

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Голованова Антона Владимировича **«Травление планарных структур «алмаз-металл» и «алмаз-диэлектрик» высокочастотным газовым разрядом низкого давления»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

В работе представлено экспериментальное исследование реактивного ионного травления (РИТ) планарных структур из металлов и диэлектриков на поверхности синтетического алмаза высокочастотным емкостным (ВЧЕ) газовым разрядом низкого давления на основе элегаза.

Актуальность темы диссертации. Изучение результатов взаимодействия плазмы газового разряда низкого давления с поверхностью твердых веществ экспериментальными методами представляет научный интерес в связи с необходимостью расширения базы данных по взаимодействию плазмы с поверхностью для применения в плазменных установках, установлением физических закономерностей в процессах взаимодействия плазмы с поверхностью для развития плазменных технологий, совершенствованием и верификацией кодов для описания взаимодействия плазмы с поверхностью. Ещё больший интерес вызывают исследования, в которых используются вещества с сочетанием исключительных электрических, физических, химических и термических свойств: для плазмообразующего газа используется нетипичный для плазменных задач электроотрицательный газ SF₆ (электрическая прочность при атмосферном давлении и зазоре 1 см — 89 кВ/см, молярная масса — 146,06 г/моль и др.) и смеси на его основе, а для подложки столь же уникальный алмазный материал с экстремальными характеристиками (теплопроводность — 900–2300 Вт/(м·К), ширина запрещенной зоны — 5,46-6,4 эВ и др.). Повышенный интерес к тематике исследований связан с ускоренным развитием сравнительно новой по сравнению с кремниевой, но обладающей в перспективе преимуществами по энергоэффективности и плотности микротранзисторов, алмазной микроэлектроники повышенных мощностей. Не менее привлекательно и развитие алмазной микрооптики для широкодиапазонных источников рентгеновского излучения,

на ряду с другими высокотехнологическими областями применения трехмерных и планарных микроструктур алмаза.

Структура и основное содержание работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы. Текст работы представлен на 133 страницах, включая 53 рисунка и 17 таблиц. Список литературы содержит 144 наименования. Комментарии по перечисленным разделам приведены в данном отзыве.

Во **введении** обоснованы актуальность и научная новизна работы, сформулированы цель и задачи исследования, приведены научные положения, выносимые на защиту, рассмотрена научная и практическая ценность работы, изложена структура работы.

Материалы в главах логично структурированы и достаточно описаны как для анализа материала, так и для возможной воспроизводимости и повторяемости исследований другими научными группами.

В **первой главе** приведен необходимый минимум обширных теоретических и экспериментальных исследований по ионному распылению твердых тел, сделан обзор типов синтетического алмаза (HPHT, CVD), методов плазменной обработки травления алмаза (газовое химическое, плазмохимическое травления, ионное распыление), особое внимание уделено экспериментальным особенностям РИТ, исследуемым и в данной работе.

Во **второй главе** описан процесс изготовления и подготовки алмазных подложек (HPHT монокристаллов и CVD пленок) для экспериментов, а также формирования контактных защитных масок на них методом фотолитографии. Указаны параметры и описаны системы экспериментальной установки для РИТ полупроводниковых материалов в ВЧЕ разряде, на которой получены все экспериментальные результаты. Описана методика проведения экспериментов и указаны параметры режимов травления: состав смеси газов, их давление, мощность разряда.

Третья глава посвящена анализу поверхностей травления полиалмаза в плазме Ag, SF₆, O₂, CF₄ и их смесей. Сделаны выводы о преобладающем физическом механизме распыления, но с химическим усилением и экспериментально получены экстремальные скорости травления в плазме SF₆ по сравнению со смесью Ag и O₂ при сходных параметрах (давлении плазмообразующего газа, напряжении самосмещения). Описан эффект микромаскинга (образования наноструктур на поверхности) и условий его возникновения

или же подавления.

В **четвертой главе** рассмотрено селективное травление алмаза с масками из металлов (Al, Cr, Ni, Mo) и диэлектриков (Al_2O_3 , AlN), определены их селективности травления к алмазу в ВЧЕ-разрядах на основе SF_6 . Описаны условия и техника изготовления микроструктур на поверхности алмаза.

Пятая глава посвящена рассмотрению процессов сглаживания алмазной поверхности с использованием РИТ. Предложена фрактальная модель анализа шероховатости, которая позволяет сравнить шероховатость поверхности до и после РИТ.

Научная новизна результатов диссертационной работы. Описанные в работе экспериментальные исследования позволили получить ряд новых результатов, которые имеют как практический интерес для развиваемой алмазной микроэлектроники, так и научный интерес в области исследования фундаментальных процессов взаимодействия плазмы с поверхностью и методов диагностики поверхности. В частности представлены новые результаты измерения скорости РИТ алмаза в зависимости от напряжения самосмещения в ВЧЕ-разрядах низкого давления на основе SF_6 , SF_6+CF_4 и SF_6+O_2 . Отмечено влияние химического усиления распыления фтором, приводящее к повышению коэффициента распыления до двух раз по сравнению с коэффициентами чисто физического распыления ионами Cs^+ . Впервые определены селективности травления к алмазу металлов Al, Ni, Cr, Mo и диэлектриков AlN, Al_2O_3 в ВЧЕ-разрядах на основе SF_6 . Впервые получены алмазные микроструктуры сферического профиля при помощи селективного травления с многослойными контактными защитными масками.

Достоверность результатов и обоснованность выводов. Достоверность результатов и обоснованность выводов подтверждается экспериментальными и расчетными методами, применяемыми в физике низкотемпературной плазмы и физике конденсированного состояния ведущими научными группами, многократным проведением экспериментов, обеспечивающих повторяемость результатов, корректной обработкой экспериментальных данных, анализом и сравнением полученных данных с данными верифицированных источников, апробацией результатов на семинарах, конференциях и при публикациях в рецензируемых научных изданиях.

Практическая значимость полученных результатов. Методика формирования алмазных трехмерных структур и модификации поверхности алмаза РИТ

в фторсодержащей плазме с масками из металлов и диэлектриков по-видимому может быть масштабирована и применена в технологических процессах в области алмазной микроэлектроники, микрооптики и других высокотехнологических областях.

Замечания по диссертационной работе. Как всякое серьезное научное исследование, диссертационная работа не свободна от недостатков.

1. В экспериментах параметры плазмы оцениваются косвенными методами по показаниям измерителей параметров элементов цепи питания разряда, кварцевого датчика вакуумметра и контроллеров потоков газов, что снижает точность полученных численных данных и усложняет их верификацию по сравнению со спектральными и зондовыми методами, обычно применяемыми при диагностике низкотемпературной плазмы ВЧЕ разрядов.

2. В работе описан эффект графитизации поверхности алмаза применительно к кислородной плазме, однако для фторсодержащей плазмы методика диагностики и анализ возможной деградации не упомянуты. Из-за нагрева поверхности алмаза деградация поверхностного слоя, т.е. изменение его физических и химических свойств, могут оказаться существенными и стать проблемой, которую необходимо устранить при масштабировании РИТ алмаза для практического применения.

Заключение (выводы о работе). Отмеченные замечания носят рекомендательный характер и не снижают положительной оценки научных результатов диссертации. В работе тщательно исследованы и детально описаны особенности РИТ планарных структур на поверхности синтетического алмаза с использованием набора материалов масок (Al_2O_3 , AlN, Al, Cr, Ni, Mo), смесей плазмообразующих газов (SF_6 , CF_6 , O_2 , Ar), варьирования давления (1-50 мТорр) и мощности разряда (20-50 Вт) с использованием обширного комплекта диагностических средств (РЭМ, СЗМ, АСМ, оптическое профилирование). С привлечением инструментов моделирования проанализированы и систематизированы результаты исследований, сделаны корректные выводы, представляющие научный интерес. Об уровне исследований и интересе к ним свидетельствуют, в частности, публикации автора в международном физическом журнале Phys. Status Solidi A, а также цитирование этих работ авторами статей профильных журналов Diam. Relat. Mater., J. Vac. Sci. Technol. A и др.

Диссертация А. В. Голованова представляется завершенным научным

