

С.Вартапетов¹, Э.Ильичев², Р.Набиев², В.Одинокоев³, Г.Павлов³,
Г.Петрухин², Э.Полторацкий², Г.Рычков², В.Сологуб³, Н.Шелепин⁴
polt@niifp.ru², pavlov@niitm.ru³

ЭМИССИОННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА НА ОСНОВЕ НАНО- (МИКРО-) СТРУКТУРИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ*

В работе представлены основные результаты комплексной НИОКР "Разработка комплекта технологического оборудования и технологии получения функциональных нанокристаллических интегральных структур", выполняемой в рамках ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 годы". Проект фактически закладывает физико-технологические основы эмиссионной электроники на углеродных материалах и является совместной работой ООО "Оптосистемы"¹ (Троицк, Моск. обл.) и предприятий Зеленограда: ФГУП "НИИ физических проблем им. Ф.В.Лукина"², ОАО "НИИ точного машиностроения"³, ОАО "НИИМЭ и завод "Микрон"⁴.

Развитие твердотельной электроники позволило решить ряд серьезных технических проблем. Достигнутое быстродействие приборов составляет ~10 ГГц, плотность вентилей на кристалле ~ $5 \cdot 10^7$ вент./см².

Однако существуют задачи, решение которых на традиционных материалах не найдено. К таковым относится, например, реализация компактных мощных схем и устройств для СВЧ-генераторов и усилителей, где требуются катодные узлы с плотностью тока >10 А/см² и выходные мощности порядка нескольких киловатт. Традиционно эта область "закрывается" приборами и устройствами вакуумной электроники, хотя используемые в мощных ламповых устройствах узлы термокатодов имеют низкий КПД, большие габариты и инерционность.

В последнее время обсуждаются [1,2] возможности эффективного использования в системах микроволновой связи, ИК-визуализации, радиочастотной локации и идентификации автоэмиссионных сред на основе углеродных наноструктур (УНС). Вместе с тем техническая реализация большинства автоэмиссионных задач в рамках традиционных технологий

и материалов чрезвычайно затруднена из-за низких значений предела текучести и прочности таких материалов и сложности воспроизводства идентичной геометрии автоэмиттирующих острий в матричных устройствах.

Появление технологий получения УНС на основе принципов самоорганизации может позволить решить существующие проблемы благодаря высоким значениям прочности таких структур (~45 ГПа), модуля Юнга (1 ТПа), аспектного отношения (~ 10^3), предельных плотностей тока (до 1 ТА/см²) и малому диаметру острий. Задача сводится к поиску технологий, позволяющих реализовать каталитические наноразмерные области "капли" с малой дисперсией латеральных размеров в плоскости кристалла.

Автоэмиссионные среды реализуются, как правило, посредством каталитического синтеза, либо роста с использованием CVD- или PECVD-методов [3, 4]. Для эффективного решения задач автоэмиссионной электроники на элементах нанометровых и субмикронных размеров и интеграции разрабатываемых технологий и устройств в технологии и устройства традиционной микроэлектроники необходимы технологические процессы, позволяющие получать автоэмиссион-

*Начало. Продолжение статьи – "Наноиндустрия" 5/2009.

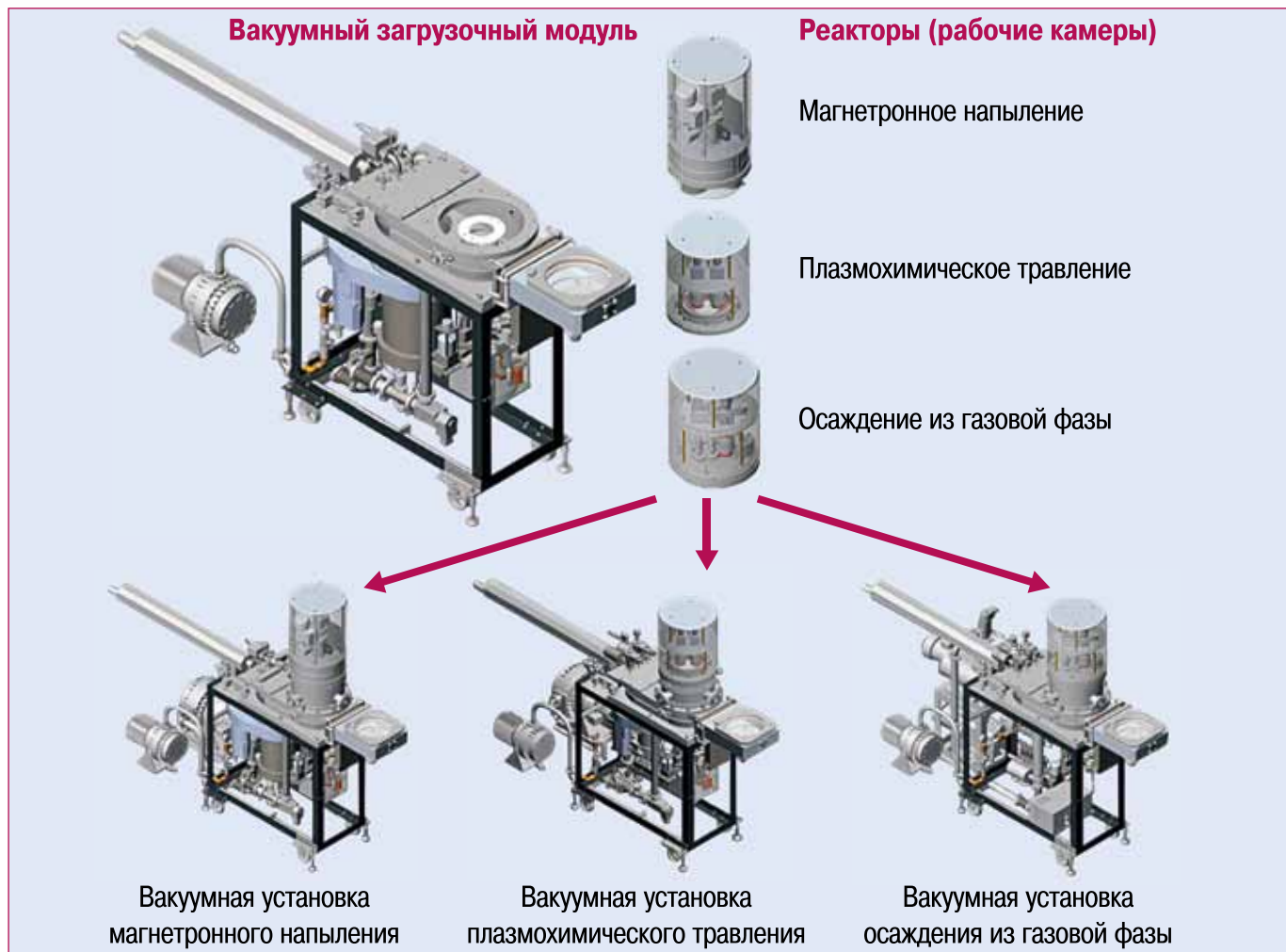


Рис. 1 Архитектура разработанного ОАО "НИИТМ" комплекса оборудования

ные среды с однородными параметрами по площади пластин диаметром, превышающим 3–4 дюйма.

БАЗОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ ОБОРУДОВАНИЯ

Анализ литературных данных и предварительные исследования показали, что решить поставленные задачи можно только в рамках комплексного подхода.

Существующие плазмостимулирующие газофазные технологии получения УНС используют, как правило, рабочие давления 10^2 – 10^3 Па, что накладывает ограничения на однородность осаждения и, соответственно, на латеральные размеры обрабатываемых образцов. При традиционной реализации PECVD-технологий СВЧ (либо ВЧ) плазма используется одновременно как для нагрева подложки, так и для активации диссоциации молекул газа-реагента, что вносит некоторую неопределенность при управлении технологическими процессами роста, а также при трактовке протекающих в камере и на образце физико-химических процессов. При реализации автоэмиссионных сред для приборов и схем с целью исключения неконтролируемого шунтирования элементов проводя-

щим слоем из углеродных кластеров необходим тщательный подбор технологических параметров процесса (состава плазмы, ее мощностных, пространственных и временных характеристик). Сложность управления совокупностью процессов технологического маршрута объясняет тот факт, что, несмотря на многочисленность исследователей, активно работающих в данной области, довести до промышленных разработок автоэмиссионные приборы на основе наноструктурированных сред удалось только некоторым из них.

Что касается разработок, связанных с технологией получения сред, эмитирующих вторичные электроны, используются, в основном, алмазные пленки, полученные по PECVD-технологии [5] с предварительным формированием фотолитографическими методами необходимого рисунка из массивов зародышей. Попытки использовать алмазные пленки в качестве эмиттеров вторичных электродов выявляют трудности, связанные с их дефектностью, что значительно снижает эффективность пленок как преобразователей энергии первичных электронов в массив низкоэнергетических вторичных электронов из-за недостаточно больших диффузионных длин.

КЛАССИФИКАЦИЯ ПРИБОРОВ И СХЕМ

Эмиссионные среды на основе УНС предполагается использовать в разработках нескольких групп приборов эмиссионной электроники. Например, "холодные" катоды вакуумной СВЧ-электроники на основе автоэммиттеров из УНС [6, 7] и умножителей потока электронов на основе микро-(нано-) структурированных алмазных пленок [8, 9]. На основе указанных сред возможно также формирование автоэмиссионных интегральных схем [10] для эмитирующих электроны элементов плоских экранов дисплеев и высокочастотных многопозиционных слаботочных переключателей либо систем защиты от импульсных электромагнитных излучений и, наконец, вакуумных интегральных схем, стойких к спецвоздействиям.

На основе микроструктурированных алмазных пленок возможна реализация не только аналогов микроканальных пластин (МКП), умножающих потоки электронов в приборах и системах ночного видения (ЭОП), но и запоминающих сред с внутренним усилением сигнала при считывании информации. Появились сообщения [11,12] об успешных разработках термостойких диодов и полевых СВЧ-транзисторов на алмазных пленках с рабочими частотами вплоть до 120 ГГц, которые к тому же должны быть радиационно и термически стойкими.

Список эффективных для эмиссионной электроники материалов не ограничивается УНС и алмазными микроструктурированными средами. Большой интерес представляют алмазоподобные пленки (АПП). Предлагается и экспериментально доказана [13] возможность использования АПП как основы для подвижных элементов микроэлектромеханических (MEMS) переключателей и устройств на их основе в высокочастотных радиосистемах. АПП могли бы быть эффективно использованы как основа подвижных элементов MEMS-устройств в интегральных высокочастотных и радиационно стойких схемах фазовращателей для активных фазированных антенных решеток (АФАР). Высокое значение модуля упругости АПП снимает проблему проявлений эффектов "залипания" электродов, наблюдаемых в MEMS-переключателях на основе мультислойных диэлектрических структур. С высоким значением модуля упругости связаны и более высокие резонансные частоты, что позволяет существенно повысить механические частоты переключений ВЧ-сигнала (до 1,5–2 ГГц). Химическая стойкость АПП по сравнению с аналогами [14] существенно упрощает технологический маршрут изготовления MEMS.

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Для решения обозначенных выше проблем, возникающих при промышленном использовании углеродных материалов в силу их химической стойкости, особенностей синтеза и наноразмерной геометрии, необходима разработка функционально различных видов технологического оборудования,



Рис. 2 Мини-кластеры с раздельным и совмещенным управлением (стыковка установок в кластер через шлюзовую камеру)

объединенных лежащими в их основе базовыми плазменно-термическими процессами. При разработке установок закладывались следующие основные принципы, соответствующие современным тенденциям развития технологии:

- индивидуальная обработка пластины большого диаметра (в настоящее время в РФ – до 200 мм, в перспективе – до 300 мм);
- шлюзовая загрузка пластин вручную и автоматическая через SMIF (Standard Mechanical Interface Format) контейнеры;
- возможность объединения установок в технологические кластеры;
- использование "сухих" систем вакуумной откачки камер (криогенных или турбомолекулярных высоковакуумных насосов, спиральных, мембранных и других "сухих" форвакуумных насосов);
- преимущественное применение "сухих" низкотемпературных процессов с использованием широкоапертурных источников плотной плазмы;
- с помощью промышленного компьютера и рабочих программ управление процессами полностью автоматизировано;
- отказ от межоперационного контроля и внедрение контроля "in situ";
- модульный принцип компоновки оборудования с использованием базового модуля.

В ОАО "НИИ точного машиностроения" разработан комплект технологического оборудования [15], включающий установку магнетронного нанесения металлических и диэлектри-

ческих слоев наноразмерной толщины, ионно-плазменного травления наноструктур, осаждения из газовой фазы полупроводниковых и диэлектрических слоев наноразмерной толщины. Архитектура комплекса представлена на рис.1.

Модульный принцип организации оборудования на основе универсального вакуумного загрузочного модуля позволяет достаточно эффективно развивать этот комплекс посредством разработки реакторов со стандартными посадочными фланцами для данного модуля, реализующих соответствующие технологические процессы. Предложенная система шлюзовой загрузки позволяет легко стыковать две или три установки в кластерный модуль без введения модуля перегрузки пластин (рис.2).

Вакуумный загрузочный модуль включает:

- прогреваемую (охлаждаемую) загрузочную камеру из нержавеющей стали;
- шлюзовую камеру загрузки-выгрузки подложки или подложкодержателя;
- высоковакуумный турбомолекулярный или криогенный насос;
- два безмасляных форвакуумных насоса;
- регулируемые дроссельные заслонки высоковакуумной и форвакуумной магистралей;
- систему вертикального подъема подложкодержателя;
- элементы гидравлической и пневматической систем охлаждения;
- элементы охлаждения и термостатирования;
- вакуумные датчики и клапаны;
- электрокоммутационную панель.

Вакуумный загрузочный модуль позволяет осуществлять:

- загрузку-выгрузку одной подложки или одного подложкодержателя до $\varnothing 200$ мм (200×200 мм) через шлюзовую камеру в реактор;
- ионно-плазменную ВЧ-очистку пластин перед напылением;
- откачку загрузочной камеры до $3 \cdot 10^{-5}$ Па;
- откачку камеры шлюзования до $5 \cdot 10^{-1}$ Па ($5 \cdot 10^{-4}$ Па по заказу);
- контролируемое натекание газа в загрузочную камеру и камеру шлюзования;
- защиту датчиков давления от агрессивных сред.

УСТАНОВКА "МАГНА ТМ-200-01"

Установка (рис.3) предназначена для магнетронного нанесения многослойных и/или многокомпонентных металлических и диэлектрических слоев, в том числе для создания двухслойных тонких пленок, состоящих из адгезионного слоя (V, Cr, TiN и др.) толщиной 5–40 нм и слоя металла переходной группы (Fe, Ni, Co и др.). Верхний слой после плазмостимулированного отжига наноструктурируется и начинает проявлять каталитические свойства, обеспечивающие рост УНС, включая углеродные нанотрубки (УНТ). При формировании



Рис.3 Установка магнетронного нанесения слоев "МАГНА ТМ-200-01"

трехслойной структуры каталитический слой располагается между адгезионным и пассивирующим слоями. Посредством литографии из указанных слоев формируется топологический рисунок активной части прибора, при этом на торцевой поверхности срединного (каталитического) слоя посредством плазмостимулированного температурного отжига формируются наноразмерные каталитические области – своеобразные нанореакторы роста горизонтально ориентированных УНТ.

Следует отметить, что система ионно-плазменной ВЧ-очистки пластин перед напылением обеспечивает получение высококачественных тонких пленок с хорошей адгезией и, соответственно, хорошую адгезию УНС.

Для нанесения слоев используется реактор с магнетронным распылительным устройством (МРУ) мультикатодного типа с тремя мишенями диаметром 100 мм для нанесения одно-, двух- и трехслойных пленок, в том числе двух- и трехкомпонентного состава. Типичные скорости нанесения слоев МРУ достаточно высоки (1–10 нм/с), поэтому установка снабжена заслонкой, на которую проводится предварительное распыление материала мишени и которая обеспечивает короткую экспозицию нанесения тонких слоев (2–10 с). Для повышения однородности нанесения пленок мультикатодное МРУ при напылении вращается со скоростью 1–2 об./с.

УСТАНОВКА "ПЛАЗМА ТМ-200-01"

Установка (рис.4) предназначена для плазменного реактивно-ионного прецизионного высокоаспектного травления материалов и слоев, в том числе алмазных и алмазоподобных наноматериалов. Она пригодна для формирования нано-(микро-) структурированных элементов МЭМС на подложках диаметром до 200 мм. Используется широкоапертурный масштабируемый источник плотной (10^{11} – 10^{12} см⁻³) плазмы на базе ICP-источника. Индуктор представляет собой две вставленные одна в другую спирали, содержащие от трех



Рис.4 Установка ионно-плазменного травления "ПЛАЗМА ТМ-200-01"

до пяти витков. ВЧ-мощность подводится к центру индуктора. Пластина размещается на охлаждаемом столе. Равномерность охлаждения достигается с помощью гелиевой подушки. Через согласующее устройство на стол подается ВЧ-смещение, что обеспечивает дополнительные возможности управления процессом травления. На внешней стороне боковых стенок источника располагается магнитная система, которая позволяет регулировать равномерность потока и плотность плазмы.

Предварительные исследования показали, что установка обеспечивает неравномерность травления кремния на пластинах 150 мм, не превышающую $\pm 2\%$ при анизотропии 1/20 и скорости травления более 3 мкм/мин. В настоящее время установка обеспечивает травление поликристаллических алмазных пленок со средней скоростью более 0,5 мкм/мин. Ведется отработка технологических процессов анизотропного травления алмазных и АПП пленок.

УСТАНОВКА "АЛМАЗ ТМ-200-03"

Установка предназначена для плазмостимулированного газофазного выращивания (Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition – PECVD) углеродных наноструктур с применением оригинального плазменного источника, а также для плазмостимулированного термического отжига тонких пленок для формирования "нанокпель" каталитического слоя для наноструктур. Установка снабжена ИСР-источником плазмы, индуктор которого в виде плоской спирали размещен внутри рабочей камеры в непосредственной близости от подложки. Система подачи газа обеспечивает равномерный подвод углеродосодержащего газа в зону обработки пластин. Пластина устанавливается на нагреваемый подложкодержатель. Установка может быть снабжена низкотемпературными (нагрев пластин до 400–600°C) и высокотемпера-

турными нагревателями – до 800–1000°C. В объеме, помимо ВЧ, формируется постоянное электрическое поле, величина и полярность которого регулируется источником напряжения до 600 В. Дополнительно формируется несколько источников СВЧ (2,45 ГГц) симметрично вводимой в рабочую камеру (рис.5) плазмы, плотность которой регулируется с помощью ЭЦР (электронный циклотронный резонанс) разряда, что позволяет зажигать ВЧ-плазму при более низком давлении (вплоть до 0,1 Па). (Работа при низком давлении исключает эффекты шнурования и пространственных флуктуаций ВЧ-плазмы, что повышает однородность обработки пластин.) Принцип независимого управления плазменной и термической стимуляцией процесса выращивания УНС, который был реализован еще на экспериментальной установке "Алмаз ТМ–001", сохраняется и в дальнейших разработках.

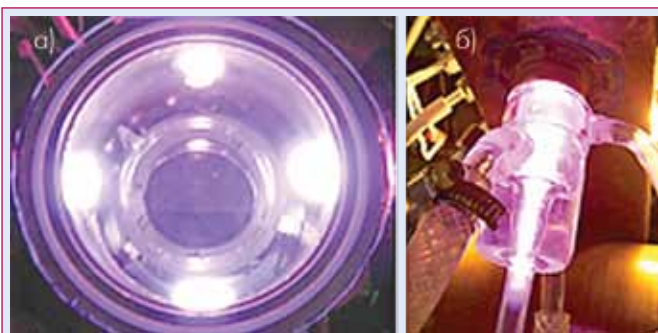


Рис.5 Источники СВЧ-ввода плазмы в реактор установки "Алмаз ТМ 001": а) вид камеры через кварцевое окно; б) вид СВЧ-источника плазмы

В указанной системе в рабочей смеси газов $\text{Ar}/\text{H}_4/\text{CH}_4$ удастся добиться воспроизводимого роста углеродных самоорганизующихся наноструктур широкой номенклатуры (УНТ, перья, конусы) с высокой степенью однородности параметров на площади пластины при температурах не выше 650°C и давлениях от 0,5 Па.

УСТАНОВКА УПСА-100

Установка предназначена для плазмохимического синтеза поликристаллических алмазных и наноалмазных пленок в микроволновом разряде (частота 2,45 ГГц, 5 кВт) резонансного типа при высоком давлении (1–150 Тор). Для нагрева и активации газовой смеси используется магнетронный источник СВЧ-излучения мощностью 5 кВт. Электромагнитная энергия вводится в вакуумную камеру через волновод соответствующего размера и формы. Волновод и вакуумная камера разделены диэлектрическим изолятором. Вводимая электрическая мощность регулируется. Камера, изготовленная из нержавеющей стали, содержит окна для визуального наблюдения и контроля температуры пирометром и спектрометрического контроля за составом плазмы. Подложка нагревается непосредственно плазменным разрядом. В зависимости от состава газовой смеси синтезировались поликристаллические алмазные пленки (ПАП) ($\text{CH}_4\text{-H}_2$) и наноалмазные пленки (Ar -

$\text{CH}_4\text{-H}_2$). Осаждение ПАП традиционно проводится в смесях $\text{CH}_4\text{-H}_2$ с малой долей (1–5%) метана. Получаемые CVD-алмазы были высокого качества [17]. Выращивание легированных алмазных пленок проводилось добавлением в газовые смеси азота или паров борсодержащих соединений, которые формировались с использованием термостабилизированного барбатера, а также водорода в качестве газа-носителя. Регулирование расхода реагента позволяло изменять и контролировать скорость подачи в рабочую камеру паров лигатуры.

ОТРАБОТКА БАЗОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Формирование каталитического слоя

Основные модели роста УНС описаны в [12–14]. Ключевые моменты здесь – эффекты смачивания каплей катализатора поверхности и возможность получения каталитических каплей размерами ~5–10 нм. Слой, используемый для формирования каталитических каплей (далее каталитический слой), необходимо формировать на слое (слоях), обеспечивающем приемлемую адгезию к подложке (приборной структуре). К свойствам адгезионного слоя предъявляется требование не только обеспечить удовлетворительную адгезию каталитического слоя к подложке, но и создать барьер, препятствующий его "отравлению" вследствие диффузии материала подложки. Кроме того, температура плавления

адгезионного слоя должна превышать температуру плавления каталитического слоя наноразмерной толщины и температуру роста УНТ. Учет перечисленных факторов, а также возможностей селективной технологической обработки каталитического слоя относительно пассивирующего и адгезионного слоев, позволили остановиться на следующих комбинациях слоев и их толщин:

- 1) Si (подложка)/V(20–30 нм)/Ni(10–30 нм);
- 2) Si (подложка)/TiN(50 нм)/Ni(15 нм);
- 3) Si (подложка)/TiN(50 нм)/Fe(15 нм).

Использование ванадия и нитрида титана позволяет улучшить адгезию каталитического слоя к подложке, а поскольку никель плохо смачивает TiN, можно ожидать ускорения процесса образования нанокapель никеля.

Для приборов с планарным вариантом автоэммиттеров на основе УНТ использовалась трехслойная мультиструктура V(20 нм)/Ni(10 нм)/V(30 нм), в которой верхний слой – пассивирующий. Открытая часть торцевой поверхности каталитического слоя является активной поверхностью для формирования каталитических каплей. Помимо использования кремниевой подложки и кремниевой приборной структуры, возможны варианты изготовления автоэмиссионных структур на альтернативных подложках – например, на подложках из поликора либо сапфира.

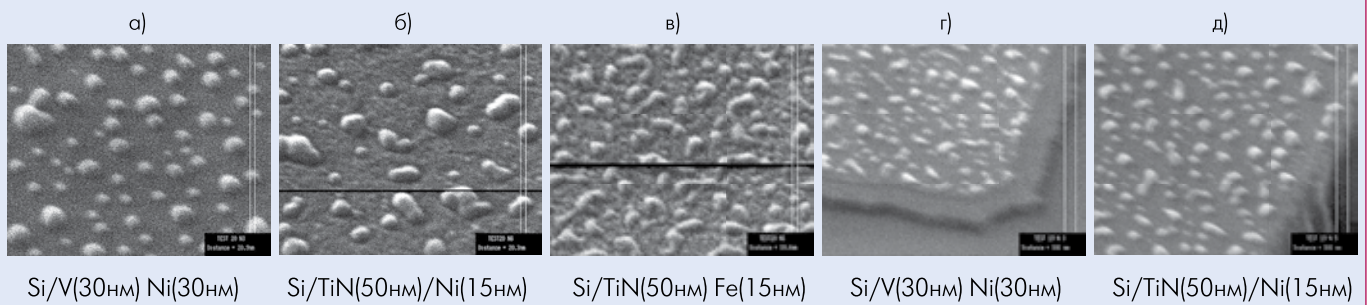


Рис.6 Растровые изображения наноразмерных областей катализатора на структурах: а), б), в) – тест 20; г), д) – тест 19

Исследование плазмостимулированного отжига тонких пленок для формирования каталитических наночастиц на установке "Алмаз ТМ-001" включало изучение влияния температуры нагрева подложки, мощности плазменного разряда, величины смещения подложки относительно плазмы, времени воздействия и других факторов. Необходимо принимать во внимание неизбежность бомбардировки пленки катализатора атомами буферного газа (транспортный и ионизирующий газ – аргон) в DC плазме (постоянное поле между столиком – держателем образцов и стенками камеры), а также в СВЧ-плазме.

Технологический маршрут включает в качестве базовых технологические процессы осаждения адгезионной, каталитической и пассивирующей пленок наноразмерных толщин, формирование наноразмерных каталитических областей, последующее выращивание УНС.

Типичные фотографии каталитических слоев после плазмостимулированного отжига пленок никеля или железа толщиной 10 нм в атмосфере буферного газа аргон/водород (95/5) при ~ 550–600°C представлены на рис.6.

После этого на указанных каплях в атмосфере ростового газа метана проводился каталитический плазмостимулированный рост УНС.

Значительная часть представленных результатов выполнена в рамках Проекта по Государственному контракту от 21.09.2007 г № 02.527.12.9007. (Заказчик: "Роснаука"; Инициатор: ОАО "СИТРОНИКС")

ЛИТЕРАТУРА

- Lieber C.V. – Solid state Commun., 1998, v.107, p.607.
- Ribaya B., Leung J., Brown Ph. A study on the mechanical and electrical reliability of individual carbon nanotube field emission cathodes. – Nanotechnology, 2008, v.19, p.1–8.
- Huczko A. Synthesis of aligned carbon nanotubes. – Apple. Phys. A, 2002, v.74, p. 617–638,
- Veyyappan M., Delzeit L., Cassell A., Hash D. Carbon nanotube growth a review. – Plasma Sources Technol. 2003, v.12, p. 205–206.
- Dischler B., Wild C. Low-Pressure Synthetic Diamond: Manufa and Applications. – Springer, Berlin, 1998.
- Duesberg G.S., Byrne H.J., Roth S., Burghard M. Towards processing of carbon nanotubes for technical applications. – Appl. Phys. A, 1999, v.69, p. 269.

- Gavrilov A., Dzbanovsky N.N., Dvorkin V.V., Il'ichev E. A., Poltoratsky E.A., Rychkov G.S., Suetin N.V. Lateral emitter as a base element of integrated emission electronics. – Technical Physics Letters, 2004, vol. 30, n. 6, p. 466–468.
- Ascarelli P., Cappelli E., Pinzari F., Rossi M.C., Salvatore S., Merli P.G., Migliori A. Secondary electron emission from diamond: Physical modeling and application to scanning electron microscopy – J. Appl. Phys., 2001, vol. 89 p. 689–696.
- Dvorkin V.V., Dzbanovsky, Suetin V.N., Poltoratsky E.A., Rychkov G.S., Il'ichev E.A., Gavrilov S.A. Secondary electron emission from CYD diamond films. – Diamond and Related Materials, 2003, 12, p. 2208–2218.
- Gavrilov S.A., Dzbanovsky N.N., Dvorkin V.V., Il'ichev E.A., Poltoratsky E.A., Rychkov G.S., Suetin N.V. Carbon nanotubes field emitter for planar emission vacuum micro- and nanoelectronics. – Technical Physics Letters, 2004, vol. 30, n. 7, p. 609–611.
- Kohn E., Denisenko A., Kubovic M., Zimmermann T., Williams O., Gruen D.M. A new diamond based heterostructure Diode – Semicond. Sci. Technol., 2006, 21, p. 32–L35].
- Milne W.I. Electronic devices from diamond-like carbon – Semicond. Sci. Technol., 2003, 18, p. 81–85.
- Власенко В.А., Беляев С.Н., Ефимов А.Г, Ильичев Э.А., и др. Микроэлектромеханические переключатели на основе аморфных алмазоподобных углеродных пленок. – Письма в ЖТФ, 2009, т.35, в.15, с. 105.
- Dmitriev V.K., Inkin V.N., Kirpilenko G.G., Potapov B.G., Ilychev E.A., Shelukhin E.Y. Thermostable resistors based on diamond-like carbon films deposited by CVD method. – Diamond and related materials, 2001, 10, p. 1007–1010.
- Одинокое В.В., Павлов Г.Я. Комплект вакуумного оборудования для микро- и нанотехнологий. – Электронная промышленность, 2008, № 3, с. 64–70.
- Averkin S.N., Orlikovsky A.A., Rudenko K.V., Sukhanov Ya.N., Valiev K.A. Microwave wide-aperture plasma source for 300-mm wafer processing. – Problems of submicron technology / Ed. Orlikovsky A.A. Moscow: Nauka-Fizmatlit. (2000), p. 3–7 (Proc. Inst.Phys. Technol.; Vol. 16).
- Ральченко В.Г., Конов В.И., Леонтьев И.А. Свойства и применения поликристаллических алмазных пластин. – Сб. трудов 7-й Международной научно-технической конференции "Высокие Технологии в Промышленности России", 29–30 июня 2001, Москва, МГУ, с. 246–253.