

Отзыв официального оппонента

на диссертацию Макарова Сергея Владимировича «Нано- и микроструктурирование поверхности металлов и полупроводников в воздухе при воздействии фемтосекундных лазерных импульсов», представленную на соискание ученой степени кандидат физико-математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика.

Известно, что воздействие на поверхности различных материалов импульсным лазерным излучением высокой интенсивности приводит к формированию различных типов нано- и микроструктур. Основными областями их применения являются улучшение эмиссионных свойств катодов и поглощательных свойств полупроводниковых фотодетекторов, а также использование наноструктурированных подложек для детектирования сверхмалых концентраций вещества и т.д. Поэтому изучение механизмов формирования нано- и микроструктур под действием лазерного излучения является актуальной задачей.

Диссертационная работа Макарова С.В. посвящена наиболее интенсивно развивающемуся в настоящий момент подходу – использованию фемтосекундных лазерных импульсов для поверхностного нано- и микроструктурирования. В частности, исследуются основные физические механизмы формирования нано- и микроструктур на основных материалах современной промышленности: кремнии, алюминии, титане, арсениде галлия и меди.

Диссертация содержит шесть глав. В главе 1 дан подробный обзор современной литературы по выбранной теме. Стоит отметить хорошую структурированность и тщательность подборки материала обзора, состоящего в основном из цитирования научных работ в авторитетных отечественных и зарубежных научных изданиях. Главным образом, в обзоре литературы обоснован ряд научных проблем, которые автор оставил целью решить в своей диссертационной работе.

В главе 2 описана методика проведения экспериментов по формированию поверхностных нано- и микроструктур, а также приведено описание основных характеристик используемых лазерных установок. Также описаны методы исследования поверхности образцов, определения плотности энергии лазерного излучения, измерения электронной эмиссии. Приведены значения погрешностей основных измеряемых величин.

В главе 3 автор показывает, что возбуждение поверхностных электромагнитных волн во время воздействия фемтосекундными лазерными импульсами играет существенную роль в процессе формирования не только периодических поверхностных структур с периодом около длины волны лазера, но и с гораздо меньшими периодами.

Результаты главы 3 указывают на важность отношения используемой плотности энергии лазерного импульса к порогу абляции материала.

Глава 4 является логичным продолжением предыдущей главы, так как в ней рассматривается другой тип поверхностных структур (микроструктур), возникающих при воздействии фемтосекундными лазерными импульсами с плотностью энергии существенно выше порога абляции материала. В первой части этой главы делается акцент на исследование зависимости объема отдельных микроструктур от плотности энергии лазерного излучения, а также от числа лазерных импульсов. Показано, что дифракция лазерного пучка на формируемых микроструктурах оказывает существенное влияние на картину их эволюции при многоимпульсном воздействии. Во второй части главы проведено исследование влияния пространственного распределения интенсивности в лазерном пучке на геометрические и химические свойства формируемого рельефа.

В главе 5 представлены результаты экспериментов по образованию наноострий внутри микрократеров на поверхности объемного алюминия под действием двух фемтосекундных лазерных импульсов. Такой подход ранее никем не исследовался. На основе экспериментальных данных, а также проведенных аналитических и численных расчетов автор доказывает, что за формирование наноострий отвечает возбуждение и фокусировка интенсивных поверхностных электромагнитных волн. В конце главы численным методом конечных элементов показано, что полученные наноострия демонстрируют усиление интенсивности падающего на них электромагнитного поля до 50 раз.

Глава 6 посвящена разработке новых или развитию известных ранее приложений лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур. В частности, продемонстрирована возможность окрашивания поверхностей металлов во всем видимом диапазоне спектра вследствие дифракции света на периодических решетках, период которых можно изменять путем изменения угла падения лазерного излучения. Показано, что неконгруэнтная абляция в областях максимума периодического распределения интенсивности ППС приводит к преимущественного испарения мышьяка из арсенида галлия, тогда как в минимумах интерференционной картины состав мишени близок к стехиометрическому. Исследован эффект гигантского комбинационного рассеяния молекул пиридина, адсорбированных на ППС. При этом автор подчеркивает, что эффект ГКР реализован именно на ППС, хотя отсутствие других типов наноструктур, которые могли образоваться на ППС вследствие переосаждения материала мишени, не подтверждено экспериментально. Кроме того, алюминий, подвергаемый абляции в воздухе с помощью УКИ, легко наноструктурируется вследствие перераспределения

расплава под действием давления отдачи паров мишени. Морфология таких наноструктур отлична от ППС.

В качестве наиболее ярких новых научных результатов работы можно выделить следующие:

1. Обнаружены и исследованы два новых для данного метода типа поверхностных наноструктур, такие, как периодические нанорешетки ориентированные вдоль вектора поляризации лазерного поля и nanoострия в центре микро-кратеров.

2. Продемонстрирован новый метод управления морфологией и химическими свойствами конических микроструктур на основе изменения пространственного профиля фемтосекундных лазерных импульсов индуцирующих их рост.

3. Показано, что прямая запись периодических поверхностных структур при помощи фемтосекундных лазерных импульсов приводит к просветлению структурированной поверхности материала в определенном диапазоне длин волн.

Результаты, полученные в диссертации, целесообразно использовать в институтах РАН (ИОФАН, ФИАН и др.), а также в МГУ и МФТИ.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием сертифицированных современных экспериментальных установок, а также многократно апробированными методиками исследований. Основные результаты опубликованы в 13 работах в отечественных и зарубежных рецензируемых научных журналах с высоким импакт-фактором, входящих в список ВАКа. Текст диссертации практически не содержит грамматических и синтаксических ошибок.

По диссертационной работе можно высказать следующие замечания. Ряд формулировок в тексте диссертации и автореферате выглядят неточно. Например, утверждается, что образование ППС обусловлено интерференцией поверхностной электромагнитной волны с лазерным пучком. Это известно уже десятки лет, хотя рядом исследователей такой механизм по-прежнему подвергается сомнениям. По-видимому, нужно подчеркнуть, что автор подтверждает указанный механизм образования ППС и в случае ультракоротких лазерных импульсов.

Защищаемые положения в большой степени совпадают с результатами работы. Это стилистически неверно, ведь защищаемые положения должны иметь более общую формулировку, выраженную в сослагательном наклонении.

Стилистически неудачно сформулирован в автореферате личный вклад автора в работу. Следовало бы добавить, что он также принимал участие в экспериментах, что, как я понимаю, соответствует действительности.

Можно оспорить положение, сформулированное в разделе Научная новизна автореферата, о том, что эволюция рельефа с числом лазерных импульсов носит характер неустойчивости. Это обстоятельство не является специфическим для абляции с помощью УКИ и было сформулировано в наших работах, выполненных в начале 2000-ных годов.

Эффект ГКР, реализованный автором, не имеет количественной оценки. В стандартных экспериментах по ГКР это осуществляется с помощью увеличения концентрации исследуемого вещества над исходной поверхностью металла.

Указанные замечания носят рекомендательный характер и не влияют на общую положительную оценку работы. Диссертация «Нано- и микроструктурирование поверхности металлов и полупроводников в воздухе при воздействии фемтосекундных лазерных импульсов» является завершенной научно-квалификационной работой и удовлетворяет требованиям ВАК, а ее автор Макаров Сергей Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика.

Официальный оппонент:

д.ф.-м.н., заведующий лабораторией
НЦВИ ИОФРАН им. А.М. Прохорова,
119991, Москва, ул. Вавилова, 38
Тел. +7(499)503-8342
e-mail: shafeev@kapella.gpi.ru

/ Шафеев Г.А. /

Подпись Шафеева Г.А. удостоверяю

Свиридова Анна Владимировна

Должность: заместитель заведующего отделом НЦВИ

13.11.2014



Шафеев Георгий Айратович

Д.ф.-м.н., профессор, Научный центр волновых исследований ИОФ РАН им. А.М. Прохорова, заведующий лабораторией макрокинетики неравновесных процессов. Рабочий адрес: 119991, Москва, ул. Вавилова, 38

Рабочий телефон: +7(499)503-8342

Адрес электронной почты: shafeev@kapella.gpi.ru

Список статей Г.А. Шафеева, близких к теме диссертационной работы С.В. Макарова:

- 1) Бармина, Е. В., Барбероглу, М., Зорба, В., Симакин, А. В., Стратакис, Э., Фотакис, К., Шафеев, Г. А. «Образование наноструктур на поверхности тантала при его лазерной абляции в воде» Квантовая электроника, 39(1), 89-93 (2009).
- 2) Бармина, Е. В., Стратакис, Э., Фотакис, К., Шафеев, Г. А. «Генерация наноструктур при лазерной абляции металлов в жидкостях: новые результаты». Квантовая электроника, 40(11), 1012-1020 (2010).
- 3) Бармина, Е. В., Лау Труонг, С., Бозон-Вердюра, Ф., Леви, Ж., Симакин, А. В., Шафеев, Г. А. «Генерация наноструктур на поверхности никеля при лазерной абляции в жидкости и их активность в гигантском комбинационном рассеянии». Квантовая электроника, 40(4), 346-348 (2010).
- 4) Stratakis, E., Zorba, V., Barberoglou, M., Fotakis, C., Shafeev, G. A. «Laser writing of nanostructures on bulk Al via its ablation in liquids». Nanotechnology, 20(10), 105303 (2009).
- 5) Шафеев, Г. А. «Фотоника и нанотехнологии» Квантовая электроника, 40(11), 941-941 (2010).
- 6) Бармина, Е. В., Серков, А. А., Шафеев, Г. А. «Наноструктурирование монокристаллического карбида кремния пикосекундным ультрафиолетовым лазерным излучением» Квантовая электроника, 43(12), 1091-1093 (2013).
- 7) Barmina, E. V., Serkov, A. A., Stratakis, E., Fotakis, C., Stolyarov, V. N., Stolyarov, I. N., and Shafeev, G. A. «Nano-textured W shows improvement of thermionic emission properties» Applied Physics A, 106(1), 1-4 (2012).
- 8) Stratakis, E., Zorba, V., Barberoglou, M., Fotakis, C., Shafeev, G. A. «Femtosecond laser writing of nanostructures on bulk Al via its ablation in air and liquids» Applied Surface Science, 255(10), 5346-5350 (2009).