

# Формирование мелкодисперсной жидкометаллической мишени под действием лазерных импульсов фемто- и пикосекундной длительности для лазерного плазменного источника в экстремальном ультрафиолетовом диапазоне

А.Ю.Виноходов, К.Н.Кошелев, В.Н.Кривцун, М.С.Кривокорытов, Ю.В.Сидельников, В.В.Медведев, В.О.Компанец, А.А.Мельников, С.В.Чекалин

*Представлены результаты исследования динамики деформации и фрагментации жидкометаллических капель под действием ультракороткого лазерного импульса. Эксперименты проводились с целью оптимизации формы капельной мишени, применяющейся в источниках излучения экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) диапазона на основе лазерной плазмы при использовании технологии предварительного импульса. В качестве лазера, создающего предимпульс, использовалась система из задающего генератора на Ti:сапфире и регенеративного усилителя, позволяющего регулировать длительность импульса от 50 фс до 50 пс. Средняя по времени импульса и пространству плотность мощности лазерного излучения на капельной мишени достигала  $3 \times 10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup>. Генерация жидкометаллических капель осуществлялась генератором капель на основе сопла с кольцевым пьезокерамическим актюатором. Материалом капель служил эвтектический сплав индий–олово. Генератор капель мог работать в капельном и струйном режимах с максимальной частотой стабильного режима работы 5 и 150 кГц соответственно. Достигнута пространственная стабильность положения капли  $\sigma = 1\%–2\%$  от ее диаметра. Размер капель варьировался в диапазоне 30–70 мкм, их скорость в зависимости от режима работы составляла 2–8 м/с.*

**Ключевые слова:** ЭУФ литография, источник ЭУФ излучения, лазерная плазма, предимпульс, фемтосекундный лазер, генератор капель, лазерная мишень, жидкометаллические капли, импульсно-периодический режим.

## 1. Введение

Бурное развитие исследований плазменных источников излучения экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) диапазона, наблюдавшееся в последнее время, обусловлено их использованием на длине волны 13.5 нм в литографических установках нового поколения для создания микросхем с характерным размером менее 22 нм [1]. Конкуренция плазменных источников ЭУФ излучения с требуемыми для промышленных литографов параметрами, происходящая в течение последних нескольких лет [2], показала технологическое преимущество лазерно-плазменных источников. В качестве лазерной мишени в этих источниках используются капли расплавленного олова, генерируемые с частотой несколько десятков килогерц и летящие со скоростью десятков метров в секунду. Одной из технологий, используемых в лазерных источниках ЭУФ излучения на основе капельной мишени, является метод предварительного лазерного импульса [3], который позволяет деформировать каплю и разбивать ее на мелкие фрагмен-

ты. Размер такой мишени лучше согласуется с размером каустики сфокусированного излучения основного CO<sub>2</sub>-лазера. Кроме того, подобная мелкодисперсная мишень эффективнее поглощает лазерное излучение, что, во-первых, увеличивает эффективность его преобразования в ЭУФ излучение, а во-вторых, позволяет более эффективно «сжигать» мишень основным лазерным импульсом, т.е. значительно уменьшать количество «несгоревших» фрагментов мишени, которые существенно влияют на время жизни элементов оптической системы источника. При использовании импульса излучения Nd:YAG-лазера длительностью 8 нс в качестве предимпульса, сферическая мишень деформируется в двумерную дискообразную мишень [4]; при длительности лазерного импульса 10 пс капля деформируется в трехмерное тонкостенное куполообразное образование, которое, как показали эксперименты [4], позволяет получать ЭУФ излучение со значительно большей эффективностью конверсии (ЭК), достигающей до  $5\%/2\pi$  ср<sup>-1</sup> в требуемом спектральном диапазоне, а также более продуктивно «сжигать» фрагменты мишени.

В связи с этим несомненный научный и практический интерес при исследовании динамики деформации капельной мишени и получении мелкодисперсной мишени представляет проведение сравнительных экспериментов с различными длительностями лазерного импульса в фемтосекундном и пикосекундном диапазонах. Цель настоящей работы состояла в исследовании формирования мелкодисперсной мишени в процессе взаимодействия капельной мишени с лазерным излучением фемто- и пикосекундного диапазонов, в отработке методики диагностики динамики расширения капельной мишени и в исследовании различных методов синхронизации формирования мишени

А.Ю.Виноходов, М.С.Кривокорытов. ООО «ЭУФ Лабс», Россия, 142190 Москва, Троицк, Сиреневый б-р, 1; e-mail: avinokhodov@gmail.com

В.М.Кривцун, К.Н.Кошелев, Ю.В.Сидельников, В.В.Медведев. ООО «ЭУФ Лабс», Россия, 142190 Москва, Троицк, Сиреневый б-р, 1; Институт спектроскопии РАН, Россия, 142190 Москва, Троицк, ул. Физическая, 5; e-mail: krivtsun@isan.troitsk.ru

В.О.Компанец, А.А.Мельников, С.В.Чекалин. Институт спектроскопии РАН, Россия, 142190 Москва, Троицк, ул. Физическая, 5; e-mail: kompanetsvo@isan.troitsk.ru

Поступила в редакцию 29 мая 2015 г., после доработки – 6 октября 2015 г.

и момента ее облучения лазерным излучением с целью их возможного использования в источниках ЭУФ излучения на основе лазерной плазмы. Основным методом диагностики процесса формирования мишени, использованным в работе, было фотографирование теневого изображения капли с малой выдержкой и разными задержками относительно лазерного импульса.

## 2. Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки показана на рис.1. Ее основными элементами являются генератор жидкометаллических капель, вакуумная камера и фемтосекундный лазер. Генератор капель показан штриховой окружностью в центре вакуумной камеры, вектор скорости капель направлен перпендикулярно плоскости рисунка. Установка включает в себя также комплект оборудования, предназначенного, во-первых, для синхронизации капли и момента воздействия на нее лазерного импульса, во-вторых, для диагностики капли и ее фрагментов и, в третьих, для ионной диагностики лазерной плазмы.

### 2.1. Генератор жидкометаллических капель

Генератор жидкометаллических капель включал в себя разогреваемый бак с жидким металлом, оборудованный системами вакуумирования и подачи газа (аргон) при регулируемом давлении, а также узел капиллярного сопла, состоящий из сопла и пористого фильтра. Бак генератора капель был изготовлен из нержавеющей стали марки 12X18H10T, которая слабо взаимодействует с жидким оловом и его эвтектическими сплавами при рабочих температурах менее 200°C. Сопло представляло собой кварцевый капилляр с внутренним диаметром 0,5 мм, сужающийся к одному из концов. На капилляре смонтирован кольцевой пьезоэлемент (актюатор), с помощью которого осуществлялась генерация капель. Электрическая емкость кольцевого актюатора составляла 2–3 нФ. Диаметр выходного отверстия сопла равнялся нескольким десяткам микрометров.

В экспериментах применялось два режима работы сопла – капельный и струйный. В первом из них в баке создавалось давление аргона, достаточное для образова-

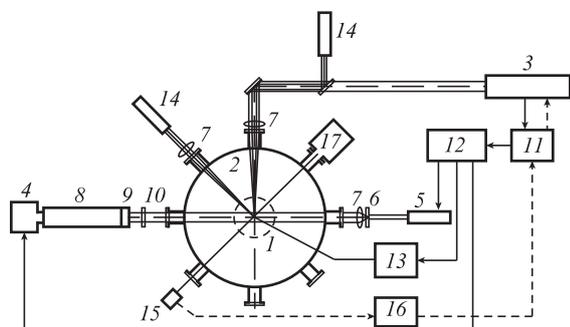


Рис.1. Схема установки:

1 – генератор капель; 2 – вакуумная камера; 3 – фемтосекундный лазер; 4 – CCD-видеокамера; 5 – просвечивающий диодный лазер; 6 – оптический диффузор; 7 – фокусирующие линзы; 8 – микрометр; 9 – объектив; 10 – узкополосный фильтр; 11 – генератор задержек; 12 – делитель частоты; 13 – блок управления генератора капель; 14 – непрерывные лазеры видимого диапазона; 15 – фотодиод с трансимпедансным усилителем; 16 – детектор максимума сигнала; 17 – цилиндр Фарадея.

ния мениска жидкого металла на выходе сопла, но недостаточное для формирования свободной струи. При подаче импульса напряжения на пьезоэлемент поперечное сечение капилляра увеличивается или уменьшается (в зависимости от полярности напряжения), что приводит к изменению давления находящегося в капилляре рабочего вещества – к возникновению волны сжатия или разрежения. Волна давления распространяется по капилляру к соплу. На выходе из сопла она отражается от границы жидкость–вакуум, тем самым передавая импульс рабочему веществу, что приводит к формированию капли. Если же создать в баке с жидким металлом избыточное давление, достаточное для преодоления капиллярного давления, то это приведет к формированию струи, вытекающей из сопла. Для тонких струй жидкости характерна неустойчивость Рэлея, приводящая к распаду струи на капли на некотором расстоянии от сопла, зависящем от скорости струи. В этом случае, подавая напряжение на пьезоэлемент, можно принудительно модулировать распад струи.

Таким образом, основное различие между этими режимами состоит в том, что в капельном режиме без иницирующего импульса капли не формируются, тогда как в струйном режиме давлением газа в баке с рабочим веществом вначале создается свободно распадающаяся струя, которая при модуляции напряжения на пьезоэлементе формирует капли с заданной частотой следования. Из-за повышенного давления газа в баке при струйном режиме скорость капель выше (в нашем случае – примерно 8 м/с), чем при капельном режиме (2–4 м/с). В случае капельного режима для генерации капель обычно использовался биполярный иницирующий импульс, а при струйном – униполярный. Амплитуда сигнала в случае капельного режима составляла несколько десятков вольт, тогда как в струйном режиме – единицы вольт; таким образом, в струйном режиме сопло работает в значительно менее напряженном режиме, обеспечивая тем самым больший ресурс работы пьезокерамического элемента. Для достижения стабильной работы генератора капель и предотвращения засорения сопла между баком и соплом устанавливался пористый фильтр из циркония или нержавеющей стали с размерами пор около 20 мкм. Бак и узел сопла были снабжены отдельной системой нагрева и контроля температуры. В качестве рабочего вещества капель в экспериментах использовался эвтектический сплав индий (52 ат. %) – олово (48 ат. %) с температурой плавления 119°C. Использование этого сплава в наших экспериментах связано с тем, что его физические свойства очень близки к физическим свойствам олова, а температура плавления значительно ниже температуры плавления чистого олова, благодаря чему сплав менее агрессивен и более удобен в работе. Кроме того, как показали наши эксперименты, в ЭУФ источниках на основе лазерной плазмы ЭК при использовании в качестве рабочего вещества эвтектического сплава составляет 70% от ЭК при использовании чистого олова. Таким образом, применение эвтектического сплава в качестве модели рабочего вещества мишени вполне оправданно.

### 2.2. Диагностика капель

Размеры капель, их скорость и пространственная стабильность определялись методом теневой фотографии в расходящемся пучке света, суть которого состоит в том,

что теневое изображение каплей регистрируется матрицей CCD-камеры 4 (рис.1) в свете вспышки импульсного лазера 5, за время которой капля не успевает заметно сдвинуться. В качестве диагностического лазера, подсвечивающего капли, был использован диодный лазер с длиной волны 850 нм и длительностью импульса 30 нс. Однородность поля засветки обеспечивали оптический диффузор 6 с углом рассеяния  $20^\circ$  и положительная линза 7. Микроскоп 8 и объектив 9 с примерно двукратным увеличением проецировали изображение капли на CCD-матрицу видеокамеры Manta MG-145B.

При записи теневых фотографий фоновая засветка перед микроскопом отсекалась с помощью узкополосного фильтра 10 со спектральной полосой пропускания  $\Delta\lambda = 850 \pm 5$  нм. Размер поля зрения камеры был равен  $4.7 \times 3.5$  мм, пространственное разрешение составляло 3 мкм. Оптическое разрешение определялось размером пикселя камеры (6.45 мкм) и увеличением микроскопа и позволяло сделать оценку сверху размеров дисперсности мишени (не более 3 мкм). Максимальная частота записи кадров камеры при полном размере поля зрения равнялась 15 Гц. Стабильная работа генератора капель характеризуется тем, что все капли имеют одну и ту же скорость и траекторию полета. В случае синхронной работы стабильно работающего генератора капель и подсвечивающего лазерного импульса из-за стробоскопического эффекта изображение каплей на экране компьютера будет неподвижным. После записи серии кадров с помощью компьютерной обработки изображения исследовалась пространственная стабильность положения капли в момент времени, определяемый вспышкой диагностического лазера. Измерение проводилось в двух направлениях – продольном (вдоль вектора скорости капли) и поперечном.

### 2.3. Фемтосекундный лазер

Лазерная система состояла из задающего фемтосекундного генератора Tsunami (Spectra Physics) на Ti:сапфире с непрерывным твердотельным лазером накачки Millennia Vs и регенеративного усилителя SpitFire Pro XP с накачкой импульсным твердотельным лазером Empower 30. Система генерировала излучение в диапазоне длин волн  $\lambda = 800 \pm 20$  нм. Лазерные импульсы обладали гауссовым профилем интенсивности в поперечном сечении. При использовании линзы 7 с фокусным расстоянием 200 мм диаметр каустики лазерного излучения составлял  $\sim 50$  мкм. Длительность лазерных импульсов могла меняться в широком диапазоне (от 50 фс до 50 пс по уровню полуширины) при постоянной энергии в импульсе 2.3 мДж и определялась по половине высоты автокорреляционной функции при помощи автокоррелятора Pulse Scout. Рабочая частота следования импульсов равнялась 1 кГц, так что для согласования работы фемтосекундного лазера и CCD-камеры использовался делитель частоты 11, запускающий генератор задержек 12.

### 3. Синхронизация и юстировка генератора капель

Технология лазерного предимпульса в ЭУФ источниках излучения на основе лазерной плазмы предполагает использование стабильной по размеру и по положению в пространстве капельной мишени, среднеквадратичное отклонение центра масс которой не должно превышать

1%–2% от диаметра капли. Учитывая размеры пятна сфокусированного лазерного излучения (50–100 мкм) и капли (30–50 мкм), а также скорость полета капель, для стабильного попадания лазерного пучка в каплю в эксперименте применялась многоступенчатая технология синхронизации и юстировки. Нами использовалось два метода попадания сфокусированного лазерного излучения в каплю. В первом из них (см. рис.1) сигнал с блока управления фемтосекундного лазера через делитель частоты подавался на генератор задержек, который по одному каналу управлял CCD-камерой, по другому – импульсным лазером подсветки, а по третьему – блоком управления генератора капель 13. Меняя задержки между импульсом запуска блока управления генератора капель и вспышкой излучения диагностического лазера (и, следовательно, моментом открытия кадра CCD-камеры), можно получать изображение капли в разные моменты времени после ее вылета из сопла. Для того чтобы сфокусированное лазерное излучение попало на траекторию пролета капли, использовался дополнительный непрерывный лазер видимого диапазона 14, оптическая ось которого совмещалась с оптической осью предимпульсного лазера, после чего эти излучения наводились на траекторию полета каплей. Затем, изменением задержки запуска предимпульсного лазера, с помощью фотодиодов (на рис.1 не показаны) осуществлялась синхронизация импульсных лазеров. На последнем этапе юстировки, используя изображение процесса разлета капли на CCD-камере, с помощью зеркала проводили окончательную корректировку пучка предимпульсного лазера по симметрии относительно лазерного пучка картины разлета фрагментов мишени. Из-за джиттера сигнала, управляющего соплом, дрейфа подпирающего давления или колебаний температуры в баке с жидким металлом и узле сопла, а также из-за механических частиц, находящихся в рабочем веществе, капли могут иметь различные скорости. Поэтому более корректным является второй метод синхронизации, использованный нами в экспериментах, когда генератор задержек запускался от сигнала рассеяния от капли, находящейся чуть выше точки взаимодействия предимпульсного лазерного импульса и капли.

Запуск от капли осуществлялся при помощи еще одного непрерывного лазера видимого диапазона 14, излучение которого фокусировалось линзой 7 на ось пролета каплей. В этом случае частота генерации каплей задавалась блоком управления генератора капель. Капля, проходя через пучок излучения непрерывного лазера, рассеивает его, и оно некоторым углом детектируется фотодиодом 5 (длительность этого импульса  $\Delta T = Lv$ , где  $L$  – размер фокального пятна непрерывного лазера,  $v$  – скорость каплей). Для корректной работы системы синхронизации  $\Delta T$  не должно превышать периода следования каплей. Сигнал от фотодиода через трансимпедансный усилитель подается на детектор максимума сигнала 16 (на рис.1 показано штриховой линией). Это устройство по моменту нулевой производной сигнала вырабатывает импульс, который подается на частотный делитель. Частотный делитель по одному каналу через генератор задержек запускает лазер подсветки и CCD-камеру, по другому – предимпульсный лазер. При этом способе синхронизации генератор каплей работает независимо от других элементов схемы синхронизации, а частоту взаимодействия лазерного импульса с каплей определяет делитель частоты. Предполагается, что в рабочем режиме работы ЭУФ ис-

точника в составе литографической машины делитель частоты использоваться не будет, а запуск лазера будет осуществляться непосредственно от детектора максимума сигнала. Из-за внутренних задержек между элементами схемы синхронизации от момента регистрации отраженного сигнала от капли до момента генерации сигнала на запуск диагностического и предимпульсного лазеров проходит около 20 мкс. Это время фактически определяет стабильность капли в направлении вектора ее скорости. Действительно, если скорости соседних капель различаются всего на 0.1 м/с, то взаимное смещение капель составляет 2 мкм, что для капли диаметром 40 мкм дает уже 5%-ное смещение ее центра масс. Поэтому при нестабильной работе генератора капле даже использование этой методики синхронизации не может дать требуемой пространственной стабильности ( $\sigma = 1\% - 2\%$ ).

## 4. Результаты и их обсуждение

### 4.1. Работа генератора капле

На рис.2 и 3 представлены теневые фотографии капле диаметром  $\sim 60$  мкм в капельном режиме при частоте следования капле  $f = 5$  кГц и в струйном режиме при  $f = 40$  кГц. В капельном режиме давление  $\Delta p$  в баке с жидким металлом равнялось  $\sim 30$  мбар, а скорость капле составляла 3 м/с, в струйном – 3.5 бар и 8 м/с соответственно. Максимальная частота следования капле, при которой еще наблюдалась стабильная работа генератора капле, в капельном режиме равнялась 5 кГц (для капли диаметром 60 мкм), в струйном – 150 кГц (для капли диаметром 30 мкм) и ограничивалась в последнем случае максимальной скоростью капле 8 м/с. Следует отметить, что поиск стабильного режима работы генератора состоял в подборе частоты следования капле, иногда с точностью до нескольких герц. При некоторых частотах следования капле удалось получить пространственную стабильность положения капли  $\sigma \sim 1\%$  по обоим взаимноперпендикулярным направлениям в течение более чем часа работы. В случае  $f = 40$  кГц расстояние между каплями составляло  $\sim 160$  мкм, так что при размере каустики лазерного излучения 50 мкм или даже 100 мкм лазерный пучок не задевал соседние с рабочей капле.

В наших экспериментах использовались сопла с разными диаметрами выходного отверстия капилляра (от 20 до 40 мкм). Обычно размер капли в 1.5 раза превышал размер выходного отверстия сопла, однако при некоторых режимах работы генератора капле соседние капле объединялись и размер капли становился больше ожидаемого. В итоге диаметр капле варьировался от 30 до

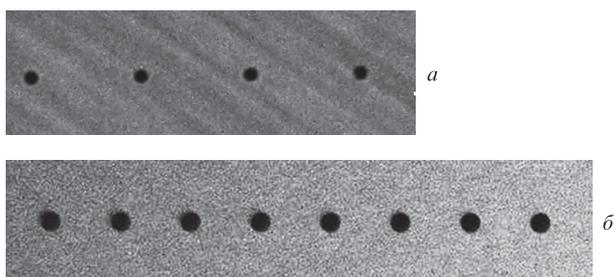


Рис.2. Теневые фотографии капле диаметром 60 мкм в капельном ( $f = 5$  кГц) (а) и струйном ( $f = 40$  кГц) (б) режимах.

70 мкм. В экспериментах по исследованию деформации капле под действием излучения фемтосекундного лазера в основном использовался капельный режим работы генератора капле при рабочей частоте их следования 8 Гц.

### 4.2. Деформация капле под действием лазерного импульса

В эксперименте были получены теневые фотографии расширяющейся капле под действием лазерных импульсов различной длительности  $\Delta t$  фемто- и пикосекундного диапазонов и при различных задержках  $\Delta t$  между этими импульсами и подсвечивающим лазерным импульсом. Для каждой длительности импульса и всех задержек снималась серия фотографий (не менее 160 кадров). Каждый кадр обрабатывался компьютерной программой, с помощью которой находилась статистика положения центра масс капле, ее размер, скорость и скорость разлета ее фрагментов по различным направлениям.

На рис.3 представлены теневые фотографии капле в различные моменты времени после действия лазерного импульса для импульсов различной длительности при диаметре каустики 50 мкм. Помимо указанных на рис.3 длительностей лазерного импульса  $\Delta t$ , были также проведены эксперименты с  $\Delta t = 200$  фс, 800 фс, 1.5 пс и 3 пс. Лазерный импульс на рис.3 распространяется слева направо под небольшим углом к горизонтальной линии. Видно, что с течением времени капле преобразуется в трехмерную тонкостенную оболочку сложной куполообразной формы, которая анизотропно расширяется. В момент времени 1 мкс после действия импульса явно просматривается структура с двумя расширяющимися оболочками и перетяжкой между ними, причем скорость расширения правой оболочки значительно больше, чем левой.

По мере расширения оболочки ее толщина становится меньше, и при достижении некоторой критической толщины оболочка начинает разрываться. Видно, что при  $\Delta t$  от 50 фс до 5.3 пс картина разлета качественно не меняется, тогда как при  $\Delta t = 50$  пс скорость разлета фрагментов резко уменьшается. Светлое пятно на фотографиях соответствует светящейся плазме. Полагая, что центр этого пятна есть начальное положение оболочек, можно вычис-

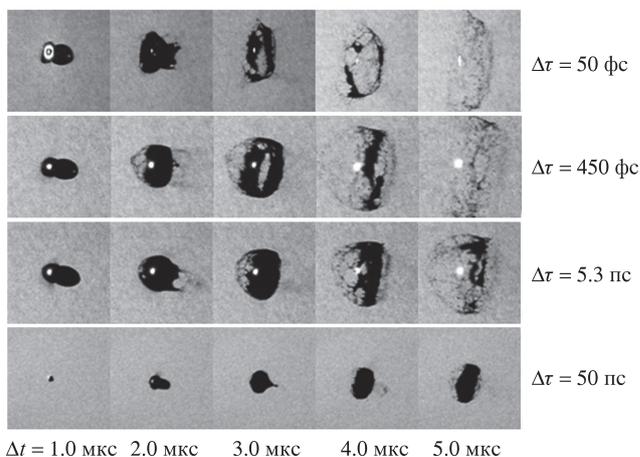


Рис.3. Теневые изображения деформации капле диаметром 60 мкм (размер кадра  $1000 \times 1000$  мкм) при различных задержках  $\Delta t$  относительно лазерного импульса с различной длительностью  $\Delta t$  (по половине интенсивности); лазерный пучок распространяется слева направо под небольшим углом к горизонтальной линии.

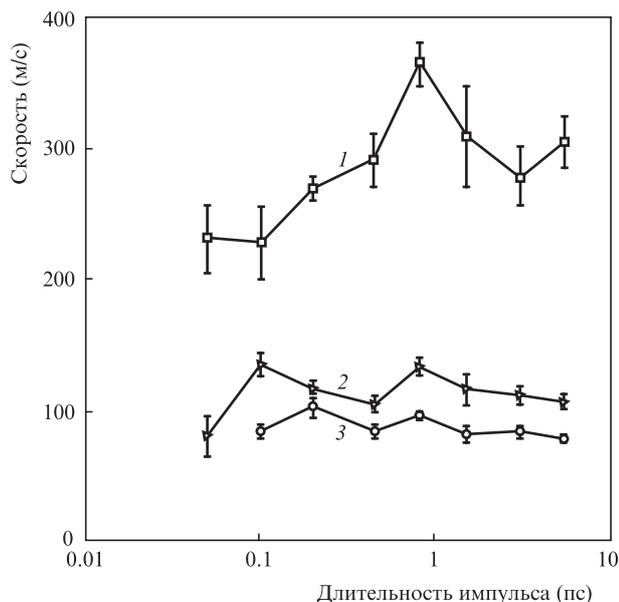


Рис.4. Зависимости скорости расширения оболочки мишени от длительности импульса предимпульсного лазера по направлению лазерного пучка (1), в перпендикулярном ему направлении (2), против направления лазерного пучка (3).

лить их среднюю скорость к моменту времени 1 мкс. На рис.4 приведены зависимости скоростей расширения оболочек (по направлению лазерного пучка, против него и в поперечном к нему направлении) от длительности лазерного импульса, построенные в результате обработки полученных кадров для капли диаметром 60 мкм при диаметре каустики 50 мкм. Каждая точка на кривых – результат усреднения по 100 кадрам. Как видно из рис.4, средняя скорость расширения оболочки вдоль лазерного пучка составляет  $\sim 300$  м/с, в противоположном направлении – примерно 80 м/с, в поперечном направлении – около 120 м/с. Зависимость скорости расширения оболочки от длительности лазерного импульса по направлению лазерного пучка имеет ярко выраженный максимум при длительности лазерного импульса 800 фс.

Этот экспериментальный факт может быть связан с особенностями механизмов поглощения лазерного излучения. Имеются два конкурирующих механизма. С одной стороны, согласно [5], для алюминиевой мишени доля поглощенной мишенью лазерной энергии в интервале плотности мощности лазерного излучения  $10^{13}$ – $10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup> снижается вместе со снижением плотности мощности. С другой стороны, при увеличении длительности импульса из-за уменьшения градиента электронной плотности на границе (за счет разлета вещества) доля поглощенной мишенью лазерной энергии должна расти, так что в сумме при некоторой длительности импульса возможен максимум поглощенной лазерной энергии. Вследствие этого зависимость кинетической энергии разлетающихся частиц от длительности лазерного импульса также может иметь максимум.

Оптимальный размер мишени для лазерно-плазменных ЭУФ источников, определяемый размером каустики основного лазерного импульса, в качестве которого в настоящее время в литографических машинах используется CO<sub>2</sub>-лазер, составляет несколько сотен мкм. Этот размер в наших экспериментах достигается, как видно из рис.3, через 1.5–3 мкс после воздействия предимпульсного лазера.

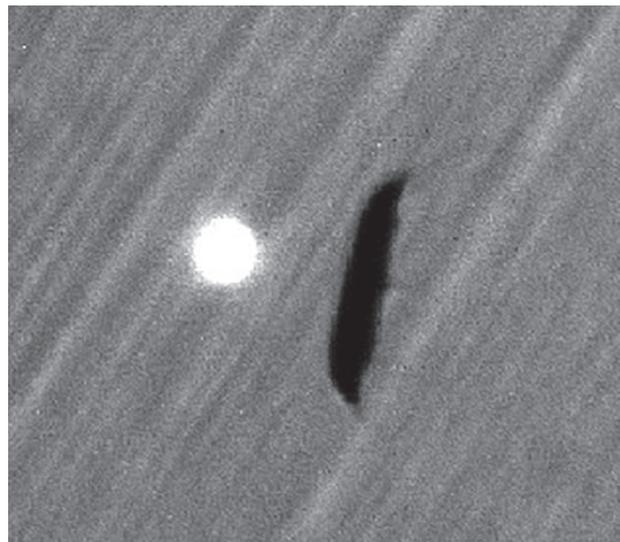


Рис.5. Теневое изображение деформированной капли диаметром 60 мкм (размер кадра 600 × 550 мкм);  $\lambda = 532$  нм, энергия в импульсе 20 мДж,  $\Delta t = 25$  нс.

Для сравнения с приведенными выше результатами нами также был проведен эксперимент с наносекундным излучением 2-й гармоники Nd:YAG-лазера. Параметры лазерного импульса были следующими: длина волны 532 нм, энергия в импульсе 15 мДж, длительность импульса 25 нс. На рис.5 показан разлет фрагментов капельной жидкометаллической мишени диаметром 60 мкм из того же эвтектического сплава In–Sn через 1.5 мкс после воздействия лазерного импульса. Лазерный пучок падает на каплю слева под небольшим углом к горизонтальной линии. Как видно из рис.5, в этом случае, так же как и в [4], характер разлета мишени качественно иной, чем в случае предимпульсов фемто- и пикосекундной длительности. В частности, при использовании импульса наносекундной длительности форма расширяющейся оболочки скорее двумерная и напоминает плоский диск с загнутыми по направлению распространения лазерного пучка краями.

Более детальное обсуждение полученных результатов, включая их сравнение с результатами гидродинамического расчета процесса расширения капли под действием лазерного импульса пикосекундной длительности, а также результаты измерения ионного потока от лазерной плазмы, мы предполагаем представить в последующих статьях.

## 5. Заключение

Проведено экспериментальное исследование процесса образования мелкодисперсной мишени, формирующейся с помощью лазерного импульса фемто- и пикосекундной длительности в рамках технологии предимпульса для источников ЭУФ излучения на основе лазерной плазмы, используемых в литографических установках последнего поколения. Мелкодисперсная мишень образовывалась в результате расширения капельной мишени из эвтектического сплава In–Sn под действием лазерного импульса. Капля разбивалась излучением титан-сапфирового лазера, длительность которого изменялась от 50 фс до 50 пс при постоянной энергии 2.3 мДж. Максимальная средняя по времени импульса и пространству

плотность мощности лазерного излучения на мишени достигала  $3 \times 10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup>.

Обнаружено, что в широком диапазоне длительностей лазерных импульсов (от 50 фс до 5.3 пс), динамика деформации капли не меняется. В результате взаимодействия лазерного импульса и капли образуется мелкодисперсная трехмерная мишень, использование которой, судя по данным [4], будет способствовать получению высоких значений ЭК в ЭУФ источниках на основе лазерной плазмы.

Создан генератор капель на основе сопла с кольцевым пьезокерамическим актюатором, который может работать как в капельном, так и в струйном режимах, различающихся максимальной частотой следования капель и их скоростью. Максимальная частота следования капель в стабильном режиме работы генератора составляла несколько десятков килогерц. Размер капель мог варьироваться от 30 до 70 мкм, скорость – от 2 до 8 м/с. Нами были разработаны две технологии синхронизации лазер-

ного излучения с быстролетающими капельными мишенями. Получена пространственная стабильность капли (1%–2% от ее диаметра) как в направлении вектора скорости капли, так и в перпендикулярном направлении при частотах следования капель до 60 кГц.

Работа проведена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по Соглашению № 14.579.21.0004 (уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57914X0004).

1. *EUV Source for Lithography*. Ed. by V. Bakshi (Bellingham, Wash.: SPIE Press, 2006).
2. Banine V.Y., Koshelev K.N., Swinkels G.H.P.M. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **44**, 253001 (2011).
3. Hartlove J., Michaelian M., Shields H., Talmadge S., Fornaca S., Martos A. Patent US6973164, 30.12.2004.
4. Fujimoto J., Hori T., Yanagida T., Mizoguchi H. *Physics Research International*, **2012**, Article ID 249495 (2012).
5. Eliezer S. *The Interaction of High-Power Lasers with Plasmas*, (Bristol, Philadelphia: IOP Publ. Ltd, 2002).