



**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

B23K 26/066 (2019.02); B23K 26/04 (2019.02); B23K 26/352 (2019.02)

(21)(22) Заявка: 2016147555, 12.05.2015

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
12.05.2015Дата регистрации:
23.05.2019

Приоритет(ы):

(30) Конвенционный приоритет:
12.05.2014 EP 14167931.6

(43) Дата публикации заявки: 14.06.2018 Бюл. № 17

(45) Опубликовано: 23.05.2019 Бюл. № 15

(85) Дата начала рассмотрения заявки РСТ на
национальной фазе: 12.12.2016(86) Заявка РСТ:
IB 2015/053494 (12.05.2015)(87) Публикация заявки РСТ:
WO 2015/173735 (19.11.2015)Адрес для переписки:
197101, Санкт-Петербург, а/я 128, "АРС-
ПАТЕНТ", М.В. Хмара

(72) Автор(ы):

РАЙССЕ, Гюнтер (DE),
ВАЙССМАНТЕЛЬ, Штеффен (DE),
ЭНГЕЛ, Энди (DE),
ПФАЙФФЕР, Мануэль (DE),
КРАЧ, Александер (DE),
БЁЛЬИ, Шарль (CH),
КАЛЬ, Маттиас (CH)(73) Патентообладатель(и):
БЁЛЬИ-ГРАВЮР СА (CH)(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: US 20120243094 A1, 27.09.2012. US
20050059265 A1, 17.03.2005. US 20030127441
A1, 10.07.2003. JP 2003211278 A, 29.07.2003.
SU 1508468 A1, 20.01.1995. RU 2440084 C2,
20.01.2012. RU 2401185 C2, 10.10.2010.

(54) УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПРОЕЦИРОВАНИЯ МАСКИ ПУЧКОМ ФЕМТОСЕКУНДНОГО И ПИКОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРА, СОДЕРЖАЩЕЕ ОГРАНИЧИТЕЛЬ, МАСКУ И СИСТЕМЫ ЛИНЗ

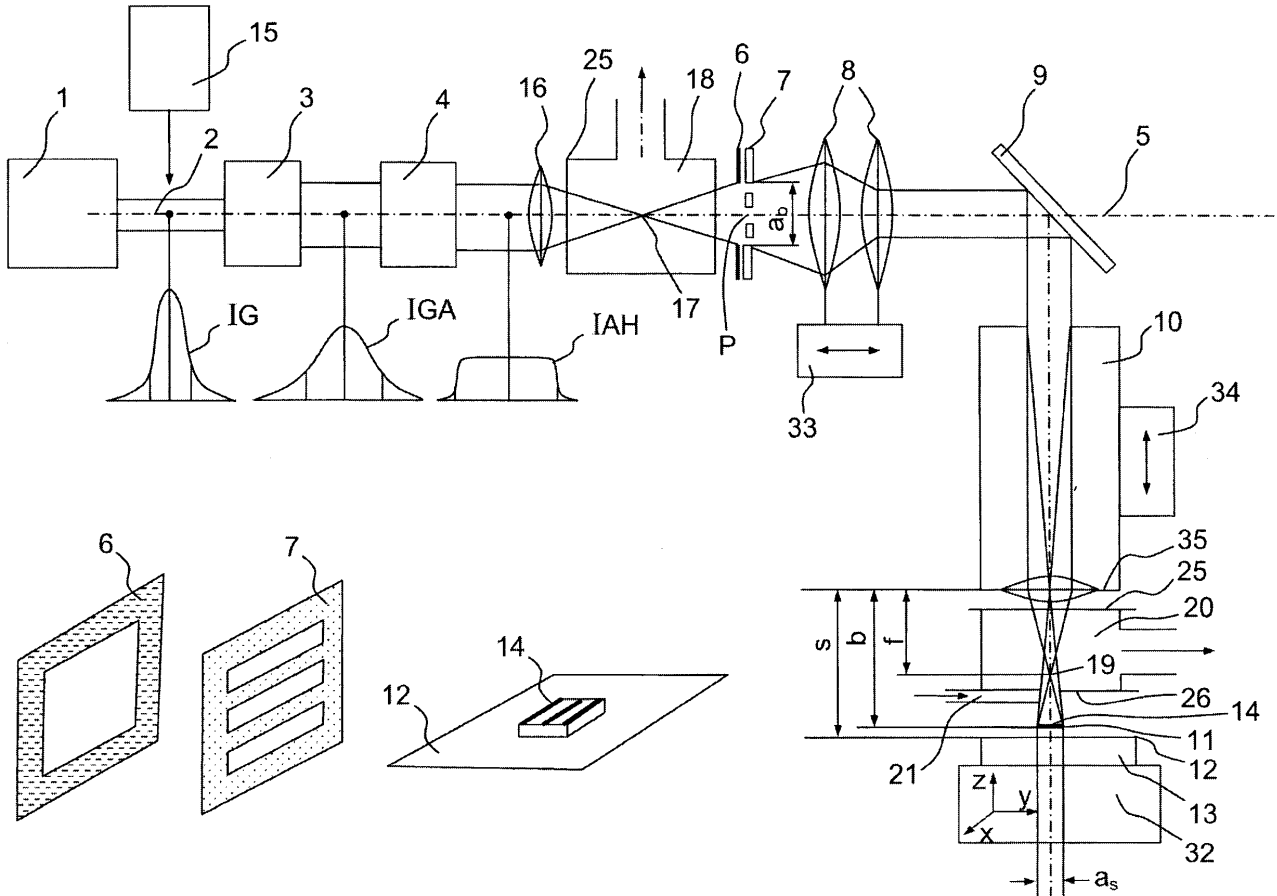
(57) Реферат:

Изобретение относится к устройству для макроструктурирования поверхности подложки воздействием проецированными посредством маски фемтосекундными или пикосекундными лазерными пучками. Устройство обеспечивает проецирование маски на поверхность подложки упомянутыми импульсными лазерными пучками (2) таким образом, чтобы в некотором местоположении на оптической оси получить импульсы лазерного пучка с увеличенным поперечным сечением лазерного пучка или импульсы лазерного пучка с уменьшенным

поперечным сечением лазерного пучка, и равномерным распределением интенсивности по своему поперечному сечению. На пути пучка (2) в указанном местоположении последовательно расположены ограничитель (6) с заданной геометрией апертуры ограничителя и маска (7) с заданной геометрией апертуры маски. Полевая линзовая система (8) и объектив (10) формирования изображения расположены таким образом, чтобы недифрагированные и дифрагированные компоненты лазерного пучка (2) импульсов, прошедшие через ограничитель

(6) и маску (7), направлялись в объектив (10), формирующий изображение, имеющее заданную апертуру, с помощью полевой линзовой системы (8) таким образом, чтобы в поперечном сечении указанного лазерного пучка импульсов в плоскости формирования изображения создавалось уменьшенное изображение распределения интенсивности, сформированного ограничителем (6) и маской (7), точное в каждой детали и имеющее заданный масштаб формирования изображения. В 1 варианте проведения пучка дополнительная линзовая система (16), полевая линзовая система (8) и объектив (10), формирующий изображение,

расположены относительно друг друга таким образом, чтобы между объективом (10), формирующим изображение, и поверхностью подложки создавался фокус (19). Во 2 варианте проведения пучка дополнительная линзовая система (16), полевая линзовая система (8) и объектив (10), формирующий изображение, расположены относительно друг друга таким образом, чтобы между полевой линзовой системой (8) и объективом (10), формирующим изображение, создавался фокус (22). Устройство содержит по меньшей мере одну вакуумную кювету, окружающую область фокуса (19) и область фокуса (22). 9 з.п. ф-лы, 5 ил.



ФИГ. 1

RU 2689018 C2

RU 2689018 C2



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(51) Int. Cl.
B23K 26/066 (2014.01)
B23K 26/04 (2014.01)
B23K 26/352 (2014.01)

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC

B23K 26/066 (2019.02); B23K 26/04 (2019.02); B23K 26/352 (2019.02)(21)(22) Application: **2016147555, 12.05.2015**(24) Effective date for property rights:
12.05.2015Registration date:
23.05.2019

Priority:

(30) Convention priority:
12.05.2014 EP 14167931.6(43) Application published: **14.06.2018 Bull. № 17**(45) Date of publication: **23.05.2019 Bull. № 15**(85) Commencement of national phase: **12.12.2016**(86) PCT application:
IB 2015/053494 (12.05.2015)(87) PCT publication:
WO 2015/173735 (19.11.2015)

Mail address:

**197101, Sankt-Peterburg, a/ya 128, "ARS-
PATENT", M.V. Khmara**

(72) Inventor(s):

**RAJSSE, Gyunter (DE),
VAJSSMANTEL, Shteffen (DE),
ENGEL, Endi (DE),
PFAJFFER, Manuel (DE),
KRACH, Aleksander (DE),
BELI, Sharl (CH),
KAL, Mattias (CH)**

(73) Proprietor(s):

BOEGLI-GRAVURES SA (CH)(54) **DEVICE FOR PROJECTING MASK WITH BEAM OF FEMTOSECOND AND PICOSECOND LASER, CONTAINING LIMITER, MASK AND SYSTEM OF LENSES**

(57) Abstract:

FIELD: instrument engineering.

SUBSTANCE: invention relates to device for macro structuring of substrate surface by means of femtosecond or picosecond laser beams projected by means of mask. Device provides for projection of mask onto surface of substrate by means of specified pulse laser beams (2) so that in certain location on optical axis to receive pulses of laser beam with increased cross section of laser beam or pulses of laser beam with reduced cross section of laser beam, and uniform distribution of intensity along its cross section. On path of beam (2) at said location there are successively arranged limiter (6) with preset geometry of aperture

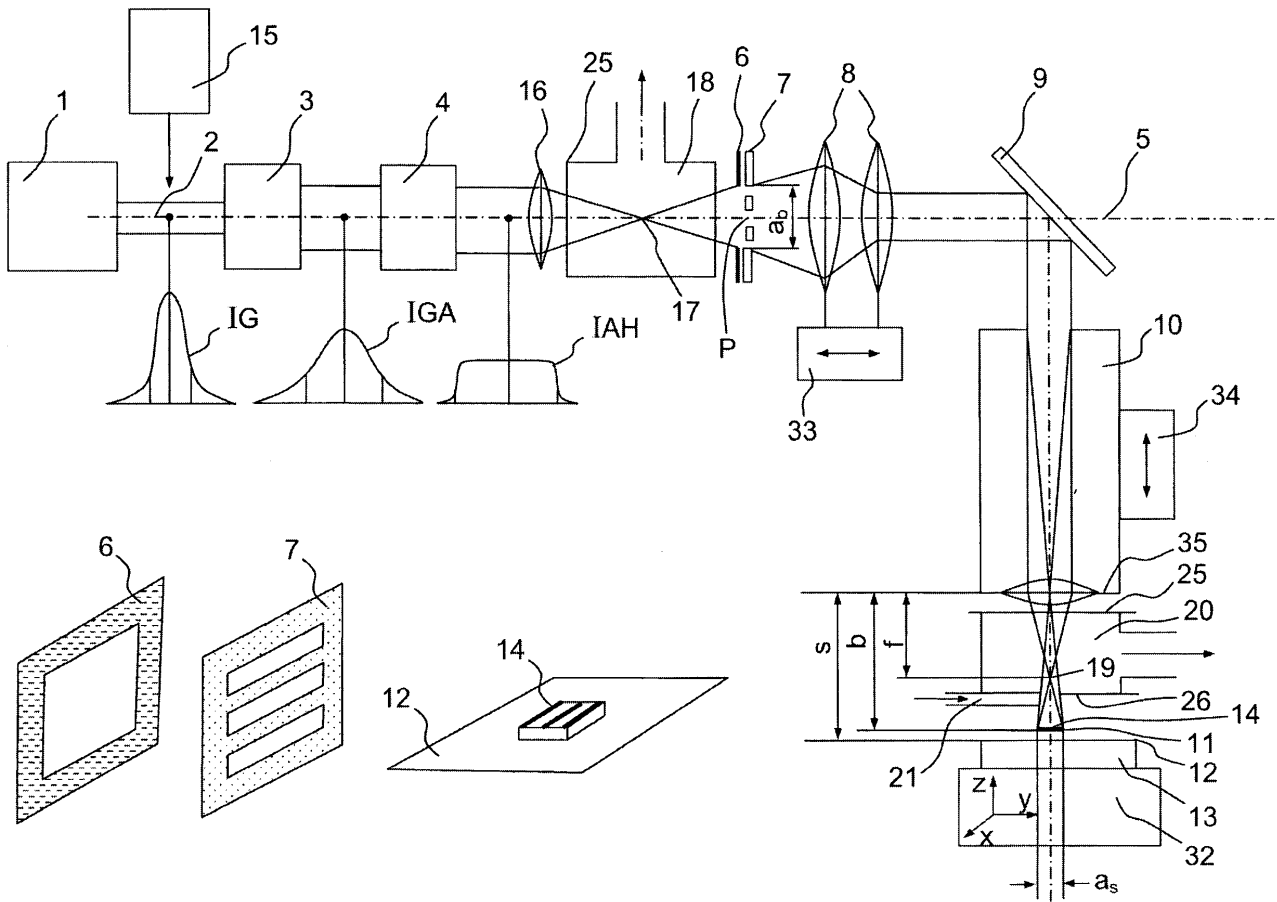
of limiter and mask (7) with preset geometry of mask aperture. Field-effect lens system (8) and imaging lens (10) are arranged such that non-diffracted and diffracted components of laser beam (2) of pulses transmitted through limiter (6) and mask (7) are directed into lens (10), forming an image having a predetermined aperture using a field-effect lens system (8) such that in a cross-section of said laser beam of pulses in the image formation plane, a reduced intensity distribution image formed by limiter (6) and mask (7) is generated, image is accurate in each part and having a given scale of image formation. In the first embodiment, the additional lens system (16), the field-effect lens system (8) and

imaging forming lens (10) are positioned relative to each other such that focus (19) is created between the image forming lens (10) and substrate surface. In compliance with second version, additional lens system (16), field-effect lens system (8) and image forming lens (10) are arranged relative to each other such that

(10), focus (22) is created. Device contains at least one vacuum cell surrounding focal area (19) and focus area (22).

EFFECT: disclosed is a device for projecting a mask with a beam of a femtosecond and a picosecond laser, having a limiter, a mask and lens systems.

10 cl, 5 dwg



ФИГ. 1

RU 2689018 C2

RU 2689018 C2

Область техники, к которой относится изобретение

Настоящее изобретение относится к устройству для проецирования маски пучками фемтосекундного и пикосекундного лазера.

Уровень техники

5 Способы и устройства для проецирования маски пучками эксимерного лазера известны и используются для микроструктурирования поверхностей твердых тел, в частности, для формирования трехмерных микроструктур посредством планомерной послойной абляции вещества с использованием, в числе прочих, и эксимерных лазеров (см., среди прочего, публикации Excimer laser technology, Ed. Dr. Dirk Basting, Lambda
10 Physik AG Gottingen 2001, ISBN 3-00-006395-1, и Weissmantel, S.; Reisse, G.; Haehnel, F.; Bertram, R.; Boettcher, R.; Production of microstructures in wide-band-gap and organic materials using pulsed laser ablation at 157 nm wavelength; Applied Physics A 101 (2010) 491). В этих способах лазерный пучок, испускаемый эксимерным лазером с длиной волны 157 нм, 193 нм, 248 нм, 308 нм или 351 нм и имеющий практически прямоугольное поперечное
15 сечение, неравномерное распределение интенсивности по поперечному сечению указанного лазерного пучка и малую длину когерентности, вследствие чего непригодный для целей микроструктурирования без дополнительного формирования пучка, формируют, используя гомогенизатор, который разлагает лазерный пучок на заданное число частичных пучков и вновь собирает их вместе должным образом, и полевой
20 линзовый элемент, в результате чего в так называемом однородном пятне в местоположении Р в направлении распространения данного пучка получают лазерный пучок с заданным квадратным поперечным сечением лазерного пучка и равномерным распределением интенсивности (профилем интенсивности с плоской вершиной). В этом местоположении Р располагают маску с заданной формой прозрачных областей маски.
25 В результате использования этой маски в однородном пятне из лазерного пучка с равномерным распределением интенсивности создается лазерный пучок с таким распределением интенсивности по поперечному сечению, которое требуется для формирования нужной микроструктуры, например, с распределением интенсивности в виде сетки; затем этот пучок с заданным уменьшающим масштабом проецируют на
30 подложку, подлежащую структурированию, посредством фокусирующей оптики, пригодной для работы на длине волны указанного эксимерного лазера. В данном случае геометрия поперечного сечения (форма контура) распределения интенсивности лазерного пучка, сформированного маской, создается геометрической формой прозрачной области или апертурой ограничителя, расположенного на небольшом
35 расстоянии до или после маски по ходу пучка или, предпочтительно, расположенного в контакте с маской (см., например, публикации WO 2010111798 и EP 2336823 A1). Минимальные размеры структуры, которую можно сформировать этим способом проецирования маски эксимерным лазером, лежат в области нескольких микрометров.

Поиск, проведенный авторами настоящего изобретения, не обнаружил других
40 сопоставимых способов и устройств для проецирования маски фемтосекундными и пикосекундными лазерными пучками. Фемтосекундные и пикосекундные лазеры испускают лазерные пучки с центральной длиной волны, по большей части, в диапазоне от 775 нм до 1064 нм, близким к гауссовскому распределению интенсивности по поперечному сечению лазерного пучка и существенно большей длиной когерентности,
45 чем у эксимерных лазеров. Эти фемтосекундные и пикосекундные лазерные пучки, используя имеющуюся в продаже фокусирующую оптику, преобразуют с целью формирования пучков с малым поперечным сечением фокуса и используют, например, для микроструктурирования поверхностей твердых тел. При использовании этого

способа фокусировки распределение интенсивности по поперечному сечению фокуса лазерного пучка остается, соответственно, подобным гауссовскому, неравномерным: интенсивность в местоположении гауссовского радиуса составляет лишь 36,8% от значения в центре пучка (коэффициент $1/e$), а интенсивность в местоположении радиуса пучка составляет лишь 13,5% от значения в центре пучка (коэффициент $1/e^2$).

Для формирования более равномерного распределения интенсивности по поперечному сечению фокуса фемтосекундных и пикосекундных лазерных пучков были разработаны гомогенизаторы пучка, располагаемые между выходом лазера и фокусирующей оптикой. В известных гомогенизаторах для фемтосекундных и пикосекундных лазерных пучков (см., например, публикацию A. Laskin and V. Laskin, nShaper - Refractive Beam Shaping Optics for Advanced Laser Technologies в журнале Journal of Physics: Conference Series 276 (2011) 0121 71) часть плотности энергии переносится из внутренней части поперечного сечения пучка во внешнюю часть поперечного сечения пучка с помощью системы преломляющих линз, в результате чего после выхода из гомогенизатора создается более равномерное распределение интенсивности по поперечному сечению лазерного пучка; однако до сих пор профиль интенсивности с плоской вершиной по всему поперечному сечению пучка удавалось получить лишь приблизительно.

Фокальный радиус лазерного пучка с гауссовским распределением является функцией длины волны, радиуса исходного пучка, испускаемого лазером, и фокусного расстояния, и не может быть уменьшен произвольным образом. Например, в установке FS-150-10 для фемтосекундного лазерного микроstructuring, выпускаемой компанией 3D-Micromac AG (Хемниц, Германия), оснащенной лазером CPA 2010 производства компании Clark Inc. (США) с центральной длиной волны 775 нм, энергией импульса 1 мДж и длительностью импульса 150 фс наименьший гауссовский фокальный радиус, который удается получить при использовании объектива с фокусным расстоянием 32 мм, равен 5,7 мкм, несмотря на двукратное расширение пучка с увеличением гауссовского радиуса от 3 мм до 6 мм и использование гомогенизатора.

Недостатки известных способов фокусировки фемтосекундных и пикосекундных лазерных пучков

Для множества прикладных задач в области микроstructuring и наноструктурирования достижимые фокальные радиусы, составляющие по меньшей мере несколько микрометров, слишком велики: они не позволяют создавать структуры размером в несколько микрометров и менее. Например, резкость краев микроструктур с размерами до нескольких десятков микрометров, создаваемых с использованием данного способа фокусировки, слишком низкая, даже в случае перекрытия импульсов лазерного пучка. С помощью этого способа фокусировки невозможно изготовить, например, оптически эффективные дифракционные решетки для видимого диапазона длин волн (постоянная решетки 1 мкм и менее), работающие на пропускание и на отражение.

Вследствие гауссовского распределения интенсивности по поперечному сечению лазерного пучка глубина абляции по поперечному сечению фокуса и, соответственно, по ширине формируемой канавки, неравномерна: в центре канавки она значительно больше, чем у края канавки. Это, в частности, приводит к высокой шероховатости поверхности, даже в случае перекрытия канавок и перемещения сфокусированного лазерного пучка по извилистой линии для абляционного удаления материала по плоскости. При микроstructuring и при разделении стоп слоев, состоящих из нескольких слоев разных материалов с толщиной несколько нанометров, такое

распределение интенсивности приводит, например, к неполному абляционному удалению материала на краях канавки или к повреждению материала подложки в центре канавки. При ширине канавок более 10 мкм этот недостаток может быть частично устранен использованием гомогенизатора пучка; тем не менее, при использовании этого способа фокусировки невозможно получить абляцией канавки меньшей ширины (1 мкм и менее) с равномерной глубиной.

Формирование заранее заданного структурированного профиля интенсивности по поперечному сечению лазерного пучка при использовании этого способа фокусировки невозможно.

10 Сущность изобретения

Техническое решение в соответствии с настоящим изобретением позволяет устранить недостатки ранее использовавшихся способов фокусировки фемтосекундных и пикосекундных лазерных пучков. В частности, целью настоящего изобретения является получение равномерного распределения интенсивности по всему поперечному сечению формирования изображения на поверхности подложки (поверхности обрабатываемого изделия), подлежащей обработке, и получение значительно меньших поперечных сечений формирования изображения по сравнению с фокальными поперечными сечениями, которые могут быть достигнуты с использованием вышеописанного способа фокусировки, например, области формирования изображения с круглым поперечным сечением, имеющей диаметр 1 мкм, или получение квадратной области формирования изображения, имеющей площадь 1 мкм^2 , при использовании лазерных пучков с центральной основной длиной волны в диапазоне, предпочтительно, составляющем от 775 нм до 1064 нм, или даже меньших поперечных сечений, например, в диапазоне нескольких сотен нанометров, при использовании удвоения частоты (SHG), утроения частоты (THG) или учетверения частоты (FHG) лазерного пучка.

При достаточно высокой, составляющей не менее 1 мДж, энергии импульса фемтосекундного или пикосекундного лазера и при возможности регулировки площади поперечного сечения однородного пятна, создаваемого этим импульсом, которая также зависит от интенсивности пучка, требуемой для структурирования, и от масштаба формируемого изображения, должно быть, более того, возможно формирование из равномерного распределения интенсивности лазерного пучка такого распределения интенсивности по поперечному сечению лазерного пучка, которое требуется для создания заданной микроструктуры, например, распределения интенсивности в виде решетки, с использованием маски, располагаемой в этом однородном пятне и имеющей заданную геометрическую форму прозрачных областей маски, а также должно быть возможно создание на подложке, подлежащей структурированию, изображения этой маски с заданным уменьшающим масштабом формирования изображения посредством соответствующей фокусирующей оптики.

Техническое решение в соответствии с настоящим изобретением содержит устройство для проецирования маски на поверхность подложки фемтосекундным или пикосекундным лазерным пучком, в котором лазерный пучок, состоящий из импульсов лазерного пучка, формируется таким образом, чтобы в некотором местоположении на оптической оси получить импульсы лазерного пучка с увеличенным поперечным сечением лазерного пучка или импульсы лазерного пучка с уменьшенным поперечным сечением лазерного пучка, причем указанный лазерный пучок имеет равномерное распределение интенсивности по своему поперечному сечению. На пути пучка в указанном местоположении последовательно расположены ограничитель с заданной геометрией апертуры ограничителя и маска с заданной геометрией апертуры маски.

Указанное устройство, кроме того, содержит полевую линзовую систему и объектив, формирующий изображение, расположенные таким образом, чтобы недифрагированные и дифрагированные компоненты импульсов лазерного пучка, прошедшие через ограничитель и маску, с помощью указанной полевой линзовой системы направлялись на объектив, формирующий изображение, имеющий заданную апертуру, таким образом, чтобы в поперечном сечении лазерного пучка, состоящего из импульсов лазерного пучка, в плоскости формирования изображения создавалось уменьшенное изображение, точное в каждой детали и имеющее заданный масштаб формирования изображения, с профилем интенсивности, создаваемым ограничителем и маской. В варианте 1 проведения пучка дополнительная линзовая система, указанные полевая линзовая система и объектив, формирующий изображение, расположены относительно друг друга таким образом, чтобы между объективом, формирующим изображение, и поверхностью подложки создавался фокус 1, а в варианте 2 проведения пучка дополнительная линзовая система, полевая линзовая система и объектив, формирующий изображение, расположены относительно друг друга таким образом, чтобы между полевой линзовой системой и объективом, формирующим изображение, создавался фокус 2. Также используется по меньшей мере одна вакуумная кювета, окружающая область фокуса 1 и фокуса 2.

В еще одном предпочтительном варианте осуществления между полевой линзовой системой и объективом, формирующим изображение, расположено зеркало отклонения на 90° .

В еще одном предпочтительном варианте осуществления предусмотрены средства для изменения расстояния между главной плоскостью объектива, формирующего изображение, и поверхностью подложки, с помощью которых заданное положение плоскости формирования изображения, которое определяется как расстояние от главной плоскости объектива, формирующего изображение, до изображения, избирательно располагается над поверхностью подложки, на указанной поверхности или под ней путем изменения расстояния между главной плоскостью объектива, формирующего изображение, и поверхностью подложки.

В еще одном предпочтительном варианте осуществления указанными средствами для изменения расстояния между главной плоскостью объектива, формирующего изображение, и поверхностью подложки является ось z ху z -координатного стола, к которому данная подложка прикреплена.

В еще одном предпочтительном варианте осуществления указанными средствами для изменения расстояния между главной плоскостью объектива, формирующего изображение, и поверхностью подложки являются оси линейного перемещения, с помощью которых полевая линзовая система, прикрепленная к этим осям линейного перемещения, и объектив, формирующий изображение, могут смещаться на заданный путь вдоль оптической оси.

В еще одном предпочтительном варианте осуществления, в варианте 1 проведения пучка, между указанной по меньшей мере одной вакуумной кюветой и поверхностью подложки расположено сопло поперечной струи инертного газа.

В еще одном предпочтительном варианте осуществления, в варианте 2 проведения пучка, между объективом, формирующим изображение, и поверхностью подложки установлена система сопел инертного газа.

В еще одном предпочтительном варианте осуществления апертуры оптических компонентов, в число которых входят по меньшей мере полевая линзовая система, объектив, формирующий изображение, и по меньшей мере одна вакуумная кювета,

выбирают достаточно большими, чтобы в формировании изображения на поверхности подложки участвовали и компоненты лазерного пучка, дифрагированные на заранее заданной геометрической форме апертуры используемой маски и имеющие порядок дифракции с первого до по меньшей мере третьего.

5 В еще одном предпочтительном варианте осуществления используемый лазер работает в режиме генерирования пачек импульсов.

В еще одном предпочтительном варианте осуществления указанное устройство дополнительно содержит расширитель пучка или средство уменьшения поперечного сечения пучка, и устройство, располагаемое между лазером и указанным расширителем пучка или средством уменьшения поперечного сечения пучка, предназначенное для генерирования второй гармоники (удвоения частоты, SHG), или третьей гармоники (утроения частоты, THG), или четвертой гармоники (учетверения частоты, FHG). Фемтосекундные или пикосекундные лазерные импульсы после выхода из лазера проходят через это устройство для генерирования, соответственно, второй гармоники 10 (удвоения частоты, SHG), или третьей гармоники (утроения частоты, THG) или четвертой гармоники (учетверения частоты, FHG), при этом по меньшей мере один из элементов - расширитель пучка или средство уменьшения поперечного сечения пучка, дополнительная линзовая система, ограничитель, маска, полевая линзовая система, объектив, формирующий изображение, и по меньшей мере одна вакуумная кювета - 15 имеет конструкцию, пригодную для пропускания сгенерированного светового излучения с длиной волны, равной половине, трети или четверти основной длины волны.

Краткое описание чертежей

Настоящее изобретение более подробно поясняется далее с использованием схематичных чертежей:

25 на фиг. 1 представлено схематичное расположение оптических компонентов системы проведения и формирования пучка для реализации способа проецирования маски фемтосекундным и пикосекундным лазером (фспсПМ);

на фиг. 2 представлен рассчитанный оптический путь лазерных пучков в системе проведения и формирования пучка в соответствии с фиг. 1 для варианта 1 проведения пучка с расположением фокуса между дополнительным линзовым элементом (16) и маской (7) и между объективом (10) и подложкой (13);

на фиг. 3 представлен рассчитанный оптический путь лазерных пучков в системе проведения и формирования пучка в соответствии с фиг. 1 для варианта 2 проведения пучка с расположением фокуса между дополнительным линзовым элементом (16) и маской (7) и между полевой линзовой системой (8) и объективом (10);

35 на фиг. 4а схематично представлено поперечное сечение вакуумной кюветы 1, располагаемой между дополнительным линзовым элементом (16) и маской (7), и аналогичной вакуумной кюветы 2, располагаемой между полевой линзовой системой (8) и объективом (10);

40 на фиг. 4б схематично представлено поперечное сечение вакуумной кюветы 2, располагаемой между объективом (10) и подложкой (13), с установленным соплом (21) поперечной струи инертного газа; и

на фиг. 5 представлен пример расположения оптических компонентов осуществленной системы проецирования маски фемтосекундным и пикосекундным лазером, в которой 45 для снижения общих размеров системы использованы четыре отклоняющих зеркала.

Подробное раскрытие изобретения

Расположение оптических компонентов

В соответствии с фиг. 1, импульсный лазерный пучок (2) фемтосекундного или

пикосекундного лазер с приблизительно гауссовским распределением интенсивности (IG) по поперечному сечению лазерного пучка после выхода из лазера (1) преобразуется по меньшей мере одним расширителем (3) пучка в лазерный пучок, тоже имеющий приблизительно гауссовское распределение интенсивности, но увеличенное поперечное сечение (IGA).

Затем указанный лазерный пучок проходит через гомогенизатор (4) и, опционально, через дополнительный линзовый элемент или дополнительную систему (16), которая в однородном пятне в местоположении (P) на оптической оси (5) лазерного пучка (оси пучка) формирует равномерное распределение интенсивности (IAN) лазерного пучка, называемое плоским профилем интенсивности.

Для формирования заданного структурированного профиля интенсивности импульсов лазерного пучка по поперечному сечению лазерного пучка в местоположении (P) последовательно, на очень малом, до нескольких десятых миллиметра, расстоянии друг от друга, либо в непосредственном контакте, расположены ограничитель (6) с заданной геометрией апертуры ограничителя и маска (7) с заданной геометрией апертуры маски. Недифрагированные и дифрагированные компоненты импульсов лазерного пучка, прошедшие через расположенные в однородном пятне в местоположении (P) ограничитель (6) и маску (7), формируют изображение в плоскости (11) формирования изображения с помощью полевого линзового элемента или полевой линзовой системы (8) и, после отражения от по меньшей мере одного зеркала (9) отклонения на 90° , с помощью объектива (10). Уменьшенное изображение (14) заданного структурированного распределения интенсивности по поперечному сечению лазерного пучка, сформированного указанными ограничителем и маской, точное в каждой детали и имеющее заданный масштаб ($V=(a_o/a_s):1$) формирования изображения, создается в плоскости (11) формирования изображения, заданное положение которой на расстоянии (b) от главной плоскости (35) объектива (10) выбирается над поверхностью 12 подложки, на указанной поверхности (предпочтительно), или под ней путем изменения расстояния (расстояний) между главной плоскостью (35) объектива (10) и поверхностью (12) подложки (13) (см. фиг. 1).

Указанное изменение расстояния (расстояний) между главной плоскостью (35) объектива (10), формирующего изображение, и поверхностью (12) подложки реализуется, предпочтительно, с помощью оси z хуз-координатного стола (32), на котором расположена подложка (13). В случае не смещаемой подложки указанное изменение расстояния (расстояний) также может быть реализовано с помощью осей (33, 34) линейного перемещения, соединенных с полевым линзовым элементом или полевой линзовой системой (8) и с объективом (10) и имеющих возможность смещаться на заданное расстояние вдоль оптической оси (5) без изменения свойств данной оптической системы, относящихся к формированию изображения.

Увеличение поперечного сечения лазерного пучка может быть реализовано посредством расширителя (3) пучка, при этом поперечное сечение лазерного пучка в однородном пятне в плоскости маски (7) после такого увеличения поперечного сечения, фокусное расстояние дополнительного линзового элемента или дополнительной линзовой системы (16) и масштаб V формирования изображения, который можно реализовать, зависят от энергии импульса лазерного пучка и должны быть согласованы между собой так, чтобы в плоскости (11) формирования изображения создавалась плотность энергии лазерного пучка, необходимая для запланированной операции лазерной обработки. Если пучок, испускаемый лазером, имеет слишком низкую энергию импульса, в результате чего плотность энергии в плоскости маски (7) слишком мала

для абляции материала в плоскости (11) формирования изображения при заданном масштабе V формирования изображения, то на месте расширителя (3) пучка должно использоваться средство уменьшения поперечного сечения пучка. Это может требоваться, например, в случае удвоения частоты (SHG), утроения частоты (THG) или учетверения частоты (FHG) основной длины волны лазерного пучка с помощью опционального устройства (15); например, при удвоении частоты лазера CPA 2010 компании Clark Inc., имеющего центральную основную длину волны 775 нм, для использования доступно лишь приблизительно 40% исходной энергии импульса лазерного пучка с основной длиной волны, а если частота утраивается, то - лишь приблизительно 6-8%. Площадь маски, которую можно использовать, будет, соответственно, очень мала, но ее будет достаточно для реализации, при малой апертуре ограничителя или апертуре маски, т.е., при очень малом поперечном сечении пучка при формировании изображения на подложке, например, 1 мкм^2 и менее, очень тонких отверстий и точных краев структуры, а также, в случае абляции послойно структурированного материала, очень малых трехмерных микроструктур (3D-структур).

Формирование изображения (14) распределения интенсивности по поперечному сечению лазерного пучка, сформированного ограничителем (6) и маской (7), точного в каждой детали и уменьшенного согласно заданному масштабу (V) формирования изображения, и, соответственно, формирование заданной микроструктуры с помощью данного способа проецирования маски фемтосекундным или пикосекундным лазером возможно только тогда, когда компоненты лазерного пучка, дифрагированного на прозрачных областях маски, например, на маске, представляющей собой линейную решетку, тоже достигают плоскости (11) формирования изображения и вносят свой вклад в формирование изображения, поскольку в противном случае информация теряется, и геометрическая форма прозрачных областей маски, и, соответственно, созданный маской заданный структурированный профиль интенсивности лазерного пучка воспроизводятся в плоскости формирования изображения лишь приблизительно. Поэтому все оптические компоненты, расположенные после маски (7), должны иметь апертуру, достаточно большую для того, чтобы компоненты дифрагированного лазерного пучка тоже воспроизводились и могли внести свой вклад в формирование изображения. Расчеты и эксперименты показали, что для получения в плоскости (11) формирования изображения точного в каждой детали изображения с профилем интенсивности лазерного излучения, созданным маской, в формировании изображения также должны принимать участие дифрагированные пучки до по меньшей мере третьего порядка дифракции.

Высокие плотности фотонов в фокусах фемтосекундных и пикосекундных лазерных пучков приводят к образованию в фокальных зонах системы проведения и формирования пучка интенсивной плазмы из воздуха или инертного газа, используемого на пути пучка для защиты оптических компонентов от загрязнения (см. также фиг. 2 и 3). Эта порожденная лазером плазма вызывает поглощение и рассеяние компонентов лазерного пучка со следующими последствиями: плазма, образующаяся в промежуточном фокусе (17) на пути лазерного пучка между гомогенизатором (4) и маской (7) снижает равномерность распределения плотности энергии в лазерном пучке в плоскости маски (7); плазма, образующаяся в фокусе 1 (19), находящемся на фокусном расстоянии (f) объектива (10), и плазма, образующаяся в фокусе 2 (22) между полевой линзовой системой (8) и объективом (10), приводит к снижению качества формирования геометрической формы апертуры маски в плоскости (11) формирования изображения, например, к снижению резкости краев, что не дает возможности получения равномерной

абляции материала на подложке (13) в областях, определяемых геометрическими формами апертуры маски (7). Таким образом, эта плазма влияет на оптическое качество расположенных далее компонентов лазерного пучка, особенно при высоких частотах повторения лазерных импульсов, и вызывает снижение точности формирования деталей изображения и, как следствие, деталей формируемой микроструктуры.

Чтобы предотвратить образование плазмы, на пути пучка в фокальных областях (17, 19, 22) установлены вакуумные кюветы (18, 20, 23). Эти кюветы, окружающие фокальные области и имеющие два окна (25), покрытые прозрачной системой интерференционных слоев, или одно окно (25) и одну точечную диафрагму (26), обеспечивающие проведение лазерного излучения практически без потерь, откачиваются до по меньшей мере предварительного вакуума и должны учитываться в расчете всей оптической системы. Как вариант, вся оптическая система, начиная от выхода лазера (1) и заканчивая объективом (10), формирующим изображение, может размещаться в вакуумной камере.

Особым режимом работы, ранее разработанным для некоторых типов пикосекундных лазеров, является режим генерирования пачек импульсов. В отличие от работы пикосекундного лазера в режиме отдельных импульсов с заданной частотой повторения, в режиме генерирования пачек импульсов создаются не пикосекундные импульсы лазерного пучка, а пачки пикосекундных импульсов лазерного пучка с интервалом между отдельными импульсами в серии (пачке) в области нескольких десятков наносекунд, как правило, 20 нс, и интервалом между пачками от 10^{-3} до 10^{-7} с, как правило 10 мкс, т.е., с частотой следования пачек (частотой повторения лазера) от 1 кГц до 10 МГц. Наибольшая возможная частота повторения пикосекундного лазера в режиме генерирования пачек импульсов зависит от количества индивидуальных импульсов в пачке и соответственно ограничена. Длительность индивидуального импульса пикосекундного лазера и длительность импульса в режиме генерирования пачек импульсов равны. Серия импульсов (пачка) может, с возможностью изменения, содержать до 20 индивидуальных пикосекундных импульсов. При этом энергия индивидуального импульса в пачке может экспоненциально снижаться в соответствии с функцией, типичной для лазерного прибора в случае одинакового интервала между индивидуальными импульсами в пачке (например, в пачке импульсов пикосекундного лазера «Lumera Hyperrapid» компании Lumera Laser GmbH), или распределение энергии импульса по индивидуальным импульсам в пачке может заранее задаваться таким образом, что энергия индивидуальных импульсов в пачке остается неизменной, снижается или повышается, либо энергия индивидуальных импульсов в пачке вначале снижается, а затем снова увеличивается; кроме того, возможно подавление импульса или множества импульсов в пачке (например, в режиме FlexBurst™ лазеров Time-Bandwidth Duetto™ и Time-Bandwidth Fuego™ компании Time-Bandwidth Products). В режиме работы пикосекундного лазера с генерированием пачек импульсов также возможно удвоение частоты или утроение частоты (SHG или THG) лазерного излучения. Обработка пикосекундным лазером в режиме генерирования пачек импульсов по сравнению с обработкой индивидуальными импульсами имеет следующие преимущества:

- более высокая интенсивность абляции при структурировании металлических образцов по сравнению с облучением индивидуальными пикосекундными импульсами такой же энергии, как суммарная энергия пачки, т.е. в случае, когда плотности энергии индивидуальных импульсов и пачек равны, и в случае одинакового межимпульсного интервала (степени перекрытия) индивидуальных импульсов и пачек, т.е., в случае одинаковой частоты повторения индивидуальных импульсов и частоты повторения

пачек;

- более высокое качество, в частности, меньшая шероховатость поверхности структурных элементов, сформированных на металлических изделиях по сравнению с облучением индивидуальными пикосекундными импульсами в случае одинаковой степени перекрытия, даже при более высоких плотностях энергии пачки.

Генерирование фемтосекундных импульсов лазерного пучка в режиме генерирования пачек импульсов пока находится на этапе фундаментального исследования (например, J. Hernandez-Ruedal, J. Siegel, D. Puerto², M. Galvan-Sosa, W. Gawelda³, and J. Solis: Ad-hoc design of temporally shaped fs laser pulses based on plasma dynamics for deep ablation in fused silica, Appl.Phys. A (2013) 112).

1 вариант проведения пучка в системе проведения и формирования пучка

В 1 варианте проведения пучка в соответствии с фиг. 2 используются дополнительный линзовый элемент (16), полевая линзовая система (8), состоящая, например, из двух линзовых элементов, и объектив (10), состоящий, например, из двух линзовых элементов.

На фиг. 2 показаны только главные плоскости указанных линзовых элементов.

Промежуточный фокус (17) данного пути пучка расположен между дополнительным линзовым элементом (16) и комбинацией (6, 7) ограничителя и маски. Фокус 1 (19) оптической системы формирования изображения, состоящей из полевой линзовой системы (8) и объектива (10), расположен между объективом (10) и поверхностью (12)

подложки; плоскость (11) формирования изображения расположена на поверхности (12) подложки. Выделенная цветом область (2а) иллюстрирует распространение дифрагированных компонентов фемтосекундного лазерного пучка с центральной длиной волны 775 нм, имеющих порядок дифракции с первого по пятый, испускаемых, например, из центра маски (7), представляющей собой линейную решетку с периодом

решетки 200 мкм, предназначенной для формирования распределения интенсивности пучка, подобного обозначенному на фиг. 1 как (14), но с большим числом промежутков (что не показано на фиг. 1), для обеспечения пропускания и дифрагирования излучения.

Вакуумная кювета 1 (18) окружает промежуточный фокус (17), вакуумная кювета 2 (20) окружает фокус 1 (19). Плоскость (11) формирования изображения расположена

на поверхности (12) подложки. Пунктирными прямоугольниками показаны дополнительные зеркала (29, 30, 31) отклонения на 90°, которые могут быть использованы для изгиба пути пучка с повышением компактности всей системы проведения и формирования пучка (см. фиг. 5). Однако при наличии достаточно протяженного пространства вся оптическая система может быть осуществлена и без зеркал (9, 29, 30, 31) отклонения.

Вакуумная кювета 1 (18), схематично показанная на фиг. 4а, состоит из двух взаимозаменяемых параллельных круглых окон (25), изготовленных из материала, прозрачного на длине волны лазера, и полого цилиндрического сепаратора (27), содержащего фланец (28) для присоединения вакуумного насоса. Окна вакуум-плотно соединены с сепаратором. Вакуумная кювета 1 (18) расположена таким образом, чтобы фокус (17) лазерного пучка располагался в центре этой кюветы. Чтобы окна (25), покрытые с обеих сторон системой интерференционных слоев, пропускающей свет с длиной волны лазера, подвергались как можно меньшему воздействию пучка, расстояние вдоль оптической оси между внутренними поверхностями окон составляет по меньшей мере 100 мм.

Вакуумная кювета 2 (20), схематично показанная на фиг. 4б, имеет только одно прозрачное окно (25) для пропускания лазерного излучения, выходящего из линзы; диаметр поверхности прозрачного окна должен выбираться достаточно большим,

чтобы обеспечивать беспрепятственное проведение дифрагированных компонентов (2а) лазерного пучка с порядками дифракции по меньшей мере с первого по третий (см. фиг. 2).

5 На место окна для вывода лазерного излучения после фокуса в направлении поверхности (12) подложки установлен диск с точечной диафрагмой (26) для пропускания лазерного излучения; это сделано потому, что интенсивность лазерного излучения в этой области может превышать пороговое значение разрушения материала окна. Поперечное сечение точечной диафрагмы (26) лишь немного больше общего поперечного сечения лазерного пучка в данном месте, и, например, для планируемого
10 применения в области микроструктурирования и наноструктурирования, лежит в диапазоне от одного до нескольких десятков квадратных микрометров. Вакуум, необходимый для предотвращения возникновения плазмы в области фокуса (19), достигается с помощью вакуумного насоса с достаточно высокой производительностью откачки. Для защиты окна (25) вакуумной кюветы 2 (20) от загрязнения материалом,
15 испаренным с подложки (13), установлено сопло (21) подачи поперечной струи инертного газа, создающее поперечный поток газа между вакуумной кюветой (20) и подложкой (13).

1 вариант проведения пучка предпочтительно применим для получения изображений с очень малыми поперечными сечениями с целью формирования структур с размерами
20 деталей в микрометровом и нанометровом диапазонах, поскольку после фокуса 1 нет никаких оптических компонентов, аберрационные погрешности (например, аберрации линзовых элементов) которых могли бы отрицательно повлиять на точность передачи деталей в изображении.

2 вариант проведения пучка в системе проведения и формирования пучка
25 Во 2 варианте проведения пучка в соответствии с фиг. 3 также используются дополнительный линзовый элемент (16), полевая линзовая система (8), состоящая из двух линзовых элементов, и объектив (10), состоящий, например, из двух линзовых элементов. На фиг. 3 показаны только главные плоскости указанных линзовых элементов. Промежуточный фокус (17) на пути пучка и в этом случае расположен
30 между дополнительным линзовым элементом (16) и комбинацией (6, 7) ограничителя и маски. Во 2 варианте проведения пучка фокус 2 (22) оптической системы формирования изображения, состоящей из полевой линзовой системы (8) и объектива (10), расположен между полевой линзовой системой (8) и объективом (10) таким образом, что для предотвращения возникновения плазмы в области фокуса 2 (22) может быть
35 использована вакуумная кювета (23) с двумя прозрачными для лазерного излучения окнами (см. фиг. 4а); диаметр поверхности прозрачного окна должен выбираться достаточно большим, чтобы обеспечивать беспрепятственное проведение дифрагированных компонентов (2а) лазерного пучка с порядками дифракции по меньшей мере с первого по третий (см. фиг. 3). Плоскость (11) формирования
40 изображения расположена на поверхности (12) подложки. Для защиты объектива (10) от загрязнения материалом, испаренным с подложки (13), установлена система (24) сопел подачи инертного газа, создающая поток газа между объективом (10) и подложкой (13).

Пунктирными прямоугольниками показаны дополнительные зеркала (29, 30, 31)
45 отклонения на 90° , которые могут быть использованы для изгиба пути пучка с повышением компактности всей системы проведения и формирования пучка (см. фиг. 5).

Однако при наличии достаточно протяженного пространства вся оптическая система

может быть осуществлена и без зеркал (9, 29, 30, 31) отклонения.

2 вариант проведения пучка предпочтительно применим для получения изображений с относительно большими поперечными сечениями в диапазоне от нескольких десятков квадратных микрометров до 1 мм^2 .

Пример варианта осуществления: проецирование маски фемтосекундным лазером, 2 вариант проведения пучка

Фиг. 5 представляет систему проецирования маски фемтосекундным лазером, в которой реализован 2 вариант проведения пучка (см. фиг. 3). Стрелками с измеренными значениями около них показаны расстояния в миллиметрах между оптическими компонентами. С целью реализации компактной системы, предназначенной для микроструктурирования с использованием способа фокусировки фемтосекундного лазера, и возможности ее встраивания в установку FS-150-10 фемтосекундного лазерного микроструктурирования компании «3D-Mikromac AG», использованы четыре зеркала (29, 30, 31, 9) отклонения на 90° . В этой установке в качестве фемтосекундного лазера используется лазер типа Clark MXR PA 2010, имеющий следующие характеристики: центральная длина волны 775 нм, длительность импульса 150 фс, энергия импульса 1 мДж, частота повторения импульсов 1 кГц; диаметр пучка у выхода из лазера 3 мм, гауссовское распределение интенсивности по поперечному сечению лазерного пучка. Диаметр пучка увеличен до $R_s=6 \text{ мм}$ с помощью расширителя (3) пучка, а в однородном пятне в местоположении P с помощью гомогенизатора (4) и дополнительного линзового элемента (16) создано распределение интенсивности с плоской вершиной при плотности энергии в импульсе лазерного пучка 3 мДж/см^2 . В данном случае указанное распределение интенсивности в импульсе лазерного пучка создано в однородном пятне в местоположении P, где расположена маска (7), с помощью маски (6), имеющей квадратную апертуру с длиной сторон $a_0=3,54 \text{ мм}$.

С помощью полевой линзовой системы (8) и имеющего фокусное расстояние 100 мм объектива (10), формирующего изображение, на расстоянии $b=110 \text{ мм}$ до изображения в плоскости (11) формирования изображения создается уменьшенное изображение (14) сформированного ограничителем (6) поперечного сечения лазерного пучка, и сформированного маской (7) распределения интенсивности лазерного пучка, при масштабе формирования изображения $V=11:1$ и плотности энергии в импульсе лазерного пучка 280 мДж/см^2 .

Технический результат изобретения

Предлагаемый способ проецирования маски фемтосекундным и пикосекундным лазером дает возможность формирования микроструктур с размером деталей до субмикронного диапазона. Такими структурами могут быть, например, оптические дифракционные решетки с периодом решетки 1 мкм и менее для видимого диапазона длин волн. Трехмерные микроструктуры, формируемые, предпочтительно, послойной структурированной абляцией, обладают высокой резкостью краев, большой крутизной стенок, низкой шероховатостью стенок и оснований. При структурировании хрупких материалов благодаря низкой тепловой и ударно-волновой нагрузке на смежные, не подверженные структурированию области подложки, в значительной мере исключаются видоизменения материала и растрескивания на краях структур. В случае достаточно высокой энергии импульса используемых лазеров и достаточно большого допустимого размера поперечного сечения однородного пятна и, как следствие, и маски, в микродиапазоне возможна обработка несколькими пучками, например, одновременное формирование структур в форме борозд и усеченных геометрических тел или

параллельное структурирование или разделение стоп тонких слоев посредством частичных пучков, сформированных таким образом в случае одинаковой заданной геометрической формы апертур пропускающих масок и расстояния между ними.

(57) Формула изобретения

1. Устройство для микроструктурирования поверхности подложки путем воздействия на нее проецированными посредством маски фемтосекундными или пикосекундными лазерными пучками, содержащее:

фемтосекундный или пикосекундный лазер, создающий импульсный лазерный пучок (2),

ограничитель (6) с заданной геометрией апертуры и маску (7) с заданной геометрией апертуры, которые последовательно расположены на пути лазерного пучка на расстоянии друг от друга, или в непосредственном контакте, определяют местоположение (Р) на оптической оси (5) и выполнены с возможностью формирования лазерного пучка (2) в упомянутом местоположении (Р), состоящего из импульсов лазерного пучка с увеличенным поперечным сечением или импульсов лазерного пучка с уменьшенным поперечным сечением по отношению к поперечному сечению исходного импульсного лазерного пучка фемтосекундного или пикосекундного лазера, и с равномерным распределением интенсивности по своему поперечному сечению,

полевую линзовую систему (8) и объектив (10) формирования изображения, расположенные таким образом, чтобы недифрагированные и дифрагированные компоненты лазерного пучка импульсов, прошедшие через ограничитель (6) и маску (7), были направлены в формирующий изображение объектив (10) с заданной апертурой с помощью полевой линзовой системы (8) и в поперечном сечении указанного лазерного пучка импульсов в плоскости (11) формирования изображения было создано уменьшенное изображение (14) с профилем интенсивности, созданным указанными ограничителем и маской, точное в каждой детали и имеющее заданный масштаб (V) формирования изображения,

и дополнительную линзовую систему (16),

при этом дополнительная линзовая система (16), полевая линзовая система (8) и объектив (10), формирующий изображение, расположены относительно друг друга с возможностью расположения фокуса (19) лазерного пучка между объективом (10), формирующим изображение, и поверхностью (12) подложки,

или дополнительная линзовая система (16), полевая линзовая система (8) и объектив (10), формирующий изображение, расположены относительно друг друга с возможностью создания фокуса (22) лазерного пучка между полевой линзовой системой (8) и объективом (10), формирующим изображение,

при этом устройство содержит по меньшей мере одну вакуумную кювету, окружающую фокус (19) или фокус (22), выполненную с возможностью вакуумирования для предотвращения возникновения плазмы в области фокуса.

2. Устройство по п. 1, отличающееся тем, что между полевой линзовой системой (8) и объективом (10), формирующим изображение, расположено зеркало (9) отклонения на 90°.

3. Устройство по п. 1 или 2, отличающееся тем, что оно содержит средства для изменения расстояния между главной плоскостью (35) объектива (10), формирующего изображение, и поверхностью (12) подложки, выполненные с возможностью обеспечения заданного положения плоскости (11) формирования изображения, определяемого как расстояние (b) от главной плоскости (35) объектива (10), формирующего изображение,

до изображения над поверхностью (12) подложки, на указанной поверхности, или под ней путем изменения расстояния между главной плоскостью указанного объектива, формирующего изображение, и поверхностью (12) подложки.

5 4. Устройство по п. 3, отличающееся тем, что указанными средствами для изменения расстояния между главной плоскостью (35) объектива (10), формирующего изображение, и поверхностью (12) подложки является ось z хуз-координатного стола (32), к которому прикрепена подложка (13).

10 5. Устройство по п. 3, отличающееся тем, что указанными средствами для изменения расстояния между главной плоскостью (35) объектива (10), формирующего изображение, и поверхностью (12) подложки являются оси (33, 34) линейного перемещения, обеспечивающие возможность смещения линзовой системы (8), прикрепленной к этим осям линейного перемещения, и объектива (10), формирующего изображение, на заданное расстояние вдоль оптической оси (5).

15 6. Устройство по п. 1, отличающееся тем, что дополнительная линзовая система (16), полевая линзовая система (8) и объектив (10), формирующий изображение, расположены относительно друг друга с возможностью расположения фокуса (19) между объективом (10), формирующим изображение, и поверхностью (12) подложки, при этом между по меньшей мере одной вакуумной кюветой (20) и поверхностью (12) подложки расположено сопло (21) поперечной струи инертного газа.

20 7. Устройство по п. 1, отличающееся тем, что дополнительная линзовая система (16), полевая линзовая система (8) и объектив (10), формирующий изображение, расположены относительно друг друга с возможностью создания фокуса (22) между полевой линзовой системой (8) и объективом (10), формирующим изображение, при этом между объективом (10), формирующим изображение, и поверхностью (12) подложки установлена система (24) сопел инертного газа.

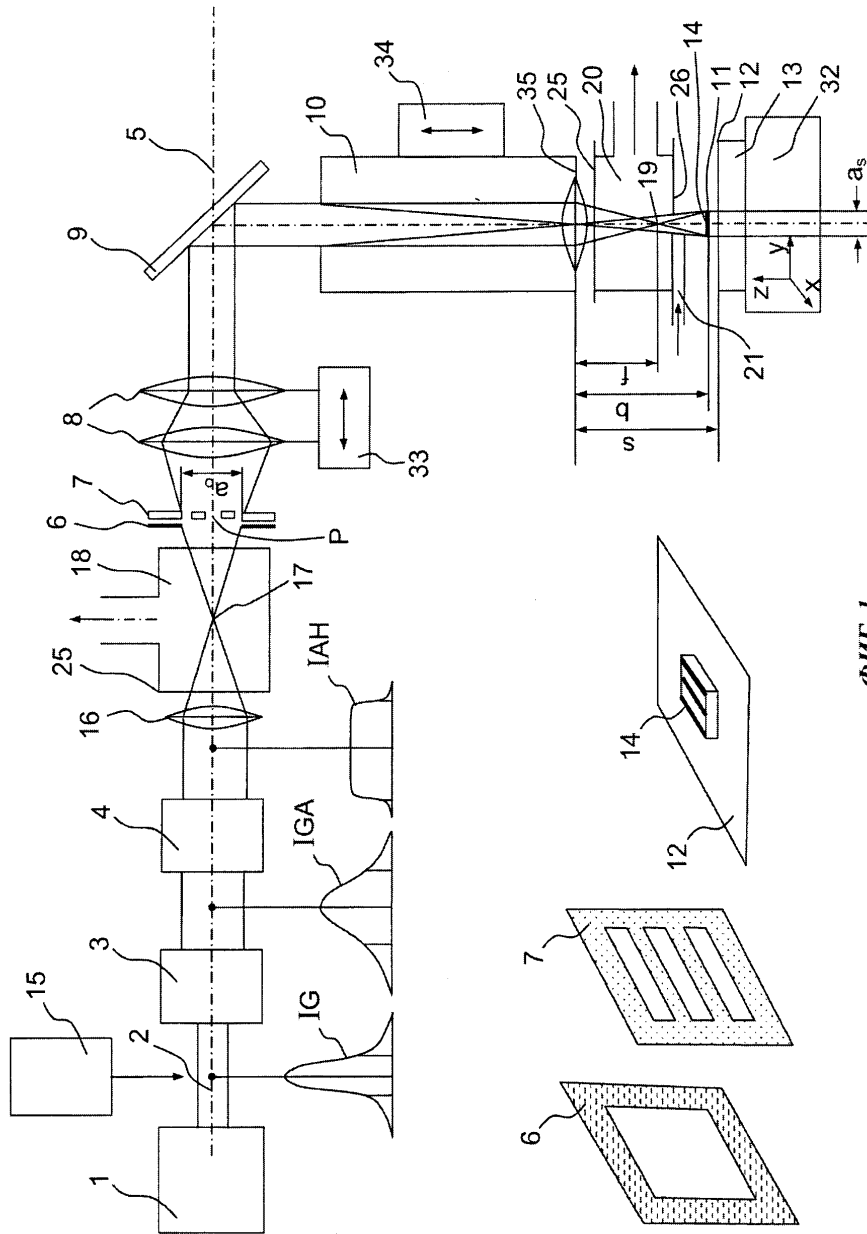
25 8. Устройство по п. 1, отличающееся тем, что апертуры оптических компонентов, в число которых входят по меньшей мере полевая линзовая система (8), объектив (10), формирующий изображение, и по меньшей мере одна вакуумная кювета, выполнены размерами, обеспечивающими формирование изображения на поверхности подложки посредством компонентов лазерного пучка, претерпевших дифракцию на заданной
30 геометрической форме апертуры используемой маски (7) и имеющих порядок дифракции с первого до по меньшей мере третьего.

9. Устройство по п. 1, отличающееся тем, что используемый лазер (1) работает в режиме генерирования пачек импульсов.

35 10. Устройство по п. 1, отличающееся тем, что оно дополнительно содержит расширитель (3) пучка или средство (3) уменьшения поперечного сечения пучка, устройство (15), расположенное между лазером (1) и указанным расширителем (3) пучка или средством (3) уменьшения поперечного сечения пучка, предназначенное для генерирования второй, или третьей, или четвертой гармоник, при этом фемтосекундные
40 или пикосекундные лазерные импульсы соответственно проходят через устройство (15) после выхода из лазера (1),

при этом по меньшей мере одно из расширителя (3) пучка или средства (3) уменьшения поперечного сечения пучка, дополнительной линзовой системы (16), ограничителя (6), маски (7), полевой линзовой системы (8), объектива (10), формирующего изображение, и по меньшей мере одной вакуумной кюветы имеют конструкцию, пригодную для
45 пропускания сгенерированного светового излучения с длиной волны, равной половине, трети или четверти основной длины волны.

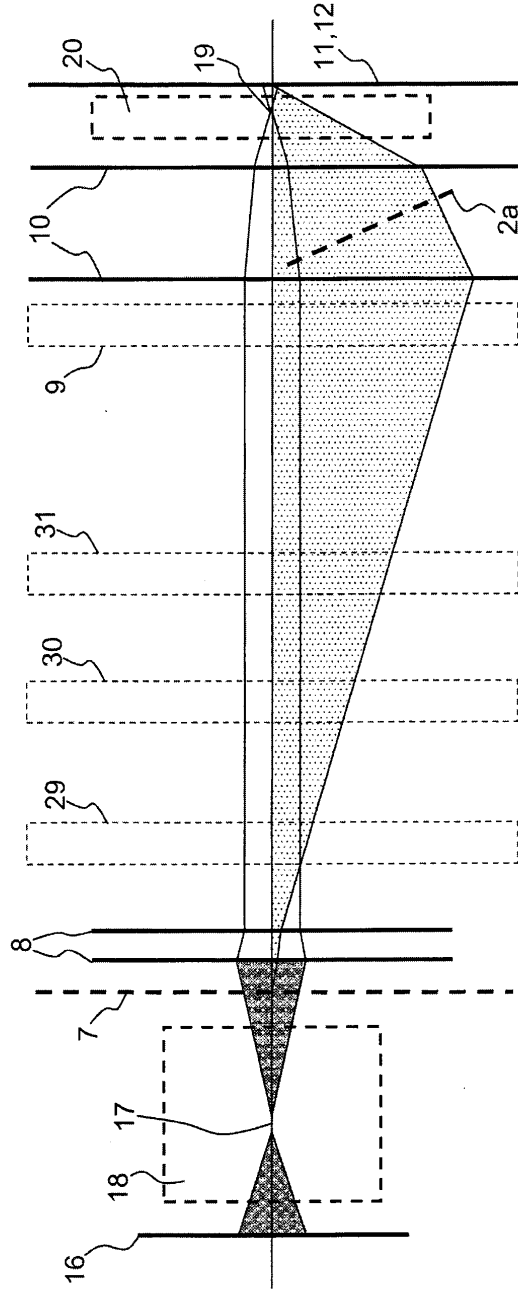
1



ФИГ. 1

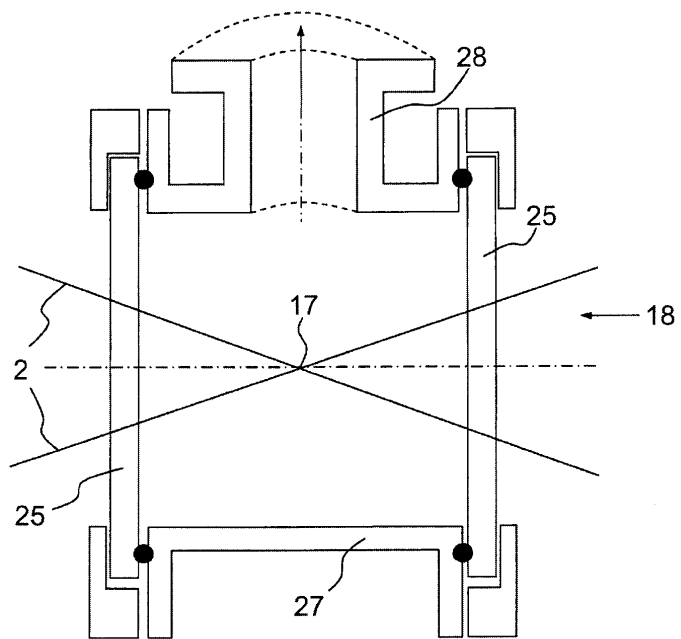
2

2



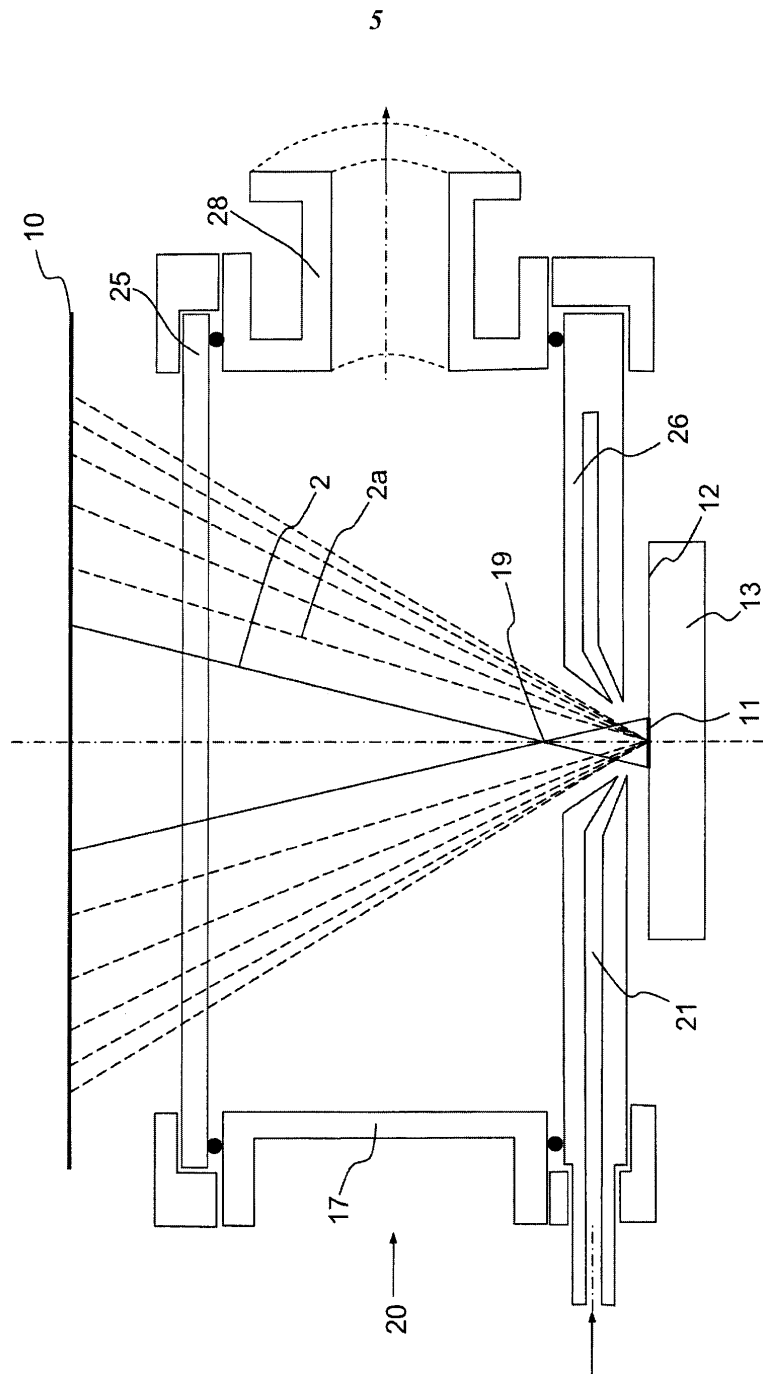
ФИГ. 2

4

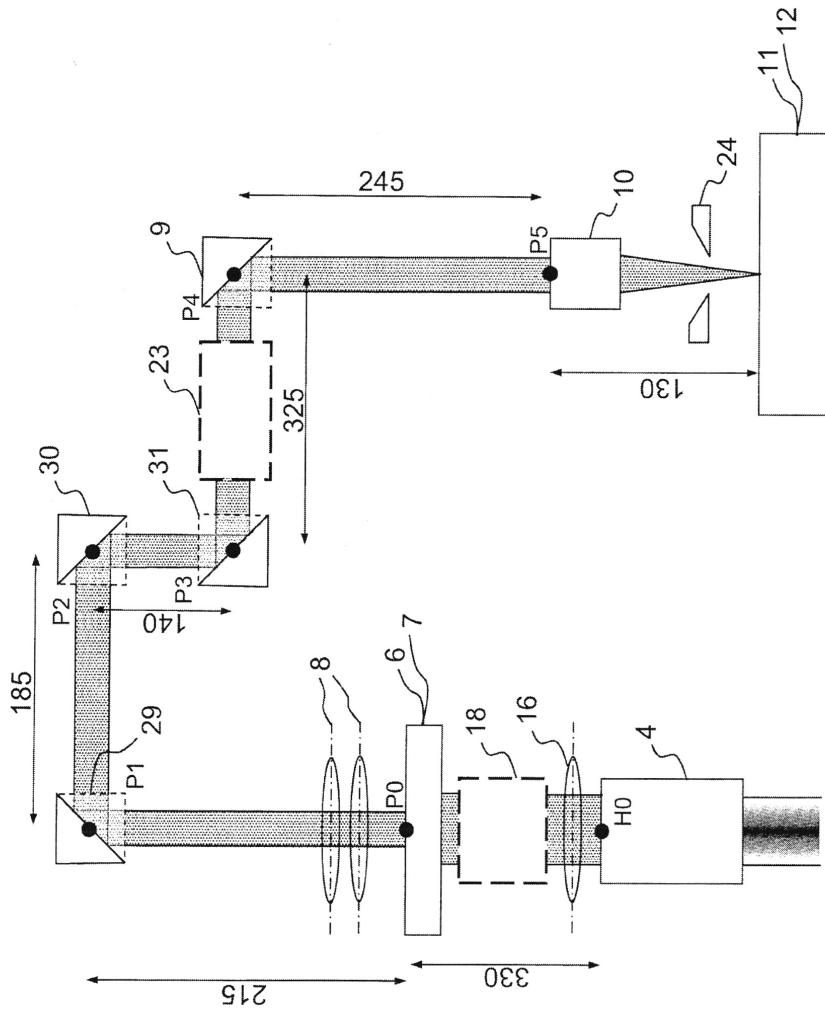


ФИГ. 4а

5



ФИГ. 4b



Фиг. 5