

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук, профессора Тимошенко Виктора Юрьевича
на диссертационную работу Кононенко Виталия Викторовича
«Лазерно-стимулированные процессы на поверхности алмаза»
выдвинутую на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по специальности 01.04.21 – Лазерная физика»

В диссертационной работе В.В.Кононенко рассматриваются процессы, индуцируемые на поверхности алмаза под воздействием импульсного лазерного излучения короткой и сверхкороткой длительности. Указанные процессы изучаются с момента появления первых лазерных источников, однако основное место в предыдущих работах занимал процесс абляции - интенсивное испарение материала с поверхности в результате свето-индуцированного нагрева алмазной мишени. Процесс абляции обязательно сопровождается разрушением алмазной решетки и его механизм был сформулирован еще в 90-х годах. Отметим, что хотя значимая часть представляемой работы посвящена проблемам оптимизации обработки поверхности алмазов в этом режиме, изучению свойств формирующейся на поверхности графито-подобной фазы и т.д., наиболее актуальные результаты касаются новых режимов лазерного воздействия, в которых модификация алмазной решетки протекает на нано и атомарном уровнях.

Результаты, полученные в работе В.В.Кононенко, свидетельствуют, что в преабляционных режимах механизмы лазерного воздействия на алмаз значительно изменяются. Так в работе наблюдался ряд интересных и важных процессов: наноабляция с поверхности и генерация активных дефектов в приповерхностной области кристаллов алмаза. Их изучение представляется интересной задачей в связи с попытками построения квантово-оптических систем, в основе которых находится алмаз. Эти системы фактически должны являться упорядоченными массивами однофотонных источников, которые помещены в твердотельную микросхему и которыми можно управлять с помощью оптических и электрических полей. Исходя из сказанного, а также из важности решения задач нанобработки и функционализации поверхности алмаза для целого ряда практических областей, можно утверждать, что тематика представляемого цикла экспериментов является крайне актуальной.

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Объем диссертации составляет 234 страницы, включая 97 рисунков и 8 таблиц.

Во введении приведено обоснование актуальности темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, представлены защищаемые положения и дан обзор основных работ, посвященных воздействию лазерного излучения на алмазы.

В первой главе содержится описание методики лазерных экспериментов, включая оригинальные методики исследований (фемтосекундную интерферометрию и *in situ* люминесцентную микроскопию).

Во второй главе обсуждаются результаты экспериментов по возбуждению электронной подсистемы монокристаллического алмаза фемтосекундным лазерным излучением.

Третья глава содержит результаты исследования установившегося процесса абляции алмаза при его многоимпульсном облучении.

В четвертой главе представлены основные закономерности наноабляции поверхности алмаза. Обсуждаются особенности наноабляционного травления при варьировании температуры образца в вакууме и при изменении параметров лазерного излучения.

В пятой главе рассмотрен процесс аккумуляционной графитизации, представлены эксперименты, проясняющие ее механизм и позволяющие оценить ее скорости.

Шестая глава посвящена процессу лазерной генерации центров типа примесь азота- вакансия, так называемых NV комплексов, в приповерхностном слое монокристаллов алмаза.

В заключении сформулированы выводы работы.

Основными наиболее значимыми научными результатами диссертационной работы В.В. Кононенко, на мой взгляд, являются следующие:

1. Экспериментально установлено, что поверхностная графитизация алмаза под действием лазерного излучения является термостимулированным процессом.
2. Обнаружено, что процесс многоимпульсного травления алмаза в кислородосодержащей газовой среде, происходящий со сверхнизкими скоростями удаления материала, называемый наноабляцией, является многофотонным фотостимулированным процессом.
3. Установлено, что наноабляция приводит к процессу формирования центров типа примесь азота- вакансия в приповерхностном слое монокристаллов алмаза, при котором не происходит заметного лазерно-индуцированного повреждения кристаллической решетки алмаза.

Среди основных достижений диссертационной работы В.В. Кононенко также необходимо выделить полноту рассмотрения воздействия интенсивного оптического

поля на поверхность твердых тел. Все это существенно расширяет наше понимание физических процессов, которые интенсивное лазерное излучение может стимулировать в алмазной решетке. При этом в широком диапазоне интенсивностей лазерного излучения, за исключением экстремальных, с точки зрения основных тенденций модификации и трансформации решетки алмаза в работе описана согласованная и внутренне непротиворечивая физическая картина.

Наряду с отмеченными достоинствами необходимо сделать следующие замечания по диссертационной работе:

1. В работе практически не исследуется влияние состава газовой среды, окружающей образцы алмаза в процессе лазерного облучения, на закономерности нанооблечения, что затрудняет выявление вклада молекулярного кислорода и других газов из воздушной атмосферы на изучаемые явления, включая генерацию NV комплексов.
2. При исследовании фотостимулированных процессов на поверхности алмаза в работе в основном рассматриваются импульсы с длительностью сотни фемтосекунд и десятки наносекунд, но не анализируется воздействие пикосекундного лазерного излучения, что может отразиться на общности сделанных выводов по механизмам лазерно-индуцированных процессов, включая нанооблечение.
3. В работе основное внимание уделяется исследованию структурных свойств и морфологии лазерно-модифицированных поверхностей алмаза, в то время как не приводятся данных по их оптическим (коэффициенты поглощения и отражения) и электрическим свойствам, что могло бы быть полезно как для лучшего понимания результатов лазерного облучения, так и для практического использования графитизированных и нанооблученных участков поверхности алмаза.
4. При исследовании процессов лазерно-индуцированной генерации NV комплексов в приповерхностной области алмаза в работе в основном используется облучение фемтосекундным излучением и практически не обсуждается возможное влияние длительности лазерного импульса на анализируемые явления. В то же время, можно предположить, что соотношение вкладов фотогенерируемой электронно-дырочной плазмы, теплового действия лазерного излучения и процессов диффузии центров в приповерхностной области алмаза может изменяться при облучении лазерными импульсами различной длительности.

5. Поскольку, как было установлено в работе, процесс нанооблачения сильно зависит от давления газа в окружающей атмосфере, то при представлении результатов исследований, в том числе в подписях под рисунками в диссертации и автореферате, желательно было бы указывать величину данного давления. Также осталось не понятным из приведенных в работе данных, можно ли повысить эффективность генерации NV комплексов, проводя лазерную обработку поверхности алмаза при пониженных давлениях окружающей атмосферы.

Данные замечания, однако, не носят принципиального характера и не влияют на основные выводы и выдвигаемые положения. Диссертация В.В.Кононенко является законченной научной работой. Ее основные выводы опубликованы в 23 статьях в рецензируемых научных журналах. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Диссертационная работа «Лазерно-стимулированные процессы на поверхности алмаза» удовлетворяет требованиям ВАК и соответствует пункту 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (ред. от 01.10.2018). Автор работы, Кононенко Виталий Викторович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.21 – Лазерная физика.

Доктор физико-математических наук,
профессор кафедры физики низких
температур и сверхпроводимости
физического факультета
МГУ имени М.В.Ломоносова

Тимошенко Виктор Юрьевич

119991, Москва, Ленинские горы, дом 1, стр. 2, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», физический факультет, кафедра физики низких температур и сверхпроводимости
Тел. +7 (916) 378-98-11
Электронный адрес: info@physics.msu.ru,
<http://phys.msu.ru/>

Декан физического факультета
Московского государственного университета
имени М.В.Ломоносова
д.ф.-м.н., профессор



 Н. Н. Сысоев