

Анализ потерь оптического излучения в полимерных оптико-электронных шинах печатных плат нового поколения

Т.А. Радзиевская^{1, 2} 

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

²ОАО «Авангард»,
Санкт-Петербург, 195271, Российская Федерация

*Адрес для переписки: tamaramanvelova239@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 05.10.2021

Поступила после рецензирования 07.02.2022

Принята к публикации 10.02.2022

Ссылка для цитирования: Радзиевская Т.А. Анализ потерь оптического излучения в полимерных оптико-электронных шинах печатных плат нового поколения // Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8. № 1. С. 84–90. DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-1-84-90

Аннотация: В статье рассмотрены отдельные факторы роста потерь в полимерных планарных оптических волноводах, которые входят в состав оптико-электронных шин, внедренных в перспективные печатные платы нового поколения. Предложены подходы к сокращению потерь на прохождение оптического излучения, к которым отнесены потери на торце оптического волновода и на переходе излучения в элемент ввода/вывода оптико-электронной шины печатной платы. По результатам проведенного в программной среде Comsol Multiphysics моделирования модовой структуры полимерного планарного оптического волновода из полимерного материала полидиметилсилоксана (PDMS) определены размеры сердцевины оптического волновода, обеспечивающие одномодовую структуру оптического волновода. Разработан и собран измерительный стенд для вычисления потерь на прохождение в полимерных планарных оптических волноводах оптико-электронной шины печатной платы, который соответствует требованиям МЭК 62596-2:2017. Минимальное измеренное значение потерь на прохождение в изготовленных тестовых полимерных планарных оптических волноводах составило 20 дБ, что соответствует зарубежным аналогам оптико-электронной шины печатной платы.

Ключевые слова: полимерные планарные оптические волноводы, оптико-электронная шина печатной платы, PDMS, потери на прохождение, измерительный стенд, Comsol Multiphysics.

Введение

Перспективность внедрения оптических систем передачи данных на уровне печатных плат сдерживается высоким уровнем потерь в оптических волноводах, внедренных в печатные платы. Применение полупроводниковых или диэлектрических материалов [1] обеспечивает достаточно низкий уровень потерь в оптических волноводах оптико-электронных шин печатных плат. Однако технологии изготовления оптических волноводов из полупроводников и диэлектриков не могут быть интегрированы в технологический процесс изготовления традиционных печатных плат.

С конца XX в. при развитии отрасли производства полимерных материалов возникла идея замены полупроводников и диэлектриков на оптические полимерные материалы, которые обладают

оптической прозрачностью в близком ИК-диапазоне оптического излучения [2, 3]. Главное преимущество оптических полимерных материалов заключается в рационализации затрат на изготовление печатных плат нового поколения с оптико-электронной шиной за счет использования сравнительно недорогостоящих полимерных материалов и, что наиболее важно, в отсутствии необходимости перепрофилирования традиционного технологического процесса производства печатных плат. Это обеспечивается тем, что аналогичные полимерные материалы уже нашли свое применение в качестве фоторезистов [4] и других материалов при изготовлении традиционных печатных плат, следовательно, для их интеграции не требуется глобального перестраивания технологии изготовления печатных плат.

Отличительной чертой полимерных материалов является более высокий уровень потерь оптического излучения в сравнении с полупроводниковыми или диэлектрическими материалами. Исходя из этого недостатка, область применения полимерных оптико-электронных шин разумно ограничена уровнем передачи данных в пределах печатной платы, например, объединительной коммутационной платы, обеспечивающей объединение сигнала с нескольких функциональных модулей печатной платы и передачи его между ними [2]. С целью контроля и снижения уровня потерь в полимерной оптико-электронной шине печатной платы нового поколения необходимо оценить факторы, влияющие на рост потерь в планарных полимерных оптических волноводах (ПОВ), а также предложить способы исключения этих факторов.

Причины роста потерь в полимерных оптико-электронных шинах печатных плат нового поколения

Как известно, оптико-электронная шина печатной платы включает в себя массив полимерных ПОВ прямоугольного сечения, а также элементы ввода/вывода излучения. В исследуемой структуре оптико-электронной шины печатной платы планарные ПОВ выполнены из полидиметилсилоксана (PDMS – от англ. Polydimethylsiloxane).

Величина потерь сигнала складывается из множества факторов, а именно: потери на поглощение и рассеяние излучения, поляризационные потери, потери на торце оптического волновода и на вводе/выводе излучения и другие виды потерь [2, 5, 6].

Рассмотрим группу потерь, которая проявляется на концах планарных ПОВ оптико-электронной шины печатной платы и в ее элементах ввода/вывода излучения. Среди этой группы выделяют потери на торце оптического волновода и потери на переходе оптического излучения из оптического волновода в элемент ввода/вывода излучения. К причинам возникновения потерь на торце ПОВ относят рассеяние оптического излучения вследствие неровной поверхности сердцевины оптического волновода. Также к причинам потерь на торце оптического волновода относят отражение оптического излучения с торца сердцевины оптического волновода.

Потери на переходе оптического излучения в элемент ввода/вывода излучения определяются рассогласованием модовой структуры, показателя преломления, пространственного совмещения и геометрических размеров сердцевин планарного ПОВ и оптоволоконных линий связи [6]. На данном этапе развития печатных плат со встроенными оптико-электронными шинами ввод/вывод оптического излучения может осуществляться с помощью оптоволоконных соединений с источником/приемником оптического излучения при условии размещения

оптико-электронной шины на поверхности печатной платы.

Для оценки функциональных характеристик оптико-электрических шин печатных плат требуется определение потерь на прохождение оптического излучения в планарных ПОВ, частичный вклад в которые вносят недостаточные мощность источника и чувствительность приемника оптического излучения [6].

Таким образом, среди причин, определяющих суммарную величину потерь в перспективных оптико-электронных шинах печатных плат нового поколения, помимо потерь на поглощение и на рассеяние излучения в планарных ПОВ следует выделить потери на торце оптических волноводов и при переходе оптического излучения в элемент ввода/вывода излучения, а также потери на прохождение оптического излучения.

Подходы к сокращению потерь на прохождение

Для ускорения внедрения печатных плат нового поколения требуется обеспечить единство измерений функциональных характеристик оптико-электронных шин передачи данных. К таким характеристикам относятся потери на прохождение в планарных ПОВ. Поэтому необходима разработка надежных методов измерений, которые не будут зависеть от типа волноводной структуры. Эта унификация обеспечит возможность определения характеристик различных видов волноводных систем.

В международном стандарте МЭК 62496-2:2017 «Общее руководство по определению условий измерения оптических характеристик оптических плат» описана система типовых методов измерений и условий проведения измерений потерь на прохождение в планарных ПОВ оптико-электронной шины печатной платы [7]. Для этой цели стандарт устанавливает систему трехзначных идентификационных кодов, определяющих пять элементов измерительного стенда (рисунок 1): 1 – источник оптического излучения; 2 – среда для передачи оптического излучения на вход оптического волновода; 3 – условие совмещения с элементом ввода оптического излучения; 4 – условие вывода оптического излучения из элемента вывода оптического волновода; 5 – приемник оптического излучения [8].

В рамках исследования был разработан и собран оригинальный измерительный стенд. В состав этого стенда вошли источник оптического излучения РУБИН 104, волоконно-оптическая сборка из одномодового оптоволокна на входе и многомодового оптоволокна на выходе оптико-электронной шины печатной платы и приемник РУБИН 201 [9]. Для обеспечения юстировки процесса ввода/вывода оптического излучения в планарный ПОВ оптико-электронной шины были использованы v-образные фиксаторы оптоволокна. Эти оригиналь-

ные v-образные канавки были сформированы с помощью скрайбирования кремниевой подложки диском для резки на глубину 130 мкм. Выбор глубины реза обусловлен величиной внешнего диаметра оптоволоконного кабеля, применяемого для ввода/вывода оптического излучения в оптико-электронную шину печатной платы.

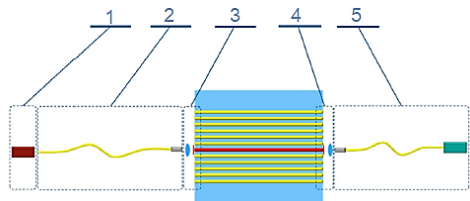


Рис. 1. Измерительный стенд для определения потерь на прохождение в полимерной оптико-электронной шине печатной платы

Fig. 1. Measuring Stand for Determining the Transmission Losses in a Polymer Optoelectronic Bus of a Printed Circuit Board

В таблице 1 представлены результаты измерения потерь на прохождение тестовой оптико-электронной шины печатной платы.

ТАБЛИЦА 1. Потери на прохождение в тестовой оптико-электронной шине

TABLE 1. Transmission Losses in the Test Optoelectronic Bus

Номер образца	1	2	3	4
Потери на прохождение, дБ	25,76	20,81	27,92	28,13
Удельные потери на прохождение, дБ/см	17,78	14,26	18,21	17,85

Из таблицы следует, что в тестовой оптико-электронной шине потери на прохождение составили не менее 20 дБ с удельным значением порядка 14 дБ/см [9]. Измерения проводились при длине волны оптического излучения, равной 850 нм. Полученные значения потерь на прохождение соответствуют значениям, ранее полученным в зарубежных аналогах оптико-электронной шины печатной платы [10] на основе материала PDMS.

Следует отметить, что в измеренную величину потерь на прохождение внесли вклад потери на торце оптического волновода и потери на переходе оптического излучения из оптического волновода в элемент ввода/вывода излучения. Для снижения потерь на торце оптического волновода достаточно обеспечить бездефектную поверхность поперечного сечения сердцевин оптического волновода, что может быть достигнуто при отработке технологического процесса изготовления планарных ПОВ [11, 12].

В то же время, снижение потерь излучения при переходе из ПОВ в элемент ввода/вывода излучения может быть обеспечено только путем снижения влияния следующих факторов: рассогласования модовой структуры, показателя преломления, пространственного совмещения и геометрических

размеров сердцевин [6] планарного ПОВ с оптоволоконными линиями связи (см. рисунок 1). Неравенство показателя преломления стеклянной сердцевин оптоволоконного с полимерной сердцевин оптического волновода не может быть исключено. Следовательно, необходимо рассмотреть способы снижения других факторов, определяющих величину потерь при переходе излучения.

Рассогласование пространственного совмещения оптоволоконного соединения с планарными ПОВ может быть ликвидировано при условии снижения степеней свободы оптоволоконного при сопряжении с сердцевин оптического волновода. Для снижения числа степеней свободы, помимо применения v-образных юстировочных канавок, были разработаны специальные элементы ввода/вывода излучения на концах оптического волновода в виде «ласточкиных хвостов» [13] (рисунок 2).



Рис. 2. Конструкция элемента ввода/вывода излучения «ласточкиных хвостов»

Fig. 2. «Dovetail» Radiation Input/Output Element Design

Отметим, что на рисунке 2 приведена топология слоя сердцевин планарного ПОВ. «Ласточкины хвосты» изготавливаются по модифицированной технологии мягкой литографии совместно с формированием полимерных планарных оптических волноводов и из тех же материалов. Ширина наиболее узких участков превосходит на 3 мкм наибольший диаметр оптоволоконного, чтобы обеспечить безопасное введение хрупкого кварцевого оптического волновода без оплетки, но при этом надежно зафиксировать для предотвращения рассовмещения, т. к. отклонение даже на 2 мкм приводит к снижению эффективности сопряжения до 60 % и меньше [14].

Для предотвращения изгибов волокна в данном элементе ввода/вывода его длина равна 7,5 мм. А для еще более надежной фиксации в перпендикулярной плоскости в нижнем слое оболочки ширина ловителя уменьшена до 120 мкм, что позволяет также успешно извлекать отвержденный нижний слой оболочки совместно с сердцевинами планарного ПОВ из мастер-штампа мягкой литографии за счет пространственного перекрытия полимерных слоев.

Возможное несоответствие модовой структуры оптоволоконного и планарного ПОВ потребовало проведения моделирования полимерного планарного ПОВ прямоугольного поперечного сечения. По причине отсутствия аналитического решения для случая планарного ПОВ с прямоугольным сечением сердцевин было проведено имитационное компьютерное моделирование модовой структуры в программной среде Comsol Multiphysics с целью определения геометрических размеров прямоугольной сердцевин оптического волновода, которые соот-

ветствовали бы одномодовой структуре планарного ПОВ из данного полимерного материала.

Для анализа модовой структуры разрабатываемого планарного ПОВ сначала теоретически было рассчитано общее число распространяющихся мод [15] М плоского планарного ПОВ с аналогичной толщиной слоя сердцевинки по формуле:

$$M = \text{int} \left[\frac{1}{\pi} (2\vartheta - \arctg \left[\left(\frac{n_{\text{clad1}}^2 - n_{\text{clad2}}^2}{n_{\text{core}}^2 - n_{\text{clad1}}^2} \right)^{1/2} \right] \right),$$

где $\vartheta = ak(n_{\text{core}}^2 - n_{\text{clad1}}^2)^{1/2}$ – нормированная частота; n_{core} – показатель преломления сердцевинки; n_{clad1} и n_{clad2} – показатели преломления оболочки (нижней и верхней) оптического волновода; a – сторона квадрата поперечного сечения сердцевинки оптического волновода; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; λ – длина волны оптического излучения, проходящего через плоский ПОВ.

Рассматриваемый оптический волновод соответствует случаю симметричного оптического волновода ($n_{\text{clad1}} = n_{\text{clad2}}$). Тогда выражение для числа распространяющихся мод можно переписать следующим образом [15]:

$$m_{\text{max}} = \frac{k_0 n_{\text{core}} 2a * \cos(\varphi_c)}{\pi},$$

где φ_c – угол отсечки ($\sin(\varphi_c) = n_{\text{core}}/n_{\text{clad}}$).

Подставив в это выражение высоту сердцевинки (a), равную 10 мкм, получим теоретическое значение количества мод в планарном ПОВ из материала PDMS, равную 0,917. Следовательно, плоский ПОВ будет одномодовым при указанной толщине слоя сердцевинки.

Далее было проведено моделирование плоского ПОВ с параметрами модели, приведенными в таблице 2. Для задания показателя преломления PDMS сердцевинки и оболочки использованы значения из [2, 3, 11].

ТАБЛИЦА 2. Параметры модели плоского ПОВ

TABLE 2. Parameters of a Polymer Slab Optical Waveguide Model

Name	Expression	Value	Description
lda0	0,85[um]	8,5E-7 m	Wavelength
f0	c_const/lda0	3,527E14 1/s	Frequency
a	10[um]	1E-5 m	Side of waveguide cross..
len	5[mm]	0,005 m	Waveguide length
width	25[um]	2,5E-5 m	Width of calculation do...
height	25[um]	2,5E-5 m	Height of calculation do...
ncl	1,404	1,404	Refractive index of PDMS...
nco	1,41	1,41	Refractive index of PDMS...
NL	len/lda0	5882,4	Waveguide length in wav...

Для моделирования была выбрана трехмерная физическая модель Electromagnetic Waves, Beam Envelopes в однонаправленном режиме с возмож-

ностью анализа модовой структуры (Mode Analysis) на входе и выходе волновода и частотным расчетом передачи оптического излучения по длине волновода (Frequency Domain). Начальные условия на входе/выходе оптического волновода были заданы с помощью поверхностных граничных условий (Port) путем ввода оптического излучения мощностью 1 Вт на входе и вывода излучения без переотражений на выходе оптического волновода. Для боковых граней были заданы граничные условия идеального электрического проводника. В результате моделирования была получена зависимость нормальной составляющей электрического поля по поперечному сечению плоского ПОВ (рисунок 3).

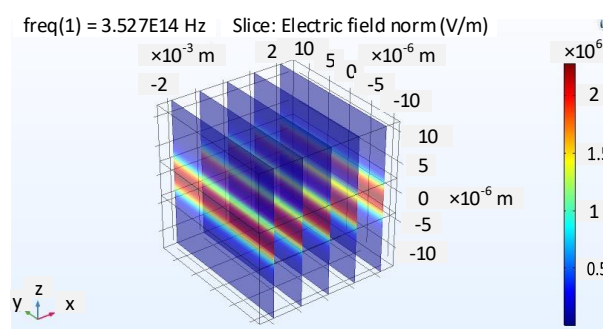


Рис. 3. Результат моделирования плоского ПОВ

Fig. 3. Simulation Result of a Polymer Slab Optical Waveguide

Затем в модели геометрия оптического волновода была изменена с плоского ПОВ на планарный с прямоугольным (квадратным) сечением сердцевинки с размерами 10×10 мкм. Для планарного ПОВ моделирование было дополнено граничным условием поверхностного рассеивания оптического излучения. В результате моделирования (рисунок 4) также, как и на рисунке 6, было построено распределение нормальной составляющей электрического поля.

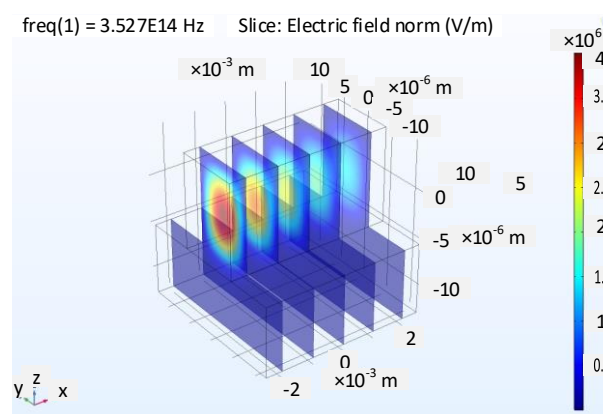


Рис. 4. Результат моделирования планарного ПОВ (10×10 мкм)

Fig. 4. Simulation Result of a Polymer Planar Optical Waveguide (10×10 um)

Наблюдаемое на рисунке 4 снижение величины нормальной составляющей поля в центре сердцевинки планарного ПОВ связано с применением граничных условий рассеяния. Для случая граничных

условий идеального электрического проводника эта величина будет постоянна по длине оптического волновода. Затем был смоделирован планарный ПОВ с поперечным сечением 20×20 мкм с аналогичными остальными характеристиками (рисунок 5).

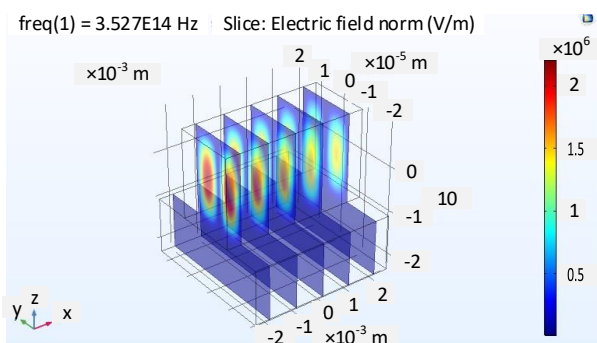


Рис. 5. Результат моделирования планарного ПОВ (20×20 мкм)

Fig. 5. Simulation Result of a Polymer Planar Optical Waveguide (20×20 μm)

В смоделированном планарном ПОВ (рисунок 5) число мод возросло до двух по сравнению с ранее полученным результатом (рисунок 4). Из этого можно сделать вывод, что для одномодовой передачи данных требуется снизить размеры сердцевин оптического волновода до 10×10 мкм включительно, которые соответствуют размерам сердцевин традиционного одномодового оптоволоконного соединения.

Отдельно следует упомянуть изменение геометрических размеров сердцевин планарных ПОВ из-за недостаточно качественной протяжки ракелем полимерного слоя перед нанесением нижнего слоя оболочки и возникновения остаточного слоя сердцевины оптического волновода. В таком случае возникают структуры, как на рисунке 6.

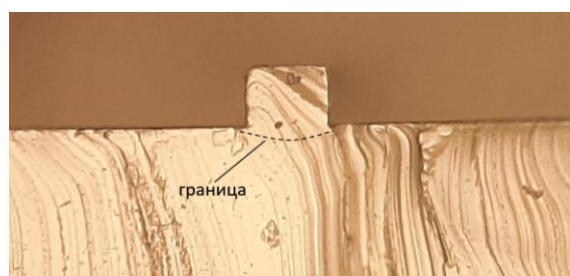


Рис. 6. Поперечное сечение тестовой топологии планарного ПОВ

Fig. 6. Cross-Section of a Polymer Planar Optical Waveguide

На рисунке 6 пунктирной линией обозначена граница сердцевин и оболочки тестовой топологии оптического волновода. Исключение таких остаточных слоев при формировании слоя сердцевины также способно снизить величину потерь в планарном ПОВ.

Заключение

Таким образом, по итогам проведенного исследования были рассмотрены типы потерь оптического излучения в планарных ПОВ оптоэлектронных шин печатных плат, для ряда которых были предложены следующие подходы к их сокращению:

- сокращение потерь на торцевом поперечном сечении оптических волноводов из-за рассеяния оптического излучения может быть обеспечено за счет изменения параметров и режимов технологического процесса формирования планарных ПОВ [11, 12];

- снижение потерь на переходе излучения в элемент ввода/вывода излучения может быть достигнуто с помощью создания дополнительных юстировочных элементов «ласточки хвосты» в элементах ввода/вывода оптического излучения, а также путем изменения геометрических размеров сердцевин оптических волноводов для соответствия с модовой структурой оптоволоконных соединений, применяющихся для ввода/вывода оптического излучения.

Требуемые размеры сердцевин определены путем моделирования в программной среде Comsol Multiphysics планарных ПОВ оптоэлектронной шины печатной платы. Для надежной оценки потерь на прохождение разработан измерительный стенд, соответствующий требованиям МЭК 62496-2:2017. По результатам измерения на разработанном стенде величина потерь на прохождение в тестовой оптоэлектронной шине печатной платы составила не менее 20 дБ, что согласуется с результатами измерения потерь на прохождение в зарубежных тестовых аналогах оптоэлектронной шины печатной платы.

Приведенные подходы к снижению потерь в оптоэлектронных шинах печатных плат будут способствовать более активному переходу на печатные платы нового поколения при разработке перспективных высокопроизводительных коммутационных вычислительных комплексов.

Список используемых источников

1. Miller S.E. Integrated optics: An introduction // The Bell System Technical Journal. 1969. Vol. 48. Iss. 7. PP. 2059–2069. DOI:10.1002/j.1538-7305.1969.tb01165.x
2. 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
3. Cai D., Neyer A. 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

4. Immonen M., Karppinen M., Kivilahti J.K. 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
5. 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
6. 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. DOI:10.18453/rosdoc_id00002429
7. Pitwon R., Immonen M., Wang K., Itoh H., Shioda T., Wu J., et al. International standards for optical circuit board fabrication, assembly and measurement // Optics Communications. 2016. Vol. 362. PP. 22–32. DOI:10.1016/j.optcom.2015.09.070
8. Pitwon R., Wang K., Immonen M., Wu J., Zhu L.X., Yan H.J. et al. International standardisation of optical circuit board measurement and fabrication procedures // Proceedings of the 15th Conference on Optical Interconnects (SPIE OPTO, San Francisco, United States, 7–12 February 2015). SPIE, 2015. Vol. 9368. DOI:10.1117/12.2077654
9. Manvelova T.A., Tarasov S.A., Ivanov N.N. 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
10. Bamiedakis N., Hashim A., Pentty R.V., White I.H. Regenerative polymeric bus architecture for board-level optical interconnects // Optics Express. 2012. Vol. 20. Iss. 11. PP. 11625–11636. DOI:10.1364/OE.20.011625
11. 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
12. Радзиевская Т.А., Ламкин И.А., Тарасов С.А., Иванов Н.Н. Технологические способы снижения факторов роста поверхностных дефектов полимерных планарных оптических волноводов // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 6. № 6. С. 469–476. DOI:10.17586/0021-3454-2021-64-6-469-476
13. Chang-Yen D.A., Eich R.K., Gale B.K. Monolithic PDMS Waveguide System Fabricated Using Soft-Lithography Techniques // Journal of Lightwave Technology. 2005. Vol. 23. Iss. 6. PP. 2088–2093.
14. Панов М.Ф., Соломонов А.В. Физические основы фотоники: Учебное пособие. СПб.: Издательство «Лань», 2017. 564 с.
15. Григорьев Л.В. Кремниевая фотоника: Учебно-методическое пособие по практическим работам. СПб.: Университет ИТМО, 2015. 69 с.

* * *

Analysis of Optical Losses in Polymer Optoelectronic Bus of a New Generation Printed Circuit Boards

T. Radzievskaya^{1, 2} 

¹Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI",
St. Petersburg, 197376, Russian Federation

²JSC «Avangard»,
St. Petersburg, 195271, Russian Federation

Article info

DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-1-84-90

Received 5th October 2021

Revised 7th February 2022

Accepted 10th February 2022

For citation: Radzievskaya T. Analysis of Optical Losses in Polymer Optoelectronic Bus of a New Generation Printed Circuit Boards. *Proc. of Telecom. Universities*. 2022;8(1):84–90. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-1-84-90

Abstract: *The article considers individual factors of loss growth in polymer planar optical waveguides, which are included in the composition of optical-electronic buses, introduced in perspective new generation printing boards. The article proposes several approaches to reducing losses in optical radiation, which include losses at the end of the optical waveguide and the light transition to the input/output element of the optoelectronic bus of the printed circuit board. According to the results of modelling the modal structure of a polymer planar optical waveguide, made from a polymer material, polydimethylsiloxane (PDMS), in the software environment of Comsol Multiphysics, the dimensions of the core optical waveguide are determined, providing a single-mode structure of an optical waveguide. A*

measuring stand was developed and assembled for calculating the transmission losses in polymer planar optical waveguides of the optoelectronic bus of a printed circuit board, which meets the requirements of IEC 62596-2: 2017. The minimum measured loss in the manufactured polymer planar optical waveguides was 20 dB, which corresponds to foreign analogues of the optical-electronic bus of the printed circuit board.

Keywords: polymer planar optical waveguides, optoelectronic data bus, PDMS, transmission losses, measurement stand, Comsol Multiphysics.

References


1. Miller S.E. Integrated optics: An introduction. *The Bell System Technical Journal*. 1969;48(7):2059–2069. DOI:10.1002/j.1538-7305.1969.tb01165.x
2. 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
3. Cai D., Neyer A. 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
4. Immonen M., Karppinen M., Kivilahti J.K. 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
5. 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
6. 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. DOI:10.18453/rosdoc_id00002429
7. Pitwon R., Immonen M., Wang K., Itoh H., Shioda T., Wu J., et al. International standards for optical circuit board fabrication, assembly and measurement. *Optics Communications*. 2016;362:22–32. DOI:10.1016/j.optcom.2015.09.070
8. Pitwon R., Wang K., Immonen M., Wu J., Zhu L.X., Yan H.J. et al. International standardisation of optical circuit board measurement and fabrication procedures. *Proceedings of the 15th Conference on Optical Interconnects, SPIE OPTO, 7–12 February 2015, San Francisco, United States*. SPIE; 2015. vol.9368. DOI:10.1117/12.2077654
9. Manvelova T.A., Tarasov S.A., Ivanov N.N. 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
10. Bamiedakis N., Hashim A., Penty R.V., White I.H. Regenerative polymeric bus architecture for board-level optical interconnects. *Optics Express*. 2012;20(11):11625–11636. DOI:10.1364/OE.20.011625
11. 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
12. Radzievskaya T.A., Lamkin I.A., Tarasov S.A., Ivanov N.N. Technological methods for reducing the growth factors of surface defects in polymer planar optical waveguides. *Journal of Instrument Engineering*. 2021;64(6):469–476 (in Russ.) DOI:10.17586/0021-3454-2021-64-6-469-476
13. Chang-Yen D.A., Eich R.K., Gale B.K. Monolithic PDMS Waveguide System Fabricated Using Soft-Lithography Techniques. *Journal of Lightwave Technology*. 2005;23(6):2088–2093.
14. Panov M.F., Solomonov A.V. *Physical Foundations of Photonics*. St. Petersburg: Lan' Publ.; 2017. 564 p. (in Russ.)
15. Grigoriev L.V. *Silicon Photonics*. St. Petersburg: ITMO University Publ.; 2015. 69 p. (in Russ.)

Сведения об авторе:

РАДЗИЕВСКАЯ
Тамара Александровна

аспирант кафедры фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), ведущий инженер-технолог Центра Микросистемотехники ОАО «Авангард»,

tamaramanvelova239@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-6360-810X>