

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет информатики и
радиоэлектроники

УДК 621.793

Леонович

Никита Викторович

Реактор осаждения алмазоподобных углеродных покрытий
в плазме высокой плотности

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра технических наук
по специальности 1-41 80 01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные
компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах»

Научный руководитель

Котов Дмитрий Анатольевич

к.т.н., доцент кафедры МНЭ

Минск 2020

ВВЕДЕНИЕ

Проблема нанесения тонкопленочных покрытий включает в себя научно-технические аспекты, относящиеся к физике, химии, механике и является едва ли не самой обширной среди современных актуальных направлений технологии. Реализация этих требований напрямую зависит от достижений в конструировании оборудования и совершенствования технологических процессов получения тонких пленок. В настоящее время наиболее перспективными методами нанесения покрытий являются вакуумные ионно-плазменные. Это обусловлено их экологической безопасностью, высокой чистотой технологических процессов и качеством продукции. Также известно, что в ионизованном или возбужденном состоянии атомы и молекулы легче взаимодействуют друг с другом, делая процесс синтеза сложных соединений более эффективным.

Алмаз – один из самых твердых материалов, имеет самый низкий коэффициент термического расширения, химически инертен и износоустойчив, обладает низким коэффициентом трения, высокой удельной теплопроводностью, является диэлектриком и оптически прозрачным от ультрафиолета (УФ) диапазона до далекого инфракрасного (ИК) диапазона.

С другой стороны, во-первых, наносить алмазное покрытие на изделия экономически не целесообразно, а во-вторых, из-за низкого коэффициента термического расширения алмазные покрытия очень быстро приходят в негодность. Поэтому в технологии применяются алмазоподобные покрытия – углеродные покрытия, обладающие преимуществами алмазных, но лишенные их недостатков.

Также алмазоподобные углеродные (АПУ) покрытия находят применение в различных областях. В трибологии – как механически твердые и устойчивые к царапинам слои для покрытия режущих поверхностей инструментов. В электронике алмазоподобные покрытия применяются для пассивации элементов, как отводящие тепло элементы, благодаря своей высокой теплопроводности и электрическому сопротивлению. Благодаря биосовместимости, износостойкости и химической инертности, алмазоподобные углеродные покрытия используются для покрытия искусственных клапанов сердца, для покрытия линз.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы магистерской диссертации. Состоит в том, что в сильноточных приборах применяются алмазоподобные покрытия, которые обладают рядом свойств: высоким пропусканием в ик-спектре, механически твердые и устойчивые к износу, с высокой теплопроводностью и электрическим сопротивлением. Проблема нанесения тонкопленочных покрытий включает в себя научно-технические аспекты, относящиеся к физике, химии, механике. Реализация этих требований напрямую зависит от достижений в конструировании оборудования и совершенствования технологических процессов получения тонких пленок.

Цель и задачи исследования.

Целью работы является разработка экспериментального комплекса для нанесения алмазоподобных углеродных покрытий и исследования полученных пленок. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- провести аналитические исследования методов получения алмазоподобных углеродных покрытий;
- разработать экспериментальный комплекс для получения алмазоподобных углеродных покрытий;
- определить оптимальные параметры для зажигания и горения высокоплотной плазмы, рассчитать оптимальную конструкцию газораспределителя для равномерного распределения рабочего вещества;
- провести экспериментальные исследования технологии формирования защитного просветляющего АПУ покрытия ИК диапазона.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является разработанный реактор осаждения алмазоподобных углеродных покрытий. Предметом исследования являются зависимости и закономерности процесса формирования алмазоподобных углеродных покрытий, а также изменения свойств полученных пленок в зависимости от условий процесса.

Область исследования. Содержание диссертационной работы соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) специальности 1-41 80 01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах».

Теоретическая и методологическая основа исследования.

В результате выполнения аналитических исследований были рассмотрены различные типы алмазоподобных углеродных покрытий, а также сравнены их структурные, механические, оптические и электрические свойства.

Для реализации метода HDPCVD был разработан цилиндрический реактор, расположенный вертикально. Расчеты газораспределенной системы, равномерность охлаждения подложкодержателя и влияние магнитного поля на степень ионизации и давления в камере проводились в программном комплексе Comsol Multiphysics методом конечных элементов. Предварительно геометрия всех элементов создавалась в САД - приложении Autodesk Inventor Professional и далее импортировалась в Comsol Multiphysics. Осаждение алмазоподобных углеродных покрытий осуществлялось в модернизированном экспериментальном реакторе вакуумной установки ВУП-5.

Информационная база исследования заключается в определении оптимальных конструктивных параметров газораспределительной системы, расчете равномерности охлаждения подложкодержателя и исследовании влияния магнитного поля на зажигание и горение высокоплотной плазмы.

Научная новизна диссертационной работы заключается в разработке экспериментального комплекса формирования алмазоподобных углеродных покрытий.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту. На защиту выносятся следующие основные результаты:

1. Для реализации метода HDPCVD был разработан цилиндрический реактор, расположенный вертикально. Диаметр реактора составляет 270 мм, при этом позволяет обрабатывать подложки диаметром до 200 мм. На нижнем торце реактора расположен держатель подложки, на верхнем торце крепится газораспределитель, выход которого расположен в зоне образования плазмы и крепится плоский источник плазмы высокой плотности. Источник представляет из себя плоский индуктор диаметром 200 мм в виде четырехзаходной спирали, работающий от источника питания вырабатывающий высокочастотный сигнал 13,56 МГц.

2. Теоретическая значимость диссертации заключается в исследовании влияния магнитного поля на зажигание и горение

высокоплотной плазмы, расчетах распределения потока рабочего вещества, расчетах равномерности распределения нагрева подложкодержателя.

3. Практическая значимость состоит в том, что был разработан экспериментальный комплекс формирования алмазоподобных углеродных покрытий.

Личный вклад соискателя. Все основные результаты и выводы получены соискателем самостоятельно. Разработка, расчеты, сборка и запуск реактора осаждения алмазоподобных углеродных покрытий и системы питания, а также получение пленок проводилась соискателем лично. Во время работы над диссертацией соискателем были выявлены зависимости влияния магнитного поля на зажигание и горение высокоплотной плазмы. Анализ результатов экспериментальных проводился совместно с научным руководителем кандидатом технических наук Котовым Д.А.

Апробация результатов диссертации. Основные теоретические результаты и законченные этапы диссертационной работы, а также результаты прикладных исследований и разработок были не однократно представлены на республиканских и международных конференциях.

Отдельные положения, в частности метод нанесения просветляющих покрытий использовались в рамках научно-технической программы Союзного государства 2016-2020 годы «Разработка комплексных технологий создания материалов, устройств и ключевых элементов космических средств и перспективной продукции других отраслей» («Технология-СТ»).

Публикации. Основные положения работы и результаты диссертации изложены в 4 опубликованных работах, представленных в материалах международных научно-практических и научно-технических конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения и списка использованных источников, включающего 15 наименований. Общий объем диссертации составляет 62 страниц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрены проблемы получения и преимущества применения алмазоподобных углеродных покрытий, а также дается обоснование актуальности темы диссертационной работы.

В **первой главе** приводятся аналитические исследования различных модификаций углерода и подробно рассмотрены структурные, механические, оптические и электрические свойства алмазоподобных углеродных

покрытий. Рассмотрены основные методы получения различных типов алмазоподобных пленок.

Во **второй главе** показаны и объяснены зачем нужны основные составляющие элементы экспериментального комплекса: турбомолекулярный механический насос ТМН-500, двухступенчатый форвакуумный пластинчато-роторный вакуумный насос VRD-48, датчики измерения вакуума, высокочастотный генератор GA-13.2, блок согласования АМП-3000. Так же изображен модифицированный реактор осаждения алмазоподобных углеродных покрытий.

В **третьей главе** приведены результаты расчетов распределения рабочего вещества в камере, равномерность охлаждения подложкодержателя. Для увеличения степени ионизации и создания высокоплотной плазмы рассмотрены магнитная система из трех соленоидов и магнитная система из двух соленоидов.

В **четвертой главе** для подтверждения проведенных теоретических исследований показаны результаты экспериментов с макетным образцом плоского источника индуктивно-связанной плазмы высокой плотности. А также представлены результаты экспериментального исследования технологии формирования защитного просветляющего АПУ покрытия ИК диапазона.

В **выводах** кратко изложены основные результаты магистерской диссертации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа научной и патентной литературы работы было показано существование несколько видов покрытий на основе алмазоподобного углерода с такими фазами как $ta-C$, $ta-C:H$ и углеводородный полимер. В зависимости от превалирования фаз и содержания водорода существенно изменяются физико-химические свойства таких покрытий.

Установлено что, для создания алмазоподобных покрытий наиболее пригодны два типа покрытий: с тетрагональной структурой без содержания водорода ($ta-C$), и с его содержанием не более 30% ($ta-C:H$).

Осаждение покрытий, с выше указанной структурой, обеспечивается следующими методами:

- вакуумного дугового испарения;
- импульсного лазерного испарения;

– химического вакуумного осаждения из парогазовой фазы с применением плазмы высокой плотности.

Разработан экспериментальный комплекс для нанесения алмазоподобных углеродных покрытий диаметром реактора 270 мм, при этом позволяет наносить АПУ покрытия на подложки диаметром до 200 мм. Для получения алмазоподобных углеродных покрытий был выбран метод HDPCVD. С целью увеличения степени ионизации при работе в давлении 0,1-1 Па были определены оптимальные параметры магнитной системы для зажигания и горения высокоплотной плазмы и было выбрано аксиальное магнитное поле с двумя соленоидами. Поле в 1 мТ оптимально для поддержания разряда, в качестве рабочего газа выступает Ar и C₂H₂.

Так же была рассчитана и выбрана оптимальная конструкция газораспределителя для равномерного распределения рабочего вещества в зоне образования высокоплотной плазмы.

В результате проведения экспериментальных исследований технологии формирования защитного просветляющего АПУ покрытия ИК диапазона у полученных пленок количество sp^3 связей (алмазоподобная фаза) превышает 40 %. Исходя из результатов экспериментов и их анализа, можно рекомендовать для получения оптически пригодных покрытий использовать пропан и ацетилен, являющимися источниками углерода, у которых оптимальное соотношение углерода и водорода в молекуле вещества.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

[1] Леонович Н.В., Толкач М.А., Занько А.И. Реактор осаждения алмазоподобных углеродных покрытий// 26-я Международная научно-практическая конференции аспирантов, магистрантов и студентов «Физика конденсированного состояния». – Гродно : ГрГУ, 2019.

[2] Занько А.И., Леонович Н.В., Котов Д.А. Химическое осаждение и газовой фазы пленок SiO_2 в плазме высокой плотности// 26-я Международная научно-практическая конференции аспирантов, магистрантов и студентов «Физика конденсированного состояния». – Гродно : ГрГУ, 2019.

[3] Занько А.И., Леонович Н.В. Расчет газового потока в установке плазмохимического осаждения// Радиотехника и электроника : материалы 56 науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 22–26 апреля 2019 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск : БГУИР, 2019. – С. 179-181.

[4] Занько А.И., Леонович Н.В., Толкач М.А. Реактор плазмохимического осаждения диэлектрических слоев на основе кремния// Радиотехника и электроника : материалы 56 юбилейной науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 22–26 апреля 2019 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск : БГУИР, 2019. – С. 179-181.