

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

G02B 3/02 (2026.05); B82Y 30/00 (2026.05)

(21)(22) Заявка: 2025131640, 13.11.2025

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
13.11.2025Дата регистрации:
30.07.2026

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 13.11.2025

(45) Опубликовано: 30.07.2026 Бюл. № 22

Адрес для переписки:

105005, Москва, вн.тер.г. Муниципальный
округ Басманный, ул. 2-я Бауманская, 5, стр.
1, ФГАОУ ВО "МГТУ им. Н.Э. Баумана",
Амелина Ксения Евгеньевна

(72) Автор(ы):

Сазонкин Станислав Григорьевич (RU),
Аверкиева Ульяна Сергеевна (RU),
Першин Кирилл Борисович (RU),
Кудряшов Сергей Иванович (RU),
Смирнов Никита Александрович (RU),
Пахольчук Петр Павлович (RU),
Горевой Алексей Владимирович (RU),
Гулина Юлия Сергеевна (RU),
Римская Елена Николаевна (RU),
Данилов Павел Александрович (RU),
Цыганков Александр Юрьевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

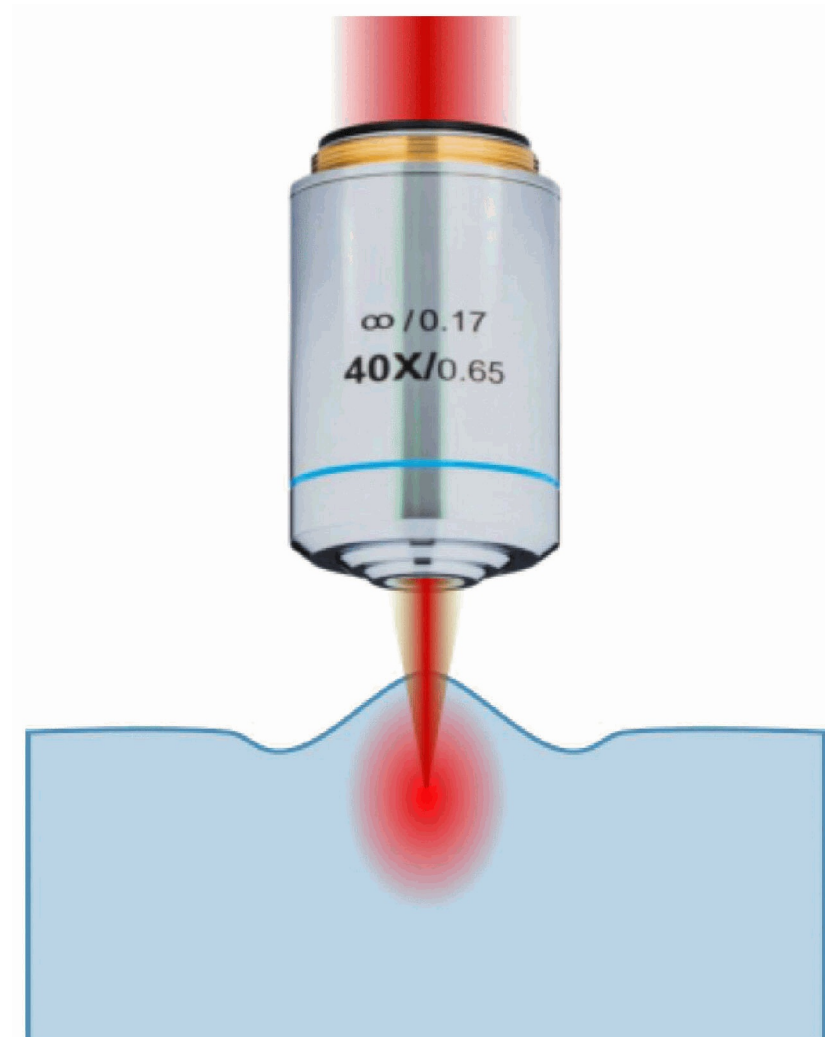
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования "Московский государственный
технический университет имени Н.Э.
Баумана (национальный исследовательский
университет)" (RU)(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: US 8846551 B2, 30.09.2014. US
11471980 B2, 18.10.2022. US 10688597 B2,
23.06.2020. US 9862219 B2, 09.01.2018. RU
2450384 C1, 10.05.2012.(54) СПОСОБ СОЗДАНИЯ ФАЗОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ПОВЕРХНОСТИ
ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТА ФЕМТОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ
СРЕДНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА

(57) Реферат:

Изобретение относится к области лазерного приборостроения, к способам создания фазовых оптических элементов на поверхности оптически прозрачных полимеров посредством лазерной модификации. Способ включает облучение поверхности полиметилметакрилата (ПММА) фемтосекундными лазерными импульсами среднего инфракрасного диапазона с длиной волны 3 мкм, длительностью импульсов 150 фс, фокусировку их вблизи поверхности на глубине от минус 300 до 300 мкм, перемещение лазерного

пятна по заданным траекториям со скоростью от 10 до 1000 мкм/с, управление высотой и шириной создаваемого рельефа путем изменения энергии импульсов, скорости сканирования, количества проходов и глубины фокусировки, выбор параметров режима модификации для обеспечения высоты рельефа от 0,1 до 2 мкм, ширины линий от 1 до 50 мкм, шероховатости поверхности не более 50 нм и пропускания модифицированной области в диапазоне от 400 до 1000 нм не менее 90%. Технический результат

- точное управление параметрами рельефа. 4 ил.



Фиг. 2

RU 2867239 C1

RU 2867239 C1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC

G02B 3/02 (2026.05); B82Y 30/00 (2026.05)(21)(22) Application: **2025131640, 13.11.2025**(24) Effective date for property rights:
13.11.2025Registration date:
30.07.2026

Priority:

(22) Date of filing: **13.11.2025**(45) Date of publication: **30.07.2026 Bull. № 22**

Mail address:

105005, Moskva, vn.ter.g. Munitsipalnyj okrug
Basmannyj, ul. 2-ya Baumanskaya, 5, str. 1,
FGAOU VO "MG TU im. N.E. Bauman", Amelina
Kseniya Evgenevna

(72) Inventor(s):

**Sazonkin Stanislav Grigorevich (RU),
Averkiewa Uliana Sergeevna (RU),
Pershin Kirill Borisovich (RU),
Kudriashov Sergei Ivanovich (RU),
Smirnov Nikita Aleksandrovich (RU),
Pakholchuk Petr Pavlovich (RU),
Gorevoi Aleksei Vladimirovich (RU),
Gulina Iuliia Sergeevna (RU),
Rimskaia Elena Nikolaevna (RU),
Danilov Pavel Aleksandrovich (RU),
Tsygankov Aleksandr Iurevich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Federalnoe gosudarstvennoe avtonomnoe
obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego
obrazovaniia «Moskovskii gosudarstvennyi
tekhnicheskii universitet imeni N.E. Bauman
(natsionalnyi issledovatel'skii universitet)» (RU)**

(54) **METHOD FOR CREATING PHASE OPTICAL ELEMENTS ON SURFACE OF POLYMETHYL METHACRYLATE USING FEMTOSECOND LASER PULSES OF THE MID-INFRARED RANGE**

(57) Abstract:

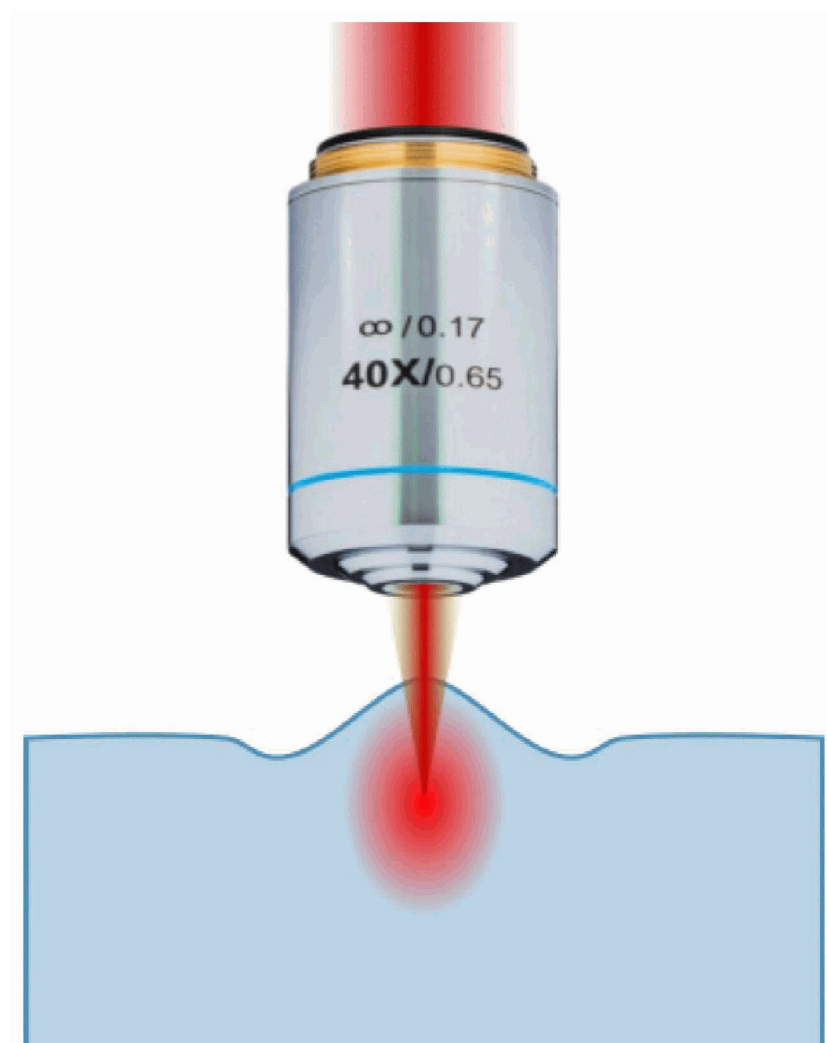
FIELD: laser instrument making.

SUBSTANCE: invention relates to methods for creating phase optical elements on the surface of optically transparent polymers by means of laser modification. The method includes irradiating the surface of polymethyl methacrylate (PMMA) with femtosecond laser pulses of the mid-infrared range with a wavelength of 3 mcm, a pulse duration of 150 fs, focusing them near the surface at a depth of minus 300 to 300 mcm, moving the laser spot along specified trajectories at a speed of 10 to 1000 mcm/s, controlling

the height and width of the created relief by changing the pulse energy, scanning speed, number of passes and focusing depth, selecting the parameters of the modification mode to ensure a relief height of 0.1 to 2 mcm, a line width of 1 to 50 mcm, a surface roughness of no more than 50 nm and a transmittance of the modified area in the range of 400 to 1000 nm of at least 90%.

EFFECT: precise control of relief parameters.

1 cl, 4 dwg



Фиг. 2

Область техники

Изобретение относится к области лазерных технологий обработки полимерных материалов, а именно к способам создания фазовых оптических элементов на поверхности оптически прозрачных полимеров, таких как полиметилметакрилат (ПММА), посредством лазерной модификации. Изобретение может быть использовано в оптической промышленности для изготовления дифракционных решеток, линз Френеля, корректоров волнового фронта и других фазовых оптических элементов.

Уровень техники

Настоящее изобретение относится к области формирования фазовых микрорельефов на поверхности прозрачных полимеров, преимущественно полиметилметакрилата (ПММА), посредством лазерной обработки. Анализ известных технических решений свидетельствует о наличии различных подходов к созданию микроструктур на поверхности ПММА и других полимеров, однако каждый из них имеет определённые ограничения, связанные с необходимостью использования красителей, ограниченной формой создаваемых структур, недостаточной прозрачностью получаемых элементов или отсутствием точного контроля над параметрами рельефа.

Известен способ получения биомиметических структур, имитирующих сложные глаза насекомых, посредством комбинации пневматической деформации, модифицированного лазерного вспучивания и контролируемого роста кристаллов на двухслойных образцах ПММА, содержащих поглощающий подслой-краситель [1]. Формирование структур осуществляется фемтосекундными импульсами инфракрасного лазера с длиной волны 800 нм, длительность импульса 120 фс, что позволяет создавать куполообразные микроструктуры с углом смачивания 160° и сниженным отражением в диапазоне от 400 нм до 800 нм. Однако данный способ требует обязательного введения красителя, ограничен формированием микролинзовых массивов и не обеспечивает точного управления высотой рельефа в пределах 2 мкм.

Известен способ формирования микролинзовых массивов в поликарбонате с использованием фемтосекундных импульсов длительностью менее 25 фс на длине волны 790 нм с энергией импульса 0,5 нДж [2]. Диаметр линз контролируется глубиной фокусировки лазера. Несмотря на одностадийность процесса, метод применим к другому материалу и не предусматривает создание произвольных фазовых элементов на ПММА.

Известен способ, при котором объединили наноимпринтинг и модифицированное лазерное вспучивание ПММА, легированного метиловым красным органическим красителем [3]. Способ при пикосекундном облучении полимера с длиной волны 532 нм и длительностью импульса 10 пс позволяет получать иерархические микро- и наноструктуры с регулируемой гидрофобностью. Однако метод требует использования красителя и формирует преимущественно линзовые массивы.

В методе лазерного вспучивания в ограниченном объеме [4] ПММА, легированный метиловым красным, покрывается гибким слоем толщиной 5 мкм и облучается тем же пикосекундным излучением на длине волны 532 нм, с длительностью импульса 10 пс и энергией в лазерном импульсе 0,9 мкДж, что позволяет получить линзы большой кривизны. Однако процесс сопровождается образованием субмикронных пузырей и требует удаления покровного слоя.

Известен способ пикосекундного облучения на длине волны 532 нм, с длительностью импульса 10 пс плёнки ПММА, толщиной 75 мкм [5], легированной красителем через стеклянный субстрат с использованием готовой маски из микролинз. Данный способ ускоряет изготовление микролинзовых матриц, но ограничивает номенклатуру структур и не применим без красителей.

Известен способ лазерного вспучивания массивного ПММА ультрафиолетовым (УФ) импульсным излучением Nd:YVO₄-лазера с длиной волны 355 нм, мощностью от 0,1 Вт до 1 Вт, для формирования каналов глубиной до 40 мкм и шириной до 400 мкм, после чего образец используется как пресс-форма под полидиметилсилоксан [6]. При больших глубинах возникают трещины, поверхность характеризуется высокой шероховатостью, а управлять рельефом в пределах 2 мкм не представляется возможным.

Известен механизм поверхностного набухания чистого ПММА при одиночных фемтосекундных импульсах с длиной волны 800 нм, длительностью импульса 45 фс [7]. Показано, что превышение порога вспучивания приводит к перфорации и выбросу материала, что существенно сужает процесс получения гладкого рельефа.

Известен способ массового изготовления микролинз в пленке поликарбоната толщиной 175 мкм [8]. Полученный диаметр линз от 50 до 96 мкм контролировался глубиной фокусировки лазера. Также с использованием пленки поликарбоната был исследован механизм образования сферических куполов и микропустот при воздействии на неё фемтосекундных импульсов, длительностью менее 25 фс на длине волны 790 нм при энергии импульса 0,47 нДж. Работа относится к другому материалу и не предусматривает создание фазовых элементов на ПММА.

УФ обработка ПММА, легированного фотоинициатором, одиночными импульсами на длине волны 308 нм при длительности импульса 30 нс и с энергией в лазерном импульсе 3 мкДж позволяет формировать микролинзовые массивы без последующей полировки [9]; однако диапазон пропускания ограничен длинами волн более 450 нм, а возможность создания произвольного рельефа не рассматривается.

В обзорной статье [10] проанализированы факторы, влияющие на высоту выпуклостей при лазерном вспучивании окрашенного ПММА, показана зависимость от плотности энергии и содержания красителя, но технологический процесс получения фазовых элементов не приводится.

Известен экспериментально полученный способ образования выпуклых структур высотой от 0,05 мкм до 2 мкм и диаметром от 20 мкм до 200 мкм при использовании наносекундного лазера [11] с длиной волны излучения 532 нм, длительностью импульса 15 нс на окрашенном ПММА. В работе была определена пороговая плотность энергии возникновения выпуклой структуры на поверхности среды, лежащая в диапазоне от 3 Дж/см² до 4 Дж/см². Недостатком данного способа является совместное действие вспучивания и перераспределения расплава, что затрудняет получение оптического качества.

Известен способ полирования поверхностей оптических элементов фемтосекундным лазерным излучением, при котором использовался сходящийся пучок с длительностью импульса менее 900 фс, обеспечивающий доводку до оптической гладкости без контактной абразивной обработки [12]. Такой подход эффективен для сглаживания, однако ориентирован преимущественно на удаление микронеровностей и не обеспечивает детерминированного формирования заданного фазового профиля на поверхности.

Также известен способ и система снятия материала, корректировки формы поверхности и полирования с использованием ультракоротких импульсов и подбора режимов лазер-материал с помощью моделей [13]. Предложенная система и способ обеспечивают высокоточную обработку, пригодную для доводки поверхностей сложной (свободной) формы. Ограничением является ориентация на доводку, также получение требуемого поверхностного фазового рельефа для дифракционных элементов прямо не решается.

Также известны система и способ создания рельефа на поверхности материала, включая полимеры и стекло, ультракороткими импульсами с формированием микростолбиков или нановыступов [14]. В ряде реализаций текстурирование сопровождалось одновременной кристаллизацией поверхности, что может изменять оптические и электрические свойства материалов. Технология пригодна для получения функциональных микрорельефов, но рельеф, как правило, случайный или периодический и формируется в управляемой газовой или вакуумной среде. Создание рассчитанных фазовых профилей с суб-волновой дискретизацией на прозрачных полимерах без постобработки не является целевым результатом.

Известен также способ неабляционной или фотоакустической компрессионной микрообработки прозрачных материалов пачками ультракоротких импульсов, предназначенный преимущественно для объёмного или сквозного формирования отверстий и каналов с повышенным качеством стенок [15]. Обработка велась в режиме, исключающем классическую абляцию поверхности, за счёт управляемого компрессионного воздействия импульсных пакетов. Указанное решение не направлено на детерминированное воспроизведение расчётного фазового профиля на поверхности полимерных подложек, а ориентировано на сверление или формирование сквозных отверстий в прозрачных материалах.

В результате в известных решениях либо обеспечивается доводка поверхностей без синтеза заданного фазового рельефа, либо формируется ориентированный на поглощение или адгезию статистический микрорельеф, либо реализуется объёмная модификация. Отсутствует простой одноэтапный процесс прецизионной прямой записи расчётного фазового профиля на поверхности прозрачного полимера (например, ПММА) без красителей и с минимальной термонагрузкой.

Наиболее близким по технической сущности (прототипом) является способ лазерного вспучивания массивного ПММА УФ импульсным излучением с длиной волны 355 нм, мощностью от 0,1 Вт до 1 Вт, с получением каналов глубиной до 40 мкм [6]. Недостатками прототипа являются: ориентация на создание пресс-форм, высокая шероховатость и трещинообразование, отсутствие прецизионного управления рельефом в пределах 2 мкм, необходимость использования охлаждения для достижения больших размеров структур.

Таким образом, анализ уровня техники показывает, что известные решения испытывают по крайней мере одну из следующих проблем: обязательное введение поглощающих красителей или покровных слоев; ограничение типов структур микролинзами либо каналами; образование трещин, газовых полостей и получение высокой шероховатости поверхности; невозможность точного регулирования рельефа высотой до 2 мкм; применение других материалов или диапазонов длины волны, несовместимых с прозрачностью ПММА.

Раскрытие изобретения

Задачей изобретения является устранение недостатков прототипа и аналогов, а именно создание способа формирования произвольных фазовых оптических элементов на поверхности оптически прозрачного ПММА без использования красителей или дополнительных слоев, обеспечивающего получение поверхности оптического качества с возможностью точного управления параметрами рельефа в диапазоне высот до 2 мкм.

Технический результат заключается в реализации способа создания фазовых оптических элементов на поверхности ПММА сфокусированными фемтосекундными лазерными импульсами среднего инфракрасного (ИК) диапазона на длине волны 3

мкм с возможностью управления высотой и шириной линий создаваемого рельефа за счет изменения энергии и частоты следования импульсов, скорости сканирования, количества проходов и глубины фокусировки, обеспечивающего формирование произвольного фазового микрорельефа оптического качества без применения красителей и без деградации спектральной прозрачности.

Для достижения технического результата предлагается способ, в котором:

1. используют фемтосекундные лазерные импульсы среднего ИК диапазона с длиной волны 3 мкм, соответствующей диапазону максимального поглощения от 2900 см^{-1} до 3000 см^{-1} для С-Н связей в молекуле ПММА, что обеспечивает поглощение лазерного импульса в приповерхностном слое и оптимальное вложение энергии для разогрева модифицируемой зоны без использования дополнительных красителей;

2. рельеф на поверхности ПММА создается за счет локального нагрева сфокусированными фемтосекундными лазерными импульсами, расширения и перераспределения материала в приповерхностном слое с последующим застыванием;

3. лазерное пятно перемещают по заданным траекториям для формирования выпуклых линий и областей заданной формы, создающих фазовый оптический элемент;

4. управление высотой и шириной линий создаваемого рельефа производят путем изменения параметров режима модификации: энергии импульсов, скорости сканирования, количества проходов и глубины фокусировки;

5. выбор параметров режима модификации осуществляют для обеспечения оптического качества поверхности и предотвращения образования микропузырей и других внутренних дефектов, снижающих пропускание модифицированной области в спектральном диапазоне работы фазового элемента, например, в области от 400 нм до 1000 нм.

В результате предлагается способ создания фазовых оптических элементов на поверхности ПММА, включающий облучение поверхности полимера лазерными импульсами и формирование микрорельефа. При этом используют фемтосекундные лазерные импульсы среднего ИК диапазона с длиной волны 3 мкм, длительностью импульса от 50 фс до 500 фс, фокусируют их вблизи поверхности ПММА на глубине от минус 300 мкм до 300 мкм от поверхности, перемещают лазерное пятно по заданным траекториям со скоростью от 10 мкм/с до 1000 мкм/с. Также при этом управляют высотой и шириной создаваемого рельефа путем изменения энергии импульсов в диапазоне от 0,1 мкДж до 10 мкДж, скорости сканирования, количества проходов от 1 шт до 10 шт и глубины фокусировки. Параметры режима модификации выбирают для обеспечения высоты рельефа от 0,1 мкм до 2 мкм, ширины линий от 1 мкм до 50 мкм, шероховатости поверхности не более 50 нм и пропускания модифицированной области в диапазоне от 400 нм до 1000 нм не менее 90%.

Преимущественно используют лазерные импульсы с частотой повторения от 5 кГц до 10 кГц. Фокусировку осуществляют оптической системой с числовой апертурой от 0,1NA до 0,5NA. А контроль процесса модификации осуществляют визуально через оптическую систему с использованием источника белого света и матричного приемника излучения.

Перечень фигур

На фиг.1 представлена структурная схема устройства для реализации способа создания фазовых оптических элементов.

На фиг.2 представлен схематический процесс создания микрорельефа на поверхности полимера.

На фиг.3 представлен пример фазовой карты оптического элемента: решетка.

На фиг.4 представлен пример фазовой карты оптического элемента: кольцевая структура.

Осуществление изобретения

В предлагаемой установке содержатся:

- 5 1. Фемтосекундный лазер, осуществляющий генерацию импульсов с центральной длиной волны 3 мкм в среднем ИК диапазоне.
2. Оптическая система, осуществляющая направление, контроль и фокусировку лазерного излучения на образец, которая состоит из системы зеркал, дихроичного зеркала и фокусирующей оптической системы.
- 10 3. Система позиционирования образца на основе трехмерной моторизованной платформы, обеспечивающая прецизионное перемещение образца по заданной траектории.
4. Блок управления, формирующий управляющие сигналы и синхронизирующий работу всех узлов установки.
- 15 5. Система контроля мощности лазерного излучения, осуществляющая стабилизацию энергии лазерных импульсов с помощью светоделителя, фотоприемного устройства (ФПУ) и блока управления.
6. Система визуализации, формирующая изображение модифицируемой области для контроля процесса в реальном времени. Она реализована по схеме проходящего через
- 20 образец излучения и включает в себя источник белого света и матричный приемник излучения (МПИ).

На фиг. 1 показана одна из возможных схем установки для записи фазовых оптических элементов на поверхности оптически прозрачного полимера.

- Последовательность фемтосекундных импульсов длительностью от 50 фс до 500 фс с частотой повторения от 5кГц до 10 кГц и центральной длиной волны 3 мкм поступает
- 25 от фемтосекундного лазера (или фемтосекундного лазера с системой генерации разностной частоты) через систему зеркал на светоделитель. Далее лазерное излучение делится в отношении 95% к 5%. Первая часть светового пучка направляется на ФПУ и используется для контроля мощности излучения и соответствующего управления
 - 30 фемтосекундным лазером для поддержания заданной мощности, которая может достигать до 20 мВт. Вторая часть пучка направляется на дихроичное зеркало, отражающее излучение в этом диапазоне в сторону фокусирующей оптической системы, состоящей из одиночной линзы, линзового или зеркального микрообъектива. Данная оптическая система фокусирует излучение вблизи передней поверхности
 - 35 модифицируемого образца из оптически прозрачного полимера. Образец, установленный на трехмерной подвижной моторизованной платформе, осуществляет перемещение по трем осям со скоростями от 10 мкм/с до 1000 мкм/с, что позволяет перемещать лазерное пятно (фокальную область) по заданным траекториям, производить сканирование в горизонтальной плоскости и менять расстояние от плоскости фокусировки до
 - 40 поверхности на расстоянии от минус 300 мкм до 300 мкм. С обратной стороны образца установлен источник белого света с конденсором, излучение от которого проходит через образец, фокусирующую оптическую систему, дихроичное зеркало, пропускающее излучение в видимом диапазоне оптического спектра, тубусную линзу и, в итоге, попадает на матричный МПИ. Фокусирующая оптическая система и тубусная линза
 - 45 расположены таким образом, что на МПИ строится изображение приповерхностного слоя образца, что позволяет наблюдать происходящую модификацию и корректировать параметры лазерного излучения и сканирования. Управление фемтосекундным лазером, включая изменение мощности лазерного излучения и его прерывание, осуществляется

блоком управления фемтосекундного лазера и моторизованной платформой. Эти устройства получают управляющие сигналы от компьютера или контроллера, работающих по заданной программе и использующих данные, поступающих с ФПУ и МПИ.

На фиг. 2 схематически изображен процесс создания микрорельефа. Лазерное излучение, сфокусированное в приповерхностный слой образца, вызывает его локальный нагрев и термическое расширение (вспучивание) за счет резонансного поглощения. После остывания на поверхности формируется стабильный рельеф.

На фиг. 3 и фиг.4 приведены примеры фазовых карт, которые демонстрируют возможности установки по созданию сложных оптических элементов. Показаны фазовая карта решетка с линейной структурой и фазовая карта кольцевой структуры. Эти элементы были получены путем программирования соответствующих траекторий движения в блоке управления установки.

Для осуществления процесса изготовления фазового элемента, например, решетки, в блок управления загружается программа, задающая траекторию сканирования и параметры лазерного излучения. Блок управления может быть реализован на базе персонального компьютера или специализированного программируемого логического контроллера. Связь с исполнительными устройствами (драйверами платформы, модулятором лазера) осуществляется через стандартные промышленные интерфейсы, что обеспечивает высокую точность и повторяемость процесса.

Список источников информации

1. Li J., Wang W., Mei X., Pan A., Sun X., Liu B., Cui J. Artificial compound eyes prepared by a combination of air-assisted deformation, modified laser swelling, and controlled crystal growth // ACS Nano. 2019. Vol. 13, No. 1. Pp. 114-124. DOI: 10.1021/acsnano.8b04047.

2. Meunier T., Villafranca A.B., Bhardwaj R., Weck A. Fabrication of microlens arrays in polycarbonate with nanojoule energy femtosecond laser pulses // Optics Letters. 2012. Vol. 37, No. 20. Pp. 4266-4268. DOI: 10.1364/OL.37.004266.

3. Shao J.Y., Ding Y.C., Wang W.J., Mei X.S., Zhai H.P., Tian H.M., Li X.M., Liu B. Generation of fully-covering hierarchical micro-/nano-structures by nanoimprinting and modified laser swelling // Small. 2014. Vol. 10, No. 13. Pp. 2595-2601. DOI: 10.1002/sml.201303656.

4. Shao J., Ding Y., Zhai H., Hu B., Li X., Tian H. Fabrication of large curvature microlens array using confined laser swelling method // Optics Letters. 2013. Vol. 38, No. 16. Pp. 3044-3046. DOI: 10.1364/OL.38.003044.

5. Li J., Wang W., Mei X., Pan A., Liu B., Cui J. Rapid fabrication of microlens arrays on PMMA substrate using a microlens array by rear-side picosecond laser swelling // Optics and Lasers in Engineering. 2020. Vol. 126. Article 105872. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2019.105872.

6. Joanni E., Peressinotto J., Domingues P. S., Setti G.D.O., Jesus D.P. Fabrication of molds for PDMS microfluidic devices by laser swelling of PMMA // RSC Advances. 2015. Vol. 5, No. 32. Pp. 25089-25096. DOI: 10.1039/C5RA03122B.

7. Baset F., Popov K., Villafranca A., Guay J.-M., Al-Rekabi Z., Pelling A.E., Ramunno L., Bhardwaj R. Femtosecond laser-induced surface swelling in poly-methyl methacrylate // Optics Express. 2013. Vol. 21, No. 10. Pp. 12527-12538. DOI: 10.1364/OE.21.012527.

8. Meunier T., Villafranca A.B., Bhardwaj R., Weck A. Mechanism for spherical dome and microvoid formation in polycarbonate using nanojoule femtosecond laser pulses // Optics Letters. 2012. Vol. 37, No. 15. Pp. 3168-3170. DOI: 10.1364/OL.37.003168.

9. Beinhorn F., Ihlemann J., Luther K., Troe J. Micro-lens arrays generated by UV laser irradiation of doped PMMA // Applied Physics A: Materials Science & Processing. 1999. Vol. 68, No. 6. Pp. 709-713. DOI: 10.1007/s003390050965.

10. Битюрин Н. М. Формирование наноструктур на поверхности и в объеме твердых тел с помощью лазерного излучения // Квантовая электроника. 2010. Т. 40, № 11. С. 955-965.

11. Malyshev A. Yu., Agareva N. A., Mal'shakova O. A., Bityurin N. M. The formation of convex microstructures on the surface of polymeric materials under laser irradiation // Journal of Optical Technology. 2007. Vol. 74, No. 9. Pp. 641-646. DOI: 10.1364/JOT.74.000641.

12. Miller, G. D. Polishing optical elements with a femtosecond laser beam // США, патент. - US10688597B2: 23.06.2020.

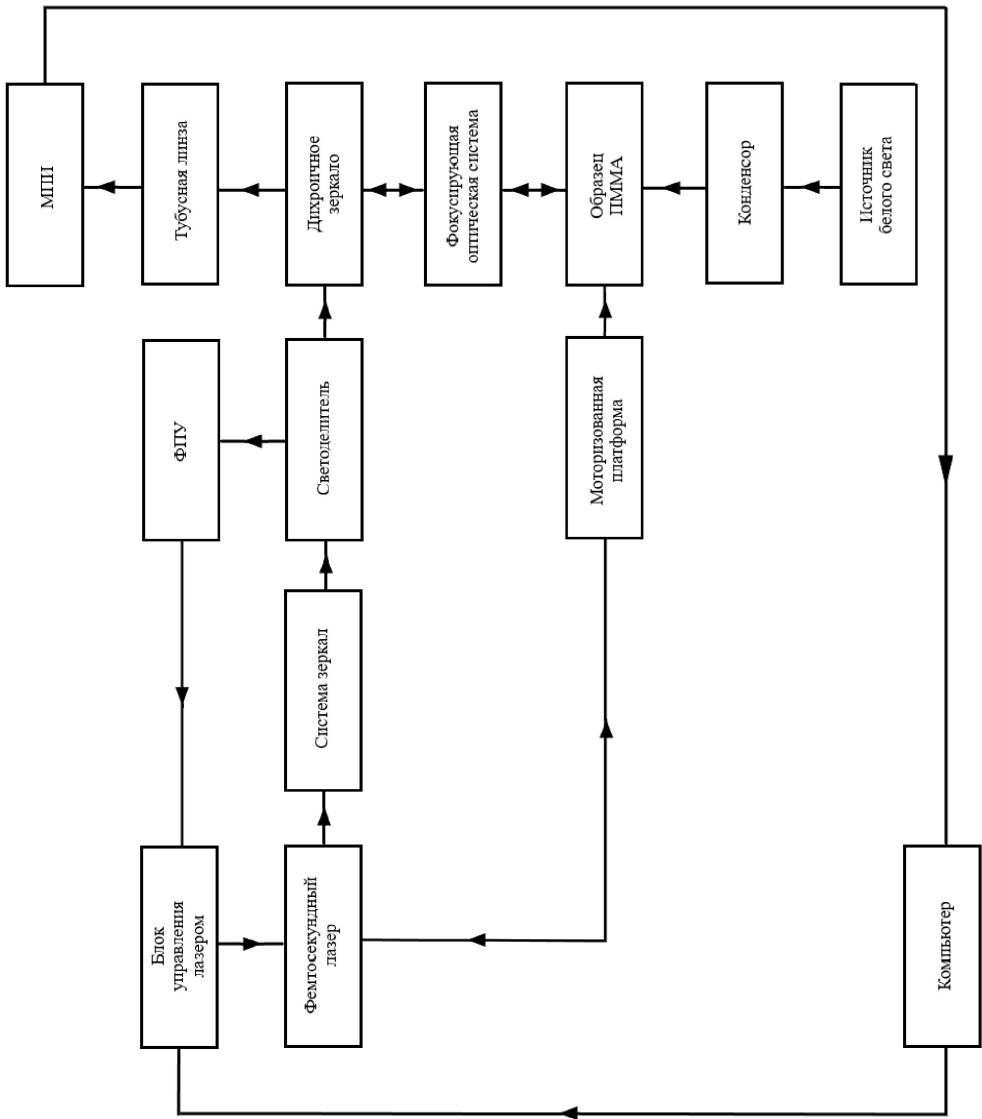
13. Qiao, J.; Taylor, L. L. Method and system for ultrafast laser-based material removal, figuring and polishing // США, патент. - US11471980B2: 18.10.2022.

14. Gupta, M. C.; Nayak, B. K. Systems and methods of laser texturing of material surfaces and their applications // США, патент. - US8846551B2: 30.09.2014.

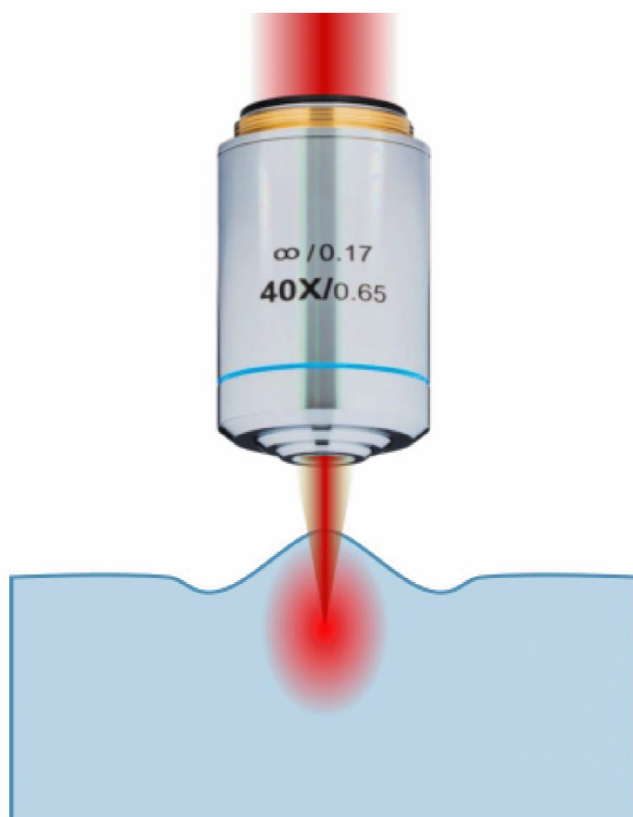
15. Hosseini, S. A. Method for non-ablative and/or photo acoustic compression machining a transparent target // Европейский союз, патент. - EP3292941B1: 21.10.2020.

(57) Формула изобретения

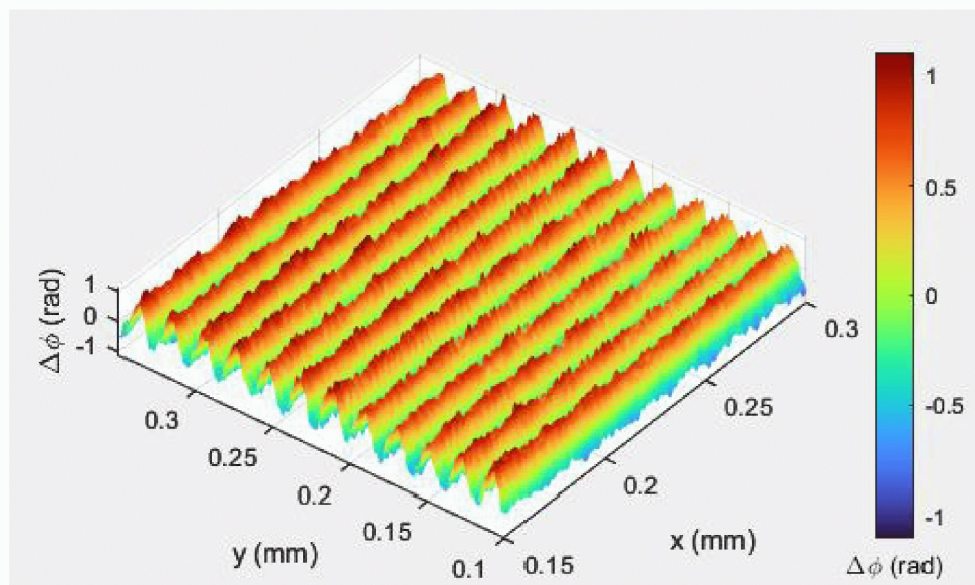
Способ создания фазовых оптических элементов на поверхности полиметилметакрилата (ПММА), включающий облучение поверхности полимера лазерными импульсами и формирование микрорельефа, отличающийся тем, что используют фемтосекундные лазерные импульсы среднего ИК-диапазона с длиной волны 3 мкм, с частотой повторения 10 кГц, длительностью импульса 150 фс, лазерные импульсы фокусируют вблизи поверхности ПММА на глубине от минус 300 до 300 мкм от поверхности, перемещают лазерное пятно по заданным траекториям со скоростью сканирования от 10 до 300 мкм/с, при этом управляют высотой и шириной создаваемого рельефа путем изменения энергии импульсов в диапазоне от 0,3 до 2 мкДж, количества проходов от 1 до 10 и глубины фокусировки, а параметры режима модификации рельефа поверхности ПММА выбирают для обеспечения высоты рельефа от 0,1 до 2 мкм, ширины линий рельефа от 5 до 50 мкм, шероховатости поверхности не более 50 нм и пропускания модифицированной области в диапазоне длин волн от 400 до 1000 нм не менее 90%.



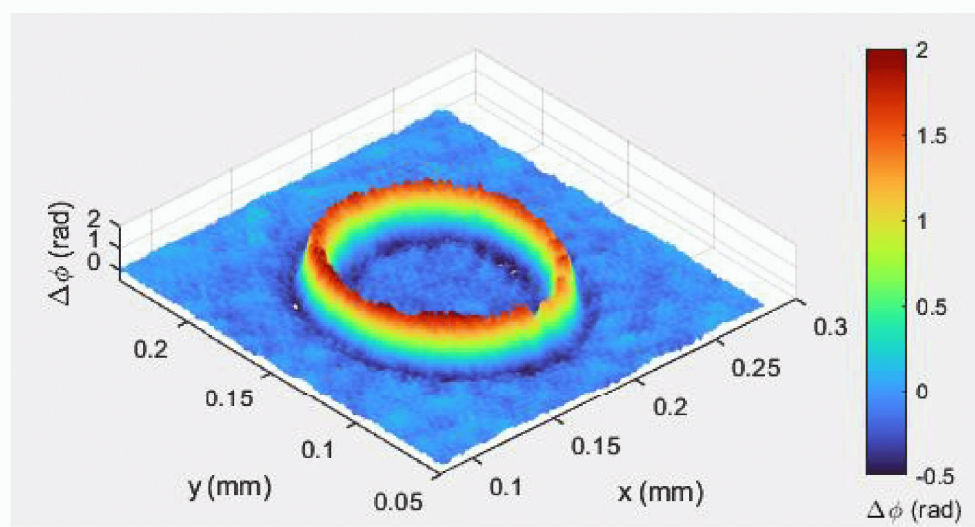
Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4