

**ОТЗЫВ**  
**официального оппонента**  
**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»**

Рецензируемая работа состоящая из Введения, 3-х глав, Заключения и списка используемой литературы (155 наименований), а также включающая 75 рисунков и диаграмм, посвящена исследованию процессов микро- и нанообработки материалов при многоимпульсном воздействии лазерного излучения с короткой длительностью импульсов. Диапазон длительностей используемых импульсов – от 100 нс до 100 пс (с частотой следования до 2 кГц) в двух режимах – в условиях превышения порога лазерной абляции и при реализации условий, когда абляция еще не возникает (доабляционный процесс).

В первом случае высокointенсивной лазерной абляции речь идет о фототермическом разрушении поверхности материала с глубокими каналами (на примере пластинок из стали – порог абляции для них –  $0.5\text{-}1 \text{ Дж}/\text{см}^2$ ), во-втором, – о фотохимических превращениях при наноабляции алмаза и алмазоподобных материалов и получении многослойного графена (3-6 слоев) на поверхности кремния/диоксида кремния (удаление атомов из облучаемой мишени, окисление и др.). Такие фотоиндуцированные повреждения кристаллической структуры имеют свои особенности при многоимпульсном воздействии, которые, несмотря на многочисленные работы в этой области за многие годы, не были изучены в условиях проявления локальных термических эффектов и аккумуляции тепла/эффектов охлаждения. При этом в эксперименте реализовывались контролируемые процессы лазерного воздействия, позволяющие изменять характеристики облучаемых образцов. Именно этот аспект управления свойствами мишени под лазерным воздействием является доминирующим в диссертации и можно говорить о разработке автором основ 4D-технологий, когда в результате лазерного эксперимента удается не только видоизменять топологические свойства материала, но и включать разные механизмы их развития во времени при соответствующих длительностях лазерных импульсов.

Поэтому актуальность работы не вызывает сомнений, тем более в условиях, когда автору удалось использовать варьируемые последовательности (в количестве от 1 до 20) коротких лазерных импульсов с эффективной частотой их следования  $\sim 200$  кГц в оригинальной оптической схеме. Это существенно увеличивает точность лазерной микрообработки материалов и имеет несомненное практическое значение.

Среди наиболее важных и новых результатов, полученных автором, считаю необходимым отметить следующие.

Первое. Абляция в глубоких каналах в материале стали/стальных пластинах сопровождается сильным поглощением и рассеянием в плазменном облаке (возникающем непосредственно над обрабатываемой поверхностью при пробое воздуха) на долгоживущих микро- наночастицах, но этим процессом удалось управлять, регулируя задержку между аблирующими лазерными импульсами. Это позволяет значительно повысить эффективность абляции и управлять ее скоростью в диапазоне нескольких порядков ее величины. При этом скачок скорости абляции носит пороговый характер (он определяется значениями  $50\text{-}70$  Дж/см<sup>2</sup>). Кроме того, наблюдается эффект сильной плазменной экранировки в сформированных сквозных каналах (при низкопороговой плотности энергии лазера – до  $15\text{-}20$  Дж/см<sup>2</sup>) из-за аблированных микро- и наночастиц.

Второе. Обнаружен эффект образования поверхностного заряда (в большинстве случаев – положительного) на накапливающихся микро- наночастицах в аблируемых каналах. Это позволяет с помощью внешнего электрического поля (величиной 60 В и/или более 1 кВ) обратимо управлять процессом их удаления в зависимости от расстояния между обкладками гибридного конденсатора (1мм и 3мм, соответственно) с необходимыми эффективностью и скоростью (до глубин в материале 600-700 мкм). Автором обсуждаются 3 фазы процессов для газодинамических параметров среды при разлете плазмы в зависимости от реализуемой в эксперименте температуры (до  $10^5$  К) и процессов теплопереноса непосредственно в металл. Принципиальный эффект здесь – возникновение свободных электронов и заряженных кластеров размером  $\sim 0.4$  мкм.

Третье. При многоимпульсном лазерном нагреве графеновых структур на подложке SiO<sub>2</sub>/Si в доабляционных режимах возникают устойчивые локальные модификации графеновых слоев (за счет низкотемпературного окисления на воздухе) без их повреждения в разных условиях окружающей среды (в атмосфере аргона и воздуха при разных давлениях) и появления

дефектов на самой поверхности исходного графита. Такой порог наноабляции составил величину  $\sim 0.25\text{-}0.4$  Дж/см<sup>2</sup>. Графеновые структуры (3-6 слоев) получались как методом химического осаждения паров на медную пленку (CVD-процесс), так и методом механического расслоения пиролитического графита. Они затем переносились на твердую кремневую подложку. Возникающие повреждения в разных условиях окружающей среды (в аргоне и воздухе) измерялись ACM-методом. Аналогичный эффект обнаружен и при наноабляции непосредственно графита в воздухе.

Четвертое. Рассмотрена процедура локального измерения механических и электронных свойств многослойных графеновых структур за счет перераспределения адсорбата на границе графен-подложка, в том числе и при вытеснении и/или замещении водных слоев такими полярными жидкостями как этанол и ацетон. Автор этот эффект называет реверсивными процессами. Важной особенностью проведенных исследований является образование паровых полостей в облучаемой области под графеновой поверхностью. Сам факт вытеснения воды от центра лазерного пятна к периферии на образце из-за разницы температур и градиента давления – своеобразное проявления фазовых переходов в разные агрегатные состояния в динамическом процессе. Он приводит также и к удалению графена с подложки (при энергии  $\geq 0.04$  Дж/см<sup>2</sup>). Автору удалось провести анализ этих процессов в рамках энергетического подхода – при оценке величины работы выхода из-за изменения поверхностного потенциала графена. Здесь обнаружен процесс «перезаписи» многоимпульсным лазерным излучением микрообластей с измененными электронными свойствами мишени при разных внешних условиях для образцов в бинарных системах (в частности, ацетон-вода).

### Недостатки.

1. Когда речь идет об аспектном числе при прецизионной аблации в материале стали рассматриваемая весьма скромная его величина – всего лишь абстрактно больше 1 – требует большей детализации с учетом формы, размеров и пространственного распределения возникающих структур на поверхности образца. Здесь необходимо было пояснить, для чего нужны такие структуры в плане практических требований под определенный тип задач.

2. Отдельный анализ необходим при рассмотрении электрофизики кластерных систем и отдельных электронов в условиях измеренного скачка проводимости контакта, а также, когда речь идет об их электростатической

стабильности и устойчивости для разных топологий на поверхности образца. Надо бы пояснить, почему их заряд в основном положительный и от чего это зависит. Могут ли возникать здесь принципиальные для физики связанные состояния заряженных частиц, и при каких условиях?

3. При анализе и обсуждении абляционного и доабляционного режимов взаимодействия лазерного излучения с различными материалами было бы полезно использовать и добавить к списку литературы энциклопедическую книгу по лазерной абляции : «Laser Ablation in Liquids: Principles and Applications in the Preparation of Nanomaterials» by Guowei Yang, CRCPress.PanStanfordPubl., 2012, 1192 p.

4. Сложные нелинейные процессы, да еще с разными адсорбатами и в разных условиях, сводятся в работе к простым качественным рассуждениям и численным методам анализа с известными оценочными соотношениями. Здесь, все-таки, было бы полезным написать исходные базовые уравнения и анализировать разные возможные режимы с цифровыми данными.

5. По структуре диссертации. Стоило бы разделить диссертацию на большее число глав выделив используемые автором оригинальные экспериментальные методики исследования.

Однако, данные замечания не влияют на принципиальные результаты, полученные автором, и носят скорее характер пожеланий на дальнейшие исследования. В целом диссертационная работа написана на высоком уровне. Ее можно охарактеризовать как целостную и внутренне связанную работу. Результаты изложены ясным грамотным языком, сопровождаются необходимым иллюстративным материалом и качественными обсуждениями. Научные положения, выносимые на защиту, обоснованы и оригинальны. Автор продемонстрировал уверенное владение как навыками, необходимыми физику-экспериментатору, так и общим высоким профессионализмом и информированностью о достижениях в данной области исследований. Актуальность, оригинальность и достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается публикациями в рецензируемых авторитетных зарубежных и отечественных научных

журналах и выступлениями с докладами на профильных международных конференциях. Автореферат диссертации достаточно полно и точно отражает содержание диссертации.

Диссертация отвечает требованиям, установленным Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.04.21 – «лазерная физика».

Без всякого сомнения считаю, что соискатель, Пивоваров Павел Александрович, заслуживает присуждения ему искомой ученой степени по данной специальности.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики и прикладной математики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

АРАКЕЛЯН Сергей Мартиросович

Контактные данные:

тел.: +7(4922)333369, e-mail: arak@vlsu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена  
диссертация: 01.04.03 – Нелинейная спектроскопия и лазерная физика



30.10.2019

Адрес места работы:

600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87,

Федеральное Государственное Бюджетное Образовательное Учреждение Высшего Образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», кафедра физики и прикладной математики

Тел.: +7(4922)333369; e-mail: arak@vlsu.ru

Подпись сотрудника ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» проф. С.М. Аракеляна  
удостоверяю:

Ученый секретарь ВлГУ



Т.Г. Коннова

30.10.2019 г.