

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук, профессора Вейко Вадима Павловича
на диссертационную работу **Кононенко Виталия Викторовича**
«Лазерно-стимулированные процессы на поверхности алмаза»
на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по специальности 01.04.21 – Лазерная физика

Проблема воздействия лазерного излучения на алмаз появилась сразу после открытия лазеров – уже в 1962 в газете “Electronics news” (США) появилась заметка «Laser drill diamond». И за относительно короткое время – к 1965-66 г.г. технология, и, частично, физика сверления алмазов миллисекундными лазерными импульсами была разработана. Тем самым была решена исключительно важная задача промышленности – изготовления алмазных фильер для волочения проволоки, и производительность труда при этом возросла неправдоподобно – с 60 часов на одно отверстие до 5-8 минут ! Этот пример приведен в начале отзыва, чтобы подчеркнуть перспективность применения лазеров для обработки алмаза, как эталона механической твердости.

Уникальное сочетание механических, теплофизических, химических, оптических, электрических, радиационных свойств позволило продемонстрировать целесообразность его использования для решения широкого круга задач – от эффективного теплоотвода и химической защиты в агрессивных средах до силовой лазерной оптики, высоковольтной коммутации электрических импульсов, контроля ионизирующего излучения и т.п. В последнее время алмаз открылся со многих других сторон, и, особенно уже в текущем веке, как чрезвычайно перспективный материал для электронных, фотонных и квантовых устройств.

Однако, значительная часть проблем, связанная с дальнейшим развитием и расширением сфер использования алмаза, упирается в сложность его

обработки, особенно на микро и нано-уровне.

Лазерные методы представляются одними из наиболее перспективных для этих целей, а это в свою очередь, требует изучения процессов, происходящих в алмазах под действием лазерного излучения на малых пространственных, а следовательно, и временных масштабах. В этом смысле тема диссертации соискателя, безусловно, является актуальной.

Во **введении** в диссертации освещена научная новизна и значимость проведенных исследований, перспективы их практического применения, представлен краткий обзор наиболее значимых работ в области взаимодействия лазерного излучения с алмазом.

Первая глава посвящена методикам проведенных исследований, в том числе, описанию экспериментальной схемы лазерного воздействия на алмаз и основных методов анализа структуры и свойств материала вoвремя и после лазерно-стимулированной модификации. При этом отметим, что часть использованных методов и методик оригинальна, например, метод измерения толщины лазерно-графитизированного слоя и др. Кроме того, важным в других методах, например, в случае время-разрешенной интерференционной микроскопии, являлась борьба с шумами – спекл-искажениями картины, вибрацией и пр., которая проводилась весьма изобретательно и способствовала существенному повышению достоверности результатов. Отметим также привлечение весьма информативных методов исследования поверхности: низкокогерентной интерферометрии и фотолюминесцентной микроскопии.

Вторая глава включает в себя описание экспериментов по нелинейной поляризации алмаза под действием фемтосекундного излучения. Приведен анализ процессов формирования электронного газа и электрон-фононного взаимодействия, приводящего к нагреву решетки алмаза, описано влияние режимов облучения на течение этих процессов. Полученные результаты позволили определить весьма важный для дальнейших объяснений и гипотез параметр взаимодействия - время жизни электронно-дырочной плазмы в

алмазе ~ 10 пс, что, в общем, укладывается в ожидаемую картину. Далее подробно исследованы механизмы нелинейного поглощения света в алмазе, приводящие к искажениям структуры пучка, при разных длительностях импульсов и на разных длинах волн.

В **третьей главе** представлены результаты многоимпульсной абляции алмаза при формировании графитизированного слоя на поверхности образца. Дано описание общепринятой модели «графитового поршня» по описанию многоимпульсной лазерной абляции и движению границы раздела двух сред: алмаз-графит. Приведены результаты исследования структуры и свойств поверхностного слоя графита, сформированного на поверхности алмаза после его абляции. Показана возможность изготовления дифракционных фазовых элементов для преобразования лазерного излучения с длиной волны 10.6 мкм.

В **четвертой главе** описаны наиболее значимые закономерности процесса лазерной наноабляции алмаза – процесса, впервые обнаруженного при участии автора диссертации - экстремально медленного поверхностного травления в воздушной среде при интенсивности излучения меньше порогов графитизации и абляции. Интересно отметить, что до этих работ абляция алмаза, минуя графитизацию его поверхности, считалась невозможной. Представлено влияние режимов лазерного облучения на скорость наноабляции алмаза. Дано описание моделей каскадной и параллельной активации атомов углерода на поверхности алмаза.

Пятая глава посвящена особенностям воздействия интенсивного лазерного излучения на алмаз, когда плотность энергии превышает порог графитизации. Рассмотрены два режима графитизации алмаза: режим полного разрушения решетки после первого импульса, режим накопления изменений в решетке за серию импульсов. Предложена и описана модель аккумуляционной графитизации алмаза под действием мощных лазерных импульсов.

В **шестой главе** рассмотрена возможность модификации решетки

алмаза на атомарном уровне при создании структурных дефектов. Исследованы процессы формирования NV центров на поверхности алмаза при нанооблации без существенного повреждения кристаллической решетки. Дано объяснение лазерно-стимулированному механизму образования NV центров.

В **заключении** обобщены результаты диссертационной работы.

В целом, диссертация В.В. Кононенко является цельной, полностью завершенной работой, написанной на актуальную тему и содержащей новые научные результаты, хорошо обоснованные и достоверные, и имеющие большую практическую ценность.

Отмечу следующие **замечания** по диссертационной работе:

1. Не совсем понятным остается механизм нанооблации – в этих условиях термин скорость нанооблации, типичная величина которой 10^{-7} нм/имп, что значительно меньше толщины монослоя, носит статистический характер, вуалирующий ее природу.
2. В диссертационной работе подробно исследованы процессы как поверхностной графитизации и нанооблации алмаза, так и объемной деградации структуры, в том числе с активацией NV центров. Однако, в приведенных результатах нет обобщения условий лазерного облучения и их связи с глубинами проникновения света и теплового фронта в алмаз. Например, как влияет степень многофотонного поглощения на толщину графитизированного / удаляемого слоя?
3. В подразделах 2.1 и 2.2 описана динамика нагрева алмаза фемтосекундными импульсами, а на рис. 2.1 и 2.3 приведены «интерференционные снимки, полученные при распространении фемтосекундного импульса в кристалле алмаза...». Однако, в режиме многофотонного поглощения глубина зоны теплового воздействия, а значит и самого импульса не должна превышать сотен нанометров, что много меньше расстояний, приведенных на рисунках (более 150 мкм).

Следовательно, на интерференционных снимках приведено не распространение самого импульса, а волна возмущения кристаллической решетки алмаза, вызванная его действием.

4. Следовало бы отметить, что значительная часть предложенных объяснений носит гипотетический характер, что, впрочем, объяснимо сложностью и новизной предмета исследований – это, как уже было указано, относится к режимам наноабляции, а также к механизмам аккумуляционной графитизации.

5. В тексте диссертации и автореферата присутствуют стилистические ошибки, например, стр. 6 «... под воздействием внешних воздействий ...», «3.2 Лазерная абляция как инструмент для микроструктурирования ...», встречаются жаргонные выражения, а также опечатки и ошибки (стр. 23,24 и др. диссертации, стр. 11 и др. автореферата, хотя в целом диссертация и автореферат написаны грамотным научным языком и в хорошем стиле, вполне понятно описывающем сложные явления.

Указанные недостатки не влияют на общую высокую оценку работы, не касаются ее сущности, новизны, практической значимости, обоснованности и достоверности выдвинутых научных положений .

Результаты исследований, полученные автором и приведенные в диссертации, являются новыми, а в некоторых случаях, просто пионерскими, и во многих отношениях не просто соответствуют, но и определяют мировой уровень.

Наиболее значимые результаты работы апробированы на российских и международных конференциях, а также опубликованы в рецензируемых изданиях. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа Кононеко Виталия Викторовича «Лазерно-стимулированные процессы на поверхности алмаза» соответствует паспорту специальности 01.04.21 – «Лазерная физика», по научной новизне и практической значимости приведенных результатов она представляет собой законченную научную и квалификационную работу.

