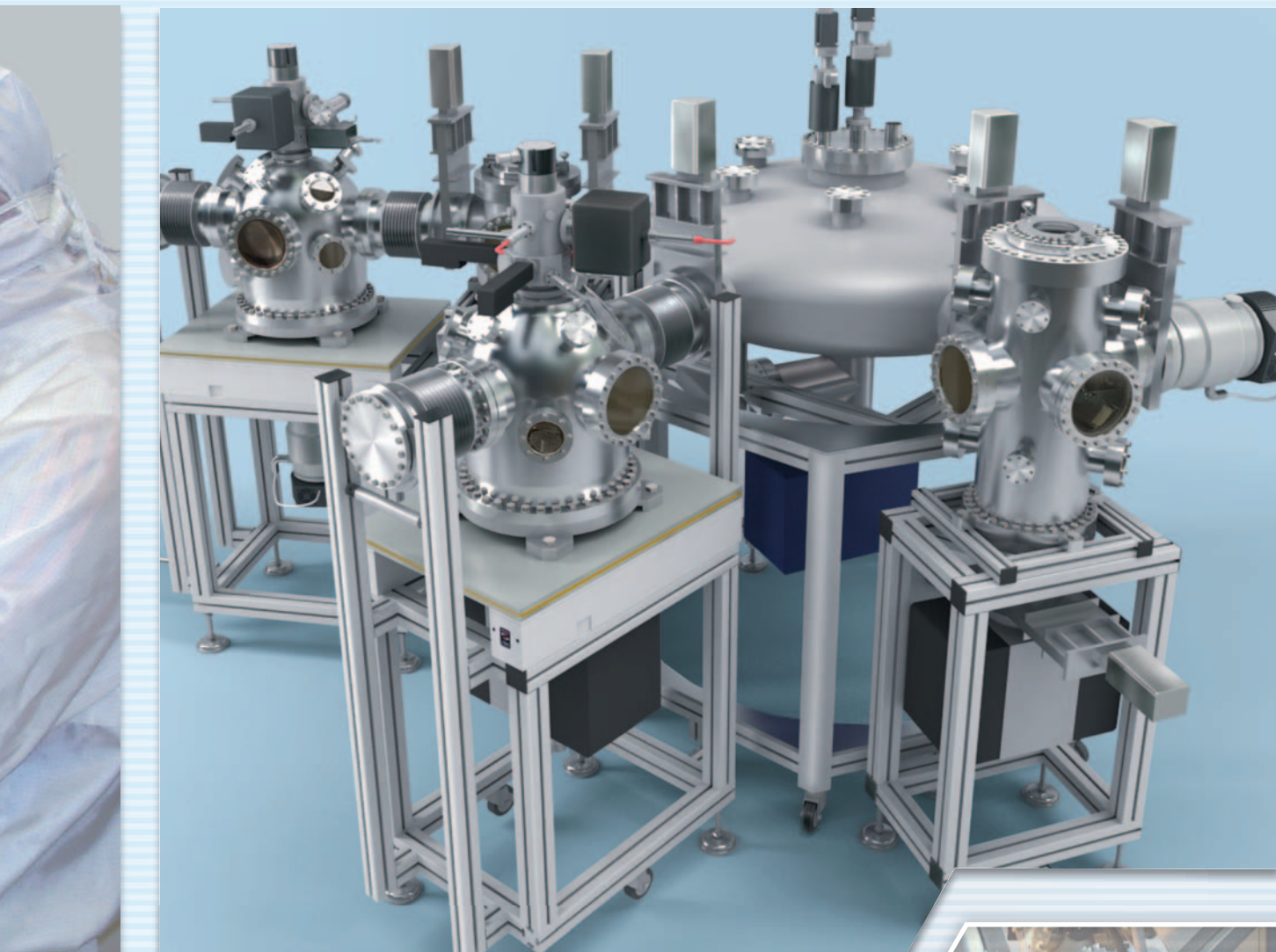
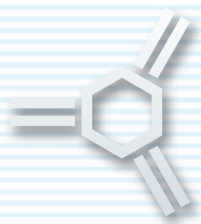


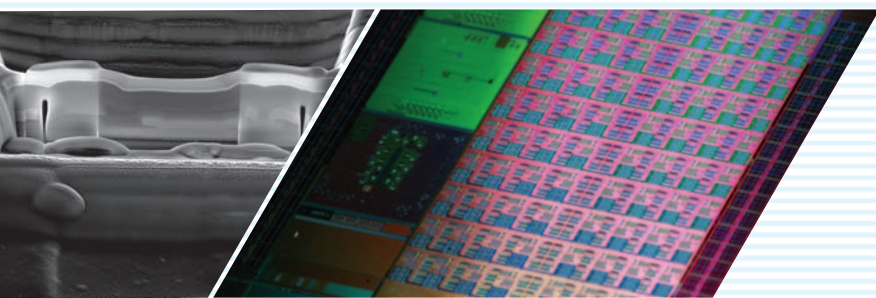
НАНОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ НА БАЗЕ ПЛАТФОРМЫ

НАНОФАБ 100





НАНОФАБ 100



Слово Генерального директора ЗАО НТ-МДТ



Компания НТ-МДТ организована в 1989 году в г. Зеленограде — центре российской микроэлектроники для применения накопленного опыта и знаний в области нанотехнологий для обеспечения исследователей приборами, способными решать широкий спектр задач в области нанометровых размеров.

В относительно короткий срок компания из небольшой группы энтузиастов превратилась в крупный концерн с мировым именем. За эти годы более 2000 приборов были успешно установлены в крупнейших научных и промышленных центрах Европы, Азии и Северной Америки. Сегодня НТ-МДТ является безусловным лидером на российском рынке СЗМ и хорошо известна по всему миру.


Мы видим свою миссию в том, чтобы вывести российское научное приборостроение на лидирующие позиции мирового рынка и движемся к достижению этой цели, опираясь на передовые разработки лучших научных коллективов России, а также путем непрерывного совершенствования собственной компетентности в области разработки, производства, маркетинга и современных методов управления.

Мы считаем важным обеспечить оборудованием все уровни научной работы — обучение студентов, серьезную и углубленную работу в лаборатории, промышленные разработки. Наш ассортимент уже сегодня включает в себя уникальные и самые эффективные в своем классе приборы, интеграция последних технологических достижений и впредь будет оставаться главным вектором нашего развития.

Группа компаний НТ-МДТ на протяжении многих лет разрабатывала концепцию создания многофункциональных кластерных научно-технологических комплексов, интегрирующих широкий спектр самого современного научного и технологического оборудования от ведущих мировых производителей. Более того, за последние 3 года были успешно установлены и введены в эксплуатацию 10 комплексов по всей России.

Соединяя Ваши знания и Ваш опыт с нашей компетенцией в создании инструментов для нанотехнологии, мы вместе способны на лучшие научные достижения!





Содержание

Платформа НАНОФАБ 100

Структура платформы.....	4
Базовые принципы	5
Применения	6

Модули НАНОФАБ 100

Модули нанолокальных технологий

Сверхвысоковакуумный модуль нанообработки фокусированными ионными пучками	10
Сверхвысоковакуумный имплантационный модуль фокусированных ионных пучков	13
Высоковакуумный модуль фокусированных ионных пучков с системой газовых инжекторов	17
Высоковакуумный модуль сканирующего зондового микроскопа с системой газовых инжекторов	20

Модули групповых технологий

Модуль молекулярно-лучевой эпитаксии GaAs	24
Модуль молекулярно-лучевой эпитаксии GaN	27
Модуль плазмохимического травления	30
Модуль плазмохимической очистки.....	30
Модуль плазмохимического осаждения из газовой фазы.....	33
Модуль импульсного лазерного осаждения	35

Контрольно-измерительные модули

Сверхвысоковакуумный модуль сканирующего зондового микроскопа.....	38
--	----

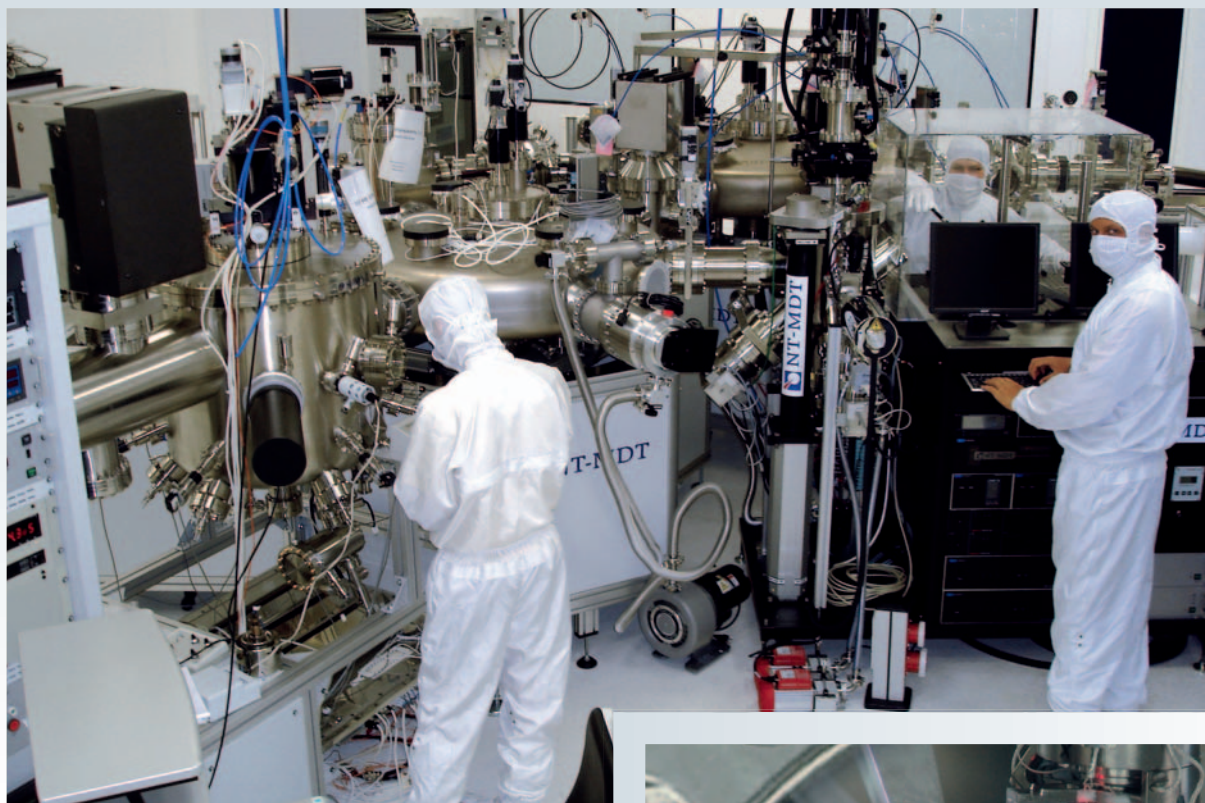
Вспомогательные модули

Сверхвысоковакуумный радиальный транспортный модуль	41
Модуль загрузки и хранения образцов.....	43
Сверхвысоковакуумный модуль переворота и передачи пластин.....	44

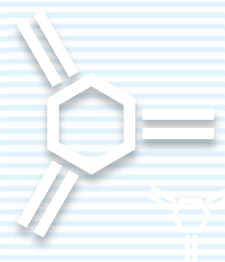
Примеры нанотехнологических комплексов	46
--	----

Терминология и акронимы	47
-------------------------------	----

НАНОФАБ 100



НАНОФАБ 100 — модульная технологическая платформа для формирования нанотехнологических комплексов (НТК) с кластерной компоновкой, включающих технологические установки с возможностями групповых и нанолокальных методов обработки подложек диаметром до 100 мм. При формировании НТК кластеры связываются в технологические цепочки через модули межоперационной передачи и складирования образцов. Это позволяет на основе платформы НАНОФАБ 100 создавать нанофабрики для создания полнофункциональных наноструктур, наноразмерных устройств и наносистем на их основе.



Структура

Богатейшие возможности НАНОФАБ 100 реализуются за счет правильно выбранной кластерной компоновочной схемы — связь между образующими кластер функционально объединенными технологическими модулями осуществляется с помощью сверхвысоковакуумного радиального робота-раздатчика. Это обеспечивает минимальное время межоперационной передачи образцов и, соответственно, сохранение совершенно необходимой в нанотехнологии атомарной чистоты поверхности.

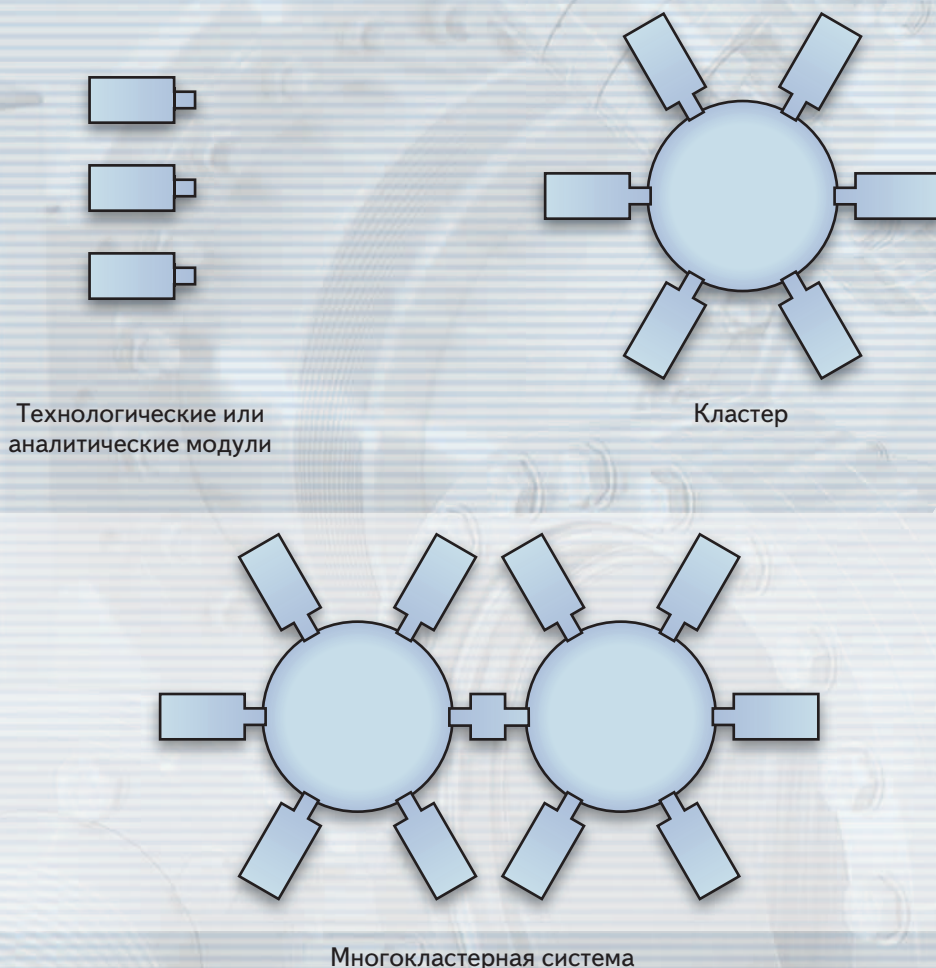
Наличие модулей передачи подложек с устройствами переворота обеспечивает возможность проведения сложных технологических циклов с включением групповых и нанолокальных процессов, а также проведение необходимых контрольно-измерительных и аналитических процедур.

Развитая транспортная системы с модулями межоперационного хранения подложек позволяет в одном НТК НАНОФАБ 100 реализовать одновременно несколько технологических циклов на нескольких подложках, допуская таким образом использование НТК несколькими исследовательскими группами.

Помимо модулей в состав НАНОФАБ 100 входят также и отдельные технологические, контрольные, измерительные, аналитические и др. устройства. Для их использования модули НАНОФАБ 100 снабжены достаточно большим количеством портов, позволяющих расширять при необходимости их возможности.

Модули платформы НАНОФАБ 100 могут функционировать как в составе НТК, так и автономно, в отдельных случаях возможно, с использованием вспомогательных загрузочных устройств или модулей загрузки.

НАНОФАБ 100 является открытой и постоянно развивающейся и расширяющейся платформой — в разработке постоянно находится несколько модулей, использующих новейшие технологии.



Базовые принципы

Модули различны по устройству, принципам работы и назначению, вместе с тем они обладают рядом общих черт, обусловленных использованием общих принципов при их конструировании:

Совмещение

Модули нанолокальных технологий и контрольно-измерительные модули снабжены специально разработанными высокоточными координатно-связанными системами позиционирования образцов, позволяющими с микронной точностью приводить обрабатываемые участки подложек в рабочие области локальных воздействий и визуализации.

Чистота процесса

Модули оснащены безмасляной системой откачки вплоть до сверхвысокого вакуума, обеспечивающего достижение требуемой чистоты процесса.

100 мм

Любой модуль платформы предназначен для работы со 100-мм подложкой

Автоматизация

Любой модуль платформы является высокотехнологичным автоматизированным устройством.

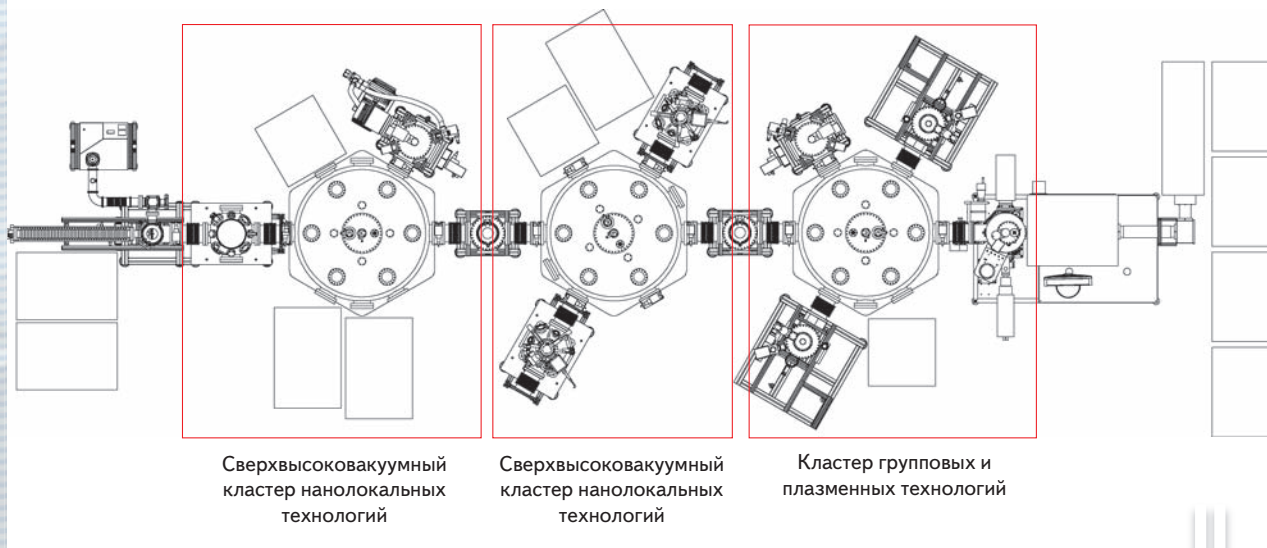
Автономность

Каждый из модулей платформы — это самостоятельная технологическая установка, блестяще решающая свою специализированную задачу. Управление процессом, происходящим в каждом модуле, может осуществляться отдельным оператором с отдельного пульта управления.

Уникальность

По составу платформы, транспортной системе, системе управления и гибкости формирования нанотехнологических комплексов платформа НАНОФАБ 100 не имеет аналогов в мировой практике.

Пример компоновки 3-кластерного НТК на базе платформы НАНОФАБ 100



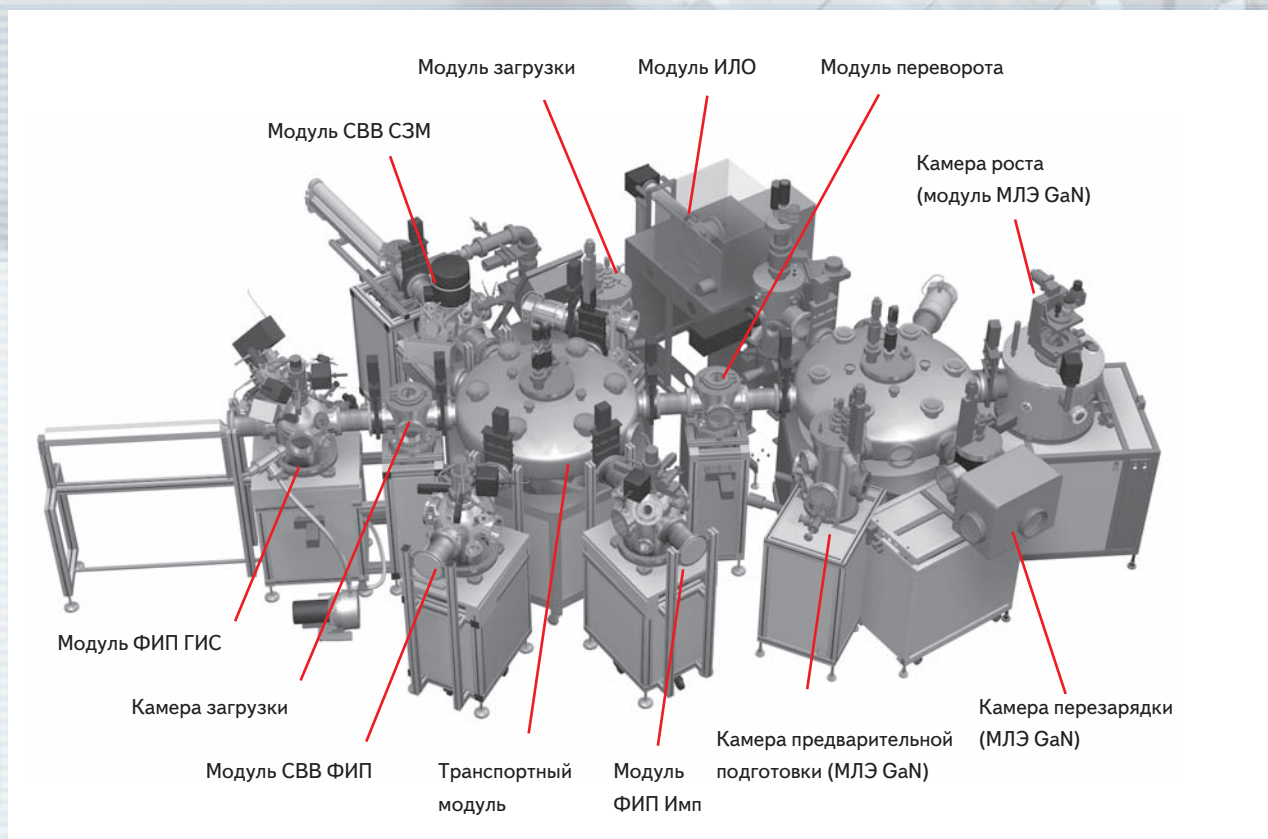
Применения

Области применения НТК НАНОФАБ 100 покрывают практически все поле нанотехнологических исследований и разработок, связанных с твердотельными наноматериалами, наноструктурами и наноустройствами. Спектр возможностей НАНОФАБ 100 простирается от проведения фундаментальных исследований до отработки отдельных технологических приемов и моделирования нанoeлектронных устройств.

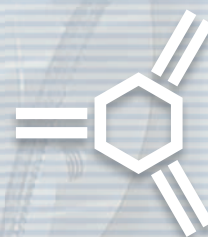
Применяемые компоновочные схемы, система управления и развитая транспортная система НТК НАНОФАБ 100 позволяет применять их также и для мелкосерийного производства наноструктур и наноустройств.

Координатно-связанная система позиционирования подложек позволяет создавать сложные многокомпонентные 3D наноустройства путем проведения в различных модулях последовательных нанотехнологических операций с нанометровым разрешением.

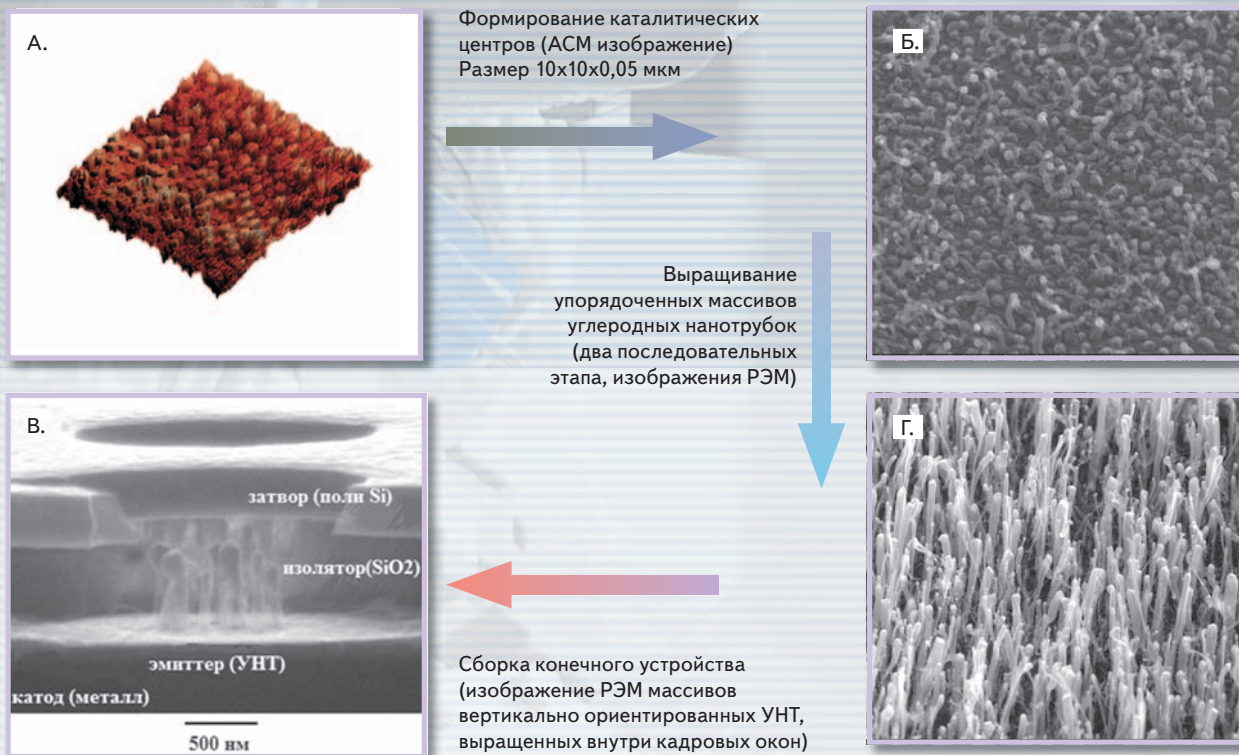
Особенно важной является область применения НТК НАНОФАБ 100 для технологических разработок в области современной кремниевой электроники, давно уже вступившей в область реальной нанoeлектроники.



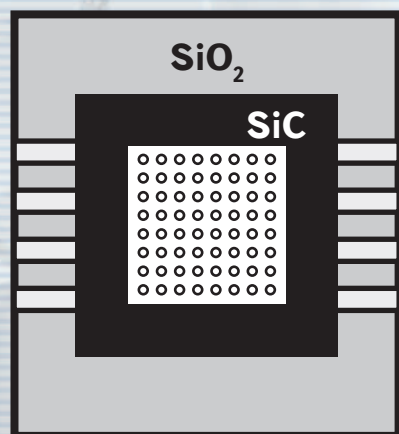
Пример компоновки модулей НТК НАНОФАБ 100 кластерного типа (ТТИ ЮФУ, Таганрог)



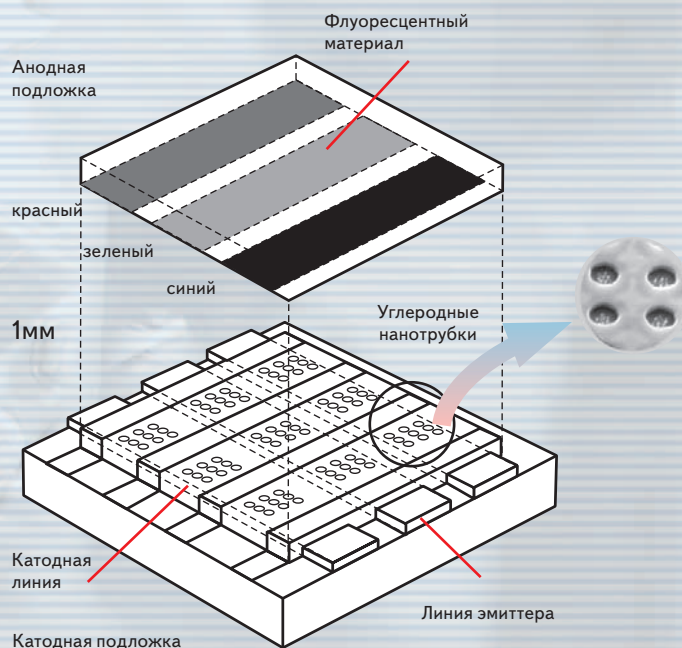
Примерная схема технологического маршрута изготовления конечного устройства (ионизационного газочувствительного датчика) на основе ориентированных массивов углеродных нанотрубок



Д. Модель ионизационного газочувствительного датчика



Е. Поперечное сечение дисплея с автоэлектронной эмиссией

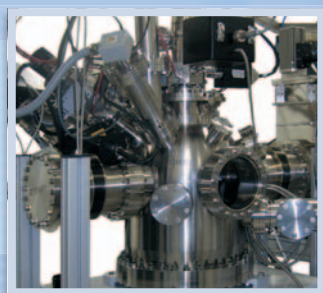


Компания выражает благодарность проф. О.А. Агееву (ТТИ ЮФУ, Таганрог) за предоставленные результаты и изображения (иллюстрации В и Е взяты из «IEE Proceedings – Circuits, Devices and Systems», 2004, Vol. 151. Issue 5. P. 443- 451).

Модули нанолокальных технологий

М

Модули нанолокальных технологий предназначены для проведения процессов последовательной локальной модификации поверхности с использованием фокусированных ионных пучков и острых зондов, включая процессы роста, травления, распыления, имплантации и пр. К ним относятся:



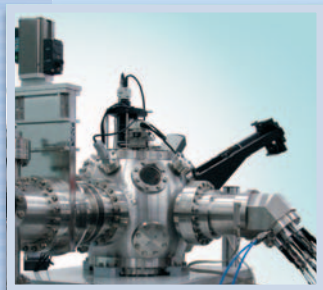
Сверхвысоковакуумный модуль нанообработки фокусированными ионными пучками



Сверхвысоковакуумный имплантационный модуль фокусированных ионных пучков



Высоковакуумный модуль фокусированных ионных пучков с системой газовых инжекторов



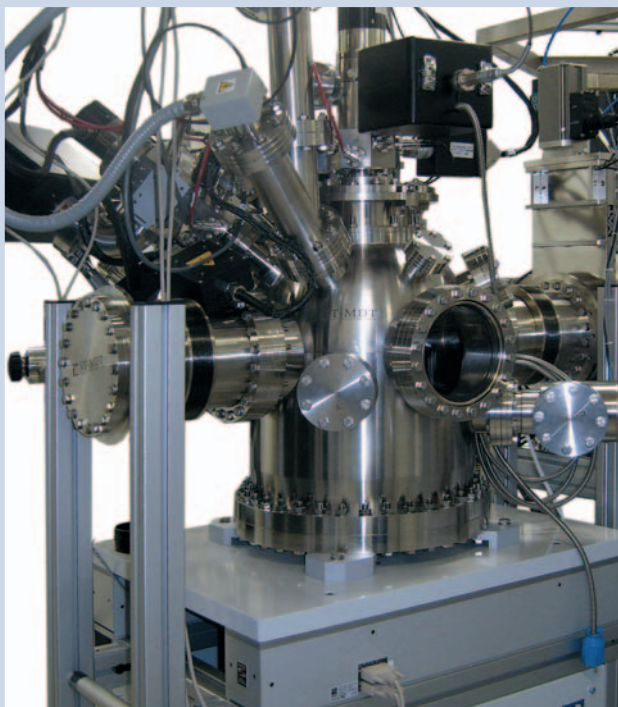
Высоковакуумный модуль сканирующего зондового микроскопа с системой газовых инжекторов

Модули с колоннами Фокусированных Ионных Пучков (модули ФИП) относятся к числу основных модулей платформы НАНОФАБ 100 и предназначены для проведения технологических операций с применением Фокусированных Ионных Пучков, в том числе операций локального распыления, резки, визуализации наноэлементов и наноструктур, ионной имплантации, локального роста, очистки поверхности п / н подложек и пр. Высокая степень автоматизации и координатно-связанная прецизионная система позиционирования подложек в модулях ФИП и СЗМ дают возможность микронного совмещения участков образца, обрабатываемых ионным пучком в модулях ФИП и исследуемых либо обрабатываемых методами зондовой микроскопии в модулях СЗМ.

*Совмещение в одной камере сканирующего электронного микроскопа и технологии ФИП позволяет получать информацию об объектах в процессе их *in situ* модификации осаждением или удалением материала. Модифицируя поверхность образца фокусированным ионным пучком можно одновременно получать изображение поверхности с помощью электронного пучка. В состав платформы НАНОФАБ 100 входят три типа модулей ФИП: СВВ модуль ФИП нанообработки, модуль ФИП ГИС, снабженный системой ввода паров элементо-органических соединений, и модуль нанолокальной ионной имплантации ФИП Имп. Таким образом, модули ФИП обеспечивают практически все значимые “top-down” и “bottom-up” ФИП технологии.*



Сверхвысоковакуумный модуль нанобработки фокусированными ионными пучками (СВВ модуль ФИП нанобработки)



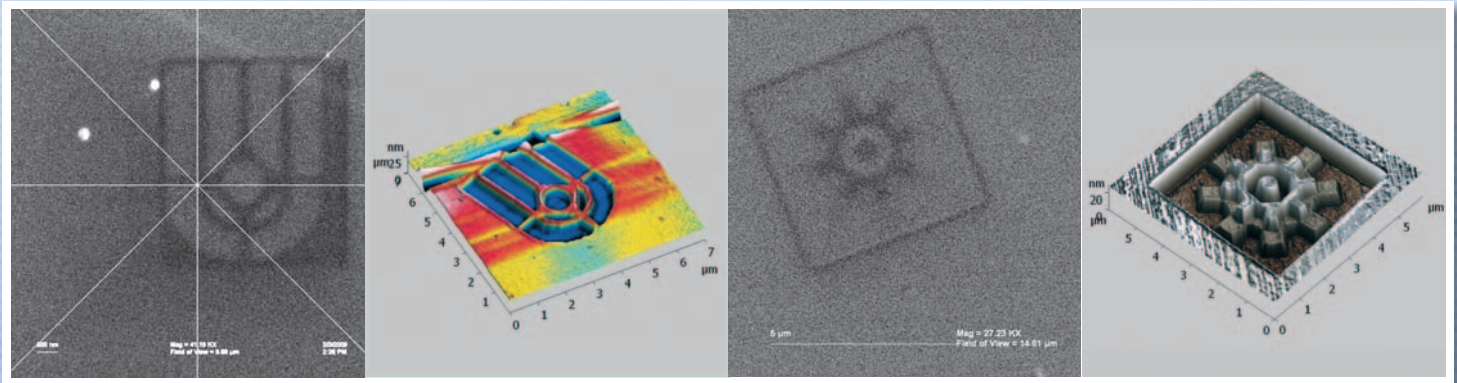
Модуль СВВ ФИП платформы НАНОФАБ 100 предназначен для исследования и модификации поверхностей посредством резки и травления ионным лучом. Фреза диаметром 10–20 нм — идеальный инструмент для создания nano- и МЭМС структур заданной геометрии. Модуль целиком установлен на системе активной виброзащиты, подавляющей механические вибрации в широком диапазоне частот.



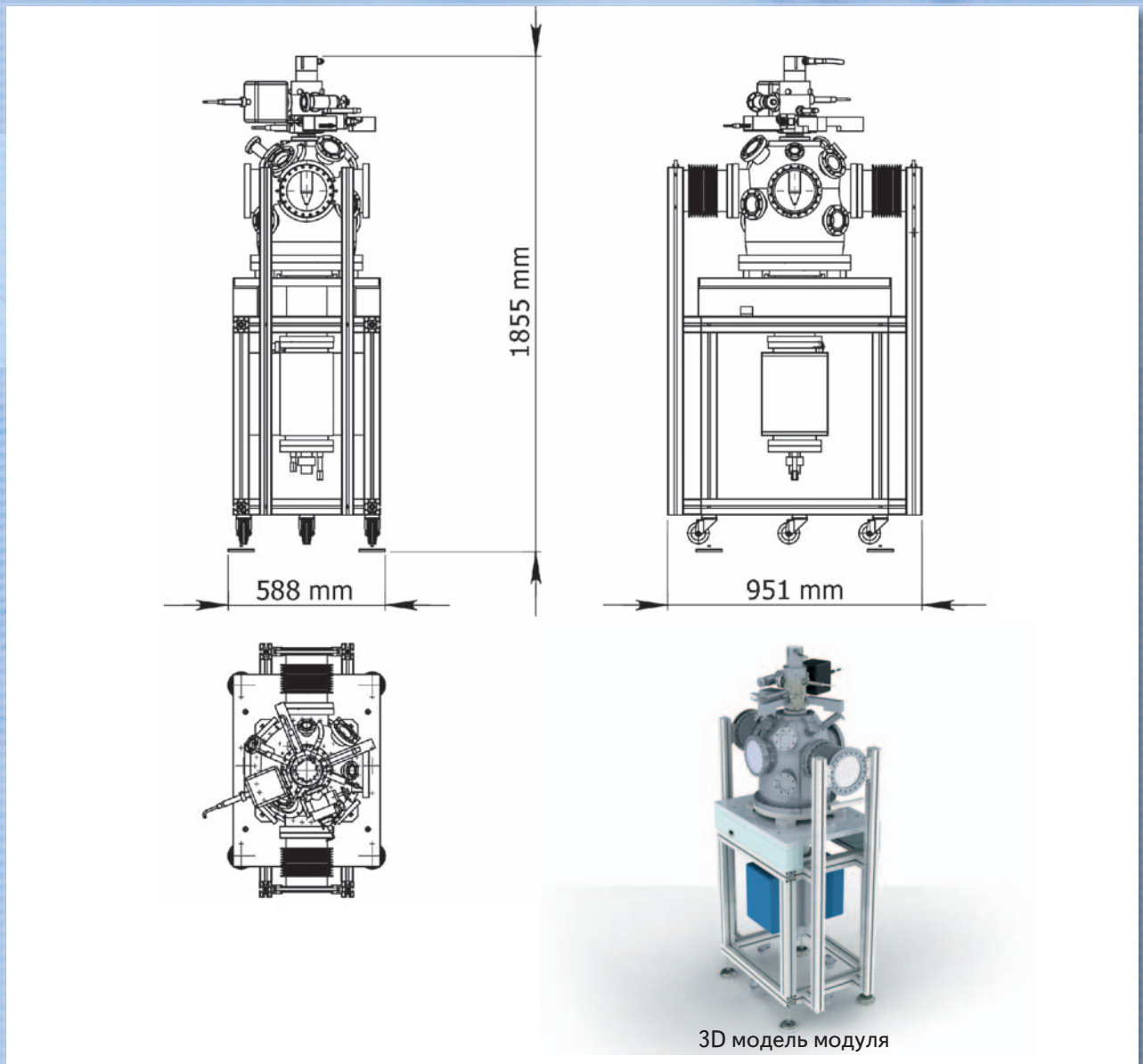
Особенности:

- универсальный рабочий диапазон, позволяющий получать изображения с высоким разрешением и осуществлять травление с высокой производительностью;
- изменения на наноуровне;
- встроенная система передачи пучка позволяет снизить время интегрирования и затраты;
- выдерживает отжиг до 180°C с запорным клапаном колонны, зафиксированным в открытом положении;
- встроенный блок отклонения пучка, бланкирования пучка и стигмации;
- механически изменяемая апертура (МИА) с 12 доступными вариантами апертур;
- Средняя апертура дифференциальной откачки колонны, геттерный ионный насос (ГИН) и средний запорный клапан колонны (ЗКК) для управления давлением;
- энергия пучка 5–30 кВ;
- диапазон токов пучка от 1,0 пА до 20 нА;
- диапазон рабочих расстояний от 5 до 75 мм;
- жидкометаллический источник ионов (ЖМИИ) FEI для получения высокого разрешения;
- регулируемый зондовый ток для применения в большинстве аналитических приложений.

Результаты



Травление ионным пучком. Изображения наноструктур получены с помощью ФИП (слева) и АСМ (справа) в центре НАНОФАБ 100-КЦСИ, любезно предоставлены М.Л. Занавескиным



Ключевой элемент модуля — колонна ФИП. Колонна ФИП обеспечивает сверхвысокую разрешающую способность (разрешение — 7 нм при энергии пучка 30 кэВ), максимальную плотность тока и эффективную работу.



Колонна ФИП

Опции

- ФИП-СЭМ — СВВ модуль фокусированных ионных пучков со сканирующим электронным микроскопом

- ФИП-СЭМ ВИМС — СВВ модуль фокусированных ионных пучков со сканирующим электронным микроскопом и системой вторично-ионной масс-спектрометрии



Вторично-ионный масс-спектрометр



Сканирующий электронный микроскоп

Технические характеристики

Колонна ФИП	
Разрешение	не хуже 10 нм
Рабочее поле	300×300 мкм
Рабочий отрезок	от 9 до 24 мм
Энергия пучка	2–5 кэВ; 10–30 кэВ
Ионный ток	от 1 пА до 40 нА
Время отсечки тока	не более 100 нсек
Система позиционирования образца	
Диапазон позиционирования	100×100×15 мм
Точность репозиционирования, XY	0.3 мкм
Точность репозиционирования, Z	1 мкм
Вакуумная система	
Комбинированный ионный и титан-сублимационный насосы	
Рабочее давление	5×10 ⁻¹⁰ мбар

Сверхвысоковакуумный имплантационный модуль фокусированных ионных пучков (СВВ модуль ФИП ИМП)



Сверхвысоковакуумный модуль нанолокальной имплантации фокусированными ионными пучками (модуль ФИП Имп) – высокотехнологичная установка, совмещающая достоинства технологии ФИП с методом ионной имплантации, что позволяет существенно оптимизировать процесс создания наноструктур с заданными свойствами размером порядка десятков нанометров. Модуль ФИП Имп предназначен для модификации поверхности подложек диаметром до 100 мм.



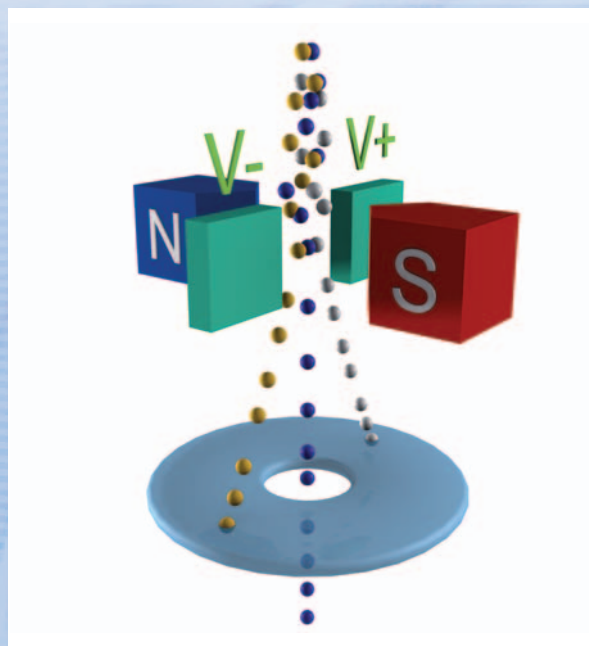
Принцип действия

В основе принципа действия модуля ФИП Импл лежит метод внедрения примесных атомов — высокоэффективный метод управления свойствами полупроводников. К его преимуществам относятся высокая воспроизводимость, локальность и точность имплантации, а также возможность введения в заданных количествах практически любой примеси. Благодаря легированию образца пучками ускоренных частиц, можно целенаправленно изменять механические, химические, оптические, коррозионные и другие поверхностные свойства материалов.

Характерный размер получаемого с помощью установки пятна на поверхности образца зависит от значения тока и энергии ионного пучка. В оптимальном режиме ток эмиссии ионов составляет от 1 пА до 40 нА. При токе пучка 1 пА и при энергии 30 кэВ размер пятна — 10 нм.

Масс-фильтр Вина — идеальное средство для измерения массового состава ионного пучка и последующей сепарации. Фильтр дает возможность использования многокомпонентных ионных источников (AuSi, AuGe, AuGeSi, CoNd, CoGe, ErNi, ErFeNiCr, NiB, GaIn, BPt, AuBeSi, AuFeGe, AuGeMn), отделяя и пропуская ионы с нужной массой, и задерживая остальные. В результате применения различных ионных источников можно получить широкий спектр пучков не только для травления, но и для имплантации.

Ключевой элемент модуля — колонна ФИП. Колонна ФИП обеспечивает сверхвысокую разрешающую способность (разрешение — 7 нм при энергии пучка 30 кэВ), максимальную плотность тока и эффективную работу.



Сепарация ионов по массам



Колонна ФИП

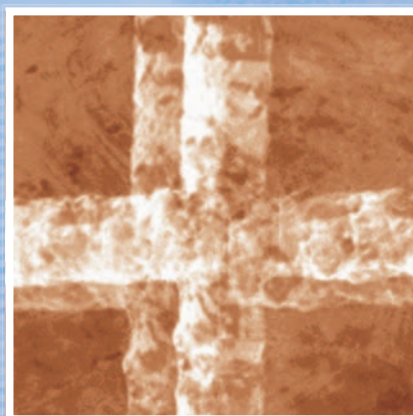
Методы:

- нанолокальная имплантация;
- ионная резка;
- нанолокальное распыление;
- нанолокальный рост;
- визуализация наноэлементов и наноструктур;
- очистка поверхностей подложек

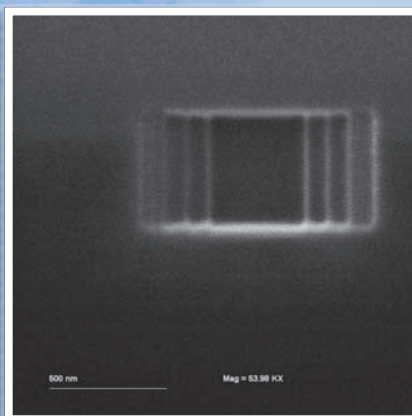
Сферы применения:

- создание элементов МЭМС и НЭМС;
- модификация изделий микроэлектроники

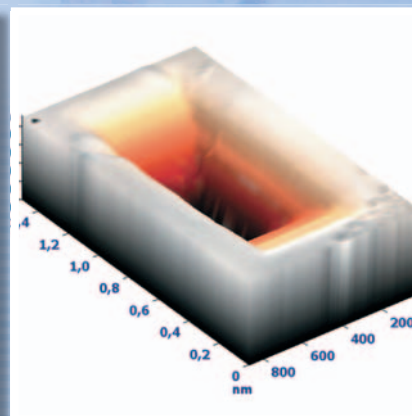
Результаты



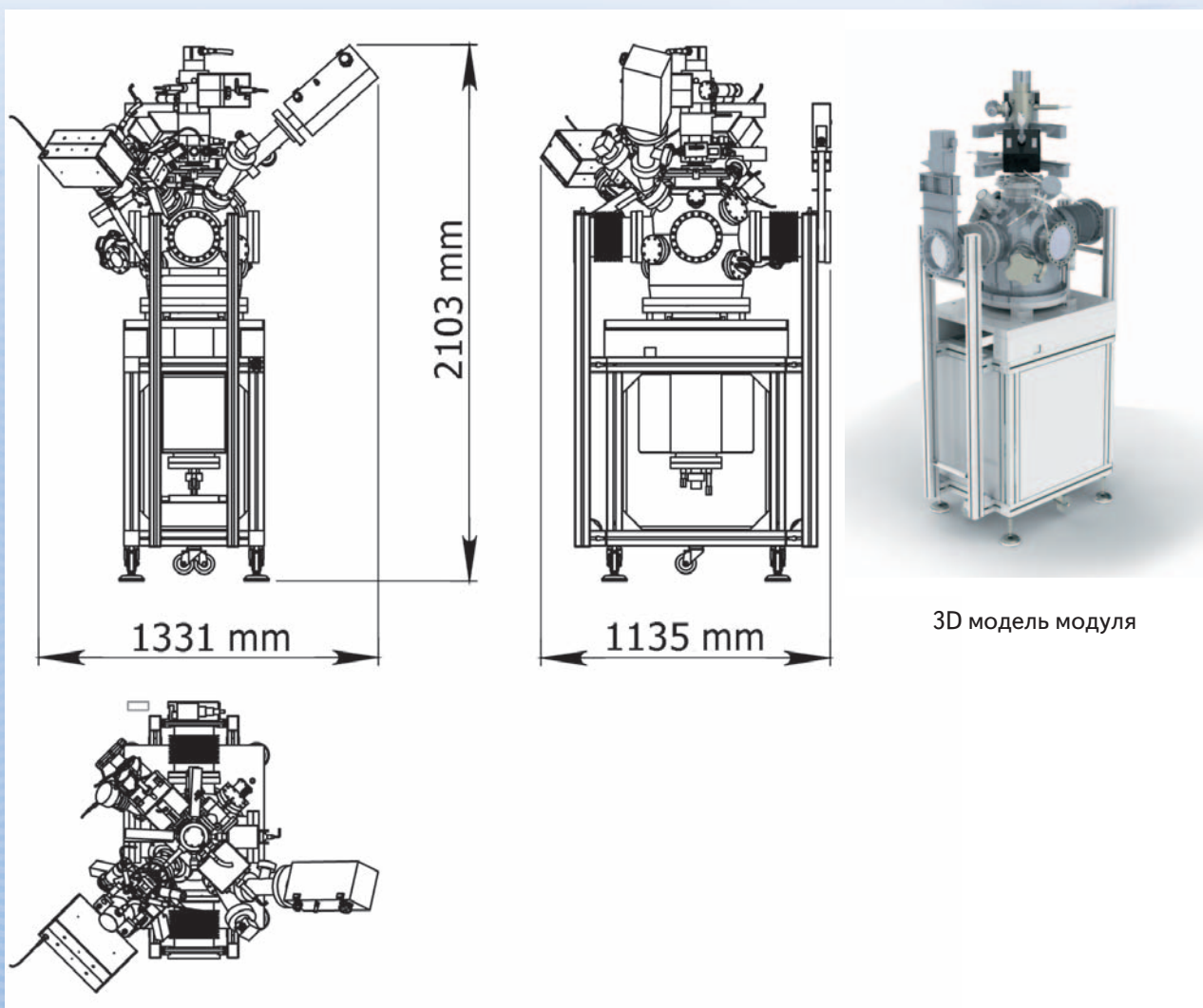
Сепарация изотопов галлия



Сканирование



Травление. Размер изображения 1,4x0,8x0,2 мкм



Технические характеристики

Колонна ФИП с магнитным сепаратором

Разрешение	не хуже 15 нм
Рабочее поле	300x300 мкм
Рабочий отрезок	от 9 до 24 мм
Энергия пучка	1–5; 10–30 кэВ
Ионный ток	от 1 пА до 40 нА
Время отсечки тока	не более 100 нсек

Система позиционирования образца

Диапазон позиционирование	100x100x15 мм
Точность репозиционирования, XY	0.3 мкм
Точность репозиционирования, Z	1 мкм

Вакуумная система

Комбинированный ионный и титан-сублимационный насосы	
Рабочий вакуум	5×10^{-10} мбар
Температура прогрева	120°C

Высоковакуумный модуль фокусированных ионных пучков с системой газовых инжекторов (ВВ модуль ФИП ГИС)

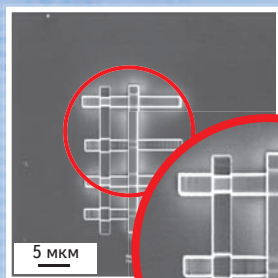


Высокотехнологичный, автоматизированный модуль ФИП ГИС (модуль фокусированных ионных пучков с газоинжекторной системой) — представитель группы модулей нанолокальных технологий, предназначенный для модификации поверхности полупроводниковых пластин диаметром до 100 мм путем инициированного ионным пучком осаждения атомов из состава вещества-прекурсора в условиях высокого вакуума. Этот мощный инструмент нанотехнологий позволяет формировать объекты с характерными размерами порядка десятков нанометров.

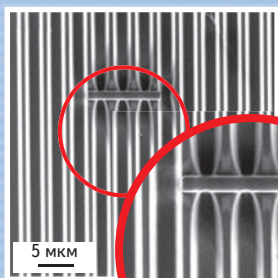


Методы:

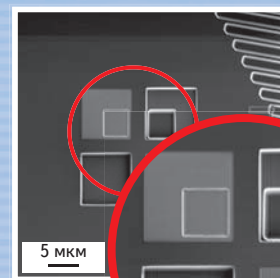
- нанолокальное осаждение из газовой фазы под действием ионного луча;
- визуализация наноэлементов и наноструктур;
- нанолокальное и селективное травление;
- ионная резка ;



Осаждение Pt



Осаждение W

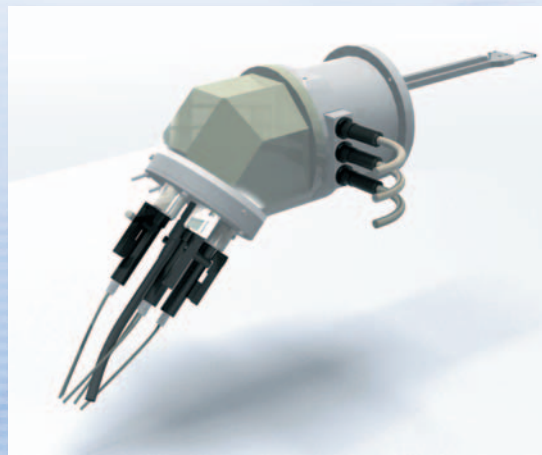


Травление Si
с использованием XeF_2





Колонна ФИП



Система газовой инжекции

Колонна ФИП обеспечивает сверхвысокую разрешающую способность (разрешение изображения — 7 нм при энергии пучка 30 кВ), максимальную плотность тока и эффективную работу. Наличие универсального рабочего диапазона позволяет также осуществлять травление с высокой производительностью. Система ГИС предоставляет возможность создания заданных химических условий в локальной области без нарушения условий высокого вакуума. Сочетание в одном устройстве технологии фокусированных ионных пучков и впрыска газа значительно расширяет спектр применений, позволяя проводить по сложным проектным шаблонам газофазное химическое осаждение металлов (вольфрама, платины), диэлектриков (SiO_2). Также возможно осуществлять локальное распыление, стимулированное и селективное травление различных материалов, а при наличии подходящих прекурсоров — выращивать микроструктуры. Следует заметить, что проведение усиленного травления и осаждения материалов требует тщательного подбора рабочих параметров как для инжектируемых газов, так и для ионного пучка. Модуль ФИП ГИС полностью отвечает самым современным технологическим требованиям.

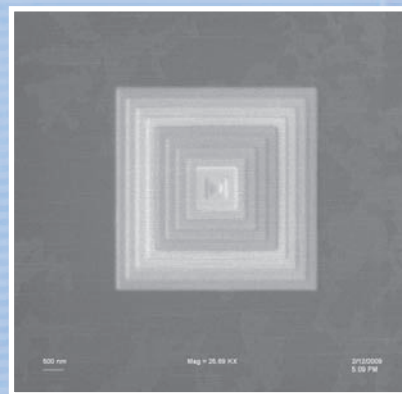
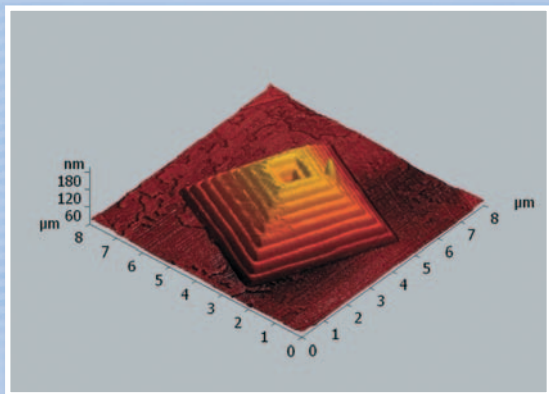
Основные части системы ГИС

- резервуары
- газовые инжекционные магистрали
- микропозиционер

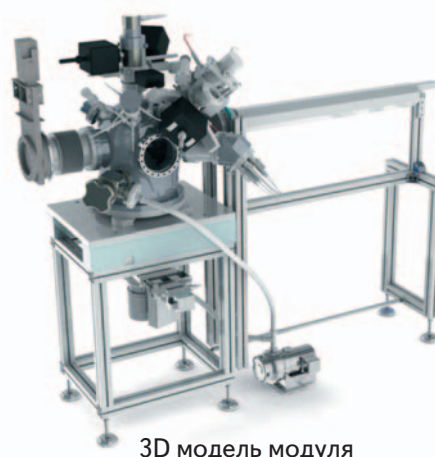
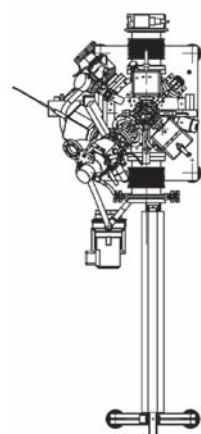
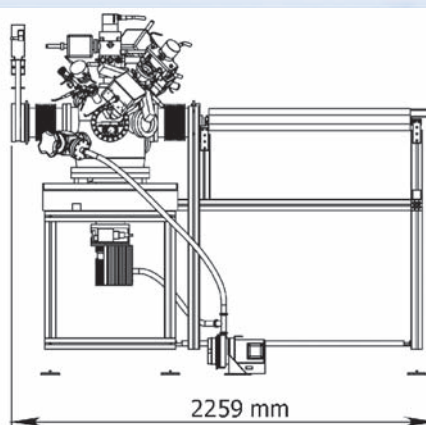
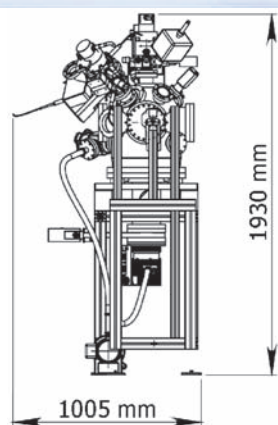
Сферы применения

- создание элементов МЭМС и НЭМС
- модификация готовых изделий микроэлектроники

Результаты



Формирование наноструктуры методом нанолокального осаждения из газовой фазы под действием ионного луча. ФИП (слева) и АСМ (справа) изображения полученной наноструктуры любезно предоставлены М.Л. Занавескиным, НАНОФАБ 100-КЦСИ.



3D модель модуля

Технические характеристики модуля ФИП ГИС

Высоковакуумная колонна ФИП	
Разрешение	не хуже 10 нм
Рабочее поле	300x300 мкм
Рабочий отрезок	9–24 мм
Энергия пучка	1–5 кэВ; 10–30 кэВ
Ионный ток	от 1 пА до 40 нА
Время отсечки тока	не более 100 нсек
Система газовых инжекторов	
Количество каналов напуска газов	5
Контроль температуры у каждого резервуара с газом	есть
Диапазон перемещения трехосевого микропозиционера выходных сопел	25x25x25 мм
Система позиционирования образца	
Диапазон позиционирования	100x100x15 мм
Точность репозиционирования, XY	0.3 мкм
Точность репозиционирования, Z	1 мкм
Вакуумная система	
Турбомолекулярный насос в камере ФИП; ионный в шлюзовой камере	
Рабочее давление	5x10 ⁻⁶ мбар (камера ФИП) 5x10 ⁻¹⁰ мбар (шлюзовая камера)





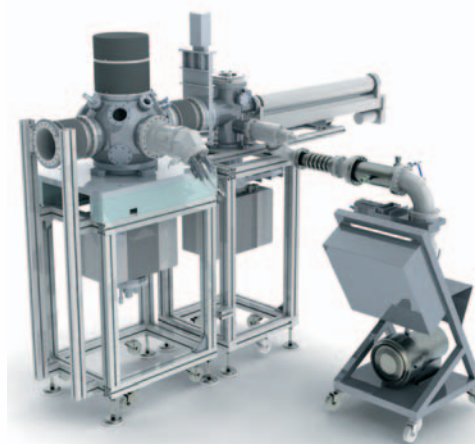
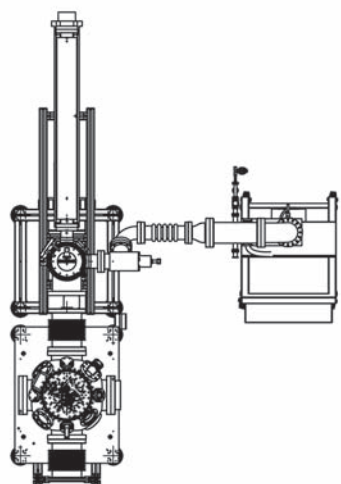
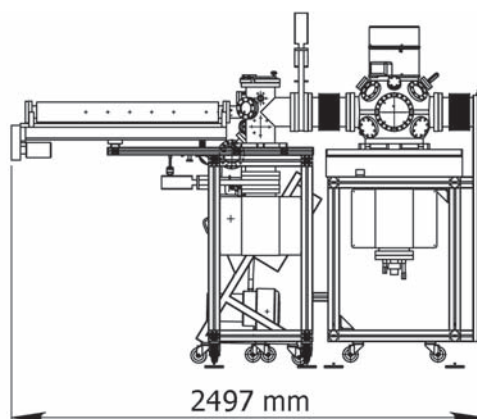
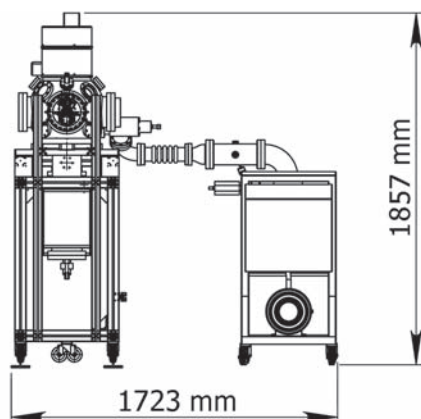
Высоковакуумный модуль сканирующего зондового микроскопа с системой газовых инжекторов (ВВ модуль СЗМ ГИС)



Нанолокальность не только при исследовании, а и при создании структуры зондовыми методами — задача модуля СЗМ с системой газовых инжекторов (СЗМ ГИС).

Система инжекторов на 5 резервуаров с микропозиционером выходных сопел и контролем температуры позволяет создавать заданные химические условия в области воздействия зонда СЗМ на образец. Здесь наилучшим образом сочетаются локальность зондового микроскопа и деликатность системы газовых инжекторов, позволяющие локально создавать заданные химические условия без нарушения чистоты процесса (то есть условий высокого вакуума).





3D модель модуля

Технические характеристики модуля СЗМ ГИС

Количество камер	2
Размер образца	подложки диаметром 2, 3, 4", образцы произвольной формы с латеральными размерами до 100 мм, толщиной до 8 мм
Масса образца	не более 150 г
Точность репозиционирования образца после проведения измерений в других модулях комплекса	не хуже 3 мкм
Смена зондовых головок	полностью автоматизированная
Система газовых инжекторов	
Количество каналов напуска газов	5
Контроль температуры у каждого резервуара с газом	есть
Трехосевой микропозиционер выходных сопел с диапазоном перемещения	25x25x25 мм



Модули групповых технологий



Модули групповых технологий предназначены для проведения технологических процессов одновременно по всей поверхности подложки, включая процессы осаждения, травления и ростовые процессы. К ним относятся:



Модуль молекулярно-лучевой эпитаксии GaAs



Модуль молекулярно-лучевой эпитаксии GaN



**Модуль плазмохимического травления
& Модуль плазмохимической очистки**



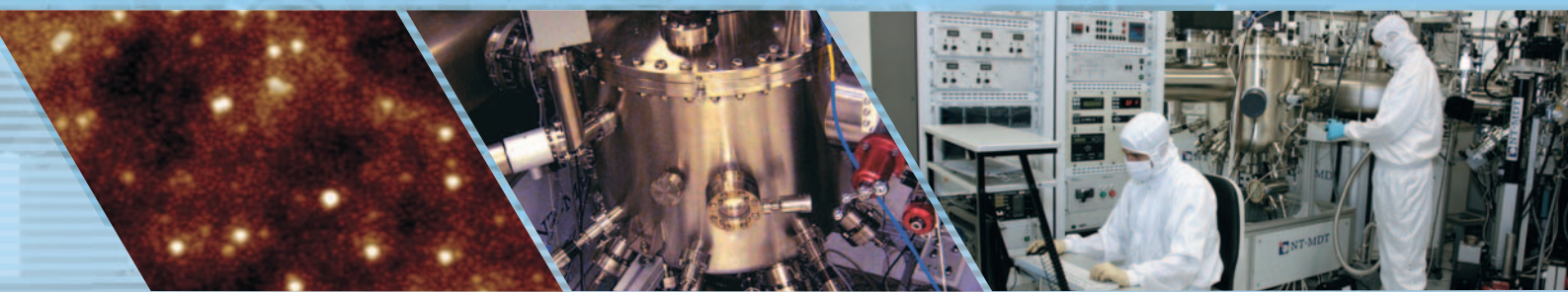
**Модуль плазмохимического осаждения из
газовой фазы**



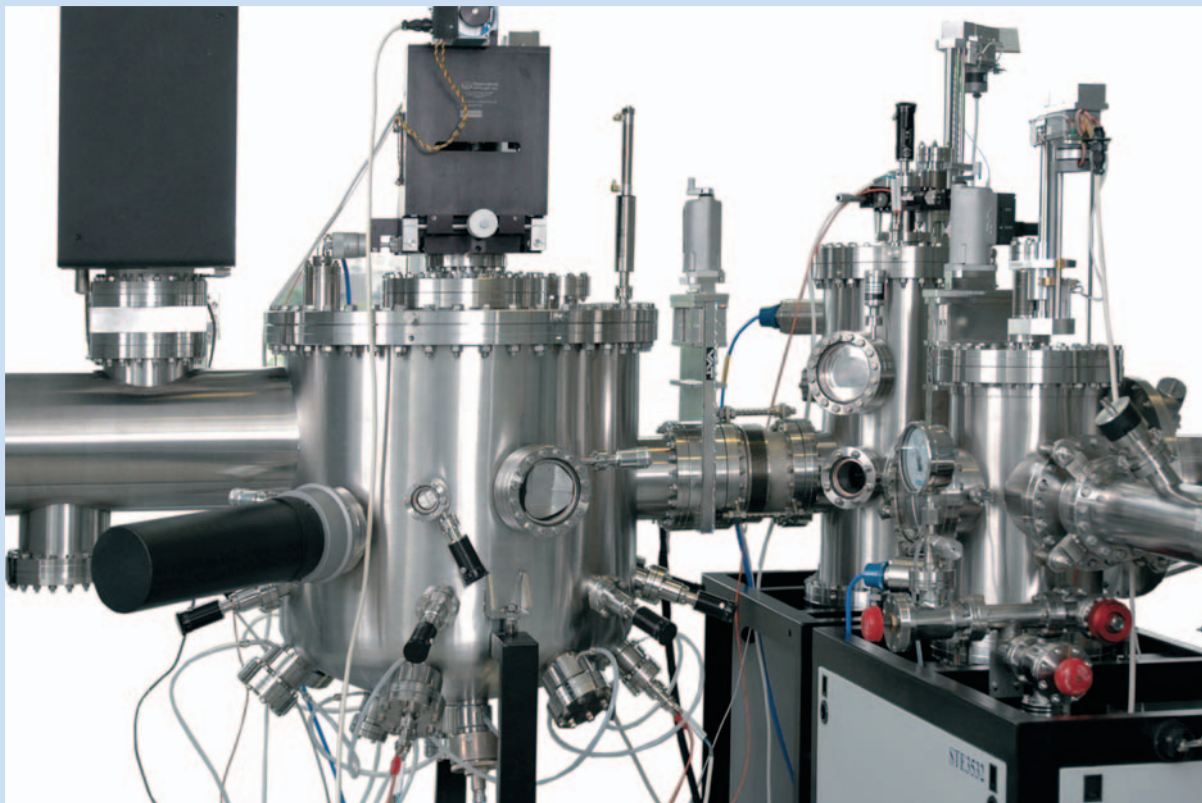
Модуль импульсного лазерного осаждения

Платформа НАНОФАБ 100 включает сверхвысоковакуумные модули молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) двух типов — модуль МЛЭ GaAs и модуль МЛЭ GaN. Эти модули предназначены для получения полупроводниковых гетероструктур на основе арсенидов и нитридов металлов III группы и могут быть использованы, в частности, для

создания СВЧ приборов и монолитных интегральных микросхем. Сверхвысоковакуумные модули МЛЭ в базовой комплектации включают три камеры: ростовую, шлюзования и подготовки. Цилиндрические ростовые камеры обеспечивают современную «вертикальную» ростовую геометрию с горизонтальным расположением подложки.



Модуль молекулярно-лучевой эпитаксии GaAs (Модуль МЛЭ GaAs)



Модуль МЛЭ GaAs предназначен для эпитаксиального роста классических соединений типа AIII BV на подложках диаметром до 100 мм.

Конструкция модуля позволяет использовать в качестве источников компонентов роста классические эффузионные ячейки, загружаемые твёрдыми материалами.

Во время транспортировки в камеру и в процессе роста подложка в держателе располагается горизонтально ростовой поверхностью вниз, что резко уменьшает неконтролируемые загрязнения.

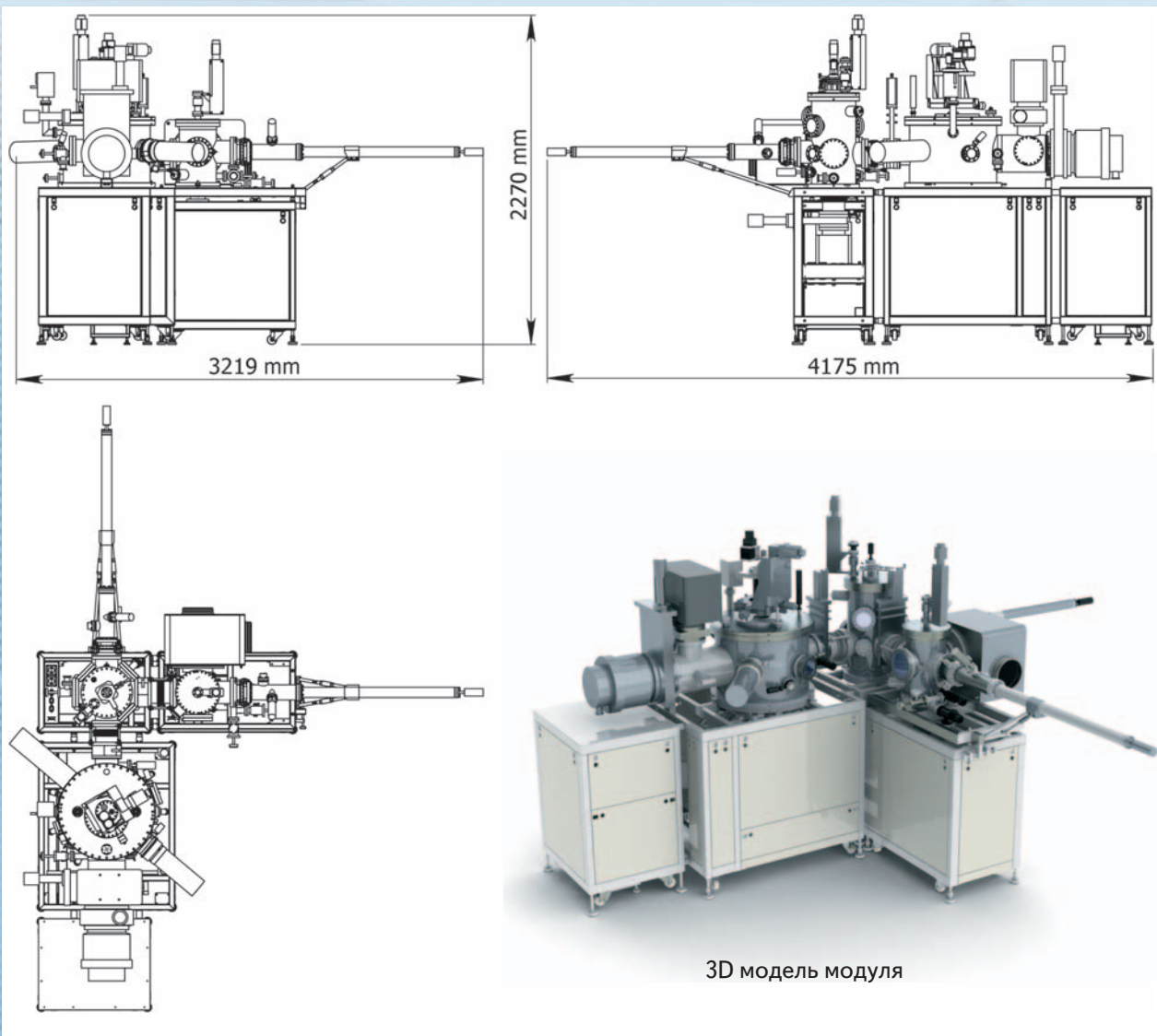
Цилиндрическая сверхвысоковакуумная камера обеспечивает современную “вертикальную” ростовую геометрию с горизонтальным расположением подложки.



Состав Модуля МЛЭ GaAs:

- ▶ две криопанели увеличенной площади, обеспечивающие высокую скорость откачки летучих компонент As и минимизирующие вероятность попадания продуктов роста с криопанели в источники материалов;
- ▶ трёхступенной ростовой манипулятор с устройством крепления носителя подложки, обеспечивающий возможность корректировки геометрии роста за счёт значительного (80 мм) вертикального перемещения;
- ▶ встроенный анализатор остаточной атмосферы квадрупольного типа;
- ▶ фланец блока испарителей, позволяющий установить до 8 молекулярных источников различного типа на фланцы DN63CF симметрично относительно вертикальной оси камеры.





3D модель модуля

Технические характеристики модуля МЛЭ GaAs:

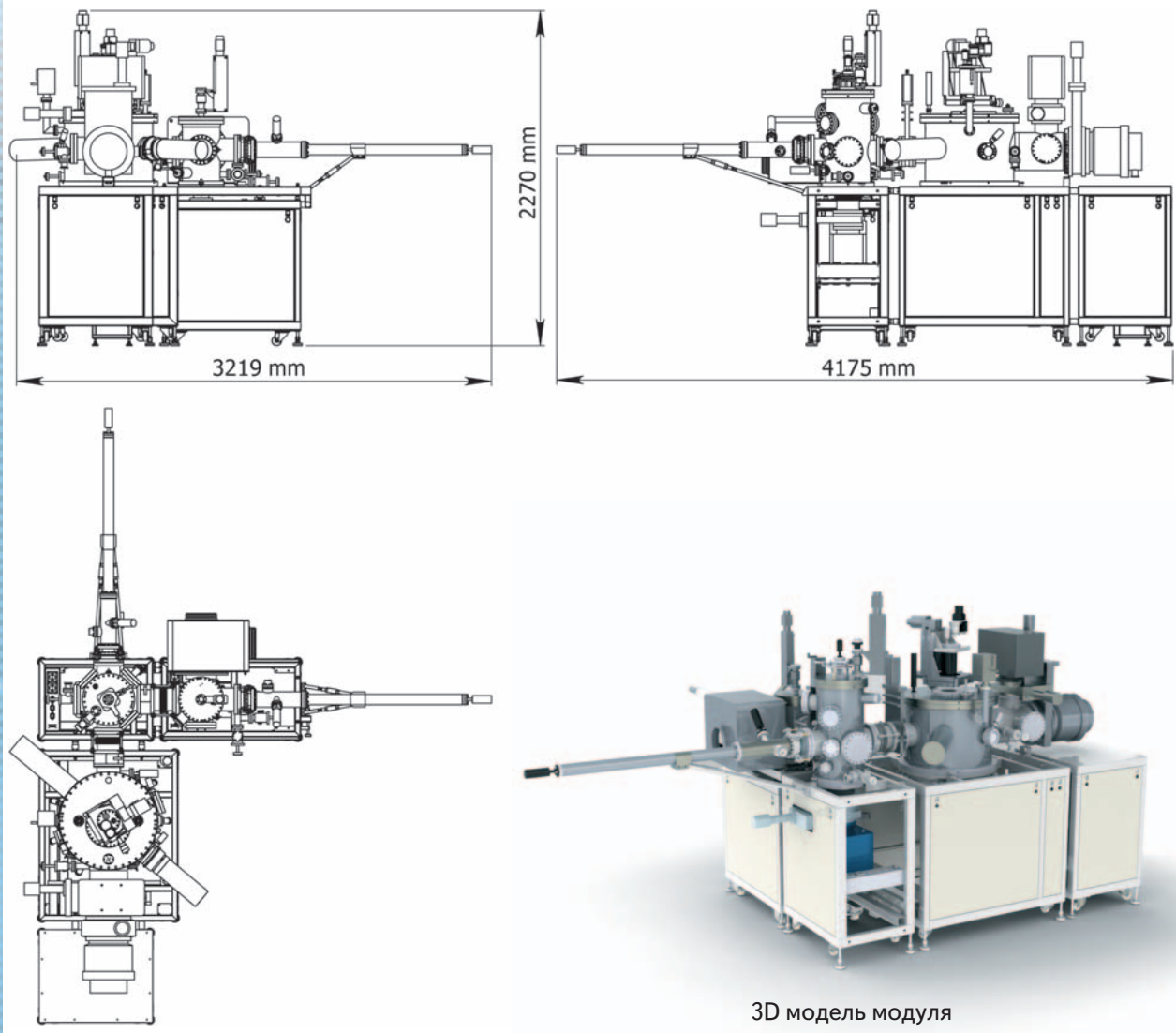
Возможность вращения носителя подложки во время роста со скоростью	не менее 1об/сек
Количество и диаметр подложек	одна 100 мм или 75 мм или 50 мм
Максимальная температура нагрева подложки,	до 900 °С
Контроль температуры нагревателя подложки	W/Re термпарой с точностью $\pm 0,5^\circ\text{C}$
Дополнительное метрологическое оборудование	система RHEED или эллипсометр видимого диапазона или встроенный анализатор остаточной атмосферы
Порты для лазерного интерферометра (эллипсометра, 2шт.) и пирометра	с заслонками
Система маршевой откачки (ионный насос)	400-600 л/с
Предельный вакуум после прогрева (48 час, 200°C)	$1,3 \times 10^{-8}$ Па
Количество эффузионных источников	до 8
Расположение образца	в обойме рабочей стороной вниз

Модуль молекулярно-лучевой эпитаксии GaN (модуль МЛЭ GaN)



Модуль МЛЭ GaN предназначен для эпитаксии полупроводниковых гетероструктур на основе нитридов III-ей группы и сконфигурирован для выращивания материалов системы InAlGaN/GaN с использованием аммиака в качестве источника активного азота.





3D модель модуля

Технические характеристики модуля МЛЭ GaN:

Возможность вращения носителя подложки во время роста со скоростью	не менее 1об/сек
Максимальная температура нагрева подложки,	до 1200 °С
Контроль температуры нагревателя подложки	W/Re термопарой с точностью ±0,5°С
Дополнительное метрологическое оборудование	Система RHEED или эллипсометр видимого диапазона или встроенный анализатор остаточной атмосферы
Порты для лазерного интерферометра (эллипсометра, 2шт.) и пирометра	с заслонками
Система маршевой откачки с турбомолекулярным насосом коррозионно-стойкого исполнения производительностью	1400-2200 л/с
Предельный вакуум после прогрева (48 час, 200°С)	1,3x10 ⁻⁸ Па
Количество эффузионных источников	до 8
Расположение образца	в обойме рабочей стороной вниз

Группа модулей плазменных технологий включает в себя: модуль плазмохимического травления (ПХТ), модуль плазмохимической очистки (модуль ПХО), модуль плазмо-химического осаждения из газовой фазы (ПХГФО).

Плазменные модули являются полностью автоматизированными установками поштучной обработки полупроводниковых пластин. Неизменяемую основу модулей очистки и травления составляет плоский водоохлаждаемый высокочастотный (ВЧ) электрод, благодаря которому возбуждается емкостная многокомпонентная плазма и реализуется режим реактивного ионного травления (RIE). По требованию заказчика для увеличения плотности ионных потоков модули могут быть доукомплектованы дополнительным индуктивно-

связанным источником плазмы мощностью до 1 кВт в плоском или цилиндрическом исполнении. Для улучшения теплоотвода от подложки предусмотрено охлаждение ее обратной стороны газообразным гелием.

Модули ПХГФО могут быть выполнены принципиально в двух исполнениях: с ВЧ возбуждением, и возбуждением от высоковольтного источника постоянного тока. Второй вариант принципиален в случае ориентации системы на рост углеродных нанотрубок.

Вакуумная система модулей в зависимости от технологических особенностей комплектуется химически стойким сухим спиральным или масляным пластинчатороторным насосом, и дополнительно турбомолекулярным.

Модули плазмохимического травления и плазмохимической очистки (Модули ПХТ и ПХО)



Модуль плазменного травления нанотехнологического комплекса НАНОФАБ 100 – установка, предназначенная для «сухого травления» широкого диапазона материалов – металлов, диэлектриков, кремния, арсенида и нитрида галлия.

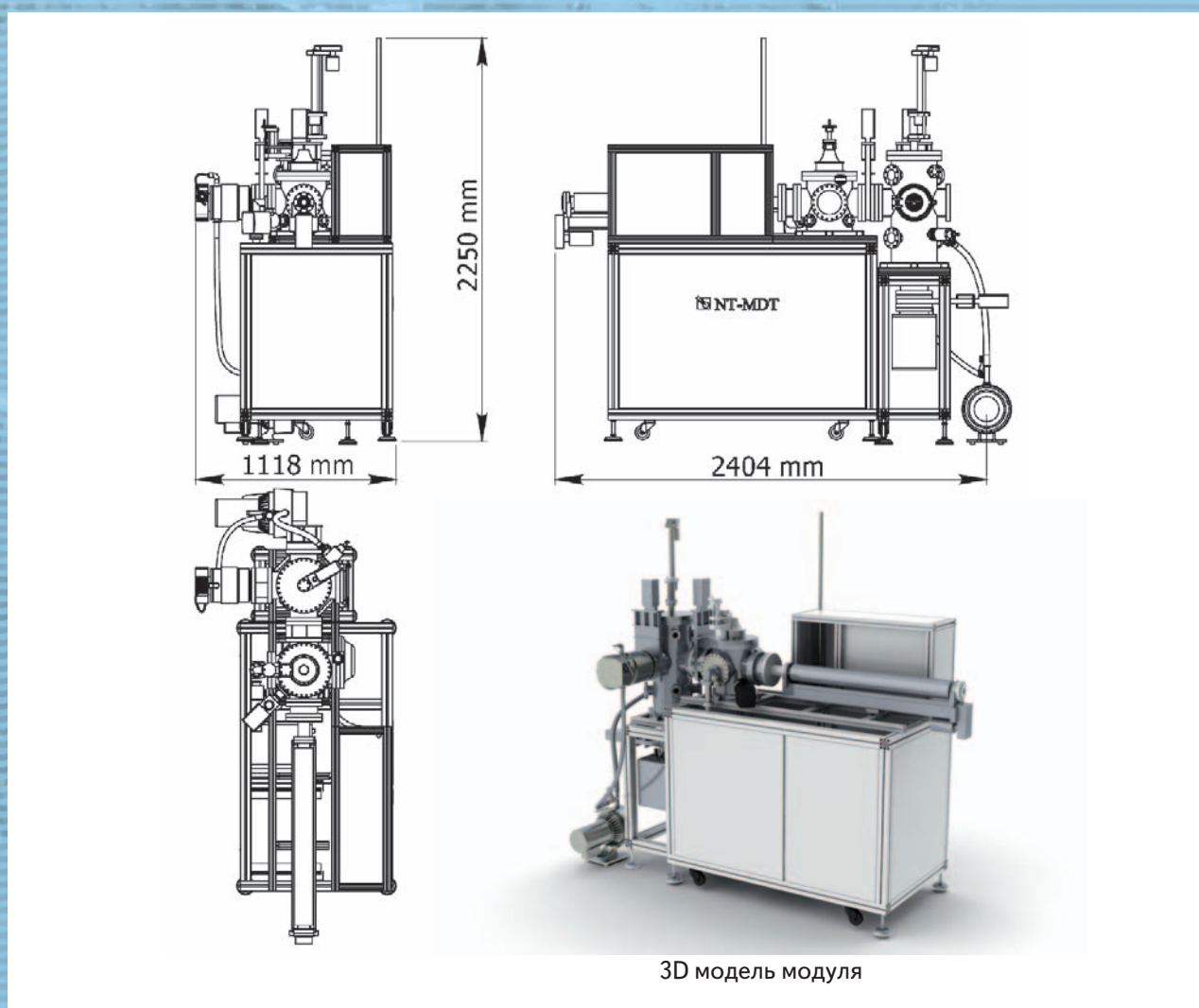
Модуль используется для обработки пластин диаметром 100 мм. Принципиально новый подход к конструкции установки позволяет легко интегрировать устройство в нанотехнологический комплекс посредством специализированного горизонтального манипулятора.

Модуль плазмохимической очистки платформы НАНОФАБ 100 предназначен для плазмохимической очистки поверхности изделий, применяемых в нанoeлектронике и состоящих из широкого спектра материалов – металлов, диэлектриков, кремния, арсенида и нитрида галлия.

Модуль используется для обработки пластин диаметром до 100 мм. Конструкции модуля позволяет легко интегрировать его в нанотехнологический комплекс посредством специализированного горизонтального манипулятора и производить операции очистки материалов и снятия естественного окисла перед последующими технологическими операциями.

Модуль позволяет производить следующие операции:

- Утонять образец на большой площади с однородностью не хуже 5 %
- Эффективно и деликатно очищать материалы и снимать естественный окисел перед последующими технологическими операциями
- Формировать топологический рисунок через маскирующие слои
- Осаждать аморфные пленки материалов



Технические характеристики модуля ПХТ:

Режим управления	Ручной, автоматический
Расположение обрабатываемой пластины	Рабочей поверхностью вниз
Основные газы, используемые при реактивном ионно-плазменном режиме травления	Ar, O ₂ , SF ₆ , CF ₆ и др.
Расход газов	10–100 см ³ /мин
Скорость травления большинства материалов (Si, SiO ₂ , Ti, Au, GaAs, GaN и др.)	0.01–0.7 мкм/мин
Однородность скорости травления по площади	не хуже 5%
Вакуумная система	
Рабочее давление в реакторной камере	2x10 ⁻² –6x10 ⁻¹ Торр (определяется независимо от количества подаваемого газа)
Предельное давление в реакторной камере	10 ⁻⁵ Торр
Предельное давление в камере загрузки	10 ⁻¹⁰ Торр
Охлаждение	
Охлаждение ВЧ-электрода	Собственная система водоохлаждения
Дополнительное охлаждение нерабочей поверхности образца	Газообразный гелий
ВЧ-генератор	
Мощность	300 Вт
Частота	13,56 МГц

Технические характеристики модуля ПХО:

Режим управления	Ручной, автоматический (без изменения технологических параметров во время проведения процесса)
Расположение обрабатываемой пластины	Горизонтально, рабочей поверхностью вниз
Основные газы, используемые при реактивном ионно-плазменном режиме травления	Ar, O ₂
Расход газов	10–100 см ³ /мин
Вакуумная система	
Рабочее давление в реакторной камере	2x10 ⁻² –6x10 ⁻¹ Торр
Предельное давление в реакторной камере	10 ⁻⁵ Торр
Предельное давление в камере загрузки	10 ⁻¹⁰ Торр
Охлаждение	
Охлаждение ВЧ-электрода	Собственная система водоохлаждения
Дополнительное охлаждение нерабочей поверхности образца	Газообразный гелий
ВЧ-генератор	
Мощность	300 Вт
Частота	13,56 МГц

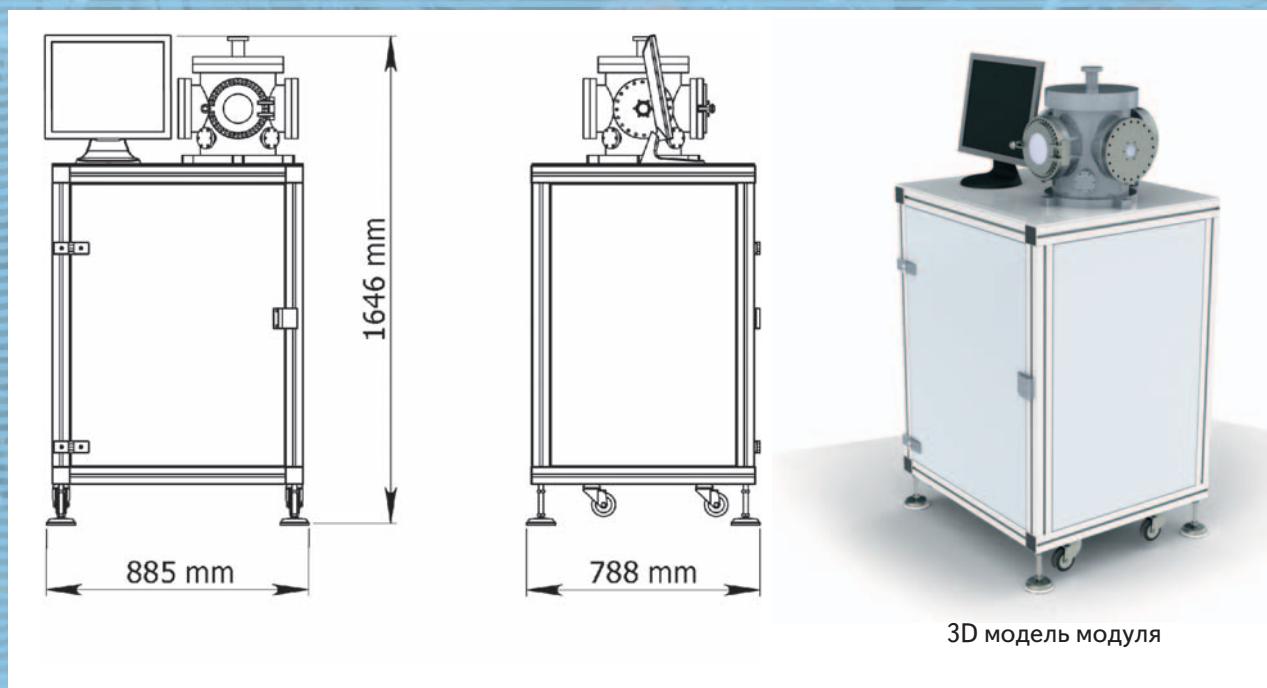
Модуль плазмо-химического осаждения из газовой фазы (модуль ПХГФО)



Модуль ПХГФО предназначен для плазмо-химического осаждения из газовой фазы. Процесс осаждения производится в плазме, получаемой при низком давлении за счет активации химических реакций электрическим разрядом.

Модуль ПХГФО может быть использован для получения массивов углеродных нанотрубок (УНТ) на одиночных пластинах диаметром до 100 мм.

Установка может применяться как автономно, так и в составе нанотехнологического комплекса.



Технические характеристики модуля ПХГФО:

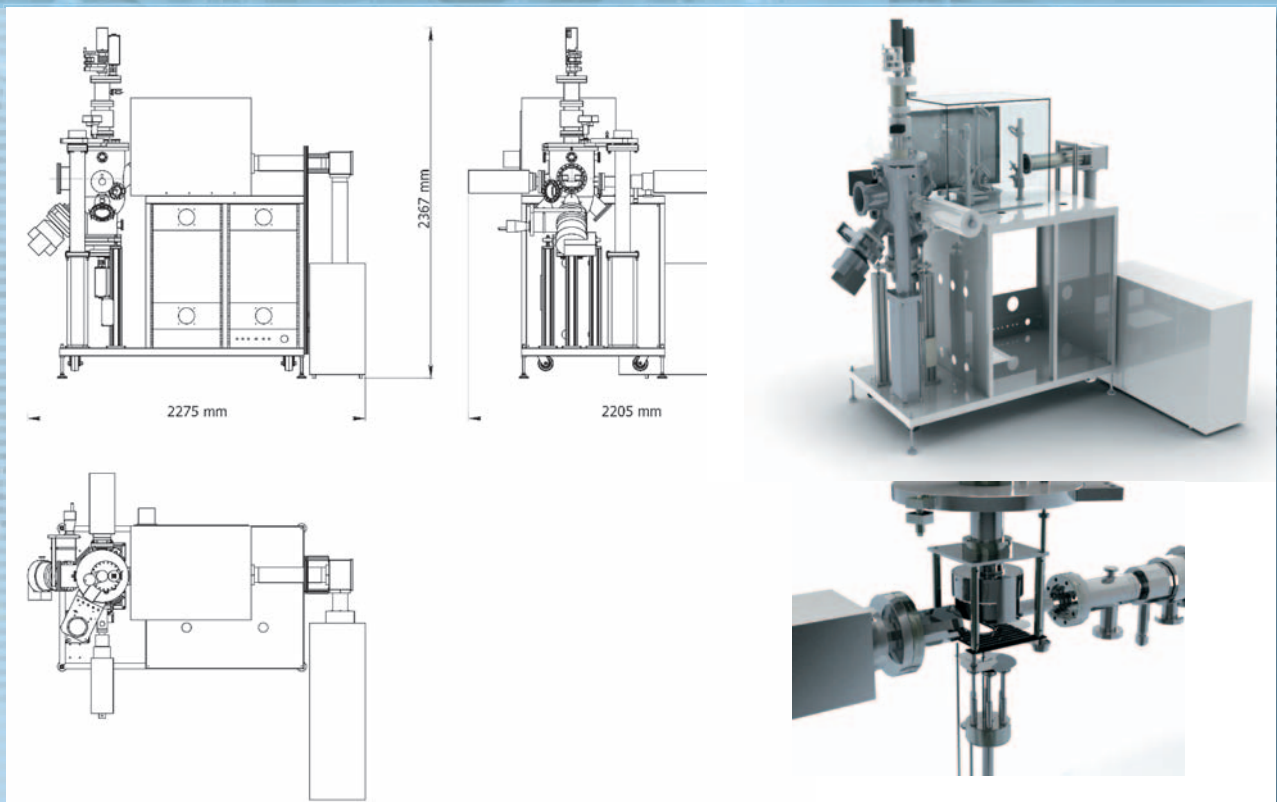
Габаритные размеры установки, не более	Глубина – 820 мм Ширина – 850 мм Высота – 1650 мм
Масса установки, не более	300 кг
Количество загружаемых и одновременно обрабатываемых пластин (размеры – диаметр пластин)	1 – 100 мм 1 – 75 мм 3 – 40 мм
Температура рабочей поверхности столика	до 900 °С
Предельный вакуум в реакторе (без подачи газов)	1×10^{-3} Торр
Рабочее давление	0.1–10 Торр
Количество газовых магистралей для подачи технологических газов	4
Способ инициирования плазмы	постоянным током
Пределы регулирования тока	0...0.5 А.
Пределы регулирования напряжения	0...1000 В
Мощность ИПВН	2.5 кВт
Высота межэлектродного пространства (рабочей области камеры)	до 25 мм
Внутренний диаметр загрузочного фланца	150 мм
Расход воды: для охлаждения камеры для скруббера	2 л/мин. 6...8 л/мин.

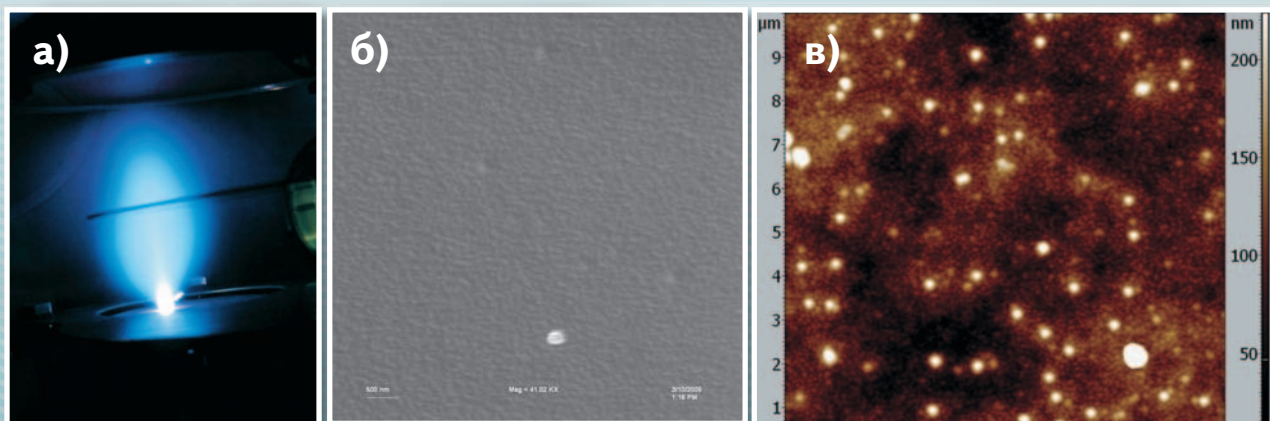
Модуль импульсного лазерного осаждения (модуль ИЛО)



Модуль ИЛО реализует следующие технологические операции:

- осаждение диэлектрических окисных слоев с термостатированием в атмосфере кислорода, как во время процесса осаждения, так и после его окончания;
- осаждение пьезо- и сегнетоэлектрических слоев с использованием мишеней из цирконаттитаната свинца (ЦТС), ниобата лития и т.п.;
- осаждение металлических слоев нанометрового диапазона в атмосфере инертного газа и получение нанотрубок и нанопроволок германия, кремния, золота и полупроводниковых соединений;
- получение сверхвысокотемпературных сверхпроводящих слоев состава $YBaCuO$ (иттрий-барий-медь-кислород), благодаря применению мишени тождественного стехиометрического состава и сохранению указанного состава во время процесса лазерной абляции.





Импульсное лазерное осаждение пленки ZnO: а) процесс абляции материала ZnO мишени, б) и в), соответственно, ФИП и АСМ изображения нанесенной пленки. Данные любезно предоставлены М.Л.Занавескиным, НАНОФАБ 100-КЦСИ.

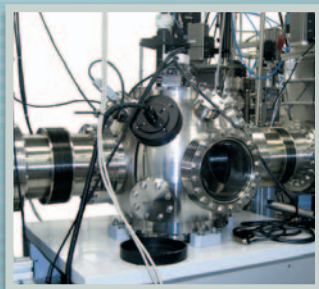
Технические характеристики модуля ИЛО:

Размер подложки	100 мм
Количество мишеней	6 мишеней \varnothing 25 мм или 3 мишени \varnothing 50 мм
Максимальная температура подложки	950°C для кремния и других непрозрачных подложек 850°C для прозрачных подложек
Равномерность прогрева подложки	$\pm 6^\circ\text{C}$ по всей площади 100 мм подложки
Точность поддержания температуры подложки	$\pm 2^\circ\text{C}$ по всей площади 100 мм подложки
Количество каналов напуска газов	не менее 3
Максимальное остаточное давление после прогрева в течение 48 часов	5×10^{-8} Торр
Система откачки	безмасляная
Максимальная скорость вращения подложки	1 об/сек
Температура прогрева камеры роста	150°C
Используемый лазер	
Модель	Coherent Model COMPex PRO 102
Длина волны	248 нм
Максимальная энергия в импульсе	400 мДж
Длительность импульса	20 нс
Система RHEED	
Рабочее давление	до 500 мТорр
Энергия пучка	1–30 кэВ
Ток пучка	до 120 мкА

Контрольно-измерительные модули

К

Контрольно-измерительные и аналитические модули предназначены для исследований характеристик и контроля параметров изготовленных структур, в настоящее время к ним относятся:

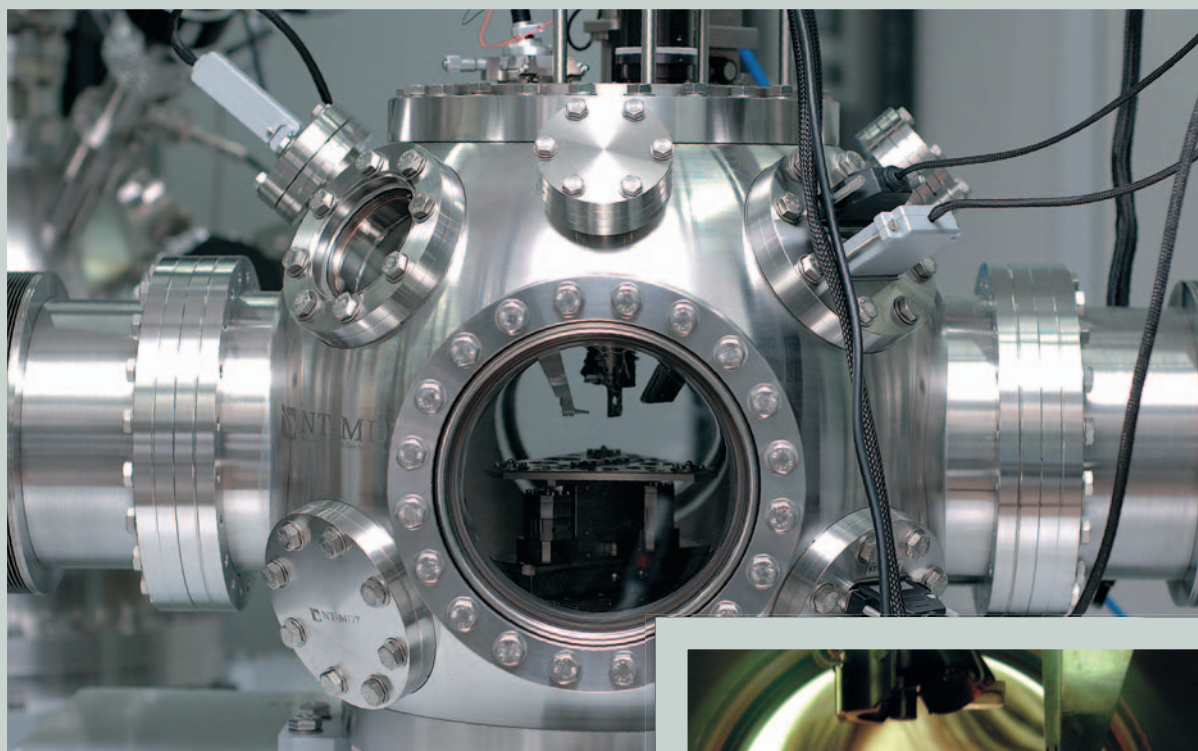


Сверхвысоковакуумный модуль сканирующего зондового микроскопа



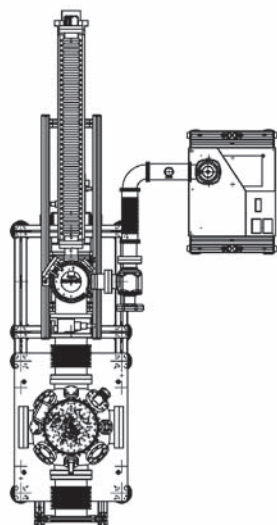
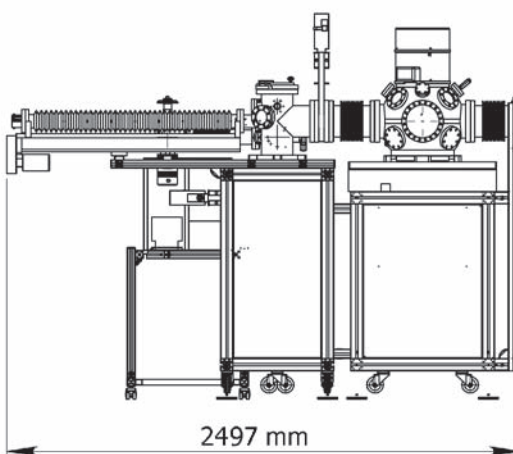
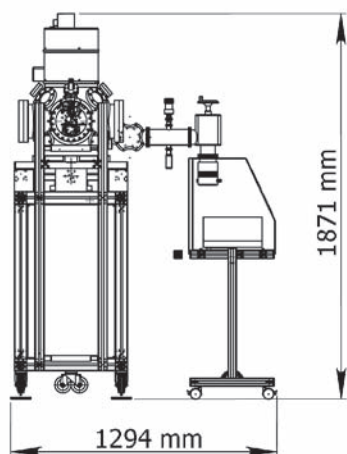


Сверхвысоковакуумный модуль сканирующего зондового микроскопа (модуль СВВ СЗМ)



Модуль СВВ СЗМ комплекса НАНОФАБ 100 предназначен для исследования поверхностей пластин, имеющих диаметр до 100 мм, и позволяет реализовывать более 40 методик измерения поверхностных характеристик подложек при вакууме 10^{-10} мбар. Разработанная специально для этого модуля система смены зондовых головок позволяет оперативно заменять рабочий зонд СЗМ без нарушения условий сверхвысокого вакуума. Координатно-связанная прецизионная система позиционирования подложек позволяет находить и исследовать созданные в других модулях системы нанобъекты.





3D модель модуля

Технические характеристики модуля СВВ СЗМ:

Образец		
Размер	2, 3, 4 “ до 100 мм в плоскости, до 8 мм в высоту	
Вес	До 150 г.	
Система сканирования		
Область сканирования, мкм	80x80x10 (Closed Loop) 3x3x2 (режим высокого разрешения)	
Минимальный шаг сканирования	0,006 нм	
Нелинейность сканирования, %	≤0.2 (Closed Loop)	
Координатный стол		
Диапазон позиционирования образца, мм	100x100x15	
Точность репозиционирования, XY, мкм	0.3	
Точность репозиционирования, Z, мкм	1	
Уровень вакуума		
Аналитико-технологическая камера	≤1.2x10 ⁻⁸ Па	
Камера загрузки и подготовки зондов	≤5x10 ⁻⁷ Па	
Виброизоляция	Активная	1–200 Гц
	Пассивная	выше 200 Гц



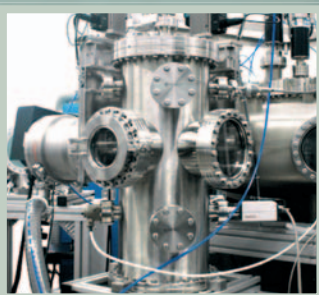
Вспомогательные модули

В

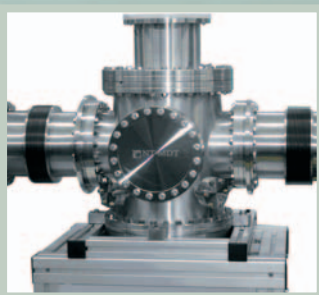
спомогательные модули предназначены для загрузки/выгрузки, транспортировки, межоперационного хранения образцов и других операций, не связанных непосредственно с технологическими операциями и исследованиями поверхности. К ним относятся:



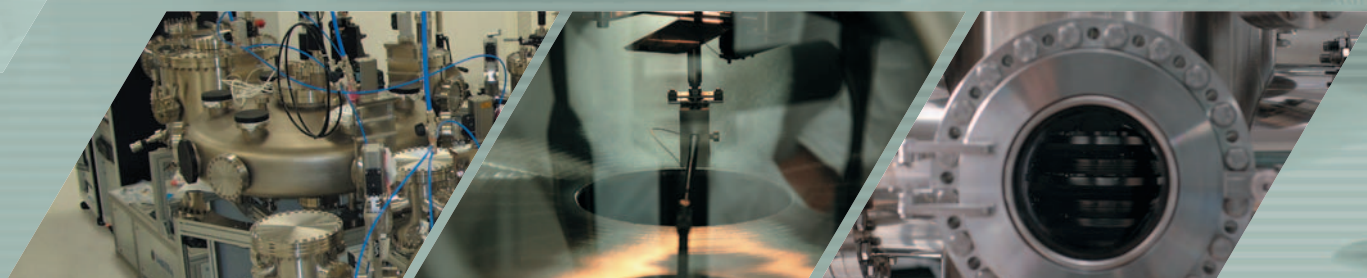
Сверхвысоковакуумный радиальный транспортный модуль



Модуль загрузки и хранения образцов



Сверхвысоковакуумный модуль переворота и передачи пластин

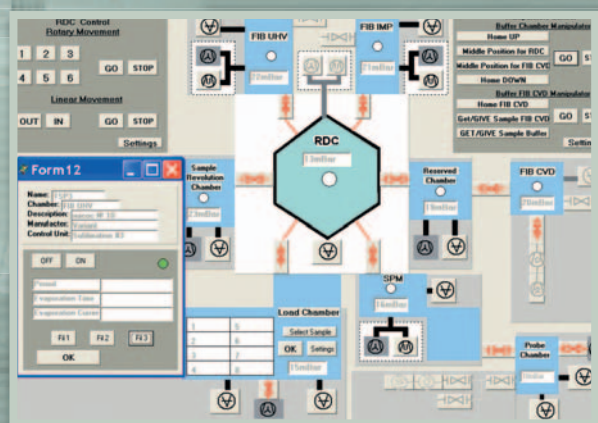


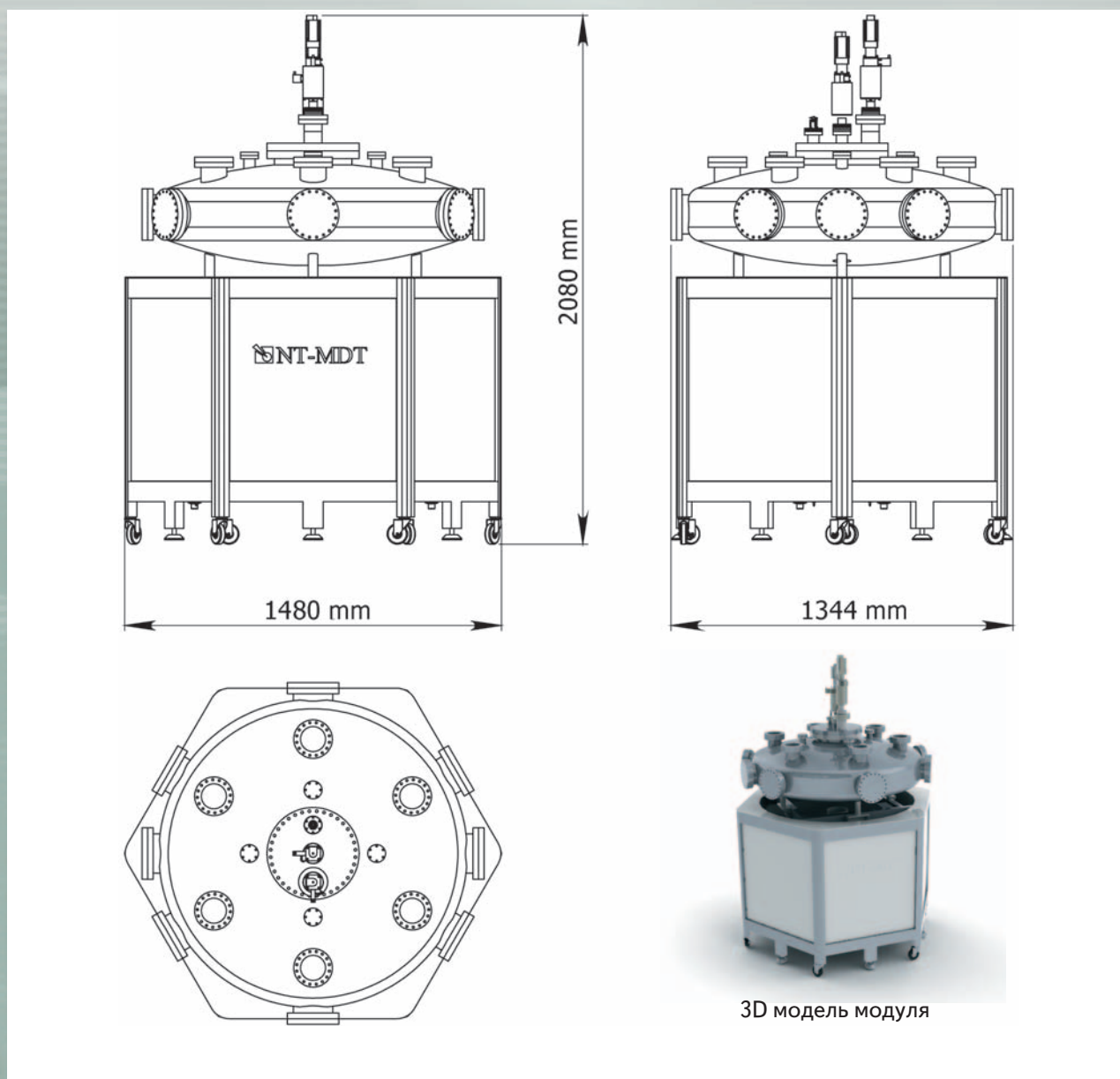
Сверхвысоковакуумный радиальный транспортный модуль (транспортный модуль)



Сверхвысоковакуумный радиальный транспортный модуль (транспортный модуль).

Транспортный модуль — соединительное звено между камерами нанотехнологического комплекса НАНОФАБ 100. Основные функциональные узлы модуля: вакуумная камера, манипулятор с держателем образца, приводы перемещения манипулятора, система для получения сверхвысокого вакуума. Для задания манипулятору вращательного движения вокруг вертикальной оси камеры и линейного перемещения используются шаговые двигатели с редукторами. Это позволяет получать высокую точность репозиционирования манипулятора, как по линейной координате, так и по угловой. Поскольку модуль предназначен для образования кластера, то манипулятор совмещен со всеми транспортными узлами. Система регулировки движения манипулятора позволяет произвести первоначальную юстировку транспортной системы всего кластера с сохранением координат конечного положения в памяти компьютера. Это необходимо для дальнейшей работы в автоматическом режиме. Вакуумная камера оснащена шестью стыковочными портами, расположенными вокруг вертикальной оси камеры. На камере имеются смотровые окна для контроля перемещений. Вакуумная система состоит из ионного насоса, вакуумметров и блоков питания и управления. Для управления движением манипулятора и вакуумными затворами служит сенсорный экран. Все контроллеры, блоки питания и компьютер размещены в одной стойке. Подобная конфигурация позволяет создавать многокластерные нанотехнологические комплексы.



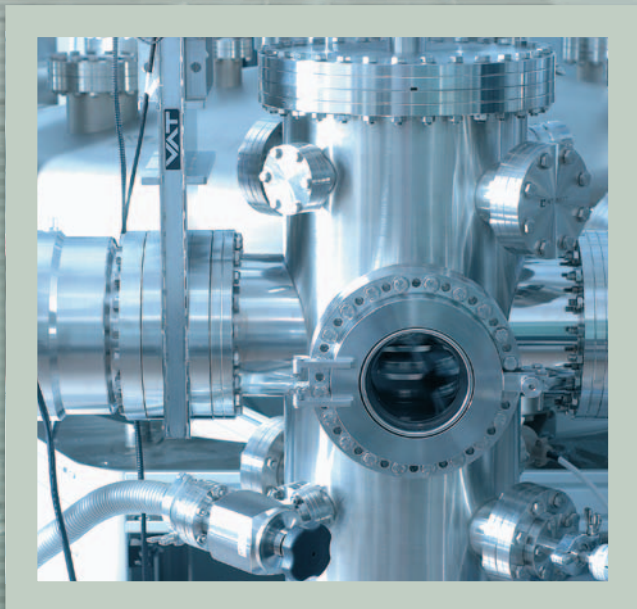


3D модель модуля

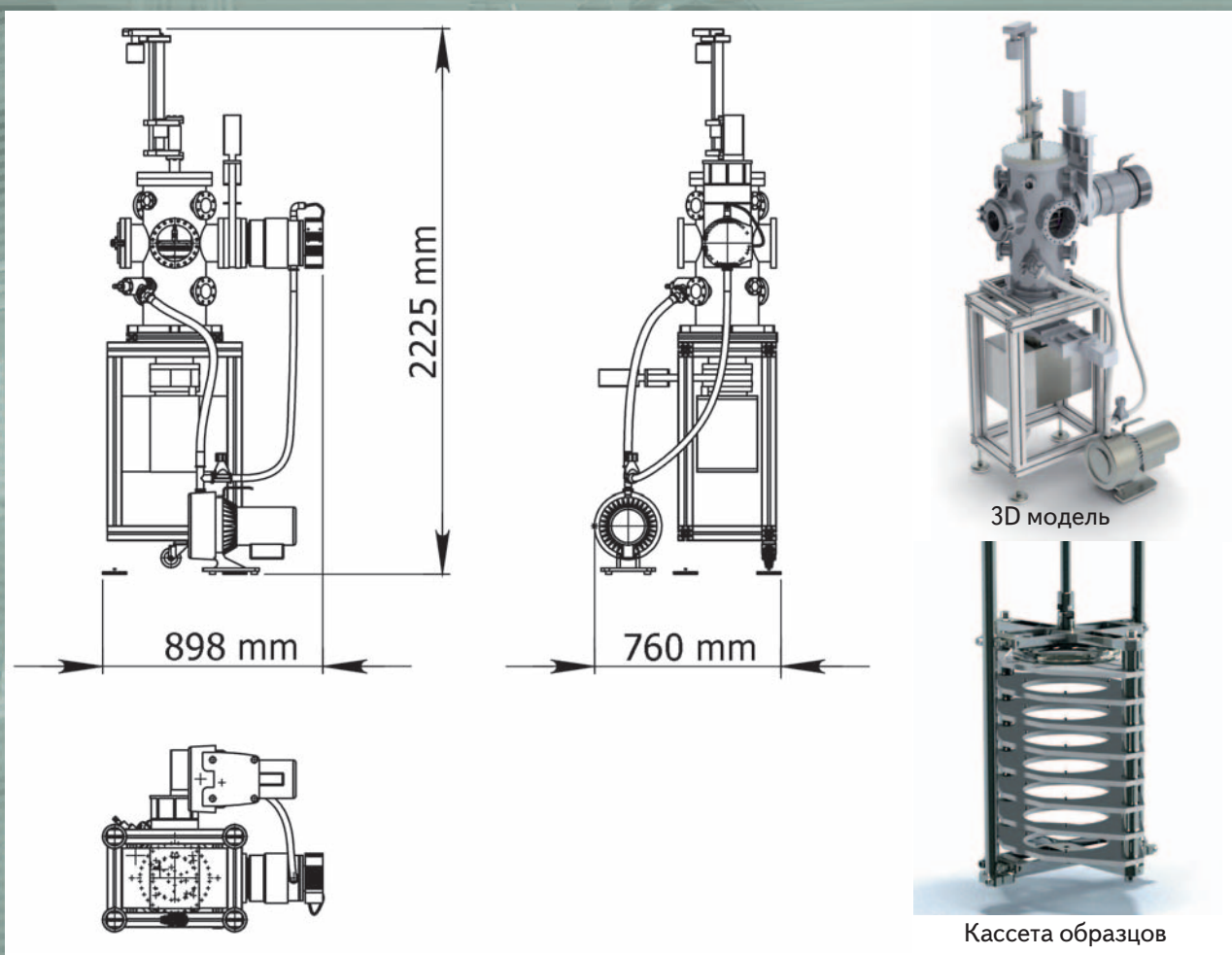
Технические характеристики модуля RDC:

Возможность вращения носителя подложки во время роста со скоростью	не менее 1об/сек
Количество и диаметр подложек	одна 100 мм или три 50 мм
Максимальная температура нагрева подложки,	не менее 700 °С
Контроль температуры нагревателя подложки	W/Re термопарой с точностью ±0,5°С
Встроенный анализатор остаточной атмосферы	квадрупольного типа
Порты для лазерного интерферометра (эллипсометра, 2шт.) и пирометра	с заслонками
Система маршевой откачки (ионный насос)	400-600 л/с
Предельный вакуум после прогрева (48 час, 200°С)	не хуже: 1×10^{-8} Па

Модуль загрузки и хранения образцов (модуль загрузки)



Модуль предназначен для загрузки и хранения образцов. Также может использоваться для межоперационного складирования. Модуль состоит из вакуумной камеры, вакуумных насосов, датчиков давления, окна быстрого доступа и подъемного механизма. Подъемный механизм представляет собой восемь полок, расположенных в ряд по вертикали. Каждая полка снабжена посадочным местом для держателя образца диаметром 100 мм. Данный механизм приводится в движение шаговым двигателем через сильфонный ввод движения. Для получения вакуума используются форвакуумный, турбомолекулярный и ионный насосы.

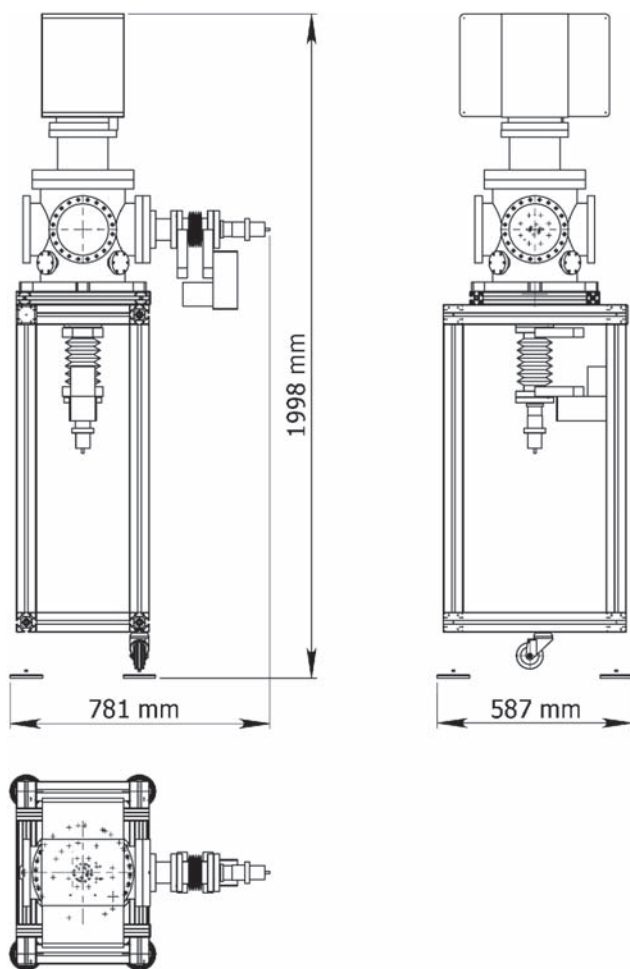


Модуль переворота и передачи пластин (**Revolution Chamber**)



СВВ модуль переворота и передачи пластин (модуль переворота) платформы НАНОФАБ 100 предназначен для передачи образца между различными кластерами комплекса. Модуль позволяет осуществлять переворот пластин, необходимый в тех случаях, когда в соединяемых кластерах ориентация образца различна.





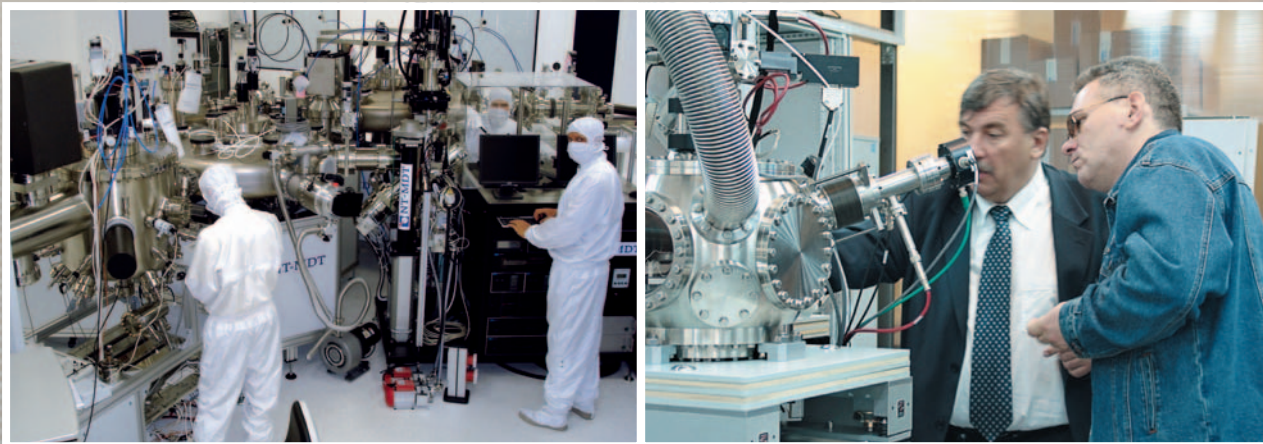
3D модель

Технические характеристики:

Рабочий уровень вакуума	10^{-10} Торр
Температура отжига	170°C
4 манипулятора (2 линейных и 2 вращательных), снабженных шаговыми двигателями	не менее 700 °C
Ионный насос со скоростью откачки	300 л/с
Одно смотровое окно для контроля процесса передачи образца	



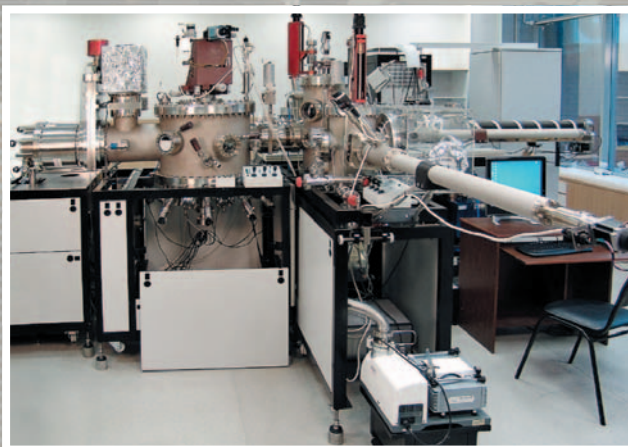
Примеры нанотехнологических комплексов



НАНОФАБ 100 в Таганрогском государственном радиотехническом университете, 2008 г.



НАНОФАБ 100 на выставке «Инновационные достижения» в рамках X Петербургского международного экономического форума, 2007 г.



НАНОФАБ 100 с линейной схемой компоновки модулей в МИЭТ, 2006 г.



НАНОФАБ 100 в ИК РАН, 2006 г.

Терминология и акронимы

Модули

Элементами платформы НАНОФАБ 100 являются модули. Каждый из модулей реализует групповой либо локальный метод нанотехнологии на 100 мм пластине. Это методы зондовой микроскопии, фокусированных ионных пучков, электронной микроскопии, молекулярно-лучевой эпитаксии, импульсного лазерного осаждения, плазменные технологии. Платформа насчитывает более 30 различных модулей (включая вспомогательные) и постоянно расширяется.

Кластеры

Объединенные по функциональному (групповые, нанолокальные, плазменные) признаку, модули образуют кластеры. Каждый кластер содержит модули, согласованные по уровню рабочего вакуума. Ядром любого кластера является робот-раздатчик, обеспечивающий транспортировку образцов между модулями.

Комплексы

Один или несколько связанных вместе кластеров образуют нанотехнологический комплекс — мощную машину, производящую в единичном или мелкосерийном количестве изделия нанoeлектроники, микроэлектромеханические устройства, изделия на их основе.

Наименования кластеров

	Полное наименование	Сокращенное наименование
1.	Сверхвысоковакуумный кластер нанолокальных технологий	СВВ Кластер
2.	Высоковакуумный кластер нанолокальных и групповых технологий	ВВ Кластер
3.	Кластер плазменных процессов	Кластер ПП
4.	Кластер молекулярно-лучевой эпитаксии	Кластер МЛЭ

Наименования модулей и групп модулей

Вспомогательные модули

1.	Сверхвысоковакуумный модуль переворота и передачи пластин	модуль переворота
2.	Модуль загрузки и хранения образцов	модуль загрузки
3.	Сверхвысоковакуумный радиальный транспортный модуль	транспортный модуль

Контрольно-измерительные модули

4.	Сверхвысоковакуумный модуль сканирующего зондового микроскопа	модуль СВВ СЗМ
Опция	Сверхвысоковакуумный модуль сканирующего зондового и сканирующего электронного микроскопов	СВВ СЗМ СЭМ



Модули групповых технологий

Модули молекулярно-лучевой эпитаксии (МВЕ)

5.	Модуль МЛЭ соединений типа $A_{III}B_V$	модуль МЛЭ GaAs
6.	Модуль МЛЭ нитридов металлов III группы	модуль МЛЭ GaN

Модули плазменных процессов

7.	Модуль плазмохимического травления (Опционально содержит буферную камеру загрузки и хранения образцов)	модуль ПХТ
8.	Модуль плазмохимической очистки	модуль ПХО
9.	Модуль плазмохимического осаждения из газовой фазы	модуль ПХГФО

Модуль лазерного осаждения

10.	Модуль импульсного лазерного осаждения	
-----	--	--

Модули нанолокальных технологий

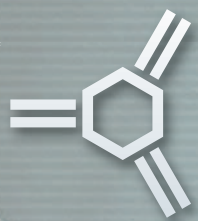
Модули ФИП

11.	СВВ модуль нанолокальной обработки фокусированными ионными пучками	модуль СВВ ФИП
Опция	СВВ модуль фокусированных ионных пучков со сканирующим электронным микроскопом (СВВ модуль нанообработки ФИП-СЭМ)	ФИП-СЭМ
Опция	СВВ модуль фокусированных ионных пучков со сканирующим электронным микроскопом и системой вторично-ионной масс-спектрометрии (СВВ модуль нанообработки ФИП-СЭМ-ВИМС)	ФИП-СЭМ ВИМС
12.	СВВ модуль нанолокальной ионной имплантации фокусированными ионными пучками (СВВ имплантационный модуль ФИП)	модуль ФИП Имп
Опция	ВВ модуль фокусированных ионных пучков со сканирующим электронным микроскопом (СВВ имплантационный модуль ФИП-СЭМ)	ФИП-СЭМ Имп
Опция	ВВ модуль фокусированных ионных пучков со сканирующим электронным микроскопом и системой вторично-ионной масс-спектрометрии (СВВ имплантационный модуль ФИП-СЭМ ВИМС)	ФИП-СЭМ Имп ВИМС

Модули СЗМ

13.	ВВ модуль сканирующего зондового микроскопа с системой газовых инжекторов (ВВ модуль СЗМ СГИ) (Опционально содержит буферную камеру загрузки и хранения образцов)	модуль СЗМ ГИС
-----	--	-----------------------

SONTECH MDT



НАНОФАБ 100



Группа компаний НТ-МДТ

Россия, 124482, Москва, Зеленоград, корпус 100

Тел.:

+7 (499) 735-0305

+7 (495) 913-5736

Факс:

+7 (499) 735-6410

+7 (495) 913-5739

e-mail: spm@ntmdt.ru

www.ntmdt.ru