

DOI: 10.51790/2712-9942-2021-2-2-2

## ВЫСОКОСКОРОСТНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ШИНЫ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ НА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТАХ ДЛЯ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

**А. С. Ахманов<sup>1,2</sup>, В. И. Соколов<sup>1,2</sup>, В. Я. Панченко<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация*

<sup>2</sup> *Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», г. Москва, Российская Федерация*

**Аннотация:** рассмотрены вопросы формирования оптического интерконнекта между СБИС на печатных платах с использованием фторсодержащих полимерных материалов. Обсуждаются различные аспекты технологии УФ-фотолитографии для создания полимерных волноводов. Приводятся результаты исследований, направленных на формирование высокоскоростной оптической шины передачи данных для микропроцессорных вычислительных систем (суперЭВМ) с использованием массивов полимерных волноводов на печатной плате.

**Ключевые слова:** оптические межсоединения, полимерные волноводы, оптическая шина передачи данных на печатной плате, суперЭВМ.

**Благодарности:** авторы благодарят академика В. Б. Бетелина за активную поддержку концепции развития оптических межсоединений для суперЭВМ и плодотворные обсуждения. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-29-20102).

**Для цитирования:** Ахманов А. С., Соколов В. И., Панченко В. Я. Высокоскоростные оптические шины передачи данных на печатных платах для микропроцессорных вычислительных систем. *Успехи кибернетики*. 2021;2(2):21–28. DOI: 10.51790/2712-9942-2021-2-2-2.

## CPB HIGH-SPEED OPTICAL DATA BUSES FOR MICROPROCESSOR SYSTEMS

**Alexander S. Akhmanov<sup>1,2</sup>, Viktor I. Sokolov<sup>1,2</sup>, Vladislav Ya. Panchenko<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Shubnikov Institute of Crystallography, Federal Research Center Crystallography and Photonics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

<sup>2</sup> *Federal State Institution “Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences”, Moscow, Russian Federation*

**Abstract:** the study deals with the optical interconnect between VLSIs on a PCB with fluorine-containing polymers. Various aspects of the UF photolithography for making polymer waveguides are discussed. The results of the research aimed at making a high-speed optical data bus for SoC (supercomputers) with PCB polymer waveguide arrays.

**Keywords:** optical interconnects, polymer waveguides, PCB optical data bus, supercomputer.

**Acknowledgements:** we would like to thank V. Betelin, a member of the Russian Academy of Sciences, for his prominent support of the supercomputer optical interconnects, and instructive discussions. This study is supported by RFBR, project No. 18-29-20102.

**Cite this article:** Akhmanov A. S., Sokolov V. I., Panchenko V. Ya. CPB High-Speed Optical Data Buses for Microprocessor Systems. *Russian Journal of Cybernetics*. 2021;2(2):21–28. DOI: 10.51790/2712-9942-2021-2-2-2.

### Введение

Современные микропроцессорные системы создаются путем объединения большого числа сверхбольших интегральных схем (СБИС), выполняющих различные функции (микропроцессоры, схемы памяти, схемы управления и коммутации, управления вводом-выводом и др.), в один модуль с помощью металлических проводников на печатной плате и соединения модулей посредством кросс-плат. Данные между СБИС на печатных платах передаются электрическими сигналами. Быстродействие

микропроцессорной системы в целом зависит от быстродействия входящих в ее состав СБИС, а также от скорости обмена данными между ними. Коммуникационная среда, объединяющая процессоры, память и системы ввода-вывода, является одним из ключевых элементов суперЭВМ.

Наиболее важными параметрами коммуникационной среды (интерконнекта) для перспективных суперЭВМ экзафлопсной производительности являются пропускная способность (ширина полосы BW) и потребляемая мощность. Их оценку можно сделать путем экстраполяции параметров, известных для современных ЭВМ петафлопсной производительности. В настоящее время введены в эксплуатацию несколько суперЭВМ производительностью 20–200 петафлоп/сек. Потребляемая мощность этих ЭВМ находится в диапазоне 2–30 МВт, мощность, потребляемая интерконнектом, составляет около 30 % полной мощности.

Интегральной характеристикой скорости передачи данных является бисекционная пропускная способность интерконнекта, т.е. скорость передачи между двумя условными половинами ЭВМ. Для эффективной работы ЭВМ производительностью несколько петафлопс, бисекционная пропускная способность составляет порядка 100 Тбит/сек, число отдельных каналов связи достигает  $10^6$ . Масштабирование этих параметров на ЭВМ производительностью 1 экзафлопс дает оценку потребляемой мощности порядка 50 МВт, что требует разработки принципиально новых методов передачи и обработки данных в ЭВМ.

Бисекционная пропускная способность интерконнекта экзафлопсной ЭВМ должна находиться в диапазоне 100 Петабит/сек – 1 Экзабит/сек, а число каналов связи  $10^8$ – $10^9$ . При этом энергопотребление в одном канале должно составлять 1 пикоДжоуль/бит – 100 фемтоДжоулей/бит, или 0,1–1 мВт/Гбит/сек. Выше приведены средние оценки параметров интерконнекта в экзафлопсной ЭВМ, позволяющие указать область параметров для исследований и разработок новых технологий его создания. Интерконнект является сложной иерархической системой и состоит из подсистем коммуникаций: внутри процессорного ядра (1 мм), между ядрами и памятью на процессорном кристалле (1 см), между процессорами на вычислительном узле (node, печатная плата 10–50 см), в модуле между печатными платами (backplane кросс-панель 100 см), между модулями в стойке (1–3 м) и между стойками (10–100 м). Необходимые скорости передачи на каждой из этих ступеней существенно зависят от конкретной архитектуры вычислительной системы.

Коммуникационные среды, основанные на электрических линиях связи, существенно ограничены по быстродействию и параллелизму вследствие физических ограничений, поэтому перспективным является переход на оптические линии на всех уровнях иерархии. Основные преимущества оптических технологий для высокоскоростной передачи информации в суперЭВМ и микропроцессорных системах следующие:

- существенное уменьшение временных задержек (оптические сигналы распространяются со скоростью света);
- ширина полосы среды практически не ограничена — до 100 ТГц. Скорость передачи по одному каналу определяется только полосами источника света и фотоприемника;
- для увеличения информационной емкости канала можно использовать методы мультиплексирования (TDM и WDM);
- фотоны не взаимодействуют друг с другом, можно минимизировать взаимные наводки соседних линий и внешние воздействия;
- меньше проблем с рассеиваемой в тепло мощностью, тепловыделение не увеличивается с длиной соединений;
- нет проблем с согласованием импедансов линий и нагрузок;
- нет ограничений для архитектур, связанных с двумерностью разводки;
- при помощи оптических технологий можно реализовать трехмерные глобальные межсоединения большого числа СБИС;
- оптическую связь можно применять на всех уровнях иерархии межсоединений в суперЭВМ;
- существенное преимущество оптических линий связи состоит также в том, что для увеличения скорости передачи не требуется принципиально изменять архитектуру линий, как это делается для электрических соединений.

Технология оптических межсоединений значительно превосходит технологию электрических соединений по производительности и плотности расположения каналов. Однако необходимость ис-

пользования дополнительных элементов — оптических приемопередатчиков (трансиверов) приводит к усложнению конструкции и неизбежному росту как стоимости, так и потребляемой мощности.

В настоящем исследовании нами описан подход к решению данной проблемы с использованием массивов полимерных оптических волноводов на печатных платах. В отличие от электрических шин на основе металлических проводников, тепловыделение в таком интерконнекте происходит, в основном, при преобразовании электрического сигнала в оптический и обратно, т.е. источниками тепла являются лазеры и фотоприемники. Поэтому для сокращения энергопотребления интерконнекта необходима разработка архитектур и топологий, минимизирующих число таких преобразований. Предлагаемый подход к созданию высокоскоростных оптических шин передачи данных на основе «сквозных» оптических каналов предусматривает:

- оптические межсоединения на кристалле (процессорном ядре) и между ядрами с использованием волноводов из кремния в окиси кремния. Поскольку кремниевые волноводы прозрачны в телекоммуникационной области длин волн вблизи 1.5 мкм, именно этот спектральный диапазон представляется оптимальным для «сквозных» межсоединений;

- оптические межсоединения между процессорами на вычислительном узле и между узлами на кросс-плате на основе полимерных волноводов. При этом концепция «сквозных» межсоединений предполагает, что полимерные волноводы на печатной плате состыкованы непосредственно с кремниевыми волноводами на чипе. Отметим, что обычные углеводородные полимерные материалы имеют значительное поглощение вблизи 1.5 мкм. Поэтому для уменьшения оптических потерь и тепловыделения в оптической шине разработаны и исследованы специальные фторсодержащие полимеры, обладающие повышенной оптической прозрачностью и низким поглощением в ближней ИК области спектра;

- соединения между модулями в стойке и между стойками реализуются с помощью жгутов оптических волокон, состыкованных с полимерными волноводами на печатной плате.

В статье приведены результаты совместных исследований, проведенных в Институте проблем лазерных и информационных технологий РАН и Научно-исследовательском институте системных исследований РАН по разработке технологий создания полимерных канальных волноводов на печатных платах. Эти работы ведутся с 2005 года по инициативе академика В.Б. Бетелина.

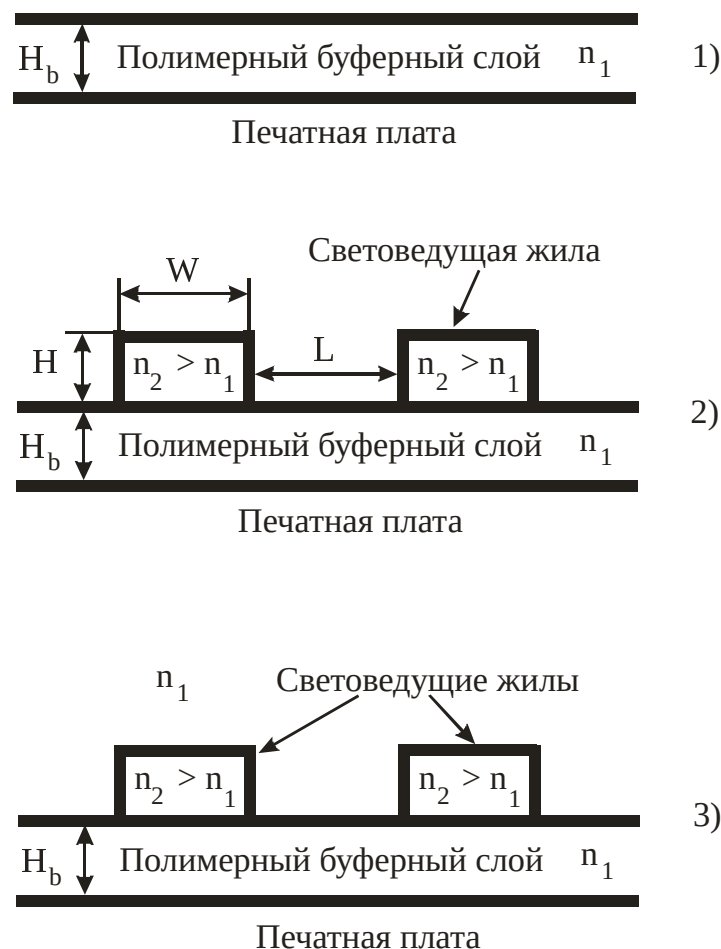
### **Формирование оптических волноводов из фторсодержащих полимерных материалов на печатной плате методом контактной фотолитографии**

Для создания оптических шин передачи данных наиболее перспективными являются полифункциональные акриловые мономеры с большой степенью фторирования. Они обладают высокой оптической прозрачностью в телекоммуникационных диапазонах длин волн и высокой активностью в процессе радикальной фотополимеризации [1–14]. Поэтому такие мономеры могут быть использованы для формирования полимерных волноводов методом УФ-фотолитографии, в основе которого лежит реакция радикальной фотополимеризации мономеров под действием УФ-актинического излучения. Формирование полимерных волноводов методом контактной фотолитографии является трехступенчатым процессом. Он включает формирование на печатной плате буферного полимерного слоя с низким показателем преломления; формирование на буферном слое световедущих жил волноводов путем освещения жидкой композиции с высоким показателем преломления УФ-излучением через фотошаблон; наращивание световедущих жил покровным полимерным слоем с низким показателем преломления, рис. 1.

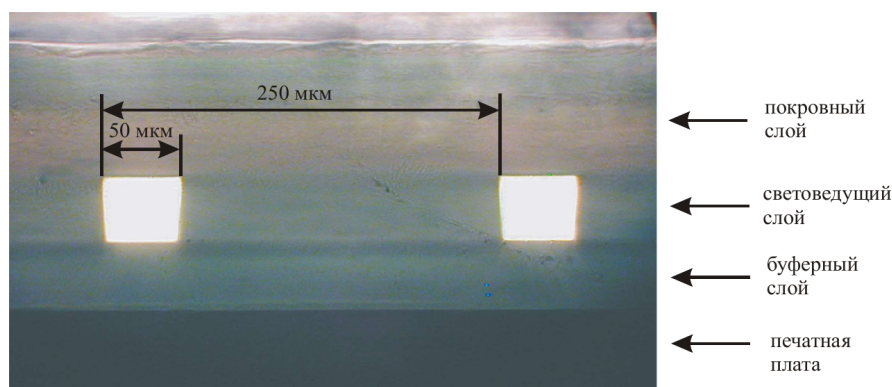
Фотография многомодовых волноводов, изготовленных данным методом, приведена на рис. 2. Ширина и высота волноводов составляет 50 мкм, расстояние между волноводами равно 200 мкм.

#### **1. Формирование массивов полимерных волноводов с высокой степенью интеграции**

Для увеличения степени интеграции полимерных волноводов на печатной плате необходимо уменьшать расстояние между световедущими жилами. Это предъявляет особые требования как к композициям, так и ко всему фотолитографическому процессу. Данная задача была решена путем использования актинического излучения с длиной волны 250–280 нм. Это позволило формировать массивы волноводов с плотностью упаковки до 625 шт/см (рис. 3), что в 2 раза превосходит плотность упаковки волноводов в оптической шине «Green Optical Link», разработанной фирмой IBM [15].



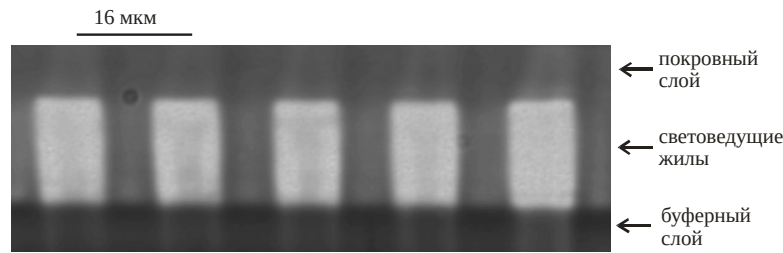
**Рис. 1.** Этапы формирования полимерных волноводов на печатной плате методом УФ-фотолитографии.  $n_1$  и  $n_2$  — показатели преломления буферного слоя и световедущей жилы соответственно,  $W$  — ширина,  $H$  — высота волновода,  $H_b$  — толщина буферного слоя,  $L$  — расстояние между волноводами



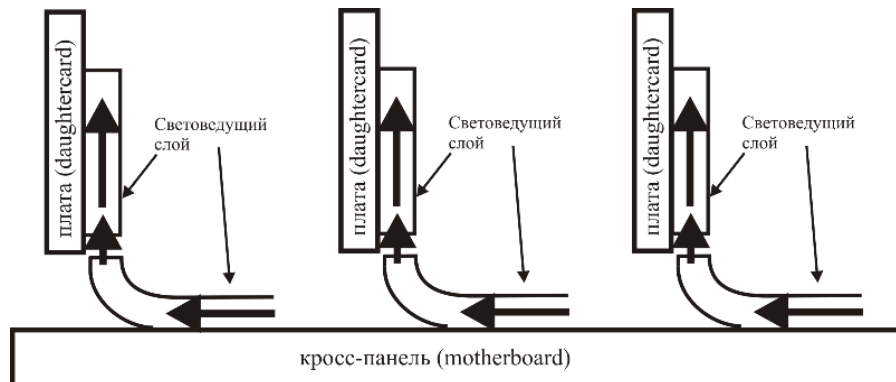
**Рис. 2.** Фотография многомодовых полимерных волноводов, изготовленных на печатной плате методом контактной фотолитографии под действием актинического излучения с длиной волны 365 нм. Вид с торца

## 2. Формирование полимерных волноводов на гибких подложках

Идея интегрально-оптического интерконнекта на печатной плате, позволяющего объединить массивы полимерных волноводов на кросс-плате и дочерних платах в единую оптическую шину передачи данных, иллюстрируется рис. 4. На этом рисунке представлена схема кросс-панели (motherboard) и трех дочерних плат (daughterboard), вставленных в кросс-панель. Оптический сигнал, распространяющийся по полимерному волноводу на кросс-панели, перенаправляется в полимерный волновод на



**Рис. 3.** Фотография массива полимерных волноводов, сформированных на печатной плате методом УФ-фотолитографии под действием излучения с длиной волны 250–280 нм. Ширина и высота волноводов составляют 10 и 15 мкм соответственно, расстояние между световедущими жилами равно 6 мкм



**Рис. 4.** Схема оптического интерконнекта на основе полимерных волноводов на гибкой подложке. Стрелками показано направление распространения оптического сигнала от кросс-платы к дочерним платам

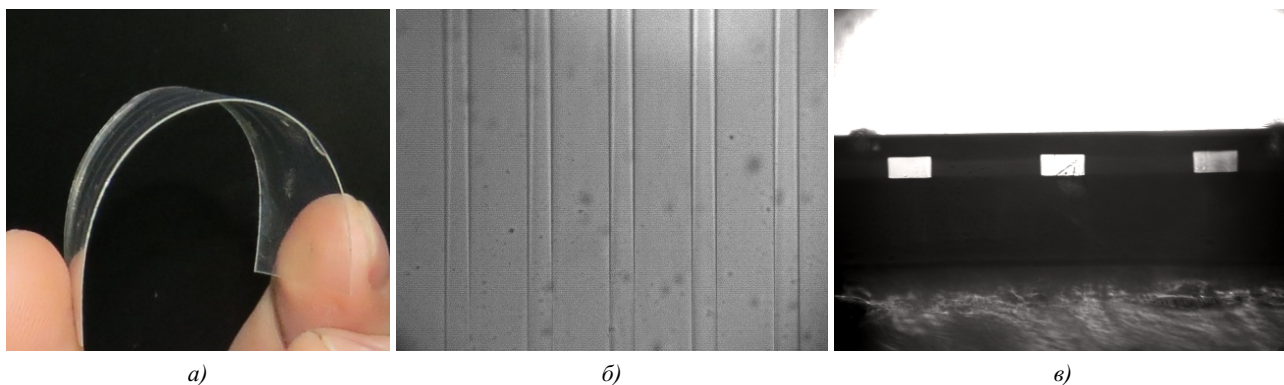
дочерней плате, претерпевая поворот на 90 градусов.

Конкретная реализация оптического интерконнекта может быть осуществлена с помощью массивов полимерных волноводов на гибких пластиковых подложках, допускающих поворот на 90 градусов при радиусе изгиба 10–20 мм. Преимуществами шлейфов на основе полимерных волноводов по сравнению с волоконно-оптическими шлейфами являются более высокая плотность упаковки волноводов в массиве и простота формирования торцов.

Для создания гибких оптических межсоединений использовались композиции из фторсодержащих мономеров — акрилатов. Вид шлейфа, включающего двенадцать волноводов, дан на рис. 5 [16, 17]. Ширина волноводов составляет 40 мкм, высота — 20 мкм, расстояние между волноводами в массиве — 120 мкм. Торец шлейфа, показанный на рис. 5в, получен методом скрайбирования пластиковой подложки с последующим сколом по линии надсечки.

### 3. Формирование оптических межсоединений в нескольких уровнях многослойной печатной платы

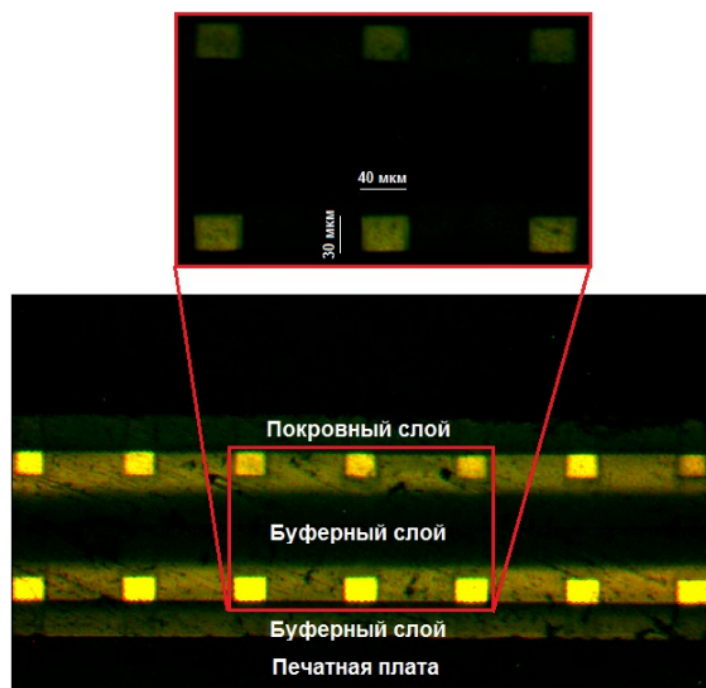
При создании оптоэлектронных печатных плат с интегрированной оптической шиной передачи данных желательно иметь возможность размещать полимерные волноводы в нескольких уровнях многослойной платы. Это позволяет, с одной стороны, существенно расширить пропускную способность оптической шины, а с другой — открывает новые возможности для архитектурных решений при создании оптических межсоединений для перспективных суперЭВМ повышенной производительности. Однако размещение волноводов в нескольких уровнях печатной платы предъявляет более жесткие требования к термической стабильности используемых полимеров. В частности, они должны выдерживать кратковременный нагрев до температур 200–230 °С в течение нескольких десятков минут и до температур 170–180 °С в течение нескольких часов без ухудшения оптических свойств. Такой диапазон температур диктуется требованиями современного технологического процесса производства многослойных печатных плат, который включает термическое спекание отдельных плат при повышенном



**Рис. 5.** Общий вид шлейфа на гибкой пластиковой подложке, включающего двенадцать полимерных волноводов (а). Фотография полимерных волноводов в шлейфе: вид сверху (б) и с торца (в)

давлении. Композиции на основе фторсодержащих акрилатов удовлетворяют требованиям по термической стойкости. Это обусловлено тем фундаментальным обстоятельством, что энергия разрыва связи С-Ф выше энергии разрыва связи С-Н. Поэтому полимеры, имеющие высокую степень фторирования, более устойчивы к повышенным температурам, чем их углеводородные аналоги.

Фотография изготовленных массивов полимерных волноводов, расположенных в двух слоях печатной платы, представлена рис. 6 [16, 17]. Ширина и высота волноводов составляют 40 и 30 мкм соответственно, расстояние между ними равно 120 мкм.



**Рис. 6.** Образец двухслойного массива полимерных волноводов, сформированных на печатной плате методом контактной УФ-фотолитографии (вид с торца)

#### 4. Формирование оптических волноводов со скошенным торцом

В настоящее время в качестве источников и приемников излучения в оптической шине используются линейки полупроводниковых лазеров с вертикальным выводом излучения и матрицы фотоприемников, расположенные в плоскости печатной платы. Ввод излучения из лазеров в волноводы и вывод его из волноводов к фотоприемнику может быть осуществлен с использованием волноводов со скошенными под углом 45 градусов торцами. Это позволяет осуществить поворот луча на 90 градусов за счет эффекта полного внутреннего отражения, тем самым обеспечивая стыковку излучателей и фотоприемников с полимерными волноводами, см. рис. 7 [16, 17].

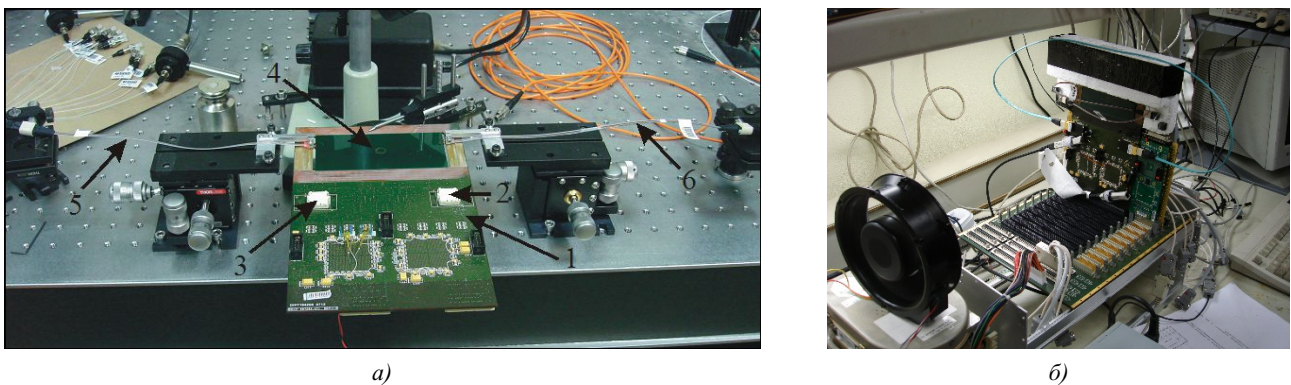




**Рис. 7.** (а) Схема волновода со скошенными под углом 45 градусов торцами для стыковки его с фотоприемниками (1) и излучателями (2). (б) Фотография изготовленного полимерного волновода со скошенным торцом

### Создание оптической шины передачи данных на оптоэлектронной печатной плате для микропроцессорных вычислительных устройств

ИПЛИТ РАН совместно с НИИСИ РАН впервые в России изготовил макетный образец полимерной оптической шины на печатной плате FR4 для микропроцессорных вычислительных систем [16, 17]. Шина имеет 12 каналов передачи оптических сигналов со скоростями более 10 Гбит/с на канал. Фотография макетного образца оптоэлектронной платы с интегрированной в нее оптической шиной представлена на рис. 8а, а на рис. 8б дана фотография этого образца, помещенного в кейт компьютера. Суммарная скорость передачи оптических сигналов по изготовленной оптической шине превышает 120 Гбит/сек.



**Рис. 8.** Макетный образец полимерной оптоэлектронной печатной платы с интегрированной в нее полимерной оптической шиной на сборочном стенде (а) и в кейте компьютера (б). 1 — печатная плата FR4, 2 и 3 — BGA-разъемы для подключения трансиверов, 4 — массив из 12 полимерных волноводов, 5 и 6 — многожильные волоконно-оптические кабели

### Заключение

В работе описан подход к созданию высокоскоростного оптического интерконнекта для супер-ЭВМ на основе «сквозных» оптических каналов, который предусматривает оптические межсоединения на кремниевом чипе (процессорном ядре) с использованием кремниевых волноводов, оптические межсоединения между процессорами на кросс-плате на основе фторполимерных волноводов, соединения между модулями в стойке и между стойками с помощью жгутов оптических волокон, состыкованных с полимерными волноводами на печатной плате.

Экспериментально продемонстрировано, что методом УФ-фотолитографии с использованием фторсодержащих акрилатов можно формировать базовые элементы оптического интерконнекта на печатной плате: массивы полимерных волноводов с плотностью упаковки более 500 шт/см, волноводы на гибких подложках, многослойные волноводные структуры, волноводы со скошенными торцами для стыковки с лазерами и фотоприемниками, расположенными в плоскости печатной платы.

Представлены характеристики макетного образца полимерной оптической шины на печатной плате FR4 для микропроцессорных вычислительных систем. Шина имеет 12 каналов передачи оптических сигналов со скоростями более 10 Гбит/с на канал. Суммарная скорость передачи оптических сигналов по изготовленной оптической шине превышает 120 Гбит/сек.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Zhou M. Low-Loss Polymeric Materials for Passive Waveguide Components in Fiber Optical Telecommunication. *Optical Engineering*. 2002;41(7):1631–1643.
2. Khanarian. G., Celanese H. Optical Properties of Cyclic Olefin Copolymers. *Optical Engineering*. 2001;40(6):1024–1029.
3. Eldada L., Shacklette L. W. Advances in Polymer Integrated Optic. *IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2000;6(1):54–68.
4. Han K., Kim D. B., Jang W. H., Rhee T. H. Chloro-Fluorinated Polyimides for Low Loss Optical Waveguides Application. *Jpn. J. Appl. Phys.* 1999;38:L1249–L1251.
5. Erdogan T. Fiber Grating Spectra. *J. of Lightwave Technology*. 1997;15:1277–1294.
6. Sokolov V. I., Mishakov G. V., Panchenko V. Ya., Tsvetkov M. Yu. Routes to Polymer-Based Photonics. *Optical Memory and Neural Networks Information Optics*. 2007;16(2):67–74.
7. Sokolov V. I., Panchenko V. Ya., Seminogov V. N. Narrowband 1.5- $\mu\text{m}$  Bragg Filter Based on a Polymer Waveguide with a Laser-Written Refractive-Index Grating. *Quantum Electronics*. 2010;40(8):739–742.
8. Ahn S. W., Steier W. H., Kuo Y. H. Integration of Electro-Optic Polymer Modulators with Low-Loss Fluorinated Polymer Waveguides. *Optics Letters*. 2002;27(23):2109–2111.
9. Groh W. Overtone Absorption in Macromolecules for Polymer Optical Fibers. *Macromol. Chem.* 1998;189:2861–2874.
10. Offrein B. J., Berger C., Beyeler R., Dangel R., Dellman L., Horst F., Lamprecht T., Meier N., Budd R., Libsch F., Kash J. Parallel Optical Interconnects in Printed Circuit Boards. *Proc. of SPIE*. 2005;5990:59900E1-59900E9.
11. Ахманов А. С., Наний О. Е., Панченко В. Я. Оптическая передача информации в супер - ЭВМ и микропроцессорных системах. *Lightwave (Russian edition)*. 2008;3:46–49.
12. Doany F. E., Show C. L., Baks C. W., Kuchta D. M., Pepeljugoski P., Schares L., Budd R., Libsch F., Dangel R., Horst F., Offrein B. J., Kash J. A. 160 Gb/s Bidirectional Polymer-Waveguide Board-Level Optical Interconnects Using CMOS-based Transceivers. *IEEE Transactions on advanced packaging*. 2009;32(2):345–359.
13. Igumnov S. M., Sokolov V. I., Men'shikov V. K., Mel'nik O. A., Boiko V. E., Dyachenko V. I., Nikitin L. N., Khaidukov E. V., Yurkov G. Yu., Buznik V. M. Fluorinated Monomers and Polymers with Specific Properties for Integrated Optics and Photonics. *Doklady Chemistry*. 2012;446, Part 1:183–187. DOI: 10.1134/S0012500812090066.
14. Соколов В. И., Ахманов А. С., Игумнов С. М., Людвигсен Х., Панченко В. Я., Савельев А. Г., Хайдуков Е. В., Хайдуков К. В. Формирование массивов фторполимерных волноводов, обладающих высокой степенью интеграции, на печатной плате. *Перспективные материалы*. 2013;S14:249–254.
15. IBM. Режим доступа: <http://www.ibm.com>.
16. Соколов В. И., Ахманов А. С., Игумнов С. М., Молчанова С. И., Савельев А. Г., Тютюнов А. А., Хайдуков Е. В., Хайдуков К. В., Панченко В. Я. Разработка элементной базы высокоскоростных интегрально-оптических устройств на основе новых полимерных материалов. *Вестник РФФИ*. 2014;3(83):78–87.
17. Хайдуков Е. В., Панченко В. Я., Хайдуков К. В., Соколов В. И., Ахманов А. С., Ашарчук И. М., Игумнов С. М., Молчанова С. И., Нечаев А. В., Савельев А. Г., Тютюнов А. А. Интегральная оптика на основе нанокompозитных полимерных материалов. *Вестник РФФИ*. 2015;4(88):68–79.