

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Московский физико-технический  
институт (национальный исследовательский университет)»  
Физтех-школа физики и исследований им. Ландау  
Кафедра нанооптики и спектроскопии

На правах рукописи

Лакатош Богдан

**Исследование механического воздействия на  
металлическую мишень, возникающего при лазерной  
абляции**

Специальность 01.04.05 - Оптика

**АВТОРЕФЕРАТ**

Диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва 2020

Работа прошла апробацию на кафедре нанооптики и спектроскопии  
Федерального государственного автономного образовательного учреждения  
высшего образования «Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»

**Научный руководитель:** кандидат физико-математических наук  
**Медведев Вячеслав Валериевич**

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук.

Защита состоится 24.12.2020 в 10:00 на заседании диссертационного совета ЛФИ.01.04.05.004 по адресу 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского физико-технического института (национального исследовательского университета) <https://mipt.ru/education/post-graduate/soiskateli-fiziko-matematicheskie-nauki.php>

Работа представлена «15» октября 2020 г. в Аттестационную комиссию федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» для рассмотрения советом по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, доктора наук в соответствии с п.3.1 ст. 4 Федерального закона «О науке и государственной научно-технической политике».

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## Актуальность и степень разработанности темы исследования

Интенсивное технологическое развитие полупроводниковой индустрии на протяжении нескольких десятилетий во многом определялось непрерывной возможностью увеличения количества транзисторов, размещаемых на кристаллических подложках интегральных микросхем. В 1965 году Гордон Мур установил эмпирическую закономерность, согласно которой количество транзисторов на кристалле микросхемы удваивается каждые 24 месяца [1]. В свою очередь, увеличение количества элементов микросхемы на единице площади кристалла опирается на возможность уменьшения характерных размеров этих элементов. Здесь ключевую роль играет технология фотолитографии. Принцип фотолитографии заключается в построении и уменьшении изображения заранее подготовленного шаблона электрической схемы (маски) на светочувствительном фоторезисте. В результате такого экспонирования на фоторезисте «выжигается» уменьшенная схема. Изображение шаблона схемы уменьшается оптической системой, что ведёт к дифракционному ограничению минимальных характерных размеров микросхем ( $L_{min}$ ), который может быть напечатан таким образом. Согласно критерию Рэлея этот предел оценивается как  $L_{min} = k \frac{\lambda}{NA}$ , где  $k$  - коэффициент порядка 1,  $\lambda$  - длина волны излучения используемого для трансляции изображения,  $NA$  - числовая апертура оптической системы. Уменьшение  $L_{min}$  осуществляется за счёт повышения  $NA$  (иммерсионная литография), эффективного уменьшения  $k$  (метод многократной экспозиции) или уменьшения длины волны. На протяжении нескольких десятилетий уменьшение  $L_{min}$  обеспечивалось уменьшением длины волны источников излучения, используемых в технологии литографии. На сегодняшний момент индустриально освоенной является технология фотолитографии использующая излучение на длине волны 193 нм. Литографы работающие на излучении с такой длиной волны способны печатать схемы с минимальным характерным размером в 22 нм [2]. Следующим шагом является переход к использованию излучения на длине волны 13.5 нм, находящейся в диапазоне экстремального ультрафиолета (ЭУФ). Для сравнения, минимальный характерный размер который сможет напечатать ЭУФ литограф оценивается в 7 нм [3]. Более того ЭУФ литография позволяет существен-

но упростить технологический процесс создания микросхем с характерным размером в 22 нм достигаемым уже сегодня. Упрощение технологического процесса приводит к уменьшению числа дефектов на создаваемых микросхемах, что также является важным промышленным параметром.

Результаты данной работы находят своё непосредственное применение в проблеме оптимизации параметров источника излучения используемого в ЭУФ литографах. Современные ЭУФ литографы работают на длине волны 13.5 нм (ширина полосы  $\pm 1\%$ ). В качестве источника такого излучения используется лазерно-индуцированная плазма полученная фокусировкой мощного лазерного импульса на оловянную каплю диаметром в десяток микрометров. Излучение лазерно-индуцированной плазмы фокусируется эллиптическим коллектором в «промежуточном фокусе», где фильтруется и перенаправляется на маску. Для создания излучающей плазмы в ЭУФ литографах используется импульсный CO<sub>2</sub> лазер, работающий на длине волны 10.6 мкм.

Ввиду промышленного применения основными характеристиками источника ЭУФ литографа являются мощность и время бесперебойной работы. Оба эти параметра сильно зависят от коэффициента отражения коллектора. Так как интересующая нас длина волны находится в диапазоне вакуумного ультрафиолета, а такое излучение поглощается в атмосфере на малых расстояниях, вся конструкция источника помещается в вакуумную камеру. Это приводит к возможности непосредственного контакта продуктов лазерно-индуцированной плазмы с поверхностью коллектора и загрязнению последней. Загрязнение коллектора негативно сказывается на его отражающих способностях и приводит к уменьшению мощности ЭУФ излучения в промежуточном фокусе. В итоге для поддержки промышленно необходимых мощностей приходится останавливать работу источника и заменять (или чистить) коллектор, что сложно и дорого.

С целью защитить коллектор от такого загрязнения применяются различные методики: для защиты коллектора от экспонирования заряженными частицами используются магнитные поля [4]; небольшие нейтральные кластеры олова останавливаются потоком водорода (при давлениях порядка 100 Па) от коллектора [3]. Однако эти методы не позволяют защитить коллектор от микрокапель. Поэтому стоит задача полностью избавиться от создания такого вида продуктов взаимодействия лазерного импульса с оловянной кап-

лей. Это осуществляется за счёт полного испарения (и/или преобразования в плазму) мишени. Непосредственное испарение капли олова диаметром в десяток микрон в одном лазерном импульсе при сохранении оптимальных для генерации ЭУФ излучения параметров лазерного импульса не представляется возможным. Поэтому на каплю предварительно воздействуют лазерным предимпульсом, который модифицирует ее форму делая возможным испарение мишени в последующем главном лазерном импульсе.

Как было обозначено выше, основными характеристиками источника ЭУФ литографа являются мощность и время бесперебойной работы. Так как характеристики мишени (материал и начальная форма) определены и не могут быть кардинально изменены оптимизация источника ЭУФ излучения осуществляется варьированием параметров главного лазерного импульса и предимпульса. При этом, очевидно, главными параметрами определяющими оптимальные условия взаимодействия лазерного излучения с мишенью являются коэффициент конверсии лазерной энергии в ЭУФ излучение (который определяет мощность источника) и импульс лазерно-индуцированной плазмы (который определяет методы, параметры и «успешность» защиты коллектора от загрязнения).

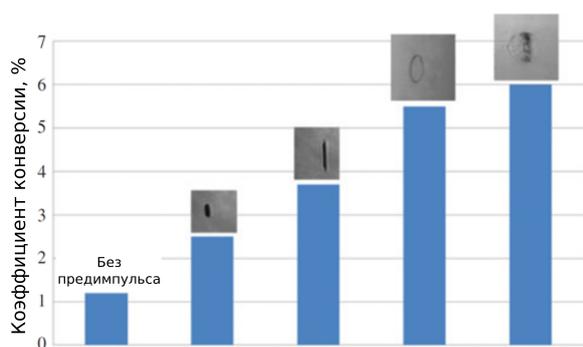


Рис. 1: Максимальный коэффициент конверсий ЭУФ излучения в зависимости от морфологии модифицированной предимпульсом капли.

Коэффициент конверсии лазерного излучения в ЭУФ излучение сильно зависит от параметров лазерного предимпульса. Это хорошо видно из рисунка 1 который был представлен в обзоре Фоменкова и др [3]. На рисунке показано, что коэффициент конверсии работы источника наибольший в случае распылённой мишени. Данная морфология мишени получается в случае воздействия на каплю предимпульсом пикосекундной длительности, как было показано в работах [5, 6, 7]. В этих работах была продемонстрирована возможность распыления капли пикосекундным лазерным импульсом,

однако физическая картина происходящих при этом процессов остаётся неизученной.

Импульс лазерно-индуцированной плазмы экспериментально исследовался ещё с 60-х годов. Однако имеющиеся в литературе результаты данных исследований не всегда находятся в хорошем соответствии друг с другом. В первую очередь это связано с тем, что образование плазмы на поверхности мишени под действием лазерного импульса зависит от многих параметров: материал мишени, форма мишени, параметры лазерного импульса (временной и пространственный профиль, энергия), длина волны лазерного излучения, давления в окружающей среде и т.д. Расхождение результатов хорошо видно при сравнении измеренных зависимостей импульса лазерно-индуцированной плазмы от интенсивности лазерного излучения. Такая зависимость представляется в виде степенного закона  $p \sim I_L^\alpha$ , где  $\alpha$  подбирается так, чтоб хорошо описать экспериментальные результаты. Данные представленные в литературе демонстрируют различную степень  $\alpha$  которая варьируется в интервале от 0.5 до 1.

Аналогичное расхождение результатов наблюдается и при теоретическом рассмотрении задачи [8]. Аналитическое рассмотрение лазерной абляции мишени возможно только в двух крайних случаях: 1) мгновенного нагрева мишени, который прекращается до момента возникновения гидродинамических потоков из поверхности мишени. 2) квазистационарной абляции, возникающей когда лазерно-индуцированная плазмы большую часть длительности лазерного импульса имеет определённый постоянный профиль плотности и температуры; Также стоит отметить, что аналитическое рассмотрение процесса лазерной абляции исключает использование некоторых реальных уравнений состояния вещества, что способно исказить результаты модели относительно импульса образованной плазмы. В общем случае лазерная абляция изучается численными методами. Однако любые численные методы должны быть валидированы на экспериментальных результатах, в которых, как говорилось выше, нет согласия. Данная ситуация приводит к необходимости проведения хорошо определённого эксперимента по измерению импульса лазерно-индуцированной плазмы в условиях соответствующих работе ЭУФ источника.

## Цели и задачи исследования

У данной диссертации были две цели:

- 1) измерить зависимость количества движения лазерно-индуцированной плазмы от интенсивности лазерного импульса при облучении оловянной мишени импульсом  $\text{CO}_2$  лазера, в диапазоне интенсивностей  $10^8 - 10^{10} \text{ Вт/см}^2$ .
- 2) исследовать зависимость деформации и фрагментации жидкометаллической капли под воздействием ультракороткого лазерного импульса от параметров системы.

Для достижения поставленных целей были решены следующие задачи:

- 1) Разработана конструкция маятника для измерения импульса отдачи лазерно индуцированной плазмы методом баллистического маятника;
- 2) Проведён эксперимент по измерению импульса отдачи лазерно-индуцированной плазмы методом баллистического маятника;
- 3) Проведена серия экспериментов исследующая зависимость эволюции формы капли от параметров воздействующего на неё лазерного импульса и её размеров.

## Научная новизна

Ниже приведены научные результаты, отражающие новизну исследований:

1. Впервые измерена зависимость количества движения лазерно-индуцированной плазмы от интенсивности лазерного импульса в диапазоне  $10^8 - 10^{10} \text{ Вт/см}^2$  в случае облучения плоской оловянной мишени импульсным  $\text{CO}_2$  лазером.
2. Впервые исследована динамика деформации и фрагментации жидкометаллической капли под воздействием субпикосекундного лазерного импульса в зависимости от параметров лазерного излучения и размеров капли. Исследуемый диапазон интенсивности составил  $10^{12} - 10^{14} \text{ Вт/см}^2$
3. Впервые продемонстрирована связь развивающихся гидродинамических неустойчивостей в облучённой фемтосекундным лазерным импульсом жидкометаллической капле с параметрами лазерного излучения.

## Научная и практическая значимость

С одной стороны экспериментальные результаты данной работы могут быть использованы в качестве критериев верификации результатов компьютерного моделирования. Так количество движения лазерно-индуцированной плазмы является одним из ключевых интегральных параметров характеризующих ее расширение и экспериментальное измерение данного параметра может быть использовано для валидации численных моделей радиационной гидродинамики используемых для моделирования лазерной абляции. Результаты исследований деформации и фрагментации жидкометаллической капли под воздействием ультракороткого лазерного импульса представляют аналогичный интерес для компьютерных расчётов гидродинамических потоков с изменением термодинамической фазы вещества.

С другой стороны, так как все эксперименты описанные в данной работе проводились в условиях близких к условиям работы промышленного источника ЭУФ излучения для литографии, их результаты могут быть использованы для оптимизации работы такого источника. Так результаты экспериментов измерения импульса лазерно-индуцированной плазмы представляют большой интерес для оптимизации методов защиты коллектора от загрязнения продуктами взаимодействия лазерного импульса с мишенью. Результаты исследования деформации и фрагментации жидкометаллической капли могут быть использованы для оптимизации параметров капли-мишени при помощи лазерных предимпульсов.

## Методы исследования

Измерение импульса лазерно-индуцированной плазмы проводилось методом баллистического маятника [9]. В данных экспериментах использовался импульсный  $\text{CO}_2$  лазер интенсивность излучения которого в плоскости мишени варьировалась в диапазоне  $10^8 - 10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup>. В этом интервале интенсивностей лазерного излучения импульс лазерно-индуцированной плазмы совпадает с импульсом переданным мишени во время ее абляции. Таким образом, закрепив мишень на маятнике и измеряя его отклонение после воздействия лазерного импульса на мишень можно рассчитать количество движения переданное мишени, а значит и импульс лазерно-индуцированной плазмы. В экс-

периментах использовался оригинально разработанный маятник, масса которого была меньше 1 г. Также были предприняты специальные меры для увеличения жёсткости конструкции маятника. Измерение угла отклонения маятника осуществлялось с помощью луча трассирующего лазера, отражённого от закреплённого на маятнике зеркала.

Исследование деформации и фрагментации жидкометаллической капли под воздействием ультракороткого лазерного импульса проводилось с использованием титан-сапфирового лазера. Основными результатами данного исследования являются зависимости эволюции морфологии капли и скорости ее расширения от параметров системы «лазер-капля». Данные результаты были получены как серии стробоскопических снимков динамики деформации капли сделанных с различной задержкой относительно лазерного импульса. Данный метод оправдан, так как отклик жидкометаллической капли на воздействие лазерным импульсом повторялся от выстрела к выстрелу. Съёмка деформации капли проводилась в двух не параллельных плоскостях. Ввиду малых размеров исследуемого объекта (диаметр капли составлял около 50 мкм) перед объективами камер помещались микроскопы. Длительность одного снимка контролировалась длительностью импульсной подсветки капли и составляла 30 нс, тем самым обеспечивая мгновенное изображение деформирующейся капли.

### **Положения выносимые на защиту**

1. Полученная близкая к пропорциональной зависимость количества движения лазерно-индуцированной оловянной плазмы от интенсивности импульса  $\text{CO}_2$  лазера (диапазон  $10^8 - 10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup>), обусловлена вкладом абляции поверхности мишени излучением самой плазмы.
2. Впервые получены экспериментальные результаты деформации и фрагментации жидкометаллической капли (диаметр  $\sim 10 - 80$  мкм) при ее облучении фемтосекундным лазерным импульсом с интенсивностью в диапазоне  $10^{12} - 10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup>.
3. Установлен закон подобия динамики расширения жидкометаллической капли после ее облучения фемтосекундным лазерным импульсом.

4. Предложен механизм образования кавитационных полостей внутри жидкометаллической капли в результате распространения в ней лазерно-индуцированных ударных волн. Продемонстрирована возможность возбуждения одной или двух пространственно разделённых кавитационных полостей в зависимости от параметров лазерного излучения.
5. Продемонстрировано влияние ориентации поляризации лазерного излучения на динамику деформации и фрагментацию облучаемой жидкометаллической капли в случае образования только одной кавитационной полости внутри капли.

### **Апробация результатов**

Основные результаты полученные в этой работе были опубликованы в рецензируемых научных журналах (список публикаций в конце автореферата). Также результаты докладывались на следующих конференциях: 1) 34-th European Conference on Laser Interaction with Matter (ECLIM 2016); 2) Международная конференция "Ломоносов" (Москва, МГУ, 2016); 3) Конкурс молодёжных научных работ в ИСАНе 2017; 4) 5-th Cavitation workshop (Greece, Chania, 2017); 5) XXIV Научная конференция МФТИ (Долгопрудный, 2017); 6) 2018 Source Workshop (Прага, 2018); 7) XVI Всероссийский Молодёжный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике (Россия, Самара, 2018); 8) International High Power Laser Ablation Symposium (США, Санта-Фе, 2018); 9) Конкурс молодёжных научных работ в ИСАНе 2019;

### **Личный вклад автора**

Все результаты, представленные в диссертационной работе были получены автором, либо при его непосредственном участии. Автор принимал участие в обработке, анализе и обсуждении результатов, изложенных в настоящей работе, а также в подготовке публикаций.

### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, двух глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 140 страниц, включая 57

рисунков и 4 таблицы. Список литературы содержит 87 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** описан принцип работы современного источника ЭУФ излучения используемого в ЭУФ литографах. На сегодняшний день актуальной проблемой в разработке таких источников является их внедрение в промышленный процесс. Это приводит к возникновению дополнительных требований к параметрам источников ЭУФ излучения. В контексте промышленного применения таких источников излучения их основными параметрами являются мощность излучения в диапазоне длин волн  $13.5 \pm 1\%$  нм и время бесперебойной работы источника. Во введении рассмотрены основные подходы для оптимизации данных параметров и определено место исследований проведённых в данной работе среди них. Также во введении сформулированы цели и задачи диссертационной работы, описана научная новизна полученных результатов, изложены научная и практическая значимость работы, а также положения, выносимые на защиту.

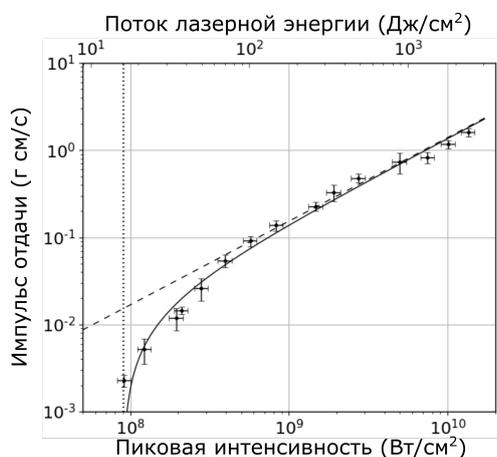


Рис. 2: Зависимость измеренного импульса отдачи лазерно-индуцированной плазмы от пиковой интенсивности лазерного импульса.

**Глава 1** диссертации посвящена измерению импульса лазерно-индуцированной плазмы. В первую очередь, в этой части рассматриваются известные экспериментальные методы измерения этой величины. Далее приводится описание существующих в литературе экспериментальных и теоретических знаний касательно этого вопроса. Приведённые данные демонстрируют многопараметричность задачи и расхождение результатов, как экспериментов так и теоретических моделей. Основываясь на этом делается вывод о невозможности точно определить импульс лазерно-индуцированной плазмы в источнике ЭУФ излучения базируясь на существующих знаниях, а значит необходимо провести эксперимент в соответствующих услови-

ях. Ввиду того, что в интересующем диапазоне интенсивности лазерного излучения величина светового давления пренебрежимо мала, импульс лазерно-индуцированной плазмы совпадает с импульсом переданным мишени во время лазерной абляции. Далее приводится описание экспериментальной установки, метода измерения и расчёта переданного мишени количества движения. Измеренные значения импульса отдачи лазерно-индуцированной плазмы хорошо аппроксимируются степенным законом  $p \sim (I_L - I_{thr})^\alpha$ , где  $\alpha = const$ ,  $p$  - импульс отдачи плазмы,  $I_L$  - интенсивность лазерного излучения,  $I_{thr}$  - порог абляции по интенсивности.

При аппроксимации, значения параметров  $\alpha$  и  $I_{thr}$  подбирались для лучшего соответствия экспериментальным результатам. Полученные таким образом значения этих параметров составили  $\alpha \approx 0.96$  и  $I_{thr} \approx 9 \cdot 10^7$  Вт/см<sup>2</sup> (рис. 2). Такие результаты находятся в хорошем соответствии с некоторыми аналогичными экспериментальными работами в которых мишень также облучалась импульсами СО<sub>2</sub> лазера, но в качестве материала мишени использовался алюминий. С другой стороны полученное значение  $\alpha$  сильно превосходит значения предсказываемые существующими аналитическими моделями. Однако результаты расчётов с помощью кода радиационной гидродинамики RZLINE [10] находятся в хорошем соответствии с экспериментальными. При анализе численных результатов расчётов RZLINE видно, что с повышением интенсивности лазерного излучения сильно увеличивается площадь испарения вещества с поверхности мишени. Это происходит за счёт дополнительного латерального транспорта энергии в плазме: радиационного транспорта, теплопроводности и потока горячих ионов на поверхность мишени. Очевидно, что такое изменение в испарении мишени приведёт к увеличению импульса плазмы при фиксированной энергии лазерного импульса, относительно значения предсказываемого аналитическими моделями, которые рассматриваемые процессы не включают. Стоит отметить, что наибольший вклад в такое испарение имеет испарение происходящее за счёт поглощения излучения индуцированной плазмы.

**Глава 2** диссертации посвящена исследованию динамики деформации и фрагментации оловянной капли (диаметр 50 мкм) под воздействием ультракороткого (характерная длительность  $\sim 100$  фс) импульса титан-сапфирового лазера. Так как данное исследование имеет прямое отношение к оптимиза-

ции параметров лазерного предимпульса в источнике ЭУФ излучения в этой части, в первую очередь, рассматриваются особенности применения предимпульса в источнике: мотивация использования двух-импульсной схемы источника, известные результаты достигнутые с использованием предимпульса и т. д. Также представлен обзор известных результатов по исследованию деформации и фрагментации жидкометаллических капель под воздействием лазерных импульсов с различными параметрами системы лазер-капля. Имеющиеся в литературе работы в основном посвящены исследованию деформации и фрагментации капли под воздействием лазерного импульса с характерной длительностью  $\tau_L \gtrsim 10$  нс. Однако такой режим взаимодействия сильно отличается от взаимодействия жидкометаллической капли с лазерными импульсами фемтосекундной длительности. При воздействии на каплю лазерными импульсами фемтосекундной длительности в капле возникают ударные волны, распространение которых (как показывают наши эксперименты) в некоторых случаях может приводить к разрывам вещества внутри капли. Очевидно, что в таком случае деформацию и фрагментацию капли некорректно описывать в традиционном для наносекундных лазерных импульсов приближении несжимаемой жидкости. Таким образом, представленные в данной диссертации результаты содержат в себе принципиально новые механизмы не рассмотренные в данной сфере ранее.

В работе описаны три серии экспериментов в каждой из которых варьировался один выбранный параметр системы при фиксированных остальных. Были исследованы следующие зависимости:

- 1) фрагментации жидкометаллической капли от энергии лазерного импульса;
- 2) фрагментации жидкометаллической капли от размеров лазерного пятна в плоскости облучаемой капли;
- 3) фрагментации жидкометаллической капли от диаметра самой капли.

Все эксперименты проводились на одной экспериментальной установке, описание которой следует сразу после обзора литературы. Далее отдельно рассматриваются результаты всех трёх серий экспериментов.

Наблюдаемая динамика деформации и фрагментации капли при различных энергиях лазерного импульса и фиксированных прочих параметрах представлена на рисунке 3

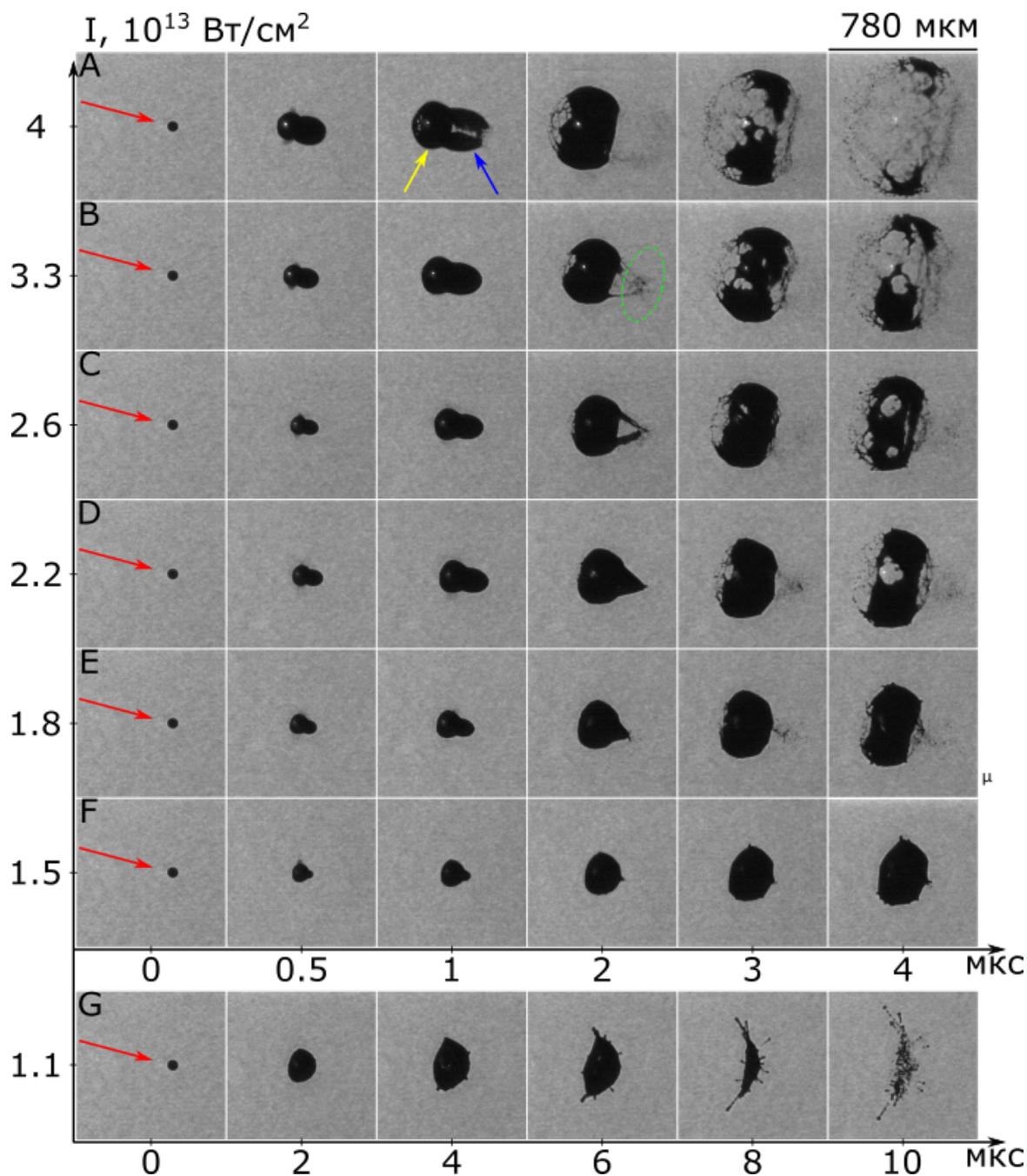


Рис. 3: Изменение сценария эволюции формы капли (начальный диаметр 50 мкм) с изменением интенсивности лазерного излучения вид сбоку. По горизонтальным осям отмечена задержка кадра относительно лазерного импульса. Красная стрелка обозначает направление падения лазерного луча, жёлтая показывает на переднюю оболочку, а синяя - на заднюю. Зелёный эллипс выделяет облако меньших капель образующихся после разрыва задней оболочки.

Как видно по данному изображению после воздействия лазерным импульсом на каплю она начинает сильно расширяться - объем капли увеличивается

в несколько десятков раз. Ввиду закона сохранения массы, очевидно, что в этом случае внутри капли образуется область с малой плотностью вещества - полость. По форме расширяющейся капли в ней можно выделить две полости ограниченные передней и задней оболочками (рис. 3). В случае большой интенсивности лазерного импульса оболочки со временем расширяются и разрываются. Видно, что при уменьшении интенсивности лазерного излучения расширение оболочек замедляется и становится ограниченным. Также, в случае когда интенсивность лазерного импульса меньше определённой величины (в нашем случае  $1.5 \cdot 10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup>) задняя оболочка не наблюдается, что свидетельствует об образовании только одной (передней) полости. Мы видим, что при малых интенсивностях лазерного излучения расширение оболочек становится ограниченным и они фрагментируются в процессе схлопывания под действием сил поверхностного натяжения.

Ввиду материала капли прямое наблюдение динамики полостей возможно только при наличии источника излучения с энергией кванта  $\sim 100$  кэВ. Альтернативой прямому наблюдению динамики полостей является численное моделирование происходящих в эксперименте процессов. В случае соответствия внешней, наблюдаемой в эксперименте, динамики деформации жидкометаллической капли с динамикой, рассчитанной в модели, разумно предположить соответствие происходящих и рассчитанных процессов внутри капли. Таким образом анализ динамики полостей внутри капли осуществлялся с помощью сравнения результатов экспериментов и соответствующих расчётов методом гидродинамики сглаженных частиц (моделирование проводилось сотрудниками Всероссийского научно-исследовательского института автоматики им. Н.Л. Духова - В.В. Жаховским и С.Ю. Григорьевым). Данный метод является классическим для численного моделирования распространения ударных волн и индуцируемых этим разрывов среды [11]. Однако данный метод весьма затратный в контексте вычислительных мощностей. Поэтому при расчётах использовались капли диаметром 2 и 4 мкм, в отличие от эксперимента, где диаметр капли составлял 50 мкм. Тем не менее результаты расчётов демонстрируют качественное соответствие наблюдениям в эксперименте.

При анализе расчётов становится ясно, что ввиду геометрии лазерно-индуцированной ударной волны она фокусируется в центре капли. Это ведёт к нарастанию ее амплитуды, которое превосходит противоположный эффект

вызванный дисперсией и диссипацией ударной волны с ее распространением в среде. Таким образом в центре капли возникает область с высокими сжимающими и растягивающими напряжениями, которые приводят к кавитации, в результате которой образуется передняя полость.

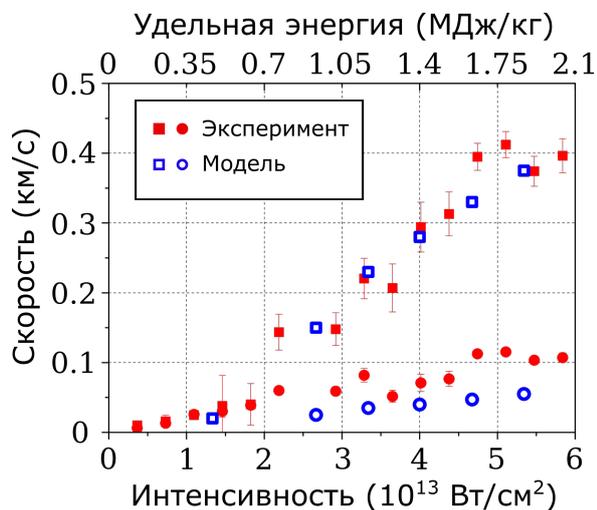


Рис. 4: Характерные скорости расширения капли после воздействия на неё ультракоротким лазерным импульсом. Кружками обозначена характерная скорость расширения передней оболочки, квадратами - характерная скорость расширения задней оболочки. Верхняя ось (поглощённая энергия на массу капли) связана с нижней осью (интенсивностью лазерного излучения) коэффициентом поглощения 0.125.

В случае когда начальная амплитуда лазерно-индуцированной волны достаточно большая, то с ее распространением сквозь каплю на не облучаемой поверхности последней может возникать откол, результатом которого является задняя полость. Ввиду дисперсии и того факта, что после прохождения центра капли ударная волна начинает расходиться, что увеличивает скорость уменьшения ее амплитуды с распространением, пороговая интенсивность лазерного излучения необходимая для индуцирования откола (а значит образования задней полости) превосходит соответствующую величину для кавитации в центре капли. Таким образом в определённом диапазоне интенсивности, возможен режим образования только одной (передней) полости в капле после воздействия на неё ультракоротким лазерным импульсом.

Помимо качественного совпадения результатов при анализе подобия происходящих в капле процессов было продемонстрировано, что профили распространяющихся ударных волн сохраняются в случае масштабирования задачи при сохранении параметра  $E_{OD}/R^3 = const$ , где  $E_{OD}$  - полная энергия поглощённая каплей,  $R$  - радиус капли. Стоит отметить, что совпадение профилей происходит при распро-

странении ударных волн по капле начиная с некоторого расстояния от поверхности индуцирования. Этот эффект является следствием большой дисперсии распространяющейся ударной волны. С распространением ударной волны вглубь мишени ее профиль претерпевает сильное уширение. Начиная с некоторого расстояния от поверхности индуцирования это уширение становится много больше ширины начального профиля, таким образом начиная с этого момента профиль ударной волны определяется параметрами среды и подобен профилю ударной волны индуцированной на другой капле, если сохраняется величина  $E_{OD}/R^3 = const$ . На рисунке 4 представлено численное сравнение скоростей расширяющихся оболочек измеренных в эксперименте (для капли диаметром 50 мкм) и полученных при расчёте методом гидродинамики сглаженных частиц (для капли диаметром 4 мкм). При учёте параметра  $E_{OD}/R^3 = const$  и поправки на коэффициент поглощения олова получено хорошее соответствие результатов.

Далее в диссертации представлено более подробное рассмотрение режима деформации и фрагментации капли под воздействием лазерных импульсов малых энергий - соответствующих режиму образования только одной (передней) полости. Интересным наблюдением в данном режиме фрагментации является образование струй на поверхности оболочки при ее сжатии. Более того, как показал эксперимент количество струй зависит от энергии лазерного импульса и направление некоторых из них остаётся фиксированным от выстрела к выстрелу. В работе рассмотрена гипотеза соответствия числа образующихся струй на поверхности оболочки наиболее быстро растущим модам сферических колебаний. Простые оценки этой идеи показывают хорошее соответствие с экспериментальными результатами. Однако данная теория никак не объясняет сохранение направления разлёта некоторых образующихся струй от выстрела к выстрелу. Предложенная в работе гипотеза объясняющая это наблюдение заключается в том, что ориентация возбуждаемых на поверхности капли сферических колебаний «привязывается» к ориентации линейной поляризации лазерного излучения. Предполагается, что это происходит за счёт анизотропии поглощения линейно поляризованного излучения на сферической поверхности капли. Для проверки этой гипотезы был проведён дополнительный эксперимент в котором при фиксированных всех параметрах системы взаимодействия лазерного излучения с каплей враща-

лась плоскость поляризации лазерного импульса. Эксперимент показал, что с вращением плоскости поляризации лазерного импульса вращается направление разлёта «стационарных» от выстрела к выстрелу струй, причём в том же направлении. В качестве ещё одного подтверждения нашей гипотезы о «привязке» направления разлёта струй к ориентации линейной поляризации лазерного излучения был проведён эксперимент с облучением капли лазерным импульсом с циркулярной поляризацией. В этом случае распределение поглощённой лазерной энергии на капле является осесимметричным (относительно лазерного луча) и сохранение направления разлёта струй от выстрела к выстрелу не наблюдалось.

После в диссертации рассмотрено влияние характерных размеров пространственного профиля лазерного излучения на динамику деформации и фрагментации жидкометаллической капли. Изменение характерных размеров пространственного профиля лазерного пучка ведёт к изменению условий перекрытия капли с последним, что влияет на энергию лазерного импульса поглощённую каплей. Соответственно в эксперименте наблюдалась аналогичная описанной выше картина динамики деформации и фрагментации капли. Однако такое поведение справедливо только в случае, если выполняется соотношение  $D_L \gtrsim D_d$ , где  $D_L$  - характерная ширина пространственного профиля лазерного пучка,  $D_d$  - диаметр капли. В случае когда характерный размер лазерного пучка меньше диаметра капли изменяется геометрия взаимодействия лазерного импульса с каплей. - теперь последняя не может рассматриваться как сфера равномерно освещённая с одной стороны и необходимо учитывать неравномерность пространственного профиля интенсивности лазерного излучения на поверхности капли. В результате динамика деформации и фрагментации капли изменяется. При таких соотношениях размеров пучка и капли в ней по прежнему образуются две пространственно разделённые полости. Однако в отличие от результатов представленных на рисунке 3 в этом случае оболочка передней полости разрывается быстрее задней. Также на ранних временах расширения на передней полости образуются струи.

Представленные далее результаты исследования влияния размеров капли на динамику ее деформации и фрагментации под воздействием ультракоротких лазерных импульсов также качественно соответствуют описанным выше. Основываясь на результатах этих экспериментов удалось вычислить

характерную толщину передней оболочки в момент ее разрыва. Она составила примерно 150 нм и не зависела от размера капли.

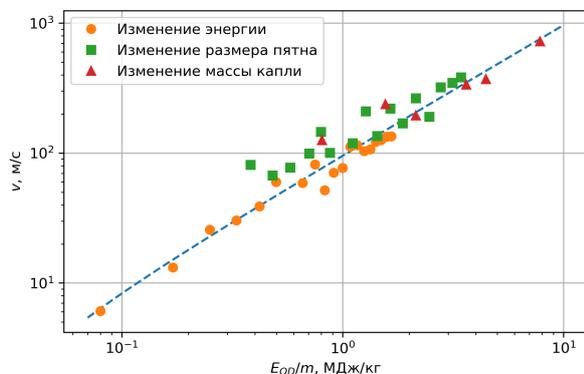


Рис. 5: Зависимость максимальной характерной скорости расширения передней оболочки в различных экспериментах от энергии лазерного импульса попавшей на каплю ( $E_{OD}$ ) делённой на ее массу

наблюдаемую прямую в область низких энергий мы можем получить грубую оценку порога возбуждения кавитации при лазерном воздействии на жидкометаллическую каплю. Такая оценка порогового значения энергии лазерного импульса на массу капли составляет 1.5 МДж/кг. Данное значение хорошо соответствует экспериментальным наблюдениям.

Подводя итоги второй главы диссертации, для проверки заявленного закона подобия деформации и фрагментации жидкометаллической капли под воздействием ультракороткого лазерного импульса в работе представлен график, на котором в соответствующих координатах отмечены характерные скорости расширения передней оболочки капли измеренные во всех экспериментах, рассмотренных выше. Этот график приведён на рисунке 5. Как видно по этому графику закон подобия  $E_{OD}/R^3 = const$  хорошо выполняется во всех рассматриваемых экспериментах. Более того, экстраполируя

### Публикации автора по теме диссертации

- Lakatosh B. V. et al. Propulsion of a flat tin target with pulsed CO2 laser radiation: measurements using a ballistic pendulum //Laser Physics Letters. – 2017. – Т. 15. – №. 1. – С. 016003.
- Krivokorytov M. S. et al. Shaping and controlled fragmentation of liquid metal droplets through cavitation //Scientific reports. – 2018. – Т. 8. – №. 1. – С. 1-6.
- Grigoryev S. Y. et al. Expansion and fragmentation of a liquid-metal droplet

by a short laser pulse //Physical Review Applied. – 2018. – Т. 10. – №. 6. – С. 064009.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] G. E. Moore *et al.*, “Cramming more components onto integrated circuits,” 1965.
- [2] V. Y. Banine, K. Koshelev, and G. Swinkels, “Physical processes in euv sources for microlithography,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 44, no. 25, p. 253001, 2011.
- [3] I. Fomenkov, D. Brandt, A. Ershov, A. Schafgans, Y. Tao, G. Vaschenko, S. Rokitski, M. Kats, M. Vargas, M. Purvis, *et al.*, “Light sources for high-volume manufacturing euv lithography: technology, performance, and power scaling,” *Advanced Optical Technologies*, vol. 6, no. 3-4, pp. 173–186, 2017.
- [4] K. Nishihara, A. Sunahara, A. Sasaki, M. Nunami, H. Tanuma, S. Fujioka, Y. Shimada, K. Fujima, H. Furukawa, T. Kato, *et al.*, “Plasma physics and radiation hydrodynamics in developing an extreme ultraviolet light source for lithography,” *Physics of Plasmas*, vol. 15, no. 5, p. 056708, 2008.
- [5] H. Mizoguchi, J. Fujimoto, and T. Saitou, “Lpp-euv light source development for high volume manufacturing lithography,” vol. 2012, pp. 11–20, LIA, 2012.
- [6] M. Krivokorytov, A. Y. Vinokhodov, Y. V. Sidelnikov, V. Krivtsun, V. Kompanets, A. Lash, K. Koshelev, and V. Medvedev, “Cavitation and spallation in liquid metal droplets produced by subpicosecond pulsed laser radiation,” *Physical Review E*, vol. 95, no. 3, p. 031101, 2017.
- [7] D. Kurilovich, T. de Faria Pinto, F. Torretti, R. Schupp, J. Scheers, A. S. Stodolna, H. Gelderblom, K. S. Eikema, S. Witte, W. Ubachs, *et al.*, “Expansion dynamics after laser-induced cavitation in liquid tin microdroplets,” *Physical Review Applied*, vol. 10, no. 5, p. 054005, 2018.
- [8] P. Mulser and D. Bauer, *High power laser-matter interaction*, vol. 238. Springer, 2010.

- [9] S. Zweigenbaum, Y. Gazit, and Y. Paiss, “Ballistic and torsion pendulums for momentum measurements of laser-produced plasma,” *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, vol. 11, no. 8, p. 830, 1978.
- [10] K. Koshelev, V. V. Ivanov, V. Medvedev, V. M. Krivtsun, V. G. Novikov, and A. S. Grushin, “Errata: Rzline code modeling of distributed tin targets for laser-produced plasma sources of extreme ultraviolet radiation,” *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, vol. 11, no. 2, p. 029802, 2012.
- [11] R. A. Gingold and J. J. Monaghan, “Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars,” *Monthly notices of the royal astronomical society*, vol. 181, no. 3, pp. 375–389, 1977.