

## ОТЗЫВ

### научного руководителя

кандидата технических наук, Соловьёва Андрея Александровича  
на диссертационную работу Гренадёрва Александра Сергеевича на тему  
«Формирование а-С:Н:SiO<sub>x</sub> плёнок методом плазмохимического осаждения»,  
представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук  
по специальности 01.04.04 – «Физическая электроника»

Диссертация Гренадёрва А.С. выполнена в Институте сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН) и посвящена актуальному вопросу – формированию легированных кремнием и кислородом гидrogenизированных углеродных плёнок (а-С:Н:SiO<sub>x</sub>) методом плазмохимического осаждения.

Аморфные углеродные пленки (а-С и а-С:Н) давно привлекают внимание своими превосходными механическими и трибологическими свойствами. Однако имеют несколько серьезных недостатков – высокие внутренние напряжения и низкую термостабильность. Легирование а-С:Н пленок кремнием и кислородом способствует снижению внутренних напряжений, обеспечивая хорошую адгезию ко многим типам подложек и позволяя формировать пленки толщиной десятки микрон. При этом хорошие физико-механические и трибологические свойства, присущие аморфному углероду, сохраняются. Для осаждения а-С:Н:SiO<sub>x</sub> в основном используются плазмохимические методы с использованием высокочастотного напряжения смещения. Автором диссертации было предложено заменить высокочастотное электропитание, применение которого связано с рядом трудностей (более дорогостоящее оборудование, трудность масштабирования), на импульсное среднечастотное биполярное питание, которое не имеет ограничений по мощности и размерам обрабатываемых образцов и хорошо зарекомендовало себя в технологиях осаждения непроводящих оксидных пленок.

Данная работа является законченным научным исследованием, в котором были получены важные научные и практические результаты, демонстрирующие перспективность использования плазмохимического метода осаждения с использованием импульсного биполярного напряжения смещения для формирования а-С:Н:SiO<sub>x</sub> пленок.

На основе полученных результатов Гренадёрвым А.С. было установлено, что структура и свойства а-С:Н:SiO<sub>x</sub> плёнок, осаждаемых в смеси аргона и паров полифенилметилсилоксана сильно зависят от таких параметров как: рабочее давление аргона, амплитуда отрицательного импульса биполярного напряжения смещения подложки, индукция магнитного поля в области подложки, расстояние

плазмогенератор/подложка, расход полифенилметилсилоксана. Было показано, что увеличение рабочего давления аргона и амплитуды отрицательного импульса биполярного напряжения смещения приводит к повышению твердости, индекса пластичности, сопротивления пластической деформации, а также к изменению оптических свойств пленок (прозрачности в видимой области длин волн 380-780 нм, ширины запрещенной зоны, энергии Урбаха). Установлено, что существует оптимальная величина индукции магнитного поля в области подложки, при которой обеспечиваются наилучшие характеристики пленок. Показано, что уменьшение расстояния плазмогенератор/подложка приводит к увеличению плотности ионного тока на подложку, что способствует улучшению механических характеристик формируемых пленок. Обнаружено, что при увеличении расхода полифенилметилсилоксана наблюдается повышение скорости осаждения пленок на порядок величины без существенного изменения их механических характеристик.

Основываясь на этих результатах, были определены условия осаждения пленок, применяемых для решения ряда практических задач: повышения электрической прочности вакуумных промежутков, износостойкости стали 12Х18Н10Т и титанового сплава ВТ1-0, просветления кремниевых пластин в ИК-области длин волн. Полученные а-С:Н:SiO<sub>x</sub> плёнки были использованы на титановых деталях дискового кардионасоса для снижения степени разрушения форменных элементов крови (эритроцитов) и обеспечения износостойкости трущихся узлов (имеется акт внедрения от АО НПК ИМПУЛЬС-проект, г. Новосибирск).

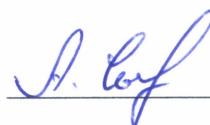
Вклад Гренадёрва А.С. в получение результатов диссертации является определяющим. За 4 года работы над диссертацией Гренадёрв А.С. выполнил большой объем лабораторных и аналитических исследований. Александр Сергеевич активно участвовал в научных конференциях российского и международного уровня, а также проявлял интерес к написанию научных публикаций. В процессе написания диссертации Гренадёрв А.С. изучил и проанализировал большой объем научной литературы. Гренадёрв А.С. сформировался в квалифицированного специалиста в области осаждения и исследования тонких плёнок, способен самостоятельно планировать и качественно проводить научные исследования.

Основные результаты работы докладывались на 7 конференциях российского и международного уровня и изложены в 8 научных работах: 4 статьи в журналах, включённых в Перечень ВАХ; 4 публикации в сборниках докладов материалов международных конференций. Метод повышения электрической прочности вакуумных промежутков с использованием а-С:Н:SiO<sub>x</sub> пленки защищен патентом РФ № 2665315 от 29.08.2018.

За время работы в Институте сильноточной электроники СО РАН Гренадёров А.С. занимал призовые места в конкурсах на лучшую научно-исследовательскую и инженерно-технологическую работу среди молодых сотрудников ИСЭ СО РАН в 2015, 2016 и 2017 гг.

Считаю, что диссертация Гренадёрова Александра Сергеевича «Формирование  $a\text{-C:H:SiO}_x$  плёнок методом плазмохимического осаждения» полностью соответствует требованиям предъявляемым ВАК Российской Федерации к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 – «Физическая электроника».

Научный руководитель,  
Заведующий лабораторией прикладной  
электроники федерального государственного бюджетного  
учреждения науки Института сильноточной электроники  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
кандидат технических наук  
Андрей Александрович Соловьев  
Россия, 634055, г. Томск, проспект Академический, 2/3  
тел. (3822) 491-651, e-mail: andrewsol@mail.ru,



А.А. Соловьев

Подпись А.А. Соловьева заверяю:  
Ученый секретарь федерального государственного бюджетного  
учреждения науки Института сильноточной электроники  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
доктор физико-математических наук  
Игорь Валерьевич Пегель



И.В. Пегель