



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

G21K 1/06 (2021.02); G02B 3/00 (2021.02)

(21)(22) Заявка: 2020144233, 31.12.2020

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
31.12.2020

Дата регистрации:
13.07.2021

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 31.12.2020

(45) Опубликовано: 13.07.2021 Бюл. № 20

Адрес для переписки:

119234, Москва, ул. Ломоносовский проспект,
27, строение 1, Московский государственный
университет имени М.В. Ломоносова, Фонд
"Национальное интеллектуальное развитие"

(72) Автор(ы):

Абрашитова Ксения Александровна (RU),
Балуян Тигран Григорьевич (RU),
Бессонов Владимир Олегович (RU),
Петров Александр Кириллович (RU),
Федянин Андрей Анатольевич (RU),
Шарипова Маргарита Ильгизовна (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Московский государственный
университет имени М.В.Ломоносова" (МГУ)
(RU)

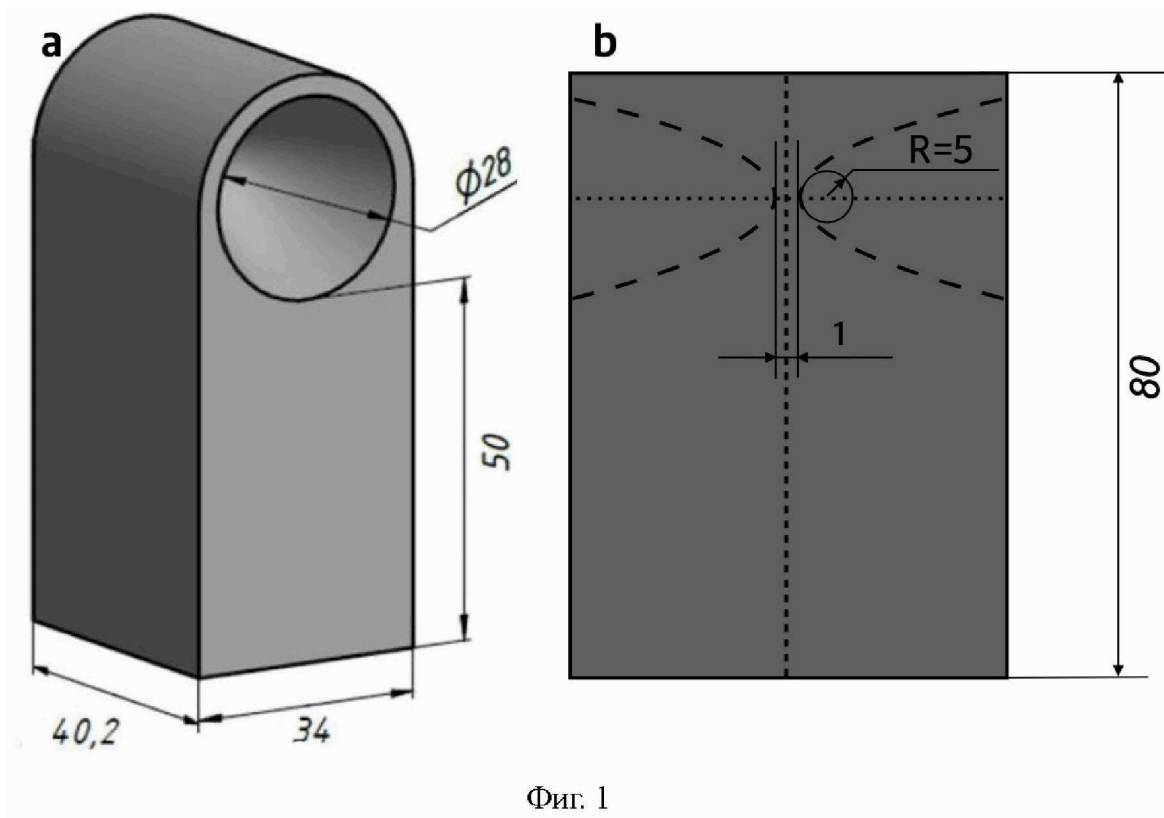
(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2692405 C2, 24.06.2019. RU
2366015 C1, 27.08.2009. RU 2297681 C2,
20.04.2007. RU 2298852 C1, 10.05.2007. CN
2784948 Y, 31.05.2006. CN 202034080 U,
09.11.2011.

(54) ПИРОЛИЗОВАННЫЙ ОБЪЕКТИВ ДЛЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

(57) Реферат:

Полезная модель относится к области рентгеновской оптики, а именно к устройствам фокусировки рентгеновского излучения на основе рентгеновской оптики. Технический результат, достигаемый при использовании заявляемой полезной модели, заключается в уменьшении фокусного расстояния и радиуса кривизны объектива (СПРЛ) в результате использования метода двухфотонной полимеризации с субмикронным разрешением и постобработки (пиролиза), позволяющего добиться кратного (преимущественно, пятикратного) уменьшения линейных размеров изготовленных структур. Заявляемый технический результат достигается тем, что объектив для рентгеновского излучения,

включающий по меньшей мере две единичные линзы на одной плоской подложке, расположенные на общей оптической оси, выполненные из фоторезиста и имеющие параболический профиль по меньшей мере одной рабочей поверхности, согласно техническому решению, представляет собой пиролизованную структуру и имеет радиус кривизны каждой линзы в вершине параболоида до 0,1 мкм. Техническим преимуществом заявляемой полезной модели является также повышение устойчивости объектива к рентгеновскому излучению за счет изменения химического состава материала для изготовления линз. 7 з.п. ф-лы, 5 ил.



Фиг. 1

Область техники, к которой относится полезная модель

Полезная модель относится к области рентгеновской оптики, а именно, к устройствам фокусировки рентгеновского излучения на основе рентгеновской оптики. Устройство может быть использовано при реализации методов рентгеновской микроскопии, микрофотографии, спектроскопии, флуоресцентной спектрометрии.

Уровень техники

Рентгеновская оптика - активно развивающаяся область науки, вызывающая огромный интерес благодаря возможности микроскопии и томографии объектов с высокой разрешающей способностью, определяемой использованием более коротких длин волн по сравнению с видимым световым диапазоном. Высокая проникающая способность позволяет использовать рентгеновское излучение для восстановления трехмерной структуры объектов. Для реализации таких оптических систем с наноразмерной разрешающей способностью необходимы устройства для фокусировки рентгеновских лучей. В простейшем случае таким устройством является собирающая линза, которая фокусирует излучение за счет преломления световых лучей на изогнутой поверхности линзы. В более сложных случаях собирающая система состоит из системы линз или объективов. Типичная оптическая линза для видимого диапазона длин волн двумерная, то есть фокусирует параллельный луч света в двух направлениях - горизонтальном и вертикальном - в точечное изображение. Линза выполняется из прозрачного однородного материала, например, стекла, чтобы в ней не было поглощения и рассеяния света. В геометрии линзы можно выделить две рабочие поверхности - переднюю и заднюю, через которые свет входит и выходит из объема линзы, соответственно. Именно форма поверхности обеспечивает преломление света. Характерным параметром рабочей поверхности линзы является радиус кривизны R . Рабочие поверхности линзы обычно обладают осью вращения, то есть линии симметрии вращения рабочей поверхности. При этом ось вращения является общей для передней и задней рабочих поверхностей, и называется оптической осью. На оптической оси располагается оптический центр линзы или точка, при прохождении через которую луч не испытывает преломления. Если луч света идет параллельно оптической оси, то линза сфокусирует свет в точке, находящейся на оптической оси. Расстояние от оптического центра линзы до фокуса называется фокусным расстоянием F . Это одна из главных характеристик линзы. Фокусное расстояние обратно пропорционально величине d : контрасту показателей преломления материала линзы и окружающей среды (обычно вакуума или воздуха, с показателем преломления, равным 1). В рентгеновском диапазоне этот контраст очень мал: $d = (1 - n_x) \sim 10^{-6} - 10^{-5}$, по сравнению с диапазоном видимого света $d_{\text{опт}} = 0.1 - 0.3$. Для того, чтобы уменьшить фокусное расстояние, используется набор N линз, упорядоченных вдоль оптической оси - составная преломляющая рентгеновская линза (СПРЛ) или объектив для рентгеновского излучения. В случае N одинаковых линз с радиусом кривизны R фокусное расстояние можно посчитать как

$$F = \frac{R}{2Nd} \quad (1)$$

Для фокусировки также может использоваться набор линз с разными радиусами кривизны и размерами входных отверстий (апертур). Например, возможно использование набора линз с постепенно (адиабатически) уменьшающимися радиусами кривизны по заданной формуле [Schroer C. G., Lengeler B. Focusing hard x rays to nanometer dimensions by adiabatically focusing lenses //Physical review letters. - 2005. - Т. 94. - №. 5. - С. 054802] для достижения рекордного значения фокусного расстояния и диаметра

перетяжки в сфокусированном свете.

Кроме того, показатель преломления в рентгеновском диапазоне меньше показателя преломления вакуума, поэтому для фокусировки используются линзы с вогнутыми рабочими поверхностями. Помимо этого, важно учитывать поглощение в массиве линз, которое может быть существенным из-за большого количества материала и приводить к деформации рабочих поверхностей. Дополнительно для уменьшения аберраций и потерь, приводящих к размытию точки фокуса, важно выдерживать форму рабочей поверхности линз и соосность массива линз.

Как следствие, в рентгеновском диапазоне изготовление фокусирующих элементов является практической научной задачей, в которой важно добиться уменьшения фокусного расстояния линз, рентгеноустойкости, точности формы рабочей поверхности линз и их соосности.

Для изготовления СПРЛ используются различные материалы, в том числе металлы (литий, бериллий, алюминий), алмазы, кремний, углерод, полимеры. Основными способами изготовления линз являются механическая штамповка по форме (US005594773A, US 20040052331A1, US006269145, [2]). При этом минимальный достижимый радиус кривизны составляет от нескольких мкм до см, количество одиночных линз в СПРЛ меньше 100, и ошибка соосности составляет не менее 10 мкм. Таким образом, минимально достижимое фокусное расстояние составляет 30 см. Для изготовления линз из кремния и алмаза используется травление по маске [3,4]. Данный способ позволяет делать относительно большие массивы линз с нанометровой точностью, однако травление имеет выделенное направление перпендикулярно поверхности. Таким образом, из уровня техники неизвестны трехмерные линзы, фокусирующие излучение в точку. Линзы, изготовленные указанным выше способом, фокусируют излучение только по одной координате (в линию). Для фокусировки рентгеновского излучения в точку требуется комбинация из двух подобных линз. Это налагает дополнительные условия на минимальную толщину материала, через который проходит рентгеновское излучение, и точность совмещения фокусных расстояний по двум направлениям.

Патент RU 2298852 C1 раскрывает полимерную рентгеновскую линзу с радиусом кривизны не менее 25 мкм. Так как в исходном материале наблюдается эффект памяти формы, возможно варьирование радиуса кривизны такой линзы за счет приложения механического напряжения. Излучение с длиной волны 0,155 мкм фокусируется СПРЛ из 12 линз на расстоянии 49.6 см.

Основным недостатком известной линзы является радиус кривизны линзы не менее 25 мкм, что приводит к фокусному расстоянию почти в полметра. В качестве материала линзы используется акрилатный полимер, который быстро деградирует в мощном рентгеновском излучении.

В патенте RU 2366015 C1 рассмотрены полимерные линзы с минимизированной толщиной для уменьшения поглощения в полимере. Линзы обладают параболическим профилем, радиусом кривизны не менее 4 мкм и обеспечивают фокусное расстояние не менее 25 см для набора из 10 линз.

Экспериментально полученный радиус кривизны линз составляет не менее 4 мкм при расчетном значении менее 0,5 мкм, что свидетельствует о неточности профиля рабочей поверхности линзы при таком способе изготовления. Аналогично предыдущему известному решению, в качестве материала линзы используется акрилатный полимер, который быстро деградирует в мощном рентгеновском излучении.

Наиболее близкой по технической сущности к заявляемой полезной модели является

линза, раскрытая в патенте RU 2692405, где описан процесс изготовления линз из полимерных материалов методом двухфотонной литографии. В результате его применения получают линзу для рентгеновского излучения, выполненную из полимерного материала, включающую по меньшей мере одну рабочую поверхность, выполненную в виде параболоида вращения с радиусом кривизны в вершине параболоида до 0,4 мкм.

Данное решение обладает рядом недостатков. Во-первых, минимальный размер радиуса кривизны рабочей поверхности составляет 0,4 мкм, что затрудняет возможность использования таких линз при необходимости достижения наноразмерных фокусных расстояний. Во-вторых, полимерный материал, используемый для изготовления линз, обладает низкой рентгеноустойчивостью. Было показано, что фокусирующие свойства подобных рентгенооптических элементов деградируют после 6 часов синхротронного излучения [1]. С учетом того, что стандартное время измерения для одного эксперимента на синхротроне составляет неделю (в режиме 7 дней в неделю, 24 часа), время стабильной работы рентгеновской линзы является важной характеристикой.

Таким образом, техническая проблема, решаемая посредством заявляемой полезной модели, заключается в необходимости преодоления недостатков, присущих аналогам и прототипу, за счет разработки трехмерного преломляющего рентгеновского объектива, выполненного при помощи аддитивных технологий из оптически прозрачных полимеров, предназначенного для фокусировки, сбора и коллимации рентгеновского излучения с длиной волны менее 10 нм.

Раскрытие полезной модели

Технический результат, достигаемый при использовании заявляемой полезной модели, заключается в уменьшении фокусного расстояния и радиуса кривизны объектива (СПРЛ) в результате использования метода двухфотонной полимеризации с субмикронным разрешением и постобработки (пиролиза), позволяющего добиться кратного (более чем в 3 раза) уменьшения линейных размеров изготовленных структур.

Техническим преимуществом заявляемой полезной модели является также повышение устойчивости объектива к рентгеновскому излучению за счет изменения химического состава материала для изготовления линз.

Технический результат достигается в результате применения метода двухфотонной полимеризации с субмикронным разрешением и постобработки (пиролиза) исходного полимерного материала.

Заявляемый технический результат достигается тем, что объектив для рентгеновского излучения, включающий, по меньшей мере две единичные линзы на одной плоской подложке, расположенные на общей оптической оси, выполненные из фоторезиста, и имеющие параболический профиль по меньшей мере, одной рабочей поверхности, согласно техническому решению, представляет собой пиролизованную структуру и имеет радиус кривизны каждой линзы в вершине параболоида до 0,1 мкм. При этом отдельные линзы в составе объектива могут быть как идентичными, так и отличаться по своим геометрическим и оптическим параметрам. В простейшем случае объектив состоит из одинаковых линз, и его фокусное расстояние определяется формулой (1). Отдельные линзы объектива могут содержать две рабочие поверхности в виде параболоида вращения с вершинами, расположенными на одной оптической оси линзы. Рабочая поверхность линзы объектива имеет выпуклую или вогнутую форму, при этом минимальное расстояние между вогнутыми рабочими поверхностями в вершинах параболоидов линз составляет до 0,1 мкм. Линзы объектива могут быть расположены на основании, обеспечивающем увеличение расстояния между оптической осью и

подложкой. В качестве фоторезиста используют Ormocomp, SZ2080 или IP-Dip, SU8. В составе фоторезистов предпочтительно использование химических элементов с низким атомным числом, таких как водород и углерод, для которых характерно низкое поглощение рентгеновского излучения. Объектив может быть выполнен из идентичных линз или из линз с постепенно уменьшающимися радиусами кривизны рабочих поверхностей и апертурами.

Заявляемый объектив получен в результате применения способа изготовления пиролизованных рентгеновских линз, включающего следующие этапы:

1) Нанесение фоторезиста на подложку;

2) Экспонирование подложки, то есть печать набора структур сфокусированным лазерным излучением в режиме двухфотонной литографии;

3) Проявка экспонированного образца;

4) Пиролиз изготовленных структур, т.е. высокотемпературный отжиг в инертной атмосфере.

Этап пиролиза позволил достичь двух важных результатов. Во-первых, под действием температуры испаряются органические материалы, которые в ином случае деградировали бы под действием рентгеновского излучения. Пиролизованный материал свободен от органических составляющих и обладает повышенными прочностными характеристиками, как механическими, так и стойкостью к излучению и температурным нагревам. Во-вторых, пиролиз приводит к появлению усадки линз и сглаживанию возможных дефектов поверхности линзы. Корректный подбор параметров пиролиза позволяет достичь изотропной усадки изготовленной структуры, так что линза равномерно сжимается по трем пространственным направлениям. Это также означает, что радиус кривизны линзы уменьшается пропорционально коэффициенту усадки, что и позволило получить линзы с радиусом кривизны до 0,1 мкм. При этом, так как фокусное расстояние определяется радиусом кривизны рабочих поверхностей линзы (см. (1)), то использование пиролиза приводит к линзам с уменьшенным фокусным расстоянием. Таким образом, использование пиролиза позволяет достичь лучшего разрешения. При этом коэффициент усадки зависит от вида полимера, температуры и времени отжига. Контролируя эти параметры, можно задавать требуемый коэффициент усадки и, как следствие, регулировать получаемое фокусное расстояние объектива. Коэффициент усадки может варьироваться в диапазоне 1...5.

Заявляемая полезная модель более подробно описана ниже с использованием следующих терминов, определений и сокращений.

Рентгеновское излучение - электромагнитное излучение с длиной волны в диапазоне от 10^{-4} нм до 10 нм.

Линза - устройство для управления светом (фокусировки или рассеяния) через эффект преломления света, представляющее собой прозрачный однородный материал, ограниченный двумя преломляющими поверхностями.

Рабочая поверхность линзы - одна из двух преломляющих поверхностей линзы.

Поверхность вращения - поверхность, образованная при вращении произвольной линии вокруг прямой линии.

Ось вращения - прямая, вращением вокруг которой образована ось вращения.

Оптическая ось (главная оптическая ось) - прямая, совпадающая с осью вращения рабочих поверхностей линзы.

Оптический центр линзы - точка, при прохождении через которую луч не испытывает преломления в линзе.

Фокус (главный фокус) оптической системы - точка, в которой собираются

прошедшие через оптическую систему лучи (или их продолжения для рассеивающих систем) при падении на оптическую систему параллельного оптической оси пучка лучей.

Фокусное расстояние линзы (оптической системы) - расстояние от оптического центра линзы (от точки пересечения первой рабочей поверхности оптической системы с оптической осью) до точки фокуса.

Декремент показателя преломления вещества - отличие показателя преломления вещества от единицы, $d=1-n$.

Аберрации - искажения при построении изображений.

Сферические аберрации - аберрации, обусловленные тем, что фокусы параллельных лучей света, идущих на разном расстоянии от оптической оси линзы, не совпадают.

Пиролиз - высокотемпературный отжиг в инертной атмосфере

СЭМ - сканирующая электронная микроскопия

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

R - радиус кривизны поверхности

n - показатель преломления вещества

$n_{\text{опт}}$ - показатель преломления вещества в видимом диапазоне электромагнитного излучения

n_x - показатель преломления вещества в рентгеновском диапазоне электромагнитного излучения

F - фокусное расстояние

N - число элементов в составной преломляющей рентгеновской линзе

$d=\text{mod}(1-n)$ - декремент показателя преломления

T - температура

Краткое описание чертежей

Полезная модель поясняется следующими чертежами.

На фиг. 1 представлена характерная трехмерная модель рентгеновской линзы, полученная в соответствии с примером конкретного выполнения заявляемого способа. Все размеры приведены в мкм. Слева (a)- трехмерное изображение, справа (b) - вертикальное сечение.

На фиг. 2 представлено СЭМ-изображение линзы из полимера SZ2080, до (a) и после (b) пиролиза.

На фиг. 3 представлена принципиальная схема рентгеновского объектива.

На фиг. 4 представлено СЭМ-изображение рентгеновского объектива, состоящего из 14 отдельных линз, выполненных из фоторезиста Ormospr.

На фиг. 5 представлено СЭМ-изображение участка рентгеновского объектива, состоящего из 4 отдельных линз, выполненных из фоторезиста Ormospr.

Осуществление полезной модели

Общий вид отдельной линзы, используемой при формировании объектива, (в одном из возможных вариантов реализации) представлен на фиг. 1. Для изготовления объектива в целом, и составляющей его линзы, в частности, на первом этапе может быть использован метод двухфотонной лазерной литографии — метод фотолитографии, основанный на явлении двухфотонного поглощения ([Malinauskas M. et al. “Ultrafast laser nanostructuring of photopolymers: A decade of advances”, Physics Reports, 2013]. Этот метод позволяет изготавливать трехмерные полимерные структуры с разрешением, превосходящим дифракционный предел. На втором этапе для получения объектива с заявляемыми характеристиками выполняют высокотемпературный отжиг изготовленной в результате применения метода двухфотонной лазерной литографии структуры.

1. В качестве материала для печати используют фоторезист, чувствительный к

излучению второй гармоники от излучения используемого лазера. Возможно использование как коммерчески доступных фоторезистов, так и других, например, изготовленных самостоятельно в лабораторных условиях. В случае использования полностью органического фоторезиста (например, IP-Dip) получаемый после пиролиза материал будет аморфным кремнием. При использовании комбинированного органо-неорганического фоторезиста (например, SZ2080 и Ormosomr) после пиролиза возможно достижение иных материалов, например, плавленого кварца или допированного стекла.

Фоторезист наносят на очищенную подложку. В качестве подложки может быть использовано стекло, кремний, специализированная мембрана из нитрида кремния для проведения синхротронных исследований. Для очистки подложки может использоваться ацетон, изопропиловый спирт, дистиллированная вода, раствор пираньи, сжиженный газ и другие компоненты. Нанесение фоторезиста производят специальным дозатором. Для контроля толщины нанесенного слоя фоторезиста может использоваться вспомогательная вставка заданной высоты (спейсер), либо спинкоатер. В случае использования ячейки второй подложкой накрывают нанесенный фоторезист частично или полностью, создавая «сэндвич» из двух пластин с фоторезистом посередине.

В качестве установки для двухфотонной литографии возможно использование коммерчески доступных установок: Nanoscribe, Tetra, MicroLight3D, LightFab и т.д. Также возможно использование самостоятельно собранных установок для лазерной печати.

Типичная схема установки представлена в публикации [5].

Линзы устанавливают на подставку для уменьшения влияния подложки на линзы при пиролизе. В качестве подставки может быть использована модель со сплошным заполнением, сетчатая структура, набор колонн и другие варианты, обеспечивающие механическое сопряжение с моделью и подложкой. Высота подставки зависит от материала фоторезиста и пиковой температуры отжига и составляет не менее 10 мкм. Для температуры 690°C высота подставки составляет 35 мкм, для 900°C - 50 мкм.

После процесса печати в объеме фоторезиста содержится напечатанная модель.

Для удаления неэкспонированного фоторезиста образец помещают в проявитель. Тип проявителя подбирается под фоторезист. Можно использовать OrmoDev, PGMEA, метилизобутил кетон. Время проявки может варьироваться от 5 минут до 2 суток. Время проявки зависит от типа проявителя и типа подложки и в среднем составляет около 2 часов. После проявки образец можно промыть, например, водой либо спиртом. Также допускается дополнительное экспонирование под УФ-лампой для придания большей механической стойкости изготовленным линзам.

2. Для пиролиза изготовленной линзы используют печь с возможностью контроля температуры и атмосферы, способная нагреться до установленной пиковой температуры. Изготовленный образец кладут в камеру печи. Затем в камере печи устанавливают постоянный поток инертного газа. Процесс пиролиза можно разбить на три стадии: нагрев до пиковой температуры, выдержка в течение определенного времени на пиковой температуре, охлаждение до комнатной температуры. На данном этапе изготовления важен медленный нагрев и охлаждение (не быстрее 30°C/мин) для того, чтобы не повредить изготовленные структуры сильными колебаниями температуры. Минимальная пиковая температура составляет 450°C, до этого не будет наблюдаться существенного изменения химического состава. Дальнейший подбор пиковой температуры пиролиза зависит от нескольких факторов: скорость и время нагрева (чем меньше скорость и время, тем выше может быть пиковая температура), материал подложки (подложка должна быть устойчива к пиковой температуре), тип фоторезиста, требуемый коэффициент усадки линз (чем выше температура, тем больше усадка). Процесс

выделения веществ прекращается при температурах выше 650°C. При температуре 900°C структуры существенно меняются, усаживаясь в 5 раз. Время выдержки при пиковой температуре составляет от нескольких минут до часа. На третьей стадии образец охлаждается. Охлаждение можно задавать контролируемо, уменьшая

5 температуру в печи с постоянной скоростью. Также допустимо охлаждение путем выключения печи. В этом случае линзы охлаждаются со временем не по линейной зависимости от времени, но скорость охлаждения достаточно медленная, чтобы линзы не деформировались из-за перепадов температуры. После окончания пиролиза в камеру возвращается воздух, и изготовленные линзы готовы к использованию. Весь процесс

10 отжига занимает от нескольких часов до нескольких десятков часов.

Типичная схема устройства, представляющего собой рентгеновский объектив (составную преломляющую линзу), показана на фиг. 3. Рентгеновский объектив состоит из набора произвольного количества единичных линз на общей подложке, расположенных строго вдоль общей оптической оси. Если все единичные линзы

15 рентгеновского объектива являются двояковогнутыми с параболическим профилем и имеют одинаковые параметры, фокусное расстояние рентгеновского объектива определяется по формуле $F=R/2Nd$, где d - декремент показателя преломления материала линзы на длине волны рентгеновского излучения, R - радиус кривизны основания параболического профиля, N - количество линз в объективе. Чем больше линз входит

20 в состав объектива, тем меньше его фокусное расстояние. Оптимальное расстояние между центрами единичных линз вдоль их оптической оси соответствует длине L единичной линзы. Таким образом, оптимальная длина объектива соответствует его минимальной длине NL . Количество линз в объективе должно подчиняться неравенству $NL \ll F$ для требуемого диапазона длин волн рентгеновского излучения.

Рентгеновский объектив (или составная преломляющая линза) может состоять из

25 единичных линз, расположенных на пьедестале (основании), для уменьшения эффекта подложки. В этом случае, высота пьедестала всех единичных линз должна быть одинакова. Также для уменьшения эффекта подложки и улучшения рентгенооптических свойств рентгеновского объектива, он может располагаться на подложке, длина которой

30 вдоль оптической оси объектива лишь немного (на несколько десятков микрон) превышает длину объектива.

Настоящая полезная модель поясняется конкретными примерами исполнения, которые наглядно демонстрируют возможность достижения требуемого технического

результата.

Пример. Объективы заявляемой конструкции были изготовлены с использованием

35 метода двухфотонной лазерной литографии. Экспериментальная установка двухфотонной лазерной литографии основана на титан-сапфировом фемтосекундном лазере с центральной длиной волны 800 нм, шириной спектра 25 нм, частотой повторения импульсов 80 МГц и интегральной мощностью 580 мВт. Для реализации способа

40 используют титан-сапфировый лазер, генерирующий лазерные импульсы с центральной длиной волны 800 нм, шириной спектра 25 нм, частотой следования 80 МГц и интегральной мощностью 600 мВт. Призмный прекомпрессор позволяет достигать значения длительности импульсов в объеме фоторезиста 80 фс. Система контроля мощности состоит из датчика мощности излучения с шагом менее 0.1 мВт. Акустооптический

45 модулятор используется в качестве затвора. Перемещение перетяжки в объеме фоторезиста осуществляется при помощи двухкоординатного быстрого механизированного гальвозеркала и пьезотранслятора. Объектива. Излучение лазера фокусируется с помощью объектива в область фоторезиста, нанесенного тонким слоем

(до 200 мкм) на подложку. Юстировка положения ячейки, определение положения перетяжки сфокусированного излучения, а также визуализация процесса изготовления производится при помощи КМОП камеры и системы освещения на просвет, собранной по схеме Келлера.

В качестве модели отдельной линзы для дальнейшей печати использовалась трехмерная модель, представленная на фиг. 1. Рабочие поверхности линзы представляли собой параболоиды вращения с радиусом 5 мкм и апертурой 28 мкм, перетяжка (минимальное расстояние между рабочими поверхностями - 1 мкм. Линза располагалась на подставке, представлявшей из себя сплошной параллелепипед размерами 30×40,2×50 мкм. Изображение отдельной линзы, изготовленной из фоторезиста SZ2080, представлен на фиг. 2.

Объективы изготавливались из коммерчески доступных фоторезистов, способных к дальнейшей пиролизной обработке, в том числе Ormocomp, IP-Dip и SZ2080. В качестве подложек использовались кремниевые пластины толщиной 1 мм и покровные стекла толщиной от 100 до 200 мкм. Проявка изготовленных структур производилась в растворителе метилизобутил кетон в течение 2 часов.

Отжиг произведенных объективов производился в горизонтальной трубчатой печи в атмосфере аргона. При отжиге выделялось три стадии:

1) Линейный нагрев от комнатной температуры до пиковой температуры отжига со скоростью 1.5°C/мин;

2) Выдержка при пиковой температуре $T_{\max}$ в течение 30 мин;

3) Выключение печи и последующее охлаждение до комнатной температуры.

В качестве пиковой температуры $T_{\max}$ использовалось 2 основных значения: 450°C и 690°C. Выбор этих двух значений обусловлен тем, что процесс модификации состава полимера начинается при 450°C и гарантированно прекращается при 690°C (так как эта температура выше 650°C). Поэтому эти значения определяют диапазон изменения химического состава. При температурах выше 900°C структуры могут сильно деформироваться, либо полностью исчезать с подложки. Состав материала изготовленных линз определялся при помощи энергодисперсионной спектроскопии. В таблице 1 приведены результаты элементного анализа материала линз в процессе пиролиза.

Таблица 1. Влияние пиролиза на элементный состав материала рентгеновской линзы

Фоторезист	$T_{\max}$, °C	C, ат.%	O, ат.%	Si, ат.%	Zr, ат.%	S, ат.%
Ormocomp	До пиролиза	67	26	4	-	3
	450	44	43	13	-	-
	690	3	70	27	-	-
SZ2080	До пиролиза	43	45	10	2	-
	450	20	51	26	3	-
	690	3	66	30	1	-

Измерение геометрических размеров линз до и после пиролиза производилось при помощи сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). На фиг. 4 показаны СЭМ-изображения одиночной линзы до и после пиролиза при пиковой температуре 690°C, выполненной из полимера SZ2080. По микрофотографиям СЭМ определялись радиусы кривизны рабочих поверхностей R до (R_i) и после (R_f) пиролиза. Радиусы кривизны линз, полученных в соответствии с прототипом, составляли до 0,5-0,4 мкм, а в результате введения дополнительной стадии отжига, радиус кривизны удалось уменьшить до 0,1 мкм (усадка линзы составила до 5). Коэффициент усадки структуры рассчитывался как

отношение радиусов кривизны до и после пиролиза: $k=R_i/R_f$. Для фоторезиста SZ2080 коэффициент усадки составил 1.2 при 450°C и 1.6 при 690°C. На фиг. 5 показано СЭМ-изображение массива из 4 линз после пиролиза при пиковой температуре 450°C, выполненного из полимера Ormocomp. Для фоторезиста Ormocomp коэффициент усадки составил 2.0 при 450°C и 2.4 при 690°C. Следует отметить, коэффициент усадки также будет меняться при изменении времени выдержки при пиковой температуре.

Таблица 2. Коэффициент усадки пиролизованных линз при разных пиковых температурах пиролиза

Фоторезист	Коэффициент усадки при разных пиковых температурных пиролиза					
	400°C	450°C	480°C	690°C	800°C	900°C
Ormocomp	1	2.0	2.1	2.4	3.6	5
SZ2080	1	1.2	1.2	1.6	2.7	2.9

Отдельные примеры изготовленных объективов представлены на фиг. 4 и 5.

(57) Формула полезной модели

1. Объектив для рентгеновского излучения, включающий по меньшей мере две единичные линзы на одной плоской подложке, расположенные на общей оптической оси, выполненные из фоторезиста и имеющие параболический профиль по меньшей мере одной рабочей поверхности, отличающийся тем, что он представляет собой пиролизованную структуру и имеет радиус кривизны каждой линзы в вершине параболоида до 0,1 мкм.

2. Объектив для рентгеновского излучения по п.1, отличающийся тем, что линзы в его составе содержат две рабочие поверхности в виде параболоида вращения с вершинами, расположенными на оптической оси линзы.

3. Объектив для рентгеновского излучения по п.1, отличающийся тем, что линзы в его составе имеют выпуклую или вогнутую рабочую поверхность.

4. Объектив для рентгеновского излучения по п.1, отличающийся тем, что минимальное расстояние между вогнутыми рабочими поверхностями в вершинах параболоидов линз составляет до 0,1 мкм.

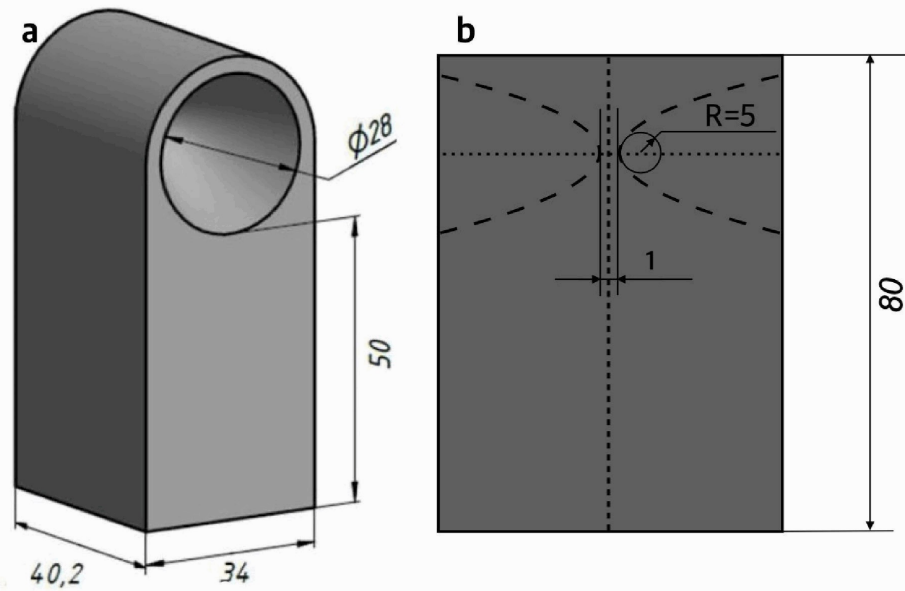
5. Объектив для рентгеновского излучения по п.1, отличающийся тем, что линзы в его составе расположены на основании, которое обеспечивает увеличение расстояния между оптической осью и подложкой.

6. Объектив для рентгеновского излучения по п.1, отличающийся тем, что в качестве фоторезиста использован Ormocomp, SZ2080 или IP-Dip, SU8.

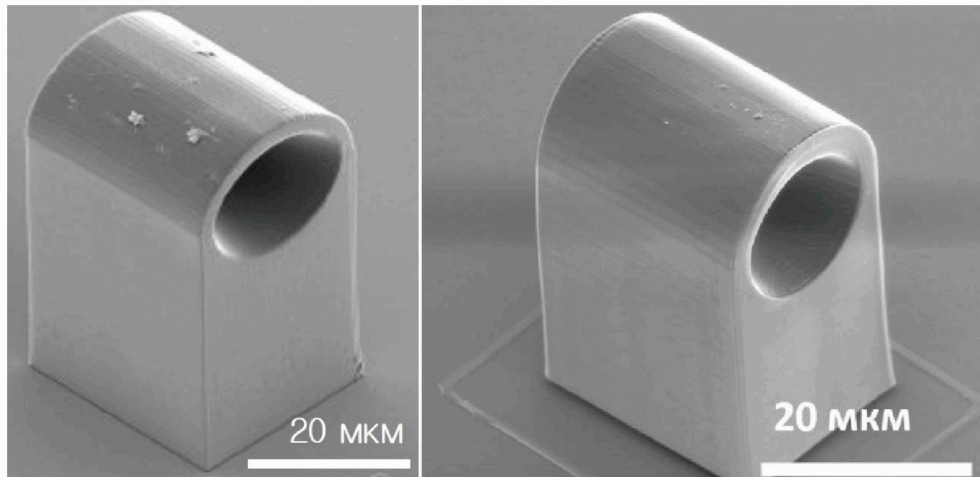
7. Объектив для рентгеновского излучения по п.1, отличающийся тем, что состоит из идентичных линз.

8. Объектив для рентгеновского излучения по п.1, отличающийся тем, что состоит из линз с постепенно уменьшающимися радиусами кривизны рабочих поверхностей и апертурами.

1

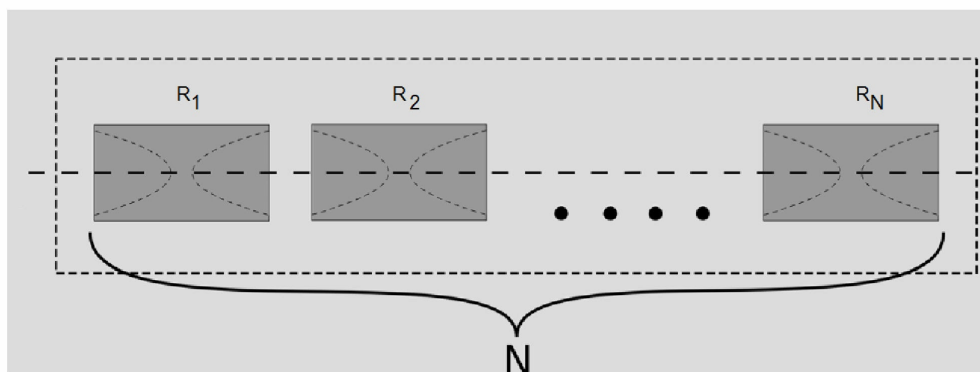


Фиг. 1

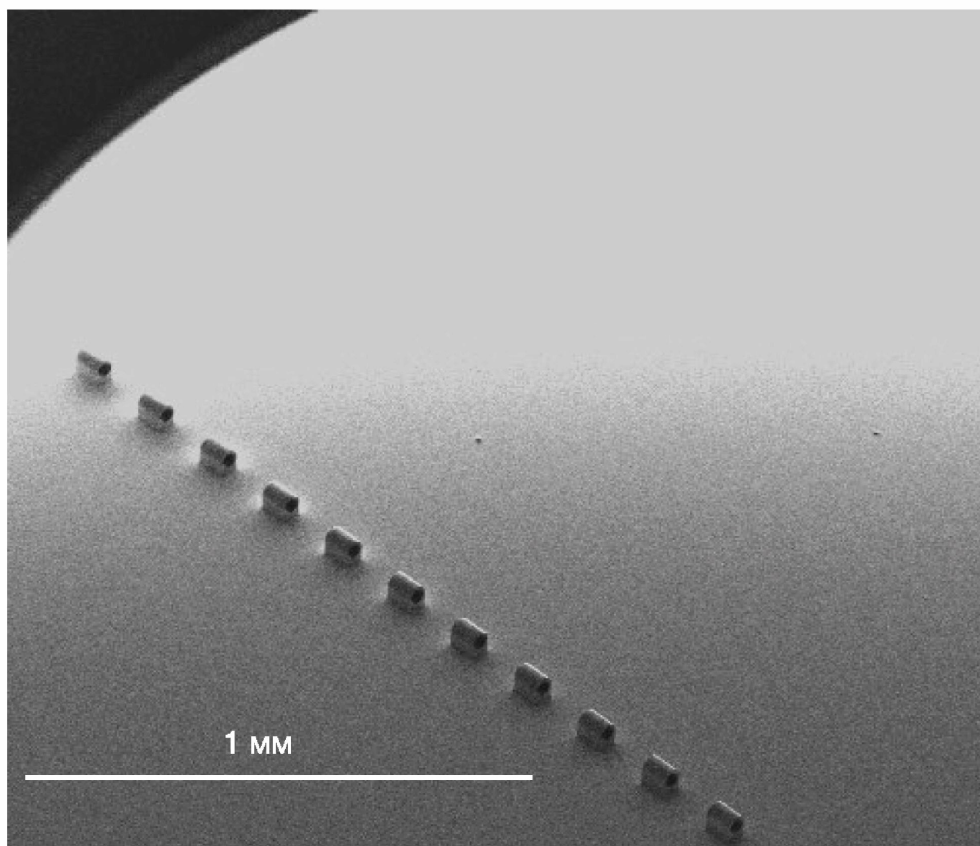


Фиг. 2

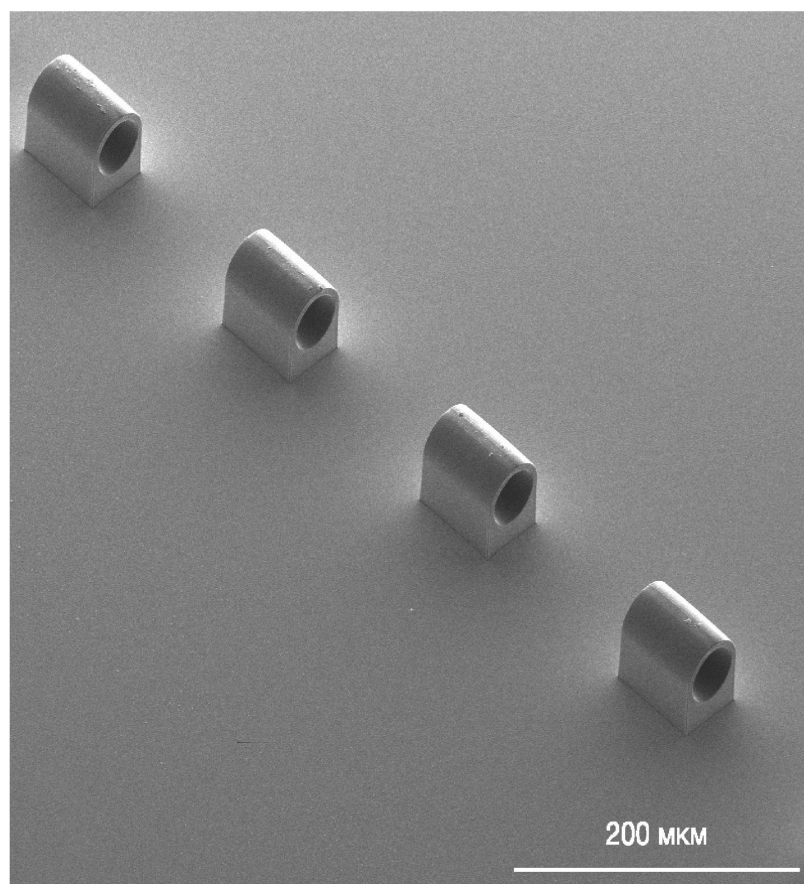
2



Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5