

DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-01

ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ КОММУТАЦИЯ СИГНАЛОВ В ОПТИЧЕСКОЙ ШИНЕ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ НА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЕ

В. И. Соколов^{1,2}, А. С. Ахманов^{1,2,a}, И. О. Горячук¹, В. Я. Панченко¹

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

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

^a ✉ asakhmanov@mail.ru

Аннотация: рассмотрены вопросы высокоскоростной коммутации сигналов в оптической шине передачи данных на печатной плате. Для создания оптических коммутаторов предлагается использовать каскады волноводных интерферометров Маха–Цендера на основе электрооптических полимеров с фторсодержащими хромофорами в боковой цепи, способными изменять показатель преломления под действием приложенного электрического поля. Такие коммутаторы обладают высоким быстродействием и обеспечивают частоты переключения на уровне 100 ГГц. Предложен подход к формированию одномодовых волноводов и волноводных интерферометров Маха–Цендера в электрооптических полимерах, основанный на лазерном фотоосветлении хромофоров, которое сопровождается уменьшением показателя преломления полимера под действием излучения видимого диапазона.

Ключевые слова: оптическая шина, полимерные волноводы, световые импульсы, оптоэлектронные печатные платы, высокоскоростная коммутация, электрооптические полимеры.

Благодарности: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части создания электрооптических полимеров, а также государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН в части разработки архитектуры оптического интерконнекта с динамической коммутацией каналов.

Для цитирования: Соколов В. И., Ахманов А. С., Горячук И. О., Панченко В. Я. Высокоскоростная коммутация сигналов в оптической шине передачи данных на печатной плате. *Успехи кибернетики*. 2022;3(4):7–13. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-01.

HIGH-SPEED SIGNAL SWITCHING IN A PCB OPTICAL DATA BUS

V. I. Sokolov^{1,2}, A. S. Akhmanov^{1,2,a}, I. O. Goryachuk¹, V. Ya. Panchenko¹

¹ *Federal Research Center for Crystallography and Photonics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

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

^a ✉ asakhmanov@mail.ru

Abstract: the study considers high-speed switching in an optical bus on a printed circuit board (PCB). We proposed to use cascades of Mach–Zehnder waveguide interferometers to build optical switches. The interferometers are made of electro-optical polymers with fluorine-containing chromophores in the side chain. The substance changes its refractive index when an electric field is applied. Such switches are fast: the switching frequency is up to 100 GHz. The authors also proposed an approach to the manufacturing of single-mode waveguides and Mach–Zehnder waveguide interferometers in electro-optical polymer using laser photo-clarification of chromophores. Visible light decreases the refractive index decrease of the polymer.

Keywords: optical bus, polymer waveguides, light pulses, optoelectronic PCB, high-speed switching, electro-optical polymers.

Acknowledgements: this work was supported by the Russian Ministry of Science and Higher Education under a government contract with the Federal Research Center for Crystallography and Photonics, Russian Academy of Sciences, for the development of electro-optical polymers, and a government contract with the Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences, for the development of an optical interconnect architecture with dynamic channel switching.

Cite this article: Sokolov V. I., Akhmanov A. S., Goryachuk I. O., Panchenko V. Ya. High-Speed Signal Switching in a PCB Optical Data Bus. *Russian Journal of Cybernetics*. 2022;3(4):7–13. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-01.

Введение

Коммуникационная среда, объединяющая процессоры, память и системы ввода-вывода, является одним из ключевых элементов микропроцессорных вычислительных систем. Коммуникационные среды, основанные на электрических линиях связи, существенно ограничены по быстродействию и параллелизму вследствие физических ограничений, поэтому перспективным является переход на оптические линии передачи данных на всех уровнях иерархии. В работе [1] нами описан подход к решению этой проблемы с использованием массивов полимерных оптических волноводов на печатных платах. Для уменьшения числа каналов (волноводов) их информационная емкость может быть увеличена применением технологии спектрального уплотнения (WDM или DWDM). Разделение оптических каналов в оптической шине на печатной плате в предлагаемой архитектуре может осуществляться на основе технологий мультиплексирования и спектрального разделения каналов.

Архитектура оптического интерконнекта может быть также реализована с использованием топологий с динамической коммутацией каналов. Однако для этого необходимо использовать высокоскоростные коммутаторы оптических сигналов. Работы по созданию таких коммутаторов в настоящее время ведутся во многих ведущих мировых лабораториях, причем одним из наиболее перспективных направлений является использование электрооптических (ЭО) полимеров, показатель преломления которых изменяется под действием приложенного постоянного электрического поля.

Электрооптические полимерные материалы находят широкое применение при создании интегрально-оптических модуляторов с частотой порядка 100 ГГц, высокоскоростных переключателей и маршрутизаторов, работающих в телекоммуникационных диапазонах длин волн вблизи 0,85, 1,3 и 1,55 мкм [2–9]. Для создания таких материалов используются хромофоры, способные изменять показатель преломления под действием приложенного электрического поля. Электрооптический полимер может быть изготовлен либо путем внедрения молекул хромофора в пассивную полимерную матрицу [5–7], либо путем их ковалентного встраивания в боковые цепи полимерных макромолекул [8–10]. Последний подход более перспективен, поскольку препятствует агрегации хромофоров, приводящей к снижению электрооптического коэффициента r_{33} . Важное значение имеет синтез новых электрооптических хромофоров, которые, наряду с большим электрооптическим коэффициентом r_{33} , обладают высокой оптической прозрачностью в ближней ИК-области спектра, особенно в телекоммуникационном С-диапазоне 1530–1565 нм. Повышение прозрачности может быть достигнуто путем использования фторсодержащих хромофоров и полимеров. Это связано с тем, что замена легких атомов водорода на более тяжелые атомы фтора приводит к смещению колебательных полос поглощения в сторону больших длин волн [11]. В результате уменьшается коэффициент затухания света и открываются окна прозрачности в телекоммуникационных областях.

В настоящее время известны различные типы фторсодержащих ЭО полимеров (см., например, обзор [12]). Ниже мы приводим оригинальные результаты по созданию новых видов таких материалов, которые способны к пленкообразованию и могут быть использованы для создания высокоскоростных коммутаторов оптических сигналов в оптической шине передачи данных на печатной плате. Обсуждаются схемы коммутаторов на основе каскадов волноводных интерферометров Маха–Цендера. Предложен подход к формированию одномодовых волноводов, волноводных разветвителей и интерферометров Маха–Цендера в электрооптических полимерах, основанный на лазерном фотоосветлении хромофоров, которое сопровождается уменьшением показателя преломления полимера.

Электрооптические полимеры с ковалентно присоединенными фторсодержащими хромофорами в боковой цепи

Синтезированные электрооптические полимеры с фторсодержащими хромофорами в боковой цепи представлены на рис. 1 [13, 14]. Данные полимеры способны к пленкообразованию и могут быть использованы для создания высокоскоростных коммутаторов оптических сигналов.

В свеженанесенной световедущей пленке, изготовленной из электрооптического полимера, молекулы хромофоров (диполи) расположены хаотично, поэтому материал является изотропным, см. рис. 2а. Для получения электрооптического эффекта необходимо ориентировать (выстроить) хромофоры в

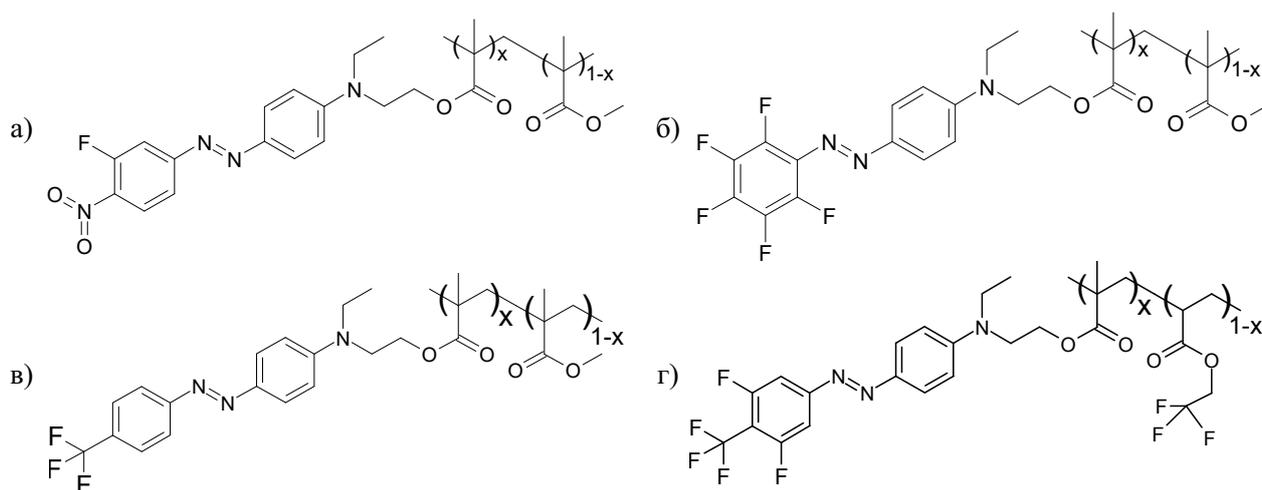


Рис. 1. Электрооптические полимеры с фторсодержащими хромофорами в боковой цепи. x — молярная концентрация звеньев с хромофорами в макромолекуле полимера

полимерной матрице так, чтобы диполи были направлены перпендикулярно плоскости пленки. Выстраивание хромофоров осуществляется, как правило, в сильном электрическом поле при одновременном нагреве полимера до температуры T , превышающей температуру его стеклования T_g . При $T > T_g$ полимер переходит в вязкотекучее состояние, подвижность хромофорных диполей увеличивается, происходит их разворот и выстраивание вдоль поля, см. рис. 2б. После охлаждения образца до температуры, меньшей температуры стеклования (при сохранении приложенного электрического поля), ориентация диполей в направлении, перпендикулярном плоскости пленки, «замораживается».

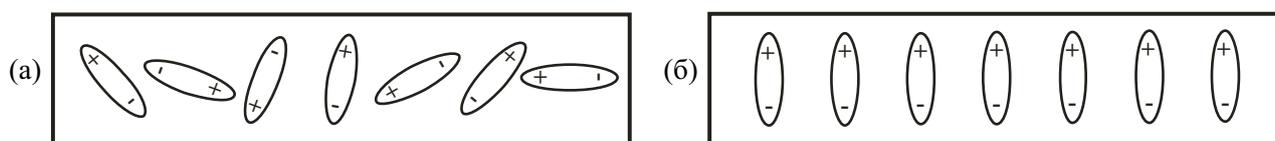


Рис. 2. Ориентация ЭО хромофорных диполей в световедущей полимерной пленке до (а) и после (б) их выстраивания под действием приложенного электрического поля

Лазерное формирование волноводов в ЭО полимерах

Световедущие пленки из ЭО полимеров толщиной 2–4 мкм формировались методом центрифугирования из растворов полимеров в хлорбензоле на кварцевых подложках, а также на кремниевых подложках с термически выращенным оксидным слоем. Спектр поглощения свеженанесенной на подложку SiO_2 пленки иллюстрируется кривой 1 на рис. 3, причем на вставке к этому рисунку показана структура полимера. Видно, что ЭО полимеры имеют интенсивные полосы поглощения с центрами вблизи 429 и 266 нм, обусловленные собственным поглощением света молекулами хромофора.

На рис. 3 приведен также спектр поглощения данной пленки после экспонирования излучением диодного лазера с длиной волны 440 нм, расположенной вблизи пика поглощения хромофора 429 нм. Из сравнения кривых 1 и 2 следует, что в процессе экспонирования интенсивность полос поглощения с центрами вблизи 429 и 266 нм уменьшается, при этом возникают новые полосы поглощения с центрами вблизи 349 и 247 нм. Такое изменение спектра поглощения обусловлено необратимой фотодеструкцией хромофора с потерей окраски (эффект фотоосветления [7, 13, 14]).

Фотодеструкция молекул хромофоров сопровождается изменением их поляризуемости и, как следствие, изменением показателя преломления n полимерного материала. Для определения величины изменения показателя преломления Δn методом центрифугирования на кремниевых подложках с термически выращенным «толстым» оксидным слоем (толщина оксидного слоя 2.1 мкм) были изготовлены световедущие пленки из ЭО полимера. Измерение показателя преломления полимера в процессе фотоосветления осуществлялось методом резонансного возбуждения волноводных мод в пленке на

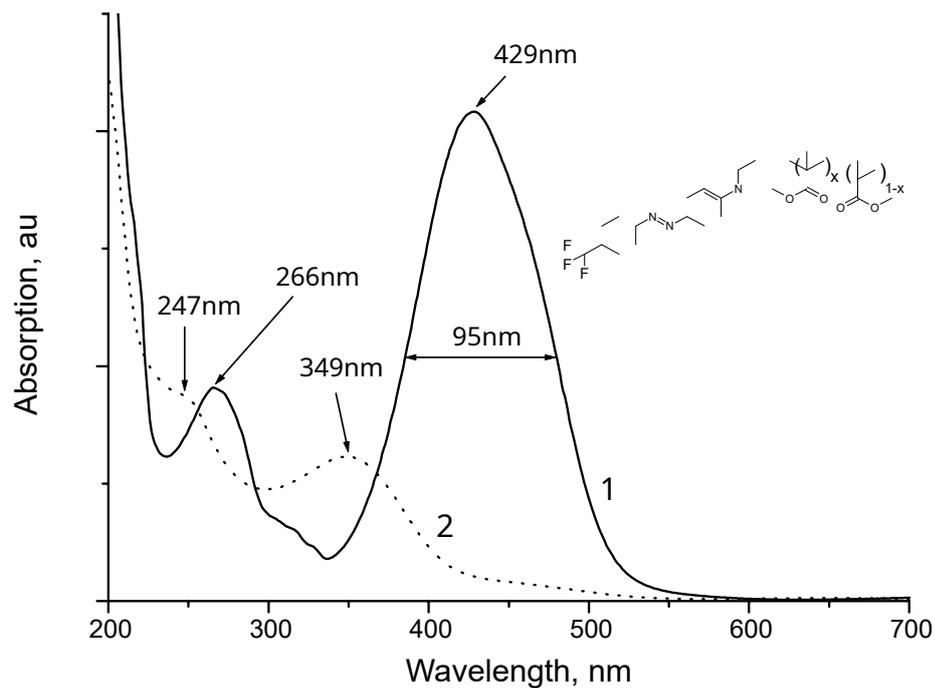


Рис. 3. Спектр поглощения световедущей пленки из ЭО полимера до (1) и после (2) экспонирования лазерным излучением с длиной волны 440 нм. На вставке показана молекулярная структура полимера

длине волны 632.8 нм с использованием призмного устройства связи Metricon2010M. Было установлено, что показатель преломления полимера монотонно уменьшается в процессе фотоосветления, причем уменьшение может достигать $\Delta n = 0.028$ [7, 13, 14]. Такое изменение является достаточным для формирования канальных оптических волноводов с числовой апертурой ЧА = 0.29. Отметим, что под действием актинического лазерного излучения в полимерной пленке образуются области с пониженным показателем преломления, служащие оболочкой волновода, а неэкспонированный электрооптический материал является световедущей жилой, в которой распространяется оптическое излучение (рис. 4).

На рис. 5 приведена фотография массива канальных оптических волноводов, сформированного в пленке из электрооптического полимера под действием лазерного излучения с длиной волны 440 нм.

На рис. 6 представлена фотография волноводного разветвителя, сформированного данным методом в пленке из ЭО полимера. Темные полосы являются световедущими жилами волноводов, обеспечивающих одномодовый режим распространения оптического излучения в телекоммуникационном С-диапазоне 1530–1565 нм.

Таким образом, путем пространственно-селективного лазерного фотоосветления в световедущих пленках из электрооптических полимеров можно изготавливать канальные оптические волноводы, а также другие элементы интегрально-оптических устройств: волноводные разветвители, направленные ответвители и т. д. Этим методом можно, в частности, формировать волноводные интерферометры Маха–Цендера, которые необходимы для создания высокоскоростных интегрально-оптических модуляторов и коммутаторов.

Высокоскоростные оптические модуляторы и коммутаторы на основе каскадов волноводных интерферометров Маха–Цендера

Схема электрооптического модулятора представлена на рис. 7. Модулятор представляет собой интерферометр Маха–Цендера, изготовленный из одномодовых волноводов. Оптическое излучение поступает на вход интерферометра и разделяется в левом волноводном разветвителе в отношении 50 % : 50 % между верхним и нижним плечами интерферометра, имеющими длину L . Сигналы, распространяющиеся в этих плечах, интерферируют на выходе интерферометра и посредством правого

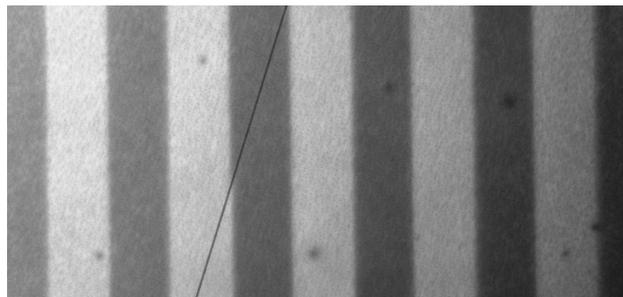
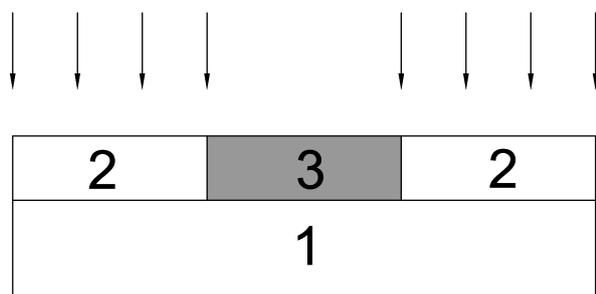


Рис. 4. Схема формирования канальных волноводов в пленке ЭО полимера методом лазерного фотоосветления. 1 – подложка, 2 – осветленные области пленки с более низким показателем преломления (оболочка волновода), 3 – неосветленная область пленки (световедущая жила). Стрелками показан ход актинического лазерного излучения, вызывающего фотоосветление хромофоров

Рис. 5. Фотография массива канальных волноводов, сформированных в пленке из ЭО полимера под действием лазерного излучения с длиной волны 440 нм. Темные полосы с шириной 100 мкм (неосветленные участки) являются световедущими жилами волноводов

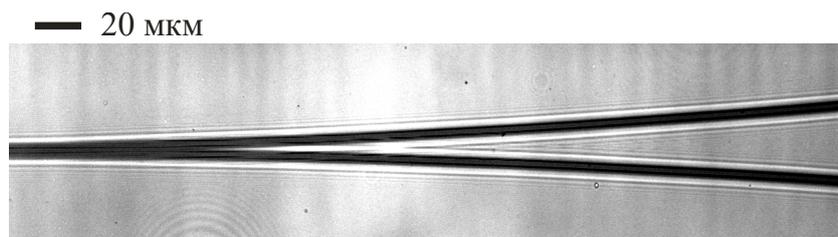


Рис. 6. Фотография волноводного разветвителя, сформированного в пленке из ЭО полимера под действием лазерного излучения с длиной волны 440 нм. Темные полосы шириной 10 мкм (неосветленные участки) являются световедущими жилами волноводов

разветвителя направляются в выходной волновод. Приложение электрического поля к одному из плечей интерферометра (посредством металлического управляющего электрода) приводит к изменению оптической разности хода сигналов, которые могут интерферировать конструктивно (при разности фаз 2π) или деструктивно (если разность фаз π), что приводит к модуляции интенсивности выходного оптического сигнала.

Быстродействие модулятора на основе электрооптических полимеров определяется временем смещения электронного облака от донора к акцептору в хромофорном диполе и составляет согласно современным представлениям менее 1 фс. Практически быстродействие модулятора определяется временем распространения электрического поля по управляющему электроду (см. рис. 7), который в современных устройствах изготавливаются в виде электрода бегущей волны.

На рис. 8 показана схема оптического коммутатора 1×4 на основе каскада из трех волноводных интерферометров Маха–Цендера (MZI). Коммутатор работает следующим образом. Оптический сигнал с длиной волны λ_1 поступает во входной порт первого интерферометра MZI (Вход 1 на рис. 8). Через направленный 3 дБ ответвитель этот сигнал делится в соотношении 50 % : 50 % между плечами этого интерферометра и, в зависимости от вносимой под действием электрического поля разности фаз сигналов в верхнем и нижнем плечах, поступает либо в правый верхний, либо в правый нижний выходной порт этого интерферометра. Аналогичная коммутация оптического сигнала происходит в следующих интерферометрах Маха–Цендера. Таким образом, представленный на рис. 8 волноводный коммутатор позволяет направлять входной оптический сигнал в любой из четырех выходных портов (Выход 1 – Выход 4 на рис. 8).

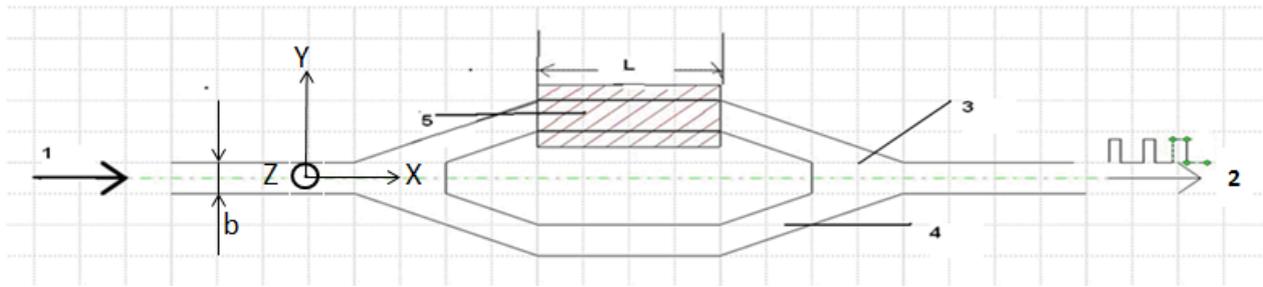


Рис. 7. Схема электрооптического модулятора на основе волноводного интерферометра Маха-Цендера. 1 – непрерывной входной световой сигнал; 2 – модулированный выходной сигнал. Модуляция происходит за счет изменения разности фаз световых волн, распространяющихся в верхнем (3) и нижнем (4) плечах интерферометра при подаче электрического напряжения на управляющий электрод (5) длиной L . X , Y , Z – оси лабораторной декартовой системы координат

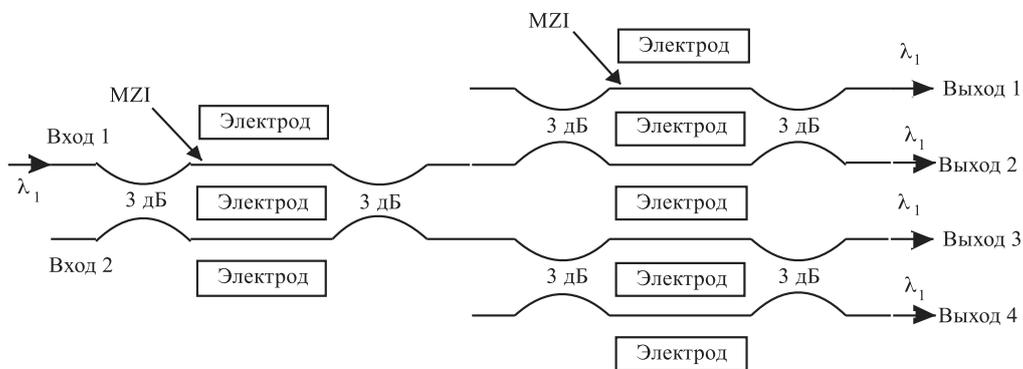


Рис. 8. Схема оптического коммутатора 1×4 на основе каскада из трех волноводных интерферометров Маха-Цендера MZI

Заключение

Синтезированы фторсодержащие электрооптические хромофоры. Разработана методика создания ЭО полимеров с ковалентно присоединенными хромофорами в боковой цепи. Изготовлены световедущие пленки из ЭО полимеров. Показано, что под действием лазерного излучения видимого диапазона происходит фотоосветление полимеров, сопровождающееся уменьшением показателя преломления полимера, что позволяет формировать различные волноводные элементы интегрально-оптических устройств под действием лазерного излучения видимого диапазона. Предложена схема высокоскоростного коммутатора в оптических шинах передачи данных на печатных платах на основе каскадов волноводных интерферометров Маха-Цендера из электрооптических полимеров с фторсодержащими хромофорами в боковой цепи.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Dalton. L., Benight S. Theory-Guided Design of Organic Electro-Optic Materials and Devices. *Polymers*. 2011;3:1325.
3. Liu J., Xu G., Liu F., Kityk I., Liu X., Zhen Z. Recent Advances in Polymer Electro-Optic Modulators. *RSC Advances*. 2015;5:1578.
4. Zhang H., Oh M. C., Szep A., Steier W. H., Zhang C., Dalton L. R., Erlig H., Chang Y., Chang D. H., Fetterman H. R. Push-pull Electro-Optic Polymer Modulators with Low Half-Wave Voltage and Low

- Loss at Both 1310 and 1550 nm. *Applied Physics Letters*. 2001;78(20):3136.
5. Zheng C. T., Zhang L. J., Qv L. C., Liang L., Ma C. S., Zhang D. M., Cui Z. C. Nanosecond Polymer Mach-Zehnder Interferometer Electro-Optic Modulator Using Optimized Micro-Strip Line Electrode. *Opt. Quant. Electron.* 2013;45(3):279.
 6. Nazmieva G. N., Vakhonina T. A., Ivanova N. V., Mukhtarov A. Sh., Smirnov N. N., Yakimansky A. V., Balakina M. Yu., Sinyashin O. G. Testing of the Ways for Synthesis of New Nonlinear Optical Epoxy-Based Polymers with Azochromophores in the Side Chain. *European Polymer Journal*. 2015;63:207–216.
 7. Соколов В. И., Ахманов А. С., Ашарчук И. М., Горячук И. О., Хайдуков К. В., Назаров М. М. Формирование канальных оптических волноводов в полиметилметакрилате с внедренным электрооптическим хромофором DR13 методом фотоосветления. *Оптика и спектроскопия*. 2017;122(3):128–134.
 8. Michel S., Zyss J., Ledoux-Rak I., Nguyen C. T. High-Performance Electro-Optic Modulators Realized with a Commercial Side-Chain DR1-PMMA Electro-Optic Copolymer. *Proceedings of SPIE. Organic Photonic Materials and Devices XII*. 2010;7599:75990I.
 9. Денисюк И. Ю., Бурункова Ю. Э., Позднякова С. А., Баля В. К., Жук Д. И., Фокина М. И. Полимерный электрооптический модулятор для радиофотоники. *Оптика и спектроскопия*. 2015;119(4):691.
 10. Соколов В. И., Ахманов А. С., Василенко Е. С., Горячук И. О., Молчанова С. И., Погодина Ю. Е., Полунин Е. В. Синтез и исследование оптических свойств фторсодержащего хромофора дисперсный оранжевый DO1. *Fluorine Notes*. 2018;5(120):1–2.
 11. Groh W. Overtone Absorption in Macromolecules for Polymer Optical Fibers. *Makromol. Chem.* 1988;189:2861–2874.
 12. Liu J., Xu G., Liu F., Kityk I., Liu X., Zhen Z. Recent Advances in Polymer Electro-Optic Modulators. *RSC Advances*. 2015;5:15784–15794.
 13. Соколов В. И., Ахманов А. С., Ашарчук И. М., Горячук И. О., Молчанова С. И., Погодина Ю. Е., Полунин Е. В., Хайдуков К. В. Фторсодержащие акриловые полимеры с фторсодержащими электрооптическими хромофорами в боковой цепи. *Fluorine notes*. 2020;2(129):1–2.
 14. Соколов В. И., Ахманов А. С., Ашарчук И. М., Горячук И. О., Заварзин И. В., Погодина Ю. Е., Полунин Е. В. Лазерное формирование световодов в электрооптических полимерах с фторсодержащими хромофорами в боковой цепи. *Fluorine Notes*. 2018;6(121):5–6.