

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Голованова Антона Владимировича

по теме «Травление планарных структур «алмаз-металл» и «алмаз-диэлектрик»

высокочастотным газовым разрядом низкого давления»,

представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических

наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

**Актуальность темы.** В диссертации А.В. Голованова «Травление планарных структур «алмаз-металл» и «алмаз-диэлектрик» высокочастотным газовым разрядом низкого давления» представлены результаты изучения процессов взаимодействия алмаза и структур «алмаз-металл»; «алмаз-диэлектрик» с плазмой высокочастотного емкостного (ВЧЕ) газового разряда низкого давления и результатов этого взаимодействия при формировании на поверхности алмаза функциональных интерфейсов.

Уникальные физические и химические свойства алмаза выделяют его в ряду других кристаллических материалов. С развитием технологий роста синтетических кристаллов алмаза со стабильно воспроизводимыми свойствами в мире растет интерес к использованию их в различных областях науки и техники. На основе алмаза создаются элементы радиационно-стойкой силовой электроники и рентгеновской оптики, эмиттеры электронов, акустические резонаторы, дифракционные решетки, нанотвердомеры, сверхтвердый инструмент и другие устройства. Для обработки алмазной поверхности при этом широко применяются плазменные технологии травления, в том числе обеспечивающие селективное травление с использованием защитных масок.

В диссертации решаются задачи определения механизмов взаимодействия плазмы ВЧЕ-разряда низкого давления с поверхностью алмаза, определения скоростей травления и коэффициентов распыления материала в плазме на основе  $SF_6$ , определения различий в скорости травления (селективности) металлов и диэлектриков по отношению к алмазу. Также в работе исследуется влияние параметров плазмы на скорость и анизотропию травления алмаза, и на сглаживание алмазной поверхности. Исследования, проведенные в диссертационной работе А.В. Голованова, представляют большой интерес для научных работников и технологов, занимающихся созданием устройств на основе синтетического алмаза и формированием трехмерных микро- и наноструктур на его поверхности.

**Научная новизна и практическая значимость.** В диссертационной работе А.В. Головановым впервые были экспериментально и теоретически изучены процессы реактивного ионного травления алмаза в плазме, основу которой составляет элегаз  $SF_6$ .

Была исследована зависимость скорости травления алмаза ионами от ускоряющего напряжения, смоделирован состав плазмы и определен коэффициент ионного распыления алмаза. На основе полученных данных А.В. Головановым впервые были сделаны выводы о том, что травление алмаза в плазме на основе  $SF_6$  реализуется по механизму физического распыления ускоренными тяжелыми ионами. Химическое распыление не вносит существенного вклада в разрушение алмазного материала, но усиливает физическое распыление. Также в работе впервые показано, что реактивное ионное травление алмаза в плазмах на основе  $SF_6$  и  $SF_6+CF_4$  приводит к сглаживанию его поверхности.

В работе А.В. Голованова впервые показано, что ВЧЕ-разряд на основе элегаза обеспечивает скорость травления в 6 раз большую, чем используемые в настоящее время для травления алмаза составы на основе  $O_2+Ar$  благодаря распылению тяжелыми ионами, образующимися при разложении молекулы  $SF_6$ . Кроме того, для травления алмаза в ВЧЕ-разрядах на основе  $SF_6$ , А.В. Головановым впервые были определены возможности использования защитных масок из различных материалов (металлов Al, Ni, Cr, Mo и диэлектриков AlN,  $Al_2O_3$ ) для селективного травления и предложена модель, объясняющая зависимость степени селективности при травлении от начальной формы защитной маски в разрядах с интенсивным ионным распылением. В диссертационной работе продемонстрированы примеры практической реализации трехмерных алмазных микроструктур с помощью селективного плазменного травления с использованием защитных масок из металлов и диэлектриков. На основе проведенных исследований предлагаются рекомендации по формированию алмазных структур различной формы (конических, сферических, трапециевидных), востребованных в устройствах различного назначения.

**Обоснованность и достоверность научных положений и выводов** подтверждена использованием современного экспериментального оборудования, накоплением большого количества результатов для получения статистически достоверных и воспроизводимых данных и сравнением их с научно-технической литературой по ионному распылению и реактивному ионному травлению. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на многочисленных научных семинарах, всероссийских и международных конференциях.

**Краткая характеристика основного содержания диссертации.** Диссертация А.В. Голованова состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 133 страницах машинописного текста, включает 53 рисунка и 17 таблиц.

Во **введении** обосновывается актуальность диссертационного исследования; формируется цель работы и ставятся задачи исследования; перечисляются подходы,

примененные к решению поставленных задач; оценивается степень новизны научных результатов, их теоретической и практической значимости; описывается апробация полученных научных результатов и внедрение их в плановые научные исследования. Кроме того, дается краткое изложение содержания диссертации.

В **первой главе** автор приводит литературный обзор по вопросам, затронутым в диссертации: типам синтетического алмаза; теоретическим и экспериментальным аспектам ионного распыления и плазменного травления алмаза; использованию защитных масок для селективного травления алмаза; применению плазменного травления алмаза на практике. На основании представленного обзора сделан вывод о необходимости изучения реактивного ионного травления алмаза и определения селективностей травления металлов и диэлектриков в высокочастотном разряде низкого давления на основе элегаза SF<sub>6</sub>.

Во **второй главе** описываются экспериментальные методики, использованные в работе. Подготовка экспериментальных образцов структур «алмаз-металл» и «алмаз-диэлектрик» осуществлялась распространенными в планарной технологии методами многоступенчатой очистки алмазных подложек, фотолитографии и магнетронного осаждения тонких пленок. Следует отметить, что установка, в которой производились опыты по реактивному ионному травлению алмаза, была создана на основе вакуумной камеры плазменной очистки, в конструкцию которой автором были внесены существенные необходимые для данной работы изменения. Для оценки результатов плазменного травления производился анализ формы и рельефа планарных структур «алмаз-металл» и «алмаз-диэлектрик» до и после травления по данным сканирующей электронной и зондовой микроскопии.

**Третья глава** посвящена исследованию механизмов реактивного ионного травления алмаза. На основе экспериментально исследованной зависимости скорости травления алмаза от самосмещения, и теоретического моделирования состава плазмы, рассчитан коэффициент распыления алмазного материала в плазме на основе SF<sub>6</sub>. Определена роль физического распыления материала ускоренными ионами и химического травления.

В **четвертой главе** приведены результаты исследования селективности травления металлов и диэлектриков к алмазу в плазмах на основе SF<sub>6</sub> и Ar+O<sub>2</sub>. Также в ней демонстрируются примеры трехмерных микроструктур, созданных селективным травлением и объясняется, почему селективность материала снижается с уменьшением размеров маски.

**Пятая глава** посвящена исследованию эффекта сглаживания алмазной поверхности под действием реактивного ионного травления. Методами сравнения параметров шероховатости алмазной поверхности и анализа функции спектральной плотности

мощности шероховатости показано, что алмазная поверхность сглаживается при травлении в разрядах с интенсивным ионным распылением.

В **заключении** приведены научные результаты и выводы диссертационной работы. Также, каждая глава снабжена краткими выводами.

По работе могут быть высказаны следующие **замечания**:

1. Полезно было бы экспериментально проконтролировать состав плазмы ВЧ-разряда на основе  $SF_6$ , который теоретически моделировался в главе 3.
2. Необходимы дополнительные обоснования и комментарии относительно целесообразности использования тетрафторметана в процессе травления алмаза, в связи с известной низкой эффективностью его использования для пассивации поверхности кремниевых подложек при реактивном ионном травлении, аналогично Bosch-процессу травления.
3. Представляется полезным построение моделей и проведение теоретических расчетов для объяснения и обобщения полученных в работе экспериментальных результатов, например, относящихся к зависимости селективности травления от исходной формы защитной маски, аналогично тому, как это сделано при моделировании состава плазмы и теоретических оценках коэффициента распыления алмаза.
4. Также в диссертационной работе и автореферате встречаются опечатки, орфографические ошибки и примеры неправильного форматирования текста. Указанные замечания, однако, не снижают значимости полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку диссертационного исследования А.В. Голованова.

**Общее заключение.** Основные результаты диссертации опубликованы в 24 научных работах, в том числе 8 статьях, опубликованных в рецензируемых журналах, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science и в перечень ВАК России. Результаты диссертационного исследования прошли апробацию на конференциях и научных семинарах.

Автореферат и опубликованные работы достаточно полно отражают основное содержание диссертации, характеризуют результаты проведенных А.В. Головановым исследований.

В целом диссертация А.В. Голованова является законченным исследованием. Результаты являются оригинальными и соответствуют поставленным целям, а выводы убедительны и носят принципиальный характер. Уровень решаемых задач представляется соответствующим требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой

степени кандидата физико-математических наук. Содержание диссертации соответствует специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Диссертационное исследование Голованова Антона Владимировича «Травление планарных структур «алмаз-металл» и «алмаз-диэлектрик» высокочастотным газовым разрядом низкого давления» является завершенной научно-квалификационной работой, отвечает требованиям, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации «О порядке присуждения ученых степеней» от 24.09.2013 г., № 842. Диссертант, Голованов Антон Владимирович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 — Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент:

профессор кафедры физики полимеров и кристаллов

физического факультета

МГУ имени М.В. Ломоносова

доктор физ.-мат. наук по специальности

01.04.10 – Физика полупроводников

Образцов Александр Николаевич

«24» сентября 2021 г.

Почтовый адрес: 119991, Российская Федерация, Ленинские горы, МГУ имени М.В. Ломоносова, дом 1, строение 2, Физический Факультет

Тел.: +7 (495) 939-41-26

E-mail: obraz@polly.phys.msu.ru

Подпись А. Н. Образцова заверяю,

Декан Физического факультета МГУ

Профессор



И. И. Сысоев