

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу  
Гренадёрва Александра Сергеевича «Формирование а-С:Н:SiO<sub>x</sub> плёнок  
методом плазмохимического осаждения», представленную к защите  
на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 01.04.04 – Физическая электроника

### Актуальность темы диссертации

В последнее время интерес к технологиям получения функциональных слоев и покрытий неуклонно растет. Это связано с увеличением количества прикладных задач, в которых требуется обеспечить широкий спектр физико-механических характеристик поверхности новых материалов. Тонкие (от десятков нм до единиц мкм) пленки на основе углерода сочетают в себе отличные механические, трибологические и электрофизические свойства, поэтому областями применения углеродных (а-С, а-С:Н) покрытий выступает промышленность, оптика, радиоэлектроника и др. Тем не менее, серьезными недостатками углеродных покрытий выступают высокие остаточные напряжения, приводящие к разрушению покрытия, а также низкая температурная стабильность, вызывающая деградацию механических и трибологических свойств при температуре 250-300 °С.

Одним из способов устранения данных недостатков является легирование углеродных покрытий различными элементами, в том числе кремнием и кислородом (а-С:Н:SiO<sub>x</sub>). В этом случае пленки характеризуются низкими остаточными напряжениями, а твердость снижается до 15-20 ГПа. Несмотря на снижение твердости, пленки имеют высокие трибологические характеристики, в частности низкий коэффициент трения (0,02-0,2) и низкую скорость износа ( $10^{-5}$ - $10^{-8}$  мм<sup>3</sup>/Н·м). Для получения а-С:Н:SiO<sub>x</sub> покрытий используют методом плазмохимического осаждения с использованием высокочастотного электропитания на промышленной частоте 1,76/13,56 МГц, так как пленка является непроводящей. Высокочастотное питание имеет ряд недостатков, основными из которых является необходимость в устройстве согласования источника питания с нагрузкой и ограничение в площади обрабатываемых подложек.

Таким образом, **цель**, поставленная в настоящей диссертационной работе, состоящая в исследовании особенностей формирования а-С:Н:SiO<sub>x</sub> пленок, наносимых методом плазмохимического осаждения в смеси аргона и паров полифенилметилсилоксана является **актуальной**. Решение задач, поставленных для достижения данной цели, позволяют использовать результаты диссертации как с научной точки зрения, так и для решения прикладных задач (повышение

электрической прочности вакуумных промежутков, износостойкости материалов и просветления ИК-оптики).

Диссертация А.С. Гренадёрва содержит совокупность новых результатов и научных положений, обоснованность и достоверность которых не вызывает сомнений. **К наиболее значимым относятся:**

Доказательство изменения механических и оптических свойств пленок за счет увеличения содержания и  $sp^3$  гибридизированных атомов углерода, которое достигается изменением содержания функциональных групп Si-O, Si-C, Si-H и C-H в пленке. Изменение содержания функциональных групп получается за счет интенсификацией ионной бомбардировки пленки в процессе роста, при увеличении рабочего давления аргона и амплитуды отрицательного импульса биполярного напряжения смещения.

Установление, что увеличение расхода полифенилметилсилоксана в диапазоне 35-287 мкл/мин способствует повышению скорости осаждения а-C:H:SiO<sub>x</sub> пленок с 17 до 221 нм/мин без ухудшения их механических свойств.

Установление особенностей формирования а-C:H:SiO<sub>x</sub> пленок плазмохимическим методом в смеси аргона и паров полифенилметилсилоксана с совокупностью свойств для прикладного использования: твердость ~15 ГПа, модуль упругости ~124 ГПа, индекс пластичности 0,12, сопротивление пластической деформации 203 МПа, интегральная прозрачность в ИК-области длин волн 3-5 мкм – 87%, скорость износа  $(5\div 7)\cdot 10^{-6}$  мм<sup>3</sup>/Н·м, коэффициентом трения 0,1.

**Степень обоснованности и достоверности полученных результатов** подтверждается использованием сертифицированного оборудования, систематическим характером исследований, применением независимых экспериментальных методик, сравнение полученных результатов с уже признанными результатами других исследователей и их удовлетворительным совпадением.

Важным результатом работы является ее **практическая ценность**, заключающаяся:

в создании основ технологии осаждения а-C:H:SiO<sub>x</sub> пленок плазмохимическим методом при использовании импульсного биполярного напряжения смещения с механическими и трибологическими свойствами, сопоставимыми с полученными при использовании высокочастотного электропитания;

повышении импульсной электрической прочности миллиметровых вакуумных промежутков за счет нанесения пленок а-C:H:SiO<sub>x</sub>;

повышении прозрачности подложек кремния в ИК-области длин волн 3-5 мкм при нанесении пленок а-C:H:SiO<sub>x</sub> на их поверхности.

Согласно приложенному акту внедрения, результаты работы используются на предприятии АО НПК «ИМПУЛЬС-проект» для нанесения  $a\text{-C:H:SiO}_x$  пленки на детали дискового насоса для механической поддержки сердца, которая обеспечивает снижение шероховатости и коэффициент трения деталей и, как следствие, снижение травмирования форменных элементов крови (эритроцитов).

Наряду с достаточной научной обоснованностью, высоким уровнем полученных результатов, детальным исследованием особенностей формирования и свойств наносимых  $a\text{-C:H:SiO}_x$  пленок, к диссертации имеется ряд **замечаний**:

1. Стр. 10. 4 положение выносимое на защиту. Не совсем правильно сформулировано. Т.к. то, что пленки могут быть использованы для получение более высокой прозрачности и так ясно. Основным же является получение более высокой прозрачности.

2. Стр. 52 4 абзац. Не корректно инфракрасное излучение называть световым потоком. Световой поток это видимое излучение.

3. Стр. 55 последний абзац. Следовало бы более подробно описать, как проводились измерения износостойкости, т.к. пленка очень тонкая и измерение тонких слоев всегда проблематично.

4. Стр. 69. Прозрачность правильной будет → пропускание.

### **Заключение**

Указанные замечания, в основном, имеют характер рекомендаций и не снижают высокой итоговой оценки диссертационной работы Гренадёрва А.С., которая подтверждает достаточную научную квалификацию автора. В целом, диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой выполнен широкий спектр исследований и установлены зависимости структуры/свойств формируемых  $a\text{-C:H:SiO}_x$  пленок от основных параметров процесса осаждения; оптимизированы условия осаждения для обеспечения повышения электрической прочности вакуумных промежутков, повышения механических и трибологических характеристик материалов, а также просветления кремниевых пластин в ИК-области длин волн.

Автореферат диссертационной работы полностью отражает ее содержание, основные результаты и выводы. Согласно научной новизне и практической значимости результатов работы, ее содержанию и оформлению диссертационная работа Гренадёрва Александра Сергеевича «Формирование  $a\text{-C:H:SiO}_x$  плёнок методом плазмохимического осаждения» соответствует всем требованиям, предъявляемым Высшей аттестационной комиссией РФ к кандидатским диссертациям и соответствует п. 9 Положения о порядке

присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 – Физическая электроника.

Официальный оппонент:



Гриценко Борис Петрович

Доктор технических наук (специальность 01.04.07), старший научный сотрудник лаборатории материаловедения покрытий и нанотехнологий, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН), 634055 г. Томск, пр-т Академический 2/4

Тел. +7(3822)-286-926, сот. 8-913-884-17-97

Электронный адрес: [gritsenko@ispms.ru](mailto:gritsenko@ispms.ru)

Подпись Б.П. Гриценко удостоверяю:

Ученый секретарь ИФПМ СО РАН, к.ф.-м.н.



Матолыгина Наталья Юрьевна