

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
**«Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
(ВлГУ)**

Институт прикладной математики и информатики, био- и нанотехнологий  
Кафедра физики и прикладной математики

Методические рекомендации по курсовому проектированию  
по дисциплине «Взаимодействие лазерного излучения с веществом»

для студентов ВлГУ, обучающихся по направлению  
200500.62 (12.03.05) «Лазерная техника и лазерные технологии»,

Составители:  
Абрамов Д.В.  
Давыдов Н.Н.

Владимир 2015

УДК 517.958:535.14  
ББК 22.343 (22.193)  
М54

**Методические** рекомендации по выполнению курсовых работ по дисциплине «Взаимодействие лазерного излучения с веществом» / Владим. гос. ун-т.; сост.: Д.В. Абрамов, Н.Н. Давыдов. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2015. – 40 с.

Содержат рекомендации по выполнению курсовой работы в рамках освоения дисциплины «Взаимодействие лазерного излучения с веществом». Предоставляют учащимся задания на выполнение курсовой работы и доводят до их сведения критерии оценки качества выполненной работы. Призваны помочь в освоении общих принципов взаимодействия лазерного излучения с веществом на примере решения конкретной теоретической, прикладной или исследовательской задачи, состоящей в выявлении отклика материала на воздействие лазерных пучков.

Предназначены для бакалавров IV курса направления 200500.62 (12.03.05) «Лазерная техника и лазерные технологии», а также для преподавателей и специалистов, повышающих квалификацию.

Ил. 47. Библиогр.: 11 назв.

УДК 517.958:535.14  
ББК 22.343 (22.193)

## Оглавление

1. Цель и задачи выполнения курсовой работы.....	4
2. Порядок выполнения курсовой работы.....	4
3. Темы курсовых работ.....	8
4. Основные требования к написанию курсовой работы.....	9
5. Критерии оценки курсовой работы.....	10
6. Список литературы.....	10
Приложение 1.....	12

## 1. Цель и задачи выполнения курсовой работы

Курсовая работа, являясь важным элементом освоения изучаемого курса, имеет целью развитие навыков исследовательской работы, использования полученных теоретических знаний, умения работать с научными литературными и электронными информационными источниками, делать на основе их анализа выводы и обобщения.

В задачи выполнения курсовой работы входит: углубление и систематизация полученных знаний по дисциплине «Взаимодействие лазерного излучения с веществом»; получение навыков сбора и обобщения практического материала; освоение принципов работы с первоисточниками; развитие умений применять полученные знания для решения конкретных научных и практических проблем.

Курсовая работа должна представлять законченную учебную работу, раскрывающую теоретические и практические проблемы избранной темы.

## 2. Порядок выполнения курсовой работы

При выполнении курсовой работы рекомендуется придерживаться следующей обобщенной последовательности работ:

- выбор темы;
- поиск и изучение литературы;
- составление плана работы;
- написание работы;
- обсуждение работы с руководителем;
- устранение выявленных недостатков;
- защита курсовой работы.

Следуя предложенной последовательности, на каждом из этапов рекомендуется придерживаться определенным правилам выполнения работ.

### Выбор темы.

Выбор темы курсовой работы осуществляется обучающимся самостоятельно, но не исключает консультации с курирующим преподавателем. Тема может быть выбрана из рекомендованного списка, предложенного в настоящих методических рекомендациях, а также другая по согласованию с научным руководителем. Тематика

предлагаемых курсовых работ, прежде всего, учитывает рабочую программу дисциплины «Взаимодействие лазерного излучения с веществом», а также наиболее общие разделы и перспективные направления лазерной физики, имеющие с ней неразрывную связь.

Исключается работа нескольких студентов над одной темой, так в данном случае становится невозможной объективная оценка результатов.

При выборе темы курсовой работы обучающимся предлагается ориентироваться на три варианта ее последующей разработки.

Во-первых, работы аналитической направленности, предполагающие обобщение имеющегося в свободном доступе научного материала по выбранной тематике. В данном случае источником информации может служить лекционный материал, но обязательно изучение и анализ как фундаментальных научных трудов по взаимодействию лазерного излучения с веществом (например [1,2]), так и текущих научных публикаций по выбранной тематике. В последнем случае необходимо обратиться к специализированным научным журналам и электронным изданиям, находящимся в свободном доступе.

Во-вторых, работы вычислительного характера, предполагающие на основании лекционного материала и рекомендуемой литературы (например, [3,4]) расчет или математическое моделирование параметров, характеризующих процессы взаимодействия лазерного излучения с веществом и анализ полученных результатов.

В-третьих, работы исследовательского характера, предполагающие выполнение экспериментальных исследований по тематике согласованной с научным руководителем, обработку их результатов, анализ и формирование научно-практических выводов. В этом случае формулировка темы полностью предоставляется студенту и руководителю его НИРС, однако она должна быть согласована преподавателем, курирующим дисциплину, так как необходимо обеспечить соответствие с задачами изучения взаимодействия лазерного излучения с веществом. Данный подход к выполнению курсовой работы имеет преимущество для студента, так как обеспечивает существенный задел для выполнения последующей выпускной квалификационной работы. Эффективность подобного подхода при закреплении материалов отдельных курсов образовательных программ наглядно представлена в работе [5]. Пример курсовой работы исследовательского характера, связанной с работой [6], приведен в Приложении 1.

### Поиск и изучение литературы.

На этапе поиска и изучения литературы следует использовать источники, указанные в рабочей программе курса и в списке дополнительной литературы, рекомендуемой для подготовки курсовой работы. Кроме того, очень большое значение имеет самостоятельный поиск книг, научных статей, электронных сообщений и других научных и технических публикаций, относящихся к тематике курсовой работы. Желательно, чтобы объемы используемого фундаментального и нового материала были сравнимыми.

Изучение источников позволяет определить текущее состояние выбранной для разработки в курсовой работе научной проблемы, ее последние достижения и перспективы развития, а значит перейти к следующему этапу – составлению рабочего плана курсовой работы.

### Составление плана работы.

Рабочий план работы составляется студентом самостоятельно, но согласовывается с руководителем. Рабочий план рекомендуется составлять в виде списка подлежащих проработке разделов. Он не должен быть коротким, так как в этом случае разделы охватывают слишком большие и недостаточно четко выраженные объемы работы. С другой стороны, план не должен быть избыточным. Следует помнить, что в рамках курсовой работе реально и, безусловно, достаточно рассмотреть и проработать 2-3 общих раздела. Названия и последовательность разделов рабочего плана должны отражать логику исследования темы курсовой работы. В процессе выполнения работы рабочий план может быть скорректирован.

### Написание работы.

На этапе написания работы следует помнить, что курсовая работа не может быть простой компиляцией найденного и используемого материала. Типичной ошибкой является ее формирование из фрагментов различных научных, учебных и технических публикаций. Курсовая работа должна быть завершенным учебно-научным материалом. Она должна отражать как известные данные, раскрывающие взаимосвязь между явлениями, так и содержать оригинальные части. В последнем случае подразумевается обобщение существующих знаний, обработка материалов исследований, расчеты или моделирование процессов и явлений, изложение собственного мнения по разрабатываемой проблеме, анализ полученных результатов и предложения по их использованию. При этом следует помнить, что курсовая работа является, прежде

всего, инструментом отражения и оценки качества освоения учащимся определенного этапа образовательной программы. В данном случае курса «Взаимодействия лазерного излучения с веществом».

#### Обсуждение работы с руководителем.

Выполнение курсовой работы, безусловно, является предметом личного творчества студента, но нельзя его реализовывать в полной изоляции. Прежде всего, студент должен помнить, что обсуждение работы с руководителем имеет целью обеспечить наибольшую эффективность выполнения работ и предотвратить возможные ошибки. Таким образом, этим этапом нельзя пренебрегать. Следует заметить, что как отдельный этап обсуждение работы с руководителем выделяется именно на завершающей стадии работы, когда подготавливается окончательный вариант, представляемый к защите. Однако, очевидно, данный элемент должен быть использован в течение всего периода подготовки курсовой работы, начиная с этапа выбора темы. Этап обсуждения работы с руководителем логично переходит в этап устранения выявленных недостатков.

#### Устранение выявленных недостатков:

Устранение недостатков должно производиться незамедлительно после их выявления. В противном случае не только теряется рабочее время, но и снижается эффективность корректировки работы вследствие исчезновения в памяти студента остроты предъявленных требований и поставленных задач. Последние должны фиксироваться письменно, но выполнение этого требования не может, как показывает практика, служить оправданием затягивания процесса устранения недостатков. Обсуждение работы с руководителем и устранение недостатков, как правило, не являются одноразовым элементом процесса выполнения курсовой работы. Это итерационный процесс, завершающийся появлением работы, достойной представлению к защите.

#### Защита курсовой работы.

Защита курсовой работы производится в рамках аудиторного занятия. На защите курсовой работы обучающийся представляет краткое изложение основного содержания работы и ее результатов. После представления курсовой работы студент должен быть готов к собеседованию по отдельным моментам работы и к ответам на дополнительные вопросы, как по теме работы, так и по всему курсу. Качество ответов на вопросы в значительной мере определяет оценку курсовой работы.

### 3. Темы курсовых работ

Перечень тем курсовых работ составлен на основании рабочей программы дисциплины «Взаимодействие лазерного излучения с веществом», а также наиболее общих и перспективных направлений в данной области науки и техники и имеет рекомендательный характер.

1. Механизмы поглощения и диссипации энергии в металлах.
2. Связь оптических постоянных с микрохарактеристиками металла.
3. Частотная зависимость поглотательной способности металла при различных видах нормального скин-эффекта.
4. Механизмы поглощения и диссипации энергии в полупроводниках.
5. Особенности межзонного поглощения.
6. Внутризонное поглощение света и зависимость поглотательной способности полупроводника от концентрации свободных носителей.
7. Кинетика фотовозбуждения полупроводника лазерным излучением.
8. Влияние диффузионно-рекомбинационных процессов на механизмы взаимодействия лазерного излучения с полупроводниками.
9. Поверхностные электромагнитные волны оптического диапазона.
10. Поверхностные плазмон-поляритоны на границе металла с диэлектриком.
11. Механизмы поглощения и диссипации энергии в диэлектриках.
12. Линейные режимы лазерного нагрева.
13. . Специфика нагрева и остывания материала при действии сверхкоротких лазерных импульсов.
14. Термомеханические эффекты; фазовые переходы в твердом состоянии; диффузионно-химические явления; эмиссионные процессы.
15. Основные особенности лазерной активации процессов аррениусовского типа.
16. Нелинейные режимы лазерного нагрева.
17. Обратные связи между оптическими и фотофизическими процессами при лазерном нагревании металлов и полупроводников.
18. Температурные зависимости поглотательной способности и коэффициентов объемного поглощения, скачки поглощения при плавлении для металлов и полупроводников.
19. Тепловая неустойчивость и стабилизация.



20. Термохимический механизм лазерного нагрева окисляющихся металлов на воздухе.
21. Механическое низкотемпературное разрушение хрупких материалов.
22. Общая характеристика механизмов лазерного разрушения.
23. Химические механизмы разрушения.
24. Высокотемпературные механизмы с участием испарения.
25. Поляритонный механизм формирования лазерно-индуцированного поверхностного рельефа.
26. Гидродинамический механизм лазерного разрушения.
27. Физические представления об оптическом пробое идеальных диэлектриков.
28. Обращение волнового фронта в системах адаптивной оптики.
29. Диодная накачка неодимовых твердотельных лазеров.
30. Диодная накачка иттербиевых твердотельных лазеров.
31. Диодная накачка эрбиевых твердотельных лазеров.

#### **4. Основные требования к написанию курсовой работы**

Основные требования к оформлению пояснительной записки курсовой работы устанавливают ГОСТ 2.105-95 ЕСКД и ГОСТ 2.106-96 ЕСКД. Общий объем пояснительной записки должен составлять не менее 1 п.л., т.е. примерно 16 страниц текста формата А4, набранного на компьютере шрифтом Times New Roman кеглем 12 с полуторным интервалом между строк.

Для курсовой работы рекомендовано следующее содержание пояснительной записки:

1. Титульный лист.
2. Формулировка задания на курсовую работу, (на бланке установленного образца).
3. Описание общего состояния проблемы в рамках выбранной темы.
4. Основная часть.
5. Заключение или выводы.
6. Библиографический список.

## 5. Критерии оценки курсовой работы

Основные критерии оценки курсовой работы вытекают из предъявляемых к ней требований.

Оценка курсовой работы производится на основании следующих критериев:

- качество содержания работы;
- умение работать с научной литературой;
- полнота решения поставленных задач;
- самостоятельность выполнения поставленных задач;
- грамотность и логичность изложения материала;
- качество оформления пояснительной записки.

По результатам защиты курсовой работы выставляется оценка. При неудовлетворительной оценке обучающийся обязан повторно довести курсовую работу до удовлетворительного уровня. Повторная защита работ должна быть проведена до начала сессии. Студенты, не сдавшие и не защитившие в срок курсовую работу, к сессии не допускаются.

## 6. Список литературы

1. Делоне, Н.Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом: курс лекций. / Н.Б. Делоне. – М.: Наука, 1989. – 280 с. – ISBN: 5-02-014056-2.

2. Делоне, Н.Б. Нелинейная оптика. / Н.Б. Делоне. – М.: Физматлит, 2003. – 64 с. – ISBN: 5-9221-0428-4.

3. Вейко, В.П. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. Силовая оптика. / В.П. Вейко, М.Н. Либенсон, Г.Г. Червяков, Е.Б. Яковлев. – М.: Физматлит, 2008. – 312 с. – ISBN: 978-5-9221-0934-5.

4. Яковлев, Е.Б. Методические рекомендации по выполнению практических заданий по курсу «Взаимодействие лазерного излучения с веществом». / Е.Б. Яковлев, Г.Д. Шандыбина. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. – 78 с.

5. Буяновская, Е.М. Методические рекомендации по выполнению исследовательских курсовых работ, научно-технологических практик и выпускных

квалификационных бакалаврских работ. / Е.М. Буяновская, С.А. Козлов, О.А. Мохнатова. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 99 с.

6. Гулая Е.Л. Исследование наноструктурирования поверхности тугоплавких металлов фемтосекундным лазерным излучением: Дипломная работа. – Владимир:ВлГУ, 2014. – 66 с.

7. Быков, В.П. Лазерная электродинамика. Элементарные и когерентные процессы при взаимодействии лазерного излучения с веществом. / В.П. Быков – М.: Физматлит, 2006. – 380 с.

8. Ахманов, С.А. Физическая оптика. / С.А. Ахманов, С.Ю. Никитин. – М.: Наука, 2004. – 654 с.

9. Сушкевич, Т.А. Математические модели переноса излучения. / Т.А. Сушкевич. – М.: Бинوم. Лаборатория знаний, 2006. – 661 с.

10. Либенсон, М.Н. Лазерно-индуцированные оптические и термические процессы в конденсированных средах и их взаимное влияние. / М.Н. Либенсон. – СПб.: Наука, 2007. – 423 с.

11. Глубокое каналирование и филаментация мощного лазерного излучения в веществе. / под ред. В. Я. Панченко. – М.: Интерконтакт Наука, 2009. – 266 с.

Пример курсовой работы

**1. Лазерное наноструктурирование поверхности металлов (Описание общего состояния проблемы в рамках выбранной темы)**

Один из эффектов взаимодействия лазерного излучения с материалами – это наноструктурирование их поверхности. Важную роль при этом играет лазерная абляция. Данный процесс может проводиться как в воздухе, так и в различных жидкостях. Чтобы на поверхности металла образовались наноструктуры, на нее направляют луч мощного лазера. Если лазер направить на металл в воздухе, то поверхность окисляется и распыляется, часть вещества просто сгорает, а поверхность вещества загрязняется оксидами. Если же направлять лазерный луч на металл в жидкости, то распыление мишени происходит в жидкость. Кроме того, поверхность не окисляется и ее свойства получают совсем другими.

Изучение обработанных вторым способом поверхностей под атомно-силовым микроскопом показывает, что на них образуются грибообразные выступы размером порядка 100 нанометров (см. рисунок 1 [1]). Так как размер их сопоставим с длиной световых волн видимого спектра, выступы изменяют условия поглощения света и, как следствие, окраску поверхности.

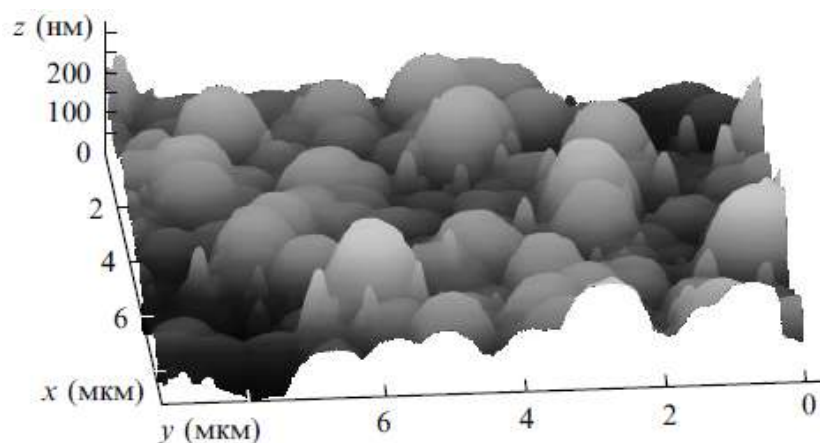


Рисунок.1. Нановыступы на поверхности металла

Так, например, при облучении дюралюминия 5-пикосекундными импульсами с

длиной волны 248 нанометров в воде сплав приобретает золотисто-желтую окраску. Примерно такую же окраску получает и серебро после лазерной абляции в воде 350-пикосекундными импульсами длиной волны 1,06 микрометра.

Исследователи выяснили, что подобным методом можно получить наноструктуры на всех металлах (в том числе и таких тугоплавких, как вольфрам и титан). В лаборатории под луч лазера помещались золото, серебро, титан, никель, кремний, медь, палладий, гольмий, тербий, а также селенид цинка и сульфид кадмия. Жидкости тоже варьировались: к примеру, использовали воду и традиционные органические растворители – ацетон, этанол, тетрагидрофуран.

Можно получать лазерной абляцией и раствор наночастиц металлов в жидкостях. При этом можно облучать как взвесь более крупных частиц, так и металлическую пластинку. В результате получаются растворы наночастиц самых разных цветов. При этом, если получать наночастицы химическими методами синтеза, то их раствор будет содержать примеси посторонних ионов, а раствор наночастиц, полученный абляцией в жидкостях при помощи лазера, не содержит посторонних ионов, что открывает возможность использования метода в медицине и биологии.

Наноструктурированные поверхности металлов имеют разнообразное применение. К примеру, они эффективно усиливают электромагнитное поле. Эффект можно использовать для изготовления различных сенсоров, способных отследить малые примеси металлов в различных средах. Кроме того, биологические клетки «охотнее» развиваются именно на наноструктурированных поверхностях. Следовательно, наноструктурирование медицинских сплавов титана или тантала может с успехом использоваться в протезировании. Использование же в этих целях лазерной абляции позволит получать наноструктуры с высокой степенью контроля и «подгонять» их под клетки, при этом сохранив химическую чистоту поверхности.

Исследования последних лет [2] показали, что наноструктурные поверхностные материалы с размером зерен менее 100 нм обладают улучшенными физико-механическими свойствами. Наноразмерные кристаллические зерна имеют не только высокую термическую стабильность, но и придают покрытиям сверхвысокую прочность и ударную вязкость. Использование лазерного наноструктурирования позволяет достичь здесь наилучших результатов.

Процесс облучения материала интенсивным импульсным лазерным пучком сопровождается изменением структурно-фазового состояния приповерхностной

области [3]. Тонкий расплав материала, присутствующий на поверхности мишени, после окончания импульса начинает охлаждаться с высокой скоростью, что приводит к значительному его переохлаждению и повышает вероятность зародышеобразования твердой фазы, следовательно, у поверхности резко увеличивается концентрация центров зародышеобразования, другими словами, происходит измельчение зерен. Размер зерен на поверхности после облучения может составлять сотни или даже десятки нанометров. Таким образом, облучение приводит к формированию поверхностных наноструктур, физические свойства которых могут заметно отличаться от свойств структур в крупнозернистом состоянии.

Этот метод называется методом «прямого лазерного наноструктурирования» (рисунок 2).

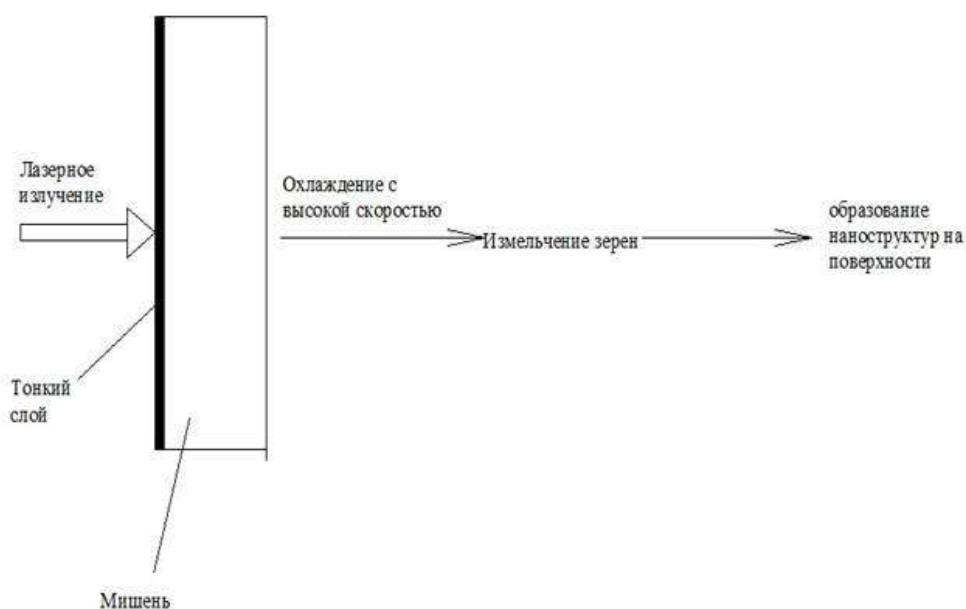


Рисунок 2. Сущность метода «прямого лазерного наноструктурирования»

Для наноструктурирования поверхности углеродосодержащих материалов еще используют метод «косвенного лазерного наноструктурирования»: формирование наноструктур на поверхности подложки, расположенной на некотором расстоянии от мишени (рисунок 3). При этом на подложке происходит осаждение продуктов абляции.

Геометрия процесса лазерной абляции и напыления, реализованного в представленных ниже экспериментах, описана в работе [4].

Сфокусированный лазерный пучок попадал на край графитовой мишени под небольшим ( $5-10^\circ$ ) углом к поверхности. Подложка из нержавеющей стали

располагалась параллельно оси лазерного пучка на фиксированном расстоянии (менее 0,5 мм) от мишени. Плазма, образующаяся при импульсном испарении материала мишени, имела видимый размер около 1 мм (по нормали к поверхности) и касалась поверхности подложки. Облучение мишени осуществлялось 300-пикосекундными импульсами твердотельного Nd:YAG-лазера. Энергия импульса составляла около 3 мДж при частоте следования импульсов 5 Гц. Излучение фокусировалось стеклянной линзой в пятно диаметром 40 мкм по уровню интенсивности  $1/e^2$ , так что интенсивность импульса достигала  $10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup>. Для увеличения площади напыления лазерный пучок двигался относительно подложки (и мишени) вдоль оси, перпендикулярной плоскости подложки. Вскоре после начала процесса напыления промежуток между подложкой и мишенью заполнялся взвесью испаренных углеродных микрочастиц, что приводило к инициированию низкого порога пробоя воздуха. Поскольку частота следования лазерных импульсов была невысокой, то даже маломощный вентилятор легко сдувает эту взвесь, что позволяет предотвратить нежелательный пробой.

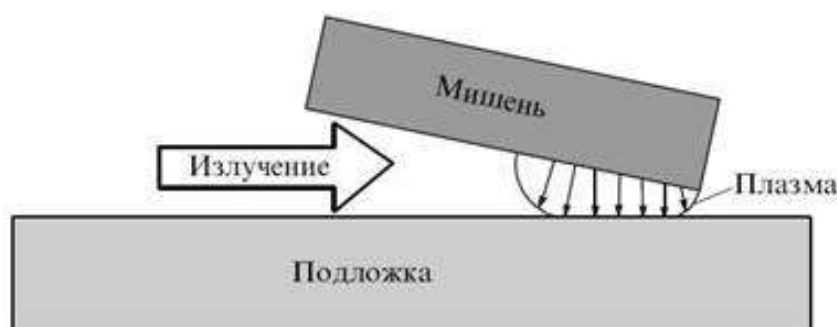


Рисунок 3. Метод косвенного лазерного наноструктурирования твердых тел

Зависимость размера зародыша от исходных параметров [5]:

$$r(t) = \frac{v_0 d \exp(-U/kT_k^2 h)}{\varepsilon U(U+h)} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{U \varepsilon t}{kT_k^2}\right) \right],$$

где:  $U$  – энергия активации перемещения атома;  $t$  – продолжительность лазерного импульса;  $k$  – постоянная Больцмана ( $k=1,38$ .Дж/К);  $T_k$  – температура фазового превращения;  $\varepsilon$  – средняя скорость охлаждения расплава;  $v_0$ -дебаевская

частота колебания атомов в переохлаждении жидкости;  $d$  – характерный размер;  $h$  – теплота фазового превращения на один атом.

Формирование наноструктур на поверхности разных твердых материалов было обнаружено при многократном воздействии одним пучком наносекундного ArF-лазера с длиной 193 нм. На рисунке 4 приведена схема метода «прямого лазерного наноструктурирования» [6].

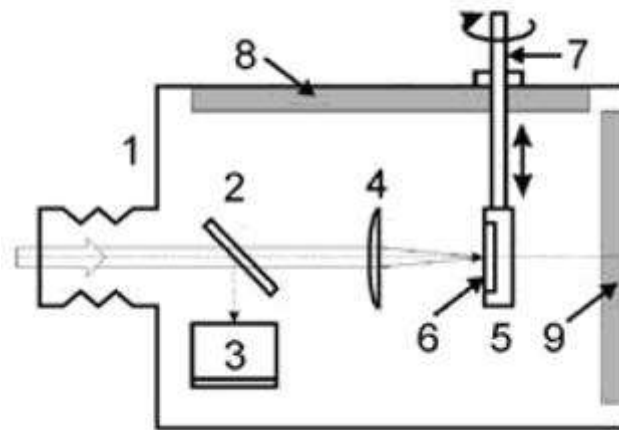


Рисунок 4. Схема рабочей камеры

В этой схеме 1 – корпус камеры; 2 – прозрачная пластина из флюорита для отвода части интенсивности пучка в измеритель энергии; 3 – измеритель энергии; 4 – фокусирующая линза; 5 – держатель образца; 6 – образец; 7 – герметичный ввод для перемещения держателя образца; 8 – прозрачное окно для наблюдения снаружи за перемещением образца в камере; 9 – задний съемный фланец камеры.

Анализ профилей облученных поверхностей проводился с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ). Рельеф на поверхности титана после облучения наносекундным ArF-лазером с длиной волны 193 нм представлен на рисунке 5.



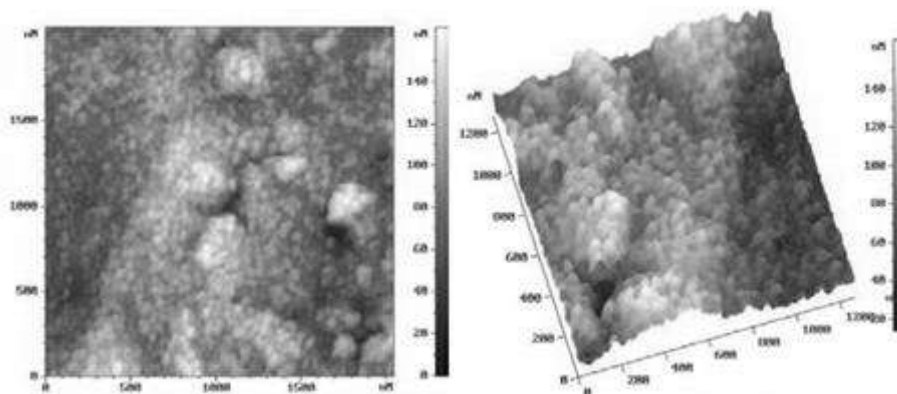


Рис. 5. 2D и 3D рельеф на поверхности титана после облучения наносекундным ArF-лазером с длиной волны 193 нм

Отдельное внимание уделяется наноструктурированию тугоплавких металлов. Так в работе [7] рассмотрены особенности микро- и наноструктурирования поверхности вольфрама под действием серии импульсов фемтосекундного излучения ( $\lambda=800\text{нм}$ ,  $\tau=66\text{ фс}$ ). На рисунке 6 приведены характерные области разрушения поверхности вольфрама под действием серии импульсов излучения, для плотности энергии  $Q=0.17\text{ Дж/см}^2$ ,  $N=2000$ . Здесь  $N$  – количество импульсов воздействующего излучения. На рисунке 6а видны периодические микроstructures, с характерным масштабом порядка  $d\sim\lambda\approx 500\text{ нм}$ , формирование которых связано с интерференцией падающего излучения с поверхностными плазмонами (ПП), а на рисунке 6б – виден периодический рельеф с характерным масштабом 30 нм, ранее не наблюдавшийся в экспериментах с металлами. Хотя основные параметры периодического микрорельефа (период, ориентация по отношению к вектору поляризации падающего излучения) совпадают с предсказываемыми поляритонной моделью, есть определенные трудности в выполнении условий существования ПП на границе вольфрам-воздух.

Условие существования поверхностных плазмонов для границы раздела вольфрам-воздух на длине волны воздействующего излучения  $\lambda$  [8]:

$$\text{Re } \varepsilon(\lambda=0,8\text{мкм}) < -1.$$

Из формулы и данных таблицы 1 видно, что на длине волны лазерного излучения условие существования ПП для границы раздела вольфрам-воздух не выполняется.

Таблица 1

Спектральная зависимость оптических постоянных вольфрама [9]

$\lambda$ , мкм	$-\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$	n	k
1,06	3.25	2.1	3.00	3.5
0,827	-4.33	1.94	3.48	2.79
0,62	-4.61	2.08	3.6	2.89

Следовательно, для этой границы раздела поверхностные плазмоны не должны существовать и возбуждаться. Однако экспериментальные результаты по формированию лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур (ППС) прямо указывают на возбуждение ПП и их интерференцию с падающей волной.

Следовательно, существуют дополнительные условия существования ПП. Во-первых, при значительном отрыве электронной температуры от фононной в двухтемпературной модели может, в многополостной модели оптических свойств металла, произойти перераспределение концентрации электронов по двум зонам, так что изменится эффективная результирующая плазменная частота металла.

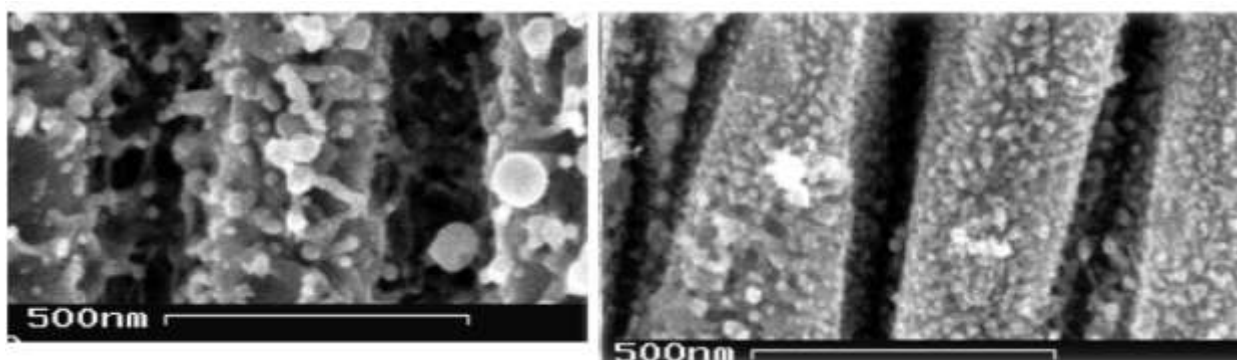


Рисунок 6. Характерная область поверхности вольфрама, облученная фемтосекундными импульсами с  $Q=0.44$  Дж/см<sup>2</sup> а) центральная ; б) периферийная область.

Действительно, вольфрам принадлежит к группе хрома, с шестью валентными электронами в атомах этих металлов. Его поверхность Ферми состоит из замкнутых полостей (фигур) четырех типов. Каждый тип полостей, или «листов» поверхностей Ферми вносит свою долю в суммарную плазменную частоту, которая, таким образом, определяется группами носителей тока с разными микрохарактеристиками. Полосы межполостных переходов металлах группы хрома наиболее широка для вольфрама, а переходы в вольфраме начинаются с энергий порядка 1 эВ. Отличие величины  $\varepsilon_1$  от -1

не столь значительно для  $\lambda=0.8$  мкм, что с учетом указанных обстоятельств может привести к выполнению условия существования поверхностных плазмонов за счет разогрева поверхности высокоинтенсивным лазерным излучением. Вторая возможность заключается в наличии в составе естественных покровных окислов вольфрама соединений с кислородом различной валентности, в частности,  $WO_2$ , обладающий металлическими свойствами (металлический окисел). Свойства таких окислов зависят от стехиометрии, но недостаточно изучены. Наличие металлических окислов на вольфраме было также косвенно подтверждено в наших экспериментах с излучением  $\lambda=10,6$  мкм.

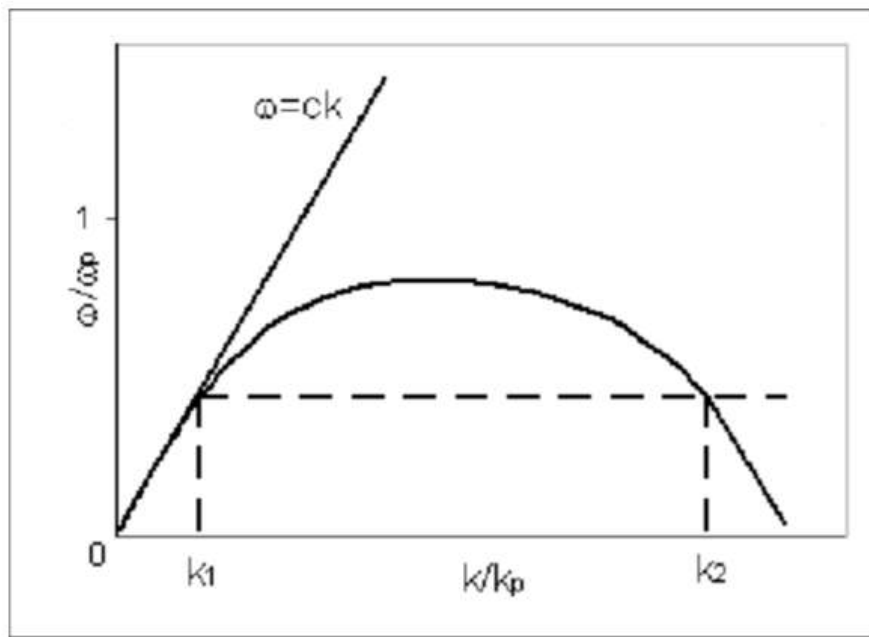


Рисунок 7. Типичная дисперсионная кривая поверхностных плазмон-поляритонов плоской модельной слоистой структуры металл-окисел для случая контакта металла с  $\text{Re}\epsilon(\omega) \leq -1$  и воздуха [10].

Как показывают результаты модельных расчетов дисперсионного соотношения для ПП в среде с экспоненциально изменяющейся диэлектрической проницаемостью металла [10] или в слоистой среде в случае, если на поверхности металла выполняется соотношение  $\text{Re}\epsilon(\omega) \sim -1$ , дисперсионная зависимость имеет вид кривой с максимумом, с восходящей и ниспадающей ветвями, см. рисунок 7. Для ниспадающей ветви с отрицательной дисперсией характерны большие значения волновых чисел,  $k_{s2} \sim (10 - 10^2)k_0$ . При нормальном падении излучения волновое число решетки, сформированной за счет интерференции поверхностных плазмонов с падающей волной, есть  $g = k_{s2}$ .

Величина периода мелкомасштабной решетки  $d_2 = 2\pi/k_{s2} = 28$  нм. Заметим, что при воздействии серии фс импульсов лазерного излучения с плотностями мощности  $q \leq 10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup> часть металла испаряется, окисляется в атмосфере воздуха и осаждается на поверхности  $W$  в виде тонкой окисной пленки нестехиометрического состава и пониженной валентности металла (за счет обеднения приповерхностного слоя  $W$  кислородом).

В качестве исходных неровностей рельефа поверхности для возбуждения волн с отрицательной дисперсией (волны в левой среде) с большими величинами  $k_s$  дополнительно следует рассматривать характерные пространственные масштабы  $s \sim 10$  нм. Источниками возбуждения этих поверхностных плазмонов являются нанорельеф поверхности и наночастицы материала, образующиеся на начальных стадиях наноструктурирования поверхности. Резонансные нанорешетки, сформированные при их интерференции с падающим излучением, обеспечивают дополнительный канал поглощения падающего лазерного излучения, при возбуждении ПП и их диссипации в металле. ПП в левой среде, возбуждаемые объемным излучением, обладают большими коэффициентами затухания. Нагретая поверхность наноструктурированного  $W$  обладает дополнительным каналом для излучения, через трансформацию ПП на нанорешетках.

Таким образом, ПП с большими волновыми векторами приводят к формированию мелкомасштабного упорядоченного нанорельефа на поверхности  $W$  и создают дополнительный канал увеличения эффективной поглощательной способности ( $A_{эфф}$ ) его поверхности. Согласно принципу Кирхгофа, за счет этого рельефа дополнительно увеличивается и излучательная способность поверхности  $W$ .

Таблица 2

Зависимость периода ППС в различных областях зоны облучения поверхности  $W$  с  $Q=0.44$  J/см<sup>2</sup> на воздухе (нормальное падение излучения)

Число импульсов	Период ППС, мкм	
	Центральная область	Периферийная область
40	0.56	-
100	-	-
200	0.51	-
400	0.50	0.46
800	0.47	0.48

Обычно период микроструктур, образующихся при воздействии лазерного излучения на металлы в рамках поляритонной модели, имеет вполне определенную величину (здесь мы не рассматриваем угловую зависимость и считаем, что свет падает по нормали к поверхности), определяемую дисперсией ПП. Особенностью рассматриваемого случая является обнаружение плавного изменения периода структур  $d$  на поверхности, от значений, практически равных длине волны воздействующего излучения  $\lambda$  ( $d=\lambda/\eta$ ), до величин  $d\sim(0.5-0.7)\lambda$  (что соответствует величине  $\eta\approx 2$  – уменьшению фазовой скорости поверхностного плазмона почти в два раза по сравнению с исходной поверхностью). Изучение величины периода микрорельефа показало его хорошую корреляцию со степенью наноструктурированности поверхности. Поэтому мы связываем изменение величины  $\eta$  с изменениями поверхностного слоя металла, который, видимо, должен описываться уже не диэлектрической проницаемостью, а основываться на рассмотрении набора металлических наноструктур различной формы, в первом приближении, невзаимодействующих. Заметим, что рассматриваемая наноструктурированная поверхность существенно отличается от наноструктурированных поверхностей металлов, получаемых путем пластической деформации – при этом существенно уменьшается характерный размер зерна, изменяются механические и электрические свойства.

Отметим, что в величине  $\eta$  содержится информация об усредненных оптических свойствах поверхностного слоя. Измерение комплексной величины волнового числа ПП рассматривалось как метод определения оптических свойств поверхности металла, наряду с измерениями поглощательной способности поверхности.

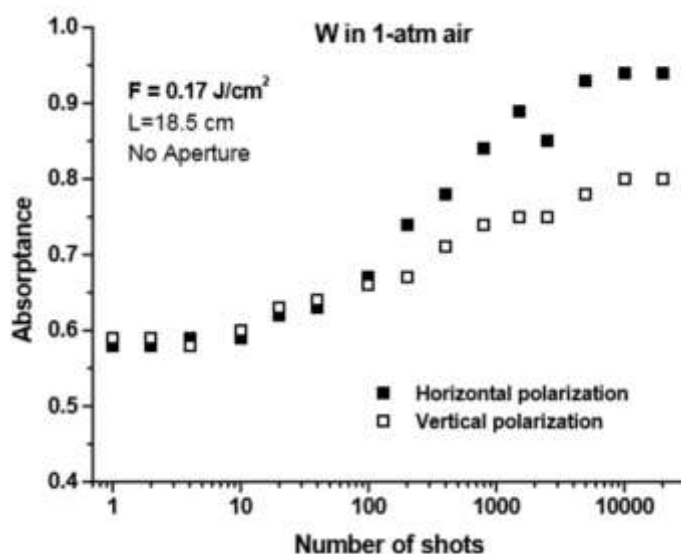


Рисунок 8. Зависимость эффективной поглощательной способности поверхности вольфрама от количества облучающих импульсов  $N$ .

На рисунке 8 приведена экспериментальная зависимость величины  $A_{\text{эфф}}$  вольфрама, подвергающегося воздействию серии импульсов фемтосекундного излучения в атмосфере воздуха. По аналогии с воздействием фс излучения на Au и Pt, наблюдаются сильные изменения исходной величины  $A$  за счет ее микро и наноструктурирования, идущего на начальном этапе воздействия излучения ( $N \sim 110$ ,  $Q = 0.17 \text{ Дж/см}^2$ ), обеспечивает максимальный рост поглощательной способности порядка 0.14. Максимальный вклад, даваемый резонансными микроструктурами, можно оценить как 0.17, см. график рисунке 8.

Остальной прирост, порядка (0.06 – 0.1) видимо, приходится на поглощение за счет многократных переотражений в поверхностном слое. При этом процессы структурирования поверхности с двумя существенно различными пространственными масштабами не являются независимыми. Действительно, образование наноструктур обеспечивает наличие локальных центров, на которых осуществляется рассеяние лазерного излучения, в том числе в цилиндрические поверхностные плазмоны и диссипация энергии последних в металле. На этом этапе образуются промежуточные ППС, постепенно преобразующиеся в линейный резонансный микрорельеф. Соотношение вкладов в эффективную поглощательную способность изменяется в

зависимости от плотности энергии излучения.

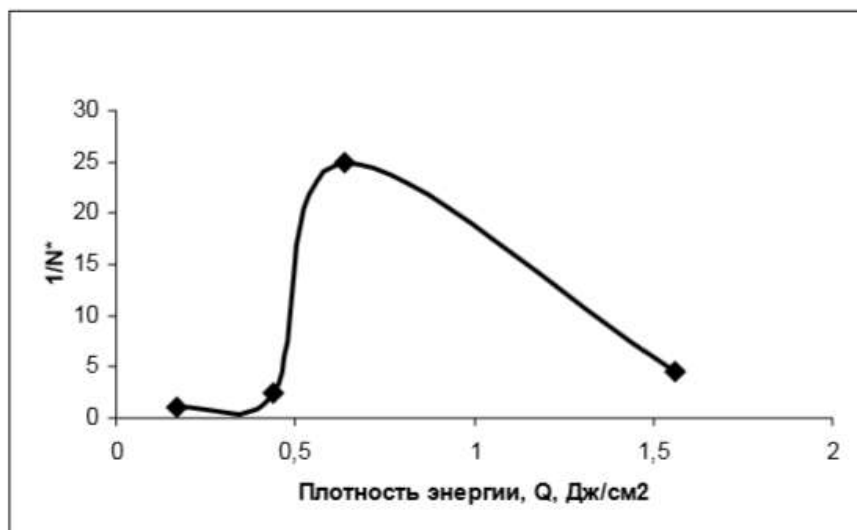


Рисунок 9. Зависимость скорости нарастания периодических резонансных микроструктур ( $\sim 100/N^*$ ) от плотности энергии воздействующего излучения  $Q$

Экспериментальный график на рисунке 9 построен исходя из данных по зависимости пороговой величины числа импульсов  $N^*$ , необходимых для формирования ППС, от  $Q$ . (Здесь  $N^*$  - число импульсов, принимаемое за начало формирования микроструктур, позволяющее при калориметрических измерениях обнаружить анизотропию поглощательной способности – разницу в поглощении р- и s-поляризованного излучения.) Величина  $1/N^*$  характеризует скорость формирования ППС. Из рисунка 9 следует, что, начиная с  $Q=0,17$  Дж/см<sup>2</sup> и вплоть до  $Q=0,64$  Дж/см<sup>2</sup> наблюдается сверхлинейное увеличение скорости формирования резонансных микроструктур, а при больших плотностях энергии – быстрый спад. Сверхлинейный рост связан со сверхлинейной зависимостью высоты микрорельефа и величины коэффициента преобразования в ПП с увеличением  $Q$ , а быстрый спад обусловлен увеличением вклада радиационных потерь в затухание ПП на существенно более шероховатой поверхности, образующейся при повышенных величинах  $Q$ .

## 2. Наноструктурирование поверхности молибдена и вольфрама при воздействии фемтосекундного лазерного излучения

### 2.1. Описание условий и средств экспериментальных исследований

В качестве объектов для экспериментального исследования взаимодействия фемтосекундного лазерного излучения с тугоплавкими металлами были использованы образцы из вольфрама и молибдена. Следует заметить, что группа тугоплавких металлов не велика. В нее входят ниобий, вольфрам и молибден. Ниобий является достаточно трудно доступным материалом, поэтому для исследований были выбраны два последних металлов.

Экспериментальные образцы из вольфрама представляют собой пластины со следующими размерами: длина 10 мм, ширина 2 мм и толщина 1 мм. Экспериментальные образцы из молибдена имеют вид диска диаметром 10 мм и толщиной 2 мм.

Обработка поверхности стеклоуглерода осуществлялась излучением фемтосекундной лазерной системы ТЕТА-10 с Yb:KGW активной средой. Общий вид фемтосекундной лазерной установки, примененной при проведении экспериментальных исследований приведен на рисунке 10.



Рисунок 10. Фемтосекундная лазерная система ТЕТА-10

Схема воздействия приведена на рисунке 11. Параметры воздействия: длина



волны излучения  $\lambda = 1029$  нм, длительность импульса излучения  $\tau = 300$  фс, частота повторения импульсов  $f = 10$  кГц, энергия в импульсе  $\varepsilon = 150$  мкДж. Поляризация лазерного излучения – линейная. Лазерное излучение фокусировалось на поверхность образцов в пятно с диаметром 50 мкм. Обработка поверхности образцов производилась в атмосферном воздухе (рис. 11а) и среде жидкого азота, который покрывал их поверхность слоем с толщиной до 5 мм (рис. 11б).

Лазерное воздействие на материалы осуществлялось пучком, перемещающимся по поверхности образцов со скоростью 10 мм/с. Расстояние между центрами линий лазерной обработки 100 мкм.

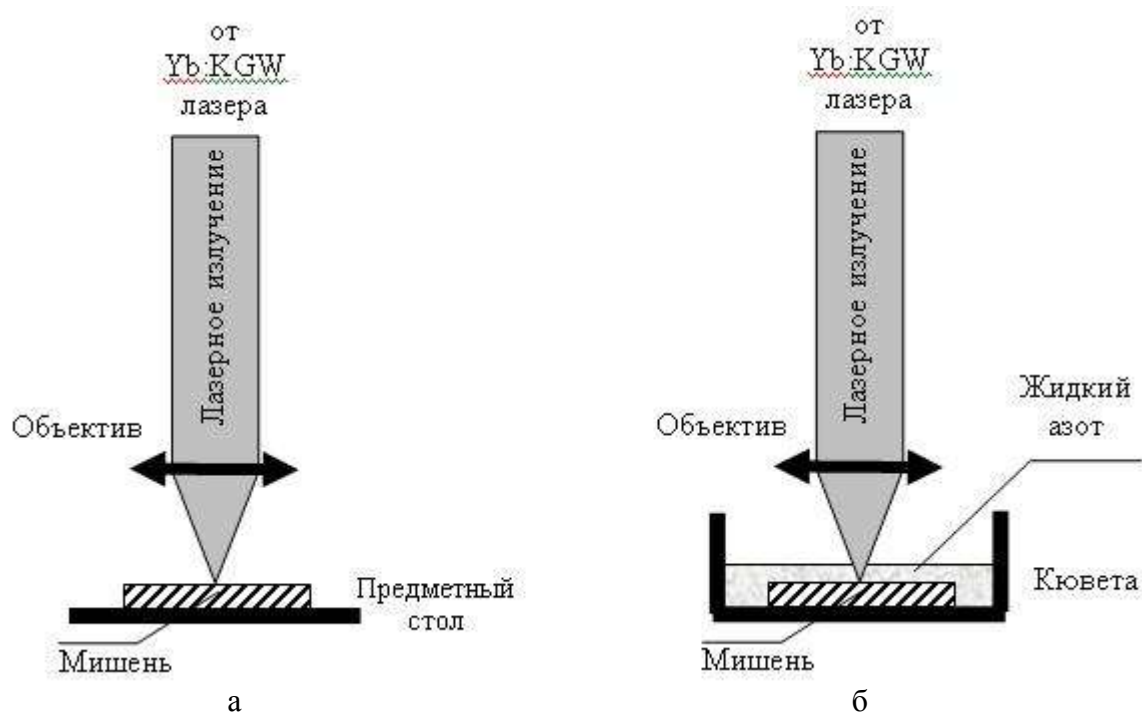


Рисунок 11. Общая схема воздействия лазерного излучения на мишень: а – в атмосферном воздухе; б – в среде жидкого азота

Исследование сформированных под действием фемтосекундного лазерного излучения наноструктурированных слоев производилось на основе РЭМ изображений, то есть изображений, полученных при помощи растрового электронного микроскопа Quanta 200 3D (рисунок 12).

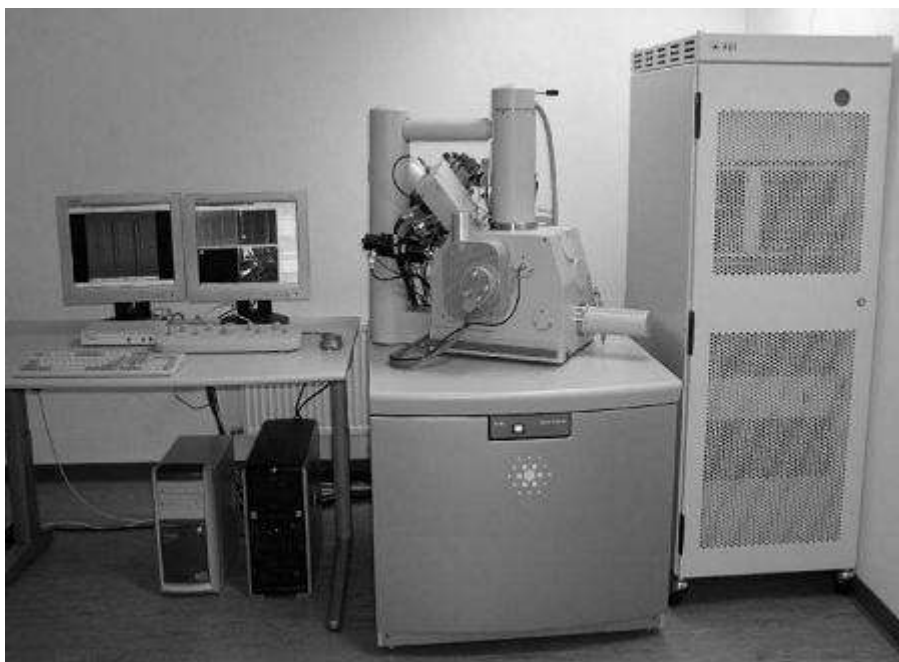


Рис. 12. Растровый электронный микроскоп Quanta 200 3D

## 2.2. Лазерное наноструктурирование поверхности молибдена в среде атмосферного воздуха

Общий результат обработки молибденового образца фемтосекундным лазерным излучением на воздухе заключается в формировании на его поверхности модифицированного слоя. Этот слой представляет собой систему квазипериодических протяженных линейчатых структур (рисунок 13).

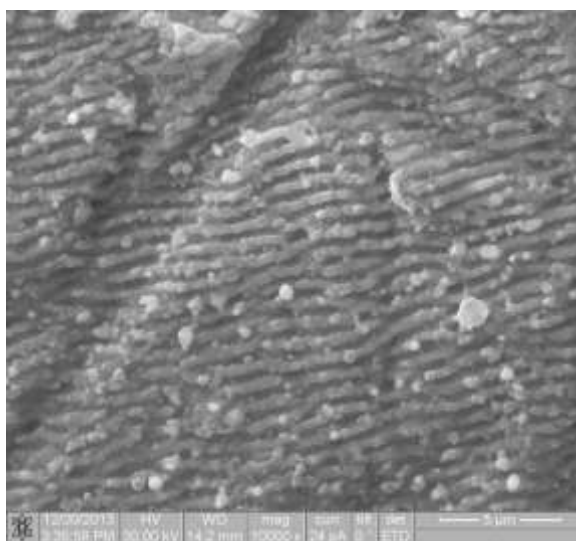


Рисунок 13. Общий вид модифицированной фемтосекундным лазерным излучением поверхности молибдена

Морфологические характеристики сформированных под действием фемтосекундного лазерного излучения структур следующие: ширина структур около 400 нм, расстояние между структурами также около 400 нм (рисунок 14). Таким образом, период линейчатой системы структур составляет величину около 800 нм.

Общий вид микрорельефа поверхности молибдена, сформировавшегося под действием фемтосекундного лазерного излучения, имеет похожий характер и близкие пространственные характеристики по сравнению с результатами лазерного модифицирования поверхности других материалов, приводимыми в научной печати, а также полученными в рамках выполнения на кафедре Физики и прикладной математики ВлГУ выпускных квалификационных работ аналогичного направления (см. например [11]).

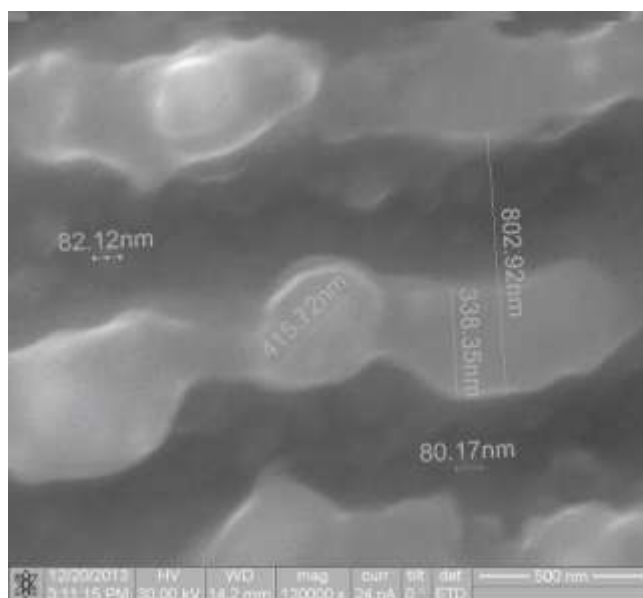


Рисунок 14. Морфологические характеристики сформированных под действием фемтосекундного лазерного излучения структур на поверхности молибдена

Таблица 3

Морфологические характеристики рельефа, сформированного при лазерной обработке на поверхности материалов

Материал	Латунь	Сталь	Титан	Молибден
1	2	3	4	5
Ширина структур, нм	700	600	600	400
Расстояние между структурами, нм	100	200	200	400
Период структур, нм	800	800	800	800

В рассмотренной для сравнения работе [11] были получены линейчатые квазипериодические структуры на поверхности латуни, стали (Ст3) и титана (рисунок 15). Морфологические характеристики полученных структур представлены в таблице 3, в пятый столбец которой добавлены значения результатов, полученных в настоящей работе.

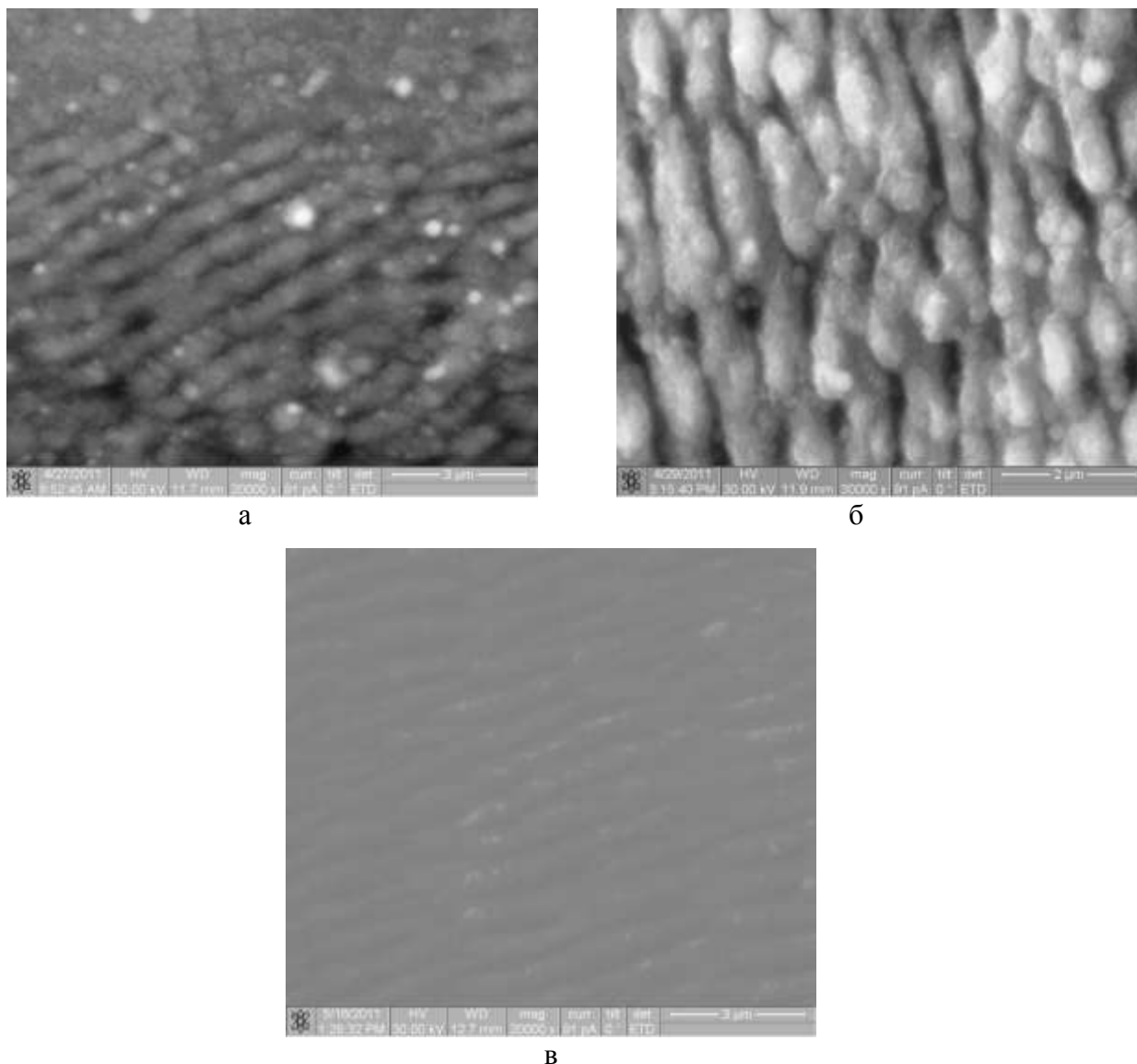


Рисунок 15. РЭМ изображение рельефа поверхности экспериментальных образцов после обработки фемтосекундным лазерным излучением:

а – латунь, б – сталь, в – титан [11].

Анализ результатов обработки фемтосекундным лазерным излучением поверхности различных материалов показывает, период формируемых линейчатых структур остается постоянным (800 нм). Это еще раз подтверждает прямую связь

данной характеристики лазерно-индуцированных структур с длиной воздействующего лазерного излучения. Все результаты получены при обработке поверхности материалом при помощи фемтосекундной лазерной системы ТЕТА-10 с Yb:KGW активной средой (длина волны излучения 1029 нм). Ширина линейчатых структур изменяется от наибольшей величины у латуни до наименьшей у молибдена. Такая тенденция может быть связана с такой характеристикой рассматриваемых материалов, как температура плавления (см. таблицу 4).

Таблица 4

Температура плавления материалов, подвергнутых обработке фемтосекундным лазерным излучением

Материал	Латунь	Сталь	Титан	Молибден
1	2	3	4	5
Температура плавления, °С	900	1500	1668	2620
Ширина структур, нм	700	600	600	400

Второй отличительной особенностью сформированных под действием фемтосекундных лазерных импульсов структур на поверхности молибдена является характерный оплавленный характер линейчатых структур. В случае лазерной обработки других материалов поверхностный рельеф структуры спекшихся наночастиц.

Причиной такого существенного отличия в результатах лазерной обработки поверхности образцов является достаточно низкая температура плавления оксида молибдена, а именно 795 °С. В рассматриваемом эксперименте обработка молибдена фемтосекундным лазерным излучением осуществлялась в естественных условиях. Аналогично получен лазерно-индуцированный поверхностный рельеф при лазерной обработке материалов сравнения. Очевидно, что в присутствии атмосферного кислорода и при высокой температуре поверхностные структуры будут формироваться в виде оксидов обрабатываемых металлов или преобладающих элементов в сплавах. Оксиды, формируемые в экспериментах сравнения, имеют значительно более высокие температуры плавления: оксид меди – 1242 °С, оксид железа – 1566 °С и оксид титана – 1825 °С.

Именно низкая температура плавления оксида молибдена определяет характер неровностей образующих линейчатых структур, формируемых на поверхности образца под воздействием фемтосекундного лазерного излучения. в отличие от спекшихся

структур регистрируется более сильное изменение ширины линейчатой структуры (рисунок 16). На расстоянии, не превышающем 2 мкм ширина линейчатой структуры изменяется в пределах от 100 нм до 400 нм.

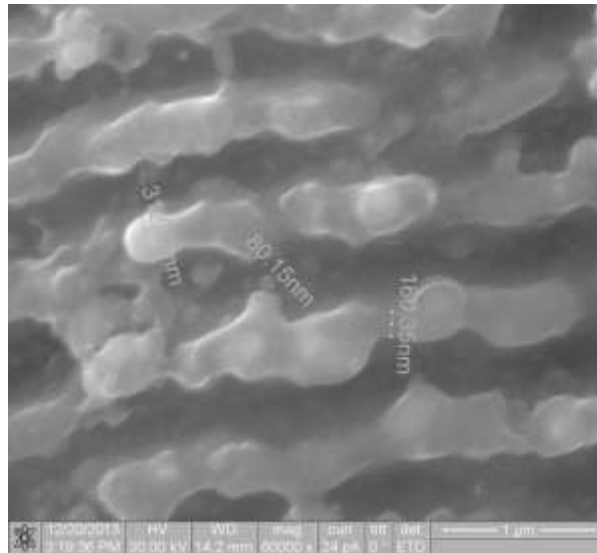


Рисунок 16. Вариации ширины линейчатых структур оксида молибдена

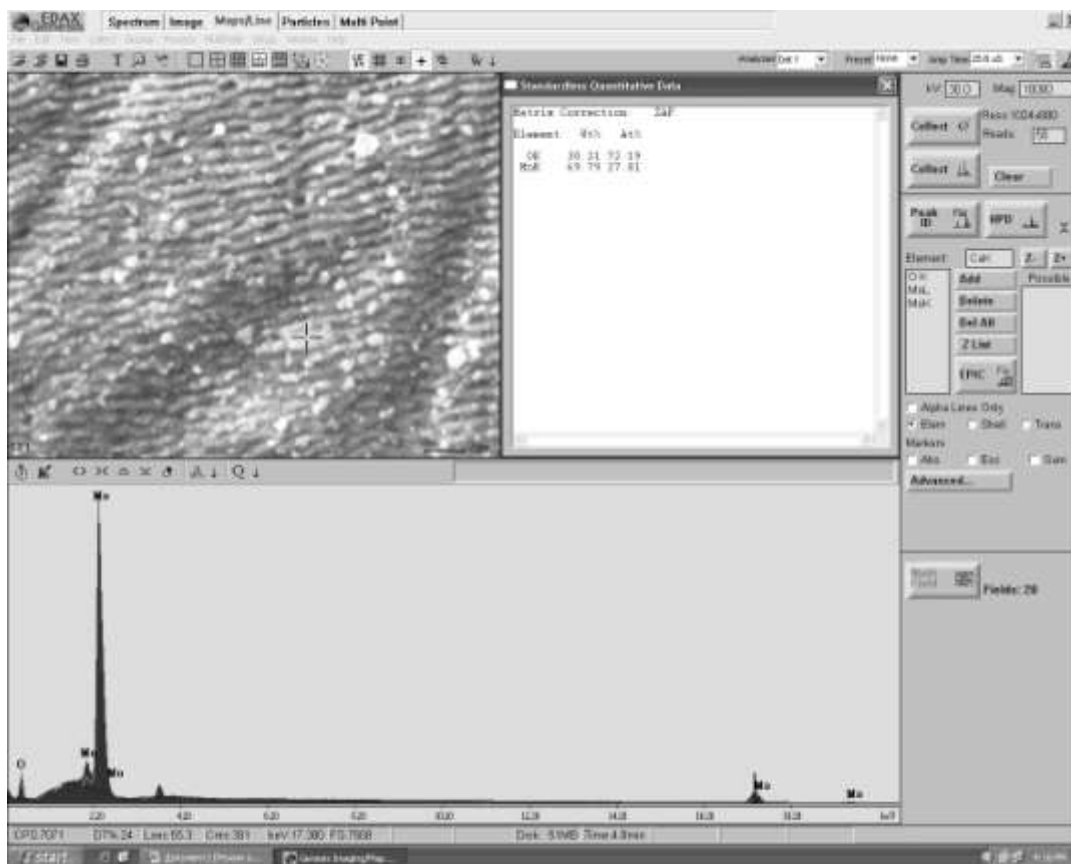


Рисунок 17. Элементный анализ структур, формируемых на поверхности молибдена при воздействии фемтосекундного лазерного излучения на воздухе

В вариациях ширины лазерно-индуцированных полос оксида молибдена по нашему мнению, проявляется тенденция сплавления изначально формируемых структур.

Несмотря на то, что в присутствии атмосферного кислорода и при высокой температуре структуры должны формироваться в виде оксида молибдена, была поведена проверка элементного состава поверхностного слоя при помощи системы EDAX растрового электронного микроскопа Quanta 200 3D. Результаты анализа приведены на рисунок 17.

Элементный анализ лазерно-индуцированных структур показал, что они в основном состоят из оксида молибдена  $\text{Mo}_2\text{O}_5$ .

### **2.3. Лазерное наноструктурирование поверхности молибдена в среде жидкого азота**

Общий характер результата обработки молибденового образца фемтосекундным лазерным излучением в среде жидкого азота также проявляется в формировании на его поверхности модифицированного слоя в виде системы квазипериодических протяженных линейчатых структур (рисунок 18).

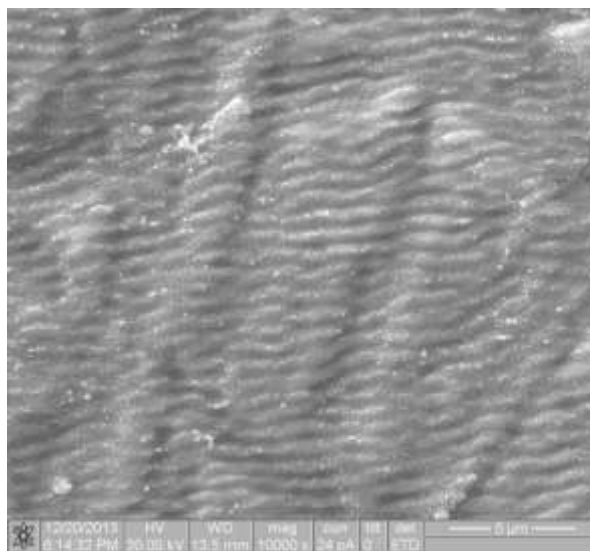


Рисунок 18. Общий вид модифицированной фемтосекундным лазерным излучением поверхности молибдена в среде жидкого азота

Морфологические характеристики структур, сформированных на поверхности молибдена под действием фемтосекундного лазерного излучения в среде жидкого

азота, следующие: ширина структур около 400 нм, расстояние между структурами около 300 нм (рисунок 19). Таким образом, период линейчатой системы структур составляет величину около 700 нм.

В отличие от результатов лазерной обработки молибдена на воздухе линейчатые структуры при лазерном воздействии на поверхность образцов в среде жидкого азота формируются не в результате сплавления, а за счет спекания исходных наночастиц (рисунки 19, 20).

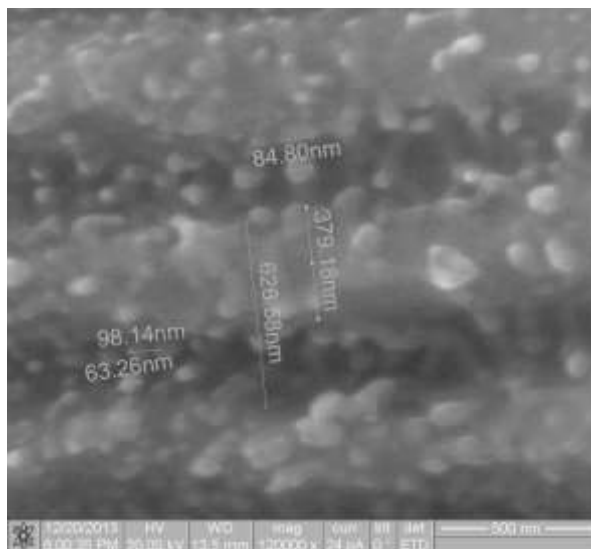


Рисунок 19. Морфологические характеристики структур, сформированных на поверхности молибдена под действием фемтосекундного лазерного излучения в среде жидкого азота

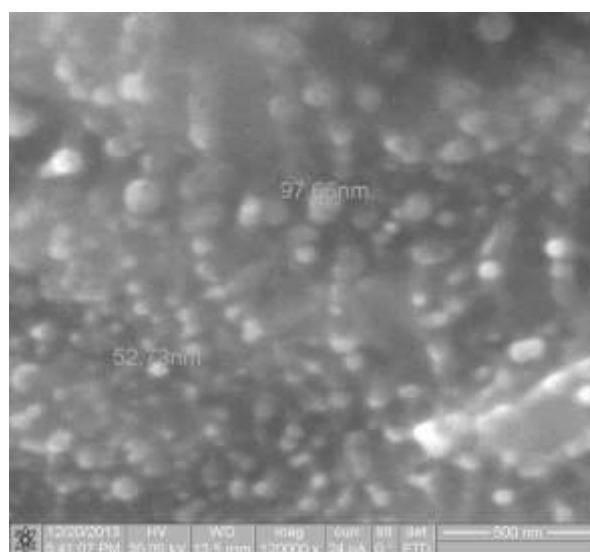


Рис. 20. Характерные размеры наночастиц, формирующих линейчатых микрорельеф на поверхности молибдена



Оценка характерных размеров наночастиц, при спекании которых формируются линейчатые структуры, показала, что их средние значения лежат в диапазоне от 50 нм до 100 нм (рисунок 20).

Элементный анализ лазерно-индуцированных структур показал, что они в основном состоят из нитрида молибдена MoN (рисунок 21).

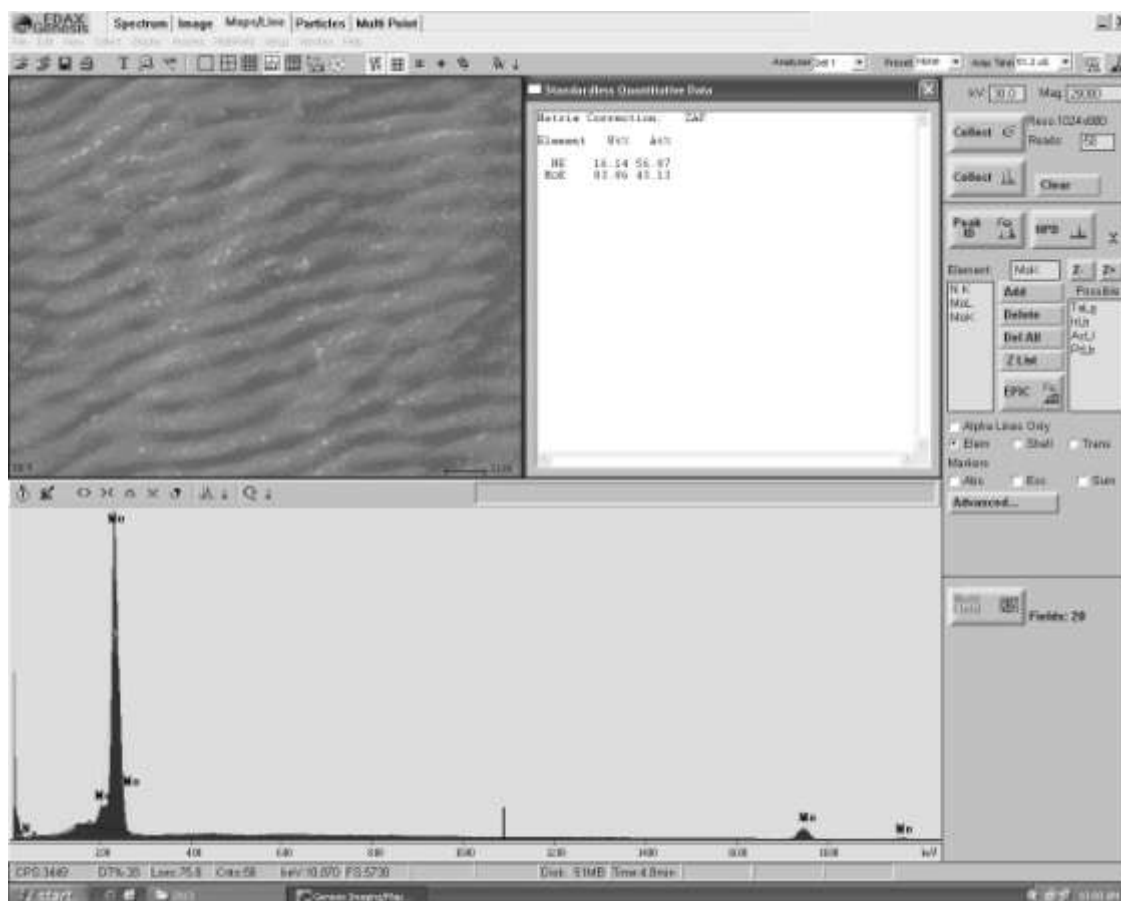


Рисунок 21. Элементный анализ структур, формируемых на поверхности молибдена при воздействии фемтосекундного лазерного излучения в среде жидкого азота

#### 2.4. Лазерное наноструктурирование поверхности вольфрама в среде атмосферного воздуха

Общий характер результата обработки вольфрамового образца фемтосекундным лазерным излучением в среде атмосферного воздуха показан на рисунок 22. Очевидно проявляется формирование на его поверхности модифицированного слоя в виде системы квазипериодических протяженных линейчатых структур.

Морфологические характеристики структур, сформированных на поверхности

вольфрама под действием фемтосекундного лазерного излучения в среде атмосферного воздуха, следующие: ширина структур около 400 нм, расстояние между структурами также около 400 нм (рисунок 23). Таким образом, период линейчатой системы структур составляет величину около 800 нм.

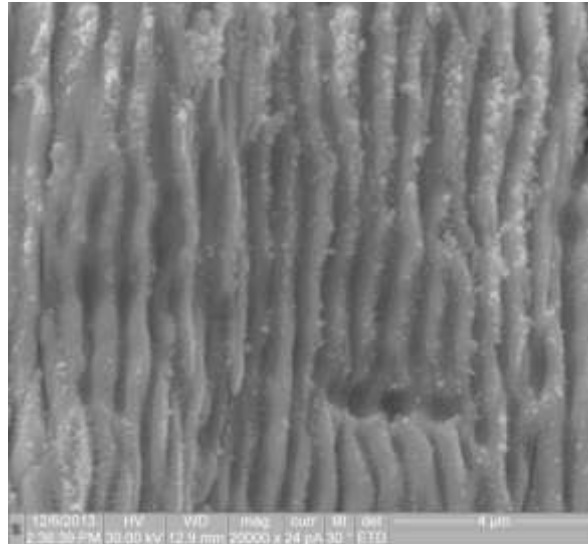


Рисунок 22. Общий вид модифицированной фемтосекундным лазерным излучением поверхности вольфрама в среде атмосферного воздуха

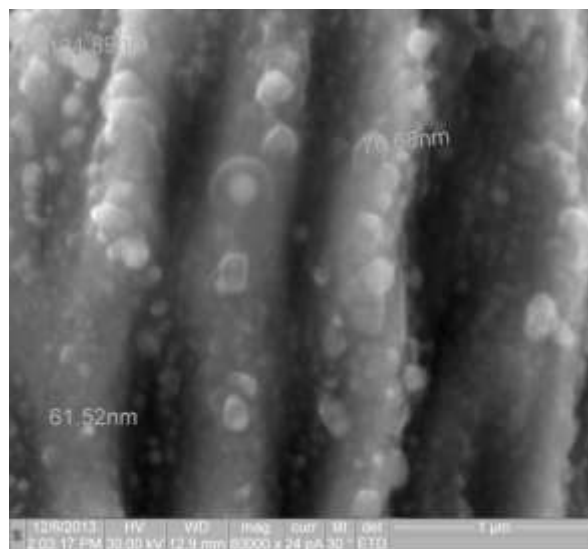


Рисунок 23. Морфологические характеристики структур, сформированных на поверхности вольфрама под действием фемтосекундного лазерного излучения в среде атмосферного воздуха

Зарегистрированные линейчатые структуры очевидно формируются в результате

спекания исходных наночастиц. Это объясняется достаточно большой температурой плавления оксида вольфрама (1473 °С). Она значительно превышает температуру плавления молибдена и сравнима со значениями данной характеристики для оксидов меди и железа.

Тот факт, что микрорельеф модифицированной под действием лазерного излучения поверхности формируется за счет спекания наночастиц, объясняет большую ширину линейчатых структур, чем предполагалось бы для вольфрама, имеющего температуру плавления 3422 °С.

Оценка характерных размеров наночастиц, при спекании которых формируются линейчатые структуры, показала, что их средние значения лежат в диапазоне от 50 нм до 150 нм (рисунок 23).

## **2.5. Лазерное наноструктурирование поверхности вольфрама в среде жидкого азота**

Общий характер результата обработки вольфрамового образца фемтосекундным лазерным излучением в среде жидкого азота также проявляется в формировании на его поверхности модифицированного слоя в виде системы квазипериодических протяженных линейчатых структур (рисунок 24).

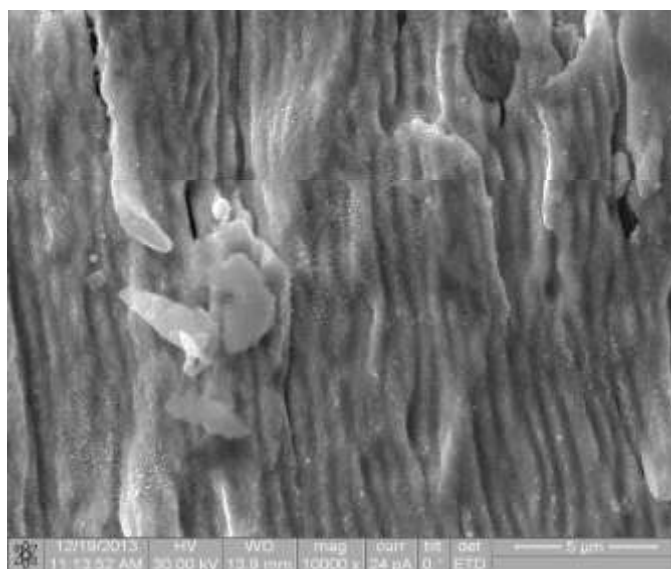


Рисунок 24. Общий вид модифицированной фемтосекундным лазерным излучением поверхности вольфрама в среде жидкого азота

Морфологические характеристики структур, сформированных на поверхности

вольфрама под действием фемтосекундного лазерного излучения в среде жидкого азота, следующие: ширина структур около 400 нм, расстояние между структурами также около 400 нм (рисунок 25). Таким образом, период линейчатой системы структур составляет величину около 800 нм.

Основным характером формирования линейчатых структур при лазерном воздействии на поверхность образцов в среде жидкого азота является спекание исходных наночастиц (рисунок 26).

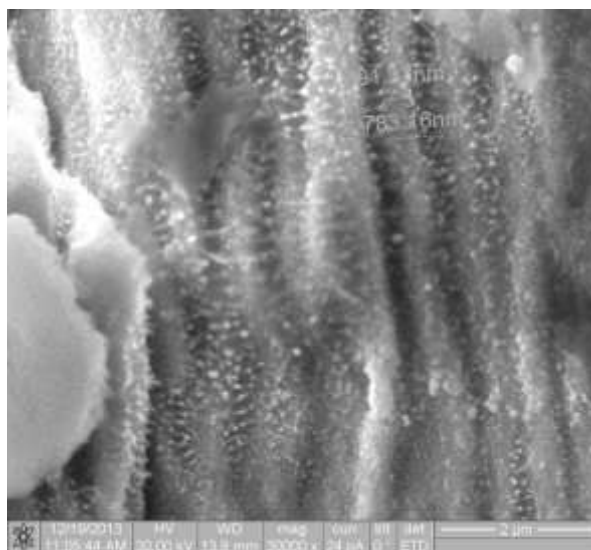


Рисунок 25. Морфологические характеристики структур на поверхности вольфрама после воздействия фемтосекундного лазерного излучения в среде жидкого азота

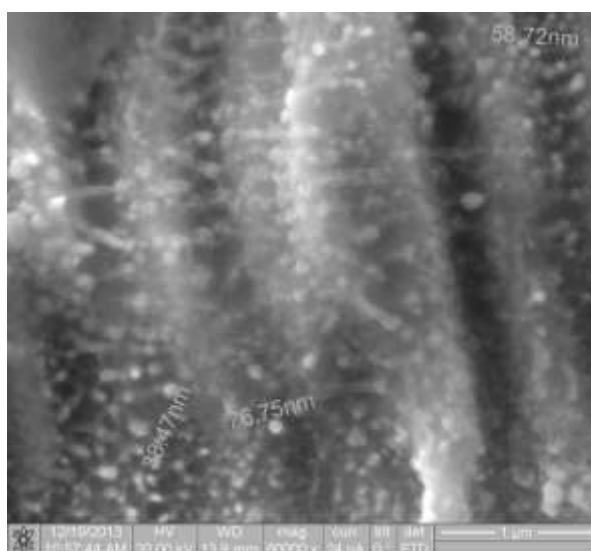


Рисунок 26. Характерные размеры наночастиц, формирующих линейчатый микрорельеф на поверхности вольфрама

Оценка характерных диаметров наночастиц, при спекании которых формируются линейчатые структуры, показала, что их средние значения лежат в диапазоне от 30 нм до 80 нм (рисунок 26). Регистрируется присутствие не только сферических наночастиц, но и наностержней с длиной до 400 нм.

Элементный анализ лазерно-индуцированных структур показал, что они в основном состоят из нитрида вольфрама  $W_2N$  (рисунок 27).

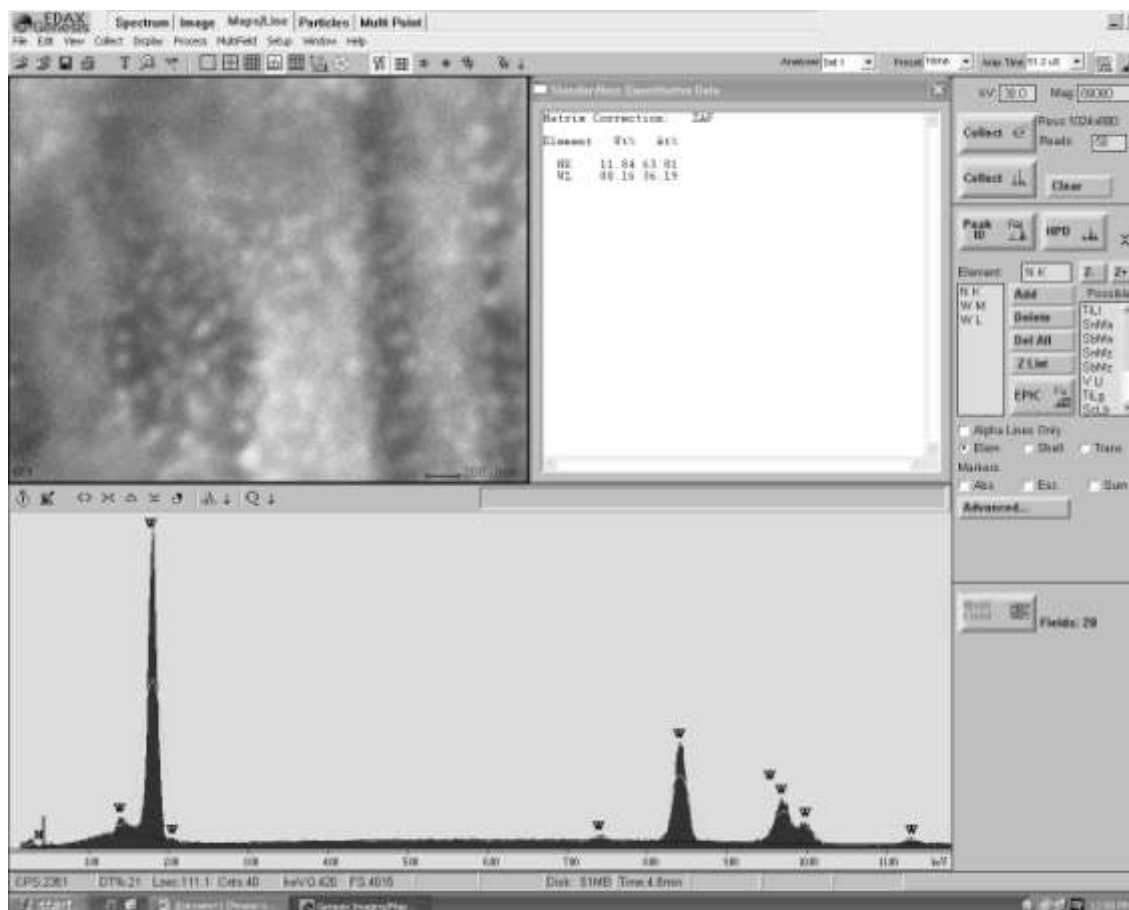


Рисунок 27. Элементный анализ структур, формируемых на поверхности вольфрама при воздействии фемтосекундного лазерного излучения в среде жидкого азота

### **3. Заключение**

В рамках курсовой работы проведено экспериментальное исследование наноструктурирования поверхности тугоплавких металлов (молибден, вольфрам) фемтосекундным лазерным излучением в среде атмосферного воздуха и жидкого азота и получены следующие результаты:

1. Зарегистрированы квазипериодические линейчатые структуры на поверхности молибдена и вольфрама, модифицированной фемтосекундным лазерным излучением.
2. Определены морфологические характеристики зарегистрированных поверхностных структур.
3. Определен химический состав модифицированного лазерным излучением поверхностного слоя.
4. Определены характерные размеры наночастиц, в результате спекания которых формируются лазерно-индуцированные линейчатые структуры.
5. Показана возможность реализации механизма формирования линейчатых структур из оксида молибдена за счет сплавления исходных наноструктур.

#### 4. Библиографический список.

1. Бармина, Е.В. Образование наноструктур на поверхности тантала при его лазерной абляции в воде. / Е.В. Бармина, М. Барбероглу, В. Зорба, А.В. Симакин, Э. Стратакис, К. Фотакис, Г.А. Шафеев. Квантовая электроника. – 2009. – Т. 39. – № 39. – С. 89 - 93.
2. Чирков, А. Лазерно-плазменное наноструктурирование поверхностных слоев сталей при атмосферных условиях. / А. Чирков. Фотоника. – 2008. – № 4. – С. 28 - 30.
3. Илясов, В.В. Исследование наноструктур поверхности материалов методом лазерного излучения. / В.В. Илясов, В.Ч. Нгуен. «Технические науки — от теории к практике»: материалы XI международной заочной научно-практической конференции. Новосибирск, 25 июня 2012 г. – 2012. – С. 118 - 124.
4. Миколуцкий, С.И. Зарождение и рост наноструктур на поверхности твердого тела, оплавленного лазерным импульсом. / С.И. Миколуцкий, В.Ю. Хомич, В.А. Шмаков, В.А. Ямщиков. Российские нанотехнологии. – 2011. – Т. 6. – № 11-12. – С. 65 - 69.
5. Аракелян, С.М. Лазерное наноструктурирование материалов: методы реализации и диагностики: учебное пособие. / С.М. Аракелян, В.Г. Прокошев, Д.В. Абрамов, А.О. Кучерик. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2010. – 140 с.
6. Лапшин, К.Э. Прямое лазерное наноструктурирование поверхности алмазных пленок и керамики нитрида кремния наносекундными импульсам излучения F<sub>2</sub> – лазера / К.Э. Лапшин, А.З. Обидин, В.Н. Токарев, В.Ю. Хомич, В.А. Шмаков, В.А. Ямщиков. Российские нанотехнологии. – 2007. – Т. 2. – № 11-12. – С. 28 - 30.
7. Воробьев, А.Я. Наноструктурирование поверхности металла и формирование резонансных микроструктур под действием фемтосекундных импульсов поляризованного излучения. / А.Я. Воробьев, Чунле Гуо, В.С. Макин. Труды VII международной конференция “Прикладная Оптика – 2006”. – 2006. – С. 196 - 201.
8. Дмитрук, Н.Л. Поверхностные поляритоны в полупроводниках и диэлектриках. / Н.Л. Дмитрук, В.Г. Литовченко, Н.Л. Стрижевский. – Киев: Наукова Думка, 1989. – 86 с.
9. Weaver, J.H. Optical properties of crystalline tungsten. / J.H. Weaver, D.W. Lynch, C.G. Olson. Physical Rev. B. – 1975. – V. 12. – P. 1293 - 1297.

10. Баженов, В.В. Формирование мелкомасштабного периодического рельефа на поверхности металла под действием поляризованного сканируемого излучения. / В.В. Баженов, А.М. Бонч-Бруевич, М.Н. Либенсон, В.С. Макин. Письма в ЖТФ. – 1986. – Т. 11. – № 18. – С. 1104 - 1110.

11. Немчинов А.М. Наноструктуризация поверхности материалов в поле фемтосекундных лазерных импульсов: Магистерская диссертация. – Владимир: ВлГУ, 2011. – 65 с.