



УТВЕРЖДАЮ

Проректор ФГБОУ ВО

«НИУ МЭИ» по научной работе

д.т.н. Драгунов В.К.

« 4 » _____ 12 _____ 2018 г.

О Т З Ы В

ведущей организации - федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» на диссертационную работу Гренадёрва Александра Сергеевича на тему «Формирование а-C:H:SiO_x плёнок методом плазмохимического осаждения», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 – Физическая электроника

Возможность эффективного управления свойствами кристаллических полупроводников путем легирования явилась основой развития современной твердотельной электроники, микро- и нанoeлектроники. Вместе с тем отличительной чертой аморфных полупроводников является слабая чувствительность этих материалов к примесям, что вызывает серьезные трудности в управлении их свойствами традиционными методами. В рассматриваемой работе задача получения аморфных пленок с заданными свойствами решается не традиционным методом легирования, а путем структурной модификации, то есть направленным изменением атомной структуры материала с помощью различных технологических факторов. Такая постановка задачи безусловно **является актуальной**.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка используемой литературы из 155 наименований и приложения. Общий объем составляет 142 страницы машинописного текста.

В **первой главе** представлен аналитический обзор, посвященный анализу аморфных алмазоподобных пленок. Рассматриваются достоинства и недостатки алмазоподобных пленок углерода, проводится их сравнение с алмазоподобными кремний - углеродными пленками, на основании которого показаны преимущества последних. Проведен анализ основных методов

получения аморфных кремний - углеродных пленок, позволивший сформулировать основные направления исследований.

Вторая глава посвящена описанию созданной установки для получения аморфных кремний – углеродных пленок методом плазмохимического осаждения с использованием импульсного биполярного напряжения смещения. Описаны аналитическое и измерительное оборудование, использованное в работе, и методики проводимых исследований, включая спектроскопию комбинационного рассеяния, ИК-Фурье спектроскопию, атомно-силовую микроскопию и другие методы.

В третьей главе изложены результаты исследования влияния условий и режимов осаждения кремний – углеродных пленок (давление аргона в рабочей камере, амплитуда отрицательного импульса биполярного напряжения смещения, расстояние между плазмогенератором и подложкой, величина магнитного поля в рабочей области, расход полиметилфенилсилоксана) на структуру и свойства получаемых плёнок. Показано, что условия осаждения оказывают существенное влияние на соотношение sp^3 - и sp^2 -гибридизированных атомов углерода, концентрацию функциональных групп Si-O, Si-C, Si-H и C-H в пленке. Перечисленные изменения атомной структуры приводят к изменениям физико-механических и оптических свойств, что обуславливает значительное улучшение эксплуатационных характеристик покрытий из этих материалов.

Четвертая глава диссертации посвящена прикладным аспектам. В ней показано, что оптимизация параметров осаждения, проведенная в рассматриваемой работе, позволила получить кремний – углеродные пленки, обеспечивающие улучшение механических и трибологических свойств на металлических подложках, увеличить (на основе эффекта просветления) прозрачность кремниевых пластин в диапазоне длин волн 3 – 5 мкм, повысить импульсную электрическую прочность вакуумных промежутков с титановыми электродами.

В конце работы сформулированы основные результаты диссертации.

Научное новизна результатов диссертации заключается в том, что автором установлены зависимости атомной структуры аморфных кремний – углеродных пленок (соотношение атомов углерода с sp^3 и sp^2 гибридизацией электронных орбиталей, содержание функциональных групп Si-C, Si-O, Si-H, C-H) от различных технологических факторов в процессе их получения и вскрыты физические механизмы, обуславливающие эти зависимости. А

также определено влияние наблюдаемых изменений атомной структуры на механические, оптические и электрические свойства пленок. Также к научной новизне следует отнести и разработанный автором способ обработки электродов изолирующих промежутков высоковольтных электровакуумных приборов, защищенный патентом РФ.

Обоснованность и достоверность полученных научных результатов определяется использованием современных методов исследований, а также подтверждается согласованностью результатов, полученных различными экспериментальными методами.

В качестве **практической ценности** рассматриваемой работы следует отметить разработку и реализацию технологии осаждения аморфных алмазоподобных кремний – углеродных пленок, обладающих хорошими механическими, трибологическими и оптическими свойствами, разработку методов снижения коэффициента трения, скорости износа и увеличения интегральной прозрачности в ИК области исследуемых пленок. Так же к практической ценности относятся разработанные методы повышения электрической прочности вакуумной изоляции и улучшения характеристик элементов насосов для механической поддержки сердца.

Подтверждение опубликования основных результатов диссертации в научной печати. Основные научные результаты диссертации достаточно полно опубликованы в 8 статьях в журналах, включенных в список ВАК и в других изданиях, а также докладывались на многочисленных российских и зарубежных конференциях, семинарах и школах. Кроме того автором получен патент РФ.

В качестве **критических замечаний** по диссертационной работе необходимо отметить следующее.

1. Нельзя признать удачной формулировку цели работы «Исследование особенностей» (стр. 7), поскольку процесс исследования является лишь методом достижения цели. Положение 4 научной новизны правильнее было бы отнести к практической ценности работы.

2. На странице 15 пленки аморфного углерода подразделяются на алмазоподобные (DLC) и ta-C. Такое разделение не корректно, так и в тех и в других пленках атомы углерода имеют тетраэдрическую конфигурацию.

3. Последняя часть утверждения на стр. 63, что «увеличение интенсивности D-пика соответствует увеличению количества sp^2 -связанных кластеров в аморфном углероде, т.е. приводит к увеличению содержания

микрористаллического графита в объеме пленки...» является спорным, поскольку увеличение количества sp^2 -гибридизированных атомов углерода не означает обязательного образования микрористаллов графита. Такие атомы могут оставаться в структурной сетке аморфного углерода.

4. В разделе 3.2.1 автор связывает наличие края Урбаха на спектральной зависимости коэффициента оптического поглощения с экспоненциальным распределением плотности локализованных состояний в хвостах зон. При этом он утверждает, что «это соответствует модели Мотта и Дэвиса для разупорядоченных материалов». При этом ссылка делается не на работу Мотта и Дэвиса, а на статьи других авторов. Однако в монографии Мотта и Дэвиса «Электронные процессы в некристаллических полупроводниках» утверждается прямо противоположное: «Имеется несколько возможных объяснений экспоненциального края поглощения. В аморфных полупроводниках появляется дополнительная возможность, о которой упоминали многие авторы, а именно переходы между локализованными состояниями в хвостах зон, плотность которых экспоненциально падает с энергией. Мы считаем, что это объяснение маловероятно [далее идет обоснование их точки зрения]».

5. В том же разделе (3.2.1) на основании экспериментальных данных автором показано, что увеличение интенсивности бомбардировки растущей пленки ионами аргона ведет к увеличению концентрации атомов углерода с sp^3 -гибридизацией. Однако физическая основа данного явления в работе рассмотрена весьма поверхностно.

6. В заключении к разделу 3.2.2 утверждается, что увеличение содержания sp^3 -гибридизированных атомов углерода в пленке способствует снижению ширины запрещенной зоны. Данное утверждение вызывает удивление, поскольку модификация углерода с sp^3 -гибридизацией (алмаз) обладает максимальной шириной запрещенной зоны.

7. В конце раздела 4.1 автор отмечает, что «первый пробой приводит к снижению прочности разрядного промежутка ниже уровня, характерного для электродов без пленки». К сожалению, этот интересный факт в работе никак не анализируется.

8. Ряд работ (144-154) в списке литературы приведены без названий.

Перечисленные замечания не оказывают принципиального влияния на отмеченные выше положительные стороны работы.

Материалы диссертации изложены логично и аргументировано. Содержание автореферата соответствует материалам, изложенным в диссертации. Диссертация представляет собой законченное научное исследование, в результате которого получены новые теоретические и экспериментальные результаты, обладающие научной новизной. Положения, выносимые на защиту, достаточно обоснованы. В целом диссертационная работа Гренадёрва Александра Сергеевича на тему «Формирование а-С:H:SiO_x плёнок методом плазмохимического осаждения», отвечает требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 – Физическая электроника, а диссертант заслуживает присвоения ему искомой степени.

Диссертация обсуждена на заседании кафедры Электроники и наноэлектроники «04» декабря 2018 г. протокол № 11.

Директор Института радиотехники и электроники НИУ «МЭИ»
зав. кафедрой Электроники и наноэлектроники, д.т.н., профессор

Мирошникова Ирина Николаевна

Ученый секретарь кафедры Электроники и наноэлектроники,
к. т. н. доцент

Сарач Ольга Борисовна

Адрес: 111250, Россия, Москва, Е-250, Красноказарменная улица, дом 14
Тел.: +7 (495) 362-73-09. Эл. почта: universe@mpei.ac.ru