

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Института теоретической
физики им. Л.Д. Ландау Российской
академии наук

д. ф. - м. н. доцент

Колоколов Игорь Валентинович



2019 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

**на диссертационную работу Сараевой Ирины Николаевны
«Абляционное формирование коллоидных растворов наночастиц металлов и
полупроводников в жидкостях ультракороткими лазерными импульсами ближнего
ИК-диапазона варьируемой длительности»,
представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 01.04.21 – Лазерная физика**

Лазерная абляция в жидкости - это перспективный метод получения наночастиц. Кроме того, после облучения на поверхности мишени образуются поверхностные наноструктуры, которые представляют самостоятельный интерес. Строение и состав наночастиц определяются параметрами лазерного импульса, веществом мишени и химической формулой используемой жидкости. Ирина Николаевна в своей работе изучила влияние длительности лазерного импульса на то, какие получаются наночастицы и поверхностные структуры. Был детально исследован диапазон длительностей от порядка 300 фс до 10 пс. Было проверено влияние жидкости. Было рассмотрено несколько мишеней. В работе ставилась цель - найти оптимальные условия получения наночастиц и выращивания поверхностных структур путем вариации указанных параметров.

Работ по лазерной абляции в жидкости много. Понятно, что это обусловлено важностью вопроса. В диссертации Ирины Николаевны дается подробный обзор имеющихся на сегодня публикаций. Однако до сих пор не имеется систематического описания того, как длительность импульса влияет на результат. Более того, в диссертации сказано следующее. После тщательного поиска по литературе, соискатель нашла только две публикации по указанной проблеме. Причем эти две публикации противоречат друг другу. В одной пишется о снижении порога выхода наночастиц по падающему флюенсу при увеличении длительности импульса. Тогда как в другой работе, наоборот порог растет с ростом флюенса. Забегая вперед, отметим, что найденные в диссертации зависимости оказываются более сложными. А именно, наблюдается, например, немонотонное поведение при вариации длительности.

Знакомство с диссертацией и авторефератом работы не оставляет сомнений в актуальности исследований, собранных Ириной Николаевной в её диссертационной работе. Мне приходилось использовать статьи диссертанта и до знакомства с её

диссертацией. Кроме того, мы пересекались на конференциях. Внимательно познакомился с диссертацией и авторефератом. Обсудили широкий круг вопросов, касающихся проблем, затронутых в диссертации на одном предзащитном обсуждении в ИТФ им. Ландау РАН и на официальном представлении диссертации на Ученом совете ИТФ им. Ландау РАН. Могу сказать следующее. Работа высококвалифицированная, очень большая по объему проведенных опытов и собранных данных. Сделано много важных выводов.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка ссылок из 170 наименований. Объем диссертации составляет 117 страниц, включая 72 рисунка и 2 таблицы.

Во введении приведены актуальность диссертации, основные цели и методы исследований, научная новизна, защищаемые положения и практическая значимость полученных результатов.

Глава 1 посвящена обзору литературы по лазерной генерации наночастиц и формированию поверхностных структур. Описан широкий круг применений. Представлены основные физические модели, используемые при описании абляции в жидкость. Дан анализ недостатков, неясностей, проблем, стоящих перед исследователями. Дается постановка задач и пути подходов к их решению.

Глава 2 посвящена описанию деталей эксперимента: это лазерные системы, аналитическое оборудование и основные режимы работы лазеров.

В Главе 3 представлены данные по экспериментальному измерению и расчету порогов откольной абляции в процессе обработки кремния и серебра в воздухе и жидких средах фемтосекундным лазерным излучением ближнего ИК диапазона (~1030 нм). Приведены спектры оптической эмиссии лазерного факела в воздухе и в жидкости. Определены времена, за которые происходит погасание свечения факелов. Показано, что время "жизни" факела в жидкости меньше, чем время жизни в воздухе. Обнаружено изменение химического состава поверхностного слоя исследуемых мишеней в результате лазерного воздействия.

Глава 4 посвящена исследованию влияния длительности лазерного импульса на величину коэффициента экстинкции коллоидных растворов наночастиц металлов и полупроводников. Величина коэффициента экстинкции позволяет, как известно, судить о концентрации наночастиц в коллоиде. Обнаружено изменение концентрации наночастиц при вариации длительности воздействия. Несколько меняются также размеры наночастиц и форма микроструктур на поверхности мишени. Опыты выполнены с использованием пары существенно отличающихся жидкостей. Это вода и изопропиловый спирт. Показано, что полученные зависимости коэффициента экстинкции от длительности лазерного импульса находятся в корреляции с критическими значениями мощностей самофокусировки в деионизированной воде (2 МВт) и изопропиловом спирте (0.7 МВт).

При значениях лазерной мощности выше критических для самофокусировки наблюдаются потери энергии лазерного излучения и понижается эффективность абляции по концентрации наработанных наночастиц. При увеличении длительности импульса пиковая мощность становится ниже критической, и наблюдается увеличение выхода наночастиц, обусловленное снижением вклада самофокусировки и филаментации в

процесс распространения лазерного излучения от входа в жидкость и до пятна облучения на мишени.

В Главе 5 подробно проанализирован процесс наработки наночастиц селена при облучении селеновых мишеней. АФМ методом и другими определены профили кратеров после цепочки из повторяющихся лазерных воздействий в одно и то же пятно облучения на мишени. По глубине профиля кратера вычислен выход наночастиц (суммарная масса). Показано, что эффективность абляции селена по массе может быть доведена до уровня порядка мг/с. Такой темп наработки позволяет говорить о фабрикации наночастиц селена в промышленных масштабах для обширного круга применений. Наночастицы (продукты абляции) селена детально исследованы рядом методов высокой точности. В диссертационной работе Ирины Николаевны описано создание "чернил", в виде коллоида наночастиц селена. Эти чернила применяются ею для формирования покрытий толщиной в десятки нанометров в сенсорных устройствах. Такие устройства основаны на явлении гигантского инфракрасного поглощения света. Эффект отработан на примере родамина 6Ж.

В Заключении приведены основные результаты работы.

Тема диссертации актуальна, и полученные в работе результаты являются новыми и оригинальными. Их достоверность подтверждена фактом использования сертифицированного оборудования, их хорошей воспроизводимостью и апробацией на ряде международных и всероссийских конференций. Результаты работы опубликованы в 5 научных статьях в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus.

Результаты, полученные в работе Сараевой И. Н., могут быть рекомендованы для использования в исследованиях ФИАН, ИОФАН, ИТМО, МИФИ и ряда других научных учреждений.

Отметим недостатки, имеющиеся в диссертационной работе:

1. В Главе 3 нет подробностей описания численно-теоретического моделирования воздействия ультракоротких импульсов на золото. А именно, нет описания кода, не представлены значения использованных параметров.

2. Практическую значимость полученных результатов следует представить более полно. Автор диссертации нашел те параметры, которые являются ключевыми для управления процессом абляции. Хорошо было бы описать, в каких областях применений разумно использовать такого рода оптимизацию.

3. Защищаемое положение 3 содержит фразу: «...выход наночастиц различных фракций в зависимости от длительности импульса в фемто/пикосекундном диапазоне изменяется разнонаправленно». Формулировка «разнонаправленно» неточна и не дает представления о конкретной динамике, определяющей процесс лазерной абляции.

4. На с. 48 на рисунке 3.15 представлены оптические спектры излучения факелов кремния в воздухе и в воде. Однако отсутствует расшифровка, каким именно атомам или ионам принадлежат указанные спектральные пики.

Приведенные замечания не влияют на общую высокую положительную оценку диссертационной работы.


Тематика диссертационной работы соответствует специальности 01.04.21 – «Лазерная физика». Текст автореферата правильно отражает содержание работы. Список цитируемой литературы соответствует содержанию.

Все вышесказанное дает основание считать, что представленная Сараевой Ириной Николаевной диссертация «Абляционное формирование коллоидных растворов наночастиц металлов и полупроводников в жидкостях ультракороткими лазерными импульсами ближнего ИК-диапазона варьируемой длительности» полностью удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., а её автор Сараева Ирина Николаевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – Лазерная физика.

Доклад автора по материалам диссертации был представлен 13 декабря 2019 года на заседании Ученого совета Института теоретической физики им. Л.Д. Ландау Российской академии наук (ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН), см. объявление на сайте ИТФ <https://www.itp.ac.ru/ru/seminars/scientific-council/previous/>

Отзыв на диссертацию был составлен ведущим научным сотрудником сектора «Плазмы и лазеров», доктором физико-математических наук, членом-корреспондентом РАН Наилем Алимовичем Иногамовым и одобрен на заседании Ученого совета 13 декабря 2019 года.

Ведущий научный сотрудник сектора «Плазмы и лазеров» ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН,
доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН

 Иногамов Наиль Алимович

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау Российской академии наук (ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН)
142432, МО., г. Черноголовка, просп. Академика Семенова, д. 1-А
Тел.: (+7 495) 702-93-17
e-mail: nailinogamov@gmail.com

Ученый секретарь ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН
кандидат химических наук

 Крашаков Сергей Александрович

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау Российской академии наук (ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН)
142432, МО., г. Черноголовка, просп. Академика Семенова, д. 1-А
Тел.: +7 (495) 702-93-17
e-mail: sakr@itp.ac.ru

Список основных публикаций сотрудников Института теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН по теме диссертации Сараевой И. Н. в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Yu.V. Petrov, V.A. Khokhlov, V.V. Zhakhovsky, N.A. Inogamov, Hydrodynamic phenomena induced by laser ablation of metal into liquid, *Applied Surface Science* 492, 285-297 (2019)
2. Yu.V. Petrov, N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovsky, V.A. Khokhlov, Condensation of laser-produced gold plasma during expansion and cooling in a water environment, *Contrib. Plasma Phys.*, 59(6), e201800180 (2019)
3. M. Ishino, N.A. Inogamov, S. Tamotsu, V.V. Zhakhovsky, N. Hasegawa, I.Yu. Skobelev, A.Ya. Faenov, T.A. Pikuz, K. Mikami, T. Kawachi, M. Nishikino, Study of damage structure formation on aluminum film targets by picosecond soft X-ray laser ablation around threshold region, *Appl. Phys. A* 124, 649 (2018)
4. S.Yu. Grigoryev, B.V. Lakatosh, M.S. Krivokorytov, V.V. Zhakhovsky, S.A. Dyachkov, D.K. Ilnitsky, K.P. Migdal, N.A. Inogamov, A.Yu. Vinokhodov, V.O. Kompanets, Yu.V. Sidelnikov, V.M. Krivtsun, K.N. Koshelev, V.V. Medvedev, Expansion and Fragmentation of a Liquid-Metal Droplet by a Short Laser Pulse, *Phys. Rev. Applied* 10, 064009 (2018)
5. Н.А. Иногамов, В.А. Хохлов, В.В. Жаховский, Формирование уединенной микроструктуры и абляция в прозрачный диэлектрик при субнаносекундном лазерном воздействии, *Письма в ЖЭТФ*, 108 (7), 470-477 (2018)
6. B. Rethfeld, D. Ivanov, M. Garcia, S. Anisimov, Modelling ultrafast laser ablation, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 50, 193001 (2017)
7. X.W. Wang, A.A. Kuchmizhak, X. Li, S. Juodkazis, O.B. Vitrik, Yu.N. Kulchin, V.V. Zhakhovsky, P.A. Danilov, A.A. Ionin, S.I. Kudryashov, A.A. Rudenko, N.A. Inogamov, Laser-Induced Translative Hydrodynamic Mass Snapshots: Noninvasive Characterization and Predictive Modeling via Mapping at Nanoscale, *Phys. Rev. Applied* 8, 044016 (2017)
8. С.И. Анисимов, В.В. Жаховский, Н.А. Иногамов, С.А. Мурзов, В.А. Хохлов, О формировании и кристаллизации жидкой струи, возникающей при воздействии на пленку остросфокусированным лазерным пучком, *Квантовая электроника*, 47(6), 509-521 (2017)
9. B. Rethfeld, D. Ivanov, M. Garcia, S. Anisimov, Modelling ultrafast laser ablation, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 50, 193001 (2017)
10. N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovsky, K.P. Migdal, Laser-induced spalling of thin metal film from silica substrate followed by inflation of microbump, *Appl. Phys. A* 122(4), 432 (2016)