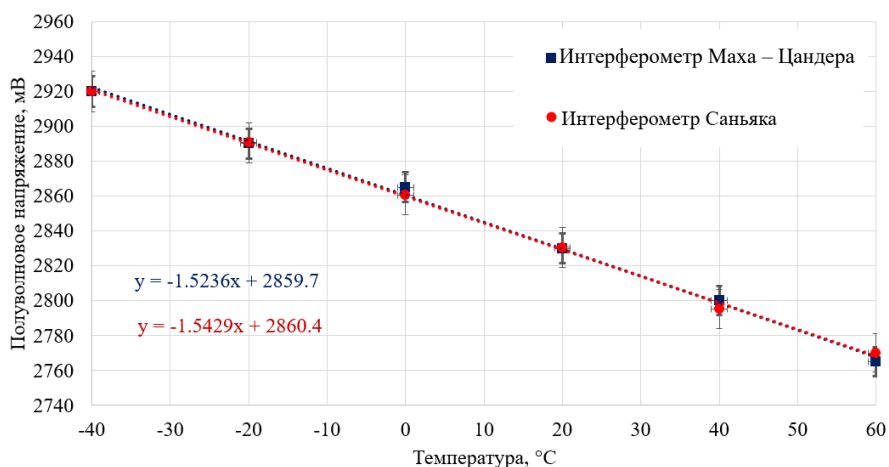


Рис. 6. Графики зависимости полуволнового напряжения СИОМ от температуры, полученные при измерении двумя методиками

По данным графикам определены полуволновое напряжение при температуре  $0$  °С, а также температурный коэффициент полуволнового напряжения  $\kappa$  для исследуемого образца СИОМ производства ПАО «ПНППК». Данные приведены в таблице.

#### Характеристики полуволнового напряжения СИОМ

Параметр	Методика измерения		
	Теоретический расчет	Интерферометр Маха – Цандера	Интерферометр Саньяка
$V_{\pi 0}$ , мВ	2860,0	$2859,7 \pm 9,5$	$2860,4 \pm 9,4$
$\kappa$ , $10^{-4} \text{ K}^{-1}$	-5,2	-5,32	-5,39

Полученные значения  $\kappa$  близки к теоретическим расчетам, что свидетельствует о хорошей точности применяемых методик измерения.

## Заключение

В данной работе представлены методики измерения полуволнового напряжения фазового модулятора СИОМ. Измерены значения полуволнового напряжения и температурного коэффициента изменения полуволнового напряжения. Полученные значения температурного коэффициента близки к теоретическому, что свидетельствует о высокой точности представленных методик измерения. Данный коэффициент является важной характеристикой СИОМ при проектировании волоконно-оптических гироскопов. Проверка обеих методик с использованием излучения с разной степенью когерентности была важной задачей, поскольку последние годы ведется активная разработка резонаторных волоконно-оптических гироскопов, в которых возможно применение обоих типов излучения.

## Список литературы

1. Fiber optic resonators for angular rate sensors / D.G. Gilev, K.A. Ovchinnikov, V.V. Krishtop [et al.] // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* – 2022. – Vol. 86 (Suppl 1). – P. S75–S80. DOI: 10.3103/S1062873822700423
2. A prototype for a passive resonant interferometric fiber optic gyroscope with a  $3 \times 3$  directional coupler / K.A. Ovchinnikov, D.G. Gilev, V.V. Krishtop, A.B. Volyntsev, V.A. Maximenko, A.A. Garkushin, Y.V. Filatov, A.S. Kukaev, A.A. Sevryugin, E.V. Shalymov [et al.] // *Sensors.* – 2023. – P. 23. – P. 1319. DOI: org/10.3390/s23031319
3. Experimental investigation of an optical resonator gyroscope with a Mach – Zehnder modulator and its sensitive elements / Y.V. Filatov, D.G. Gilev, P.S. Goncharova, V.V. Krishtop, A.S. Kukaev, K.A. Ovchinnikov, A.A. Sevryugin, E.V. Shalymov, V.Y. Venediktov // *Photonics.* – 2023. – Vol. 10. – P. 4. DOI: 10.3390/photonics10010004
4. Lefevre, Herve. *The Fiber-Optic Gyroscope* / Herve Lefevre // Third Edition. – Artech, 2022.
5. Performance improvement of white-light-driven resonant fiber optic gyroscope using four-frequency sawtooth wave modulation technology / Wu Fan, Li Jun, Lan Shiqi, Yan Bo, Zhou Jun, Yue Yazhou // *Optics Communications.* – 2023. – Vol. 550. – P. 129827. DOI: 10.1016/j.optcom.2023.129827
6. Wang Linglan, Yan Yuchao, Ma Huilian, Jin Zhonghe. Research progress of the resonant fiber optic gyroscope technology. – 2015. – 967906. DOI: 10.1117/12.2197580

7. Resonant fiber optic gyroscope using a reciprocal modulation and double demodulation technique / L. Liu, S. Liu, J. Hu, H. Ma, Z. Jin // *Opt Express*. – 2022. – Mar 28. – Vol. 30(7). – P. 12192–12203. DOI: 10.1364/OE.458596. PMID: 35473145
8. Terrel, Matthew. Resonant fiber optic gyroscope using an air-core fiber / Matthew Terrel, Michel Digonnet, Shanhui Fan // *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology* – *J. Lightwave Technol.* – 2012. – Vol. 30. – P. 931–937. DOI: 10.1109/JLT.2011.2177959
9. Navigation-grade resonant fiber-optic gyroscope using ultra-simple white-light multibeam interferometry / Shuangxiang Zhao, Qingwen Liu, Yuanyuan Liu, Huilian Ma, Zuyuan He // *Photon. Res.* – 2022. – Vol. 10. – P. 542–549.
10. Closed-loop resonant fiber-optic gyroscope with a broadband light source / J. Hu, S. Liu, L. Liu, H. Ma // *Journal of Lightwave Technology*. – 2023. – Vol. 41, no. 18. – P. 6088–6093. – 15 Sept.15. DOI: 10.1109/JLT.2023.3270443
11. Performance improvement of white-light-driven resonant fiber optic gyroscope using four-frequency sawtooth wave modulation technology / Fan Wu, Jun Li, Shiqi Lan, Bo Yan, Jun Zhou, Yazhou Yue // *Optics Communications*. – 2024. – Vol. 550. – P. 129827. DOI: 10.1016/j.optcom.2023.129827
12. Rongqing, Hui, Chapter 7: External electro-optic modulators. Editor(s): Rongqing Hui, *Introduction to Fiber-Optic Communications*. – Academic Press. – 2020. – P. 299–335. DOI: 10.1016/B978-0-12-805345-4.00007-X
13. Smith, D.S. Refractive indices of lithium niobate / D.S. Smith, H.D. Riccius, R.P. Edwin // *Optics Communications*. – 1976. – Vol. 17, Iss. 3. – P. 332–335. DOI: 10.1016/0030-4018(76)90273-X
14. Zook, J.D. Temperature dependence and model of the electro-optic effect in LiNbO<sub>3</sub> / J.D. Zook, D. Chen, G.N. Otto // *Applied Physics Letters*. – 1967. – Vol. 11, no. 5. – P. 159–161.
15. Афанасьев, В.М. Определение величины полуволнового напряжения электрооптического модулятора интенсивности излучения на основе интерферометра Маха – Цендера / В.М. Афанасьев, Р.С. Пономарев // *Прикладная фотоника*. – 2020. – Т. 7, № 1. – С. 16–24.
16. Application of optical frequency domain reflectometry for the study of polarization maintaining fibers / K.A. Ovchinnikov, D.G. Gilev, V.V. Krishtop [et al.] // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* – 2022. – Vol. 86 (Suppl 1). – P. S156–S162. DOI: 10.3103/S1062873822700599
17. Измерение величины двулучепреломления волокна типа Panda с помощью интерферометра Саньяка / К.А. Овчинников, В.В. Криштоп, Д.Г. Гилев, В.А. Максименко, А.В. Перминов // *Изв. вузов. Приборостроение*. – 2023. – Т. 66, № 10. – С. 845–851. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-10-845-851
18. Signal processing improvement of passive resonant fiber optic gyroscope using a reciprocal modulation-demodulation technique / Hanzhao Li, Yi Lin, Lu Liu, Huilian Ma, ZHonghe Jin // *Opt. Express*. – 2020. – Vol. 28. – P. 18103–18111.

## References

1. Gilev D.G., Ovchinnikov K.A., Krishtop V.V. et al. Fiber optic resonators for angular rate sensors. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, 2022, vol. 86, pp. S75-S80.
2. Ovchinnikov K.A., Gilev D.G., Krishtop V.V., Volyntsev A.B., Maximenko V.A., Garkushin A.A., Filatov Y.V., Kukaev A.S., Sevryugin A.A., Shalymov E.V. et al. A prototype for a passive resonant interferometric fiber optic gyroscope with a  $3 \times 3$  directional coupler. *Sensors*, 2023, vol. 23, p. 1319.
3. Filatov Y.V., Gilev D.G., Goncharova P.S., Krishtop V.V., Kukaev A.S., Ovchinnikov K.A., Sevryugin A.A., Shalymov E.V., Venediktov V.Y. Experimental investigation of an optical resonator gyroscope with a Mach – Zehnder modulator and its sensitive elements. *Photonics*, 2023, vol. 10, p. 4.
4. Lefevre H. *The Fiber-Optic Gyroscope*. Third Edition. Artech, 2022.
5. Wu F., Li J., Lan S., Yan B., Zhou J., Yue Y. Performance improvement of white-light-driven resonant fiber optic gyroscope using four-frequency sawtooth wave modulation technology. *Optics Communications*, 2023, vol. 550, p. 129827.
6. Wang L., Yan Y., Ma H., Jin Z. Research progress of the resonant fiber optic gyroscope technology. *Proceedings of Applied Optics and Photonics China*, 2015, p. 967906.
7. Liu L., Liu S., Hu J., Ma H., Jin Z. Resonant fiber optic gyroscope using a reciprocal modulation and double demodulation technique. *Optics Express*, 2022, vol. 30, no. 7, pp. 12192-12203.
8. Terrel M., Dignonnet M., Fan S. Resonant fiber optic gyroscope using an air-core fiber. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, vol. 30, pp. 931-937.
9. Zhao S., Liu Q., Liu Y., Ma H., He Z. Navigation-grade resonant fiber-optic gyroscope using ultra-simple white-light multibeam interferometry. *Photon. Res.*, 2022, vol. 10, pp. 542-549.
10. Hu J., Liu S., Liu L., Ma H. Closed-loop resonant fiber-optic gyroscope with a broadband light source. *Journal of Lightwave Technology*, 2023, vol. 41, no. 18, pp. 6088-6093.
11. Wu F., Li J., Lan S., Yan B., Zhou J., Yue Y. Performance improvement of white-light-driven resonant fiber optic gyroscope using four-frequency sawtooth wave modulation technology. *Optics Communications*, 2024, vol. 550, p. 129827.
12. Hui R. Chapter 7: External electro-optic modulators. *Introduction to Fiber-Optic Communications*. Ed. R. Hui. Academic Press, 2020, pp. 299-335.
13. Smith D.S., Riccius H.D., Edwin R.P. Refractive indices of lithium niobate. *Optics Communications*, 1976, vol. 17, no. 3, pp. 332-335.
14. Zook J.D., Chen D., Otto G.N. Temperature dependence and model of the electro-optic effect in LiNbO<sub>3</sub>. *Applied Physics Letters*, 1967, vol. 11, no. 5, pp. 159-161.
15. Afanas'ev V.M., Ponomarev R.S. Opređenje veličiny poluvolnovogo napriazheniia elektrooptičeskogo modulatora intenzivnosti izlucheniia na osnove

interferometra Makha – Tsendera [Experimental determination of the half-wave voltage of the Mach-Zender electro-optical amplitude modulator]. *Applied Photonics*, 2020, vol. 7, no. 1, pp. 16-24.

16. Ovchinnikov K.A., Gilev D.G., Krishtop V.V. et al. Application of optical frequency domain reflectometry for the study of polarization maintaining fibers. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, 2022, vol. 86, pp. S156-S162.

17. Ovchinnikov K.A., Krishtop V.V., Gilev D.G., Maksimenko V.A., Perminov A.V. Izmerenie velichiny dvulucheprelomleniia volokna tipa Panda s pomoshch'iu interferometra San'iaka [Measuring the birefringence value of a Panda fiber using a Sagnac interferometer]. *Journal of Instrument Engineering*, 2023, vol. 66, no. 10, pp. 845-851.

18. Li H., Lin Y., Liu L., Ma H., Jin Z. Signal processing improvement of passive resonant fiber optic gyroscope using a reciprocal modulation-demodulation technique. *Opt. Express*, 2020, vol. 28, pp. 18103-18111.

#### Сведения об авторах

#### About the authors

##### **ОВЧИННИКОВ К.А.**

*e-mail: OvchinnikovKA@pnppk.ru*

Аспирант, начальник лаборатории, Научно-исследовательский институт радиопоники и оптоэлектроники ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», научный сотрудник кафедры общей физики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация

##### **K.A. OVCHINNIKOV**

*e-mail: OvchinnikovKA@pnppk.ru*

PhD student, head of laboratory, Research Institute of Radiophotonics and Optoelectronics Perm Scientific-Industrial Instrument-Making Company, researcher at the Department of General Physics, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

##### **ГИЛЕВ Д.Г.**

*e-mail: GilevDG@pnppk.ru*

Кандидат технических наук, начальник бюро, Научно-исследовательский институт радиопоники и оптоэлектроники ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», научный сотрудник кафедры общей физики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация

##### **D.G. GILEV**

*e-mail: GilevDG@pnppk.ru*

PhD in Technical Sciences, bureau chief, Research Institute of Radiophotonics and Optoelectronics Perm Scientific-Industrial Instrument-Making Company, researcher at the Department of General Physics, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**КРИШТОП В.В.**

*e-mail: Krishtop@pnppk.ru*

Доктор физико-математических наук, профессор Пермского национального исследовательского политехнического университета, главный научный сотрудник Научно-исследовательского института радиопоники и оптоэлектроники ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», г. Пермь, Российская Федерация

**V.V. KRISHTOP**

*e-mail: Krishtop@pnppk.ru*

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Perm National Research Polytechnic University, Chief Researcher of the Research Institute of Radiophotonics and Optoelectronics, Perm Scientific and Production Instrument Making Company, Perm, Russian Federation

**Финансирование.** Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2023-0006).

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов** равноценный.

**Получена:** 15.04.2024

**Одобрена:** 18.04.2024

**Принята к публикации:** 19.04.2024

**Financing.** The research was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FSNM-2023-0006).

**Conflict of Interest.** The authors declare no conflict of interest.

**The authors' contribution is equal.**

**Received:** 15/04/2024

**Approved:** 18/04/2024

**Accepted for publication:** 19/04/2024

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Овчинников, К.А. Определение температурного коэффициента изменения полуволнового напряжения фазового модулятора на  $\text{LiNbO}_3$  / К.А. Овчинников, Д.Г. Гилев, В.В. Криштон // Прикладная фотоника. – 2024. – Т. 11, № 2. – С. 36–48.

Please cite this article in English as: Ovchinnikov K.A., Gilev D.G., Krishtop V.V. Determination of temperature coefficient of change half-wave voltage phase modulator on  $\text{LiNbO}_3$ . *Applied photonics*, 2024, no. 2, pp. 36-48.



УДК 535.2(076.5)

**П.О. Якушенков**Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,  
Москва, Российская Федерация**КОМПЛЕКСНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ ПРЕЛОМЛЕНИЯ  
ПРИ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭФФЕКТАХ**

Показатель преломления при самофокусировке рассматривался как компонента метрического тензора, т.е. как искривление пространства-времени. Однако возник интерес – как быть, если показатель преломления комплексный. Если ввести комплексный метрический тензор, то комплексная часть не будет искривлять пространство-время. В то же время при нелинейных эффектах будут возникать затухающие моды, т.е. если  $n$  линейный, то поглощение будет  $\alpha$ , но если  $n = n_1 + n_2$ , то тогда поглощение будет другим, о чем и пойдет речь в данной статье.

**Ключевые слова:** комплексная диэлектрическая проницаемость, комплексный показатель преломления, метрический тензор, искривление, нелинейные эффекты, комплексный угол преломления, поглощение.

**P.O. Yakushenkov**P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russian Federation**COMPLEX REFRACTIVE INDEX WITH THE PRESENCE  
OF NONLINEAR EFFECTS**

The refractive index during self-focusing was considered as a component of the metric tensor, it means, as a curvature of space-time. However, there was an interest – what will be, if the refractive index is complex. If we introduce a complex metric tensor, then the complex part will not curve space-time. At the same time, with the presence of nonlinear effects, damping modes will occur, it means, if  $n$  is linear, then the absorption will be  $\alpha$ , but if  $n = n_1 + n_2$ , then the absorption will be different, which will be discussed in this article.

**Keywords:** complex permittivity, complex refractive index, metric tensor, curvature, nonlinear effects, complex refraction angle, absorption.

## Введение

В работе [1] «Самофокусировка излучения, как коллапс волнового вектора» вещественный показатель преломления рассматривался как компонента метрического тензора  $n = \sqrt{\epsilon} = \sqrt{g_{00}}$  ( $dt' = dt\sqrt{g_{00}}$ ), и общая идея состояла в том, что скорость света в веществе не меняется, а искривляется путь в четырехмерном пространстве, и свету нужно пройти больший путь по искривленной координате времени, чем по прямой. Было вычислено действие дополнительного искривления пространства-времени из-за дополнительного поля  $4\pi\mathbf{P}$  ( $\mathbf{D} = \mathbf{E} + 4\pi\mathbf{P}$ ) – в зоне повышенного показателя преломления траектории лучей стягиваются на угол  $\theta$ ,

$$\sqrt{g_{00}} = c/v = 1/\sqrt{1 - m^2 c^4 / E^2} = 1/\cos\left(\frac{\theta}{2}\right),$$

где масса  $m$  – формальная константа, которой можно также это описать. Ее можно приписать, исходя из закона сохранения энергии [2], в случае неплоского фронта распространения света (когда между фотонами есть угол  $\theta$ ):  $m^2 c^4 = E^2 - p^2 c^2$ , энергия двух фотонов  $E = 2\hbar\omega$ , импульс  $p = 2\hbar k = 2\hbar\omega \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)/c$ , а значит,  $m = 2\hbar\omega \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)/c^2$ .

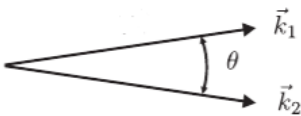


Рис. 1. Угол между волновыми векторами

Однако возник интерес, как при таком подходе описать комплексный показатель преломления. Прежде всего комплексный показатель преломления отвечает за поглощение, которое является таким коэффициентом, который описывает вероятность для одного фотона поглотиться или нет и долю фотонов, которые поглотятся, для группы фотонов. В то время как действительный показатель преломления действует на все фотоны, даже если рассмотреть случай обыкновенной и необыкновенной волны, то они будут отличаться поляризацией (т.е., вернее было бы сказать, – действительный показатель преломления одинаково действует на все фотоны одинаковой поляризации).

Формально можно ввести комплексный метрический тензор, аналогичный комплексной диэлектрической проницаемости и показателю

преломления ( $k_0 n'' = \alpha / 2$  в линейном случае,  $\alpha$  – поглощение)  
 $\sqrt{g_{00}} = \sqrt{\varepsilon' + i\varepsilon''} = n' + in''$ , однако масса, о которой излагалось выше, будет описывать только действительную часть метрического тензора, которая искривляет пространство-время, в отличие от мнимой. Как и при описании осцилляции массы нейтрино, вводя  $\sqrt{g_{00}} = c/v$ , который будет зависеть от угла между импульсом и волновым вектором, нейтрино приобретает массу, когда  $g_{00}$  становится комплексным, но комплексные компоненты метрического тензора не искривляют пространство-время, т.е. комплексный метрический тензор не имеет смысл искривления. Однако фотону можно приписать массу как формальную константу, если фронт распространения волны не плоский, описав это искривлением и действительной частью метрического тензора, а нейтрино приобретает массу по-другому (это связано с гамильтонианом нейтрино). Следовательно, если просто ввести комплексный метрический тензор, то массой, смысл которой в искривлении, поглощение описать нельзя, будет возникать масса, смысл которой не в искривлении траекторий, а в поглощении энергии (как масса нейтрино).

### Линейный коэффициент поглощения

Комплексную диэлектрическую проницаемость можно получить из уравнений Максвелла:

$$\operatorname{rot} H = \frac{4\pi j}{c} + \frac{\partial D}{c \partial t} = \frac{4\pi \sigma E}{c} + \frac{\varepsilon \partial E}{c \partial t} = E \left( \frac{4\pi \sigma}{c} + \frac{i\varepsilon \omega}{c} \right) = \frac{i\omega E}{c} \left( \varepsilon + \frac{4\pi \sigma}{i\omega} \right) = \frac{i\omega E}{c} \varepsilon^*(\omega),$$

где  $\varepsilon^*(\omega)$  – комплексная диэлектрическая проницаемость, но здесь предполагается, что диэлектрическая проницаемость не зависит от поля, а при нелинейных эффектах зависимость существенна.

Если вывести коэффициент поглощения из комплексного показателя преломления, то мы получим закон Бугера:

$$n' + in'' = \sqrt{\varepsilon' + i\varepsilon''}, \quad n' = \sqrt{\frac{\varepsilon' + \sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2}}{2}} \quad \text{и} \quad n'' = \sqrt{\frac{-\varepsilon' + \sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2}}{2}},$$

тогда  $k = k_0 n = k_0 n' + ik_0 n''$ , а  $E = E_0 e^{i(kr - \omega t)} = E_0 e^{-k_0 n'' r} e^{i(n' k_0 r - \omega t)}$ , и, наконец, интенсивность  $I = E^2 = E_0^2 e^{-2k_0 n'' r} e^{2i(n' k_0 r - \omega t)}$  – т.е. если  $k_0 n'' = \alpha / 2$ , то

интенсивность убывает по закону Бугера. Но здесь мы опять предполагаем, что показатель преломления не зависит от интенсивности, т.е. без нелинейных эффектов. Таким образом этот коэффициент поглощения  $\alpha$  не предполагает зависимости от интенсивности света, а зависимость  $\alpha$  от длины волны – это достаточно известная V-образная кривая, левая часть которой связана с электронным поглощением, а правая часть с молекулярным (с колебательными и вращательными степенями свободы), причем энергия квантов света для электронного поглощения – единицы эВ, для молекулярного поглощения связанная с колебательными степенями свободы – сотые эВ, а для поглощения связанного с вращательными степенями свободы молекул  $\sim 10^{-4}$  эВ. Например, в световодах для минимальных потерь передачи выбирается длина волны, на которой  $\alpha(\omega)$  минимально.

Действительный и комплексный показатель преломления, как и диэлектрическая проницаемость, связаны между собой. Есть известные соотношения Крамерса – Кронига:

$$\varepsilon'(\omega) = 1 + \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\varepsilon''(x) dx}{x - \omega} \quad \text{и} \quad \varepsilon''(\omega) = \frac{-1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\varepsilon'(x) - 1}{x - \omega} dx,$$

которые связывают действительную и мнимую часть диэлектрической проницаемости, однако это тоже линейный случай, т.е. тоже без нелинейных эффектов. В присутствии нелинейных эффектов комплексная диэлектрическая проницаемость и, соответственно, коэффициент поглощения будут другие, будут возникать эффекты насыщения, если интенсивность света большая, а также волновые эффекты из-за повышенного показателя преломления, вызванного пучком света (как правило, в сильно нелинейных средах с большим нелинейным показателем преломления), о чем речь пойдет ниже.

### Комплексный угол преломления

Рассмотрим для начала случай, когда из среды с большим показателем преломления (например, из воды) под углом, большим, чем угол полного внутреннего отражения (например,  $85^\circ$ ), идет волна в среду с меньшим показателем преломления (например, в воздух). Показатель преломления воды  $n_1 = 1,33$ , а воздуха  $n_2 = 1$ , как на рис. 2. И будем искать угол преломления, т.е.  $\theta_1 = 85^\circ$ , а нужно найти угол  $\theta_2$ . Затем рассмотрим еще коэффициент отражения.

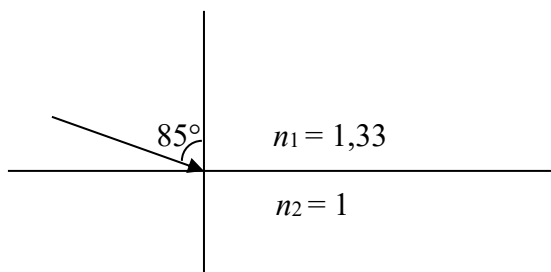


Рис. 2. Угол, больший угла полного внутреннего отражения

Согласно закону Снеллиуса,  $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ , т.е.  $\sin \theta_2 = 1,32$ , это будет означать, что угол  $\theta_2$  – комплексный, поясним, что это значит:

$$\cos \theta_2 = \sqrt{1 - (\sin \theta_2)^2} = 0,86i.$$

Тогда для поля волны мы имеем:

$$\begin{aligned} E &= E_0 e^{i(kr - \omega t)} = E_0 e^{i(k_y^* y \cos \theta_2 + k_x^* x \sin \theta_2 - \omega t)} = E_0 e^{i(0,86i^* y k_y + 1,32 x k_x - \omega t)} = \\ &= E_0 e^{-0,86 y k_y} e^{i(1,32 x k_x - \omega t)}, \end{aligned}$$

т.е. будут возникать затухающие (эванесцентные) моды. Эти затухающие моды не связаны с поглощением  $\alpha$  за счет электронного или молекулярного поглощения в веществе, этот эффект связан с появлением границы раздела, где по одну сторону от нее больший, а по другую меньший показатель преломления.

Теперь рассмотрим, что при этом будет с коэффициентом отражения. Согласно формулам Френеля, коэффициенты отражения для поляризаций [7]:

$$\begin{aligned} R_{TE} &= \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} = \frac{n_1 \cos \theta_1 - \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1}}{n_1 \cos \theta_1 + \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1}}, \\ R_{TM} &= \frac{n_2 \cos \theta_1 - n_1 \cos \theta_2}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2} = \frac{n_2^2 \cos \theta_1 - n_1 \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1}}{n_2^2 \cos \theta_1 + n_1 \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1}}. \end{aligned}$$

Если  $\cos \theta_2 = 0,86i$ , то коэффициент отражения будет комплексным. Если  $I = E^2$ , то рассмотрим:

$$RI = R_0 e^{i\varphi} E_0^2 e^{2i(kr - \omega t)} = R_0 E_0^2 e^{i(\varphi + 2kr - 2\omega t)} = R_0 E_0^2 e^{-1,72, yk_y} e^{i(\varphi + 2,64xk_x - 2\omega t)}.$$

Мы будем наблюдать дополнительное затухание и изменение фазы волны, т.е. затухание, связанное с границей раздела, – это волновой эффект. Таким же образом работают слоистые структуры, например SESAM, при их использовании в качестве затвора для генерации лазерных импульсов [8].

### Поглощение при нелинейных эффектах, затухающие моды

При рассмотрении нелинейных эффектов, когда  $n = n_1 + n_2 I$ , например, в материалах с большим нелинейным показателем преломления или при достаточно высокой интенсивности, когда  $n_2 I$  будет существенно влиять, т.е. будут наблюдаться нелинейные эффекты, такие как самофокусировка, будет возникать волноводная область с повышенным показателем преломления.

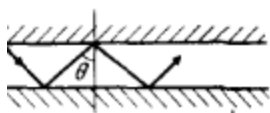


Рис. 3. Волновод и угол большой угла полного внутреннего отражения

Если рассмотреть в волноводной области лучи, идущие под углом, большим угла полного внутреннего отражения, т.е., например, моды высших порядков, то мы будем получать затухающие (эванесцентные) моды вне волноводной области, которые известны всем специалистам по волноводам.

Поэтому толщина оболочки, которая имеет меньший показатель преломления по сравнению с сердцевиной, выбирается равной  $3/\alpha$ . Итак, из вышеизложенного следует, что при нелинейных эффектах, когда  $n = n_1 + n_2 I$ , образуется область (в области пучка света) с повышенным показателем преломления, которая образует волновод, и образуется граница раздела между областями с большим и меньшим показателем преломления для лучей света, распространяющихся под углом, большим угла полного внутреннего отражения (например, для волноводных мод высших порядков), будут возникать затухающие моды вне волноводной области, что будет увеличивать затухание волны, – этот эффект является волновым эффектом и не связан с поглощением  $\alpha$  в веществе за счет электронного или молекулярного поглощения.

Также при больших интенсивностях, сравнимых с  $I_s = hv/\sigma_{gs}$ , где  $\sigma_{gs}$  – сечение поглощения, будет наблюдаться насыщение поглощения и  $\alpha(I) = \alpha_0/(1 + I/I_s)$ . На этом эффекте также можно сделать затвор для генерации лазерных импульсов.

## Заключение

В заключении мы имеем: действительную часть показателя преломления можно описать метрическим тензором (и массой – константой  $m$ ), если ввести комплексный метрический тензор (или комплексную диэлектрическую проницаемость), то мнимая часть не будет искривлять пространство-время (и не будет описываться массой  $m$ ). Однако при нелинейных эффектах будет возникать дополнительное затухание из-за волновых эффектов, связанное с образующейся границей раздела между областями с большим и меньшим показателем преломления: если  $n = n_1 + n_2 I$ , образуется область (в области пучка света) с повышенным показателем преломления, которая образует волновод. Для лучей света, распространяющихся в волноводной области под углом, большим угла полного внутреннего отражения (например, для волноводных мод высших порядков), будут возникать эванесцентные моды вне волноводной области, соответственно, будет возникать дополнительное затухание, не связанное с поглощением вещества  $\alpha$  (ни с электронным, ни с молекулярным), т.е. коэффициент поглощения при нелинейных эффектах будет другим из-за появления границы и волновых эффектов. Также при высокой интенсивности будет происходить насыщение поглощения.

## Список литературы

1. Якушенков, П.О. Самофокусировка излучения, как коллапс волнового вектора / П.О. Якушенков // Прикладная фотоника. – 2023. – Т. 10, № 3. – С. 74–81.
2. Lorentz-invariant mass and entanglement of biphoton states / S.V. Vintskevich [et. al.] // Laser Phys. Lett. – 2019. – 16 065203.
3. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика. Теория поля. Т. 2 / Л.Д. Ландау, Е.М. Лившиц. – М.: Наука, 1988. – 509 с.
4. Сивухин, Д.В. Общий курс физики: в 5 т. Т. IV. Оптика / Д.В. Сивухин. – М.: Физматлит; Изд-во МФТИ, 2004.
5. Якушенков, П.О. Диэлектрическая проницаемость с точки зрения ОТО / П.О. Якушенков // VIII Междунар. конф. по фотонике и информационной оптике: сб. науч. тр. – М., 2019.
6. Вергелес, С.С. Электродинамика сплошных сред, отдельные вопросы / С.С. Вергелес. – М.: Изд-во МФТИ, 2016. – 38 с.
7. Хансперджер, Р. Интегральная оптика / Р. Хансперджер. – М.: МИР, 1985; Hunsperger, R.G. Integrated Optics: Theory and Technology / R.G. Hunsperger. – Springer, 2009.

8. Якушенков, П.О. Метод расчёта слоистых структур типа SESAM для скрипта программы моделирования / П.О. Якушенков // Материалы XII Международн. конф. по фотонике и информационной оптике. – М., 2023. – С. 530–532.

### References

1. Yakushenkov P.O. Samofokusirovka izlucheniia, kak kollaps volnovogo vektora [Self-focusing, as the collapse of the wave vector]. *Applied Photonics*, 2023, vol. 10, no. 3, pp. 74–81.

2. Vintskevich S.V. et. al. Lorentz-invariant mass and entanglement of biphoton states. *Laser Phys. Lett.*, 2019, vol. 16, no. 6, p. 065203.

3. Landau L.D., E.M. Livshits Teoreticheskaia fizika. Teoriia polia. Tom 2. Moscow: Nauka, 1988, 509 p.

4. Sivukhin D.V. Obshchii kurs fiziki. Tom IV. Optika. Moscow: Fizmatlit, 2004.

5. Iakushenkov P.O. Dielektricheskaia pronitsaemost' s tochki zreniia OTO [Dielectric constant from the point of view of general relativity]. Sbornik trudov VIII Mezhdunarodnoi konferentsii po fotonike i informatsionnoi optike, 2019.

6. Vergeles S.S. Elektodinamika sploshnykh sred, ot del'nye voprosy. Moscow: Moskovskii fiziko-tehnicheskii institut, 2016, 38 p.

7. Hunsperger R.G. Integrated Optics: Theory and Technology. Springer, 2009.

8. Iakushenkov P.O. Metod rascheta sloistykh struktur tipa SESAM dlia skripta programmy modelirovaniia [Method for calculating layered structures of the SESAME type for the script of the modeling program]. Materialy XII Mezhdunarodnoj konferentsii po fotonike i informatsionnoi optike, 2023, pp. 530–532.

#### Сведения об авторе

**ЯКУШЕНКОВ П.О.**

*e-mail: loss24680@yandex.ru*

Младший научный сотрудник, Физический институт академии наук (г. Москва, Российская Федерация).

#### About the author

**YAKUSHENKOV P.O.**

*e-mail: loss24680@yandex.ru*

Junior Research Fellow, Physical Institute of the Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation).

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад автора** 100 %.



**Получена:** 26.04.2024

**Одобрена:** 29.04.2024

**Принята к публикации:** 30.04.2024

**Financing.** The study was not sponsored.

**Conflict of Interest.** The authors declare no conflict of interest.

**The authors' contribution is equal.**

**Received:** 26/04/2024

**Approved:** 29/04/2024

**Accepted for publication:** 30/04/2024

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Якушников, П.О. Комплексный показатель преломления при нелинейных эффектах / П.О. Якушников // Прикладная фотоника. – 2024. – Т. 11, № 2. – С. 49–57.

Please cite this article in English as: Yakushnikov P.O. Complex refractive index with the presence of nonlinear effects. *Applied photonics*, 2024, vol. 11, no. 2, pp. 49-57.

УДК 538.975

**А.А. Ольхова, А.А. Патрикеева, М.А. Бутяева,  
П.П. Омельченко, Б.К. Шульга, М.М. Сергеев**

Национальный исследовательский университет ИТМО,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

## **ЛАЗЕРНАЯ МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ И ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДВУХСЛОЙНЫХ ПЛЕНОК AG-PBSE**

Рассмотрена модификация структуры и оптических свойств двухслойных пленок серебро-селенид свинца (Ag-PbSe) в результате воздействия лазерными наносекундными импульсами ближнего ИК-излучения в режиме сканирования. Выявлено формирование микроразмерных фрагментов и наночастиц серебра в результате лазерного облучения, а также их влияние на спектральное пропускание и отражение пленки. Показано, что наличие слоя серебра на пленке PbSe является эффективным способом для улучшения оптических характеристик материала, что расширяет область возможного применения халькогенидных пленок данного состава.

**Ключевые слова:** халькогенидные плёнки, селенид свинца, наночастицы серебра, лазерное воздействие, структурирование поверхности, наносекундные лазерные импульсы.

**A.A. Olkhova, A.A. Patrikeeva, M.A. Butyaeva,  
P.P. Omelchenko, B.K. Shulga, M.M. Sergeev**

National Research University ITMO, St. Petersburg, Russian Federation

## **STRUCTURE AND OPTICAL PROPERTIES LASER MODIFICATION OF THE AG-PBSE FILMS**

The modification of the structure and optical properties of two-layer silver-lead selenide (Ag-PbSe) films because of exposure to laser nanosecond pulses of near-infrared radiation in the scanning mode is considered. The formation of micro-sized fragments and silver nanoparticles as a result of laser irradiation, as well as their effect on the spectral transmission and reflection of the film, has been revealed. It is shown that the presence of a silver layer on a PbSe film is an effective way to improve the optical characteristics of the material, which expands the scope of possible applications of chalcogenide films of this composition.

**Keywords:** chalcogenide films, silver nanoparticles, laser irradiation, surface structuring, nanosecond laser pulses.

### **Введение**

Халькогенидные пленки селенида свинца являются полупроводниковым материалом с уникальными электрическими и оптическими свойствами [1], что делает его объектом интенсивного изучения в различных областях науки [2] и промышленности [3].

Среди основных преимуществ пленок PbSe стоит отметить их высокую чувствительность к инфракрасному излучению [4], благодаря чему они становятся перспективным материалом для применений в области инфракрасной оптики [5], фотодетекторов [6] и термоэлектрических устройств [7]. Благодаря своим уникальным оптическим свойствам пленки PbSe находят применение в сфере инфракрасной спектроскопии [8], медицинской диагностики [9] и даже в области космических исследований [10].

Предполагается, что нанесение слоя серебра на селенид свинца (PbSe) будет играть ключевую роль в улучшении его электрических характеристик по нескольким причинам:

1. Серебро – металл, поэтому нанесение слоя серебра на поверхность пленки PbSe способствует увеличению электропроводности системы в целом [11].

2. Нанесение слоя серебра может помочь снизить контактное сопротивление между пленкой PbSe и электродом [12], что, в свою очередь, улучшает электрическое соединение и эффективность передачи заряда.

3. Серебро обладает высокой стабильностью и устойчивостью к окислению [13], что способствует его использованию в качестве материала для создания защитного слоя и повышения долговечности пленки PbSe [4].

Последующая лазерная модификация Ag-PbSe позволяет улучшить свойства халькогенидных пленок, включая повышение фоточувствительности [8]. С помощью лазерной обработки можно изменить микроструктуру поверхности пленки, увеличивая поверхностную площадь и обеспечивая лучшее сцепление между пленкой и подложкой. Это позволяет увеличить поглощение инфракрасного излучения и повысить чувствительность детектора [14].

### **Методика лазерной модификации**

Для лазерной модификации структуры пленок Ag-PbSe использовались волоконные импульсные иттербиевые лазеры (рис. 1) с наносекундной длительностью импульсов, частотой их повторения от 2,5 до 100 кГц, длиной волны излучения 1,064 мкм и средней мощностью излучения до 50 Вт. Движение лазерного пятна в плоскости обработки задавалось поворотом зеркал сканирующей гальванометрической системы. После зеркал лазерный пучок фокусировался f-theta линзой в плоскость обработки с полем 100×100 мм до диаметра 50 мкм. Максимальная средняя плотность мощности падающего на пленку излучения

в режиме лазерного воздействия составляла  $2165,6 \text{ кВт/см}^2$  при длительности и частоте следования импульсов от 4 до 20 нс и от 10 до 285 кГц соответственно. Модификация структуры пленок осуществлялась построчным сканированием при скорости движения лазерного пятна от 5 до 200 мм/с.

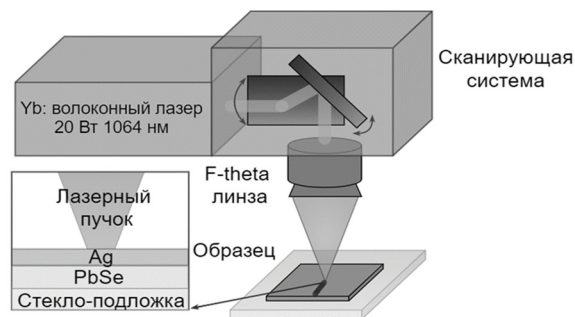


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для лазерной модификации структуры пленок Ag-PbSe с длиной волны излучения 1,064 мкм

Таблица 1

Режимы модификации пленки Ag-PbSe с помощью импульсного лазерного источника с длиной волны 1064 нм

Наименование	$v$ , мм/с	$P_{cp}$ , Вт	$z$ , мм	$f$ , кГц	$t$ , нс	$q_{имп}$ , кВт/см <sup>2</sup>	Перекрытие
Режим 1	200	0,24	4	285	4	670,5	без перекрытия
Режим 2	80	0,46	3	10	8	1144,5	без перекрытия
Режим 3	5	2,72	0	200	20	2165,6	10 л/мм

Здесь  $P_{cp}$  – средняя мощность падающего излучения,  $f$  – частота следования импульсов,  $v$  – скорость сканирования,  $t$  – длительность импульсов,  $z$  – расстояние от фокуса до поверхности образца,  $q_{имп}$  – импульсная плотность мощности лазерного воздействия.

## Методика измерений

### *Измерение оптических характеристик*

Оптическая микроскопия плёнок до и после лазерного воздействия осуществлялась с помощью микроскопа Carl Zeiss Axio Imager (Германия). Исследование проводилось в проходящем и отражённом свете, в светлом и тёмном поле. Для более детального исследования использовалась сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) модифициро-

ванных областей с помощью микроскопа Zeiss Merlin (Германия). Отражение и пропускание плёнок PbSe в диапазоне от 400 до 900 нм измерялись с помощью микроскопа-спектрофотометра МСФУ-К Ю-30.54.072, ЛОМО (Санкт-Петербург, Россия) с минимальной областью регистрации до 1 мкм.

### Исследование оптических характеристик

Подложки были изготовлены из натрий-кальций-силикатного стекла по ГОСТ EN 572-1-2016 и имеют состав, представленный в табл. 2.

Таблица 2

Состав подложки

Компонент	Содержание, %
SiO <sub>2</sub>	69–74
CaO	5–14
Na <sub>2</sub> O	10–16
MgO	0–6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0–3
Содержание других компонентов	0–5

При облучении пленок наибольшие эффекты лазерного воздействия проявляются при выборе длины волны излучения, которая близка к границе собственного поглощения пленок. Излучение, применяемое в исследовании на длине волны 1064 нм, попадает в область собственного поглощения пленок, что приводит к высокому поглощению падающего излучения при отсутствии пропускания.

В начале исследования был проведен анализ структуры исходных пленок Ag-PbSe. По результатам оптический микроскопии исходный образец имел неструктурированную поверхность, при этом сама пленка содержала рассеивающие свет частицы размером около 100 нм (рис. 2, в). Во время формирования слоя Ag на поверхности пленок PbSe происходило образование неоднородностей, в результате формирования которых возникли нескомпенсированные напряжения, приводящие к образованию трещин на поверхности пленки PbSe после лазерной модификации.

По результатам FESEM-EDX атомный вес серебра в исходной пленке Ag-PbSe составлял 17,02 % (рис. 3), при этом пленка не содержала дополнительных примесей и пики составных элементов образца были достаточно выражены.

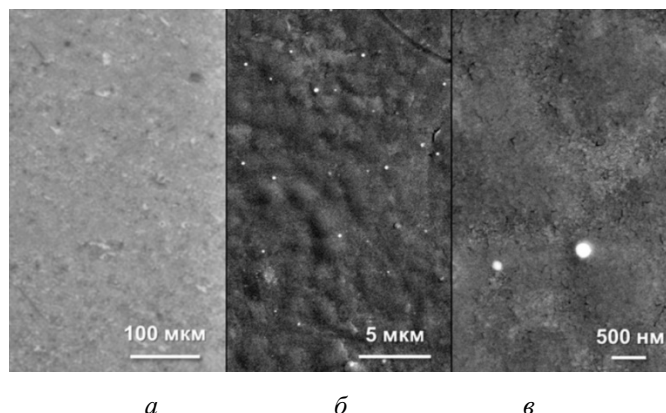


Рис. 2. Вид пленки Ag-PbSe до модификации, полученный с помощью оптической микроскопии в отраженном свете светлого поля (а) и с помощью детектора вторичных электронов СЭМ (б, в)

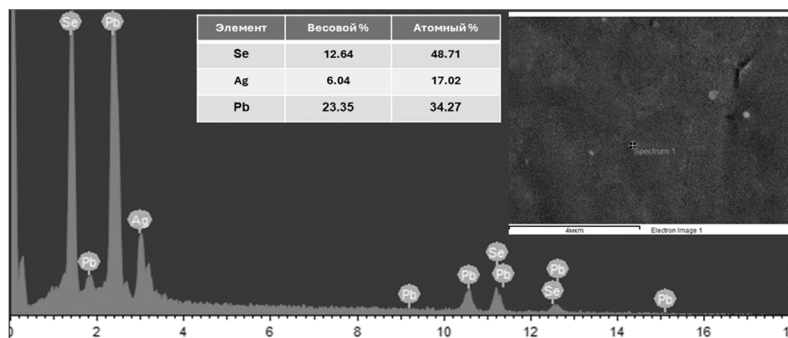


Рис. 3. Изображение FESEM-EDX пленки Ag-PbSe до модификации

При лазерном воздействии в режимах 1–2 наблюдалось появление первичной модификации (рис. 4 и 6). Фототермическое воздействие приводило к термоуплотнению и рекристаллизации [15]. При нагреве образца материал пленки размягчался, в том числе происходило размягчение поверхностной пленки Ag с внедрением частиц в матрицу PbSe [16]. Вследствие резкого нагревания/охлаждения материала образца происходило формирование нескомпенсированных напряжений, что приводило к образованию микротрещин в зоне лазерного воздействия. В результате увеличения плотности мощности лазерного воздействия более интенсивное формирование микротрещин можно наблюдать при обработки пленки в режиме 2.

Изображение FESEM пленок до и после лазерной обработки в режимах 1–2, показано на рис. 5 и 7, отсутствие дополнительных

химических элементов в составе образца свидетельствует о том, что процесс лазерной модификации не сопровождался истончением образца. Лазерная модификация пленки в режиме 1 приводила к уменьшению атомной концентрации серебра на 7,56 % по сравнению с исходной пленкой. Воздействие лазерного излучения на образец в режиме 2 приводило к полному удалению Ag с поверхности пленки Ag-PbSe. Таким образом фототермическая обработка образцов с помощью импульсного излучения на длине волны 1064 нм может приводить к неконтролируемому изменению концентрации серебра на поверхности образца, при этом увеличение плотности мощности лазерного воздействия приводит к уменьшению концентрации Ag вплоть до полного удаления с поверхности образца.

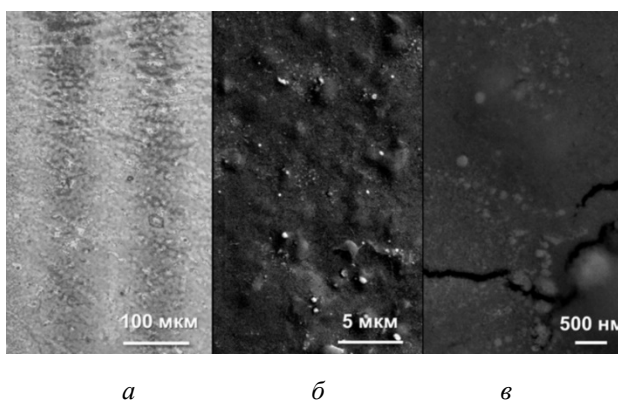


Рис. 4. Вид пленки Ag-PbSe после модификации в режиме № 1, полученный с помощью оптической микроскопии в отраженном свете светлого поля (а) и с помощью детектора вторичных электронов СЭМ (б, в)

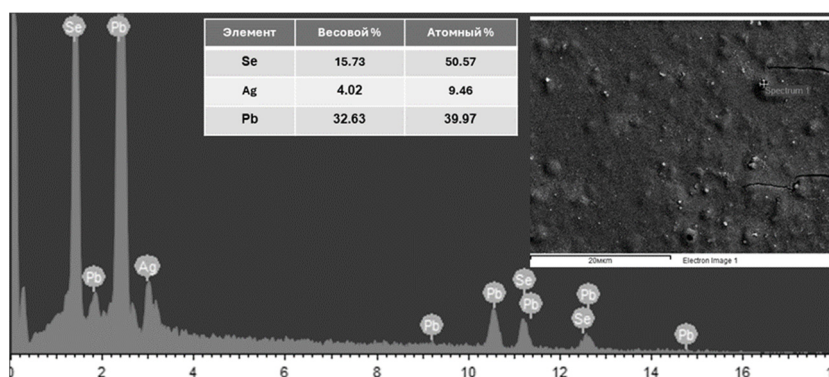


Рис. 5. Изображение FESEM-EDX Ag-PbSe после модификации в режиме № 1

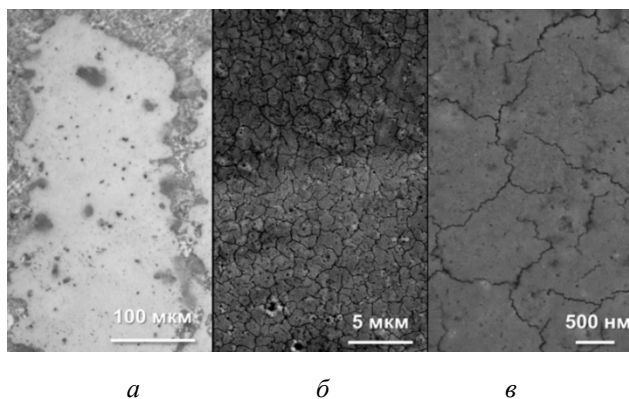


Рис. 6. Вид пленки Ag-PbSe после модификации в режиме № 2, полученный с помощью оптической микроскопии в отраженном свете светлого поля (а) и с помощью детектора вторичных электронов СЭМ (б, в)

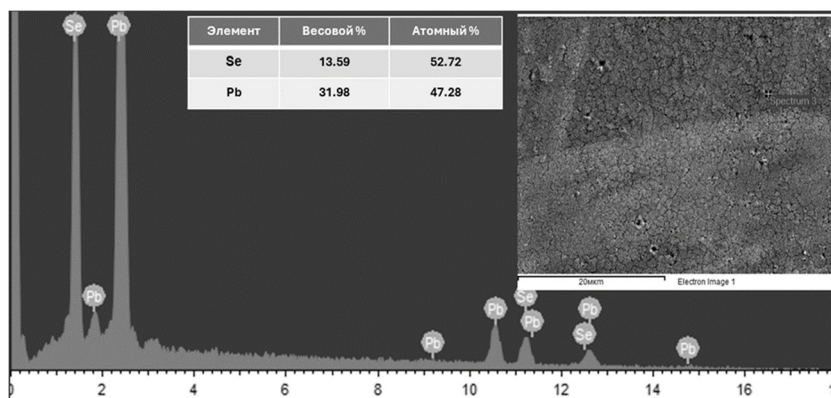


Рис. 7. Изображение FESEM-EDX Ag-PbSe после модификации в режиме № 2

Повышение плотности мощности лазерного воздействия относительно режимов 1 и 2 приводило к модификации структуры пленки (рис. 8), при которой лазерное излучение способствовало локальному нагреву поверхности пленки серебра. Таким образом лазерная обработка в режиме 3 приводила к агломерации и фрагментации металлических частиц, в результате этого процесса образовывались наночастицы серебра с различными размерами и структурами.

Стоит отметить, что лазерная модификация образца в режимах 1–3 не приводила к разрушениям в области сканирования и не изменяла свойства исходной пленки между треками, но вызывала плавление и способствовала перераспределению расплавленного материала.



Также по СЭМ изображениям пленок Ag-PbSe, обработанных в режиме 3, в зоне лазерного воздействия можно наблюдать наличие темных и светлых гребней, характеризующихся различной плотностью материала. Более плотные светлые гребни формировались за счет перераспределения материала и обеднения соседней темной области трека, которая была менее плотной.

Изображение FESEM-EDX пленок до и после лазерной обработки в режимах 4 показано на рис. 9. Наличие в пленке элементов, характерных для покровного стекла подложки, свидетельствует об истончении пленки в области сканирования лазерным пятном. Также наличие в составе пленке составных элементов подложки может быть следствием их диффузии из подложки в пленку. При этом лазерная обработка в режиме 3 так же, как и в режиме 2, приводила к полному удалению пленки Ag с поверхности PbSe.

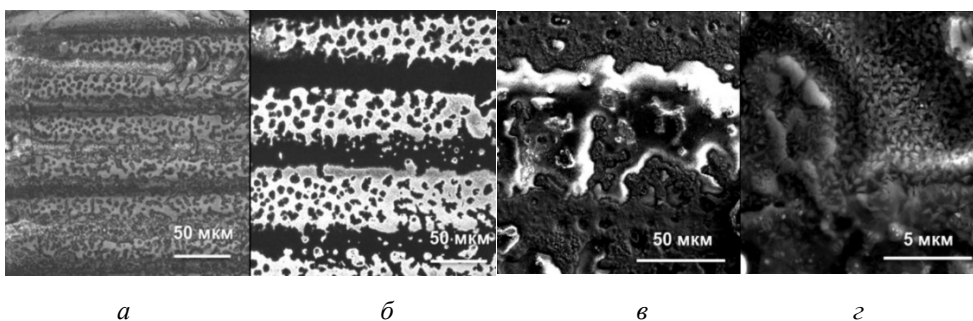


Рис. 8. Вид пленки Ag-PbSe после модификации в режиме № 3, полученный с помощью оптической микроскопии в отраженном свете светлого поля (а, б) и с помощью детектора вторичных электронов СЭМ (в, г)

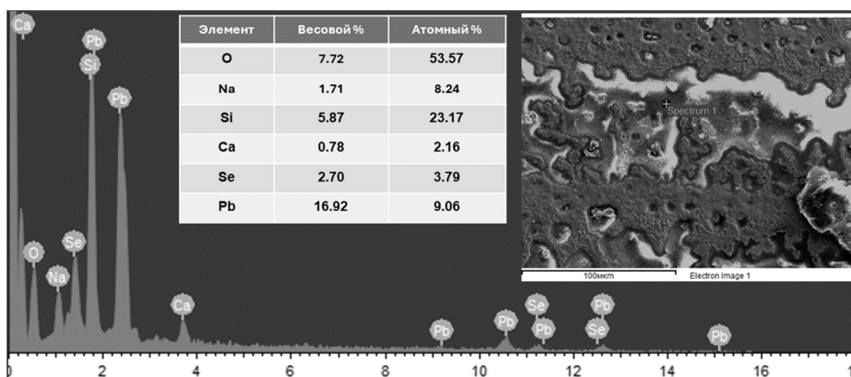


Рис. 9. Изображение FESEM-EDX пленок Ag-PbSe после модификации в режиме № 3

Ниже представлены спектры отражения (рис. 10) пленок в видимом диапазоне спектра для образцов, прошедших различные виды обработки. Наименьшим отражением, практически во всем измеряемом диапазоне длин волн, обладали образцы, подвергшиеся лазерной модификации в режиме 1–2. При этом отражение пленки Ag-PbSe после обработки в режиме 1 снижалось на 15–28 % и не превышало 5 %, а после модификации в режиме 2 отражение достигало 2–5 %. В случае повышения плотности мощности лазерного воздействия на пленки снижение отражения наблюдалось на 6–13 %, однако лазерная модификация в режиме 3 также приводила к наибольшему росту пропускания практически во всем измеряемом спектральном диапазоне, пропускание составляло 15–20 %. Данная тенденция может быть связана с истончением пленки и частичной абляцией материала. При обработке в режимах 1–2 был использован менее разрушающий режим, вследствие чего пленка после модификации имела коэффициент пропускания, близкий к нулевому. Таким образом, наилучший результат был достигнут при лазерной обработке в режимах 1–2.

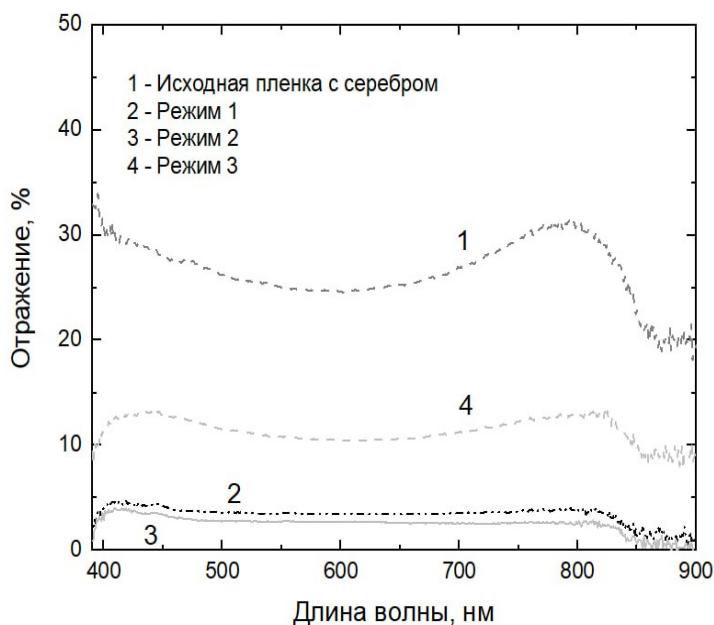


Рис. 10. Спектры отражения, полученные для исходного образца, образца Ag-PbSe и образцов Ag-PbSe после лазерной модификации в режимах 1–3

## Заключение

Сравнены режимы 1–3 модификации оптических свойств пленок Ag-PbSe.

Использование импульсного лазерного источника небольшой мощности (до 25 мВт) является перспективным подходом для точной модификации полупроводниковых пленок. Контролируемая температура обработки минимизирует тепловое воздействие и позволяет создавать микро- и наноструктуры с высокой пространственной разрешающей способностью до 100 лин/мм. Такой подход имеет большой потенциал для применения в области разработки новых устройств и технологий, требующих высокой точности и надежности при модификации полупроводниковых пленок.

Следует отметить, что наибольшее снижения отражения было достигнуто в режимах 1–2, что свидетельствует о лучшей применимости в устройствах фотодетекторов. При модификации в режиме 3 отмечено не столь сильное снижение отражения, как в режимах 1–2, при этом зафиксирован наибольший рост пропускания в видимой области спектра, что связано с частичной абляцией образца. Таким образом, наилучший результат оптической модификации был достигнут при лазерной обработке в режимах 1–2.

Было показано, что нанесение пленки серебра на поверхность PbSe является эффективным способом для улучшения его оптических характеристик и расширения спектра потенциального применения этого материала в различных технологических областях.

## Список литературы

1. Optoelectronic properties of PbSe monolayers from first-principles / B.U. Haq [et al.] // Applied Surface Science. – 2020. – Vol. 525. – P. 146521.
2. Grayer, J. Embedded surface plasmon resonant disc arrays for improved MWIR sensitivity and increased operating temperature of PbSe photoconductive detectors / J. Grayer, S. Ganguly, S.S. Yoo // Plasmonics: Design, Materials, Fabrication, Characterization, and Applications XVII. – International Society for Optics and Photonics. – 2019. – Vol. 11082. – P. 1108224.
3. Responsivity enhancement of mid-infrared PbSe detectors using CaF<sub>2</sub> nano-structured antireflective coatings / B. Weng [et al.] // Applied Physics Letters. – 2014. – Vol. 104, no. 2. – P. 021109.

4. Gupta, M.C. Photoconductive PbSe thin films for infrared imaging / M.C. Gupta, J.T. Harrison, M.T. Islam // *Materials Advances*. – 2021. – Vol. 2, no. 10. – P. 3133–3160.
5. Third-order nonlinear optical properties of infrared emitting PbS and PbSe quantum dots / D. Wawrzynczyk [et al.] // *The Journal of Physical Chemistry C*. – 2016. – Vol. 120, no. 38. – P. 21939–21945.
6. Infrared detectors based on semiconductor p-n junction of PbSe / V. Kasiyan [et al.]. – 2012.
7. Thermoelectric prospects of chemically deposited PbSe and SnSe thin films / P.K. Nair [et al.] // *Semiconductor Science and Technology*. – 2018. – Vol. 33, no. 3. – P. 035004.
8. Properties of chemical bath deposited and sensitized PbSe thin films for IR detection / M.H. Jang [et al.] // *Semiconductor Science and Technology*. – 2019. – Vol. 34, no. 11. – P. 115010.
9. McDowell, L.L. CdSe/PbSe high-temperature mid-infrared heterostructure photovoltaic photodetector / L.L. McDowell, M.R. Mirzaei, Z. Shi // *Terahertz, RF, Millimeter, and Submillimeter-Wave Technology and Applications XVI*. – SPIE, 2023. – C. PC124200K.
10. Tribological properties and bearing application of Mo-based films in space environment / J. Shi [et al.] // *Vacuum*. – 2021. – Vol. 188. – P. 110217.
11. Charge transport modulation in PbSe nanocrystal solids by Au x Ag<sub>1-x</sub> nanoparticle doping / H. Yang [et al.] // *ACS nano*. – 2018. – Vol. 12, no. 9. – P. 9091–9100.
12. Mid-wavelength infrared photo response and band alignment for sensitized PbSe thin films / M.H. Jang [et al.] // *Journal of Applied Physics*. – 2019. – Vol. 126, no. 10.
13. Oxidation-resistant silver nanostructures for ultrastable plasmonic applications / R. Sachan [et al.] // *Advanced Materials*. – 2013. – Vol. 25, no. 14. – P. 2045–2050.
14. Ahmed, R. Mid-infrared photoresponse of electrodeposited PbSe thin films by laser processing and sensitization / R. Ahmed, M.C. Gupta // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2020. – Vol. 134. – P. 106299.
15. Pulsed laser annealing of thin films of self-assembled nanocrystals / W.J. Baumgardner [et al.] // *ACS nano*. – 2011. – Vol. 5, no. 9. – P. 7010–7019.
16. Al-Ghamdi, A.A. Structural, optical and electrical characterization of Ag doped lead chalcogenide (PbSe) thin films / A.A. Al-Ghamdi, S. Al-Heniti, S.A. Khan // *Journal of luminescence*. – 2013. – Vol. 135. – P. 295–300.

## References

1. Haq B.U. et al. Optoelectronic properties of PbSe monolayers from first-principles. *Applied Surface Science*, 2020, vol. 525, p. 146521.
2. Grayer J., Ganguly S., Yoo S.S. Embedded surface plasmon resonant disc arrays for improved MWIR sensitivity and increased operating temperature of PbSe photoconductive detectors. *Plasmonics: Design, Materials, Fabrication, Characterization, and Applications XVII. International Society for Optics and Photonics*, 2019, vol. 11082, p. 1108224.
3. Weng B. et al. Responsivity enhancement of mid-infrared PbSe detectors using CaF<sub>2</sub> nano-structured antireflective coatings. *Applied Physics Letters*, 2014, vol. 104, no. 2, p. 021109.
4. Gupta M.C., Harrison J.T., Islam M.T. Photoconductive PbSe thin films for infrared imaging. *Materials Advances*, 2021, vol. 2, no. 10, pp. 3133-3160.
5. Wawrzynczyk D. et al. Third-order nonlinear optical properties of infrared emitting PbS and PbSe quantum dots. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2016, vol. 120, no. 38, pp. 21939-21945.
6. Kasiyan V. et al. Infrared detectors based on semiconductor p-n junction of PbSe. *Journal of Applied Physics*, 2012, vol. 112, no. 8.
7. Nair P.K. et al. Thermoelectric prospects of chemically deposited PbSe and SnSe thin films. *Semiconductor Science and Technology*, 2018, vol. 33, no. 3, p. 035004.
8. Jang M.H. et al. Properties of chemical bath deposited and sensitized PbSe thin films for IR detection. *Semiconductor Science and Technology*, 2019, vol. 34, no. 11, p. 115010.
9. McDowell L.L., Mirzaei M.R., Shi Z. CdSe/PbSe high-temperature mid-infrared heterostructure photovoltaic photodetector. *Terahertz, RF, Millimeter, and Submillimeter-Wave Technology and Applications XVI. SPIE*, 2023, p. PC124200K.
10. Shi J. et al. Tribological properties and bearing application of Mo-based films in space environment. *Vacuum*, 2021, vol. 188, p. 110217.
11. Yang H. et al. Charge transport modulation in PbSe nanocrystal solids by Au<sub>x</sub>Ag<sub>1-x</sub> nanoparticle doping. *ACS Nano*, 2018, vol. 12, no. 9, pp. 9091-9100.
12. Jang M.H. et al. Mid-wavelength infrared photo response and band alignment for sensitized PbSe thin films. *Journal of Applied Physics*, 2019, vol. 126, no. 10.
13. Sachan R. et al. Oxidation-resistant silver nanostructures for ultrastable plasmonic applications. *Advanced Materials*, 2013, vol. 25, no. 14, pp. 2045-2050.
14. Ahmed R., Gupta M.C. Mid-infrared photoresponse of electrodeposited PbSe thin films by laser processing and sensitization. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, vol. 134, p. 106299.
15. Baumgardner W.J. et al. Pulsed laser annealing of thin films of self-assembled nanocrystals. *ACS Nano*, 2011, vol. 5, no. 9, pp. 7010-7019.

16. Al-Ghamdi A.A., Al-Heniti S., Khan S.A. Structural, optical and electrical characterization of Ag doped lead chalcogenide (PbSe) thin films. *Journal of Luminescence*, 2013, vol. 135, pp. 295-300.

#### **Сведения об авторах**

##### **ОЛЬХОВА А.А.**

*e-mail: olkhova.a.a@mail.ru*

Аспирантка, младший научный сотрудник Международной лаборатории лазерных микро- и нанотехнологий, Национальный исследовательский университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; <http://orcid.org/0000-0001-9048-3031>

##### **ПАТРИКЕЕВА А.А.**

*e-mail: patrikeeva17@gmail.com*

инженер Международной лаборатории лазерных микро- и нанотехнологий, Национальный исследовательский университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; <http://orcid.org/0000-0002-5274-9692>

##### **БУТЯЕВА М.А.**

*e-mail: maria.dubkova@mail.ru*

Инженер Международной лаборатории лазерных микро- и нанотехнологий, Национальный исследовательский университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; <http://orcid.org/0000-0003-3251-6602>

##### **ОМЕЛЬЧЕНКО П.П.**

*e-mail: 336882@niuitmo.ru*

Лаборант Международной лаборатории лазерных микро- и нанотехнологий, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; <https://orcid.org/0009-0004-5438-3761>

#### **About the authors**

##### **A.A. OLKHOVA**

*e-mail: olkhova.a.a@mail.ru*

Phd Student, Junior Researcher in International Laboratory "Laser Micro- and Nanotechnologies", ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russia, <http://orcid.org/0000-0001-9048-3031>

##### **A.A. PATRIKEEVA**

*e-mail: patrikeeva17@gmail.com*

Engineer in International Laboratory "Laser Micro- and Nanotechnologies", ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russia, <http://orcid.org/0000-0002-5274-9692>

##### **M.A. BUTYAEVA**

*e-mail: maria.dubkova@mail.ru*

Engineer in International Laboratory "Laser Micro- and Nanotechnologies", ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russia; <http://orcid.org/0000-0003-3251-6602>

##### **P.P. OMELCHENKO**

*e-mail: 336882@niuitmo.ru*

laboratory assistant in International Laboratory "Laser Micro- and Nanotechnologies", ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russia; <https://orcid.org/0009-0004-5438-3761>

**ШУЛЬГА Б.Г.**

*e-mail: swim-12@mail.ru*

Бакалавр, Университет ИТМО, 197101,  
Санкт-Петербург, Россия;  
<https://orcid.org/0009-0001-6603-4102>

**B.G. SHULGA**

*e-mail: swim-12@mail.ru*

bachelor student, ITMO University, 197101,  
Saint-Petersburg, Russia; <https://orcid.org/0009-0001-6603-4102>

**СЕРГЕЕВ М.М.**

*e-mail: maxim.m.sergeev@gmail.com*

Доцент Международной лаборатории  
лазерных микро- и нанотехнологий,  
Университет ИТМО, 197101, Санкт-  
Петербург, Россия; Scopus ID:  
55624732300, <http://orcid.org/0000-0003-2854-9954>

**M.M. SERGEEV**

*e-mail: maxim.m.sergeev@gmail.com*

Docent in International Laboratory "Laser  
Micro- and Nanotechnologies", ITMO Uni-  
versity, 197101, Saint- Petersburg, Russia;  
Scopus ID: 55624732300, <http://orcid.org/0000-0003-2854-9954>

**Финансирование.** Представленные исследования были выполнены за счёт гранта Российского Научного фонда и гранта Санкт-Петербургского Научного фонда №23-29-10081.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов** равноценный.

**Получена:** 06.05.2024

**Одобрена:** 10.05.2024

**Принята к публикации:** 13.05.2024

**Financing.** the presented research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation and a grant from the St. Petersburg Science Foundation No. 23-29-10081.

**Conflict of Interest.** The authors declare no conflict of interest.

**The contribution of the authors** is equal.

**Received:** 06/05/2024

**Approved:** 10/05/2024

**Accepted for publication:** 13/05/2024

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Лазерная модификация структуры и оптических свойств двухслойных пленок Ag-PbSe / А.А. Ольхова, А.А. Патрикеева, М.А. Бутяева, П.П. Омельченко, Б.К. Шульга, М.М. Сергеев // Прикладная фотоника. – 2024. – Т. 11, № 2. – С. 58–71.

Please cite this article in English as: Olkhova A.A., Patrikeeva A.A., Butyaeva M.A., Omelchenko P.P., Shulga B.K., Sergeev M.M. Structure and optical properties laser modification of the Ag-PbSe films. *Applied photonics*, 2024, vol. 11, no. 2, pp. 58-71.

Научное издание

# ПРИКЛАДНАЯ ФОТОНИКА

---

---

## APPLIED PHOTONICS

Т. 11, № 2

---

Выход в свет 13.06.2024. Формат 70×100/16.  
Усл. печ. л. 10,96. Тираж 21 экз. Заказ № 099.

Свободная цена

---

Издательство Пермского национального  
исследовательского политехнического университета.  
Адрес: 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, к. 113.  
Тел. (342) 219-80-33.

Отпечатано в типографии Издательства  
Пермского национального исследовательского  
политехнического университета.  
Адрес: 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, к. 113.  
Тел. (342) 219-80-33.