

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.063.03 НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ ИМ. А.М. ПРОХОРОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 18 ноября 2019 г., протокол № 220

О присуждении ПИВОВАРОВУ ПАВЛУ АЛЕКСАНДРОВИЧУ, гражданину РФ, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Роль эффектов многоимпульсного воздействия в процессах лазерной абляции и доабляционной модификации материалов короткими импульсами» по специальности 01.04.21 — Лазерная физика принята к защите «10» июня 2019 г. № протокола 214 диссертационным советом Д 002.063.03 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (119991 Москва, ул. Вавилова, 38, приказ № 105/нк от 11.04.2012 г.).

Соискатель Пивоваров Павел Александрович 1976 года рождения. В 1999 году соискатель окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ». В 2018 обучался в экстернате ИОФ РАН по специальности 01.04.21–Лазерная физика. В настоящее время работает в должности научного сотрудника в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук.

Научный руководитель — кандидат физико-математических наук Климентов Сергей Михайлович, заместитель директора Инженерно-

физического института биомедицины Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,

Официальные оппоненты:

Аракелян Сергей Мартиросович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики и прикладной математики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых»;

Заботнов Станислав Васильевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики и молекулярной электроники Физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (МГУ)

дали положительные отзывы о диссертации.

Ведущая организация — Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО» (Университет ИТМО), г.Санкт-Петербург, в своем положительном заключении, подписанном Вейко В.П., доктором технических наук, профессором факультета лазерной фотоники и оптоэлектроники и Сергеевым М.М., кандидатом технических наук, ассистентом факультета лазерной фотоники и оптоэлектроники, и утвержденном проректором по научной работе Университета ИТМО, доктором технических наук, профессором Никифоровым В.О., указала, что выполненная на высоком научном уровне диссертационная работа Пивоварова П.А. удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21— Лазерная физика.

В отзыве указаны следующие замечания.

1) Не обоснована связь между двумя частями диссертации, посвященными исследованиям многоимпульсной лазерной абляции стали и лазерной модификации графеновых структур.

2) Автором не обсуждаются причины образования положительного заряда на частицах, формирующихся в канале отверстия при многоимпульсной обработке стали короткими импульсами

3) При оценках энергии, поглощенной в графеновом слое на подложке SiO<sub>2</sub>/Si, автор пренебрегает интерференционными явлениями.

4) Диссертация значительно бы выиграла, если бы автор указал (и обосновал), для каких конкретно приложений может быть полезен исследованный в работе метод лазерной модификации графеновых слоев.

5) Погрешности измеряемых величин на экспериментальных графиках указаны далеко не во всех случаях.

Соискатель имеет 54 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 14 работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях и рекомендованных ВАК РФ.

Список наиболее значительных работ:

1. Klimentov S.M., Garnov S.V., Kononenko T.V., Konov V.I., Pivovarov P.A. and Dausinger F., High rate deep channel ablative formation by picosecond-nanosecond combined laser pulses // Applied Physics A, 1999, **69**, с. S633-S636.
2. Климентов С.М., Гарнов С.В., Конов В.И., Кононенко Т.В., Пивоваров П.А., Царькова О.Г., Брайтлинг Д., Даусингер Ф., Роль низкопорогового пробоя воздуха в абляции материалов короткими лазерными импульсами // 2004, Труды ИОФРАН, **60**, с.13-29.
3. Климентов С.М., Пивоваров П.А., Конов В.И., Брайтлинг Д., Даусингер Ф., Лазерная микрообработка в газовой среде при высокой частоте повторения аблирующих импульсов // Квантовая электроника, 2004, **34**, №.6, с.537-540.
4. Klimentov S.M., Garnov S.V., Konov V.I., Kononenko T.V., Pivovarov P.A., Tsarkova O.G., Breitling D., Dausinger F., Effect of low-threshold air breakdown on material ablation by short laser pulses // Physics of Wave Phenomena, 2007, **15** №1, с. 1–11.

5. Klimentov S.M., Pivovarov P.A., Konov V.I., Klimentov D.S., Dausinger F., Generation of long-living charged nanoparticles at ablation in air and their role in pulsed microdrilling // Laser Physics, 2008, **18** №6, с. 1–6.
6. Frolov V.D., Pivovarov P.A., Zavedeev E.V., Komlenok M.S., Kononenko V.V., Konov V.I., Laser nanoablation of graphite // Applied Physics A, 2014, **114**, №1, с. 51-55.
7. Frolov V.D., Pivovarov P.A., Zavedeev E.V., Khomich A.A., Konov V.I., Laser-induced local profile transformation of multilayered graphene on a substrate // Optics and Laser Technology, 2015, **69**, №6, с. 34-38.
8. Pivovarov, P.A., Frolov, V.D., Zavedeev, E.V., Khomich, A.A., Konov, V.I., Laser induced modification of mechanical properties of nanostructures: graphene-water adsorbate-substrate // Laser Physics, 2016, **26**, №8, art. no. 084002.
9. Frolov V.D., Pivovarov P.A., Zavedeev E.V., Konov V.I., Influence of laser irradiation on local electronic properties of graphene in the presence of water adsorbate // Optics and Laser Technology, 2017, **90**, с.216-221.
10. Пивоваров П.А., Фролов В.Д., Заведеев Е.В., Конов В.И., Лазерно-индуцированная модификация графена в присутствии этанола на границе графен–подложка // Квантовая электроника, 2017, **47**, №11, с.1017–1022.

На автореферат поступили 2 отзыва.

1. От Дормидонова А.Е., кандидата физико-математических наук, заместителя начальника научно-исследовательского отдела, начальника научно-исследовательской лаборатории Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова» (ФГУП «ВНИИА») Отзыв положительный. В отзыве указаны следующие замечания:

1) В части посвященной экспериментам с приложением внешнего электрического поля при абляции стальных мишеней, было бы полезным представить схемы эксперимента с конденсатором. Это поможет пониманию оценок и выводов, сделанных по измерениям проводимости.

2) В качестве пожелания можно предложить также включить в автореферат схематическое изображение поперечного сечения графенового

образца в области многоимпульсного лазерного воздействия с указанием всех компонентов образца и характерных размеров и толщин, что, скорее всего, облегчило бы восприятие соответствующего материала.

3) Подписи и обозначения на рис. 5 плохо читаются.

2. От Солохина С.А., кандидата физико-математических наук, заведующего кафедрой лазерной физики и технологии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых». Отзыв положительный. В качестве замечаний указано, что, к сожалению, не представлены материалы практической апробации или внедрения результатов работы на производственной базе профильных предприятий. Данное замечание носит рекомендательный характер с целью скорейшего внедрения прикладных результатов работы

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается высоким научным уровнем и значимостью их работ в области лазерной физики и, в частности, физики взаимодействия лазерного излучения с веществом.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований экспериментально установлено, что снижение эффективности многоимпульсной лазерной абляции каналов с высоким аспектным отношением в стали связано с оптическим пробоем воздуха, инициируемым на микрочастицах, накапливающимися в них от импульса к импульсу. Доказано, что экранирующее действие плазмы пробоя существенно снижается при интервале между аблирующими лазерными импульсами менее 250 мкс за счет формирования компактной долгоживущей области горячего разреженного газа в зоне абляции. Продемонстрирована возможность удаления микрочастиц внешним электрическим полем в процессе многоимпульсной абляции. При многоимпульсном лазерном воздействии короткими низкоинтенсивными импульсами экспериментально обнаружена устойчивая локальная трансформация многослойных графеновых листов на подложке

SiO<sub>2</sub>/Si без их повреждения. Показано, что лазерноиндуцированная трансформация графена связана с вытеснением водного адсорбата, аккумулированного на границе графен–подложка, на периферию зоны воздействия. Такое перераспределение, а также вытеснение/замещение водного адсорбата с помощью других полярных жидкостей, хорошо растворимых в воде (этанол и ацетон), позволяет осуществлять локальное изменение механических и электрофизических свойств графеновых пленок.

Теоретическая значимость исследований обусловлена обнаружением нового механизма возникновения сильной плазменной экранировки при абляционном формировании глубоких каналов в стали короткими лазерными импульсами высокой интенсивности. Теоретически обоснована возможность подавления такой экранировки с ростом частоты повторения лазерных импульсов. С помощью численного моделирования продемонстрирована возможность устойчивого лазерноиндуцированного перераспределения слоев водного адсорбата на границе графен–подложка, наличие которого во многом определяет конечные физические свойства графена на гидрофильной подложке.

Научная новизна диссертации заключается в следующем.

Показано, что оптический пробой воздуха в процессе многоимпульсного абляционного формирования протяженных каналов в стали инициируется преимущественно на накапливающихся в них от импульса к импульсу микрочастицах. Проведенные исследования таких частиц, а также условий их формирования позволили разработать методы эффективного подавления плазменной экранировки лазерного излучения, инициируемой на них.

Обнаружен и исследован лазерный режим управления локальными физическими свойствами графеновых структур на подложке SiO<sub>2</sub>/Si, обусловленный перераспределением водного адсорбата по границе графен–подложка при низкоинтенсивном многоимпульсном нагреве графена короткими лазерными импульсами.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается следующим.

Разработаны методы подавления плазменной экранировки лазерного излучения при абляционном формировании протяженных каналов, значительно повышающие эффективность лазерной абляции стали на воздухе. Предложен способ устойчивой локальной лазерноиндуцированной коррекции физических свойств многослойных графеновых пленок на подложке SiO<sub>2</sub>/Si без повреждения углеродных структур.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что результаты расчетов и моделирования согласуются с имеющимися экспериментальными данными и теоретическими представлениями.

Личный вклад соискателя состоит в участии в разработке экспериментальных методик, проведении исследований, их анализе, теоретических расчетах и оценках. Соискатель активно участвовал в написании научных статей и апробации результатов исследований на конференциях и семинарах.

На заседании 18 ноября 2019 г. диссертационный совет принял решение присудить Пивоварову П.А. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 7 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту «0» человек, проголосовали: за «17», против «нет», недействительных бюллетеней «нет».

Председатель диссертационного совета  
академик РАН

И.А. Щербаков

Ученый секретарь диссертационного совета  
канд. физ.-мат. наук



Т.Б. Воляк

18.11.2019 г.