

## ОТЗЫВ

научного руководителя о диссертации Кирилла Бронникова  
«Формирование лазерно-индуцированных периодических поверхностных  
структур на пленках металлов и полупроводников», представленной на  
соискание степени кандидата физико-математических наук по  
специальности 1.3.6 «Оптика»

Диссертационная работа Бронникова К.А. посвящена исследованию особенностей формирования упорядоченных термохимических и абляционных лазерно-индуцированных поверхностных периодических структур (ЛИППС) с помощью фемтосекундного лазерного излучения на пленках металлов и полупроводников, а также поиску оптимальных режимов с точки зрения производительности записи и упорядоченности структур. ЛИППС представляют собой периодический рельеф, возникающий в области фокального пятна высокомогущного лазерного излучения на поверхности твердых тел вследствие локальных интерференционных эффектов. Данное явление является объектом активных исследований последние несколько десятилетий и интерес к нему неуклонно возрастает из-за все новых открываемых эффектов и отсутствия единой теоретической модели, объясняющей формирование ЛИППС, а также открывающихся областях практического применения, включая нанофотонику, сенсорику, трибологию, медицинские применения, и др. Поэтому работа Бронникова К.А. является в высокой степени актуальной.

Диссертационная работа К.А.Бронникова представляет собой комплексное исследование режимов формирования как термохимических, так и абляционных структур при фемтосекундной лазерном воздействии на различные материалы (металлы и полупроводники), а также результаты практического применения данных структур.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитируемой литературы, приложения, а также списка обозначений и сокращений. Работа изложена на 106 страницах, содержит 45 рисунков и 2 таблицы. Список литературы состоит из 108 наименований.

Во введении дается краткое описание явления ЛИППС, его ключевых особенностей; даны ссылки на примеры практического применения данных структур. Кроме того, приводится описание недавно обнаруженных термохимических ЛИППС, которым уделено основное внимание в диссертации, обоснование актуальности их изучения. Сформулированы цель и задачи работы. Представлены основные положения, выносимые на защиту, и содержание диссертации по разделам.

В первой главе приведен литературный обзор по теме диссертации. Дана

историческая справка о первом наблюдении ЛИППС на полупроводниках, развитии экспериментальных исследований ЛИППС и эволюции теоретических моделей. 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 и их характерные особенности.

Вторая глава посвящена 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  $\text{CrO}_2/\text{Cr}_2\text{O}_3$  составляющие выступы структур. В случае пленок Hf достигнуты высокие скорости записи высокоупорядоченных ТЛИППС – до 2 мм/с, что на порядок выше значений, полученных для Cr. Экспериментально подтвержден линейный характер зависимости периода ТЛИППС от длины волны падающего излучения (в диапазоне 256-1026 нм) на примере пленок Ti. Кроме того, показано, что изменение газовой среды, в которой производится формирование ТЛИППС, влияет как на морфологию, так и на химический состав структур.

В третьей главе представлены результаты по записи 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. Продemonстрировано применение полученных на пленке a-Si ТЛИППС в методе флуоресцентной спектроскопии для повышения чувствительности измерения концентрации тестового анализата. 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. Абляционные ЛИППС с периодом около 450 нм  $\sim \lambda/2$  распространяются на значительную глубину внутрь c-Si, а также примечательны своей высокой упорядоченностью, бездефектностью (при



записи в атмосфере азота) и большим аспектным отношением глубины к ширине.

В заключении подводятся итоги диссертационной работы и приводятся важнейшие результаты.

В диссертации К.А.Бронникова получены следующие основные результаты:

1. Использование астигматического гауссова пучка позволяет улучшить упорядоченность термохимических поверхностных периодических структур, формируемых на пленке хрома (Cr), и повысить производительность записи на 2 порядка по сравнению с исходным гауссовым пучком круглого сечения.

2. Воздействие фс лазерного излучения на пленку титана (Ti) в газовой атмосфере азота приводит к формированию термохимических поверхностных периодических структур с комплексным химическим составом TiO<sub>2</sub>/TiN.

3. Воздействие фс лазерного излучения на пленки аморфного кремния (a-Si) приводит к формированию термохимических поверхностных периодических структур (ТЛИППС) с одномерной и двумерной периодичностью при записи однократным сканированием с линейной поляризацией. Кроме того, формирование ТЛИППС на a-Si сопровождается кристаллизацией подповерхностного слоя, что, вместе с имеющимся структурированием поверхности и окислением Si, приводит к уменьшению коэффициента отражения в диапазоне длин волн 450-1100 нм. При увеличении скорости сканирования достигается режим равномерной кристаллизации аморфной фазы кремния без образования поверхностных структур.

4. Воздействие фс лазерного излучения на кристаллический кремний (c-Si), покрытый тонкой пленкой гафния (Hf), приводит к формированию поверхностных периодических структур различного типа, в зависимости от энергии записывающего импульса  $E_p$  и скорости сканирования  $v$ : при малых  $E_p$  и  $v$  образуются термохимические ЛИППС с периодом  $\sim\lambda$ , тогда как для высоких  $E_p$  и  $v$  наблюдаются ЛИППС абляционного типа с периодом  $\sim\lambda, \lambda/2, \lambda/4$  и высоким аспектным соотношением.

Научная новизна и значимость работы заключается в том, что впервые дано объяснение зависимости периода формируемых термохимических ЛИППС на пленках хрома (Cr) от толщины пленки вследствие изменения оксидного состава выступов структур, влияющего на рассеяние и интерференцию света, что подтверждается численным моделированием. Впервые продемонстрировано, что использование астигматического гауссова пучка позволяет улучшить упорядоченность термохимических поверхностных периодических структур, формируемых на пленке Cr, и повысить производительность записи на 2 порядка по сравнению с исходным гауссовым пучком

круглого сечения. Впервые показано, что запись ТЛИПИС на пленках титана (Ti) в газовой среде азота приводит к формированию поверхностных периодических структур с комплексным химическим составом  $TiO_2/TiN$ . В случае пленок аморфного кремния (a-Si) впервые получен новый тип структур при однократном сканировании пучком с линейной поляризацией – гексагональная решетка конусообразных выступов  $SiO_2$  с периодом  $\sim 980$  нм, чередующихся с подповерхностными включениями поликристаллической фазы Si, что позволило существенно изменить оптические свойства пленки (снижение коэффициента отражения с  $\sim 50\%$  до  $< 2\%$  в видимом диапазоне). Впервые продемонстрировано, что воздействие фс лазерного излучения на кристаллический кремний (c-Si), покрытый тонкой пленкой гафния (Hf), приводит к формированию поверхностных периодических структур термохимического (период  $\sim \lambda$ ) и абляционного (период  $\sim \lambda, \lambda/2, \lambda/4$  с высоким аспектным соотношением) типа, в зависимости от энергии записывающего импульса и скорости сканирования.

В ходе выполнения экспериментальных работ и проведения теоретических расчетов он проявил себя как высококвалифицированный, целеустремленный, инициативный сотрудник. Соискатель является автором и соавтором в общей сложности 37-ти индексируемых печатных работ (включая тезисы конференций), 12 из которых опубликованы в рейтинговых рецензируемых зарубежных журналах.

Полученные результаты К. Бронникова в совокупности с представленной характеристикой свидетельствуют о высоком уровне подготовки соискателя, способного самостоятельно выполнять исследовательские работы, анализировать полученные результаты и представлять их научному сообществу. Выполненная диссертация на тему «Формирование лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур на пленках металлов и полупроводников» отвечает всем необходимым требованиям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г. (ред. от 11.09.2021 г.), а ее автор, Кирилл Бронников, заслуживает присуждения ему степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 «Оптика».

Старший научный сотрудник ИАиЭ СО РАН

к.ф.-м.н.

Достовалов А.В.

подпись к.ф.-м.н. Достовалова А.В. заверяю:

02.09.22.

Учёный секретарь ИАиЭ СО РАН

к.ф.-м.н.



Донцова Е.И.