

УДК 535.015

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ
И ТЕРМООПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ГИБРИДНОГО ФОТОПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА
НА ОСНОВЕ ТИОЛ-СИЛОКСАНОВЫХ
И АКРИЛАТНЫХ ОЛИГОМЕРОВ***

**Н. Г. Миронников^{1,2}, В. П. Корольков^{1,2}, Д. И. Деревянко³,
В. В. Шелковников^{3,4}, О. Б. Витрик^{5,6}, А. Ю. Жижченко⁵**

¹*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1*

²*Новосибирский государственный университет,
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2*

³*Новосибирский институт органической химии им. Н. Н. Ворожцова СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 9*

⁴*Томский государственный университет,
634050, г. Томск, ул. Ленина, 36*

⁵*Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН,
690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5*

⁶*Дальневосточный федеральный университет,
690041, г. Владивосток, ул. Суханова, 8
E-mail: mironnikov.nikolay@gmail.com*

Исследованы оптические (коэффициент преломления и показатель поглощения) и термооптические (термооптический коэффициент и коэффициент теплового расширения) характеристики нового гибридного органически-неорганического фотополимерного материала Гибример-ТАТС на основе тиол-силоксановых и акрилатных олигомеров. Изменение соотношения исходных компонентов даёт возможность варьировать термооптический коэффициент от $-0,7 \cdot 10^{-4}$ до $0,66 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, что создаёт предпосылки для синтеза атермализованных оптических компонентов и элементов с повышенной чувствительностью оптических свойств к изменению температуры для использования в термочувствительных датчиках.

Ключевые слова: гибридный фотополимер, тиол-силоксан-акрилатные олигомеры, коэффициент преломления, термооптический коэффициент, коэффициент теплового расширения, атермализация.

DOI: 10.15372/AUT20160211

Введение. Фотополимерные гибридные органически-неорганические композиции активно исследуются последние два десятилетия. Свойства таких материалов зависят от состава и могут плавно и целенаправленно варьироваться при изменении соотношения компонентов в исходной фотополимерной композиции. Среди разрабатываемых фотополимерных материалов наиболее известны и коммерчески доступны Ormoser (Organically Modified Ceramics) и SU-8. Материал Ormoser является гибридным ультрафиолетовым фотоотверждаемым полимером и включает несколько вариантов композиций для различных технологий изготовления микрооптических компонентов (OrmoComp, InkOrmo, OrmoClear, OrmoCore, OrmoClad, OrmoStamp) [1].

Термооптические и термомеханические свойства фотополимерных материалов важны для создания на их основе элементов интегральной и дифракционной оптики: оптических

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 2012-218-03-004).

переключателей, регулируемых оптических аттенуаторов, оптических соединителей/разветвителей, волноводных решёток.

Большой термооптический коэффициент (ТОК), с одной стороны, отрицательно сказывается на свойствах волноводных решёток, потому что длина волны излучения смещается с изменением показателя преломления волноводов [2]; с другой стороны, позволяет создавать сенсорные оптические устройства на основе волоконных или планарных брэгговских решёток [3]. Атермализованные волноводные устройства, оптические характеристики которых не зависят от колебаний температуры, необходимы для создания мультиплексорных устройств при разделении светового потока по длинам волн [4].

Таким образом, знание термооптических характеристик создаваемых гибридных фотополимерных материалов имеет важное значение при разработке различных функциональных элементов оптической системы.

В [5] проведён синтез и исследованы термомеханические свойства «сшитых» твёрдых плёнок гибридного фотополимерного материала Гибример-ТАТС, полученного в результате фотополимеризации композиции тетраакрилатных (ТА) и тиол-силоксановых (ТС) олигомеров в различных соотношениях. Структуры таких олигомеров приведены на рис. 1.

Было выявлено, что фотополимеризованные плёнки материала Гибример-ТАТС имеют высокую термическую устойчивость (до 300 °С) как в инертной, так и в окислительной атмосферах, а термомеханические свойства материала обусловлены соотношением ТА и ТС в исходной композиции. Таким образом, можно ожидать изменения термооптических свойств материала в зависимости от соотношений тетраакрилатного и тиол-силоксанового олигомеров.

Целью данной работы является исследование зависимости термооптических характеристик фотоотверждённого гибридного фотополимерного материала Гибример-ТАТС от количественного соотношения исходных олигомеров.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. *Получение гибридных фотополимерных композиций и экспериментальных образцов Гибример-ТАТС.* Для проведения измерений был создан ряд фотополимерных композиций, представляющих собой раствор из хлороформа, фотоинициатора и смеси тетраакрилатного и тиол-силоксанового олигомеров в различных соотношениях. В качестве инициатора фотополимеризации в композицию добавлен гексафторфосфат 2,4-диэтил-9-оксо-10-(4-гептилоксифенил)-9Н-тиоксантения в виде 5 %-ной добавки по весу к раствору тетраакрилатных олигомеров в хлороформе. Введение инициатора фотополимеризации вызывает увеличение поглощения в области 370–430 нм.

Для измерения коэффициента преломления композицию наносили на стеклянную подложку, высушивали до полного улетучивания растворителя и экспонировали УФ-излучением в камере ELC-500 UV (фирма "Electro-light Corporation") в течение 10 мин до получения твёрдой плёнки сшитого полимера. В итоге образцы представляли собой слои гибридного фотополимерного материала толщиной 100–200 мкм.

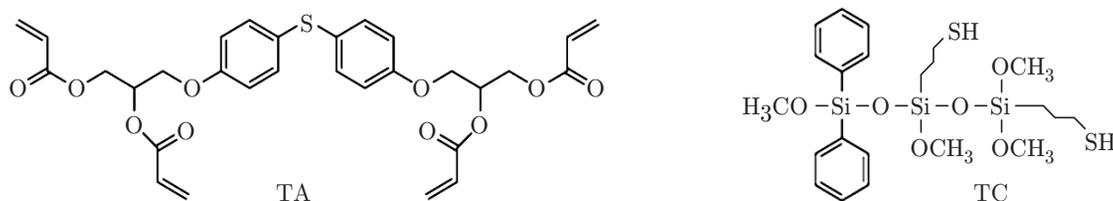


Рис. 1. Структуры тетраакрилатного и тиол-силоксанового мономеров-олигомеров композиции гибридного фотополимерного материала Гибример-ТАТС

Таблица 1

Соотношение ТА:ТС	Коэффициент преломления n	
	до фотополимеризации	после фотополимеризации
2:1	1,5205	1,5255
1:1	1,5211	1,5251
1:2	1,5225	1,5248

Образцы для измерения термооптических свойств выполнены в виде «сэндвича», в котором исследуемый материал заключён между двумя стеклянными пластинами. Сэндвичи фотоотверждённого Гибример-ТАТС изготавливали следующим образом: 1 мл 30 %-ного раствора тетраакрилатного и тиол-силоксанового олигомеров в хлороформе высушивали до полного улетучивания растворителя при температуре 50 °С на протяжении 30 мин, после чего 50 мкл вязкой фотополимерной композиции наносили поливом между пластинок из боросиликатного стекла размером 10 × 10 мм. Толщина исследуемого материала определялась толщиной плоскопараллельных вставок, помещаемых между стеклянными пластинками. Для предотвращения растрескиваний в толстом слое темновая предполимеризация осуществлялась в течение 15 дней, после чего проводилась фотополимеризация с использованием камеры ELC-500 UV на протяжении 10 мин. Термообработка полученного образца не требовалась.

Измерение коэффициента преломления. С помощью рефрактометра ИРФ-454БМ был измерен коэффициент преломления материала Гибример-ТАТС до и после фотополимеризации на образцах с различным мольным соотношением тетраакрилатных и тиол-силоксановых олигомеров.

Из табл. 1 видно, что измеренный коэффициент преломления образцов Гибример-ТАТС изменяется в третьем знаке при вариации соотношения ТА- и ТС-олигомеров, а также между состояниями до и после фотополимеризации.

Рост коэффициента преломления в ходе реакции полимеризации связан, по всей видимости, с увеличением плотности материала. При полимеризации молекул двойные связи ТА-олигомера раскрываются, образуя сетку сшитого полимера. Такие изменения приводят к увеличению плотности материала.

При создании микроструктурированных оптических компонентов коэффициент преломления фотоотверждённого материала Гибример-ТАТС ($n = 1,525$) близок к коэффициенту преломления широко применяемых оптических стёкол марки «Крон» ($n = 1,517$). Это даёт возможность формировать микроструктурированный оптический компонент в тонком слое полимера на стеклянной подложке. Причём поверхность раздела между стеклом и слоем Гибример-ТАТС не будет отражать свет и вносить паразитные блики.

Измерение показателя поглощения Гибример-ТАТС. Для формирования волноводных структур и толстых микрооптических элементов на основе фотополимерного материала Гибример-ТАТС большое значение имеет показатель поглощения. Для определения спектра поглощения на стеклянную подложку был нанесён слой Гибример-ТАТС с соотношением ТА:ТС равным 2:1 толщиной 170 мкм. Спектр поглощения фотополимера определён на основе закона Бугера с учётом поглощения подложки.

Из рис. 2 следует, что плёнки Гибример-ТАТС обладают сильным поглощением в УФ-области 350–400 нм, это связано с поглощением продуктов фотораспада инициатора. Также плёнки обладают слабым поглощением в области 450–650 нм, которое вызвано образованием комплекса с переносом заряда между фотоинициатором и тетраакрилатным мономером. Прозрачность материала в видимой области спектра начинается с 600 нм, делая его пригодным для создания компонентов дифракционных, микрооптических и интегрально-оптических элементов, работающих в красной и ближней инфракрасной областях спектра.

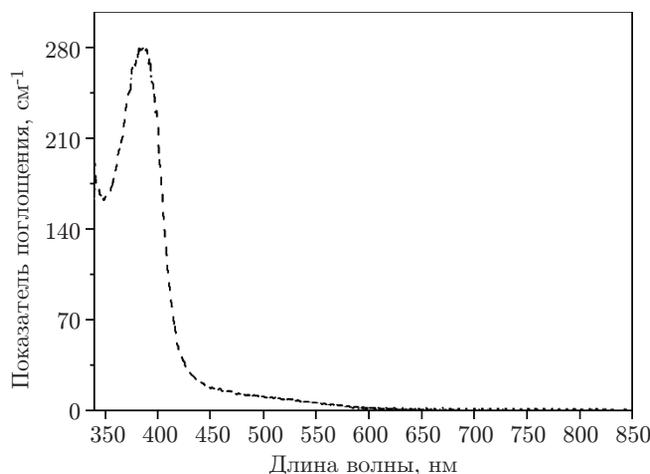


Рис. 2. Спектр поглощения плёнки Гибример-ТАТС толщиной 170 мкм

Исследование термооптических свойств. Для измерения термооптического коэффициента и коэффициента линейного теплового расширения исследуемого материала был использован интерференционный метод [6, 7] с применением многолучевого интерферометра Фабри — Перо. Образец исследуемого материала помещался между зеркалами интерферометра. При нагревании образца в термостате изменяются его показатель преломления и толщина, что приводит к изменению фазы проходящих через него интерферирующих световых пучков и, следовательно, к сдвигу интерференционной картины. Схема установки показана на рис. 3.

Источником излучения служит гелий-неоновый лазер 1 с длиной волны 633 нм. В режиме измерения ТОК (конфигурация А) луч лазера, установленного в положение 1А, проходит через светоделитель 2 и падает на резонатор Фабри — Перо 4 в виде сэндвича с исследуемым материалом между двумя стеклянными пластинами. Пучки света, отражённые от внешних поверхностей сэндвича, далее отражаются от светоделителя и формируют интерференционную картину, регистрируемую USB-видеокамерой 3, связанной с компьютером. В режиме измерения коэффициента теплового расширения (КТР) (конфи-

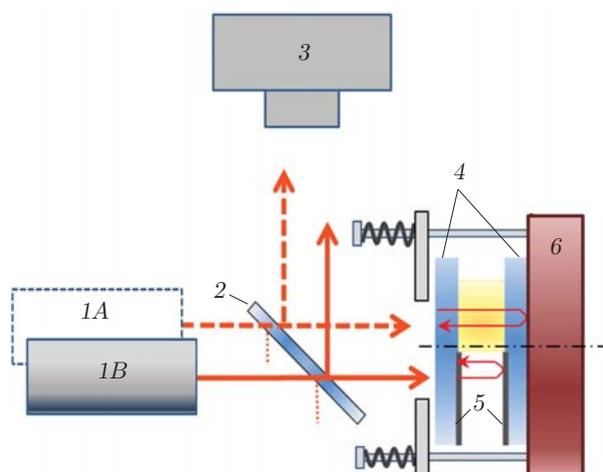


Рис. 3. Схема установки: 1А и 1В — положения гелий-неонового лазера в конфигурациях измерений А и В, 2 — светоделитель, 3 — USB-камера, 4 — сэндвич с исследуемым материалом, 5 — полупрозрачные зеркала, 6 — термостат

гурация B) луч лазера, установленного в положение $1B$, проходя светоделитель, падает на участки сэндвича, где стеклянные пластинки не контактируют с исследуемым материалом Гибример-ТАТС. Внутренние поверхности этих участков представляют собой полупрозрачные зеркала 5 в виде напылённой плёнки хрома с пропусканием 40 %. Они необходимы для повышения контрастности соответствующей интерференционной картины.

Температура сэндвича контролируется термостатом 6 с дискретностью $0,1$ °С в диапазоне температур 25 – 70 °С. В качестве держателя образца используется теплопроводящее кольцо, которое крепится к фланцу термостата с помощью слабо пружинистых фиксаторов. Такая схема крепления не препятствует температурному расширению образца. При нагреве сэндвича начинается движение интерференционных полос. При достижении заданной температуры цепь нагревателя прерывается. Фиксируется сдвиг интерференционных полос относительно положения старта нагрева. Измерение величины сдвига полос повторяется в процессе охлаждения для подтверждения воспроизводимости результата.

Относительная погрешность измерения температуры и сдвига интерференции полос составляет от $2,2$ до $6,6$ % (при температурах выше 60 °С) и приблизительно от 1 до 5 % (при сильной клиновидности образца). Это соответствует относительной ошибке разности хода от $3,2$ до $11,6$ %. Данные, необходимые для оценки погрешности, накоплены в результате многократных измерений характеристик тестового образца.

Методика вычисления ТОК и КТР в предлагаемой работе отличается от изложенной в [6, 7] тем, что резонатор Фабри — Перо выполнен в виде сэндвича, а не монолитного блока. Оптическая разность хода (ΔL) лучей, падающих на образец-сэндвич и отражённых от его внешних поверхностей, может быть вычислена следующим образом:

$$\Delta L = 2L_1n_1 + 4L_2n_2 + \lambda/2, \quad (1)$$

где L_1 , L_2 и n_1 , n_2 — толщины и коэффициенты преломления исследуемого материала и стеклянных пластинок в сэндвиче соответственно; $\lambda/2$ — половина длины волны, вносимая в разность хода вследствие отражения лучей от более плотной среды.

Продифференцировав выражение (1) по температуре, получим коэффициент температурного изменения разности хода ($d\Delta L/dT$) для образца в конфигурации измерений A :

$$\frac{d\Delta L_b}{dT} = 2L_1 \left(n_1\alpha_1 + \frac{dn_1}{dT} \right) + \phi, \quad (2)$$

где $\phi = 4L_2(n_2\alpha_2 + dn_2/dT)$ — коэффициент температурного изменения разности хода в стеклянных пластинках; $\alpha_{1,2} = (1/L_{1,2})(dL_{1,2}/dT)$ — коэффициент линейного теплового расширения; $dn_{1,2}/dT$ — термооптический коэффициент исследуемого материала и стекла. Используя известные для боросиликатного стекла значения КТР, ТОК и показатель преломления, можно рассчитать, что $\phi = L_2(0,6 \cdot 10^{-5}) \text{ K}^{-1}$.

В конфигурации измерений B , где по ходу лучей отсутствует исследуемый материал, выражение (2) преобразуется к виду

$$\frac{d\Delta L_a}{dT} = 2L_1n_1\alpha_1. \quad (3)$$

В этом случае интерферируют пучки, отражённые полупрозрачными зеркалами, нанесёнными на внутренние поверхности стеклянных пластин.

Отражённые пучки от образца — резонатора Фабри — Перо — образуют интерференционную картину в виде полос равного наклона, детектируемых камерой. Сдвиг на одну полосу интерференции соответствует изменению оптической разности хода внутри резонатора на половину длины волны зондирующего излучения. Коэффициент температурного

изменения оптической разности хода лучей в зондируемом участке образца определим как

$$\frac{\delta\Delta L_{a,b}}{\delta T} = \frac{\lambda}{2} \frac{\delta m_{a,b}}{\delta T}, \quad (4)$$

где $\delta m_{a,b}$ — количество прошедших интерференционных полос за период изменения температуры материала на величину δT в конфигурации измерений A или B ; λ — длина волны зондируемого излучения.

Выражения (3) для каждой конфигурации можно подставить в уравнения (1) и (2). Преобразуя (3), выразим КТР через сдвиг полос интерференционной картины:

$$\alpha_1 = \frac{1}{2n_1 L_1} \frac{\lambda}{2} \frac{\delta m_a}{\delta T}. \quad (5)$$

Термооптический коэффициент исследуемого материала задаётся разностью уравнений (2) и (3) с учётом (4):

$$\frac{dn_1}{dT} = \frac{1}{2L_1} \left(\frac{\lambda}{2} \frac{\delta(m_b - m_a)}{\delta T} - \phi \right). \quad (6)$$

На основе выражений (5) и (6) получены экспериментальные значения ТОК и КТР, представленные в табл. 2 для фотоотверждённого материала Гибример-ТАТС с разным мольным соотношением ТА- и ТС-олигомеров. В таблице приведены также значения этих коэффициентов для известных полимеров, фотополимеров и стекла.

Как следует из таблицы, КТР и ТОК могут целенаправленно изменяться в зависимости от состава композиции и имеют тенденцию к повышению при увеличении содержания тиол-силоксановых олигомеров. В целом величины измеренных коэффициентов близки к значениям КТР и ТОК для материалов типа SU-8, ОрмоСомр и поликарбонат. Боросиликатное стекло существенно отличается от приведённых полимеров на порядок меньшими значениями КТР и ТОК.

Коэффициент теплового расширения равен $0,6 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ для ОрмоСомр и InkОрмо, а для остальных вариантов лежит в диапазоне $(1-1,3) \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$. При этом термооптический коэффициент варьируется от $1,5 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ для ОрмоСтампа до $2,7 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ для

Таблица 2

Материал	n ($\lambda \approx 633 \text{ нм}$)	ТОК ($dn/dT, 10^{-4} \text{ K}^{-1}$)	КТР ($\alpha, 10^{-4} \text{ K}^{-1}$)
Гибример-ТАТС	1 : 4	0,66	0,7
	1 : 2	0,43	0,71
	1 : 1	-0,06	0,61
	2 : 1	-0,43	0,56
	14 : 1	-0,7	0,50
SU-8 [8]	1,59	-1,1	0,52
ОрмоСомр/InkОрмо [9]/[1]	1,52	-1,3/-2	0,6
ОрмоСлар/ОрмоСор/ОрмоСлард [1]	1,537 ~ 1,555	-2,1/-2,2/-2,7	1 ~ 1,3
ОрмоСтампа [1]	1,516	-1,5	1,05
PMMA [10, 2]/измеренный	1,49	-0,80 ~ -1,3/-1,3	0,9 ~ 2,2/0,9
Поликарбонат [10]	1,59	-1,07	0,7
Боросиликатное стекло [11]	1,517	0,025	0,033

OrmoClad. Данные параметры являются результатом оптимизации состава материалов под различные технологии. Продажа полимеров Ormoses в виде однокомпонентного состава, сразу пригодного для фотополимеризации, не позволяет потребителю самому создавать материал со свойствами, оптимальными для заданного типа микрооптических элементов.

Интересно отметить, что при повышении доли тетраакрилатного компонента в Гибример-ТАТС его термооптический коэффициент становится отрицательным, что может быть использовано для создания атермализованных субволновых резонансных волноводных решёток [9]. Кроме того, это даёт возможность для компенсации увеличения разности хода лучей в рефракционном материале на основе Гибример-ТАТС, вызванного тепловым расширением за счёт уменьшения коэффициента преломления.

Рассмотрим применение этого эффекта к случаю рефракционной микролинзы, целиком изготовленной из материала Гибример-ТАТС и находящейся в воздушной среде. Такие микролинзы используются для оптических межсоединений [12]. Приращение Δf фокусного расстояния линзы f в зависимости от изменения температуры ΔT даётся в общем виде известным выражением

$$\Delta f = f \Delta T x_f, \quad (7)$$

где x_f — коэффициент оптотеплого расширения. Для рефракционной линзы в воздушной среде этот коэффициент может быть вычислен по формуле [13]

$$x_f = \alpha - \frac{1}{n - n_{\text{air}}} \left(\frac{dn}{dT} - n \frac{dn_{\text{air}}}{dT} \right),$$

где n и α — коэффициенты преломления и линейного расширения материала линзы. Из данного выражения видно, что атермализация линзы, т. е. независимость её фокусного расстояния от температуры, наступает при условии

$$\alpha = \frac{1}{n - n_{\text{air}}} \left(\frac{dn}{dT} - n \frac{dn_{\text{air}}}{dT} \right). \quad (8)$$

Термооптический коэффициент всех полимеров примерно на два порядка больше, чем у воздуха. Чтобы полимер с коэффициентом преломления около $n = 1,5$ удовлетворял соотношению (8), модуль его термооптического коэффициента должен быть положительным и в 2 раза ниже, чем КТР этого материала. Из табл. 2 видно, что для известных полимеров, в том числе и гибридных, ТОК отрицательный и рефракционная линза из таких материалов не может быть атермализованной. В то же время из формулы (8) и табл. 2 следует, что при вариации соотношения компонентов ТА : ТС исследованного Гибример-ТАТС между 1 : 1 и 1 : 2 может быть найдено соотношение ТА : ТС с термооптическим коэффициентом в диапазоне $(0,31-0,35) \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, обеспечивающее атермализацию рефракционной линзы из этого материала при α , лежащем в диапазоне $(0,61-0,71) \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$.

Такая атермализованная рефракционная линза имеет преимущество перед атермализованной гибридной дифракционно-рефракционной линзой в силу меньших энергетических потерь и возможности использовать просветляющее покрытие. Как известно, при нанесении просветляющего покрытия на поверхность дифракционного компонента сглаживается его рельеф и существенно падает дифракционная эффективность.

Перспективной областью применения материала Гибример-ТАТС является создание интегрально-оптических волноводных элементов. В [14] получено выражение для зависимости центральной частоты λ_c спектральных мультиплексоров/демультиплексоров от температуры:

$$\frac{d\lambda_c}{dT} = \lambda_c \left(\frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{dn_{\text{eff}}}{dT} + \alpha_{\text{sub}} \right), \quad (9)$$

где n_{eff} — эффективный показатель преломления материала волновода; α_{sub} — коэффициент линейного расширения подложки. Эффект атермализации возникает при обращении в нуль выражения в скобках. Для волновода из материала Гибример-ТАТС на подложке из кремния с $\alpha_{\text{sub}} = 2,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ атермализация будет возникать при более тщательном подборе компонентов, близких к соотношению ТА : ТС равному 1 : 1 (см. табл. 2).

Наряду с задачей атермализации оптических компонентов и оптических схем стоит и обратная задача — создать компоненты с высокой чувствительностью к температурным изменениям для оптических датчиков температуры, применяемых в областях, где электрические термометры не могут использоваться из-за взрывоопасности или взаимовлияния электрических полей. Одним из простейших термочувствительных компонентов оптического датчика является резонатор Фабри — Перо [15]. Из выражения (3) следует, что коэффициент температурного изменения разности хода возрастает при одинаковых знаках α_1 и dn_1/dT . Из табл. 2 видно, что фотополимеризованный материал Гибример-ТАТС с соотношением компонентов ТА : ТС 1 : 4 в исходной композиции даёт величину $n_1\alpha_1 + dn_1/dT$, которая равна 1,73 и уступает только некоторым разновидностям РММА. Химическая и механическая стойкость материала Гибример-ТАТС делает его весьма перспективным конструкционным материалом для оптических датчиков температуры.

Заключение. Проведены измерения показателя преломления, термооптического коэффициента и коэффициента теплового расширения фотоотверждённого материала Гибример-ТАТС на основе тетраакрилатных и тиол-силоксановых олигомеров в зависимости от их соотношения в исходной композиции. Показано, что изменение соотношения исходных компонентов даёт возможность изменять термооптический коэффициент материала Гибример-ТАТС от $-0,7 \cdot 10^{-4}$ до $0,66 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ и коэффициент теплового расширения от $0,5 \cdot 10^{-4}$ до $0,7 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$. Варьирование указанных характеристик материала Гибример-ТАТС может быть полезным при использовании разработанного материала для создания как оптических датчиков температуры, так и атермализованных микрооптических и волноводных компонентов, например рефракционных микролинз для оптических интерконнекторов и спектральных мультиплексоров/демультиплексоров.

В данной работе применялось оборудование Центра коллективного пользования «Высокоразрешающая спектроскопия газов и конденсированных сред» Института автоматики и электрометрии СО РАН и Аналитико-технологического инновационного центра «Высокие технологии и новые материалы» Новосибирского государственного университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hybrid Polymers // Micro resist technology. URL: <http://microresist.de/en/product/hybrid-polymers> (дата обращения: 3.11.2015).
2. Zhiyi Z., Ping Z., Peng L., Fengguo S. Thermo-optic coefficients of polymers for optical waveguide applications // Polymer Commun. 2006. **47**, N 14. P. 4893–4896.
3. Гармаш В. Б., Егоров Ф. А., Коломиец Л. Н. и др. Возможности, задачи и перспективы волоконно-оптических измерительных систем в современном приборостроении // Фотон-Экспресс-Наука. 2005. № 6(46). С. 128–140.
4. Kurata Y., Sugihara O., Kaino T. et al. Thermo-optic controllable hybrid photonic polymers containing inorganic nanoparticles // JOSA B. 2009. **26**, N 12. P. 2377–2381.
5. Shelkovnikov V. V., Ektova L. V., Orlova N. A. et al. Synthesis and thermomechanical properties of hybrid photopolymer films based on the thiol-siloxane and acrylate oligomers // Journ. Mater. Sci. 2015. **50**, N 23. P. 7544–7556.

6. **Лапшинов Б. А., Магунов А. Н.** Установка для измерения температурной зависимости показателя преломления твёрдых тел // Приборы и техника эксперимента. 2010. № 1. С. 159–164.
7. **Jewell J. M., Askins C., Aggarwal I. D.** Interferometric method for concurrent measurement of thermo-optic and thermal expansion coefficients // Appl. Opt. 1991. **30**, N 25. P. 3656–3660.
8. **Lorenz H., Laudon M., Renaud P.** Mechanical characterization of a new high-aspect-ratio near UV-photoresist // Microelectron. Eng. 1998. **41/42**. P. 371–374.
9. **Saleem M. R., Honkanen S., Turunen J.** Thermo-optic coefficient ofOrmocomp and comparison of polymer materials in athermal replicated subwavelength resonant waveguide gratings // Opt. Commun. 2013. **288**. P. 56–65.
10. **Masahiro T., Naohiro K., Okihiro S. I., Naomichi O.** A new method for accurately measuring temperature dependence of refractive index // Opt. Rev. 2005. **12**, N 2. P. 97–100.
11. **Jewell J. M.** Thermo-optic coefficients of some standard reference material glasses // Journ. Amer. Ceram. Soc. 1991. **74**, N 7. P. 1689–1691.
12. **Rong W., Rakić A. D., Majewski M. L.** Design of microchannel free-space optical interconnects based on vertical-cavity surface-emitting laser arrays // Appl. Opt. 2002. **41**, N 17. P. 3469–3478.
13. **Jamieson T. H.** Thermal effects in optical systems // Opt. Eng. 1981. **20**, N 2. P. 156–160.
14. **Чехлова Т. К., Живцов С. В., Грабовский Е. И.** Температурная зависимость зольгель-волноводов // Радиотехника и электроника. 2006. **51**, № 7. С. 855–861.
15. **Кульчин Ю. Н., Воробьев Ю. Д., Витрик О. Б. и др.** Датчик температуры на основе волоконно-оптических интерферометров Фабри — Перо с внешними резонаторами // Оптическая техника. 1997. **12**, № 1. С. 24–25.

Поступила в редакцию 3 ноября 2015 г.
