

УДК 539.2

## КОМПАКТНЫЙ АМПЛИТУДНЫЙ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЙ МОДУЛЯТОР НА ОСНОВЕ ХРОМОФОРСОДЕРЖАЩИХ ПОЛИИМИДОВ\*

С. Л. Микерин<sup>1,2</sup>, А. И. Плеханов<sup>1</sup>, А. Э. Симанчук<sup>1,2</sup>,  
А. В. Якиманский<sup>3</sup>, А. А. Мартыненко<sup>3</sup>, Н. А. Валишева<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Институт автоматики и электрометрии СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1

<sup>2</sup>Новосибирский институт органической химии им. Н. Н. Ворожцова СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 9

<sup>3</sup>Институт высокомолекулярных соединений РАН,  
199004, Санкт-Петербург, В.О., Большой проспект, 31

<sup>4</sup>Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13

E-mail: mikerinsl@iae.sbras.ru

Представлены результаты работ по созданию и исследованию компактных волноводных электрооптических модуляторов с использованием оригинальных синтезированных хромофорсодержащих полиимидов с ковалентно присоединённым коммерческим красителем DR-13. Разработаны и реализованы полностью полимерные электрооптические планарные структуры с архитектурой фазового поляризационного и амплитудного модуляторов в виде интерферометра Маха — Цендера. Исследованы характеристики созданных модуляторов на длине волны 1,3 мкм, достигнуто полуволновое напряжение 24 В при длине активной части модулятора 1,3 см.

*Ключевые слова:* электрооптические полимеры, радиофотоника, электрооптический модулятор, интерферометр Маха — Цендера.

DOI: 10.15372/AUT20180410

**Введение.** Развитие технологий и рост объёмов передачи информации по оптоволоконным линиям связи привели к необходимости создания новых фотонных устройств и компонентов, которые обеспечивают требуемую высокую скорость и энергетическую эффективность. К их числу относят волноводные электрооптические (ЭО) модуляторы света, сопрягаемые с оптическим волокном и способные кодировать электрические сигналы в оптические. Такие модуляторы позволяют передавать большой поток информации с малым ослаблением сигнала в широком диапазоне частот при высокой электромагнитной защищённости и малых массогабаритах. Среди различных типов материальных систем органические ЭО-материалы определены как одни из наиболее перспективных, которые отвечают указанным выше требованиям, для развития фотонных устройств [1]. В сравнении с обычными неорганическими кристаллами эти материалы обладают рядом преимуществ, таких как большой коэффициент Поккельса ( $r_{33} > 300$  пм/В), малая инерционность ЭО-отклика ( $< 10$  фс), относительно низкая диэлектрическая постоянная (от 3 до 4) с малой дисперсией (до 250 ГГц), малый тангенс диэлектрических потерь ( $10^{-4}$ ), совместимость с другими

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в части разработки и изготовления волноводных структур (грант № 16-13-10156) и Федерального агентства научных организаций в части исследования волноводных и модуляционных свойств созданных структур (государственная регистрация № АААА-А17-117060810014-9).

материалами и подложками, исключительная технологичность, позволяющая создавать сложные конфигурации и массивы, радиационная стойкость и широкий диапазон эксплуатационных температур [2]. Привлекательной особенностью электрооптических полимерных материалов является достаточная модуляция с низким управляющим напряжением. При этом использование полимеров с высокой температурой стеклования, таких как полиимиды, позволяет создавать устройства, сохраняющие свои рабочие характеристики при повышенных температурах. Развитие исследований по электрооптическим полиимидным материалам даст возможность вывести на новый уровень фотонные технологии создания устройств с высокой пропускной способностью, малой занимаемой площадью и низкой энергией потребления для задач радиофотоники.

Целью предлагаемой работы является создание и исследование полностью полимерных компактных волноводных электрооптических модуляторов различной архитектуры, в которых используются оригинальные синтезированные хромофорсодержащие полиимиды.

**Выбор электрооптических полимеров, наведение поляризации.** В качестве ЭО-полимера применялся оригинальный синтезированный полиимид на основе 3,3'-дигидрокси-4,4'-диаминодифенилметана и 4,4'-(фенилен-1,3-диокси)дифталевого ангидрида с ковалентно присоединённым хромофором DR-13 (в [3] полиимид обозначен как «а», в [4, 5] — «PI1-DR-13»).

Процедура синтеза полиимида детально описана в [6]. Степень замещения ОН-групп хромофорными фрагментами составила 50–60 %. Детальные исследования оптических и нелинейно-оптических свойств, температурной стабильности и использования в качестве активного ЭО-вещества в фазовом модуляторе синтезированных полиимидов представлены в работах [3–5].

Полиимидные слои формировались методом центрифугирования растворов синтезированных полиимидов на подложках. Затем для создания устойчивой нецентросимметричной ориентации среды полученные плёнки подвергались процедуре наведения поляризации (полинга). Образцы нагревались до температуры, близкой к температуре стеклования полимеров (около 180–190 °С). Далее включалось внешнее электрическое поле и образцы выдерживались в таких условиях в течение 20 мин, после чего нагрев отключался и образцы остывали при сохранении этого поля. Внешнее электрическое поле создавалось прямым контактным способом с характерной напряжённостью 75 В/мкм.

Характерная величина ЭО-отклика полиимидных слоёв, сформированных описанным способом, составляла  $r_{33} = 4,7 \pm 0,5$  пм/В на длине волны 1310 нм [7].

**Создание планарных полностью полимерных модуляторов.** Нижний общий электрод (Au/Cr) формировался на кремниевой подложке толщиной 250 мкм, после чего на неё последовательно наносились и обрабатывались методом оптической литографии с помощью соответствующей маски полимерные светоотверждаемые слои фоторезиста SU-8 фирмы Microchem (рис. 1, *a, b*). Маска была спроектирована таким образом, чтобы создать на одной подложке массив фазовых и амплитудных (интерферометр Маха — Цендера) модуляторов с различной шириной каналов. Ширины каналов (от 3 до 4,5 мкм с шагом 0,5 мкм) рассчитаны с учётом показателей преломления слоёв и условия одномодового режима распространения излучения внутри структуры [8, 9]. Толщины полимерных слоёв, образующих нижнюю обкладку модулятора, составляли 2 и 1 мкм соответственно. Вязкость выбранного фоторезиста не позволяла наносить более тонкий второй слой даже при условии разбавления фоторезиста циклопентаном (базовый растворитель фоторезиста SU-8). Полученные каналы заполняли синтезированным хромофорсодержащим полиимидом (центрифугирование при 600 оборот/мин, толщина формируемого слоя 1,5–2 мкм), который образовывал световедущую сердцевину волновода. Затем структуру закрывали

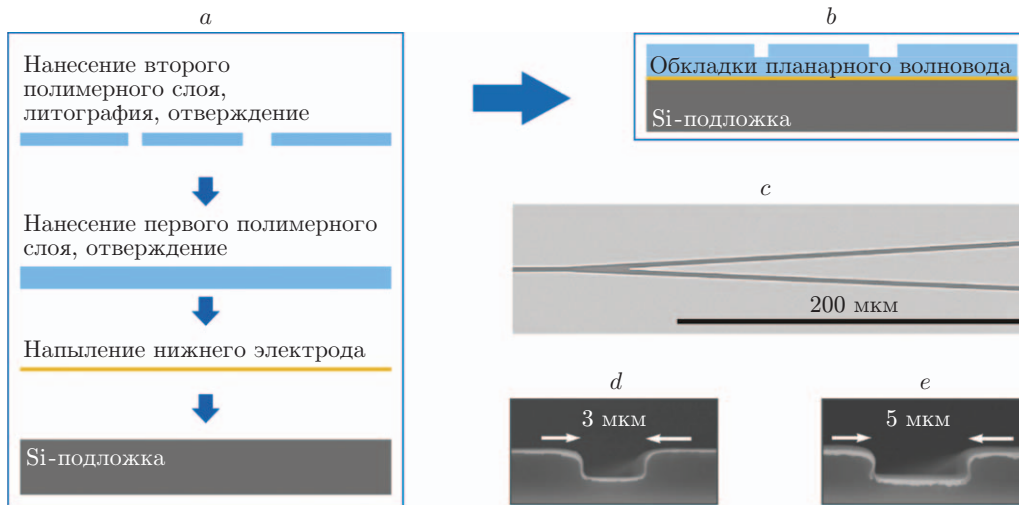


Рис. 1. Схема создания полимерной основы волноводных каналов методом литографии: *a* — последовательность операций; *b* — результат; *c, d, e* — электронные фотографии Y-ветвителя интерферометра и профилей каналов

верхним полимерным покрытием. В качестве верхнего слоя использовался коммерческий светоотверждаемый полимер NOA 61 (толщина слоя 5 мкм). Качество созданных структур оценивалось с помощью оптической и сканирующей электронной микроскопии. После отбраковки каналов на поверхности верхней обкладки формировались управляющие электроды (Au/Ti) над активными участками волноводов. Далее торцы полученной структуры скалывались, образец фиксировался на жёсткой стеклянной основе, к напылённым электродам присоединялись подводящие проводники и закреплялись с помощью проводящего клея. Полученные структуры подвергались полингу через управляющие электроды с напряжением из расчёта 75 В на каждый мкм полной толщины структуры.

В результате проделанных операций получался массив компактных планарных модуляторов длиной 2,5 см (рис. 2). Архитектура массива проектировалась таким образом, чтобы рядом с каждым амплитудным модулятором Маха — Цендера располагался прямой канал фазового модулятора такой же ширины и оба модулятора имели общий управляющий электрод. Данное решение обеспечивает идентичность поперечных геометрических размеров волноводов и степени их полинга. Наличие рядом фазового модулятора как наиболее простой структуры (в амплитудном модуляторе имеют место трудноконтролируе-

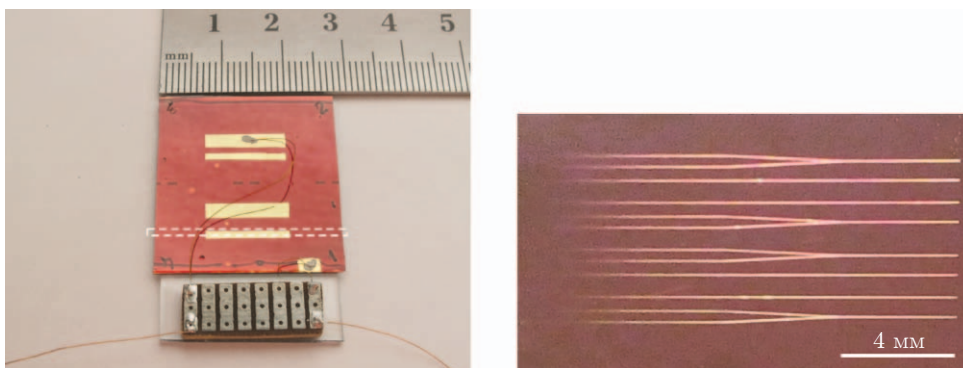


Рис. 2. Рабочий макет массива полимерных планарных модуляторов (слева), пунктиром выделен один из модуляторов; фотография фрагмента массива (справа)

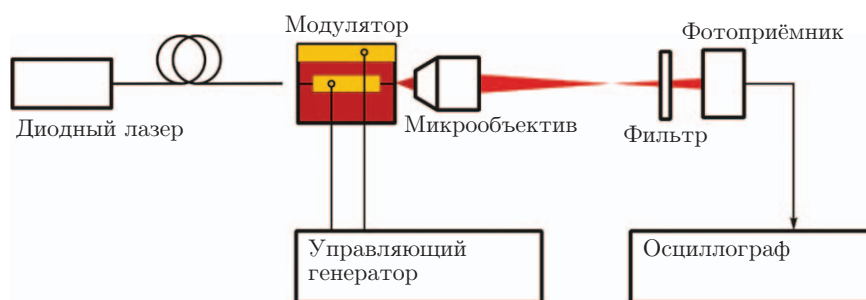


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

мые факторы, например вариации кромки клиновидной стенки каналов и общей ширины каналов на участке их расхождения в Y-ветвителях, отсутствие баланса плеч интерферометра) позволяет контролировать волноводные свойства интерферометров и получать достоверную информацию об ЭО-свойствах активной сердцевины.

**Измерение полуволнового напряжения.** Модулирующие свойства волноводных структур изучались при низких частотах управляющего напряжения ( $\sim 1$  кГц). Для управления модулятором применялся генератор сигналов специальной формы Г6-34 с усилителем напряжения (рис. 3). В качестве источника несущего оптического излучения использовался одночастотный полупроводниковый лазер (длина волны 1,3 мкм) с волоконным выходом (производитель АО «НОЛАТЕХ»). Волокно с сохранением поляризации имело концевую сферическую линзу, дающую перетяжку диаметром 2,5 мкм. Для введения излучения в волновод концевая линза подводилась к торцу волноводной структуры с помощью трёхкоординатного юстировочного столика. В амплитудном модуляторе в волноводе возбуждалась ТМ- или ТЕ-мода, в фазовом модуляторе — оба типа мод. Выходное излучение регистрировалось фотодатчиком через микрообъектив (и поляризатор при фазовой модуляции). Модуляция интенсивности излучения регистрировалась осциллографом Tektronix TDS-2022 в режиме синхронного усреднения под действием переменного управляющего напряжения. Характерная наблюдаемая картина модуляции представлена на рис. 4 на фоне управляющих импульсов напряжения треугольной формы.

Амплитудные модуляторы в созданном массиве демонстрировали полуволновые напряжения от 24 до 38 В при длине активной части  $L = 1,3$  см в зависимости от экземпляра модулятора в массиве и поляризации несущего излучения. Минимальное значение добротности  $V\pi L$  для нашего устройства составило 31 В · см при поляризации излучения, перпендикулярной плоскости структуры. Общие потери излучения на ввод-вывод и распространение в созданных модуляторах не превышали 20 дБ.

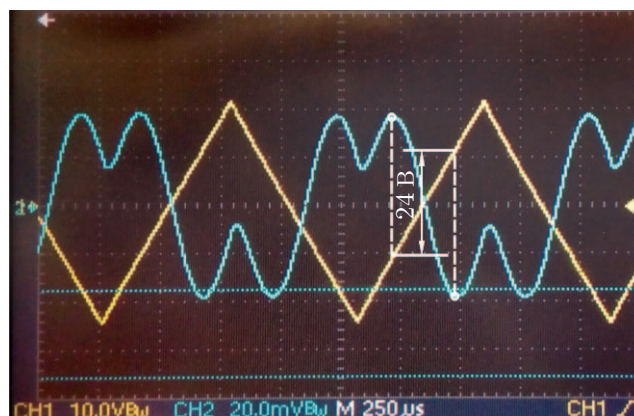


Рис. 4. Осциллограммы модулированного оптического сигнала

**Обсуждение результатов.** Значение  $V\pi L$ , полученное в данной работе, оказывается на порядок меньше в сравнении с результатами [7]. Оценка ЭО-коэффициента по величине полуволнового напряжения созданных структур [10] даёт значение  $r_{33}(\text{in device}) \approx 38$  пм/В, что заметно превышает реальные величины ЭО-отклика для хромофоров DR13 [7]. В работе [11] приведены аналогичные аномально высокие значения ЭО-отклика, причину которых авторы указать затрудняются. В [12] показано большое влияние электрофизических параметров слоёв на распределение электрического поля в структуре. На наш взгляд, причина малого значения полуволнового напряжения состоит в соотношении проводимостей используемых материалов. В [7] был применён диоксид кремния в качестве нижней обкладки и цианакрилат в качестве верхней обкладки. Оба этих материала имеют, как минимум, на порядок меньшую проводимость по отношению к хромофорсодержащему полиимиду. В предлагаемой работе используемый полимер NOA 61 обладает значительно более высокой проводимостью по сравнению с диоксидом кремния и цианакрилатом. Увеличение проводимости обкладок по отношению к сердцевине может приводить к повышению степени полинга за счёт перераспределения внешнего поля с его увеличением в активной сердцевине волновода и, значит, к увеличению ЭО-отклика. Аналогично при измерениях полуволнового напряжения на низких частотах управляющее поле в большей степени сосредоточится на сердцевине волновода, что приведёт к уменьшению эффективной толщины структуры и, следовательно, пропорциональному снижению полуволнового напряжения. Так, в предельном случае, когда материалы обкладок имеют много большую проводимость по сравнению с сердцевиной, всё управляющее поле перераспределится на активную сердцевину, понижая полуволновое напряжение в количестве раз, соответствующее отношению толщины активной сердцевины к суммарной толщине структуры. В нашем случае общая толщина структуры составляла 9 мкм при толщине ЭО-слоя в области волноводного канала 1 мкм, что в предельном случае приводит к девятикратному снижению полуволнового напряжения. Оценка в пределе ЭО-коэффициента с учётом приведённых соображений даёт  $r_{33} \approx 38/9 \approx 4,3$  пм/В и хорошее согласие с имеющимися в литературе данными. На высоких частотах управляющего напряжения эффекты перераспределения электрического поля могут изменяться. Изучение этого вопроса есть предмет дальнейших исследований. Эффект снижения управляющего напряжения за счёт определённого соотношения между низкочастотной проводимостью полимерных слоёв может найти полезное применение в подстройке сдвига фаз в плечах интерферометра и упрощении стабилизации рабочей точки модулятора.

**Заключение.** Основным результатом данной работы является создание планарного амплитудного модулятора типа Маха — Цендера на основе теплостойких полимеров и успешная демонстрация его модуляционных свойств. Полная длина модулятора составила 2,5 см, длина активной части — 1,3 см, минимальное полуволновое напряжение для созданных структур — 24 В. Эффект понижения параметра  $V\pi L$ , наблюдаемый экспериментально на низких частотах, может быть использован для подстройки сдвига фаз в плечах интерферометра и упрощения стабилизации рабочей точки модулятора.

Работа выполнена с помощью оборудования Центра коллективного пользования «Высокоразрешающая спектроскопия газов и конденсированных сред» в Институте автоматизации и электрометрии СО РАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dalton L. R., Sullivan P. A., Bale D. H. Electric field poled organic electro-optic materials: State of the art and future prospects // Chem. Rev. 2010. **110**, N 1. P. 25–55.
2. Taylor E. W., Nichter J. E., Nash F. D. et al. Radiation resistance of electro-optic polymer-based modulators // Appl. Phys. Lett. 2005. **86**, N 20. 201122.

3. **Yakimansky A. V., Nosova G. I., Solovskaya N. A. et al.** Dispersion of quadratic nonlinearity of polarized films of chromophore-containing polyimides in the range of resonance absorption // *Chem. Phys. Lett.* 2011. **510**, N 4–6. P. 237–241.
4. **Горковенко А. И., Плеханов А. И., Симанчук А. Э. и др.** Нелинейно-оптические свойства хромофорсодержащих полиимидов с ковалентно присоединённым красителем // *Автоматрия.* 2014. **50**, № 1. С. 116–122.
5. **Gorkovenko A. I., Plekhanov A. I., Simanchuk A. E. et al.** Temperature dependence and the dispersion of nonlinear optical properties of chromophore-containing polyimide thin films // *Journ. Appl. Phys.* 2014. **116**, N 2. 223104.
6. **Nosova G. I., Abramov I. G., Solovskaya N. A. et al.** Synthesis and photophysical properties of soluble polyimides and polyquinazolones containing side-chain chalcones or azo chromophores // *Polym. Sci. Ser. B.* 2011. **53**, N 1–2. P. 73–88.
7. **Атутов С. Н., Микерин С. Л., Плеханов А. И. и др.** Планарный фазовый электрооптический модулятор на основе хромофорсодержащих полиимидов // *Автоматрия.* 2018. **54**, № 1. С. 46–53.
8. **Pogossian S. P., Vescan L., Vonsovici A.** The single-mode condition for semiconductor rib waveguides with large cross section // *Journ. Lightwave Technol.* 1998. **16**, N 10. P. 1851–1853.
9. **Moosburger R., Petermann K.** 4 × 4 digital optical matrix switch using polymeric oversized rib waveguides // *IEEE Photon. Technol. Lett.* 1998. **10**, N 5. P. 684–686.
10. **Eng D. L. K., Kozacik S., Olbricht B. C. et al.** All-polymer modulator for high frequency low drive voltage applications // *Proc. SPIE.* 2013. **8622**. 86220T.
11. **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 // *Proc. SPIE.* 2012. **7599**. 75990I.
12. **Tsarev A., Taziev R., Heller E., Chalony M.** Polymer electro-optic modulator efficiency enhancement by the high permittivity dielectric strips // *Photonics and Nanostructures — Fundamentals and Applications.* 2017. **25**. P. 31–37.

*Поступила в редакцию 6 апреля 2018 г.*