

ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертационную работу

Хамдохова Эльдара Залимовича

«ФОРМИРОВАНИЕ ГРАФИТОПОДОБНЫХ НАНОСТРУКТУР В УГЛЕРОДНЫХ ПЛЕНКАХ, ПОЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОДУГОВЫМ МЕТОДОМ»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по спе-
циальности 01.04.15 – Физика и технология наноструктур, атомная и молекулярная
физика

Диссертация Хамдохова Э. З. посвящена получению графитоподобных наноструктур в субмикронных пленках углерода и исследованию их автоэмиссионных свойств. **Цель работы:** развитие технологии формирования графитоподобных наноструктур (эмиссионных центров) в углеродных пленках, полученных электродуговым распылением графита в магнитном поле, для создания автоэмиссионных катодов.

Результаты системных исследований автоэмиссионных свойств различных проводников показывают перспективность их использования в СВЧ приборах, рентгеновских трубках и источниках света в качестве катодов. Однако в отечественной и зарубежной печати нет достаточных данных о способах получения автоэмиссионных углеродных сред большой площади с однородными эмиссионными свойствами рабочей поверхности. Одним из основных, наиболее распространенных методов получения углеродных пленок является вакуумно-дуговой метод, т.е. электродуговое распыление графита. Структура и свойства углеродных пленок определяются режимом конденсации плазменного потока на подложку. К наиболее значимым параметрам осаждения относится потенциал смешения, ток дуги, давление инертного газа, температура конденсации и т.д. Данный способ нанесения углеродных пленок, как справедливо отмечает диссертант не нашел широкого применения в полупроводнико-вой электронике из-за присутствия в плазменном потоке микрочастиц углерода.

Новым интересным направлением, развивающейся в диссертационной работе Хамдохова Э. З., является исследование зависимости свойств и структуры углерод-

ной пленки от использования магнитного поля для выделения мелкодисперсной углеродной фракции из общего плазменного потока. Данный аспект процесса осаждения не получал должного внимания в научной литературе. Таким образом, исследования, проведенные Хамдоховым Э. З. на модернизированной серийной установке, представляют собой большой практический и научный интерес.

Диссертация состоит из введения, трех глав и выводов, списка цитируемой литературы из 112 наименований. Диссертация изложена на 97 страницах, включая 59 рисунков и 6 таблиц.

Во введении автор определяет объект, цели исследования и задачи, которые необходимо решить при выполнении работы, излагает общую методику исследований, обосновывает актуальность, достоверность, научную новизну и практическую ценность работы. Приведен список конференций, на которых проведена апробация диссертационной работы. Сделана краткая аннотация диссертационной работы по главам.

В первой главе на основе литературных данных диссидентом рассмотрены и основные способы получения углеродных наноструктур, их свойства и области применения.

В выводах к главе 1 отмечается, что наиболее перспективным методом синтеза углеродных наноструктур является электродуговой метод, поскольку выполняется при очень высокой температуре. Также преимущество электродугового метода связано с возможностью промышленного синтеза углеродных наноструктур и повторяемостью процесса их роста.

Вторая глава содержит описание электродугового метода получения углеродных пленок, а также методов их исследования и процессы в вакуумной дуге, которые приводят к образованию в плазменном потоке микрочастиц углерода, снижающих качество поверхности. Отмечена особая роль магнитной сепарации плазменного потока. Разработка технологии получения пленок в данной работе проводилась на установке вакуумного напыления износостойких покрытий УВНИПА. В процессе выполнения диссертационной работы Хамдоховым Э. З. была произведена модернизация электродугового испарителя, что позволило применить в процессе осаждения углеродной пленки магнитную сепарацию. Описаны методики анализа

структурных особенностей покрытий (POP, ACM, KPC, РФЭС, РФА).

В выводах к главе 2 отмечается, что применение составного катода Ti-C и магнитной сепарации позволило получить непрерывный пучок фильтрованной углеродной плазмы и, таким образом, получить углеродную пленку с гладкой поверхностью.

Глава третья включает более полное описание технологии получения графитоподобныхnanoструктур в субмикронных углеродных пленках, результаты их исследования и, по сути, является основной.

При исследовании фазового состава пленок (раздел 3.1), полученных путем электродугового распыления графитовой мишени Хамдоховым Э. З. установлено, что содержание графитоподобных нанокластеров в аморфной углеродной пленке составляет ~4% от массы углеродных фаз.

В разделе 3.2 исследован процесс формирования графена в структурах Si/SiO₂/Si₃N₄/C/Ni. Для изучения процесса роста пленок были проведены исследования с помощью метода КРС, который успешно применяется для определения элементного состава и химического состояния атомов в поверхностных слоях материалов. На основе полученных результатов предложена модель формирования графеновых пленок. Так, экспериментальные исследования показали, что никель проявляет не только катализическое действие, но и является растворителем углерода. В процессе отжига происходит растворение углерода в никеле и, таким образом, уменьшение толщины углеродного слоя на гетерогранице Ni /Si₃N₄ вплоть до нескольких нанометров, что стимулирует преобразование аморфной углеродной пленки в стопку из графеновых слоев

В разделе 3.3 исследован процесс формирования графитоподобных nanoструктур в структурах Si/TiN/C/Ni. Диссертантом Хамдоховым Э. З. осуществлен синтез наноразмерных углеродных структур на подложке с барьерным подслоем в присутствии никеля. Гетероструктуры C/Ni получены на барьерном слое TiN толщиной 17 нм, который наносился электродуговым способом на кремниевую подложку. Применение термического отжига и наноразмерного барьерного слоя нитрида титана с крайне низким коэффициентом диффузии углерода способствует диффузионному “перемешиванию” атомов углерода и никеля. Происходит формирование в

аморфной углеродной пленке гетероструктуры Si/TiN/C/Ni графитоподобных наноструктур с линейным размером ~7нм.

Наиболее важные результаты были получены в разделе 3.4 при исследовании автоэмиссионного катода с опорной структурой из МКП с каналами, внутри которых электродуговым способом сформированы регулярно расположенные эмиссионные центры на основе графитоподобных наноструктур с низкой работой выхода электронов. Проведенные исследования ВАХ опытных образцов показали, что предельный выходной ток около $1\text{mA}/\text{cm}^2$ достигается при $U_{\text{раб}} \sim 400\text{ V}$.

В разделе 3.5 исследованы фазовые превращения в никромовой пленке после воздействия пучка ионов углерода. Данные КРС - исследований позволяют докторанту сделать вывод, что процесс осаждения углерода на никромовую пленку сопровождается образованием графитоподобных наноструктур.

В выводах к главе 3 отмечается, что использование никелевой дуги для непосредственного нагрева структуры Si/TiN/C/Ni в вакууме исключает необходимость последующего термического отжига структуры Ni/C для формирования в углеродной пленке графитоподобных наночастиц.

Заключение по диссертации из 9 пунктов содержит основные результаты, отмеченные во второй и третьей главах.

Подводя итоги анализа рассматриваемой работы можно отметить следующее: несмотря на ее относительно небольшой объем (97стр.) и большое число работ по ее тематике, полученные в ней результаты являются новыми и достаточными для докторской диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Название диссертации соответствует содержанию, автореферат адекватно отражает содержание диссертации.

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов и обоснованность выводов обеспечиваются корректностью постановки задачи, использованием современных методов и аппаратуры исследования микроструктуры и свойств изучаемых покрытий, статистической обработкой результатов измерений, полученных в ходе выполнения настоящей работы, и их сопоставление с литературными данными.

Практическая ценность полученных результатов определяется возможностью

стью их использования при оптимизации процесса нанесения гладких углеродных пленок на промышленных установках, реализующих электродуговой метод.

Результаты диссертационной работы Хамдоховым Э. З. апробированы на ряде Российских и Международных конференциях и опубликованы в открытой печати, среди них 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ. В приложении к диссертации имеются копии «Акта о внедрении результатов кандидатской диссертации» и «Справки об использовании результатов кандидатской диссертации». На способ получения однофазных пленок нитрида титана получен Патент РФ №3497977 от 10 ноября 2013 г. На способ изготовления катода на основе массива автоэмиссионных эмиттеров получен Патент РФ № 2640355 от 18 апреля 2016г.

Работа в целом является законченным исследованием, направлена на решение важной и актуальной задачи, выполнена на высоком научном уровне. Полученные Хамдоховым Э. З. экспериментальные и теоретические данные могут быть использованы при оптимизации процесса формирования графитоподобных наноструктур и решения практических задач автоэмиссионной электроники.

По структуре и содержанию диссертации могут быть сделаны следующие **замечания:**

1. Глава 1 содержит интересные обзорные результаты, но слегка устаревшие, за исключением некоторых.
2. В диссертации не указаны размеры подложки, поэтому возникает вопрос о плотности ионного тока на подложке.
3. В тексте диссертации не указана величина магнитного поля.
4. К сожалению, в главе 3-й полученным интересным результатам удалено недостаточное, на наш взгляд, внимание. В частности, при рассмотрении автокатода на основе МКП недостаточно обоснованы параметры надежности предлагаемой структуры в сравнении, например, с острийным автокатодом.

При оформлении текста, рисунков и таблиц допущены несколько неточностей и отпечатков. Например:

1. В списке цитируемой литературы в ряде работ отсутствуют названия, что является нарушением ГОСТа
2. На некоторых рисунках не дан источник, хотя в тексте ссылки даны.

Указанные замечания не снижают общий высокий научный уровень работы. Диссертационная работа Э.З. Хамдохова «Формирование графитоподобных наноструктур в углеродных пленках, полученных электродуговым методом» представляет собой научно-квалификационную работу и удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемых к кандидатским диссертациям (п.п. 9,10 «Положение о порядке присуждения ученых степеней» от 24 сентября 2013 г., № 842). Тема и содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.04.15. - Физика и технология наноструктур, атомная и молекулярная физика (п.п. 1,2,4).

По объему выполненных работ и новизне полученных результатов диссертационная работа Э.З. Хамдохова на тему «Формирование графитоподобных наноструктур в углеродных пленках, полученных электродуговым методом» рекомендуется для защиты на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.15. - Физика и технология наноструктур, атомная и молекулярная физика, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Заведующий кафедрой «Электронные приборы»

ФГБОУ ВО СКГМИ (ГТУ) д. т. н., проф.

Козырев Е.Н.



362021, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Николаева 44

тел. +7(8672)407443, e-mail: kozyrev@skgmi-gtu.ru

Горжусь Козырева Е.Н. заверяю:
Ученосі сенінгері Ученого совета ФГБОУ ВО
«СГУ» (ГТУ) Радаев А.И. *Радаев*