

(19)



**Евразийское  
патентное  
ведомство**

(11) **042061**

(13) **B1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента  
**2022.12.30**

(51) Int. Cl. **G03F 7/00 (2006.01)**

(21) Номер заявки  
**202290753**

(22) Дата подачи заявки  
**2022.03.31**

---

(54) **ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК ЭКСТРЕМАЛЬНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ И ЛИТОГРАФИЧЕСКАЯ СИСТЕМА С ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ**

---

(31) **2021132150; 2021136734; 2022100914**

(56) **US-A1-20120050708**

(32) **2021.11.03; 2021.12.13; 2022.01.17**

**US-A1-20150076359**

(33) **RU**

**US-B2-7307375**

(43) **2022.12.29**

**RU-C2-2206186**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:  
**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО "ЭУФ  
ЛАБС" (RU)**

(72) Изобретатель:  
**Астахов Дмитрий Игоревич,  
Виноходов Александр Юрьевич,  
Иванов Владимир Витальевич,  
Кошелев Константин Николаевич,  
Кривокорытов Михаил Сергеевич,  
Кривцун Владимир Михайлович,  
Лаш Александр Андреевич, Медведев  
Вячеслав Валерьевич, Христофоров  
Олег Борисович (RU)**

(74) Представитель:  
**Щербакова Л.В. (RU)**

---

(57) Изобретение относится к плазменным источникам экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) излучения и литографическим системам с их использованием. Применения включают изготовление полупроводниковых устройств, в частности, средне- и мелкосерийное производство интегральных схем сверхвысокого разрешения, а также вспомогательные работы при их крупномасштабном производстве. ЭУФ литограф содержит систему освещения устройства формирования рисунка, включающую в себя источник ЭУФ излучения на основе лазерной плазмы с вращающимся мишенным узлом, подающим мишень в зону взаимодействия с импульсным лазерным пучком. Мишень представляет собой образованный под действием центробежной силы слой материала мишени на обращенной к оси вращения поверхности кольцевой канавки, выполненной во вращающемся мишенном узле. Материал мишени обладает текучестью под действием центробежной силы, при этом мишень имеет центробежное ускорение не менее 3000g и линейную скорость не менее 100 м/с. Техническим результатом изобретения является расширение арсенала средств ЭУФ литографии за счет значительного упрощения конструкции ЭУФ литографов, уменьшения массы, габаритов, эксплуатационных затрат, расширения спектра их функциональных возможностей, повышения надежности, времени жизни и удобства использования.

---

**B1**

**042061**

**042061**

**B1**

### **Перекрестная ссылка на родственные патенты и патентные заявки**

Настоящая заявка является продолжением заявки на патент PCT/EP 2020/061562, поданной 24.04.2020, которая, в свою очередь, является продолжением заявки на патент US 16/536,404 поданной 08.08.2019, ныне патент US 10588210, которая, в свою очередь, является продолжением заявки РФ 2019113052 поданной 26.04.2019, ныне патент РФ 2806713, и заявки РФ 2020103063, поданной 25.01.2020, ныне патент РФ 2826316, а также продолжением заявки PCT RU/2018/000520, поданной 08.08.2018, которая, в свою очередь, является продолжением заявки на патент РФ 2017141042, поданной 24.10.2017, ныне патент РФ 2670283, которые включены в настоящее описание посредством ссылки во всей своей полноте.

### **Область техники**

Изобретение относится к высокояркостному источнику экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) или мягкого рентгеновского излучения (МРИ) на основе лазерной плазмы и к литографическим системам с его использованием. Применение включает изготовление полупроводниковых устройств, в частности, средне- и мелкосерийное производство наноразмерных интегральных схем (ИС), а также вспомогательные работы при крупномасштабном производстве ИС нового поколения методом ЭУФ литографии.

### **Предшествующий уровень техники**

ЭУФ излучение (также иногда называемое мягким рентгеновским излучением) обычно определяется как электромагнитное излучение с длиной волны в диапазоне примерно 5-100 нм. Современная ЭУФ литография преимущественно использует диапазон длин волн  $13,5 \pm 0,135$  нм, отвечающий диапазону отражения многослойных Mo/Si зеркал, не ограничиваясь только этим вариантом. Способы получения ЭУФ излучения включают, но не обязательно ограничиваются этим, преобразование материала мишени в плазму химического элемента, имеющего линии излучения ионов в ЭУФ-диапазоне. Для высокоэффективной генерации ЭУФ излучения на 13,5 нм известно использование высокотемпературной плазмы ряда элементов, в частности, ксенона (Xe), лития (Li), олова (Sn).

Литографическая система или литограф представляет собой машину, которая наносит требуемый рисунок на пластину, обычно на целевую часть пластины при производстве полупроводниковых устройств (транзисторов, диодов и т.п.), как правило, устройств металл-оксид-полупроводник (МОП).

Литографическая система, использующая ЭУФ излучение, или ЭУФ литограф является ключевым элементом технологической линии или фабрики для производства полупроводниковых устройств.

ЭУФ литограф включает в себя источник ЭУФ излучения и систему освещения на основе зеркал, которая формирует пучок излучения, падающий на устройство формирования рисунка. Обычно устройство формирования рисунка также называют маской или фотосаблоном. В ЭУФ литографе маска (фотошаблон) выполняется в виде отражающего элемента. Формируемый проекционной оптической системой пучок ЭУФ излучения, переносимый в уменьшенном масштабе изображение маски, используется для создания наноразмерных структурных элементов на пластине.

ЭУФ литограф можно использовать, в частности, при изготовлении интегральных схем (ИС). В этом случае устройство формирования рисунка используется для создания рисунка схемы, который должен быть сформирован на отдельном участке или слое ИС. Перенос рисунка обычно осуществляется на слой чувствительного к излучению материала (фоторезиста), нанесенного на пластину. Как правило, одна пластина будет содержать множество смежных целевых частей, которые будут последовательно структурированы в соответствии с топологией переносимого на эти части изображения маски.

Известные литографические системы включают в себя так называемые степперы, в которых каждый участок мишени облучается путем одновременного экспонирования всего рисунка на участок пластины, и так называемые сканеры, в которых каждый участок пластины облучается путем сканирования маски пучком излучения в заданном направлении ("направление сканирования") при синхронном сканировании целевых частей пластины параллельно или антипараллельно этому направлению сканирования, как известно, например, из патентной заявки WO 2021121985, опубликованной 24.06.2021.

Для своего функционирования высокопроизводительная литографическая система предполагает наличие очень развитой инфраструктуры. В частности, она включает в себя наиболее мощный (~ 250 Вт/2%BW/2π ср) и высокоэффективный (с коэффициентом конверсии SE13,5 ~ 5%) источник ЭУФ излучения, использующий лазерную плазму олова, полученную путем облучения материала мишени в форме капли двумя лазерными лучами, как известно, например, из заявки WO 2014082811, опублик. 05.06.2014. Высокопроизводительные нанолитографы с таким ЭУФ источником позволяют осуществлять крупномасштабное (до 160 пластин диаметром 300 мм/ч) производство ИС (чипов памяти) и процессоров нового поколения с размером элементов микросхем лишь несколько единиц нм. Такой ЭУФ литограф, состоящий более чем из 100000 компонентов, является одной из самых сложных когда-либо построенных машин. Он включает расположенную на нижнем этаже литографа систему газовых CO<sub>2</sub> лазеров, наиболее мощную из когда-либо выпускавшихся серийно. В общей сложности, такой нанолитограф весит 180 т и потребляет более 1 МВт электроэнергии, а его стоимость превышает 100 млн USD.

Наиболее сложными и дорогостоящими элементами такой литографической инфраструктуры являются маски. Набор масок только при производстве одной ИС может стоить до нескольких миллионов

долларов. Поэтому из-за высокой сложности и стоимости оборудования, дороговизны масок, сложной и дорогостоящей инфраструктуры проекционная фотолитография становится конкурентоспособной только при массовом производстве. Все это в совокупности делает эту технологию малодоступной или доступной только для единичных глобальных игроков.

Соответственно, существует потребность иметь доступные относительно простые и компактные ЭУФ литографы для относительно широкого круга применений при относительно малосерийных производствах.

Одним из подходов к решению указанной проблемы является развитие безмасочных литографических систем, которые обеспечивают топологические нормы, характерные для проекционной литографии: в области 100-10 нм и менее. Производительность безмасочного нанолитографа может быть на один-два порядка ниже, чем в случае массовой проекционной литографии, а стоимость литографического процесса не должна сильно зависеть от масштабов производства, что обеспечит большую доступность литографического производства.

В одной из таких литографических систем световой пучок разделяется на два (или четыре) пучка, которые интерферируют на целевой части пластины, как известно, например, из заявки WO/2009/083229, опубл. 09.07.2009. Интерференция вызывает образование линий или другого рисунка на целевой части пластины, Ekinci, Yasin et al. "Evaluation of resist performance with EUV interference lithography for sub-22-nm patterning", *Advanced Lithography* (2012).

В другой безмасочной литографической системе, известной, например, из патента US 5691541, опубликованного 25.11.1997, функцию устройства формирования рисунка выполняет микрооптическая электромеханическая система (МОЭМС) микрозеркал, выполняющая роль пространственного модулятора потока излучения. В этой технологии топология изображения на фоторезисте кодируется состоянием пикселей (микрозеркал) МОЭМС, отражающих ЭУФ излучение.

В настоящее время размер пикселя МОЭМС составляет 16×16 мкм при числе пикселей 1,05×10<sup>6</sup>. Также известны МОЭМС с размером пикселя 8×8 мкм, и размер пикселя 4 мкм может быть реализован в рамках существующей технологии. Соответственно, при использовании зеркального объектива с уменьшением 800х технологические нормы при литографическом производстве могут быть 20 нм, 10 нм и менее, Salashchenko, N.N., Chkhalo, N.I. & Dyuzhev, N.A. *Maskless X-Ray Lithography Based on Microoptical Electromechanical Systems and Microfocus X-Ray Tubes*. *J. Synch. Investig.* 12, 944-952 (2018).

В вышеуказанной работе предложено использовать относительно простой источник ЭУФ излучения на основе лазерной плазмы ксенона с высокой (теоретически до 4%) ожидаемой эффективностью конверсии лазерного излучения в излучение плазмы на длине волны 11,2 нм. Также, более короткая длина волны, по сравнению со ставшей уже традиционной для ЭУФ литографии длиной волны 13,5 нм, позволит улучшить технологические нормы изготовления ИС.

Однако низкая эффективность поглощения лазерного излучения накачки в Хе и сильное самопоглощение ЭУФ излучения ксеноном сильно ограничивают возможности получения высокой эффективности источников ЭУФ излучения на основе Хе-плазмы. Также можно отметить дороговизну ксенона, требующую сложной системы его рециркуляции. Все это объясняет причины, по которым источники ЭУФ излучения на основе лазерной Хе-плазмы не получили распространения. Кроме этого, работа с длиной волны излучения 11,2 нм связана с использованием Mo/Be зеркал, содержащих бериллий, что не всегда приемлемо в силу его токсичности.

Другой спектральный интервал связан с использованием La/B4C и C/B4C зеркал, которые имеют весьма высокий (теоретически до 80%) коэффициент отражения в спектральной области 6.6-6.7 нм, что обуславливает возможность значительного улучшения технологических норм процесса изготовления ИС или другого литографического процесса за счет уменьшения длины волны ЭУФ излучения. Для получения излучения на 6.7 нм наиболее эффективным (CE<sub>6,7</sub>~1.8%) является использование тугоплавких (~1300°C) гадолиния (Gd) или тербия (Tb) в качестве плазмообразующего материала. Материал может содержать соединение эвтектического сплава Gd или Tb, что снижает температуру плавления мишени вплоть до 650°C, как известно из заявки WO 2009116867, опубл. 24.09.2009.

Однако использование тугоплавкого плазмообразующего материала в литографических источниках ЭУФ излучения до сих пор является еще не решенной технической проблемой.

Этого недостатка лишено использование в качестве плазмообразующего материала Li с его относительно низкой температурой плавления, 160,54°C, известное, например, из заявки WO 2017217882, опубл. 21.12.2017. В отличие от других материалов, применение Li позволяет получать практически монохроматическое излучение от одиночного резонансного перехода водородоподобного Li<sup>2+</sup> на длине волны 13,5 нм. Ширина спектральной линии излучения по полувысоте интенсивности не превосходит 0.02-0.03 нм, как это известно, например, из публикации Schriever G, et al. *Laser-produced lithium plasma as a narrow-band extended ultraviolet radiation source for photoelectron spectroscopy*. *Appl Opt.* 1998 Mar 1; 37(7):1243-8.

Наряду с эмиссией ЭУФ излучения в качестве побочного нежелательного продукта из области излучающей плазмы генерируется поток загрязняющих частиц (debris), к которым относятся микрокапли, а

также заряженные и нейтральные частицы, загрязняющие оптическую систему, интегрированную с источником ЭУФ излучения. Однако предлагаемая при использовании лития в качестве плазмообразующего материала испарительная очистка оптических элементов не полностью решает проблему их защиты от загрязнений.

В значительной степени указанные недостатки устранены в чистых компактных источниках ЭУФ излучения относительно простой конструкции, известных из патентной заявки РСТ/RU 2018/000520, опубликованной 31.05.2019 под номером WO 2019103648, заявки РСТ/EP 2020/061562, опубликованной 29.10.2020 под номером WO 2020216950, и патента RU2743572, опубликованного 20 февраля 2021. В этих источниках используется легкоплавкая жидкометаллическая лазерная мишень, вращающаяся с высокой линейной скоростью около 100 м/с. Это, во-первых, обеспечивает высокую стабильность поверхности лазерной мишени и не требует сложной системы синхронизации лазерного пучка и мишени. Во-вторых, высокая скорость мишени позволяет подавить поток загрязняющих частиц, генерируемых в плазме наряду с излучением и, прежде всего, его наиболее проблемной капельной фракции, перенаправив ее в сторону от пространственного угла вывода ЭУФ излучения и от входного окна вакуумной камеры, предназначенного для ввода лазерного пучка.

Указанный метод подавления загрязнений обладает высокой эффективностью при использовании материала мишени с достаточно высокой плотностью  $\rho$ , например, олова с  $\rho=7,31$  г/см<sup>3</sup>. Однако использование Li в качестве материала мишени, характеризуется слишком большой скоростью капельной фракции загрязнений из-за малой плотности материала мишени ( $\rho=0,534$  г/см<sup>3</sup>), фрагменты которой в результате воздействия ударных импульсов взрывного типа в зоне взаимодействия приобретают скорости, достигающие 1000 м/с, что резко снижает эффективность защиты от капельной фракции Li-загрязнений. Кроме этого, использование только жидкометаллической мишени ограничивает набор материалов мишени, например, таких как Gd или Tb, при необходимости получения высокоэффективной генерации ЭУФ излучения на более короткой длине волны.

Соответственно, существует необходимость устранить по меньшей мере часть упомянутых выше недостатков. В частности, существует потребность в литографических системах сравнительно простой конструкции с применением ЭУФ источников, которые обладали бы достаточно высокими выходными параметрами ЭУФ излучения (средней мощностью, яркостью) при практически полном ослаблении потока выходящих из плазмы загрязняющих частиц, были бы компактными, и способными использовать различные материалы мишени: Sn, Li, Gd или Tb,- для расширения функциональных возможностей указанных литографических систем.

#### **Краткое изложение изобретения**

Технической задачей и техническим результатом изобретения является усовершенствование источников ЭУФ излучения на основе лазерной плазмы с быстровращающейся мишенью и расширение арсенала средств литографических систем, преимущественно предназначенных для мелко- и среднесерийного производства полупроводниковых изделий, за счет применения в них новых усовершенствованных источников ЭУФ излучения указанного типа.

Поставленным целям удовлетворяют признаки независимых пунктов формулы изобретения. Зависимые пункты формулы изобретения описывают варианты осуществления изобретения.

Согласно аспекту изобретения предложен источник ЭУФ излучения, содержащий вакуумную камеру с вращающимся мишенным узлом, подающим мишень в зону взаимодействия с импульсным лазерным пучком, сфокусированным на мишень, представляющую собой образованный под действием центробежной силы слой материала мишени на обращенной к оси вращения поверхности кольцевой канавки, выполненной во вращающемся мишенном узле, пучок ЭУФ излучения (может быть также обозначен как пучок излучения плазмы), выходящий из зоны взаимодействия на оптический коллектор, и средства подавления загрязнений.

Отличие источника ЭУФ излучения состоит в том, что материал мишени обладает текучестью под действием центробежной силы, при этом мишень имеет центробежное ускорение не менее 3000g, где g - ускорение свободного падения, и линейную скорость не менее 100 м/с.

В предпочтительном варианте реализации изобретения поверхность мишени является круглоцилиндрической с осью симметрии, совпадающей с осью вращения.

В предпочтительном варианте реализации изобретения материал мишени принадлежит к группе, включающей жидкость, например расплавленный металл или сплав; порошок, например металлический порошок или их смеси.

В предпочтительном варианте реализации изобретения материал мишени - олово (Sn) или его сплав с индием (In).

В варианте реализации изобретения материал мишени содержит композицию лития (Li) по меньшей мере с одним дополнительным элементом, выбранным из группы, включающей в себя серебро (Ag), золото (Au), висмут (Bi), барий (Ba), стронций (Sr).

Материал мишени может представлять собой эвтектический сплав, в котором атомная доля Li находится в диапазоне от 60 до 90%.

В предпочтительном варианте реализации изобретения источник ЭУФ излучения имеет максимум спектральной яркости на длине волны 13,5 нм.

В другом варианте реализации изобретения источник ЭУФ излучения имеет максимум спектральной яркости в диапазоне длин волн 6,6-6,8 нм, а материал мишени содержит гадолиний (Gd) или тербий (Tb) или их соединения.

Материал мишени может представлять собой сплав Gd и/или Tb с металлом, выбранным из группы, состоящей из Ag, Cu, Ni, Fe, Co, Mn, Al, Ga, Cd, Ru и Rh.

В варианте реализации изобретения оптический коллектор содержит по меньшей мере одно многослойное зеркало.

В варианте реализации изобретения оптический коллектор содержит два блока эллипсоидных зеркал скользящего падения, расположенных тандемом вдоль пути пучка ЭУФ излучения, передающих изображение излучающей области плазмы без искажений, в масштабе, определяемом конструкцией указанных блоков, во вторую фокальную точку второго эллипсоидного зеркального блока, а вторая фокальная точка первого эллипсоидного зеркального блока расположена в первой фокальной точке блока второго эллипсоидного зеркала.

В предпочтительном варианте реализации изобретения пути прохождения импульсного лазерного пучка и пучка ЭУФ излучения расположены в пространственных областях с минимальной скоростью выброса загрязняющих частиц, которая, по меньшей мере, в 104 раз меньше, предпочтительно, в 106 раз меньше, чем максимальная скорость выброса загрязняющих частиц.

В предпочтительном варианте реализации изобретения вектор линейной скорости мишени в зоне взаимодействия направлен по одну сторону от плоскости, проходящей через зону взаимодействия и ось вращения, а сфокусированный лазерный пучок и выходной пучок ЭУФ излучения расположены по другую сторону от указанной плоскости.

В предпочтительном варианте реализации изобретения между зоной взаимодействия и оптическим коллектором расположено одно или несколько средств защиты от загрязнений, включающих экран, расположенный вне области прохождения пучков лазерного и ЭУФ излучения, поток защитного газа, магнитное поле, фольговая ловушка, мембрана с прозрачностью более 60% для ЭУФ излучения из материала, принадлежащего к группе, включающей углеродные нанотрубки (УНТ), Ti, Al, Si, Zr, Si, BN.

В предпочтительном варианте реализации изобретения импульсный лазерный пучок генерируется твердотельным лазером с диодной накачкой и модуляцией добротности.

В другом аспекте изобретение относится к литографической системе, содержащей источник ЭУФ излучения и систему освещения, предназначенную для освещения устройства формирования рисунка.

Литографическая система отличается тем, что источник ЭУФ излучения выполнен в соответствии с настоящим изобретением.

В предпочтительном варианте реализации изобретения устройство формирования рисунка относится к группе устройств, включающей в себя фотошаблон или литографическую маску; сканируемый фотошаблон; микрооптическую электромеханическую систему (МОЭМС) микрозеркал; просвечиваемый квазишаблон, предназначенный для формирования интерферирующих пучков ЭУФ излучения.

В предпочтительном варианте реализации изобретения мембрана, входящая в состав средств защиты от загрязнений, также служит газовым затвором, разделяющим объемы с разным давлением.

В предпочтительном варианте реализации изобретения объем вакуумная камера источника ЭУФ излучения содержит газы аргон и водород или их смесь, а объем с системой освещения содержит газ водород.

Между совокупностью существенных признаков настоящего изобретения и достигаемым техническим результатом существуют следующие причинно-следственные связи.

Использование предложенного источника ЭУФ излучения, характеризующегося простотой конструкции, глубоким подавлением загрязнений, высокой яркостью и стабильностью, в целом, обеспечивает упрощение конструкции ЭУФ литографа, уменьшает его массу, габариты, улучшает его надежность, технологическую и коммерческую доступность, снижает эксплуатационные затраты, повышает удобство эксплуатации.

Настоящее изобретение обладает преимуществами применения широкого диапазона материалов мишени. При использовании Sn- или Li- содержащих жидкометаллических мишеней работа ЭУФ литографа осуществляется на ставшей традиционной для ЭУФ литографии длине волны 13,5 нм. В случае использования Li обеспечивается, по существу, монохроматичность источника излучения, что позволяет в ряде случаев улучшить качество литографического процесса. При этом применение "тяжелого" сплава Li (вместо чистого лития малой плотности) обеспечивает высокоэффективное подавление загрязняющих частиц, генерируемых в плазме наряду с излучением.

Использование не только жидкометаллических, но и любых жидких и/или сыпучих материалов мишеней позволяет генерировать и использовать излучение лазерной плазмы в различных спектральных диапазонах. В частном случае реализации изобретение предусматривает работу литографической системы с излучением на длине волны 6,7 нм за счет применения материала мишени тугоплавких материалов, например, порошка Gd или Tb, позволяя значительно уменьшить технологические нормы

литографического производства.

Для широкого круга материалов мишени, обладающих текучестью, высокое центробежное ускорение (более 3000g) позволяет формировать под действием центробежной силы высокостабильную мишень, поверхность которой к очередному импульсу принимает в зоне взаимодействия неизменную кругло-цилиндрическую форму, что обеспечивает высокостабильную работу источника излучения и ЭУФ литографической системы в целом.

Как известно, решающую роль в загрязнении оптического коллектора играет капельная фракция загрязняющих частиц, вылетающая из зоны взаимодействия с относительно небольшой скоростью. В соответствии с изобретением она эффективно подавляется за счет быстрой скорости вращения мишени (сотни Гц при линейной скорости более 100 м/с), обеспечивающего перенаправление подавляющей части капельной фракции загрязняющих частиц в сторону от оптического коллектора и от входного окна, предназначенного для ввода лазерного пучка в камеру с источником ЭУФ излучения. Дальнейшее обеспечение чистоты источника ЭУФ излучения достигается за счет целого комплекса средств подавления загрязнений. Среди них следует отметить сменную мембрану, например из УНТ, практически прозрачную для ЭУФ излучения, также играющую роль газового затвора, разделяющего объемы литографической системы с разным давлением, в которых содержатся источник ЭУФ излучения и система освещения.

Первый из этих объемов содержит газы аргон и водород или их смесь, а в второй - газ водород для защиты поверхностей оптических элементов от загрязнений. УНТ мембрана служит кардинальным средством подавления относительно мелких (менее 300 мкм) капель, а также ионной и паровой фракций загрязнений, тогда как для крупных капель (более 300 мкм) наиболее эффективным способом защиты является быстрое вращение мишени, перенаправляющее их в сторону от оптического коллектора. Вместе с использованием других средств защиты от загрязнений, а именно защитных экранов, потоков защитного газа, магнитных полей, фольговых ловушек это обеспечивает высочайшую чистоту источника излучения и очень длительный период работы мембраны до ее смены из-за снижения прозрачности.

В настоящем изобретении, в отличие от известного использования капельных мишеней, устраняется необходимость синхронизации мишени с лазерным пучком и ее предварительного формирования. Кроме этого, использование в соответствии с изобретением компактного высокоэффективного твердотельного лазера, в отличие от применения сложной и громоздкой системы газовых CO<sub>2</sub> лазеров, существенно упрощает источник ЭУФ излучения.

В целом, все это повышает надежность ЭУФ литографической системы, упрощает его конструкцию, повышает удобство эксплуатации.

Изобретение предусматривает возможность применения различных видов оптического коллектора: на основе многослойных зеркал нормального падения и/или зеркал скользящего падения, что позволяет оптимизировать систему защиты от загрязнений и параметры системы освещения литографической системы.

Также изобретение предусматривает возможность использования различных типов устройств формирования рисунка, к которым относятся:

- литографическая маска, в том числе сканируемая;
- маска или псевдошаблон для интерференционной литографии;
- МОЭМС с зеркалами, имеющими максимумом отражения на длине волны 13,5 или 6,7 нм.

В соответствии с этим изобретение обеспечивает расширение номенклатуры ЭУФ литографов, выполненных в соответствии с настоящим изобретением, реализует возможность создания относительно простых универсальных ЭУФ литографических систем для создания полупроводниковых изделий различного назначения, преимущественно по технологическим нормам 22 нм и менее.

Вышеупомянутые и другие цели, преимущества и особенности настоящего изобретения станут более очевидными из следующего неограничивающего описания вариантов его осуществления, приведенных в качестве примера со ссылкой на прилагаемые чертежи.

#### **Краткое описание чертежей**

Сущность изобретения поясняется чертежами, на которых

фиг. 1 - схема источника ЭУФ излучения в соответствии с вариантом реализации настоящего изобретения,

фиг. 2 - упрощенная схема источника ЭУФ излучения,

фиг. 3 - результаты расчета пространственного распределения выброса загрязняющих частиц из зоны взаимодействия, иллюстрирующие выбор направлений распространения пучков лазерного и ЭУФ излучения в пространственных областях с минимальными уровнями выброса загрязнений,

фиг. 4 - спектры излучения лазерной плазмы с использованием в качестве материала мишени Sn и эвтектического сплава Sn/In=52/48,

фиг. 5А и 5Б - результаты расчета пространственного распределения выброса загрязняющих частиц из зоны взаимодействия для материалов мишени из Li и композиции с атомными долями Li(80%) и Ag(20%),

фиг. 6А и 6Б - экспериментальные результаты сравнения выброса загрязнений для материалов ми-

шени из Li и композиции 80%Li+20%Ag,

фиг. 7А и 7Б - спектры источника ЭУФ излучения до и после отражения от Mo/Si зеркала для материала мишени из композиции 80%Li+20%Ag,

фиг. 8 - спектр излучения лазерной плазмы Gd-мишени,

фиг. 9А и 9Б - фрагменты поперечного сечения вращающегося мишенного узла с порошковым материалом мишени и центрифугированной смеси порошка и расплава повышенной плотности.

фиг. 10 - схема источника ЭУФ излучения с оптическим коллектором на основе двух блоков эллипсоидных зеркал скользящего падения,

фиг. 11 - схема литографической системы с плазменным источником ЭУФ излучения в соответствии с вариантом реализации настоящего изобретения,

фиг. 12 - схема безмасочной литографической системы в соответствии с вариантом реализации настоящего изобретения,

фиг. 13 - схема устройства формирования рисунка с квазишаблоном для формирования интерферирующих пучков ЭУФ излучения в варианте реализации литографической системы.

На чертежах совпадающие элементы устройства имеют одинаковые ссылочные номера.

Эти чертежи не охватывают и, кроме того, не ограничивают весь объем вариантов реализации данного технического решения, а представляют собой только иллюстративный материал частных случаев его реализации.

### **Подробное описание предпочтительных вариантов реализации изобретения**

Согласно примеру реализации изобретения, показанному на фиг. 1, высокояркостный источник ЭУФ излучения 1, предназначенный для использования в литографической системе, содержит вакуумную камеру 2 с вращающимся мишенным узлом 3. Вращающийся мишенный узел 3 подает мишень 4, материал которой обладает текучестью под действием центробежной силы, в зону взаимодействия 5 со сфокусированным лазерным пучком 6. Часть вращающегося мишенного узла 3 выполнена в виде диска, закрепленного на валу вращения. Диск имеет периферийную часть в виде кольцевого барьера с кольцевой канавкой, обращенной к оси вращения 7. Мишень 4 представляет собой слой материала мишени образованный центробежной силой на поверхности кольцевой канавки, выполненной во вращающемся мишенном узле 3. Конфигурация кольцевой канавки предотвращает выброс материала мишени в радиальном направлении и в обоих направлениях вдоль оси вращения 7, если объем материала мишени не превышает объема указанной кольцевой канавки.

В предпочтительном варианте реализации изобретения материал мишени может быть расплавленным легкоплавким металлом, расплавляемом и поддерживаемом в заданном оптимальном диапазоне температур с помощью системы индукционного, либо радиационного нагрева 8.

В другом варианте материал мишени может быть в виде порошка, например, из тугоплавкого Gd или Tb для получения ЭУФ излучения с максимумом спектральной яркости вблизи на длины волны 6,7 нм.

Для обеспечения высокой стабильности поверхности мишени и, соответственно, выходных параметров источника ЭУФ излучения, используется высокая скорость вращения при центробежном ускорении не менее 3000g. Действие центробежной силы делает поверхность мишени 4 параллельной оси вращения 7. т.е. поверхность мишени представляет собой по существу круглую цилиндрическую поверхность, ось которой совпадает с осью вращения 7.

В зоне взаимодействия 5 под воздействием сфокусированного лазерного пучка 6 происходит генерации импульсной высокотемпературной плазмы материала мишени 4. Плазма генерирует излучение в ЭУФ диапазоне, которое выходит из зоны взаимодействия 5 в виде расходящегося пучка ЭУФ излучения 9. В пучке ЭУФ излучения также может содержаться не используемое излучение других спектральных диапазонов.

Пучок ЭУФ излучения в пространственном угле сбора излучения, ограниченном кожухом 13, попадает на оптический коллектор 10. Оптический коллектор в частном случае реализации изобретения выполнен в виде Mo/Si зеркала с максимумом отражения на длине волны 13,5 нм. В других вариантах может использоваться оптический коллектор на основе зеркал скользящего падения или оптические элементы в виде зонных пластинок Френеля.

После отражения от зеркала оптического коллектора 10 пучок ЭУФ излучения может быть направлен на оптический элемент 11, например, в виде зеркала скользящего падения, либо в виде дифракционной решетки - для осуществления спектральной фильтрации излучения за счет изменении угла наклона регулируемого, как показано стрелками на фиг. 1.

На пути прохождения сфокусированного лазерного пучка 6 и пучка ЭУФ излучения 9 расположены средства подавления загрязнений, включающие в себя все или некоторые из ниже перечисленных средств:

кожухи 12, 13, окружающие указанные пучки лазерного и ЭУФ излучения;

потоки защитного газа, направленные через газовые вводы 14 в кожухи 12, 13 для подавления паровой и ионной фракций загрязнений на пути прохождения пучков лазерного и ЭУФ излучения;

экран 15, отделенный от вращающегося мишенного узла 3 щелевыми зазорами, имеющий только

два небольших отверстия (для ввода сфокусированного лазерного пучка и для выхода пучка ЭУФ излучения), через которые загрязнения могут покидать мишенный узел;

фольговая ловушка (не показана) с высокой прозрачностью для излучения, представляющая собой систему фольг, расположенных радиально по отношению к зоне взаимодействия 5, на развитой поверхности которой осаждаются загрязнения;

магнитное поле, создаваемое постоянными магнитами 16, которые отклоняют заряженные частицы от попадания на оптический коллектор;

мембрана 17, по существу, прозрачная для ЭУФ излучения, непроницаемая для загрязнений и газа, предпочтительно сменная (узел быстрой смены мембраны не показан).

Мембрана, установленная на пути прохождения пучка ЭУФ излучения предпочтительно выполнена из материала, относящегося к группе, включающей в себя: углеродные нанотрубки (УНТ), Ti, Al, Si, ZrSi, BN.

На фиг. 2 показана упрощенная схема источника ЭУФ излучения и расположение пучков 6, 9 лазерного и ЭУФ излучения по отношению к вращающемуся мишенному узлу 3. В соответствии с настоящим изобретением вектор  $\vec{V}_R$  линейной скорости мишени в зоне взаимодействия и пучки 9, 6 ЭУФ и лазерного излучения расположены по разные стороны от плоскости 18, проходящей через зону взаимодействия 5 и ось вращения мишенного узла 7, что обеспечивает чистоту ЭУФ источника в пространственных областях прохождения пучков лазерного и ЭУФ излучения. Это иллюстрируется результатами численного моделирования пространственного распределения выброса загрязняющих частиц из зоны взаимодействия 5, выполненного с помощью программы RZLINE. Программа предназначена для работ в области радиационной гидродинамики плотной горячей плазмы, в ней заложены математические модели, основанные на многолетней экспериментальной и теоретической работе, как известно, например, из публикации К. Koshelev, V. Ivanov, V. Medvedev, et al "Return-to-zero line code modeling of distributed tin targets for laser-produced plasma sources of extreme ultraviolet radiation", Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS Vol. 14, Issue 4, 4015.

На фиг. 3 показана карта пространственного распределения удельных скоростей выброса загрязняющих частиц (учитываются частицы всех фракций всех скоростей) в экспериментальных координатах, в которых  $\varphi$  - угол к вектору скорости мишени в плоскости вращения ("азимутальный угол"),  $\theta$  - угол к оси вращения ("полярный угол"). Характерные направления в зоне взаимодействия следующие:

- I - параллельно оси вращения:  $\theta = 0$ ,  $\varphi$  - любой;
- II - вдоль скорости мишени:  $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$ ;
- III - по нормали к поверхности мишени:  $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 90^\circ$ ;
- IV - против скорости мишени:  $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 180^\circ$ .

Пространственное распределение удельной скорости выброса загрязнений, фиг. 3, рассчитывалось в  $\text{nm}/(\text{месяц}\cdot\text{Вт})$  как удельная скорость роста толщины пленки материала мишени, осевшего на поверхность экспонируемого образца, расположенного на расстоянии 40 см от зоны взаимодействия, на единицу мощности лазера при круглосуточной работе источника 7 дней в неделю. Это распределение получено для типичных параметров источника ЭУФ излучения: материал мишени - Sn, длина волны лазерного излучения 1-2 мкм, энергия лазерного импульса - несколько единиц мДж (1-5 мДж), длительность лазерного импульса - несколько нс (1-5 нс), диаметр фокального пятна - несколько десятков мкм, линейная скорость мишени 200 м/с. Кроме быстрого вращения мишени, никакие другие методы подавления загрязнений не учитывались.

Как показано на фиг. 3, в основном масса загрязняющих частиц сосредоточена в секторе вдоль направления скорости мишени, ограниченном "азимутальными углами"  $\varphi$  от  $0^\circ$  до  $80^\circ$  и "полярными углами"  $\theta$  от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ . Овалами обозначены выбранные в соответствии с изобретением пространственные области с минимальными уровнями выхода загрязнений, в которых расположены конусы пучков лазерного и ЭУФ излучения. Как видно из данных фиг. 3, максимальная скорость выброса загрязняющих частиц вдоль направления вращения мишени составляет около 107  $\text{nm}/\text{месяц}\cdot\text{Вт}$ , а в местах прохождения пучков 6, 9 лазерного и ЭУФ излучения - менее 2  $\text{nm}/\text{месяц}\cdot\text{Вт}$ , т.е. более чем в 106 раз лучше.

На фиг. 4 показаны спектры излучения лазерной плазмы с использованием в качестве материала мишени Sn и эвтектического сплава Sn/In=52/48, полученные при одинаковых условиях возбуждения. Видно, что при использовании этих материалов достигается одинаково высокая спектральная яркость в ЭУФ диапазоне. Использование олова или оловянного сплава предпочтительней для достижения высокой яркости на рабочей длине ЭУФ литографии 13,5 нм при высокой, около 3%, эффективности конверсии SE13,5 энергии лазерного излучения в ЭУФ излучение в спектральной полосе 13,5 $\pm$ 0,135 нм в пространственный угол 2 $\pi$  ср. При этом использование эвтектического сплава Sn/In может быть предпочтительнее, поскольку температура его плавления 125 $^\circ\text{C}$  существенно ниже температуры плавления 232 $^\circ\text{C}$  чистого олова, что упрощает конструкцию ЭУФ источника и повышает удобство его эксплуатации.

В другом варианте реализации изобретения для получения, по существу, монохроматического ЭУФ излучения на длине волны 13,5 нм материал мишени содержит Li. Для снижения выхода загрязняющих частиц материал мишени помимо Li содержит по меньшей мере один дополнительный элемент, выбран-

ный из группы, включающей в себя серебро Ag, Au, Bi, Ba, Sr. Предпочтительно материал мишени представляет эвтектический сплав, в котором атомная доля Li находится в диапазоне от 60 до 90%.

Результаты расчета выхода из плазмы загрязняющих частиц для материалов мишени из Li, фиг. 5А, и композиции из 80%Li и 20%Ag (в атомных долях), фиг. 5Б, иллюстрируют значительный положительный эффект, достигаемый в соответствии с настоящим изобретением. Увеличение плотности материала мишени (в 4,8 раза по сравнению с плотностью лития  $\rho=0,512 \text{ г/см}^3$ ) позволяет резко (более чем на порядок величины) снизить скорость выброса загрязняющих частиц в областях прохождения пучков лазерного и ЭУФ излучения.

Достижение этого положительного эффекта изобретения подтверждено экспериментально с использованием источника ЭУФ излучения, фиг. 1, в котором тестовый образец размещался вместо мембраны 17.

На фиг. 6 показаны полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа (SEM) фотографии тестовых образцов для материалов мишени из Li, фиг. 6А, и композиции из 80%Li и 20%Ag, фиг. 6Б. Размер кадров - 125 мкм. Тесты проведены при следующих условиях:

линейная скорость мишени - 150 м/с;

ускорение - 23000g;

энергия лазерного пучка на мишени - 3,3 мДж в пятне фокусировки 120 мкм по уровню интенсивности ( $1/e^2$ );

частота повторения импульсов - 25 кГц;

время экспозиции образцов 2,5 ч (фиг. 6А) и 10 ч (фиг. 6Б).

Видно, что повышение плотности материала мишени в соответствии с изобретением приводит к резкому подавлению загрязнений.

На основании проведенных тестов показано, что относительно крупные капли размером более 300 нм, которые могут проникать через УНТ-мембрану, подавляются полностью. Таким образом, замена тестового образца сменной УНТ мембраной позволяет обеспечить ультравысокую чистоту высокояркостного монохроматического источника излучения на 13,5 нм, выполненного в соответствии с настоящим изобретением.

На фиг. 7А и 7Б представлены спектры источника ЭУФ излучения для материала мишени из композиции 80%Li+20%Ag. Спектр, представленный на фиг. 7А, измерен для излучения, выходящего непосредственно из плазмы. Наличие ионов Ag в излучающей плазме обуславливает полосу излучения с пиком на длине волны 17 нм, которая не перекрывается с линией излучения Li на 13,5 нм и может быть легко отфильтрована, например, с помощью Mo/Si зеркала, как это видно из фиг. 7Б. При этом интенсивность линии излучения  $\text{Li}^{2+}$  на 13,5 нм практически не меняется при замене материала мишени из Li на композицию из 80%Li+20%Ag.

Достигаемая в соответствии с изобретением монохроматичность источника ЭУФ излучения позволяет использовать с ним широкий круг оптических элементов, к которым относятся многослойные Mo/Si зеркала, установленные под различными углами, зеркала скользящего падения, зонные пластины Френеля, и расширяет диапазон применений по существу точечных (с характерным размером ~ 100 мкм и менее) источников излучения, раскрытых в настоящем изобретении.

В другом варианте осуществления изобретение позволяет генерировать излучение вокруг центральной длины волны 6,7 нм, как это иллюстрируется спектром излучения лазерной плазмы Gd-мишени, представленным на фиг. 8.

На фиг. 9 схематично показан фрагмент сечения вращающегося мишенного узла 3 с мишенью 4, содержащей основной плазмообразующий материал, относящийся к Gd, либо Tb. Для обеспечения текучести тугоплавкий материал мишени может представлять собой порошок 20 на поверхности канавки 19, выполненной во вращающемся мишенном узле 3, фиг. 9А. Еще в одном варианте материал мишени может представлять собой смесь более плотного расплава или жидкости 21 и порошка 20, фиг. 9Б.

Плазменный источник света высокой яркости работает, как описано ниже и показано на фиг. 1.

Вакуумная камера 2 вакуумируется с помощью безмасляной вакуумной насосной системы до давления ниже  $10^{-5} \dots 10^{-15}$  мбар. При этом удаляются компоненты газа, такие как азот, кислород, углерод и др., способные взаимодействовать с материалом мишени и загрязнять зеркало оптического коллектор 10.

Вращающийся мишенный узел 3 приводится в действие с помощью вращающегося привода, например электродвигателя с магнитной муфтой, что обеспечивает чистоту вакуумной камеры 2. Под действием центробежной силы мишень 4 формируется в виде слоя материала мишени на поверхности кольцевой канавки, обращенной к оси вращения 7. При центробежном ускорении не менее 3000g поверхность мишени, по существу, параллельна оси вращения.

Мишень 4 подвергается воздействию сфокусированного лазерного пучка 6 с высокой частотой повторения импульсов, которая может находиться в диапазоне от 10 кГц до 1 МГц. Коротковолновое излучение генерируется сфокусированным лазерным пучком 6, нагревающим материал мишени до плазмообразующей температуры. Лазерная плазма излучает свет в коротковолновом диапазоне. В зависимости от плотности мощности лазерного излучения в фокальном пятне и материала мишени коротковолновое излучение генерируется в диапазоне от 2,5 до 120 нм, в частности, в спектральных диапазонах около длин

волн 6,7 нм или 13,5 нм.

Отвод тепла от мишени осуществляется в основном с помощью радиационного охлаждения и через узкий зазор между вращающимся узлом мишени 3 и неподвижным водоохлаждаемым теплообменником (не показан), через который продувается газ под давлением ~1 мбар.

Образовавшаяся в зоне взаимодействия 5 плотная высокотемпературная плазма генерирует коротковолновое излучение. Пучок ЭУФ излучения 9 выходит из зоны взаимодействия 5 через средства подавления загрязнений 13-17 на зеркало оптического коллектор 10. За счет быстрого вращения мишени 4 капельная фракция загрязняющих частиц, вылетающих из зоны взаимодействия, приобретает значительную тангенциальную составляющую скорости, сравнимую с линейной скоростью мишени. Соответственно, результирующий вектор скорости каплей будет в значительной степени перенаправлен от конусов лазерного пучка 6 и пучка ЭУФ излучения 9, которые, предпочтительно расположены по разные стороны от плоскости 18, проходящей через зону взаимодействия 5 и ось вращения 7.

Предпочтительно, не ограничиваясь только этим, в качестве материала мишени может быть выбран расплавленный легкоплавкий металл. В других вариантах реализации изобретения материалом мишени является порошок, например, металлический порошок или смесь порошка и расплава.

Еще в одном варианте реализации изобретения, схематично показанном на фиг. 10, сбор ЭУФ излучения осуществляется оптическим коллектором 10, содержащим два блока 22, 23 эллипсоидных зеркал скользящего падения. Блоки 22, 23 эллипсоидных зеркал расположены на одной общей оптической оси 24, предпочтительно тандемом по пути распространения пучка ЭУФ излучения 9. Зона взаимодействия 5 расположена в первом фокусе первого блока 22, а второго фокус первого блока 22 совпадает с первым фокусом второго блока эллипсоидных зеркал 23. Каждый блок эллипсоидных зеркал 22, 23 может состоять из нескольких вложенных соосных эллиптических зеркал, так что их фокусы совпадают.

Первый блок эллипсоидных зеркал 22 передает изображение излучающей области плазмы, расположенной в первом фокусе первого эллипсоидного зеркала, во второй фокус. Из-за разного коэффициента усиления разных участков эллипсоидного зеркала результирующее изображение излучающей плазмы сильно искажается в промежуточном фокусе между двумя блоками зеркал 22, 23. При этом второй блок эллипсоидных зеркал 23, первый фокус которого совпадает со вторым фокусом первого блока эллипсоидных зеркал 22, обеспечивает устранение указанных искажений изображения. Таким образом, во втором фокусе второго эллипсоидного зеркального блока изображение плазмы проецируется без искажений с масштабным коэффициентом, определяемым конструкцией первого и второго блоков эллипсоидных зеркал 22, 23.

В варианте осуществления изобретения оптический коллектор 10 имеет увеличение, близкое или равное 1, в пределах от 0,8 до 1,2. В предпочтительном варианте второй блок эллипсоидных зеркал 23 в несколько раз, от 2 до 15 раз, меньше первого блока эллипсоидных зеркал 22.

В зависимости от рабочего диапазона длин волн и угла сбора в качестве отражающего материала эллипсоидных зеркал скользящего падения может быть выбран один из следующих материалов с относительно высоким коэффициентом отражения скользящего падения: Mo, Ru, Rh, Pd, U, Ni, W, Fe, Nb, Al, Si, Co и BN, обеспечивающие коэффициент отражения не менее 20% при углах падения не менее 5 градусов в диапазоне длин волн от 2,5 до 120 нм.

На пути пучка ЭУФ излучения 9 вдоль оптической оси 24 оптического коллектора 10 имеются средства подавления загрязнений, часть из которых отмечена номерами позиций 13, 14, 15, 17, 26 на фиг. 10.

В соответствии с настоящим изобретением достигаются важные преимущества по сравнению с источниками света, использующими оптический коллектор на основе зеркала нормального падения. В последнем случае очень ограничена область размещения средств защиты от загрязнений, поскольку значительную часть области между зоной взаимодействия и оптическим коллектором занимает зона распространения отраженного пучка ЭУФ излучения. Согласно варианту реализации изобретения, показанному на фиг. 10, практически на всем пути между зоной взаимодействия 5 и оптическим коллектором 10 размещены средства подавления загрязнений 13, 15. Эти средства частично расположены внутри и снаружи кожухов 12, 13, окружающих пучки 6, 9 лазерного и ЭУФ излучения.

В зоне между первым и вторым блоками 22, 23 эллипсоидных зеркал предпочтительно располагается вторая секция средств защиты от загрязнений 26 с газовым вводом 14, посредством которого через ряд сопел, установленных вокруг оптической оси 24, подается защитный газ, предпочтительно аргон. Тем самым перед мембраной 17 создается зона повышенного давления, которая служит дополнительным барьером на пути распространения загрязнений во второй блок эллипсоидных зеркал и интегрированную с источником аппаратуру. Этот газ откачивается через кольцевой патрубок, также расположенный в этой зоне (не показан). Мембрана 17, с одной стороны, ограничивает поток загрязняющих частиц, а с другой - разделяет зоны с разным давлением защитного газа. Все это обеспечивает высокоэффективную защиту от загрязняющих частиц.

Таким образом, настоящее изобретение предусматривает создание источников ЭУФ излучения, характеризующихся большой средней мощностью, высокой яркостью ЭУФ излучения, большим сроком службы и простотой эксплуатации применительно к использованию литографических системах.

На фиг. 11 схематично показана литографическая система 27, которая содержит плазменный источник ЭУФ излучения 1, систему освещения 28, предназначенную для освещения устройства формирования рисунка 35 и проекционную систему 37, которые размещены в отдельных (вакуумных) корпусах и расположены последовательно на пути пучка ЭУФ излучения 9, исходящего из зоны взаимодействия 5 источника ЭУФ излучения 1. Источник ЭУФ излучения 1, система освещения 28 и проекционная система 37 расположены в вакуумном корпусе (не показан), окружающем эти системы. Плазменный источник ЭУФ-излучения 1 выполнен в соответствии с настоящим изобретением.

На фиг. 11 изображена литографическая система с вариантом источника ЭУФ-излучения, показанного на фиг. 10 и описанного выше, поэтому его подробное описание опускается. Оптический коллектор 10 собирает излучение плазмы в пучок ЭУФ излучения 29 и фокусирует в точке 30 для формирования изображения области излучающей плазмы, которое выступает в качестве виртуального источника излучения для системы освещения 28. Точка 30, в которой фокусируется пучок излучения, может называться промежуточным фокусом.

В соответствии с вариантом реализации настоящего изобретения, показанном на фиг. 11, мембрана 17, предпочтительно УНТ мембрана, являющаяся средством защиты от загрязнений и, которая может быть установлена между зеркалами 22, 23 оптического коллектора, также служит газовым затвором, разделяющим объемы источника ЭУФ излучения 1 и системы освещения 28 с разным давлением. Камера 2 источника ЭУФ излучения с более высоким давлением содержит газы аргон, потоки которого на пути прохождения пучков 6, 9 лазерного и ЭУФ излучения используется для защиты от загрязнений, как описано выше. Водород в силу его химической активности используется для очистки оптических поверхностей.

Промежуточный фокус 30 может быть расположен в отверстии диафрагмы 31 для пространственной фильтрации пучка ЭУФ излучения.

Дополнительно на пути прохождения пучка ЭУФ излучения может быть установлен спектральный фильтр, например в виде металлической фольги, не ограничиваясь только этим вариантом.

Система освещения 28, которая предназначена для формирования пучка ЭУФ излучения, может включать устройство 32 с составным (фацетированным) полевым зеркалом и устройство 33 с составным зрачковым зеркалом. Устройство 32 с составным полевым зеркалом и устройство 33 с составным зрачковым зеркалом вместе обеспечивают пучок излучения 34 с желаемой формой поперечного сечения и желаемым угловым распределением. Пучок излучения 34 проходит от системы освещения 28 и на устройство формирования рисунка 35, удерживаемое опорной конструкцией 36. Устройство формирования рисунка 35 отражает и формирует пучок излучения 38 Система освещения 28 может включать в себя другие зеркала или устройства в дополнение или вместо устройств 32, 33 с составными полевым и зрачковым зеркалами.

После отражения от устройства формирования рисунка 35, которое может быть литографической маской, пучок направленного излучения 38 поступает в проекционную систему 37. Проекционная система 37 содержит множество зеркал, которые сконфигурированы так, чтобы проецировать пучок излучения 38 на пластину 39, удерживаемую столом 40 для пластин. Проекционная система 37, характеризующаяся коэффициентом уменьшения, формирует изображение с элементами, которые меньше, чем соответствующие элементы на устройстве формирования рисунка 35. Хотя проекционная система 37, упрощенно изображенная на фиг. 11, имеет два зеркала, она может включать любое количество зеркал (например, шесть, семь, восемь, девять или десять зеркал).

Источник ЭУФ излучения 1, система освещения 28 и проекционная система 37 могут быть сконструированы и расположены так, чтобы их можно было изолировать от внешней среды. В источнике ЭУФ излучения 1 может быть предусмотрен газ при давлении ниже атмосферного давления (например, водород и аргон). В системе освещения 28 и/или в проекционной системе 37 может быть обеспечен вакуум. Небольшое количество газа (например, водорода) при давлении значительно ниже атмосферного давления может быть обеспечено в системе освещения 28 и/или проекционной системе 37.

Проекционная система 37 фокусирует пучок излучения 38 на целевом участке пластины 39. Целевой участок можно назвать экспонируемым полем. Стол для пластин 40 можно точно перемещать, например, таким образом, чтобы расположить различные целевые части пластины 39 на пути луча 38 излучения. Стол для пластин 40 может позиционироваться одним или несколькими устройствами (не показаны). Чтобы повысить точность позиционирования стола 40 для пластин можно использовать один или несколько датчиков положения (не показаны) для измерения положения стола 40 для пластин относительно пучка 38. Измерения, выполненные датчиками по одному или нескольким положениям, могут подаваться обратно к одному или нескольким позиционирующим устройствам.

Устройство формирования рисунка 35 в варианте реализации изображения используется в режиме сканирования, при котором стол для масок (опорная конструкция) 36 и стол для пластин 40 сканируются синхронно, в то время как рисунок, структурирующий пучок ЭУФ излучения, проецируется на пластину 39 (динамическая экспозиция). Скорость и направление стола 40 пластины относительно стола маски 36 могут определяться характеристиками уменьшения и обращения изображения проекционной системы 37. Пучок направленного излучения, падающий на пластину 39, может быть в виде полосы излучения, кото-

рая может называться экспозиционной щелью. Во время экспонирования при сканировании движение стола 40 для пластин и опорной конструкции 36 может быть таким, что щель экспонирования перемещается по полю экспонирования пластины 39.

Проекционная система 37 обычной литографической системы 27 может применять уменьшение примерно в 4 раза как в направлении  $x$ , так и в направлении  $y$ . Однако может оказаться выгодным увеличить уменьшение проекционной системы 37, по меньшей мере, в одном из направлений  $x$  и/или  $y$ .

После облучения на пластине 39 слоя фоторезиста его проявляют с возможностью дальнейшего выполнения травления пластины в соответствии с этим узором.

В настоящее время источники ЭУФ излучения, соответствующие настоящему изобретению, обеспечивают в промежуточном фокусе мощность излучения в спектральной полосе  $13,5 \pm 0,135$  нм около 10 Вт и возможно масштабирование этой величины, по меньшей мере, до 50 Вт. В принципе, это позволяет использовать предложенные литографические системы для серийного производства полупроводниковых устройств. Вместе с тем, из-за высоких сложности и стоимости оборудования, дороговизны масок, сложной и дорогостоящей инфраструктуры проекционная фотолитография конкурентоспособна только при массовом производстве. Одним из подходов к решению указанной проблемы является использование безмасочных литографических систем, которые обеспечивают топологические нормы, характерные для проекционной литографии. Производительность безмасочного нанолитографической системы может быть на один-два порядка ниже, чем в случае массовой проекционной литографии, но стоимость литографического процесса при этом не зависит от масштабов производства, что обеспечит большую доступность литографического производства.

На фиг. 12 схематично показан вариант реализации изобретения с литографической системой 27, в которой устройство 35 формирования рисунка представляет собой микрооптическую электромеханическую систему (МОЭМС) микрозеркал. Плазменный источник ЭУФ излучения 1, показанный на фиг. 12 подробно описан выше (фиг. 1), и его описание опускается. Для упрощения системы освещения и проецирования могут быть размещены в одной общей вакуумной камере 41. Система освещения может включать устройство 32 с составным зеркалом для однородного освещения устройства формирования рисунка 35 в виде МОЭМС микрозеркал. Пучок излучения 34 проходит от составного зеркала и на устройство формирования рисунка 35. Устройство формирования рисунка 35 отражает и формирует пучок излучения 38, который с помощью зеркал 42, 43, 44 проекционного объектива фокусирует пучок излучения 38 на целевом участке пластины 39 с фоторезистом, перемещаемой столом 40 пластины (2D сканером). Литографическая система 27 также содержит шлюз для закладки и выгрузки проэкспонированных пластин (не показан).

Работа литографической системы, фиг. 12, происходит следующим образом. Пучок ЭУФ излучения 29, отраженный коллекторным зеркалом 10, перенаправляется зеркалом 11 на составное зеркало 32 (гомогенизатор). Составное зеркало 32 обеспечивает однородное освещение динамической маски 35, представляющей собой МОЭМС зеркал. Отраженное от МОЭМС зеркал излучение падает на первое зеркало 42 проекционного объектива и далее с помощью зеркал 43 и 44 изображение МОЭМС переносится на пластину 39 с фоторезистом, установленную в плоскости изображения. Особенностью проекционной схемы является то, что лучи, отраженные от наклоненных микрозеркал (это состояние соответствует неотражающей части классической фотомаски) не попадают во входную апертуру зеркал 42, 43, 44 проекционного объектива. Таким образом, состояние микрозеркала формирует два пиксель изображения: "0" - отклоненное микрозеркало и "1" - исходное состояние микрозеркала.

Требуемая топология на пластине 39 формируется за счет согласованного движения стола 40 пластины (сканера) и микрозеркал МОЭМС, синхронизованного с импульсами источника ЭУФ излучения 1. Движение пластины 39 в экспонируемой области предпочтительно происходит с постоянной скоростью.

Система совмещения слоев микросхемы обеспечивает точное определение координат пластины по маркерам, контроль и коррекцию координат при сканировании с требуемой точностью. Система автофокуса контролирует и корректирует расстояние между объективом и пластиной с фоторезистом с точностью лучше глубины фокуса объектива. Закладка пластин с фоторезистом и выемка проэкспонированных пластин осуществляется через шлюз.

В варианте реализации изобретения уменьшение объектива - 800х, производительность - 3 пластины диаметром 400 мм/ч, размер МОЭМС -  $8 \times 33$  мм, пиксель  $16 \times 16$  мкм, число пикселей - 1,05 Мп, разрешение - 20 нм.

Помимо чисто бинарного способа экспонирования возможно экспонирование в режиме с градацией "серости". Это достигается за счет многократного, с небольшим сдвигом (менее размера пикселя), фиксирования изображения. Это один из приемов "улучшения разрешения". В целом, благодаря взаимосвязи трех систем: источник ЭУФ излучения-МОЭМС-сканер реализуются дополнительные возможности оптимизации профиля засветки фоторезиста, тем самым достигаются высокое разрешение и малая шероховатость края линии.

В частном случае реализации изобретение предусматривает работу литографической системы с излучением на длине волны 6,7 нм за счет применения в качестве материала мишени тугоплавких материа-

лов, например, порошка Gd или Tb, позволяя уменьшить технологические нормы литографического производства.

В другом варианте реализации литографической системы устройство формирования рисунка, схематично представленное на фиг. 13, представляет собой просвечиваемый пучком 45 ЭУФ излучения квазишаблон 46. Пространственное структурирование излучения на экспонируемой пластине 39 осуществляется с помощью оптической системы, включающей квазишаблон, в котором располагают, например, две взаимно перпендикулярные пары дифракционных решеток 47 и 48 с периодами  $p_x$  и  $p_y$  соответственно. Интерференция четырех пучков первого дифракционного порядка, дифрагируемых на этих решетках, приводит к образованию в фоторезисте, покрывающем пластину, стоячего электромагнитного поля (интерференционной картины), периодического по координатам  $x$  и  $y$ . Период интерференционной картины 49 (стоячего поля)  $d_x$  однозначно определяется периодом  $p_x$  данной пары дифракционных решеток  $d_x = p_x/2$ . Ограничением на период интерференционной картины является то, что период дифракционных решеток не может быть меньше половины длины волны ЭУФ излучения. Таким образом, это определяет разработку простых и доступных ЭУФ литографических систем высокого разрешения.

#### Промышленное применение

Предложенные устройства предназначены для применений, включающих литографию с использованием плазменного источника ЭУФ излучения.

#### ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Источник экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) излучения, содержащий вакуумную камеру с вращающимся мишенным узлом (2), подающим мишень (4) в зону взаимодействия (5) с импульсным лазерным пучком (6), сфокусированным на мишень, представляющую собой образованный под действием центробежной силы слой материала мишени на обращенной к оси вращения поверхности кольцевой канавки, выполненной во вращающемся мишенном узле, пучок ЭУФ излучения, выходящий из зоны взаимодействия на оптический коллектор, и средства подавления загрязнений, отличающийся тем, что материал мишени обладает текучестью под действием центробежной силы, при этом мишень имеет центробежное ускорение не менее  $3000g$ , где  $g$  - ускорение свободного падения, и линейную скорость не менее  $100$  м/с.

2. Источник по п.1, в котором поверхность мишени (3) является круглоцилиндрической с осью симметрии, совпадающей с осью вращения.

3. Источник по п.1, в котором материал мишени принадлежит к группе, включающей жидкость, например расплавленный металл или сплав; порошок, например металлический порошок или их смеси.

4. Источник по п.1, в котором материал мишени - олово (Sn) или его низкотемпературный сплав с другими металлами, включая индий (In).

5. Источник по п.1, в котором материал мишени содержит композицию лития (Li) по меньшей мере с одним дополнительным элементом, выбранным из группы, включающей в себя серебро (Ag), золото (Au), висмут (Bi), барий (Ba), стронций (Sr).

6. Источник по п.1, в котором материал мишени представляет эвтектический сплав, в котором атомная доля Li находится в диапазоне от 60 до 90%.

7. Источник по п.1, в котором источник ЭУФ излучения имеет максимум спектральной яркости на длине волны  $13,5$  нм.

8. Источник по п.1, в котором источник ЭУФ излучения имеет максимум спектральной яркости в диапазоне длин волн  $6,6-6,8$  нм, а материал мишени содержит гадолиний (Gd) или тербий (Tb) или их соединения.

9. Источник по п.8, в котором материал мишени представляет собой сплав Gd и/или Tb с металлом, выбранным из группы, состоящей из Ag, Cu, Ni, Fe, Co, Mn, Al, Ga, Cd, Ru и Rh.

10. Источник по п.1, в котором оптический коллектор (8) содержит по меньшей мере одно многослойное зеркало.

11. Источник по п.1, в котором оптический коллектор (8) содержит два блока (9, 10) эллипсоидальных зеркал скользящего падения, расположенных тандемом вдоль пути пучка ЭУФ излучения (7), передающих изображение излучающей области плазмы без искажений, в масштабе, определяемом конструкцией указанных блоков, во вторую фокальную точку (17) второго эллипсоидального зеркального блока (10), а вторая фокальная точка первого эллипсоидного зеркального блока (9) расположена в первой фокальной точке блока второго эллипсоидального зеркала (10).

12. Источник по п.1, в котором пути прохождения импульсного лазерного пучка (5) и пучка ЭУФ излучения (7) расположены в пространственных областях с минимальной скоростью выброса загрязняющих частиц, которая по меньшей мере в 10 раз меньше, предпочтительно в 10 раз меньше, чем максимальная скорость выброса загрязняющих частиц.

13. Источник по п.1, в котором вектор линейной скорости мишени в зоне взаимодействия (4) направлен по одну сторону от плоскости (18), проходящей через зону взаимодействия (4) и ось вращения (6), а сфокусированный лазерный пучок (5) и пучок ЭУФ излучения (7) расположены по другую сторону

от указанной плоскости (18).

14. Источник по п.1, в котором средства защиты от загрязнений, включают одно или несколько из средств (12-16), к которым относятся экран, расположенный вне области прохождения пучков лазерного и ЭУФ излучения, поток защитного газа, магнитное поле, фольговая ловушка, мембрана (16) с прозрачностью более 60% для ЭУФ излучения из материала, принадлежащего к группе, включающей углеродные нанотрубки, Ti, Al, Si, Zr, Si, BN.

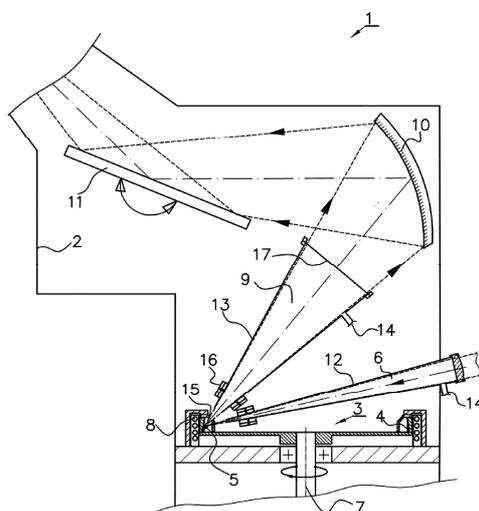
15. Источник по п.1, в котором импульсный лазерный пучок генерируется твердотельным лазером с диодной накачкой и модуляцией добротности.

16. Литографическая система, содержащая источник экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) излучения и систему освещения, предназначенную для освещения устройства формирования рисунка, отличающаяся тем, что источник ЭУФ излучения выполнен по любому из пп.1-15.

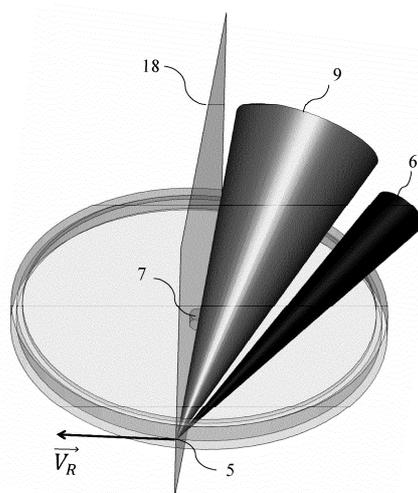
17. Система по п.16, в которой устройство формирования рисунка относится к группе устройств, включающей в себя фотошаблон или литографическую маску; сканируемый фотошаблон; микрооптическую электромеханическую систему (МОЭМС) микрозеркал; просвечиваемый квазишаблон, предназначенный для формирования интерферирующих пучков ЭУФ излучения.

18. Система по п.16, в которой мембрана (16), входящая в состав средств защиты от загрязнений, также служит газовым затвором, разделяющим объемы с разным давлением.

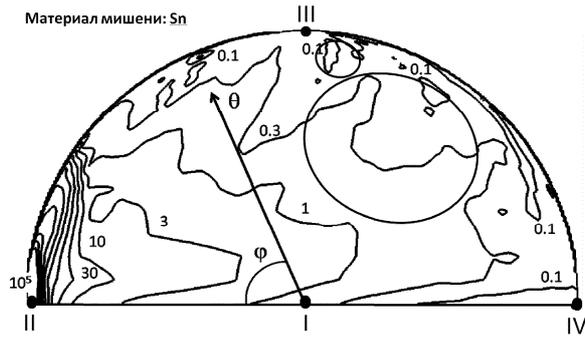
19. Система по п.16, в которой вакуумная камера источника ЭУФ излучения содержит газы аргон и водород, а объем с системой освещения содержит газ водород.



Фиг. 1



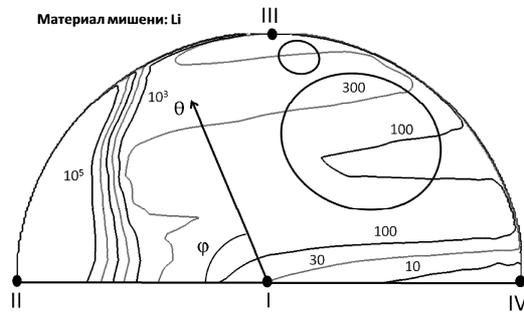
Фиг. 2



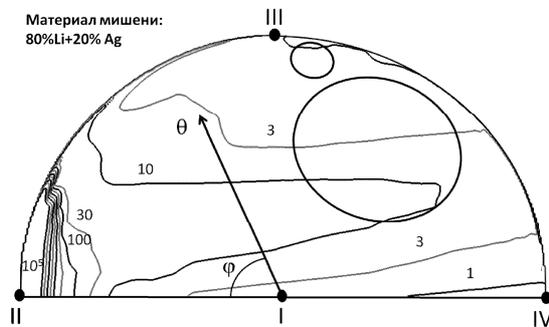
Фиг. 3



Фиг. 4

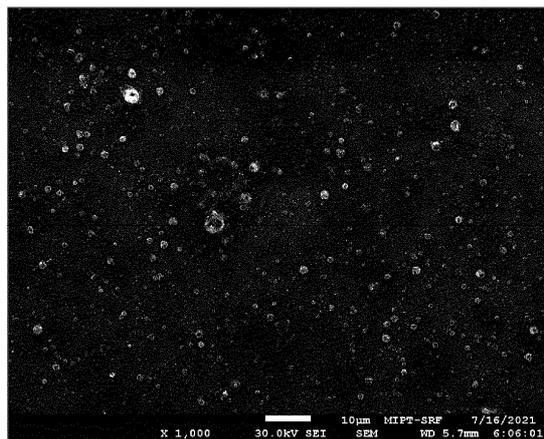


Фиг. 5А



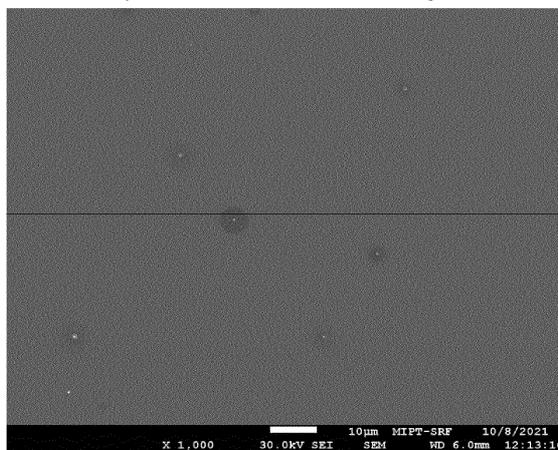
Фиг. 5Б

042061

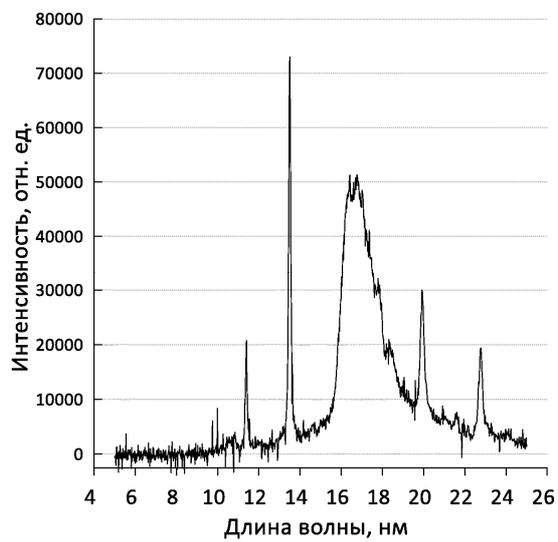


Фиг. 6А

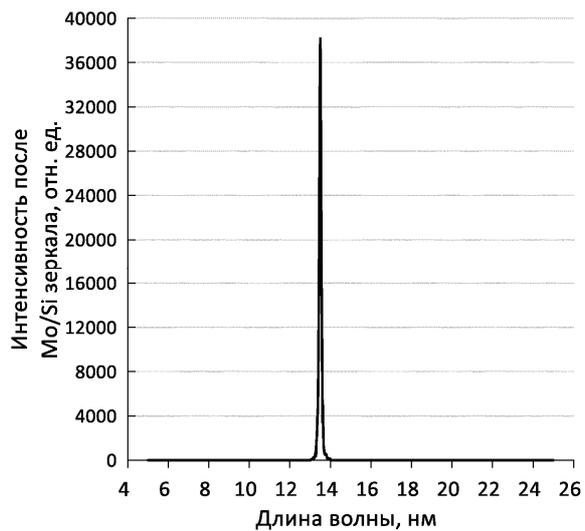
Материал мишени: 80% Li+20% Ag



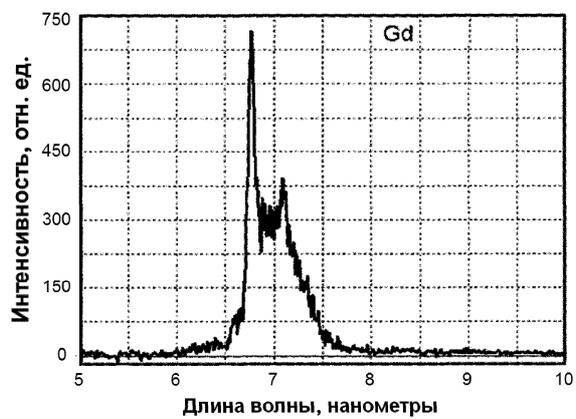
Фиг. 6Б



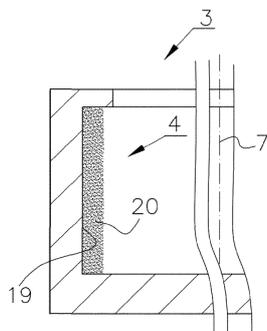
Фиг. 7А



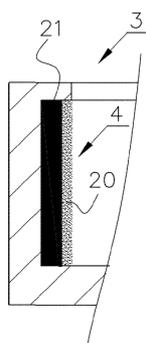
Фиг. 7Б



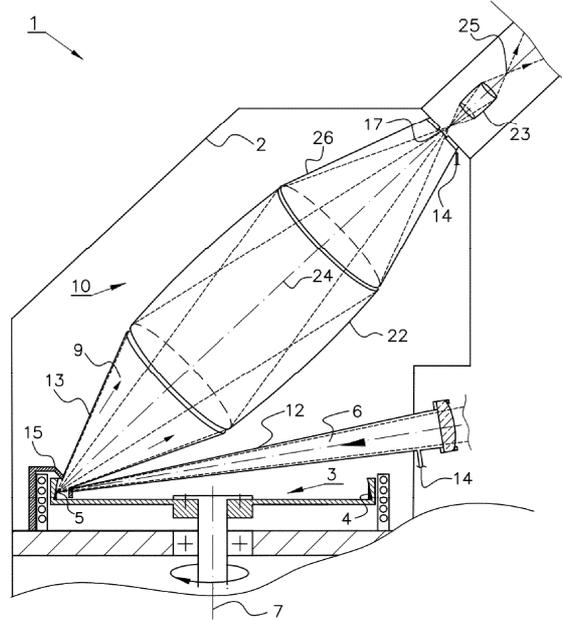
Фиг. 8



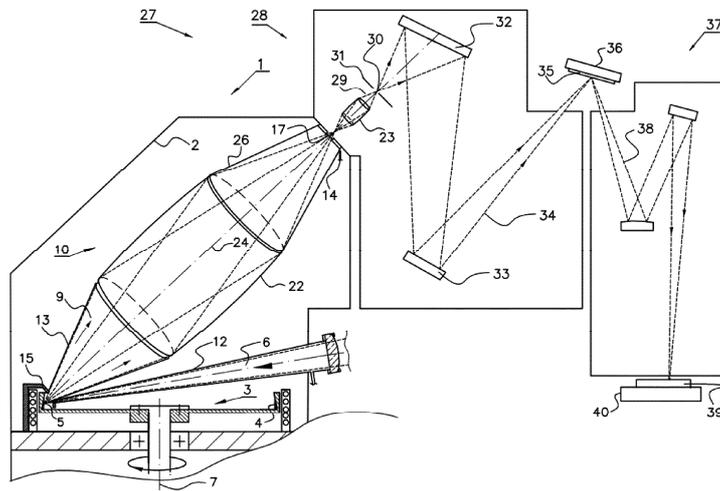
Фиг. 9А



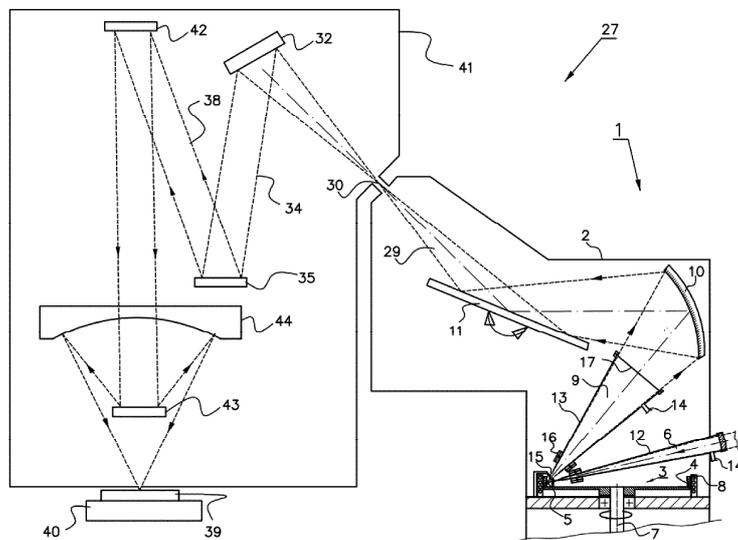
Фиг. 9Б



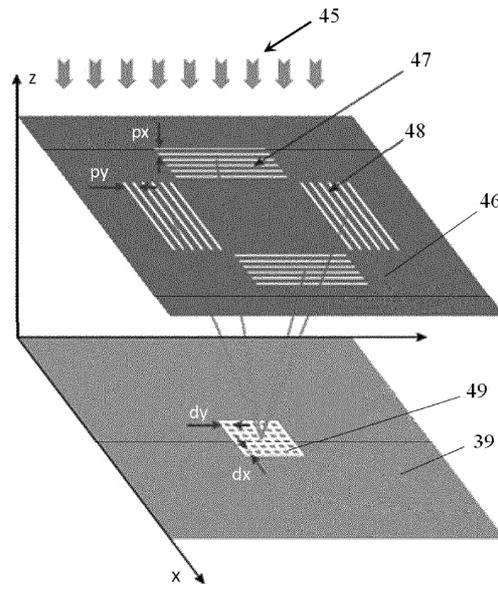
Фиг. 10



Фиг. 11



Фиг. 12



Фиг. 13

