

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента, к.ф.-м.н. Заботнова Станислава Васильевича  
на диссертацию Пивоварова Павла Александровича  
«Роль эффектов многоимпульсного воздействия в процессах лазерной абляции и  
доабляционной модификации материалов короткими импульсами»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических  
наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика

Диссертационная работа П.А. Пивоварова посвящена теме прецезионной лазерной обработки нано- и субнаносекундными лазерными импульсами стали и тонких графеновых пленок на подложке. Несмотря на достигнутые в последние десятилетия успехи в данном направлении недостаточно внимания уделялось особенностям, связанным непосредственно с влиянием количества импульсов и задержки между ними на качественные и количественные характеристики формируемых в результате облучения каналов и кратеров. Решение данной задачи позволило бы с прикладной точки зрения существенно расширить технологические возможности изготовления микро- и наноструктур из перечисленных материалов. Для фундаментальной науки представляет несомненный интерес получение новых знаний о механизмах лазерного структурирования как в условиях высокоинтенсивного облучения, приводящего к абляционному формированию каналов с высоким аспектным отношением, на примере стальных пластин, так и в случаях низкоинтенсивной наномодификации (ниже порога абляции) поверхности графена. Таким образом, сформулированная в тексте диссертации цель исследования по обнаружению и исследованию эффектов, связанных с многократностью воздействия короткими лазерными импульсами в обоих перечисленных случаях, обусловила несомненную актуальность выполненной работы.

Работа изложена на 152 страницах, состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитированной литературы.

Во введении представлены: актуальность темы диссертации; цели работы и решаемые задачи; краткое описание методов исследования; научная новизна и достоверность полученных результатов, их научно-практическая значимость; выносимые на защиту положения; сведения о структуре диссертации, аprobации работы и личном вкладе автора; список публикаций диссертанта.

В первой главе, представляющей собой обзор литературы, анализируются ключевые работы по лазерному сверлению твердых тел и изучению сопутствующего данной технологии плазменного облака, возникающего в результате абляции мишени. Также обсуждаются основные работы по методам получения и изучению графеновых слоев, включая влияние на структурные и электрофизические свойства материала используемых подложек, водного адсорбата и лазерного облучения.

Во второй главе описываются примененные методики лазерного сверления пластин стали и результаты исследования как структурных свойств полученных таким образом микроканалов, так и влияния на формирование последних плазменного облака и микрочастиц, возникающих в результате абляции. Особое внимание уделяется детальному анализу при изменении режимов лазерного облучения: использовании одиночных и сдвоенных лазерных импульсов, пуга импульсов (комбинированные импульсы), варьировании частоты их следования и давления окружающего воздуха.

Третья глава посвящена изучению так называемой наноабляции тонких слоев графена на подложках  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ , когда модификация поверхности происходит под действием лазерных импульсов с плотностью потока энергии, меньшей порога для начала испарительной абляции. В изучаемом режиме абляции возможно контролируемым образом формировать кратеры с точностью до атомарной. Автор диссертации подробно описывает как структурные особенности лазерноиндуцированных кратеров, так и влияние на их образование не только параметров лазерного излучения, но жидкого адсорбата, находящегося в виде тонкой прослойки воды, этанола или ацетона между графеновой пленкой и подложкой.

В заключении сформулированы основные выводы диссертационной работы.

Полученные в представленной диссертационной работе результаты характеризуются высокой степенью новизны, поскольку в ходе проведенных исследований впервые было проведено комплексное изучение целого ряда эффектов, определяющих специфику многоимпульсного воздействия во время лазерной абляции стали в глубоких каналах и при лазерноиндуцируемой локальной трансформации графеновых листов на гидрофильной подложке в нормальных условиях. К наиболее ярким и важным из полученных результатов я бы отнес следующие:

1. При лазерном сверлении глубоких каналов в слоях стали в режиме абляции лазерными импульсами субнаносекундной и наносекундной длительности значительная часть падающей энергии (до 90%) поглощается и рассеивается в плазменном облаке, возникающем при пробое воздуха на долгоживущих микрочастицах, накапливающихся в атмосфере каналов между лазерными выстрелами. Доказано существование данных частиц и показана возможность их удаления внешним электрическим полем непосредственно в процессе абляции.
2. Уменьшение задержки между аблирующими лазерными импульсами до величин ниже 250 мкс позволяет значительно снизить вероятность пробоя воздуха и экранирующее действие приповерхностной плазмы, и, таким образом, значительно повысить эффективность абляции за счет формирования вблизи испаряемой поверхности относительно долгоживущей горячей разреженной газовой области.
3. Многоимпульсный лазерный нагрев нанослоев графена на подложке  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  короткими импульсами с интенсивностями значительно ниже порога испарительной абляции на воздухе приводит к устойчивой локальной трансформации поверхности графенового листа без удаления вещества за счет перераспределения аккумулированных на интерфейсе графен – подложка слоев водного адсорбата по области поверхности размером порядка 1 мкм.
4. Лазерноиндуцированное перераспределение адсорбата между графеном и подложкой, а также замещение/вытеснение водных слоев другими полярными жидкостями (этанолом и ацетоном) позволяет осуществлять контролируемое локальное изменение механических и электрофизических свойств слоистых графеновых структур.

Следует отметить, что поставленные в диссертации задачи изучения механизмов и закономерностей микро- и наноструктурирования стали и графена с помощью коротких лазерных импульсов решались с использованием взаимодополняющих друг друга методов воздействия лазерного излучения короткой длительности на твердые тела в режимах выше и ниже порога испарительной абляции, оптической электронной и атомно-силовой микроскопии, спектроскопии комбинационного рассеяния света, измерения проводимости аблированного плазменного облака, а также поверхностного потенциала и фазового контраста облученных пленок. Комплексное применение перечисленного набора экспериментальных подходов наряду с глубоким анализом полученных данных не вызывает сомнений в достоверности и

обоснованности полученных результатов и положений, выносимых на защиту. По результатам диссертационной работы опубликовано 32 работы, из которых 14 являются статьями в российских и иностранных реферируемых изданиях, включенных в перечень рекомендуемых ВАК РФ, 3 – работами в сборниках трудов международных конференций, 15 – тезисами докладов на международных конференциях и семинарах.

Тем не менее, по диссертационной работе имеется ряд замечаний:

1. Местами текст сложен для восприятия. Так, не очень аккуратно оформлены аббревиатуры: некоторые из них расшифрованы 3 раза (ACM, CVD), но при этом КР – комбинационное рассеяние света в сокращенном варианте впервые упоминается на странице 30, а расшифровывается только на странице 91. Имел смысл в конце текста дополнительно привести список используемых сокращений и обозначений. Также в разделе 3.7 неоднократно приводится нумерация образцов с exp1# по exp9#. Описание данных образцов формально приводится, но является “размазанным” по 10 страницам. Было бы хорошо систематизировать данные по всем образцам в виде единой таблицы.
2. В разделе 1.1 обзора литературы приводится информация по лазерному сверлению глубоких каналов в различных металлах, полупроводниках и диэлектриках. Однако в итоге обоснование выбора стали для исследования в данной диссертационной работе, из которого следовала бы постановка конкретной задачи исследования, не приводится. Краткого обоснования во введении явно недостаточно.
3. В ходе выполнения диссертационной работы измерены спектры комбинационного рассеяния света 3-6-слойных пленок графена, что свидетельствует о высокой чувствительности использовавшегося в работе спектрометра для измерения данного вида рассеяния. Напрашивается логичный вывод о целесообразности измерения аналогичных спектров для водного адсорбата. Однако в тексте на эту тему информации не приводится.
4. На странице 101 делается промежуточный вывод, что из рисунка 53в, где представлено сечение кратера, можно увидеть разрушение графеновой пленки в результате увеличения энергии лазерного воздействия. Однако визуально принципиальной разницы с рисунком 53б, где разрушения еще не должно быть, не видно. Следовало бы делать изложенный вывод на основании другой информации, например, рисунка 54 с непосредственным изображением

разрушенной поверхности. Но и здесь имело смысл увеличить масштаб печати и сделать рисунок в цвете для лучшего восприятия.

Сделанные замечания носят рекомендательный характер, не являются принципиальными и не снижают общей положительной оценки диссертации.

Автореферат достоверно отражает структуру и содержание диссертационной работы.

В итоге можно сделать вывод, что на защиту вынесено оригинальное и завершенное научное исследование. Диссертационная работа «Роль эффектов многоимпульсного воздействия в процессах лазерной абляции и доабляционной модификации материалов короткими импульсами» полностью удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а её автор – Пивоваров Павел Александрович – заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика.

Официальный оппонент:

Доцент физического факультета

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,

кандидат физико-математических наук

Заботнов Станислав Васильевич

«28» октября 2019 г.

Почтовый адрес: 119991, Москва, Ленинские горы, д.1, стр. 2,

Физический факультет МГУ

Телефон: +7(495) 939-46-57

E-mail: zabotnov@physics.msu.ru

Подпись С.В. Заботнова удостоверяю  
Декан физического факультета  
МГУ имени М.В.Ломоносова,  
профессор

Сысоев Николай Николаевич



5

С отозвом однокомиссией 29.10.2019

Дир. 1 Пивоваров П.А.