

**ОТЗЫВ ОППОНЕНТА**  
**на диссертационную работу**  
**Бронникова Кирилла Алексеевича**  
**«Формирование лазерно-индуцированных периодических**  
**поверхностных структур на пленках металлов и полупроводников»,**  
**представленной на соискание ученой степени кандидата физико-**  
**математических наук по специальности 1.3.6 – Оптика.**

Диссертационная работа К. А. Бронникова посвящена исследованию (в основном экспериментальному) формирования лазерно-индуцированных поверхностных периодических структур (ЛИППС) с помощью фемтосекундного лазерного излучения на пленках ряда металлов и кремния. Высокий интерес к исследованию ЛИППС вызван перспективами многочисленных практических применений этих структур. Причем область их применения становится все обширнее. Исследования показывают, что наличие ЛИППС изменяет оптические свойства поверхности, смачиваемость поверхности (в том числе по отношению к металлам, что может быть использовано при создании микроконтактов), ее бактерицидные свойства. ЛИППС могут использоваться для анализа состава сред (один из результатов диссертации К. А. Бронникова относится к этой области). Данные структуры также влияют на трение, приживаемость имплантов.

Для более активного внедрения в практическое использование ЛИППС требуется расширение пока ограниченного объема знаний по теме ЛИППС и понимания внутренних механизмов данного феномена. Особенно это касается обнаруженных относительно недавно термохимических ЛИППС (ТЛИППС), которые формируются в результате термически стимулированной реакции окисления на металлических пленках под воздействием импульсного лазерного излучения. ТЛИППС в основном исследуются в Диссертации. Формирование ЛИППС является результатом множества физических и химических процессов, зависящих от многих параметров. Поэтому их изучение представляет большой интерес с точки зрения фундаментальной науки.

Вышесказанное говорит об **актуальности и практической значимости** диссертационной работы. Диссертация представляет интерес как с точки зрения развития технологий, так и с точки зрения фундаментальной науки.

О возможных применениях ЛИППС и современных представлениях о механизмах их возникновения достаточно подробно рассказано во **Введении** и **Главе 1** Диссертации.

Диссертация К. А. Бронникова содержит принципиально **новые** результаты. Отметим некоторые из них.

В **Главе 2** впервые было дано объяснение эффекта увеличения периода ТЛИППС при повышении толщины пленки хрома. Благодаря проведенному анализу химического состава структур была обнаружена корреляция между наблюдаемым изменением периода, толщины пленки и относительным содержанием различных оксидов хрома. Согласно выполненному в работе численному моделированию, данные оксиды, имея различающиеся оптические параметры, дают картины рассеяния и интерференции с разным периодом. Также показано, что эффекты диссипации тепла в пленке хрома способствуют ухудшению упорядоченности ТЛИППС при понижении частоты следования импульсов. При этом использование металла с более низкими теплоемкостью и теплопроводностью, такого как гафний, позволяет увеличить предельную скорость сканирования при сохранении однородности структур. Кроме того, в случае пленки титана, было выявлено влияние внешней газовой среды, в которой происходит запись ТЛИППС, на их морфологию и

химический состав и обнаружено формирование нитрида титана в атмосфере с избыточным содержанием азота.

В **Главе 3** впервые продемонстрировано образование ТЛИППС с гексагональной периодичностью на пленке кремния, получаемым при однократном сканировании лазерным пучком. Данные структуры имеют отличительные антиотражающие свойства: коэффициент отражения не превышает 2% в интервале длин волн 500-1000 нм. В работе также был показан пример использования этих структур для повышения чувствительности метода флуоресцентного анализа концентрации раствора. Был обнаружен режим кристаллизации пленки аморфного кремния с малым увеличением шероховатости поверхности, что перспективно для приложений кремниевой фотоники. Наконец для комбинации, состоящей из монокристаллического кремния и покрывающей тонкой пленки гафния, было показано, что, варьируя скорость сканирования и энергию лазерного импульса, возможно получать ЛИППС различного периода и типа (как термохимические, так и абляционные).

В диссертации приведен литературный обзор и историческая справка о развитии исследований по теме ЛИППС (Введение и Глава 1). Библиографический список насчитывает 108 наименований.

Диссертация имеет четкую структуру и достаточно хорошо иллюстрирована. Автореферат в целом соответствует содержанию диссертации. Он хорошо оформлен и иллюстрирован, отличается четким и сжатым, но при этом понятным и полным изложением.

Результаты работы опубликованы в международных рецензируемых журналах, входящих в список ВАК (8 публикаций) и доложены на многочисленных международных конференциях. Это говорит о **достоверности** результатов, полученных в диссертации. Достоверность результатов обусловлена также тщательностью проведенных исследований, использованием нескольких методик при исследовании модифицированных материалов, сравнением с результатами других авторов.

В процессе выполнения диссертационной работы были решены многие задачи. Впечатляет объем выполненной работы. Исследовалось формирование ЛИППС на различных материалах, варьировались толщина пленок, условия облучения (длина волны, интенсивность излучения, скорость сканирования и т.п.), окружающая среда (воздух и азот). Тщательно исследовались химический состав, геометрия, фазовый состав (аморфный, кристаллический) получаемых структур с помощью чрезвычайно разнообразных методов: 1. Сканирующая электронная микроскопия; 2. Атомно-силовая микроскопия; 3. Оптическая микроскопия; 4. Измерение и анализ морфологии поверхности, базирующийся на Фурье образе изображения этой поверхности; 5. Комбинационное рассеяние (определение химического состава и кристаллической фазы); 6. Определялся химический и фазовый состав в том числе под поверхностью образца; 7. Разрезы ионным пучком; 8. Измерение оптических свойств (коэффициентов отражения и пропускания); 9. Численное моделирование.

Достоинством Диссертации является также то, что всем получаемым в эксперименте результатам Автор стремится дать теоретическое объяснение.

Вместе с тем Диссертация не свободна от **недостатков**

1. Есть погрешности изложения. Например, часто используются фраза «фс лазерное излучение». Лучше написать полностью «фемтосекундное лазерное излучение (ФЛИ)», а затем использовать обозначение ФЛИ. Используется дежурная фраза «Формирование лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур (ЛИППС) при воздействии лазерного излучения на поверхность полупроводника было обнаружено еще в



1965 году». Я бы ожидал, что дальше последует фраза «а на поверхности металла – в таком-то году». Но далее идет ссылка на статьи 2010-2012 годов. Или, «Период структур примерно равен, либо меньше длины волны лазерного излучения. В то же время диаметр воздействующего лазерного пучка может существенно ... превосходить величину периода данных структур». На основании этого делается вывод, что «Данные структуры могут быть сформированы на произвольно большой площади». Слишком оптимистично. Сравнить надо с площадью, которую необходимо обработать.

2. Список литературы довольно внушительный. Но я бы добавил работы Скользкого (J. Z. P. Skolski), Итиной, группы Булгаковой (в Диссертации ссылка только на одну работу).

3. Численное моделирование в параграфе 2.2 практически не описано. Геометрию задачи представить из описания трудно. Нужен рисунок. Нет ни уравнений, ни граничных условий, ни метода решения. А эта задача не простая для численного решения: есть контакт различных материалов, необходимо использовать неотражающие граничные условия и т.п.

4. В Автореферате сказано, что ЛИППС, в отличие от ТЛИППС, ориентированы только перпендикулярно поляризации. Насколько я знаю, и это отмечено и в Диссертации, абляционные ЛИППС могут быть и параллельны поляризации.

5. Периодическая модуляция оксидных выступов на пленке аморфного кремния в виде конусообразных структур (параграф 3.1), наблюдаемая при низких скоростях сканирования, объясняется эффектом гидродинамической неустойчивости Рэля-Плато. Мне кажется, что это утверждение недостаточно обосновано. Возникают вопросы о том, присутствует ли жидкая фаза вообще, каковы ее вязкость, плотность и т.п.? Может ли развиваться эта неустойчивость в этих условиях? Может объяснение надо искать в изменении оптических свойств? Картина возникает сложная: есть разные фазы вещества, химические изменения. На мой взгляд похожая картина возникает на рис. 43 б параграфа 3.3 на пленках гафния.

Высказанные замечания не снижают ценности диссертации. Диссертация Бронникова К. А. «Формирование лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур на пленках металлов и полупроводников», выполненная под руководством кандидата физико-математических наук А. В. Достовалова является законченной научно-квалификационной работой. Она содержит решение научной задачи - исследование формирования лазерно-индуцированных периодических структур фемтосекундными лазерными импульсами. Представленные исследования интересны, важны, выводы обоснованы.

Диссертационная работа «Формирование лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур на пленках металлов и полупроводников» соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 – оптика. Автор работы Бронников К. А. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент,  
Старший научный сотрудник ФИЦ ИВТ  
доктор физико-математических наук

23.11.22

В.П. Жуков

Подпись В.П. Жукова удостоверяю  
Ученый Секретарь ФИЦ ИВТ, к.ф.-м.н.



Н.В. Киланова