

Агеев Олег Алексеевич

Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: ageev@fep.tti.sfedu.ru.

347928, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2.

Тел.: 88634371611.

Кафедра технологии микро- и нанoeлектронной аппаратуры; заведующий кафедрой; д.т.н; профессор.

Коноплев Борис Георгиевич

Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: kbg@tti.sfedu.ru.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел.: 88634371767.

Факультет электроники и приборостроения; декан; д.т.н.; профессор.

Alexeev Alexey Nikolaevich

«Semiconductor Technologies and Equipment» JSC.

E-mail: alex@semiteq.ru.

27, Engels Avenue, Saint Peterburg, Russia.

Phone: +78127021308; fax: +78126330597.

Chief Executive Officer; Cand. of Phys.-Math. Sc.

Sokolov Igor Al'bertovich

E-mail: sokolov@semiteq.ru.

Assistant director; Cand. of Phys.-Math. Sc.

Ageev Oleg Alexeevich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: ageev@fep.tti.sfedu.ru.

2, Shevchenko Street, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: +78634371611.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Head the Department; Dr. of Eng. Sc., Professor.

Konoplev Boris Georgievich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: kbg@fep.tsure.ru.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: +78634371767.

College of Electronics and Electronic Equipment Engineering; Dean; Dr. of Eng. Sc.; Professor.

УДК 621.3.049.

В.А. Быков

**КЛАСТЕРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СОЗДАНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ
ЭЛЕМЕНТОВ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ**

Группой компаний НТ-МДТ на протяжении многих лет разрабатывалась концепция создания многофункциональных кластерных научно-технологических комплексов, интегрирующих широкий спектр самого современного научного и технологического оборудования

от ведущих мировых производителей. В настоящее время данная концепция реализована в модульной технологической платформе НАНОФАБ, созданной для формирования нанотехнологических комплексов с кластерной компоновкой. В данной работе рассмотрены исторические аспекты создания кластерного технологического оборудования в СССР и РФ. Проанализированы преимущества кластерной компоновки технологических модулей перед линейной схемой, обозначены перспективы развития экспериментально-технологического оборудования для создания микро- и наносистемной техники.

Кластерное оборудование; сверхвысоковакуумный; нанотехнологический комплекс.

V.A. Bykov

CLUSTER EQUIPMENT FOR DEVELOPMENT AND STUDYING THE ELEMENTS OF NANOELECTRONICS

Over a number of years NT-MDT Co has developed the concept of creating the multifunctional scientific-technological complex with the integration of the state-of-the art scientific and technological equipment from the world-famous producers. At the present time this concept is realized in NANOFAB modular platform. NANOFAB is developed to assemble nanotechnology facilities with the cluster arrangement of their modules. The historical aspects of creating the cluster technological equipment in USSR and Russia were considered in this article. Moreover, the advantages of cluster configuration of technological modules over the linear scheme were analyzed and the development prospects of experimental technological equipment for macro- and nanosystems creating were specified.

Cluster equipment; ultrahigh vacuum; nanotechnology platform.

Идея кластерных комплексов в микроэлектронике берет начало от так называемой «Бочки Лабунова», предложенной Владимиром Архиповичем Лабуновым еще в 1983 г. для производства сверхбольших интегральных схем. Эта идеология была положена и в конструкцию технологической линии «сухой» фотолитографии «ОСНОВА-2Л», представляющей собой связанный в единую систему вакуумный литографический комплекс из 8 модулей. Для разработок в области нанoeлектроники в НИИФП им. Ф.В. Лукина в начале 90-х гг. была создана кластерная система «Цирконий», включающая модуль загрузки, модуль высоковакуумной туннельной микроскопии, модуль магнетронного напыления, модуль плазменных процессов. Модули объединялись вокруг центрального высоковакуумного модуля-манипулятора, позволяющего транспортировать подложку в требуемый модуль в соответствии с заданным технологическим циклом. К сожалению, в то время реализация идеи осталась незаконченной.

Начиная с уровня 130 нм, развитие микроэлектроники потребовало создания кластерных комплексов с идеологией «Бочки Лабунова» и в настоящее время именно такие комплексы и используются в стандартных технологических линиях.

Для исследовательских работ связанные вакуумные, сверхвысоковакуумные, газонаполненные технологические линии используются повсеместно.

На рис. 1–3 приведены примеры таких связанных нанотехнологических комплексов.

Эти линии могут содержать сверхвысоковакуумные, высоко или низковакуумные модули или даже газонаполненные с контролируемой или воздушной атмосферой, соединенные в единую систему посредством переходных, согласующих по условиям среды модулям.



Рис. 1. Исследовательская нанотехнологическая линия университета Хьюстона (США)



Рис. 2. Сверхвысоковакуумный нанотехнологический кластер Даласского университета (США)



Рис. 3. Исследовательская линия для изготовления органических светоизлучающих экранов (OLED) в инертной среде университета Аризоны

Первые разработки НТ-МДТ были системами линейно связанных модулей (рис. 4).

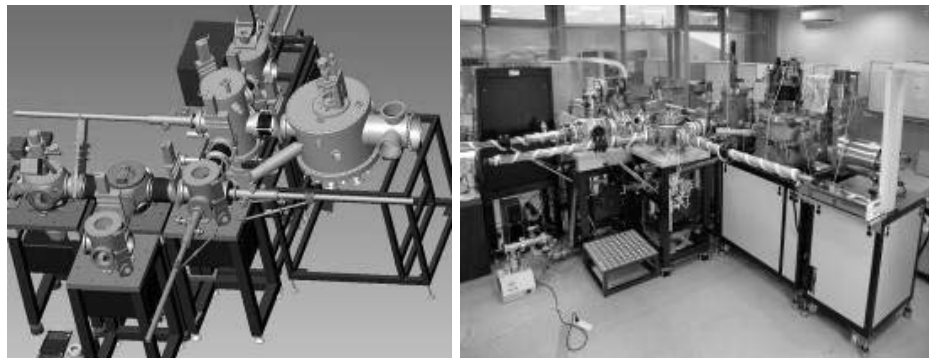


Рис. 4. Нанофаб НТК-5 (установлен в техническом университете МИЭТ, Зеленоград)

Комплекс НТК-5 состоит из модулей сканирующей зондовой микроскопии, фокусированный ионных пучков (Ga источник ионов) с электростатическим электронным микроскопом и модуля молекулярно – лучевой эпитаксии (GaAlN), а также модуля загрузки, промежуточной камеры переворота пластин и модуля загрузки зондов СЗМ.

Отличительной особенностью нанотехнологических модулей НТ-МДТ является то, что они предназначены не только для исследования технологических процессов, но и для создания нанотехнологических функциональных элементов. В ходе их создания была решена задача прецизионного репозиционирования. Были разработаны специальные двухкоординатные системы, оснащенные высокоточными датчиками линейного перемещения, позволяющие с точностью до нескольких десятков нанометров быстро находить заданный участок поверхности пластины при переносе образца из одного модуля в другой. Кроме того, конструкция держателя пластины и позиционера обеспечивают возможность репозиционирования образца исходно с точностью 2–3 мкм, что существенно меньше площади сканирования.

Идеология линейных систем тапа НТК-5 имеет существенный недостаток – выход из строя одного модуля останавливает системы. Кроме того, последовательная организация комплекса ограничивает его производительность. Это в особенности важно при увеличении числа функциональных модулей.

Задача была решена в системах НАНОФАБ -100, -25, представляющими из себя кластерные технологические комплексы, состоящие из необходимого числа объединенных единой транспортной системой модулей, ориентированных под тот или иной технологический процесс. Отличительной особенностью нанотехнологических комплексов от другого кластерного оборудования и его модулей состоит в том, что модули оснащаются аналитическими системами, которые обеспечивают соблюдение конструктивно-технологических ограничений, требуемых для изделий нанoeлектроники, микро и нанoeлектромеханики. Комплекс НАНОФАБ 100 обеспечивает работу системы с образцами диаметром до 4 дюймов, а НАНОФАБ 25 – с образцами диаметром до 1 дюйма.

В зависимости от конкретного типа изделий, на разработку которых ориентируется комплекс, требования к точности реализации тех или иных элементов, квазипланарных или 3-мерных функциональных структур могут составлять от десятков нанометров до долей нанометра с атомарным дискретом. Модули комплек-

сов НАНОФАБ -100, -25 можно разделить на два типа – модули формирования пленочных структур (напыление, молекулярно-лучевая эпитаксия, лазерная абляция, химическое осаждение из газовой фазы, модули плазменных технологий, химической модификации и т.п.), для которых прецизионное позиционирование в плоскости не требуется и необходим интегральный контроль процессов и контроль качества пленочных структур – модули «групповых» технологий, и модули, требующие взаимосовмещения, обеспечивающие возможность быстрого репозиционирования с возможностью обращения к тому или иному элементу или участку поверхности – модули «локальных» технологий (модули сканирующей зондовой микроскопии и литографии, электронной микроскопии и литографии, модули с использованием фокусированных ионных пучков, модули для измерения свойств и характеристик элементов, модули рентгеновской микроскопии, модули проекционного иницированного роста и т.п.).

Транспортная система комплексов базируется на шестипозиционных сверх-высоковакуумных радиальных модулях с встроенными манипуляторами, обеспечивающими захват и перемещение образца из модуля в модуль. В модули встроены системы для вращения и линейного перемещения образцов, обеспечивающие точность репозиционирования образца, закрепленного на специализированном держателе – носителе с точностью до 10 мкм при выносе 1280 мм у НАНОФАБ 100 и 780 мм у НАНОФАБ 25.

Модули оснащены ионными и титан-сублимационными насосами, позволяют отжиг до 200 °С и обеспечивают откачку до 10^{-10} Торр.



Рис. 5. Фотографии радиальных транспортных модулей систем НАНОФАБ 100 (слева) и НАНОФАБ 25

Системы могут быть как одно-, так и многокластерными (рис. 2) в зависимости от требований технологии. Разработан и модуль переворота пластин, что обеспечивает технологическую возможность работы как только на одной, так и на обеих сторонах рабочей пластины, а также возможность работы в модулях, где технологически требуется поворот лицевой части образца.

Система НАНОФАБ 25 работает с образцами, диаметром до 1 дюйма, что позволяет обеспечить возможность получения атомарного и субатомарного разрешения в модах динамической атомно-силовой микроскопии.

Модули локальных технологий сконструированы так, что позволяют оснащаться блоками растровой электронной микроскопии с автоэмиссионными катодами и системами электростатической фокусировки и сканирования и обеспечивают разрешение вплоть до 10 нм, а также могут быть оснащены

оптическими микроскопами с разрешением до 3 мкм, что значительно облегчает начальное позиционирование образцов.

Относительно небольшие габариты и радиальная компоновка позволяют размещать нанотехнологические комплексы на платформе НАНОФАБ 25 практически в любой лаборатории.



Рис. 6. НАНОФАБ 25 (Политехнический университет, Санкт-Петербург)

Наличие сверхвысоковакуумного радиального транспортного модуля обеспечивает проведение многосторонних исследований наноструктур с атомарным разрешением, включая лучевые (электронная и ионная спектроскопия) и зондовые (АСМ и СТМ) методы.

Нанотехнологические комплексы НАНОФАБ-100 (рис. 7, 8) в технологическом плане в настоящее время уже весьма развиты и могут быть оснащены различными модулями для исследования и создания наноструктур с использованием техники сканирующей зондовой микроскопии, фокусированных ионных пучков для травления, роста структур с возможностью имплантации заданными типами ионов.



Рис. 7. НАНОФАБ 100 (Национальная лаборатория, Курчатовский институт)

Разработаны модули для формирования покрытий с использованием методов лазерного напыления металлов и диэлектриков с импульсными эксимерными лазерами 193 нм (ArF) и 248 нм (KrF) соответственно.



Рис. 8. НАНОФАБ 100 (НОЦ "Нанотехнологии" Южного федерального университета, г. Таганрог)

Созданы системы магнетронного напыления для напыления металлических, непроводящих или полупроводниковых слоев; получения многослойных структур с заданными толщинами, получения оксидов и нитридов. Система может содержать 3 или 4 магнетрона для мишеней диаметром 76 мм. Питание магнетронов постоянным током 1,5 кВт или постоянным импульсным током (20 кГц) 1,5 кВт или ВЧ переменным током (13,56 МГц) 600 Вт. Используется кольцевая ионная пушка типа DAS для ассистирования напылению или очистки.



Скорости напыления металлов до 15 А/с, однородность по площади – 5 %. In situ метрия – датчик массы на основе кварцевого резонатора, дополнительно оптическая рефлектометрия. В системе возможен контроль давления в реакторе при поддержании заданного соотношения газовых компонентов.

Разработаны и модули газофазного осаждения, дублирования и плазменного травления резиста, модули плазменного травления и очистки с контролем процессов.

Дальнейшее развитие систем предполагает создание систем безмасковой литографии высокого разрешения, что позволит использовать комплексы не только для разработок, но и для малосерийного производства в нанoeлектронике.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. О.А. Агеев.

Быков Виктор Александрович

Научно-производственная группа предприятий «НТ-МДТ».

E-mail: vbykov@ntmdt.ru.

124482, г. Москва, Зеленоград, корпус 100 ЗАО «НТ-МДТ».

Тел.: 84997357777.

Генеральный директор; д.т.н.

Bykov Victor Alexandrovich

NT-MDT Co (Molecular Devices and Tools for NanoTechnology).

E-mail: vbykov@ntmdt.ru.

NT-MDT Co. Post Box 158, Building 317-A, Zelenograd, Moscow, 124482, Russia.

Phone: +74997357777.

President; Dr. of Eng. Sc.