

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального
государственного бюджетного
учреждения науки Институт
автоматики и процессов управления
Дальневосточного отделения
Российской академии наук,
член-корреспондент РАН




Р. В. Ромашко

«9» ноября 2022 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Бронникова Кирилла Алексеевича «Формирование лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур на пленках металлов и полупроводников», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 – «оптика».

Структурирование поверхности материалов с помощью лазерного излучения является устоявшимся и активно развиваемым направлением исследований в оптике. Создание как периодических, так и случайно расположенных вариаций рельефа, оптических параметров позволяет контролируемым образом модифицировать оптические и физические характеристики поверхности: изменение коэффициентов отражения/пропускания, коэффициента трения, степени смачиваемости и адсорбции. Данная модификация свойств находит применение в сенсорике, обработке сигналов, голографии, при создании элементов интегральной оптики и др.

В то время как для подобного структурирования поверхности могут быть применены различные подходы, явление возникновения лазерно-индуцированных поверхностных периодических структур (ЛИППС) оказывается привлекательным методом с практической точки зрения благодаря одностадийности процесса и его масштабируемости, возможности производить модификацию в обычных атмосферных условиях. ЛИППС представляют собой параллельно расположенные углубления или выступы на поверхности твердого тела с около- или субволновым периодом, образуемые в результате локальных интерференционных, гидродинамических, термохимических и других эффектов в области воздействия лазерного пучка. Разнообразная физика явления и отсутствие единого теоретического подхода для описания процесса возникновения ЛИППС обуславливают высокий исследовательский интерес к данной тематике.

Диссертационная работа К. А. Бронникова посвящена исследованию особенностей формирования ЛИППС с помощью фемтосекундного лазерного излучения на пленках металлов и полупроводников. Сформированы ЛИППС на пленках хрома, гафния, титана и кремния; исследована морфология, химический состав, оптические свойства полученных структур в зависимости от параметров лазерного излучения, условий записи, толщины

пленок; для объяснения некоторых наблюдаемых зависимостей выполнены численные расчеты и сделаны теоретические оценки.

Основное содержание диссертации изложено в трех главах.

В главе 1 приведен литературный обзор и дана историческая справка о первом наблюдении ЛИППС, развитии экспериментальных исследований ЛИППС и эволюции теоретических подходов к их описанию. Представлена классификация ЛИППС как по физическим механизмам их образования, так и по соотношению периода к длине волны записывающего излучения. Отдельно рассмотрен механизм образования термохимических ЛИППС (ТЛИППС) и их характерные особенности.

В главе 2 представлены результаты по формированию ТЛИППС на пленках металлов (Cr, Hf, Ti) с помощью фс лазерных импульсов, исследованию морфологии полученных структур, химического состава в зависимости от условий лазерного воздействия. Обнаружено увеличение периода ТЛИППС при увеличении толщины пленки Cr, коррелирующее с изменением относительного содержания оксидов $\text{CrO}_2/\text{Cr}_2\text{O}_3$, составляющих выступы структур. Наблюдаемое ухудшение упорядоченности ТЛИППС при понижении частоты следования импульсов объясняется диссипацией теплового профиля между импульсами. В случае пленок Hf достигнуты высокие скорости записи высокоупорядоченных ТЛИППС – до 2 мм/с, что на порядок выше значений, полученных для Cr. Наблюдается линейная зависимость периода ТЛИППС от длины волны падающего излучения (в диапазоне длин волн $\lambda = 256\text{-}1026$ нм) в случае пленок Ti. Кроме того, показано, что изменение газовой среды, в которой производится формирование ТЛИППС, влияет как на морфологию, так и на химический состав структур.

Глава 3 посвящена формированию термохимических и абляционных ЛИППС на пленках аморфного кремния (a-Si) и образце кристаллического кремния (c-Si), покрытого тонкой пленкой Hf. Впервые продемонстрировано формирование двумерных ТЛИППС с гексагональной периодичностью на пленке a-Si при однократном сканировании лазерным пучком. Данные структуры образуются в результате процессов окисления и кристаллизации и обладают антиотражающими свойствами. Обнаружен режим лазерно-индуцированной кристаллизации пленки a-Si без образования ЛИППС с минимальным повышением шероховатости поверхности. ЛИППС, сформированные на c-Si, покрытом пленкой Hf (толщина 20 нм), демонстрируют богатую морфологию в зависимости от параметров лазерного облучения (энергия импульса, скорость сканирования): наблюдаются как термохимические, так и абляционные ЛИППС с различным периодом и высоким аспектным соотношением.

К наиболее значимым результатам диссертационной работы можно отнести следующее:

1. Экспериментальное обнаружение нелинейного увеличения периода решеток термохимических ЛИППС в зависимости от толщины пленки хрома, коррелирующее с изменением оксидного состава выступов ТЛИППС; результаты проведенного численного расчета рассеяния импульса на выступе с различным оксидным составом дают изменение периода интерференционной картины, качественно согласующееся с экспериментально наблюдаемой зависимостью.

2. Экспериментальное обнаружение снижения регулярности периодических решеток ТЛИППС при уменьшении частоты следования импульсов, объясняемое эффектом

диссипации температурного профиля после поглощения импульса. Предложены способы повышения производительности записи ТЛИППС за счет использования пучка с эллиптическим профилем и выбора металла с низкими теплоемкостью и теплопроводностью (гафний).

3. Экспериментальное обнаружение линейной зависимости периода ТЛИППС от длины волны записывающего излучения (в диапазоне длин волн $\lambda = 256-1026$ нм) в случае пленок титана и появление нитрида титана в химическом составе формируемых ТЛИППС при записи в газовой среде, богатой азотом.

4. Экспериментальное обнаружение различных режимов лазерной модификации пленок аморфного кремния: при малых скоростях сканирования (1-3 мкм/с) – режим формирования ТЛИППС в виде микроконусов с гексагональной периодичностью, сопровождаемого подповерхностной кристаллизацией, при однократном сканировании образца пучком с линейной поляризацией; при высоких скоростях (>1 мм/с) – равномерная кристаллизация аморфного кремния без образования поверхностных структур.

5. Экспериментальное обнаружение формирования ЛИППС различного типа и периода при лазерном воздействии на монокристаллический кремний, покрытый тонкой (20 нм) пленкой гафния: при малых энергиях импульса и скоростях сканирования образуются термохимические ЛИППС с околотовновым периодом ($\sim\lambda$), ориентированные параллельно направлению поляризации, тогда как при высоких значениях энергии импульса и скорости сканирования наблюдаются абляционные ЛИППС, ориентированные ортогонально поляризации, с периодами $\sim\lambda$, $\sim\lambda/2$, $\sim\lambda/4$.

К замечаниям по диссертации необходимо отнести следующее:

1. В обзоре литературы, в подразделе 1.4. “Термохимические ЛИППС (ТЛИППС)” кратко приведены результаты по формированию ТЛИППС на пленках титана из работ [10,11], где были использованы как наносекундные, так и фемтосекундные импульсы. Структуры, полученные с использованием фс импульсов, демонстрируют существенно более высокую упорядоченность, чем ТЛИППС, записанные нс импульсами. Данное отличие объясняется в тексте тем, что “использование фс лазерных импульсов позволяет локализовать тепловое воздействие излучения на материал и снизить влияние диффузии тепла, приводящее к размытию периодической модуляции температуры на поверхности”. Однако более значительным фактором представляется влияние частоты следования импульсов: в работе [10] использовались нс импульсы с частотой следования 10 Гц, тогда как в работе [11] – фс импульсы с частотой следования 1 МГц. Это тем более вероятно, так как согласно результатам, представленным в главе 2, подраздел 2.3, уменьшение частоты следования на два порядка (с 200 до 2 кГц) приводит к прекращению формирования упорядоченной периодической структуры на пленках хрома.

2. Представленное обоснование экспериментально наблюдаемого увеличения периода решеток ТЛИППС при увеличении толщины пленки хрома лишь за счет изменения оптических параметров оксидных выступов видится не вполне убедительным, поскольку в результатах численного моделирования не показана степень влияния размера, формы данных выступов на картину рассеяния света. Не рассмотрено также отличие в динамике тепловых эффектов для пленок разной толщины, которое может приводить к различным условиям протекания термохимической реакции окисления и, следовательно, различному химическому составу структур.

3. В случае пленок хрома, абсолютные значения расчетных периодов ТЛИППС заметно отличаются от измеренных в эксперименте в меньшую сторону, особенно в случае относительно толстых пленок (более 100 нм). В диссертации делается предположение об отличии оксидов, составляющих выступы структур, от их чистых форм, приводящем к уменьшению показателя преломления и увеличению периода интерференционной картины. И если для тонких пленок (30-40 нм) скорректированный расчетный период (≈ 650 нм) оказывается достаточно близок к экспериментальному (≈ 680), то для пленок толщиной больше 70 нм различие достигает ≈ 180 нм (765 нм – расчетный период, ≈ 950 нм – экспериментальный) или $\sim 20\%$. Данное расхождение никак не объясняется в тексте диссертации.

Тем не менее, данные замечания в целом не снижают значимости диссертационной работы К. А. Бронникова. Диссертация представляет собой цельное научное исследование, содержащее решение актуальных научных проблем. Она также представляет интерес с точки зрения развития различных приложений. Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК. Автореферат в полной мере отражает ее содержание. Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается их апробацией на многочисленных конференциях и семинарах, а также публикациями в рецензируемых научных журналах.

Результаты, полученные в диссертации, могут быть использованы в исследованиях и разработках различных функциональных поверхностей, дифракционных оптических элементов, сенсоров, элементов интегральной оптики в ИАПУ ДВО РАН, ДВФУ, НГУ, ИФП СО РАН, ИЛФ СО РАН, МГУ, ИТМО, ФИАН, ИПЛИТ РАН и других учреждениях и предприятиях.

Доклад К. А. Бронникова по материалам диссертационной работы был заслушан и обсужден на семинаре Отдела оптоэлектронных методов исследования газообразных и конденсированных сред ИАПУ ДВО РАН 9 ноября 2022 года.

Диссертационная работа К. А. Бронникова «Формирование лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур на пленках металлов и полупроводников», отвечает всем требованиям «Положения о порядке присуждения научным и научно-педагогическим работникам ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 – «оптика».

Главный научный сотрудник ИАПУ ДВО РАН,
доктор физ.-мат. наук

О. Б. Витрик

Секретарь семинара,
старший научный сотрудник ИАПУ ДВО РАН,
кандидат физ.-мат. наук

С.О. Гурбатов

9 ноября 2022 г.