DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-1-31-40

# Подходы к снижению потерь на рассеяние излучения в полимерных планарных оптических волноводах

# Т.А. Радзиевская<sup>1, 2\*</sup>, Н.Н. Иванов<sup>3</sup>, С.А. Тарасов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, 197376, Российская Федерация

<sup>2</sup>ОАО «Авангард»,

Санкт-Петербург, 195271, Российская Федерация

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,

Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

\*Адрес для переписки: tamaramanvelova239@mail.ru

#### Информация о статье

Поступила в редакцию 28.10.2020 Принята к публикации 12.01.2021

**Ссылка для цитирования:** Радзиевская Т.А., Иванов Н.Н., Тарасов С.А. Подходы к снижению потерь на рассеяние в полимерных планарных оптических волноводах // Труды учебных заведений связи. 2021. Т. 7. № 1. С. 31–40. DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-1-31-40

Аннотация: В статье рассмотрены перспективы использования полимерных материалов для создания планарных оптических волноводов оптико-электронных шин высокоскоростных систем передачи данных. Выявлены преимущества и недостатки использования неспециализированных полимерных материалов общего применения. Предложены технологии изготовления полимерных планарных оптических волноводов. Определены основные типы потерь в планарных оптических волноводах, причины их возникновения, а также подходы к их сокращению. На примере полимера PDMS и технологии мягкой литографии отмечены критические этапы технологического процесса изготовления полимерных планарных оптических волноводов, которые способствуют возрастанию потерь на рассеяние. Для каждого этапа предложены алгоритмы предотвращения увеличения потерь на рассеяние. Данные алгоритмы были реализованы на практике при изготовлении макетов полимерных планарных оптических волноводов оптико-электронной шины передачи данных.

**Ключевые слова:** полимерные планарные оптические волноводы, оптико-электронная шина передачи данных, мягкая литография, мастер-штамп, PDMS, SU-8, T-topping, адгезия.

#### Введение

С конца XX века динамичный рост объемов информации, передаваемой в единицу времени, определяет необходимость постоянного развития систем передачи данных. До определенного момента лимитирующим фактором создания высокоскоростных систем являлась пропускная способность сетей передачи данных между функциональными блоками системы. Применение оптоволоконных кабелей устранило эту проблему при построении новых высокоскоростных систем передачи данных.

Наряду с этим все чаще возникает обратная ситуация: появляется потребность в разработке новых средств передачи данных внутри функциональных блоков систем передачи данных, ответственных, к примеру, за обработку и маршрутизацию данных. Электрические проводники в таких блоках существенно уступают по пропускной способности оптоволоконным соединениям, создавая эффект «бутылочного горлышка» при высокоскоростной передаче информации [1–2].

Для исключения этого негативного эффекта предлагается заменить медленные электрические межсоединения на оптические проводники [1–2]. Примером такой замены является разработка объединительной платы с встроенной оптико-электронной шиной для функционального блока высокоскоростной системы передачи данных. Исследования в области создания макетов объединительных плат с оптико-электронной шиной передачи данных ведутся как в зарубежных научных лабораториях [3–5], так и в отечественных научных центрах [6].

На данный момент широко распространено употребление оптоволокна для коммутации между модулями отдельного блока системы. Предлагаемое решение – применить оптико-электронную шину передачи данных - рассматривается как более рациональное. На коротких расстояниях «модуль-модуль» внутри отдельного блока системы применение оптоволокна, обладающего малыми потерями на единицы километров, является избыточным. Кроме того, существует перспектива создания полностью оптических блоков системы передачи данных путем масштабирования применения оптикоэлектронных шин с объединительных плат блоков на дочерние платы модулей блоков [1-3, 5, 7-8]. Дочерние оптические платы смогут подключаться посредством специальных оптических разъемов к оптико-электронной шине объединительной платы. Подобная схема коммутации сигнала обеспечит дальнейшее увеличение пропускной способности блока и системы в целом за счет передачи сигнала только по оптическим каналам без повторного преобразования в электрический сигнал и передачи его по медленным электрическим межсоединениям.

# Постановка задачи

Основным недостатком, ограничивающим распространение оптико-электронных шин передачи данных, является высокая величина потерь в оптических волноводах в сравнении с оптоволокном. По этой причине необходимо определить предпосылки к увеличению потерь и предложить методы их снижения для роста востребованности оптикоэлектронных шин передачи данных при создании новых высокоскоростных функциональных блоков систем передачи и обработки данных.

## Оптико-электронная шина передачи данных

Оптико-электронная шина передачи данных – это оптико-электронное устройство, которое встроено в объединительную плату и применяется для коммутации сигналов посредством оптического излучения. По области размещения выделяют оптико-электронные шины, расположенные на поверхности печатной платы и встроенные между ее слоями [3–5, 6]. Второй вариант размещения является более выгодным с точки зрения защиты оптико-электронной шины от внешних воздействий [5].

Как следует из названия, использование оптикоэлектронной шины предусматривает предварительное преобразование сигнала из электрического в оптический с помощью специальных преобразователей [4, 9, 10]. Затем оптический сигнал с помощью устройств ввода/вывода, входящих в состав оптико-электронной шины, передается в массив планарных оптических волноводов. Далее сигнал передается оптическим излучением до необходимого узла на объединительной плате. Затем происходит обратное преобразование сигнала из оптического в электрический и его обработка в функциональном электронном узле, подключенном к объединительной плате [4].

Исходя из области размещения оптико-электронной шины (на поверхности или между слоями объединительной платы), применяют различные устройства ввода/вывода излучения. При расположении на поверхности объединительной платы используют устройства ввода/вывода, обеспечивающие сопряжение «встык» с оптическими волноводами оптико-электронной шины. Напротив, при встраивании между слоями объединительной платы чаще прибегают к развороту оптического излучения на 90° для достижения оптического слоя оптико-электронной шины. Для увеличения эффективности ввода/вывода излучения на торцах оптических волноводов оптико-электронной шины интегрируют 45° микрозеркала, а также применяют массивы микролинз для фокусировки оптического излучения при его выходе из устройства ввода/вывода излучения [9, 10].

Основным функциональным элементом оптикоэлектронной шины является массив планарных оптических волноводов. Как и электрические проводники, планарные оптические волноводы формируются на печатном основании и призваны коммутировать сигналы по объединительной плате. Топология планарных оптических волноводов, по аналогии с электрическими проводниками, определяется схемой (оптических в случае оптических межсоединений) соединений объединительной платы.

Главным отличием планарных оптических волноводов от электрических проводников является возможность передачи сигнала посредством оптического излучения, обеспечивающего более высокую пропускную способность межсоединений (до десятков Гбит/с [11] или даже до 1 Тбит/с [4]) и другие преимущества [1, 4], определяемые оптической природой передаваемого сигнала.

Планарные оптические волноводы – это устройства для передачи сигнала в виде оптического излучения. В основе функционирования планарных оптических волноводов лежит принцип полного внутреннего отражения оптического излучения на границе двух элементов оптического волновода: сердцевины и оболочки. Сердцевина оптического волновода изготавливается из материала, оптически прозрачного на определенной длине волны оптического излучения. По сердцевине оптического волновода осуществляется передача оптического сигнала за счет полного внутреннего отражения на границе с оболочкой оптического волновода. Оболочка также обеспечивает защиту сердцевины оптического волновода от внешних воздействий.

В зависимости от поперечного сечения сердцевины выделяют типы оптических волноводов. Цилиндрическая форма сердцевины соответствует оптоволоконным волноводам, плоское планарное сечение с отсутствующими боковыми слоями оболочки оптического волновода – планарным оптическим волноводам (оптический слой), а прямоугольное сечение – канальным (микрополосковым) оптическим волноводам.

Важно отметить, что существует расхождение в терминологии, приведенной в отечественных и зарубежных научных источниках. Термин планарный волновод (*nep. с англ.* planar waveguide) в зарубежной научной литературе [12] используется для определения канальных оптических волноводов, а плоский волновод (*nep. с англ.* slab waveguide) – для планарных волноводов. В связи с этим, здесь и далее в этой статье будем придерживаться зарубежной терминологии при описании оптических волноводов оптико-электронной шины, определяя их как планарные оптические волноводы вместо канальных оптических волноводов.

Рассмотрим упрощенную модель оптико-электронной шины, представленную на рисунке 1.



Рис. 1. Модель оптико-электронной шины передачи данных Fig. 1. Optoelectronic Data Bus Model

На печатном основании макета объединительной платы размещен нижний слой оболочки планарных оптических волноводов. Массив сердцевин оптических волноводов в виде прямых соединений расположен поверх нижнего слоя оболочки. Для ввода излучения выбрано сопряжение «встык» оптоволокна и вертикальных торцов сердцевин планарных оптических волноводов. Верхние и боковые слои оболочки отсутствуют и заменены на воздух окружающей среды, показатель преломления которого также обеспечивает полное внутреннее отражение на границе «сердцевина-окружающая среда». Кроме того, отсутствие верхней оболочки обеспечит контроль качества изготовления сердцевины планарного оптического волновода.

В общем случае выделяют следующие виды потерь сигнала в оптических волноводах [13–15]: потери на поглощение оптического излучения; потери на рассеяние; поляризационные потери; вносимые потери; потери на переходе из элемента ввода/вывода излучения и другие. Потери на поглощение излучения определяются материалом сердцевины и оболочки оптического волновода. Потери на рассеяние излучения подразделяются на потери от примесного и от собственного рассеяния [14–15]. Общей причиной увеличения данного типа потерь является недостаточная отработка технологического процесса формирования оптических волноводов. Поляризационные потери определяются анизотропией оптических свойств материалов и поляризацией проходящего оптического излучения [14]. Вносимые потери являются физической величиной, определяемой как значение затухания мощности оптического излучения, подаваемого на вход планарного оптического волновода [15]. Значения вносимых потерь выделяют из общих суммарных потерь излучения с учетом мощности источника и чувствительности приемника оптического излучения.

Существуют подходы к сокращению каждого типа потерь оптического излучения в планарных оптических волноводах. Так, сокращение потерь на поглощение обеспечивается путем специальной обработки материала сердцевины планарного оптического волновода, которая исключает причину возникновения пиков поглощения оптического излучения на заданной длине волны [15]. Значение поляризационных потерь уменьшается при сокращении внутренних напряжений в материале сердцевины оптического волновода [14]. Величина вносимых потерь, как и потерь на рассеяние излучения нивелируется при условии оптимизации технологии изготовление планарного оптического волновода. Снижение потерь при переходе излучения из оптоволокна достигается за счет соответствия модовой структуры оптоволокна и планарного волновода, а также за счет соответствия показателей преломления и размеров сердцевин [15]. Также можно добиться уменьшения потерь с помощью добавления буферных слоев для согласования показателя преломления на границах сердцевин оптоволокна и планарного оптического волновода. В настоящей статье подробнее будут рассмотрены методы снижения потерь на рассеяние в полимерных планарных оптических волноводах.

## Материалы и технологии изготовления полимерных планарных оптических волноводов

При изготовлении оптических волноводов широко распространено использование полупроводниковых материалов [16]. Полупроводники применяются при создании источников и приемников оптического излучения. Соответственно, при формировании планарных оптических волноводов из полупроводниковых материалов появляется возможность создания интегральных полупроводниковых оптических устройств.

С конца XX века в связи с развитием материаловедения и технологий изготовления изделий интегральной оптики появилась идея создания полимерных интегральных оптических устройств. Преимуществом таких устройств является низкая стоимость изготовления за счет применения широко распространенных технологий микроэлектроники, возможность изготовления гибких интегральнооптических устройств. Другое преимущество употребления полимерных материалов заключается в решении проблемы растрескивания полупроводниковых планарных оптических волноводов под влиянием внешних температурных воздействий при их формировании на печатном основании. Согласно исследованиям [13, 17], величина температурного коэффициента линейного расширения полимерных материалов в большей мере соответствует температурному коэффициенту линейного расширения печатного основания, чем в случае полупроводниковых материалов. Как следствие этого, при внешнем температурном воздействии в полимерных планарных оптических волноводах не возникают избыточные внутренние напряжения, которые свойственны полупроводниковым планарным оптическим волноводам и приводят к увеличению значения потерь сигнала в подобных оптических волноводах, а в предельном случае - к необратимому нарушению целостности сердцевины планарного оптического волновода.

Критичным недостатком применения полимерных материалов при создании планарных оптических волноводов является большая в сравнении с полупроводниками величина удельных потерь оптического излучения. Этот недостаток может быть устранен за счет ограничения области применения полимерных материалов. Так, употребление полимеров подходит под требования, предъявляемые к материалам при создании планарных оптических волноводов оптико-электронных шин передачи данных, расстояние на которых необходима коммутация сигналов на объединительной плате, не превосходит 1 м, а значит, сравнительно большая величина потерь сигнала (доли или единицы дБ/см) не снизит эффективность передачи оптического излучения в полимерных планарных оптических волноводах оптико-электронной шины [13]. В работе [13] представлены результаты анализа величины потерь в полимерных материалах, предусматривающих создание полимерных планарных оптических волноводов.

Наиболее широко распространенной технологией изготовления полимерных планарных оптических волноводов является фотолитография. Выбор подвида фотолитографии определяется, в первую очередь, в зависимости от способности полимерного материала под действием УФ-излучения отверждаться. В случае обеспечения этой возможности элементы полимерных планарных оптических волноводов оптико-электронной шины передачи данных могут быть созданы при помощи прямой литографии.

Примерами таких полимерных материалов являются негативные фоторезисты, которые имеют полимерную основу и возможность УФ-отверждения

[13]. Фоторезист SU-8 [18] обладает возможностью УФ-отверждения, прозрачен в области видимого и инфракрасного спектра оптического излучения и используется при создании полимерных планарных оптических волноводов. Помимо фоторезистов широкого спектра применения при изготовлении планарных оптических волноводов путем прямой литографии могут применяться такие специализированные коммерческие материалы, как ЕроСоге/ЕроСlad и другие [19].

Отсутствие возможности УФ-отверждения требует проведения дополнительных операций, призванных обеспечить формообразование элементов полимерных планарных оптических волноводов. Для этого сначала на поверхности полимера сердцевины оптического волновода при помощи прямой фотолитографии создается маска из фоторезиста. Затем путем дополнительных воздействий, например, травления по фоторезистивной маске, формируется массив сердцевин полимерных планарных оптических волноводов. К подобным технологиям относится безмасочное рисование лазерным пучком по фоторезистивному слою с последующим травлением полимерного слоя по полученной маске.

Кроме микроэлектронных технологий при создании полимерных планарных оптических волноводов оптико-электронной шины передачи данных пригодны более нестандартные технологии, нашедшие свое применение в других областях. Например, можно обнаружить множество общих черт у полимерных микрофлюидных устройств и планарных оптических волноводов. Так, микрофлюидные микроканалы [15] отличаются от планарных (канальных) оптических волноводов лишь отсутствием заполнения канала полимерным материалом. Соответственно, можно сделать вывод, что и материалы, и технологии формирования микроканальных флюидных устройств могут найти применение при создании полимерных планарных оптических волноводов. Подходящими методами формирования являются аддитивные технологии, например, 3D-печать [20], а также большая группа технологий наноимпринтной литографии [21].

Полимерными материалами, наиболее часто употребляемыми в технологии наноимпринтной литографии, являются полиметилметакрилат (PMMA, *аббр. от англ.* Polymethylmethacrylate) и полидиметилсилоксан (PDMS, *аббр. от англ.* Polydimethylsiloxane) [12]. PDMS получил широкое применение среди материалов для изготовления изделий микрофлюидики [15], а также может использоваться при формировании полимерных планарных оптических волноводов. PDMS проявляет различные значения показателя преломления материала в зависимости от условий, в которых было проведено отверждение материала: температура, соотношение компонентов базы полимера и отверждающего агента и другие [22–23]. Это преимущество позволит создать и сердцевину, и оболочку полимерного планарного оптического волновода из одного материала (PDMS), имеющего различные показатели преломления в соответствующих слоях для обеспечения полного внутреннего отражения на их границах. Так будет обеспечено отсутствие предпосылок для возникновения внутренних напряжений в слоях полимерного планарного оптического волновода, так как оптические волноводы будут созданы из одного материала, и, следовательно, будут иметь одинаковые значения температурного коэффициента линейного расширения.

Среди подвидов наноимпринтной литографии в качестве наиболее подходящего выбрана мягкая литография [21]. Ключевым отличием мягкой литографии является использование «мягкого» штампа, изготовленного с помощью оттиска (импринта) «жесткого» мастер-штампа. В качестве материала для его формирования широко применяется фоторезист SU-8, а для мягкого штампа -PDMS. Важным преимуществом мягкой литографии является возможность изготовления полимерных планарных оптических волноводов из неспециализированных полимерных материалов общего применения. Рассмотрим технологический процесс изготовления полимерных планарных оптических волноводов при помощи технологии мягкой литографии с основными характеристиками, представленными в таблице 1.

# ТАБЛИЦА 1. Основные параметры полимерных планарных оптических волноводов

Параметр	Сердцевина/оболочка	Значение
Материал		PDMS
Показатель преломления п	оболочка	1,404
	сердцевина	1,41
Соотношение смеси полимер/отверждаю- щий агент PDMS	оболочка	20:1
	сердцевина	5:1
Высота <i>h,</i> мкм	оболочка	40
	сердцевина	50
Общая высота планарного волновода Н, мкм		130
Длина волны оптического излучения λ, нм		850

TABLE 1. The Polymer Planar Optical Waveguides Main Parameters

Исходя из предположения, что полимерный планарный оптический волновод будет изготовлен из одного материала с разным показателем преломления в соответствующих слоях, было принято решение заменить оттиск мастер-штампа на заливку полимера PDMS сердцевины в топологию мастерштампа с последующим отверждением в каналах мастер-штампа. Затем поверх отвержденного PDMS сердцевины наносится слой PDMS оболочки и присоединяется печатное основание оптико-электронной шины. После отверждения полимерных слоев осуществляется «отрыв» полученной полимерной структуры из мастер-штампа.

# Подходы к снижению потерь на рассеяние в полимерных планарных оптических волноводах

Основным критерием качества технологии изготовления полимерных планарных оптических волноводов является величина потерь на рассеяние излучения. Как уже было сказано ранее, значение потерь на рассеяние может быть снижено при достаточной отработке технологии формирования оптических волноводов. Основными пагубными явлениями, которые необходимо устранить при отработке технологического процесса, являются высокая шероховатость поверхности сердцевины полимерного планарного оптического волновода и присутствие неоднородностей в ее структуре. В предложенном технологическом процессе выделены две лимитирующие стадии, определяющие величину потерь на рассеяние в сформированных полимерных планарных оптических волноводах.

Во-первых, качество изготовления мастерштампа. Топологию мастер-штампа из фоторезиста SU-8 предлагается сформировать путем прямой контактной фотолитографии. Для негативных фоторезистов, к которым относится SU-8, свойственна проблема создания отрицательного наклона стенок фоторезистивной маски (T-topping). Предполагается, что присутствие данного паразитного эффекта повлечет за собой увеличение шероховатости боковых поверхностей сердцевин полимерных планарных оптических волноводов из-за их повреждения при попытке изъятия из мастер-штампа, а в предельном случае – отрыва сердцевин от нижнего слоя оболочки.

Причиной возникновения T-topping [24, 25] определяют приповерхностное поглощение широкополосного УФ-излучения (длина волны менее 350 нм). Как следствие этого избыточного поглощения, происходит переэкспонирование приповерхностного слоя и недоэкспонирование нижнего слоя фоторезиста SU-8. В свою очередь, приповерхностное поглощение возникает из-за наличия пиков поглощения оптического излучения на длинах волн 231,5, 268,5 и 276 нм [25] у соли гексафтороантимоната триарилсульфония, входящей в состав фоторезиста SU-8 как фотокислотный генератор (ФКГ). Следовательно, изза поглощения оптического излучения происходит избыточная генерация кислоты Льюиса, которая диффундирует из проэкспонированных участков фоторезиста и полимеризует приповерхностный слой непроэкспонированных областей, где ее концентрация наиболее велика. Схема возникновения паразитного T-topping при экспонировании фоторезиста SU-8 широкополосным УФ-излучением представлена на рисунке 2.



Рис. 2 Схема образования T-topping в слое фоторезиста SU-8 [24] Fig. 2 T-Topping Formation Scheme in the SU-8 Photoresist Layer [24]

Исходя из причин возникновения паразитного T-topping, необходимо исключить возможность экспонирования фоторезиста широкополосным спектром УФ-излучения. Для этих целей в руководстве по процессированию фоторезиста SU-8 рекомендуется использовать специализированные коммерческие светофильтры [26]. Данные устройства призваны отфильтровать УФ-излучение с длиной волны менее 350 нм при экспонировании фоторезиста SU-8.

В данной статье предлагается иной подход к решению проблемы паразитного T-topping. Предполагается, что использование светофильтра в виде стеклянной подложки со слоем фоторезиста SU-8 также будет стимулировать фильтрацию нежелательной части УФ-спектра и способствовать увеличению вертикальности стенок фоторезистивной маски. Для устранения T-topping при проведении контактного экспонирования мастер-штампа необходимо расположить изготовленный светофильтр между источником УФ-излучения и фотошаблоном с топологией мастер-штампа. Также следует определить, является ли фильтрующий эффект данного светофильтра постоянным или, напротив, он ограничен во времени; имеется ли зависимость эффективности фильтрации от толщины фоторезистивного слоя SU-8 на поверхности светофильтра. Кроме того, не следует забывать о необходимости определения значения, на которое требуется увеличить мощность экспонирующего УФ-излучения с учетом добавления светофильтра.

Во-вторых, следующий лимитирующий этап изготовления полимерных планарных оптических волноводов – «отрыв» оптических волноводов из мастер-штампа после отверждения. При неудачном отрыве возможно возникновение повышенной шероховатости поверхности сердцевины планарного оптического волновода и увеличение потерь на рассеяние излучения на границе «сердцевина-оболочка». Основной причиной возникновения шероховатостей из мастер-штампа является повышенная адгезия полимера к фоторезисту мастер-штампа.

При формировании полимерных планарных оптических волноводов сердцевина оптических волноводов вступает в контакт с тремя поверхностями: полимер PDMS оболочки, фоторезист SU-8 мастер-штампа и основание мастер-штампа (кремний). Следовательно, необходимо контролировать величину адгезии полимера PDMS сердцевины ко всем трем материалам [27]. При этом в первом случае величина адгезии должна быть достаточно высокой, чтобы сердцевины не оторвались от нижнего слоя оболочки, а в двух других случаях – наоборот, что создает дополнительные сложности. Для уменьшения количества материалов, приведенных в контакт с сердцевиной полимерного планарного оптического волновода, предлагается добавить дополнительный этап в технологический процесс изготовления мастер-штампа для формирования подслоя из фоторезиста SU-8. Данный подслой исключит контакт полимера PDMS сердцевины с основанием мастер-штампа. На рисунке 3 представлена блок-схема технологического процесса изготовления полимерных планарных оптических волноводов с учетом добавления дополнительного подслоя мастер-штампа.

Для снижения адгезии фоторезиста к двухслойному мастер-штампу предлагается нанести дополнительный буфферный слой поверхностного активного вещества или модификатора адгезии гексаметилдисилазана. Добавление буфферного слоя позволит извлекать полимерные планарные оптические волноводы из мастер-штампа без повреждения поверхностей, вступающих в контакт с мастерштампом, а, следовательно, без увеличения величины шероховатости и потерь на рассеяние оптического излучения.

С другой стороны, применение предложенных буфферных слоев обеспечит многократное использование мастер-штампа для формирования полимерных планарных оптических волноводов оптико-электронной шины передачи данных единой топологии без повторного изготовления мастерштампа.



Рис. 3. Схема технологического процесса изготовления макета оптико-электронной шины [20] Fig. 3. Optoelectronic Data Bus Fabrication Process [20]

#### Заключение

Таким образом, в представленной статье предложены подходы к снижению потерь на рассеяние в планарных оптических волноводах оптико-электронной шины передачи данных, которые заключаются в поэтапной доработке технологического процесса изготовления оптических волноводов.

Отличительной особенностью рассмотренных планарных оптических волноводов было отмечено их формирование из неспециализированного полимерного материала общего применения – полидиметилсилоксана (PDMS) – по технологии мягкой литографии. С учетом этой особенности были определены наиболее критичные этапы изготовления полимерных планарных оптических волноводов, а именно: формирование мастер-штампа из фоторезиста SU-8 и отрыв отвержденных оптических волноводов из мастер-штампа. Каждый из выбранных этапов имеет решающее значение в увеличении шероховатости поверхности элементов оптических волноводов и, как следствие, в возрастании потерь на рассеяние оптического излучения.

Причиной увеличения шероховатости поверхности полимерных планарных оптических волноводов на этапе изготовления мастер-штампа был определен паразитный эффект T-topping. Предложен алгоритм снижения величины T-topping путем фильтрации широкополосного УФ-излучения, которое используется при формировании мастерштампа с помощью технологии контактной фотолитографии. Также выдвинуто предположение о возможности замены дорогостоящего специализированного коммерческого светофильтра, рекомендованного руководством по применению фоторезиста SU-8, на светофильтр, изготовленный на основе стеклянной подложки с нанесенным слоем фоторезиста SU-8, для нивелирования эффекта Ttopping.

Избыточная и неравномерная адгезия полимерного материала PDMS к мастер-штампу была выявлена в качестве иного эффекта, способствующего увеличению шероховатости поверхностей сердцевин полимерных планарных оптических волноводов. Для борьбы с неравномерностью адгезии целесообразно внести изменения в конструкцию мастер-штампа, добавив дополнительный подслой. С целью снижения величины адгезии предлагается наносить на поверхность мастер-штампа дополнительный буфферный слой поверхностного активного вещества или модификатора адгезии гексаметилдисилазана (HMDS). Предложенный подход к снижению адгезии полимерного материала оптических волноводов также обеспечит возможность многократного применения мастер-штампа для формирования полимерных планарных оптических волноводов идентичной топологии.

Представленные подходы к снижению потерь на рассеяние излучения были успешно реализованы при изготовлении мастер-штампов и макетов полимерных планарных оптических волноводов оптико-электронной шины передачи данных.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям (Договор № 14376ГУ/2019 от 11.07.2019 г.).

#### Список используемых источников

1. Ахманов А.С. Оптическая передача информации в супер-ЭВМ и микропроцессорных системах. Часть 1 // LIGHTWAVE. 2008. № 3. С. 46–53.

2. Copper versus optical: The battle begins // VITA Technologies. URL: http://vita.mil-embedded.com/articles/copper-versus-optical-battle-begins (дата обращения 20.10.2020)

3. Bamiedakis N., Hashim A., Penty R.V., White H. Regenerative polymeric bus architecture for board-level optical interconnects // Optics Express. 2012. Vol. 20. Iss. 11. PP. 11625–11636. DOI:10.1364/0E.20.011625

4. Schares L., Kash J.A., Doany F.E., Schow C.L., Schuster C., Kuchta D.M. Terabus: Terabit/Second-Class Card-Level Optical Interconnect Technologies // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2006. Vol. 12. Iss. 5. PP. 1032–1044. DOI:10.1109/JSTQE.2006.881906

5. Immonen M., Wu J., Yan H.J., Zhu L.X., Chen P., Rapala-Virtanen T. Development of electro-optical PCBs with embedded waveguides for data center and high performance computing applications // Proceedings of SPIE OPTO (San Francisco, USA, 1–6 February 2014). Vol. 8991. Optical Interconnects XIV. 2014. DOI:10.1117/12.2039875

6. Соколов В.И., Ахманов А.С., Китай М.С., Молчанова С.И., Панченко В.Я., Троицкая Е.В. и др. Лазерные технологии формирования полимерных элементов микро и нанофотоники для высокоскоростных информационных систем. URL: http://shatura.laser.ru/laser.ru/30/Polymer\_photonics.pdf (дата обращения 05.05.2020)

7. Ахманов А.С. Оптическая передача информации в супер-ЭВМ и микропроцессорных системах. Часть 2 // LIGHTWAVE. 2008. № 4. С. 52–55.

8. Zhu L.X., Immonen M., Wu J., Yan H.J., Ruizhi S., Peifeng C., et al. Electro-optical line cards with multimode polymer waveguides for chip-to-chip interconnects // Proceedings of SPIE/COS Photonics Asia (Beijing, China, 9–11 October 2014). Vol. 9270. Optoelectronic Devices and Integration V. 2014. DOI:10.1117/12.2071965

9. Karppinen M., Mäkinen J.-T., Kataja K., Tanskanen A., Alajoki T., Karioja P., et all. Embedded optical interconnect on printed wiring board // Proceedings of Photonics Europe (Strasbourg, France, 26–30 April 2004). Vol. 5453. Micro-Optics, VCSELs, and Photonic Interconnects. 2004. PP. 150–164. DOI:10.1117/12.545931

10. Karppinen M., Alajoki T., Tanskanen A., Kataja K., Mäkinen J.-T., Karioja P., et all. Parallel optical interconnect between surface-mounted devices on FR4 printed wiring board using embedded waveguides and passive optical alignments // Proceed-ings of SPIE Photonics Europe (Strasbourg, France, 3–7 April 2006). Vol. 6185. Micro-Optics, VCSELs, and Photonic Interconnects II: Fabrication, Packaging, and Integration. 2006. DOI:10.1117/12.664386

11. Chen S., Pang F., Li K., Wu J., Immonen M., Zhang X., et al. Long distance optical printed circuit board for 10Gbps optical interconnection // Proceedings of Photonics Asia (Beijing, China, 5–7 November 2012). Vol. 8555. Optoelectronic Devices and Integration IV. 2012. DOI:10.1117/12.999969

12. Zgraggen E. Fabrication and System Integration of Single-Mode Polymer Optical Waveguides. D.Sc. Thesis. Zurich: ETH, 2014. 158 p.

13. Cai D. Optical and Mechanical Aspects on Polysiloxane Based Electrical-Optical-Circuits-Board. D.Sc. Thesis. Dortmund: TU Dortmund University, 2008. 129 p. DOI:10.17877/DE290R-8242

14. Ma H., Jen A.K.-Y., Dalton L.R. Polymer-Based Optical Waveguides: Materials, Processing, and Devices // Advanced Materials. 2002. Vol. 14. Iss. 19. PP. 1339–1365. DOI:10.1002/1521-4095(20021002)14:19<1339::AID-ADMA1339>3.0.CO;2-O

15. Sergeeva E. Fabrication of polymer-based optofluidic microsystems for optical fluid analysis on printed circuit boards. D.Sc. Thesis. Rostock: University of Rostock, 2019. 143 p.

16. Miller S.E. Integrated Optics: An Introduction // Bell System Technical Journal. 1969. Vol. 48. Iss. 7. PP. 2059–2069. DOI:10.1002/j.1538-7305.1969.tb01165.x

17. Cai D. Polydimethylsiloxane (PDMS) based optical interconnect with copper-clad FR4 substrates // Sensors and Actuators B: Chemical. 2011. Vol. 160. Iss. 1. PP. 777–783. DOI:10.1016/j.snb.2011.08.062

18. Immonen M. Fabrication and Characterization of Polymer Optical Waveguides With Integrated Micromirrors for Three-Dimensional Board-Level Optical Interconnects // IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing. 2005. Vol. 28. Iss. 4. PP. 304–311. DOI:10.1109/TEPM.2005.856538

19. Prajzler V., Neruda M., Nekvindova P., Mikulik P. Properties of Multimode Optical Epoxy Polymer Waveguides Deposited on Silicon and TOPAS Substrate // Radioengineering. 2017. Vol. 26. No. 1. PP. 10–15. DOI:10.13164/re.2017.0010

20. Иванов Н.Н., Радзиевская Т.А. Конвергенция технологий фотоники и радиоэлектроники при создании высокоскоростных шин передачи данных // IX Международная научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» (Санкт-Петербург, Россия, 26–27 февраля 2020). СПб: СПбГУТ, 2020. Т. 1. С. 510–514.

21. Zhou W. Principles and Status of Nanoimprint Lithography // Nanoimprint Lithography: An Enabling Process for Nanofabrication. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013. 269 p. DOI:10.1007/978-3-642-34428-2

22. Chang-Yen D.A., Eich R.K., Gale B.K. A Monolithic PDMS Waveguide System Fabricated Using Soft-Lithography Techniques // Journal of Lightwave Technology. 2005. Vol. 23. Iss. 6. PP. 2088–2093. DOI:10.1109/JLT.2005.849932

23. Cai Z., Qiu W., Shao G., Wang W. A new fabrication method for all-PDMS waveguides // Sensors and Actuators A: Physical. 2013. Vol. 204. PP. 44–47. DOI:10.1016/j.sna.2013.09.019

24. Madou M.J. Fundamentals of Microfabrication and Nanotechnology. Irvine: CRC Press, 2011. 1992 p. DOI:10.1201/ 9781315274164

25. Mitra S.K. Microfluidics and nanofluidics handbook: Fabrication, implementation, and applications. Irvine: CRC Press, 2011. 624 p. DOI:10.1201/b11188

26. SU-8 3000 Permanent epoxy negaive photoresist (Data Sheet) // MicroChem. URL: http://microchem.com/pdf/SU-8%203000%20Data%20Sheet.pdf (дата обращения 20.10.2020)

27. Manvelova T.A. Polymer Optoelectronic Bus for High-Speed Data Transmission Systems // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1400. Iss. 6. DOI:10.1088/1742-6596/1400/6/066051

\* \* \*

# The Reducing Approaches of Scattering Losses in Polymer Planar Optical Waveguides

# T. Radzievskaya<sup>1, 2</sup>, N. Ivanov<sup>3</sup>, S. Tarasov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, 197376, Russian Federation
<sup>2</sup>JSC «Avangard», St. Petersburg, 195271, Russian Federation
<sup>3</sup>The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications,

St. Petersburg, 193232, Russian Federation

## Article info

DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-1-31-40 Received 28th October 2020 Accepted 11th Junuary 2021

**For citation:** Radzievskaya T., Ivanov N., Tarasov S. The Reducing Approaches of Scattering Losses in Polymer Planar Optical Waveguides. *Proc. of Telecom. Universities.* 2021;7(1):31–40. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-1-31-40.

**Abstract:** The article presents the development prospects of planar optical waveguides for high-speed data transmission systems optoelectronic buses by polymer materials. The advantages and disadvantages of using non-specialized polymeric materials for general use are revealed. The polymer planar optical waveguides fabrication technologies are proposed. The main losses types in planar optical waveguides, the reasons for their occurrence, as well as approaches to their reduction are determined. Using the example of PDMS polymer and soft lithography technology, the technological process critical stages of polymer planar optical waveguides production are noted, which contribute to an scattering losses increase. For each stage, algorithms are proposed to prevent an scattering losses increase. These algorithms were implemented in practice in the manufacture of layouts of polymer planar optical waveguides of the optical-electronic data transmission bus.

**Keywords:** polymer planar optical waveguides, optoelectronic data bus, soft lithography, hard mold, PDMS, SU-8, T-topping, adhesion.

## FUNDING

This research was funded by Innovation Assistance Fund (Contract no. 14376ГУ/2019, 11.07.2019).

## References

1. Ahmanov A.S. Optical Transmission of Information in Super-Computers and Microprocessor Systems. Part 1. *LIGHTWAVE*. 2008;3:46–53. (in Russ.)

2. VITA Technologies. *Copper versus optical: The battle begins.* Available from: http://vita.mil-embedded.com/articles/ copper-versus-optical-battle-begins [Accessed 20th October 2020]

3. Bamiedakis N., Hashim A., Penty R.V., White H. Regenerative polymeric bus architecture for board-level optical interconnects. *Optics Express*. 2012;20(11):11625–11636. DOI:10.1364/OE.20.011625

4. Schares L., Kash J.A., Doany F.E., Schow C.L., Schuster C., Kuchta D.M. Terabus: Terabit/Second-Class Card-Level Optical Interconnect Technologies. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2006;12(5):1032–1044. DOI:10.1109/JSTQE.2006.881906

5. Immonen M., Wu J., Yan H.J., Zhu L.X., Chen P., Rapala-Virtanen T. Development of electro-optical PCBs with embedded waveguides for data center and high performance computing applications. *Proceedings of SPIE OPTO*, 1–6 February 2014, San Francisco, USA. Vol. 8991. Optical Interconnects XIV. 2014. DOI:10.1117/12.2039875

6. Sokolov V.I., Ahmanov A.S., Kitaj M.S., Molchanova S.I., Panchenko V.Ya., Troitskaya E.V. *Laser Technologies for the Formation of Polymer Elements of Micro and Nanophotonics for High-Speed Information Systems*. Available from: http://shatura.laser.ru/laser.ru/30/Polymer\_photonics.pdf [Accessed 5th May 2020]. (in Russ.)

7. Ahmanov A.S. Optical Transmission of Information in Super-Computers and Microprocessor Systems. Part 2. *LIGHTWAVE*. 2008;4:52–55. (in Russ.)

8. Zhu L.X., Immonen M., Wu J., Yan H.J., Ruizhi S., Peifeng C., et al. Electro-optical line cards with multimode polymer waveguides for chip-to-chip interconnects. *Proceedings of SPIE/COS Photonics Asia*, 9–11 October 2014, Beijing, China. Vol. 9270. Optoelectronic Devices and Integration V. 2014. DOI:10.1117/12.2071965

9. Karppinen M., Mäkinen J.-T., Kataja K., Tanskanen A., Alajoki T., Karioja P., et all. Embedded optical interconnect on printed wiring board. *Proceedings of Photonics Europe, 26–30 April 2004, Strasbourg, France. Vol. 5453. Micro-Optics, VCSELs, and Photonic Interconnects.* 2004. p.150–164. DOI:10.1117/12.545931

10. Karppinen M., Alajoki T., Tanskanen A., Kataja K., Mäkinen J.-T., Karioja P., et all. Parallel optical interconnect between surface-mounted devices on FR4 printed wiring board using embedded waveguides and passive optical alignments. *Proceedings of SPIE Photonics Europe, 3–7 April 2006, Strasbourg, France. Vol. 6185. Micro-Optics, VCSELs, and Photonic Interconnects II: Fabrication, Packaging, and Integration.* 2006. DOI:10.1117/12.664386

11. Chen S., Pang F., Li K., Wu J., Immonen M., Zhang X., et al. Long distance optical printed circuit board for 10Gbps optical interconnection. *Proceedings of Photonics Asia, 5–7 November 2012, Beijing, China. Vol. 8555. Optoelectronic Devices and Integration IV.* 2012. DOI:10.1117/12.999969

12. Zgraggen E. Fabrication and System Integration of Single-Mode Polymer Optical Waveguides. D.Sc. Thesis. Zurich: ETH; 2014. 158 p.

13. Cai D. Optical and Mechanical Aspects on Polysiloxane Based Electrical-Optical-Circuits-Board. D.Sc. Thesis Dortmund: TU Dortmund University; 2008. 129 p. DOI:10.17877/DE290R-8242

14. Ma H., Jen A.K.-Y., Dalton L.R. Polymer-Based Optical Waveguides: Materials, Processing, and Devices. *Advanced Materials*. 2002;14(19):1339–1365. DOI:10.1002/1521-4095(20021002)14:19<1339::AID-ADMA1339>3.0.CO;2-O

15. Sergeeva E. Fabrication of polymer-based optofluidic microsystems for optical fluid analysis on printed circuit boards. D.Sc. Thesis. Rostock: University of Rostock; 2019. 143 p.

16. Miller S.E. Integrated Optics: An Introduction. *Bell System Technical Journal*. 1969;48(7):2059–2069. DOI:10.1002/j.1538-7305.1969.tb01165.x

17. Cai D. Polydimethylsiloxane (PDMS) based optical interconnect with copper-clad FR4 substrates. *Sensors and Actuators* B: Chemical. 2011;160(1):777–783. DOI:10.1016/j.snb.2011.08.062

18. Immonen M. Fabrication and Characterization of Polymer Optical Waveguides With Integrated Micromirrors for Three-Dimensional Board-Level Optical Interconnects. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*. 2005;28(4):304–311. DOI:10.1109/TEPM.2005.856538

19. Prajzler V., Neruda M., Nekvindova P., Mikulik P. Properties of Multimode Optical Epoxy Polymer Waveguides Deposited on Silicon and TOPAS Substrate. *Radioengineering*. 2017;26(1):10–15. DOI:10.13164/re.2017.0010

20. Ivanov N.N., Radzievskaja T.A. Convergence of Photonics and Radio Electronics Technologies in the Creation of High-Speed Data Transmission Buses. *Proceedings of the IXth International Conference on Infotelecommunications in Science and Education, 26–27 February 2020, St. Petersburg, Russia.* St. Petersburg: The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications Publ.; 2020, vol.1. p.510–514. (in Russ.)

21. Zhou W. Principles and Status of Nanoimprint Lithography. In: *Nanoimprint Lithography: An Enabling Process for Nanofabrication*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2013. 269 p. DOI:10.1007/978-3-642-34428-2

22. Chang-Yen D.A., Eich R.K., Gale B.K. A Monolithic PDMS Waveguide System Fabricated Using Soft-Lithography Techniques. *Journal of Lightwave Technology*. 2005;23(6):2088–2093. DOI:10.1109/JLT.2005.849932

23. Cai Z., Qiu W., Shao G., Wang W. A new fabrication method for all-PDMS waveguides. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2013;204:44–47. DOI:10.1016/j.sna.2013.09.019

24. Madou M.J. Fundamentals of Microfabrication and Nanotechnology. Irvine: CRC Press; 2011. 1992 p. DOI:10.1201/9781315274164

25. Mitra S.K. *Microfluidics and nanofluidics handbook: Fabrication, implementation, and applications*. Irvine: CRC Press; 2011. 624 p. DOI:10.1201/b11188

26. MicroChem. SU-8 3000 Permanent epoxy negaive photoresist (Data Sheet). Available from: http://microchem.com/pdf/SU-8%203000%20Data%20Sheet.pdf [Accessed 20th October 2020]

27. Manvelova T.A. Polymer Optoelectronic Bus for High-Speed Data Transmission Systems. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1400(6). DOI:10.1088/1742-6596/1400/6/066051

# Сведения об авторах:

РАДЗИЕВСКАЯ Тамара Александровна	аспирант кафедры фотоники Санкт-Петербургского государственного элек- тротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), инженер- технолог Центра Микросистемотехники ОАО «Авангард» <u>tamaramanvelova239@mail.ru</u> b https://orcid.org/0000-0001-6360-810X
ИВАНОВ	доктор технических наук, старший научный сотрудник, заместитель директора по научной работе Института магистратуры Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, <u>ivanov.2nik@yandex.ru</u>
Николай Николаевич	bttps://orcid.org/0000-0001-8511-8494
ТАРАСОВ	доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой фотоники, директор департамента науки Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), satarasov@mail.ru
Сергей Анатольевич	b https://orcid.org/0000-0002-6321-0019