

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМ БЕСШАБЛОННОЙ ЛИТОГРАФИИ

В.Быков¹ vbykov@ntmdt.ru, **К.Борисов**² konstantin.borisov@mail.ru,
Ал.Быков¹, **Ан.Быков**¹, **В.Котов**, **В.Поляков**, **В.Шиллер**²

Коренное противоречие между потребностями приборостроения и микроэлектронного производства заключается в том, что приборостроение тяготеет к специализации элементной базы, а микроэлектроника ориентирована на широкий рынок и требует унификации элементной базы. Для создания все более сложных и разнообразных приборов необходимы все более специализированные под разрабатываемую аппаратуру СБИС, производимые в малом количестве, зачастую всего по несколько десятков штук (!), тогда как удорожание микроэлектронных технологий, требуемых для изготовления сложных СБИС, экономически оправдывается лишь массовой продукцией. Удовлетворение реальных потребностей приборостроения требует поиска приемлемых в экономическом и техническом смысле решений. Один из вариантов такого решения – создание специализированных технологических линий для производства единичных образцов (прототипирования) и мелких серий СБИС и СВЧ МИС. За рубежом это направление уже выходит из стадии исследований на стадию практического применения. Над созданием базового оборудования для таких линий работает сегодня целый ряд компаний: Multibeam (США), CRESTEC (Япония), Mapper Lithography (Голландия) и IMS Nanofabrication (Австрия). Первые образцы оборудования компании Mapper Lithography уже поставлены одному из крупнейших мировых контрактных производителей чипов – компании Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC).

Создание технологических линий прототипирования СБИС обеспечивает следующие ключевые решения:

- бесшаблонная (безмасковая) многолучевая электронная литография;

- индивидуальная обработка единичных пластин;
- выполнение нескольких смежных технологических этапов обработки одной многооперационной единицей оборудования без перезагрузки обрабатываемой пластины;
- применение новых технологий финишной очистки пластин и планаризации, позволяющих

¹ Группа предприятий "НТ-МДТ".

² ФГУП "Прогресс", НТЦ "МОДУЛЬ".

существенно сократить расходы на технологическую инфраструктуру;

- осуществление транспортной связности многооперационных единиц оборудования в технологическом кластере, выполняющем всю запрограммированную последовательность технологических операций.

В сравнении со стоимостью современных технологических линий по производству чипов с проектными нормами 65 нм и менее, стоимостью инженерной подготовки производственных помещений, эксплуатационных расходов на используемые материалы и оплату труда персонала затраты на технологический кластер будут существенно ниже. И настолько же снизится стоимость изготовления чипов, что откроет широкие возможности для создателей разнообразной специализированной элементной базы и новых образцов перспективной аппаратуры.

НАНОЭЛЕКТРОНИКА И НАНОТЕХНОЛОГИИ

Практически с момента зарождения (начало 60-х годов XX века) для развития и существования микроэлектроники требовались технологии изготовления чипов с субмикронными и нанометровыми конструктивно-технологическими нормами, т.е. нанотехнологии. В особенности после появления КМОП-транзисторов, логики и памяти на их основе. Получение требуемой толщины подзатворных диэлектриков, резистов, точность совмещения при последовательном проведении процессов литографии – все это требовало введения эллипсометрического контроля, применения все более высоко разрешающих оптических и электронных микроскопов. Именно поэтому уже в 1974 году, с момента появления термина "нанотехнология", профессор Токийского университета Норико Танигучи (он первым и ввел термин "нанотехнология") отметил, что "нанотехнология является, в частности, важной и немедленно востребованной в таких областях, как материаловедение, машиностроение, оптика и электроника". И это действительно так.

По мере продвижения шаг за шагом в сторону все меньших конструктивно-технологических норм – от 90, 65, 45, 32, 22 к 14 нм, а сегодня в разработках уже и 8-нм, электронные технологии требуют атомной точности выполняемых операций [1]. Это и обусловило развитие нанoeлектроники – электроники, базирующейся на нанотехнологиях и технологиях атомной точности. Элементная база нанoeлектроники – это приборы, функциональные свойства которых определяются размерными эффектами, в том числе квантоворазмерными. К ним относятся:

- одноэлектронные транзисторы;
- приборы на баллистических эффектах, когда длина свободного пробега носителей заряда сравнима или больше размеров элементов;
- приборы на эффектах туннелирования носителей заряда, в том числе приборы на эффекте Джозефсона (СКВИДы);
- терагерцовые и субтерагерцовые нелинейные элементы;
- приборы на квантовых точках и квантовых ямах;
- активные элементы на квазиодномерных материалах (нанотрубки), которые можно считать началом элементной базы молекулярной электроники. Сегодня уже созданы первые лабораторные образцы чипов с 10 тыс. транзисторов, телом которых являются углеродные нанотрубки [3];
- активные элементы на квазидвумерных материалах (графен, германены, MoS₂, BN, GaSe, GaTe, GaS, GaTe, InSe и т.п.) [4];
- мемристоры;
- FinFets – транзисторы с трехмерной структурой;
- приборы на спин-коррелированных эффектах (спинтроника).

Современный уровень развития технологий микроэлектроники уже позволяет изготавливать СБИС с топологическими нормами 22 нм. В 2014 году минимальные размеры элементов составят 14 нм (при этом физическая длина затвора транзисторов интегральных схем будет равна 6 нм), а к 2015–2016 годам проектные нормы достигнут 8–10 нм (в соответствии с дорожной картой компании Intel) [6]. Согласно исследованиям компании Intel [1], для 14-нм процессов достаточно эффективна иммерсионная литография (используется двойное экспонирование). Она может применяться и для 10-нм процессов (четырёхкратное экспонирование). Вместе с тем продолжают развиваться инвестиции в разработку литографии экстремального ультрафиолета (Extreme Ultraviolet Lithography, EUV), правда, несколько меньшими темпами. Сейчас для массового производства СБИС с топологическими нормами 22 нм Intel запускает пять заводов (ФАБов): В1С и D1D в Орегоне, fab 32 и fab 12 в Аризоне, fab 28 в Израиле. Стоимость каждого из этих заводов 6–8 млрд. долл. Их производительность вполне достаточна, чтобы закрыть потребности рынка.

Разработку интегральных схем с топологическими нормами 14 нм и менее и освоение их производства интенсивно ведут компании Intel, Samsung, GlobalFoundries, TSMC. Для успешного продвижения по составленным ими дорожным картам инвестируются миллиарды долларов в разработку оборудования,

материалов и технологий, а также в метрологическое обеспечение и научные исследования. На освоение технологии с проектными нормами 14–8 нм и менее Intel совместно с компанией ASML в 2012 году инвестировала 4,1 млрд. долл. Темпы, которыми ведутся работы, исключительно высоки. Таким образом, для того, чтобы конкурировать в секторе продукции микро- и нанoeлектроники массового спроса, требуются многомиллиардные капиталовложения, целесообразность которых в настоящее время вызывает вопросы, так как выход на рынок конечной продукции исключительно сложен [7]. С другой стороны, существуют секторы рынка, к которым относятся приборостроение, оборонные отрасли промышленности, в том числе аэрокосмическая, где необходима элементная база высшего уровня, а массового производства не требуется. Возможен ли успех в этих секторах? И если возможен, что для этого необходимо предпринять и сколько средств затратить?

Интегральные схемы можно и сегодня выпускать в России на технологических линиях известных производителей Юго-Восточной Азии, США, Китая. Например, по принципу fabless (разработка микроэлектронных схем без их производства), по которому сейчас работает подавляющее большинство дизайн-центров и такие российские компании, как ГУП НПЦ "Элвис", НТЦ "Модуль", ИТМиВТ, белорусская компания PROMWAD и др. [8–11].

В дизайн-центре проектируются IP-блоки, опираясь на технологические нормы конкретного ФАБа.



Рис.1. Предназначенные для разработок и исследования свойств функциональных элементов нанoeлектроники, МЭМС- и НЭМС-комплексы системы НАНОФАБ-100 функционируют в Южном федеральном университете (Таганрог) (а); в ФГУП РИИФП (Зеленоград) (б); в Курчатовском институте (в) и НОЦ Тюменского государственного университета (г)

Разработанные блоки объединяются в единую микросхему, изготавливается соответствующий комплект фотошаблонов (фотошаблоны может изготовить и сам ФАБ), который и передается контрактному производителю для обработки пластин. После изготовления чипов проводятся их измерения и испытания, по результатам которых при необходимости выполняется корректировка конструкции, и цикл проектирования повторяется вплоть до достижения требуемого результата. В зависимости от того, основана ли разработка только на компиляции отдельных уже отработанных блоков или в ходе ее предполагается создать некий новый блок, число итераций может варьироваться от одной (новых блоков нет) до трех–четырех.

В России группа компаний "Микрон" может серийно выпускать КМОП-микросхемы с проектными нормами 90 и 180 нм, а также 250- и 180-нм КНИ-, БиКМОП-, SiGe-схемы. Планируется освоение 65-нм технологии. НПО "Ангстрем" выпускает серийные микросхемы с проектными нормами до 180 нм. ОАО "Ангстрем-Т" запускает линию производства схем с проектными нормами 90 нм и планирует освоить 45-нм технологию. При рассмотрении ситуации с производством микроэлектроники в России возникает вопрос о целесообразности инвестиции средств в создание новых ФАБов, кроме уже существующих или строящихся, с учетом того, что эти предприятия имеют проблемы с рынком. С точки зрения массового производства положительный ответ на этот вопрос будет иметь большое число оппонентов. С другой стороны, уже сегодня Министерство обороны России остро нуждается в элементной базе с проектными нормами 65 нм [12]. Совершенно очевидно, что и в дальнейшем потребуются все более развитая элементная база, так как именно микроэлектроника сейчас и еще многие десятилетия будет определять тактико-технические характеристики военной техники.

МЕЛКОСЕРИЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО СБИС

Одним из первых идею использования вакуумных систем замкнутого цикла для производства изделий микроэлектроники высказал в 70-х годах прошлого века известный советский ученый В.А.Лабунов* (так называемая "бочка Лабунова"). Разработки нанотехнологических комплексов, основное назначение которых экспериментальное моделирование элементов и систем низкого уровня интеграции (рис.1), возобновились

* Сейчас Владимир Архипович Лабунов – академик Национальной академии наук Беларуси.

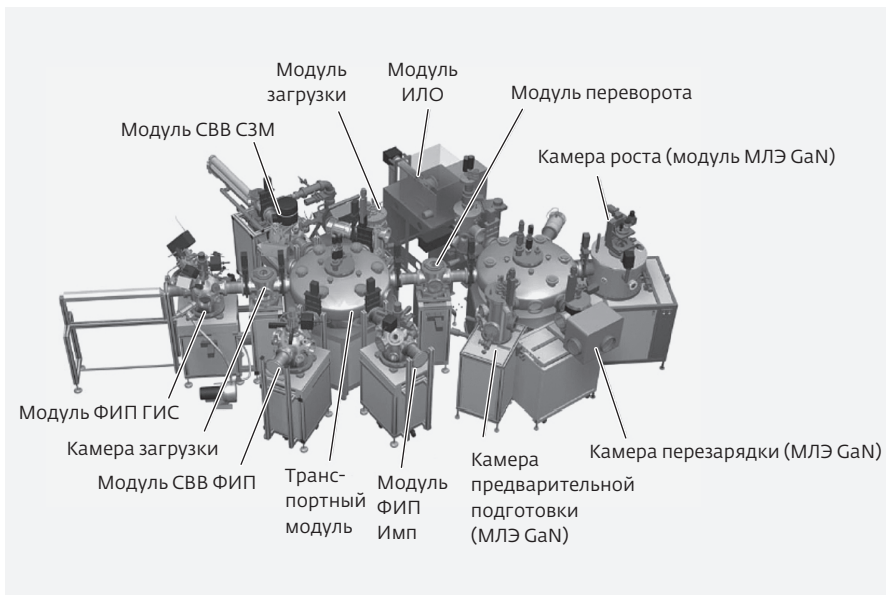


Рис.2. Модель аналитико-технологической системы, функционирующей в Таганрогском филиале Южного федерального университета

в России в 2005 году [13–20]. Созданные комплексы НАНОФАБ-100 позволяют экспериментально моделировать отдельные элементы нанoeлектроники, но их производительность недостаточна для создания схем высокого уровня интеграции.

Комплексы НАНОФАБ-100 представляют собой кластерные системы, обрабатывающие пластины диаметром до 100 мм, в которых объединены модули передачи, переворота и складирования образцов (рис.2). Наличие таких модулей позволяет проводить сложные технологические операции с помощью групповых и локальных нанопроцессов. Каждый кластер имеет шесть портов, к которым могут быть присоединены в плотную требуемые технологические или аналитические модули (рис.3). Связь между образующими кластер функционально объединенными технологическими модулями осуществляется с помощью транспортной системы и сверхвысоковакуумного радиального робота-раздатчика. Развитая транспортная система с модулями межоперационного хранения подложек позволяет в одном нанотехнологическом комплексе (НТК) НАНОФАБ-100 реализовывать одновременно несколько технологических циклов на нескольких подложках, например проводить имплантацию примесей p- и n-типа при изготовлении КМОП СБИС, в том числе и на основе транзисторов FinFET. Разработка таких модулей и технологических процессов имплантации ведется в Физико-технологическом институте РАН [21].

Помимо технологических модулей в состав комплексов НАНОФАБ-100 входят отдельные контрольные, измерительные, аналитические и другие устройства. Модули платформы НАНОФАБ-100 могут функционировать как в составе НТК, так и автономно, в отдельных случаях с использованием вспомогательных загрузочных устройств или модулей загрузки.

МНОГОЛУЧЕВАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ ЛИТОГРАФИЯ

Сегодня с помощью современных полупромышленных систем электронно-лучевой литографии модели RAITH-150 можно формировать элементы структуры размером в единицы

нанометров [22].

Кроме того, необходимы аналитические модули электронной и атомно-силовой микроскопии, обеспечивающие эффективный процесс обработки и контроля процессов формирования рисунка, проявления и травления.

Недостаток электронно-лучевой литографии – малая производительность: один процесс литографии на пластинах диаметром 100 мм с разрешением 20 нм при коэффициенте заполнения 10% занимает приблизительно 200 ч. Поэтому электронно-лучевую литографию используют только для производства фотошаблонов или

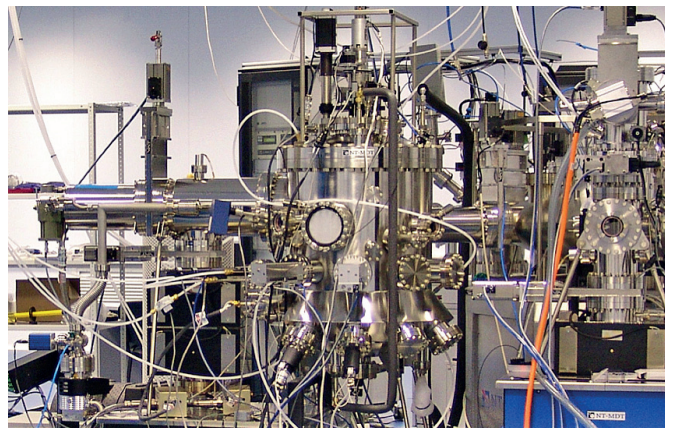


Рис.3. Модуль молекулярно-лучевой эпитаксии системы НАНОФАБ-100, предназначенный для формирования SiGe-гетероструктур

мелкосерийного производства схем низкой степени интеграции [23].

Требования к удешевлению технологий мелкосерийного производства, а также к снижению стоимости фото- и рентгеношаблонов стимулировали проведение ряда проектов, направленных на разработку высокопроизводительных систем электронной литографии. Компания Mapper Lithography предприняла попытку создания многолучевой системы электронной литографии с высокой производительностью и возможностью в перспективе управлять до 13 тыс. параллельными электронными пучками, причем так, чтобы каждый луч в заданный момент мог быть выведен из процесса экспонирования [24]. В 2011 году был создан опытный образец 110-лучевой системы, которая была установлена в компании TSMC. Сейчас испытывается 1200-лучевая система электронной литографии [24, 25, 26]. Многолучевые литографические системы представляют большой интерес для производителей микроэлектроники, но имеют ряд проблем, над решением которых работают специалисты компании.

Альтернативный вариант системы высокоэффективной электронной литографии – электронный литограф, имеющий не одну электронно-литографическую колонну, как обычно, а матрицу миниатюрных колонн. При этом возможно векторное сканирование, обеспечивающее, по сравнению с построчным сканированием, большую в $1/K_{\text{заполнения}}$ раз эффективность экспонирования, т.е. на порядок более высокую эффективность при коэффициенте заполнения 10% в случае, если время срабатывания бланкера не превышает 1 нс. Кроме того, литограф обеспечивает предварительную визуализацию объекта экспонирования. Это существенно облегчает и делает предсказуемым многократное экспонирование, необходимое при реализации бесшаблонных процессов изготовления СБИС.

Реализация литографического процесса требует применения модулей для:

- нанесения резистов (положительных резистов на основе полимерных материалов, которые, как правило, наносятся центрифугированием в условиях контролируемой атмосферы, и отрицательных резистов, осаждение и проявление которых возможно "сухими" методами в условиях высокого вакуума);
- плазменного травления;
- загрузки и очистки пластин.

Кластер бесшаблонной электронной литографии может стать основой технологических линий прототипирования и мелкосерийного производства наноСБИС. Подобная система сейчас разрабатывается по проекту Фонда перспективных исследований РФ (рис.4). Применение такого кластера позволит исключить из классического процесса литографии этап создания фотошаблонов, что значительно ускорит и удешевит проектирование микросхем и обеспечит рентабельность мелкосерийного производства СБИС. По своим характеристикам создающиеся в настоящее время установки многолучевой электронной литографии позволят начать в России технологические разработки микросхем с топологическими размерами 32-22 нм и при совершенствовании метода достичь к 2020 году уровня 8 нм.

Для реализации BEOL-процессов в дополнение к существующим модулям необходимы модули планаризации поверхности атомарной точности, а также модули ее отмычки и гомогенизации. В настоящее время используется технология химико-механической планаризации (ХМП) – прецизионная полировка поверхности с удалением возникающих после очередного процесса литографии нефункциональных слоев металла или диэлектрика с нарушениями механических и трибологических свойств. В результате ХМП шероховатость поверхности при 22-нм технологии составляет ~1 нм. Химико-механическая планаризация проводится в твердофазной системе, содержащей абразив и полировальный диск, с последующими этапами отмычки пластин от следов полировки. Высокие требования к финишной чистоте поверхности накладывают

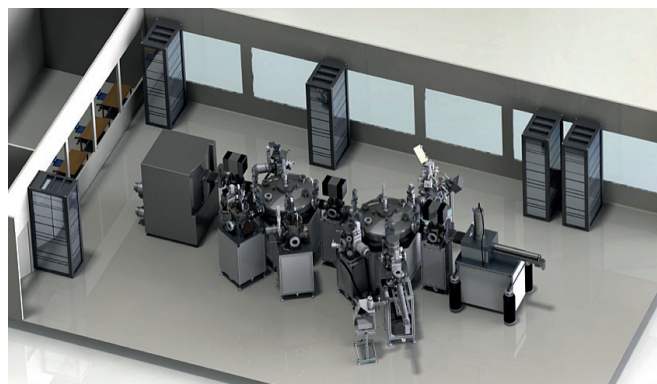


Рис.4. Модель модуля многолучевой электронной литографии, входящего в кластерную систему НАНОФАБ

чрезвычайно высокие требования и к используемой воде, очистка которой требует дорогой инфраструктуры, что оправдано на крупных производствах, но значительно удорожает мелкосерийное производство.

Предпринимался ряд попыток альтернативного решения проблемы планаризации путем ионной бомбардировки поверхности. При обработке поверхности ионным пучком под малыми углами планаризация проводящих поверхностей достигалась, но при ионной бомбардировке поверхности гетерогенной структуры, содержащей к тому же транзисторные структуры, возможен электрический пробой диэлектриков и накопление заряда в окислах. Гораздо более интересные результаты получены при использовании пучков кластерных ионов [27–33]. При адиабатическом вводе в вакуумный реактор газов через форсунки специальной формы наблюдается конденсация отдельных атомов с образованием кластеров (рис.5). Кластер может содержать несколько сотен атомов, и, если его ионизировать, например потоком электронов, он может ускоряться в электрическом поле до заданной энергии (обычно 1–40 кэВ). Атомы в таких кластерах (Ag, Xe, N₂, CH₄, CO₂, SF₆ и т.п.) связаны между собой только силами Ван-дер-Ваальса. Кластер устойчив, если из сотен его атомов ионизирован только один. В противном случае кулоновское отталкивание приведет к распаду кластера. При ударе о поверхность он распадется и атомы разлетятся по плоскости поверхности, что и приводит к ее планаризации (рис.6) [34]. Результаты планаризации карбида кремния, приведенные на рис.6, удается получить и для Si, SiO₂, Cu, Ta, Ta₂O₅ [34].

Механизм планаризации – не химический, поэтому в селективном выборе химического

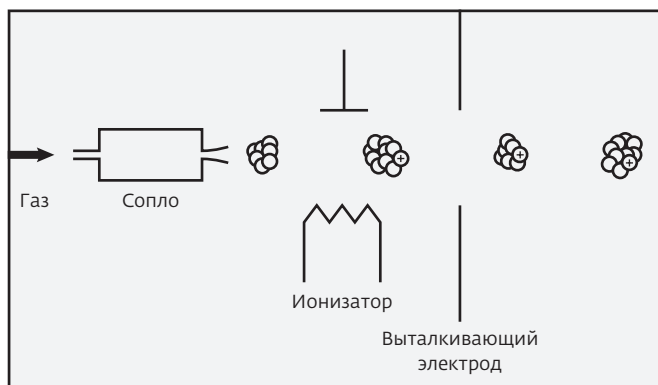


Рис.5. Принцип генерации кластерных ионов

состава газа нет необходимости. Можно ожидать сложностей только при планаризации гетерогенных структур, содержащих полимеры с сильно различающимися модулями Юнга. Развитие технологии обработки поверхности потоком Ван-дер-Ваальсовых кластеров, позволяющей получать атомарную точность, представляется исключительно важным для финишной очистки и планаризации на этапах FEOL и BEOL при мелкосерийном производстве наноСБИС.

Для контроля процессов производства помимо сканирующей зондовой микроскопии необходимы методы профилометрии с возможностью экспресс-анализа результатов обработки поверхностей и методы многозондового тестирования характеристик активных структур.

В зависимости от специализации технологическая линия для прототипирования и мелкосерийного производства элементной базы наноэлектроники может быть многосвязанной – состоять из нескольких кластерных систем с возможностью трансляции пластин между ними. Производственные линии можно специализировать под создание опытных образцов и производство различных типов изделий микро- и наноэлектроники, в том числе под диаметры пластин от 50 до 200 мм (рис.7). К таким кластерным технологическим линиям различного назначения, разработка которых может представлять интерес, относятся линии создания и мелкосерийного производства СБИС с проектными нормами от 32 нм для:

- кремниевой радиационно-стойкой наноэлектроники (диаметр пластин от 100 до 200 мм);
- кремниевой радиационно-стойкой наноэлектроники с адаптивными программируемыми интегральными схемами – нейроСБИС (диаметр пластин от 100 до 200 мм);

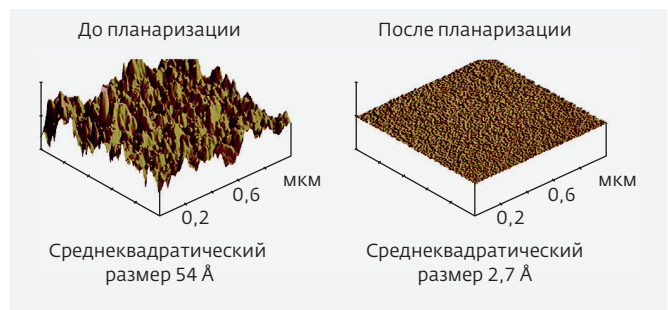


Рис.6. Изображение атомно-силового микроскопа поверхности SiC до (а) и после (б) обработки кластерными ионами Ag [34, 35]

- сверхпроводниковой нанoeлектроники (диаметр пластин 100 мм);
- СВЧ-нанoeлектроники миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн (диаметр пластин от 50 до 150 мм);
- нано-, био-, информационных и когнитивных технологий – НБИК-технологий (диаметр пластин 100 мм);
- СВЧ-акустоэлектроники (диаметр пластин от 50 до 150 мм);
- оптоэлектроники, микроволновой фотоники (диаметр пластин от 50 до 150 мм).

Для исследования технологических процессов эффективно использовать возможности таких центров синхротронного излучения, как НБИК-центр Курчатовского института и Центр высоких технологий ФГУП "НИИФП им. Ф.В.Лукина", где планируется разработка рабочих станций фотоэлектронной спектроскопии, EXAFS-спектроскопии, рефлексометрии, дифрактометрии, модуля СИ со стресс-анализатором. Интеграция станций в систему НАНОФАБ обеспечит возможность изучения технологических процессов формирования наноструктур, их контроль на уровне долей мономолекулярных слоев. Модернизация синхротронного комплекса позволит реализовать пространственную когерентность излучения и создать станции рентгеновской микроскопии высокого разрешения (лучше 5 нм), рентгеновской динамической микроскопии с пространственным разрешением лучше 20 нм и разрешением по времени лучше 0,1 нс, что обеспечит возможность разработки новых

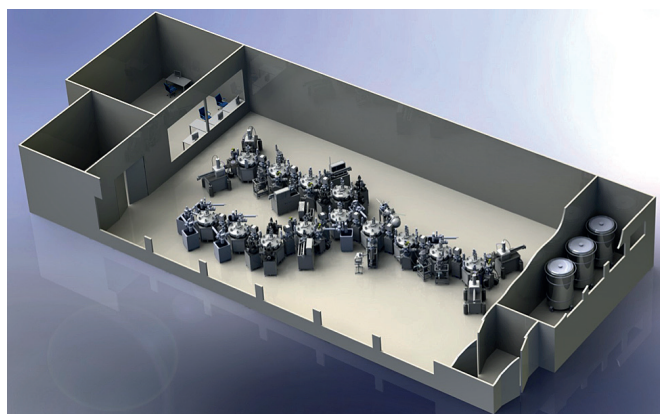


Рис.7. Макет кластерной технологической линии для разработок и мелкосерийного производства изделий нанoeлектроники

технологических процессов, необходимых для эффективного развития нанoeлектроники.

В настоящее время сложились реальные условия для качественного изменения уровня разработок элементной базы микроэлектроники для систем специального назначения с выводом ее на передовые мировые позиции. Использование бесшаблонных процессов литографии должно привести к существенному повышению темпов разработок, а внедрение методов финишной очистки и планаризации – к рентабельности мелкосерийного производства. Организация разработок технологических комплексов и технологий одновременно с интеграцией в мировую систему товаропроизводства обеспечит технологическую независимость России и приведет к значительному повышению уровня научных разработок с консолидацией научно-технического потенциала страны.

Авторы выражают искреннюю благодарность В.В.Аристову, Ю.И.Борисову, К.А.Валиеву, А.Л.Гудкову, В.В.Иванову, В.В.Казмируку, М.В.Ковальчуку, Г.Я.Красникову, В.А.Лабунову, А.А.Орликовскому, А.И.Сухопарову, Р.В.Харламову, В.С.Чернышу, А.С.Якунину, участвовавшим в разное время в обсуждении проектов по созданию кластерного оборудования, а также Фонду перспективных исследований, без финансовой поддержки которого создание полноценных нанотехнологических комплексов было бы проблематичным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Intel видит техническую возможность производства 10-нм кристаллов. – www.efind.ru/forum/showthread.php?t=45998
2. IBM carbon nanotube placement demonstration. – news.cnet.com/2300-11386_3-10014338-4.html
3. **Brown L.** IBM claims carbon nanotube chip development breakthrough. – www.techradar.com/news/computing-components/processors/ibm-claims-carbon-nanotube-chip-development-breakthrough-1109104
4. **Беленький Г.Л., Салаев Э.Ю., Сулейманов Р.А.** Деформационные явления в слоистых кристаллах. – УФН, 1988, т.55, вып.1, с.89-127.
5. Дорожная карта INTEL. – <http://newsroom.intel.com/docs/DOC-2032>
6. **Данилина Т.И., Кагадей В.А.** Технология СБИС. – Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2007.

7. **Коник Л.** Государственный электронизм. 2008. сентябрь. – www.comnews.ru/standart/article/52216, <http://www.zelenograd.ru/news/9237/>
8. **Борисов Ю., Калинин С., Немудров В.** Роль дизайн-центров микроэлектроники в развитии отечественной электронной промышленности. – Электронные компоненты, 2008, №10, www.spels.ru/index.php?option=com_docman&task=doc...
9. **Мелик-Адамян А.** Российские fabless-компании как двигатель отечественной микроэлектроники. – Электронные компоненты, 2007, №2.
10. В России будет создан новый дизайн-центр микроэлектроники "Т-Нано". – promwad.ru/news/10-07-2012-design-center-t-nano.html
11. Сайт компании Promwad. – www.promwad.ru
12. Цифровые радиостанции "Ангстрем" заменят военным мобильные телефоны. – www.rb.ru/article/angstrom-tsifrovye-radiostantsii-angstrom-zamenyat-voennym-mobilnye-telefony/6996247.html
13. **Быков В.А., Веревкин Д.В.** Многофункциональная система NANOFAB как базовый комплекс для проведения прецизионных исследовательских и технологических операций. – Материалы симпозиума "Нанофизика и Нанoeлектроника". Н.-Новгород, 25–29 марта 2005, с.206.
14. **Быков В.А., Атепалихин В.В., Быков А.В., Поляков В.В.** Нанотехнологические комплексы и их применение в нанoeлектронике. – Материалы симпозиума "Нанофизика и Нанoeлектроника". Н.-Новгород, 10–14 марта 2007, с.505–506.
15. **Агеев О.А., Быков В.А.** Технологическое оборудование для создания наносистемной техники. – НАНОтехнологии. Экология. Производство, ноябрь 2011, №5 (7).
16. **Быков В.А.** Кластерное технологическое оборудование для создания элементной базы нанoeлектроники. – Наноиндустрия, 2010, №6.
17. **Быков В.А.** Возможности кластерного оборудования для создания и исследования приборов нанoeлектроники. – Материалы симпозиума "Нанофизика и Нанoeлектроника – 2011". Н.-Новгород, март 2011.
18. **Быков В.А., Харламов Р.В.** Нейроморфные интегральные схемы для научного приборостроения. – Интеграл, 2011, №4, с.76–78.
19. **Быков В.А.** Патент 2308782, Россия. Нанотехнологический комплекс. Оpubл. 20.10.2007.
20. **Быков В.А.** Патент 2390070, Россия. Нанотехнологический комплекс на основе эпитаксиальных и ионных технологий. Оpubл. 20.05.2010.
21. **Rudenko K., Averkin S., Lukichev V. et al.** – Proc. of SPIE, 2005, v.6260.
22. **Lukichev V., Rudenko K., Orlikovsky A. et al.** – ИИТ-2008, – www.ftian.ru/works/work1/#5 (2013).
23. Электронно-лучевая литография. – m.portalnano.ru/read/tezaurus/definitions/electron_beam_lithography
24. **Орликовский А.А., Лукичев В.Ф., Руденко К.В.** Критические элементы нанотранзисторов: физика, технология, материалы. – Нанотехнологии и наноматериалы, 2010, №4 (54), www.portalnano.ru/read/sci/basic/orlikovskiy
25. Mapper technology. – www.mapperlithography.com/technology/mapper-technology
26. РОСНАНО инвестирует в безмасочную литографию с разрешением до 10 нм. – www.nanonewsnet.ru/blog/nikst/rosnano-investiruet-v-bezmasochnyu-litografiyu-s-razresheniem-do-10-nm#comment-10040
27. **Lin B.** Future of multiple-e-beam direct-write systems. – Proceedings of SPIE, Advanced Lithography 2012, Feb. 12–16, 2012, San Jose, California, USA.
28. **Андреев А.А., Ермаков Ю.А., Патрикеев А.С., Черныш В.С.** Применение газовых кластерных ионов в нанотехнологии. – "Нанотехнологии: разработка, применение". 2009, №1, т.1.
29. **Востриков А.А., Куснер Ю.С., Ребров А.К., Семячкин Б.Е.** Получение интенсивного молекулярного пучка CO₂ газодинамическим методом. – ЖПМТФ, 1975, №2, с.34.
30. **Vostrikov A.A., Mironov S.G., Rebrov A.K., Semyachkin B.E.** Molecular clusters: formation in free expansion and with vibrational energy pumping; cluster – surface interaction. – Surf. Sci., 1981, v.106, p.212.
31. **Востриков А.А., Дубов Д.Ю., Самойлов И.В.** Масс-спектрометрические наблюдения малых кластеров азота. – ЖТФ, 1994, т.64, с.120.
32. **Toyoda N., Matsuo J., Yamada I.** Surface modification with gas cluster ion beams from fundamental characteristics to applications. – Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B, 2004, v.216, p.379.
33. **Yamada I.** A short review of ionized cluster beam technology. – Nucl.Instr. and Meth. In Phys. Res. B, 1995, v.99, p.240.
34. **Yamada I., Toyoda N.** Recent advances in R&D of gas cluster ion beam processes and equipment. – Conference: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2005
35. **Insepov Z., Swanson D., Kirkpatrick A., Hassanein A.** Field evaporation and GCIB processing of electrodes. – www.mice.iit.edu/rfworkshop/insepov.pdf