Письма в ЖЭТФ, том 122, вып. 12, с. 798 – 804

Резонансный лазерный свеллинг полиметилметакрилата в среднем инфракрасном диапазоне для производства биосовместимых фазовых микрооптических элементов

А. В. Горевой [a, b 1)], *Н. А. Смирнов* [a, b], *П. П. Пахольчук* [a, b], *Е. Н. Римская* [a, b], *Ю. С. Гулина* [a, b], *Ц. Чжу* [b 2)], *Г. Х. Султанова* [c, d], *С. В. Прокудин* [c, d], *К. Б. Першин* [a, e, f], *А. Ю. Цыганков* [a, e], *С. И. Кудряшов* [a, b]

[a] *Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, 105005 Москва, Россия*

[b] *Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия*

[c] *Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", 108840 Троицк, Москва, Россия*

[d] *Московский физико-технический институт, 141701 Долгопрудный, Россия*

[e] *Офтальмологическая клиника "Эксимер", 109147 Москва, Россия*

[f] *Академия постдипломного образования Федерального научно-клинического центра Федерального медико-биологического агентства России, 125371 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 23 сентября 2025 г.
После переработки 28 октября 2025 г.
Принята к публикации 4 ноября 2025 г.

Резонансное поглощение лазерного излучения среднего инфракрасного диапазона (3.2–3.5 мкм) в приповерхностном слое нелегированного полиметилметакрилата приводит к формированию гладких выпуклых треков за счет лазерного свеллинга в предабляционном режиме, сопровождающемуся в 5–10 раз большей зоной перераспределения расплавленного лазером материала с пониженным показателем преломления. Оптические характеристики полученных структур в сочетании с отсутствием химических изменений, регистрируемых методом спектроскопии комбинационного рассеяния света, делают их перспективными для прецизионного изготовления биосовместимых полимерных фазовых элементов, не требующих введения красителей.

DOI: 10.7868/S3034576625120143

1. Введение. Использование лазерного свеллинга (swelling) полимеров является перспективным для изготовления биосовместимых микрооптических элементов свободной формы, применяемых в фотонных устройствах, системах планарной оптики, "сложных глазах" и других миниатюрных изображающих системах [1]. В отличие от лазерной абляции, свеллинг основан на локальном расширении материала, облучаемого лазерными импульсами с интенсивностью ниже порога его повреждения, что обеспечивает шероховатость поверхности оптического качества без последующей обработки, такой как жидкостное (влажное) травление [2, 3]. Значительное внимание привлекло использование наносекундных лазерных импульсов ультрафиолетового (УФ) и видимого диапазонов для формирования массивов микролинз на поверхности полиметилметакрилата (ПММА), легированного красителями, для увеличения лазерного поглощения и усиления объемного расширения за счет газообразных продуктов фотолиза [4, 5]. Для преодоления ограничения по высоте, накладываемого порогом абляции [6], метод был усовершенствован за счет реализации модификации с тыльной стороны и добавления гибкого покрывающего слоя, удерживающего газообразные продукты внутри полимерной матрицы [7, 8]. Нанесение линий на поверхность ПММА УФ лазером для изготовления пресс-форм микрофлюидных устройств из полидиметилсилоксана (ПДМС) продемонстрировало эффективность водяного охлаждения для увеличения высоты получаемых выпуклых структур до ~ 100 мкм [9], однако их использование в оптике было ограничено наличием остаточных микропузырьков под треками.

Нелегированные полимеры могут быть эффективно модифицированы лазерами с длинами волн в области их резонансного поглощения в среднем инфракрасном (ИК) диапазоне (3–4 мкм), соответству-

1) e-mail: a.gorevoy@lebedev.ru
2) J. Zhu.

ющей колебательным модам растяжения C–H связей. Данный подход применялся для лазерной абляции ПММА, полипропилена (ПП) и других полимеров с формированием канавок глубиной ~ 100 мкм [10, 11], а его растущая актуальность обусловлена развитием мощных волоконных лазеров в этом диапазоне [12], конкурирующих с CO_2 лазерами. Фототермические процессы, индуцированные как фемтосекундными импульсами, так и непрерывным излучением в среднем ИК диапазоне, также приводили к объемной модификации оптических свойств, сопровождающейся поверхностной деформацией, что было использовано для прямой лазерной записи канальных волноводов вблизи поверхности ПММА [13].

Лазерный свеллинг является многообещающим методом для модификации формы и оптических свойств широкого спектра биосовместимых полимеров, который может служить альтернативой или дополнением таким процессам, как фотополимеризация или фотоиндуцированное сшивание (cross-linking) в УФ-модифицируемых интраокулярных линзах [14], изменениям показателя преломления в гидрогелевых контактных линзах [15] и другим модификациям гидрогелей [16, 17], а также 3D-печати [18] и поверхностному текстурированию [19] за границами оптических применений. Сложность лежащих в основе процессов взаимодействия света с веществом обуславливает необходимость детального исследования мультипараметрических и зависящих от материала режимов обработки для получения желаемых характеристик лазерно-модифицированных структур.

В данной работе мы демонстрируем использование поверхностного формообразования нелегированного ПММА лазером среднего ИК диапазона в доабляционном режиме для создания фазовых микрооптических элементов, работающих в видимой и ближней ИК областях спектра. Фотоиндуцированные процессы и получаемые необратимые модификации характеризовались методами оптической и голографической микроскопии, а также конфокальной микроспектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) с целью нахождения оптимальных параметров лазерного воздействия для контролируемого свеллинга.

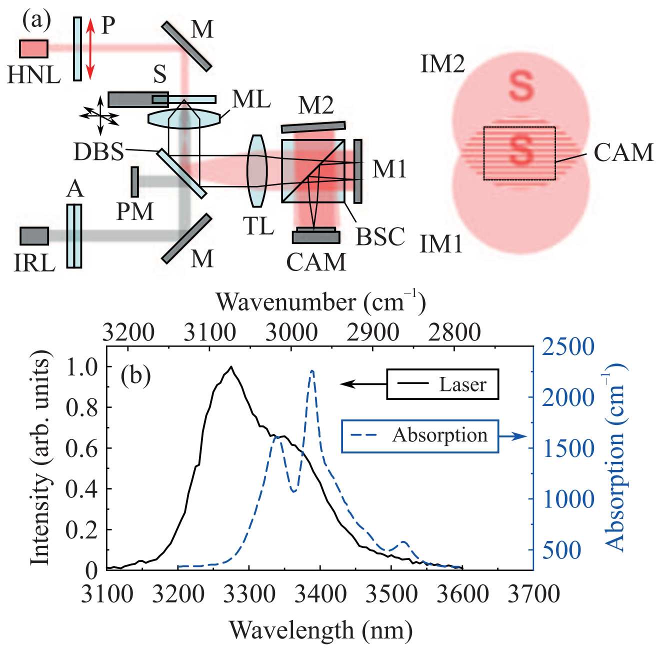

Рис. 1. (Цветной онлайн) (a) – Схема экспериментальной установки для прямой лазерной записи и *in situ* интерферометрических измерений (IRL – фемтосекундный ИК лазер; A – аттенюатор; HNL – гелий-неоновый лазер; P – поляризатор; M, M1, M2 – зеркала; DBS – дихроичный светоделитель; PM – измеритель мощности; S – образец на моторизованном 3D-позиционирующем столике; ML – основной объектив; TL – тубусная линза; BSC – светоделительный куб; CAM – камера) и вид ее плоскости изображения (справа): IM1 и IM2 – изображения для лучей, отраженных от зеркал M1 и M2 соответственно; CAM – сенсор камеры; (буквой "S" обозначена область лазерной модификации; (b) – спектр излучения фемтосекундного ИК лазера (черный, левая шкала) и спектр поглощения образца ПММА (из [13], синий, правая шкала)

2. Материалы и методы. Экспериментальные образцы (плоскопараллельные пластины из нелегированного коммерчески доступного ПММА толщиной 1 мм) подвергались локальной модификации импульсами среднего ИК диапазона (длина волны $\lambda = 3{-}4$ мкм) с использованием установки, представленной на рис. 1a. Импульсы от твердотельного иттербиевого лазера (ТЕТА-20, Авеста-Проект, Россия) с частотой повторения до 10 кГц пропускались через оптический параметрический усилитель (ОПУ) "Парус" (Авеста-Проект, Россия), обеспечивающий длительность импульсов (ширина на уровне 0.5 от максимума, FWHM) $\tau = 150$ фс, и фокусировались вблизи поверхности образца асферической флюоритовой (CaF_2) линзой с фокусным расстоянием $f = 20$ мм в пятно с радиусом $r_0 \approx 10$ мкм по уровню интенсивности e^{-1}. Мощность лазера P варьировалась с помощью аттенюатора в диапазоне 1–10 мВт (на частоте 10 кГц, в фокальной плоскости, измерялось пироэлектрическим измерителем мощности 3A-P, Ophir Optronics Solutions, Израиль), что соответствовало энергиям импульсов $E = 0.1$–1 мкДж и пиковым интенсивностям лазерного излучения $I = 0.2$–$2\,\text{ТВт/см}^2$. Образец перемещался в горизонтальной плоскости со скоростью 0.01–1 мм/с с помощью компьютерного моторизованного 3D-позиционирующего столика (Prior, Великобритания).

Прямая лазерная запись была совмещена с *in situ* цифровой голографической микроскопией (ЦГМ) в реальном времени, использующей схему интерферометра Майкельсона с частично общим путем и гелий-неоновый лазер с длиной волны 633 нм. Как показано в правой части рис. 1a, сенсор камеры регистрировал интерференционную картину, образованную в результате наложения изображений лазерно-модифицированной области (IM1) и немодифицированной области (IM2). Полученные интерферометрические изображения обрабатывались в пространственно-частотной области с применением цифровой перефокусировки методом углового спектра и вычитания фона для восстановления карт амплитуды и фазы [20, 21]. После лазерного воздействия фазовые и рельефные профили образцов дополнительно измерялись с использованием установки ЦГМ на базе двухплечевого интерферометра Маха–Цендера [22] и оптического 3D-профилометра Sensofar S neox. Обработка экспериментальных данных проводилась в среде MATLAB с использованием реализованных авторами алгоритмов.

Спектры КРС были измерены при возбуждении лазерным излучением с длиной волны 532 нм с помощью конфокального 3D-сканирующего микроскопа-спектрометра Confotec MR520 (SOL instruments). Полученный спектр немодифицированного образца в диапазоне 2700–3200 см^{-1} (что соответствует $\lambda = 3.1$–3.7 мкм) продемонстрировал характерные полосы КРС для ПММА [23], которые совпали с основными полосами поглощения [13, 24] (рис. 1b). Спектры фемтосекундных лазерных импульсов среднего ИК диапазона, измеренные на монохроматоре-спектрографе MS 7504i (SOL Instruments, Беларусь) с детектором HgCdTe 126-MCT-13-1.0 (InfraRed Associates, США), были использованы для расчета средних коэффициентов поглощения α и длин оптического проникновения L. Для спектров, представленных на рис. 1b, $\alpha = 1130\,\text{см}^{-1}$ и $L \approx 9$ мкм, что сравнимо с r_0. В данной работе мы намеренно не настраивали ОПУ непосредственно на пик резонансного поглощения, поскольку в противном случае объем воздействия лазерного излучения был бы меньше ($L < 5$ мкм), а диапазон подходящих значений мощности P для создания гладких структур сужался по мере снижения порога абляции [11, 13], что также приводило бы к уменьшению максимально возможной высоты создаваемых лазером выпуклых дорожек.

3. Результаты и обсуждение. Рисунок 2 демонстрирует фазовые изображения линий (вид сверху), полученных при воздействии лазером на поверхность образца, для частоты повторения 10 кГц, скорости сканирования 0.3 мм/с и различной мощности P. Анализ поперечных профилей позволил выделить три режима модификации, как показано на рис. 2c. При меньших значениях P (режим I) профили дорожек имеют гауссову форму с почти линейным ростом высоты (максимального фазового изменения) и менее выраженным изменением ширины (FWHM) с увеличением P. Дальнейшее увеличение P приводит к образованию значительно более широких дорожек с приблизительно той же высотой (режим II) и, наконец, к появлению провала в центре дорожки, что указывает на переход в режим абляции (III). Смена режимов обусловлена смещением баланса между набуханием полимера и перераспределением размягченной полимерной массы под действием сил поверхностного натяжения с последующим испарением материала, формирующим кратер в центре при высоких значениях P [5, 8, 9]. Фазовые изображения не показали существенной зависимости от поляризации излучения гелий-неонового лазера, падающего на образец, и не изменялись в течение двух недель после лазерного воздействия, в то время как карты амплитуд указали на то, что уменьшение пропускания в лазерно-обработанной области было пренебрежимо малым. Следовательно, выпуклые дорожки, по-

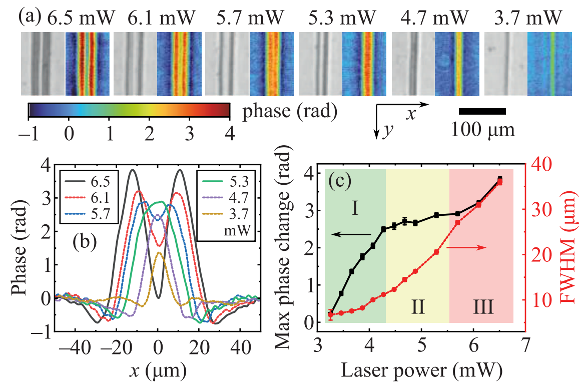

Рис. 2. (Цветной онлайн) (a) – Фрагменты оптических изображений (слева, в оттенках серого) и фазовых карт (справа, в псевдоцветах) дорожек, записанных на поверхности ПММА при различной мощности лазера; (b) – поперечные сечения фазовых карт и (c) – зависимости максимального изменения фазы (черный, левая шкала) и ширины (FWHM, красный, правая шкала) от мощности с тремя выделенными режимами воздействия: I – свеллинг; II – переходный; III – абляционный

лученные в доабляционном режиме, являлись гладкими, без рассеивающих микропузырьков или значительных остаточных механических напряжений.

Результаты других экспериментов показывают, что размеры лазерно-модифицированных дорожек также зависят от расфокусировки, скорости сканирования и количества повторных проходов, что позволяет управлять этими размерами, достигая фазовой модуляции в диапазоне $[0, \pi]$ рад и варьируя ширину линии для создания желаемой фазовой картины. В качестве доказательства работоспособности такого подхода были получены линии с фазовыми профилями в виде плоской вершины и шириной (FWHM) до 100 мкм с использованием комбинации повышенной лазерной мощности, расфокусировки и щелевых диафрагм. Расширение возможностей модификации требует дальнейшей оценки границ мультипараметрического рабочего окна для сохранения воздействия в пределах желаемого доабляционного режима. Согласно [13], лазерно-индуцированные модификации ПММА были сходными для импульсов с длительностью 250 фс и непрерывного излучения с $\lambda = 3.42$ мкм, поэтому в данной работе мы не анализировали влияние частоты повторения.

Чтобы раздельно исследовать влияние поверхностной (изменение высоты рельефа) и объемной модификации ПММА на фазовую модуляцию проходящего излучения, мы нанесли аналогичные дорожки на узкой грани пластины и получили фазовые изображения с видом сбоку. В предположении постоянного фазового профиля вдоль линии и толщины 1 мм мы преобразовали фазовую карту в пропорциональные изменения показателя преломления Δn, как показано на рис. 3a. Аналогично [13], мы наблюдали область с отрицательным Δn, достигающим -8×10^{-4} под дорожкой, окруженную граничной зоной с положительным Δn до 4×10^{-4}, которые были сформированы расширением материала в зоне лазерного нагрева. Затем фазовые (полученные методом ЦГМ) и высотные (измерены на 3D профилометре) карты лазерно-модифицированных линий и точек (воздействие лазера в одну точку без перемещения) были совмещены с использованием метода наименьших квадратов (рис. 3b). При этом значения высоты и фазы для цветовой шкалы и масштабных шкал на рис. 3b, c были согласованы с использованием показателя преломления немодифицированного ПММА ($n = 1.489$ при $\lambda = 633$ нм). Можно видеть, что максимальное значение фазы, рассчитанное из карты высот, превышает значение, полученное с помощью ЦГМ, из-за отрицательного Δn под линией. Например, эта разница для дорожки, записанной при $P = 3.9$ мВт, составила 0.2 рад или 20 нм при $\lambda = 633$ нм (рис. 3c), что соответствует интегралу от Δn по z в центре модифицированной зоны (рис. 3a). Обобщая экспериментальные результаты, вклад объема с отрицательным Δn составил $\approx 10\,\%$ от общего максимального фазового изменения для всех дорожек, нанесенных в режиме I (свеллинг), поэтому можно заключить, что поверхностная модификация является доминирующей и должна учитываться в первую очередь при проектировании фазовых элементов, изготавливаемых методом лазерного свеллинга.

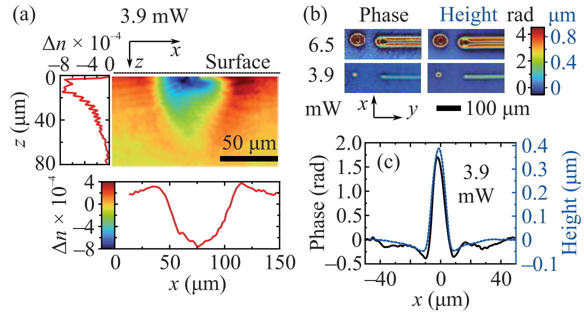

Рис. 3. (Цветной онлайн) (a) – Карта (в псевдоцветах) изменений показателя преломления в образце ПММА (вид сбоку) под лазерно-модифицированной линией (мощность лазера 3.9 мВт) и ее поперечные сечения; (b) – фазовые (слева) и высотные (справа) карты лазерно-модифицированных линий и точек (вид сверху) при мощности 6.5 и 3.9 мВт и (c) – поперечные профили фазы (черный, левая шкала) и высоты (синий, правая шкала) для дорожки, записанной при мощности лазера 3.9 мВт

Следует также отметить небольшое отрицательное изменение высоты вокруг выпуклой дорожки на поверхности (рис. 3c), размер которой, по-видимому, коррелирует с объемом лазерного воздействия (рис. 3a) и существенно превышает ширину (FWHM) выпуклости. Следовательно, мы можем очертить зону, предположительно вовлеченную в процесс размягчения полимера и перераспределения материала, которую следует учитывать при последовательном нанесении соседних линий. Для подробного исследования этого вопроса мы регистрировали фазовые изображения с частотой 30 кадров/с и анализировали эволюцию поперечного сечения фазовых профилей облученных лазером пятен (аналогичных показанным в левой части карт на рис. 3b) во время лазерного воздействия (0–2 с) и после него (>2 с, лазер выключен), как показано на рис. 4 для $P = 3.3$ мВт. Исходные профили (рис. 4a) были разложены на широкую псевдо-фойгтовскую (pseudo-Voigt) функцию (рис. 4b) с максимальным значени-

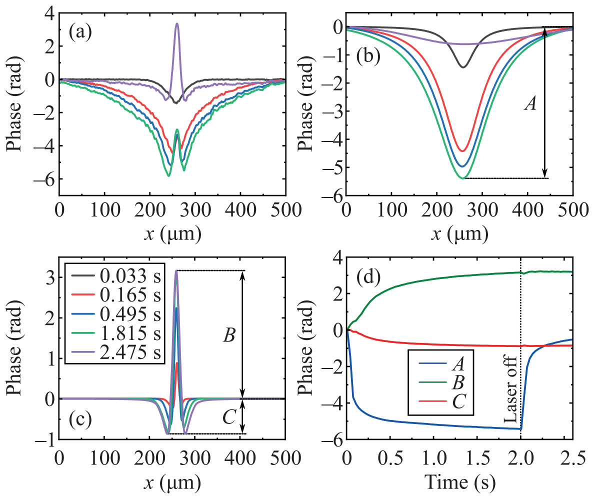

Рис. 4. (Цветной онлайн) (a) – Поперечные фазовые профили модифицированных лазером пятен в различные моменты времени после начала (0 с) лазерного воздействия и их разложение на плавно (b) и резко (c) изменяющиеся составляющие; (d) – зависимости минимального значения плавно изменяющейся компоненты (A), а также максимального (B) и минимального (C) значений резко изменяющейся компоненты от времени экспозиции. Время экспозиции составляло 2 с (момент окончания обозначен как laser off). Графики (a)–(c) используют одинаковые обозначения, показанные на (c)

ем A и разность двух гауссоид (рис. 4c) с максимальным и минимальным значениями B и C соответственно. Согласно полученной зависимости A, B и C от времени (рис. 4d), можно сделать вывод, что первая компонента (A) связана с отрицательным Δn расширенного нагретого лазером объема, в то время как вторая компонента (B, C) отражает процессы лазерного свеллинга и поверхностной деформации, которые сохраняются после окончания лазерного воздействия.

Радиус (по уровню e^{-1}) отрицательного фазового профиля $r \approx 100$ мкм (при 2 с, рис. 4b) заметно меньше, чем радиус $r_{\mathrm{th}} = \sqrt{2Dt} \approx 670$ мкм, рассчитанный в соответствии с температуропроводностью $D = 1.11 \times 10^{-7}$ м^2/с (ПММА при 23 °C [11, 25]). Если мы используем простую модель распределения температуры при нагреве гауссовым лазерным пучком [26]

$$\Delta T(x, y, z) = a \exp\left[-\left(x^2 + y^2\right)/r^2\right] / \cosh\left(z/b\right), \quad (1)$$

то можно оценить получаемую разность фаз в центре (вид сверху) как

$$\Delta\varphi_{\max} = \Delta T_{\max}\left(dn/dT\right)\left(b\pi^2/\lambda\right), \quad (2)$$

где b – глубина для уровня e^{-1} аналогично радиусу r, изменение показателя преломления с температурой равно $dn/dT = -1.3 \times 10^{-4}\, 1/{}^\circ\mathrm{C}$ для $T = -20$–$90\,^\circ$C [27], и $\lambda = 633$ нм. Используя соотношение b к r, измеренное для зарегистрированной сбоку фазовой карты модифицированного лазером объема (рис. 3a), мы получим $b \approx 45$ мкм для $r \approx 100$ мкм и можем оценить $T_{\max}$ как 85 °C для $\Delta\varphi_{\max} = A = -5.5$ рад (при 2 с, рис. 4b), что соответствует температуре стеклования ПММА ($T_{\mathrm{g}} = 85{-}125\,^\circ$C [4, 27, 28]). Следовательно, резкое снижение скорости расширения нагретой зоны (0.1–0.15 с, рис. 4d) и ее меньший размер $r < r_{\mathrm{th}}$ в дальнейшем связаны с достижением T_{g} в центре пятна и раскручиванием полимерных цепей с поглощением тепла [28], что, по-видимому, совпадает с началом свеллинга и способствует перераспределению материала вследствие размягчения. Производная dn/dT также увеличивается при $T > T_{\mathrm{g}}$, поэтому бо́льшие изменения $\Delta\varphi_{\max}$ при более высокой лазерной мощности вызваны сравнительно более медленным ростом $\Delta T_{\max}$. Между тем, ширина медленно остывающей зоны ($T_{\max}$ близка к комнатной температуре) после окончания лазерного воздействия (2.5 с, рис. 4b) лучше согласуется с r_{th}.

Спектры КРС, измеренные в модифицированном лазером объеме образцов, не показали значительных изменений ни в основном для полимеров диапазоне 250–1800 см$^{-1}$, ни в области высоких волновых чисел (2600–3200 см$^{-1}$). Таким образом, лазерный свеллинг не сопровождался фотохимическими изменениями, такими как фотоиндуцированное отщепление карбонильных боковых цепей или образование ненасыщенных (C = C) связей, связанных с мономером, которые проявляются в виде возникающей полосы колебаний 1640 см$^{-1}$ [22, 29]. Это также подтверждает, что температура во время лазерного воздействия не превышала температуру объемной деполимеризации ПММА ≈220 °C [30]. Снижение интенсивности основных полос КРС, потенциально указывающее на уменьшение плотности или другие изменения структуры материала, находилось в пределах погрешности измерений. Вместе с тем, влияние лазерно-индуцированных модификаций на последующий свеллинг (при повторном воздействии) позволяет предположить возможное локальное изменение термомеханических свойств, что требует дальнейшего исследования.

Присутствие ранее записанных дорожек в нагреваемом лазером объеме, очевидно, приводит к уменьшению высоты вновь получаемых выпуклых структур в зависимости от расстояния. Рисунок 5 иллюстрирует это фазовой картой решетки с периодом

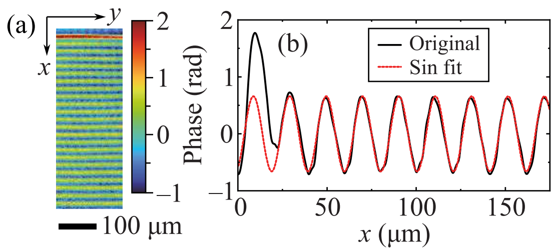

Рис. 5. (Цветной онлайн) (a) – Фазовая карта (вид сверху) записанной лазером решетки на поверхности ПММА (в псевдоцветах) и (b) – ее поперечное сечение (черный) вместе с аппроксимацией синусоидальным профилем (красный)

20 мкм, полученной при $P = 4$ мВт, 10 кГц и 0.3 мм/с. Верхняя линия (записана первой) имеет несколько меньшее максимальное фазовое значение, чем изолированная линия при той же P (см. рис. 2c), в то время как остальные линии достаточно точно следуют синусоидальному профилю с амплитудой ±0.65 рад (ЦГМ) или ±138 нм (оптический профилометр), нулевая линия которого близка к уровню поверхности немодифицированной части образца (рис. 5b). Зона с отрицательным Δn под решеткой является однородной и вносит вклад менее 5 % в максимальное фазовое изменение.

4. Заключение. По итогам исследования можно сделать вывод, что облучение нелегированного ПММА импульсами среднего ИК диапазона с длиной волны в области его резонансного поглощения ($\lambda = 3.2-3.5$ мкм), сфокусированными вблизи его поверхности, привело к формированию постоянных гладких прозрачных выпуклых структур, высота и ширина которых могут контролироваться в доабляционном режиме путем варьирования мощности лазера, расфокусировки, скорости сканирования и количества проходов. В серии экспериментов мы сформировали выпуклые (с гауссовым профилем) и плосковершинные дорожки шириной 7–100 мкм (FWHM) и высотой до 2.7 мкм (фазовое изменение при виде сверху около 12 рад), следующие по произвольным траекториям на поверхности образца. Эти параметры близки к размерам микролинз, полученных путем фронтального свеллинга легированного красителями ПММА без покровного слоя импульсами наносекундных лазеров с длинами волн 308 и 532 нм [4, 5].

Начало лазерного свеллинга было связано с достижением температуры стеклования в центре лазерного пятна, а оцененная ширина зоны перераспределения лазерно-нагретого материала в 5–10 раз превышала ширину создаваемой выпуклости, что влияло на последовательное нанесение соседних линий. Модифицированный лазером объем под дорожкой не проявлял химических изменений, детектируемых методом спектроскопии КРС, но характеризовался пониженным показателем преломления, при этом его вклад в фазовое изменение при виде сверху был мал по сравнению с поверхностной деформацией. Мы продемонстрировали, что учет этих эффектов и тщательный выбор рабочего режима позволяют записать фазовую дифракционную решетку с синусоидальным профилем на поверхности ПММА.

Результаты данной работы проливают свет на основные фототермические процессы, важные для прецизионного изготовления биосовместимых полимерных фазовых элементов без добавления красителей с использованием резонансного лазерного свеллинга. Предложенный подход потенциально применим для модификации поверхности широкого спектра биосовместимых материалов, однако его использование для мягких полимеров и гидрогелей может быть ограничено отмеченной зависимостью фиксации набухших структур от температуры стеклования.

Финансирование работы. Исследование выполнено в рамках государственного задания # FSFN-2024-0018.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

1. J. Li, W. Wang, X. Mei, A. Pan, X. Sun, B. Liu, and J. Cui, ACS Nano **13**, 114 (2019).
2. F. Chen, H. Liu, Q. Yang, X. Wang, C. Hou, H. Bian, W. Liang, J. Si, and X. Hou, Opt. Express **18**, 20334 (2010).
3. S. S. Singh, A. Khare, and S. N. Joshi, Journal of Manufacturing Processes **55**, 359 (2020).
4. F. Beinhorn, J. Ihlemann, K. Luther, and J. Troe, Applied Physics A: Materials Science & Processing **68**, 709 (1999).
5. A. Y. Malyshev, N. A. Agareva, O. A. Mal'shakova, and N. M. Bityurin, Journal of Optical Technology **74**, 641 (2007).
6. F. Baset, K. Popov, A. Villafranca, J.-M. Guay, Z. Al-Rekabi, A. E. Pelling, L. Ramunno, and R. Bhardwaj, Opt. Express **21**, 12527 (2013).
7. J. Shao, Y. Ding, H. Zhai, B. Hu, X. Li, and H. Tian, Opt. Lett. **38**, 3044 (2013).
8. J. Li, X. Mei, P. Aifei, B. Liu, and J. Cui, Optics and Lasers in Engineering **126**, 105872 (2020).
9. E. Joanni, J. Peressinotto, P. Silva Domingues, G. d. Oliveira Setti, and D. P. de Jesus, RSC Adv. **5**, 25089 (2015).
10. S. Naithani, Journal of Laser Micro/Nanoengineering **9**, 147 (2014).

11. C. Frayssinous, V. Fortin, J.-P. Bérubé, A. Fraser, and R. Vallée, J. Mater. Process. Technol. **252**, 813 (2018).
12. M. R. Majewski, G. Bharathan, A. Fuerbach, and S. D. Jackson, Opt. Lett. **46**, 600 (2021).
13. J.-P. Bérub e, C. Frayssinous, J. Lapointe, S. Duval, V. Fortin, and R. Vallée, Opt. Express **27**, 31013 (2019).
14. C. Luo, H. Wang, X. Chen, J. Xu, H. Yin, and K. Yao, Frontiers in Bioengineering and Biotechnology **10**, 913383 (2022).
15. K. T. Wozniak, Z. A. Manning, R. Huang et al. (Collaboration), Biomed. Opt. Express **15**, 6242 (2024).
16. A. Abalymov, B.-E. Pinchasik, R. A. Akasov, M. Lomova, and B. V. Parakhonskiy, Biomacromolecules **24**, 4532 (2023).
17. A. G. Savelyev, A. V. Sochilina, G. Babayeva et al. (Collaboration), Biomater. Sci. **13**, 980 (2025).
18. V. V. Rocheva, A. V. Koroleva, A. G. Savelyev, K. V. Khaydukov, A. N. Generalova, A. V. Nechaev, A. E. Guller, V. A. Semchishen, B. N. Chichkov, and E. V. Khaydukov, Sci. Rep. **8**, 3663 (2018).
19. A. Riveiro, A. L. B. Maçon, J. Del Val, R. Comesaña, and J. Pou, Front. Phys. **6**, 16 (2018).
20. M. Lyu, C. Yuan, D. Li, and G. Situ, Appl. Opt. **56**, F152 (2017).
21. O. Polschikova, A. Machikhin, A. Gorevoy, and E. Stoykova, J. Opt. Soc. Am. A **39**, A79 (2022).
22. S. Kudryashov, Y. Gulina, P. Danilov, N. Smirnov, E. Rimskaya, G. Krasin, I. Saraeva, S. Shelygina, A. Rupasov, K. Pershin, A. Tsygankov, and A. Gorevoy, Opt. Lett. **50**, 129 (2025).
23. S. Hirono, M. Kasuya, K. Matsuda, Y. Ozeki, K. Itoh, H. Mochizuki, and W. Watanabe, Appl. Phys. Lett. **94**, 241122 (2009).
24. V. M. Zolotarev, B. Z. Volchek, and E. N. Vlasova, Opt. Spectrosc. **101**, 716 (2006).
25. *Laser Welding of Plastics: Materials, Processes and Industrial Applications*, ed. by R. Klein, Wiley, Hoboken, NJ, USA (2011).
26. P. Loza, D. Kouznetsov, and R. Ortega, Appl. Opt. **33**, 3831 (1994).
27. J. M. Cariou, J. Dugas, L. Martin, and P. Michel, Appl. Opt. **25**, 334 (1986).
28. V. Mathur and K. Sharma, Heat and Mass Transfer **52**, 2901 (2016).
29. A. Baum, P. J. Scully, M. Basanta, C. L. Paul Thomas, P. R. Fielden, N. J. Goddard, W. Perrie, and P. R. Chalker, Opt. Lett. **32**, 190 (2007).
30. H. Zhao and S. L. Simon, Polymer **66**, 173 (2015).