

ЦЕНТР ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ ФГУП "НИИФП им. Ф.В.ЛУКИНА": ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИКРО- И НАНОСТРУКТУР

В.Быков, д.т.н. vbykov@ntmdt.ru; А.Гудков, к.ф.-м.н. gudkov@niifp.ru;
А.Козлитин, к.ф.-м.н.

Современные тенденции развития микро- и наноэлектроники остро ставят проблему обеспечения технологической независимости России в секторах создания и производства элементной базы специального назначения с проектными нормами 32–8 нм. Анализ этой проблемы показывает, что в настоящее время высокие затраты на перевод крупномасштабных производств приборов микроэлектроники на топологические нормы 22 нм привели к тому, что только пять компаний США, Тайваня и Южной Кореи стали производителями микросхем этого уровня. При этом в развитых странах многочисленные предприятия, разрабатывающие и производящие элементную базу высшего уровня, в том числе и в России, перешли на режим *fables*. Их деятельность сводится к проектированию и передаче документации на завод – производитель кристаллов, а затем получению от него обработанных пластин с кристаллами или готовых микросхем для тестирования, корпусирования и передаче заказчикам или использованию чипов в своей производственной цепочке [1–4]. При сохранении этой тенденции производить микросхемы топологического уровня 8 нм смогут только одна-две компании на территории США. Это ставит в абсолютную технологическую зависимость разработчиков современной микроэлектроники, в том числе и российские предприятия, производящие конкурентоспособную продукцию как гражданского, так и оборонного назначения. Для массового производства элементной базы и ее широкого применения, когда объемы заказов исчисляются миллионами чипов, это совершенно нормально. Однако существует и иной многочисленный сектор потребления – специализированные электронные устройства. Учитывая сложившуюся ситуацию, не только увеличиваются риски в отношении сроков изготовления специализированных микросхем, но и возникает прямая угроза блокирования заказа на их производство. Одно из решений этой проблемы – создание собственных ФАБов, производящих изделия микро- и наноэлектроники, но это весьма дорогостоящий путь с плохо прогнозируемым рынком.

Массовое производство СБИС с топологическими нормами 22 нм сегодня в мире обеспечивают только несколько предприятий, так называемые ФАБы. Стоимость каждого составляет 6–8 млрд. долл., а производительность – ~1000 пластин диаметром 300 мм в сутки вполне достаточна, чтобы закрыть потребности рынка широкого потребления. Разработку технологий

с топологическими нормами 14 нм и менее интенсивно ведут компании Intel, Samsung, GlobalFoundries, TSMC. Для успешного продвижения по составленным ими дорожным картам инвестируются миллиарды долларов в разработку оборудования, материалов и технологий, в метрологическое обеспечение, научные исследования. Темпы, которыми ведутся работы, исключительно высокие. Таким образом, 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 электронной продукции исключительно сложен [5].

В случае, когда ФАБ не расположен на территориях России или СНГ, создавать интегральные схемы с топологическими нормами 45, 32 и 22 нм для специальных применений в режиме fabless исключительно сложно. Далее за проектными нормами 22 нм следуют нормы 14, 10, 8 нм, и вряд ли здесь развитие технологии остановится – появятся трехмерная, молекулярная и атомарная электроника. Именно поэтому представляется крайне интересным рассмотреть возможность организации гибких мелкосерийных производств в России.

СОВРЕМЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

Мелко- и среднесерийные производства элементной базы микро- и нанoeлектроники с невысокими издержками, которые могут быть обеспечены применением специализированных технологических комплексов, интересны не только для российских разработчиков, но и для дизайн-центров, число которых исчисляется многими сотнями. Последнее обстоятельство оправдывает и экспортную направленность создаваемой продукции, что, в свою очередь, позволяет позиционировать создаваемый бизнес на рынке IPO, привлекая инвестиции для его развития с открытых рынков.

Кроме того, технологические линии мелко- и среднесерийного производств со специализированными технологическими комплексами позволят решить основную проблему приоритетного направления развития отрасли – создание технических и технологических средств, обеспечивающих разработку и производство специализированных интегральных схем на основе современной элементной базы нанoeлектроники и МЭМС. Развитие методов высокопроизводительной электронной литографии, бесшаблонной высокоразрешающей литографии, технологий формирования структур атомарной точности, аналитических методов с высоким разрешением, в том числе с использованием синхротронного излучения, обеспечит создание требуемых технологических линий и их развитие под проектные нормы нанометрового диапазона.

Благодаря организации бизнес-структур, интегрированных с сетью уже существующих компаний России, Европы, США, Юго-Восточной Азии,

появляется возможность инсталляции в течение трех-четырёх лет первых технологических линий с привлечением инвестиций с открытого рынка (IPO) на третьем году развития бизнеса. При этом появляется возможность как преодоления технологической зависимости российского сектора ИС спецприменений, так и выхода на мировой рынок технологий и технологического оборудования нанoeлектроники без прямой конкуренции с крупномасштабными производителями электронной элементной базы широкого применения. Ориентировочные начальные инвестиции (до выхода на рынок IPO) оцениваются в 9–10 млрд. руб.

С 2005 года в России ведутся разработки по созданию комплексов для выполнения специализированных нанотехнологических и аналитических исследований, основное назначение которых – экспериментальное моделирование элементов и систем с низкой степенью интеграции, а также разработка отдельных технологических процессов [6–13]. Созданные комплексы позволяют экспериментально моделировать отдельные элементы нанoeлектроники, но не обладают достаточной производительностью для изготовления схем с высокой степенью интеграции.

Пример таких комплексов – НАНОФАБ-100, которые представляют собой связанные кластерные системы по обработке полупроводниковых пластин диаметром до 100 мм. Каждый кластер имеет шесть портов, к которым могут быть пристыкованы требуемые технологические или аналитические модули. Кластеры могут быть объединены в единую технологическую систему через транспортные модули передачи, переворота и складирования пластин. Наличие модулей передачи подложек с устройствами переворота обеспечивает возможность проведения сложных технологических циклов с включением групповых и нанолакальных процессов. Перемещение пластин и выполнение технологических операций осуществляется по заданной программе с объединенного центра управления технологическим маршрутом. Гибкость и большие возможности НАНОФАБ-100 реализуются за счет кластерной компоновочной схемы. Связь между образующими кластер функционально объединенными технологическими модулями осуществляется с помощью сверхвысоковакуумного радиального робота-раздатчика. Таким образом, полностью исключается не только контакт оператора с пластиной, но и внешний транспорт пластин в кассетах от одной технологической операции к другой.

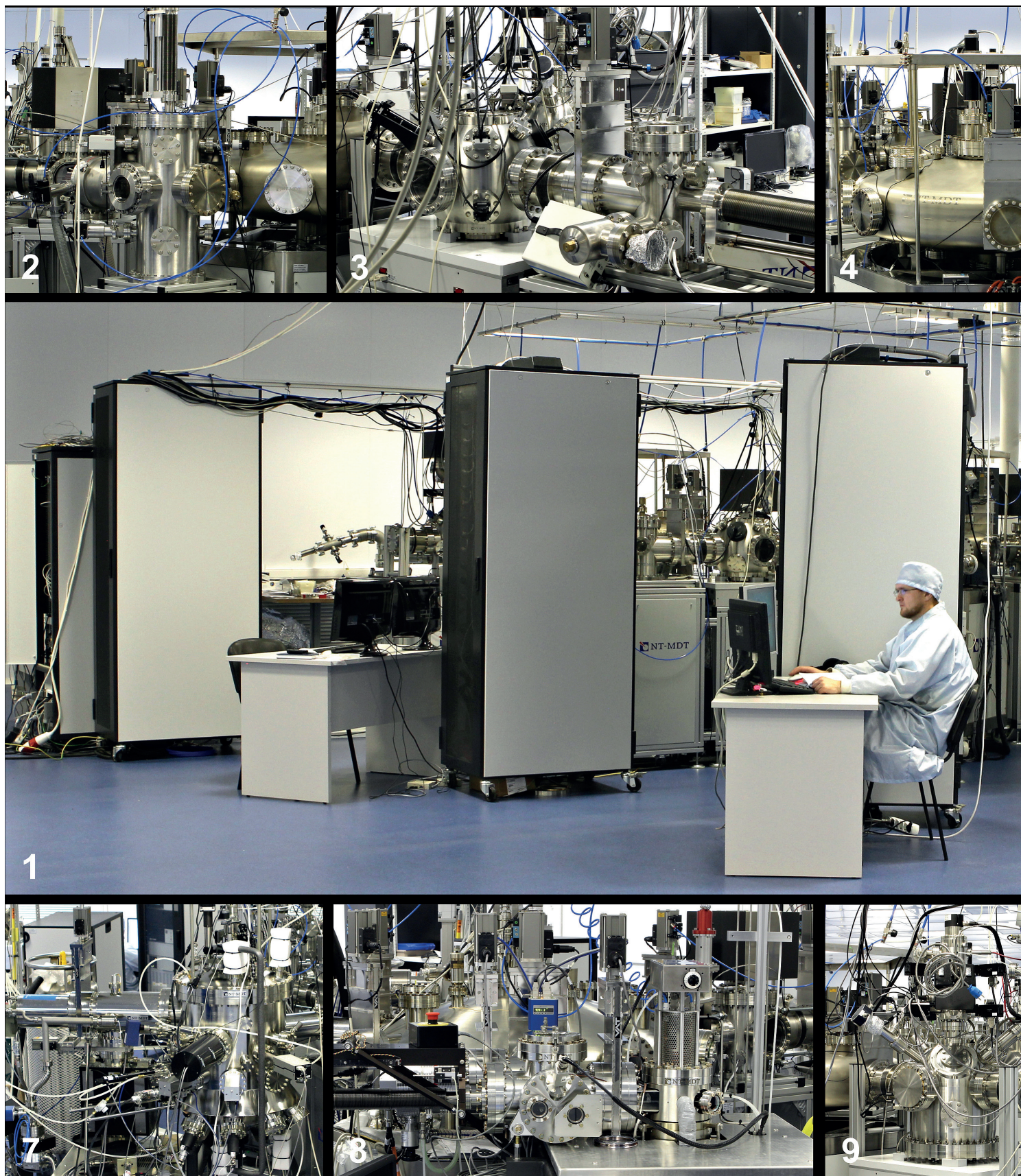
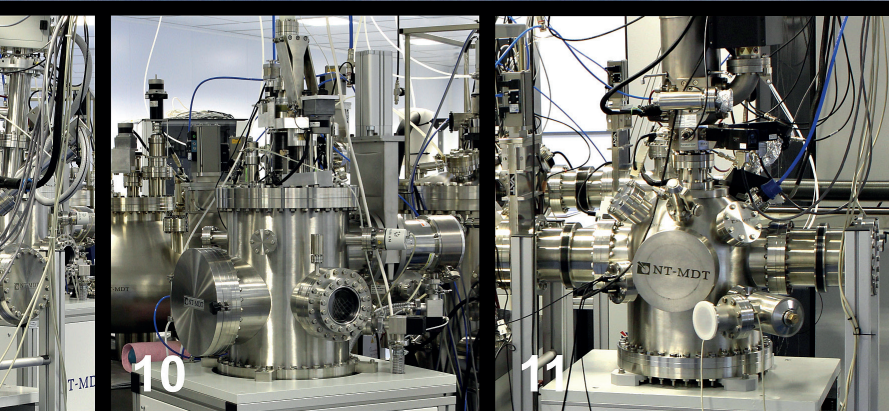
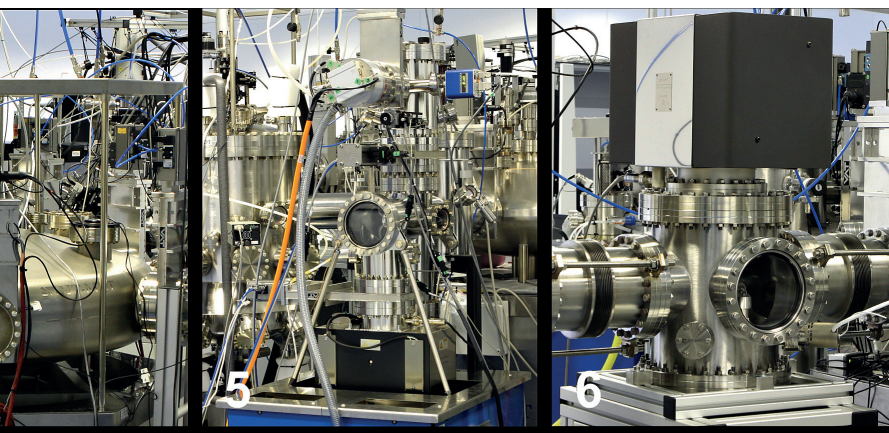


Рис.1. НАНОФАБ-100



Это обеспечивает минимальное время межоперационной передачи пластин и совершенно необходимую в нанотехнологии атомарную чистоту поверхности. Чистота поверхности особенно важна при выполнении процессов FEOL (Front End Of Line – изготовление активной части приборов), формирующих систему активных элементов, или BEOL-процессов (Back End Of Line – изготовление многоуровневой разводки) при разработке и производстве нейроморфных интегральных схем с использованием эффекта мемристивности в сложных окислах (TiO_x , TaO_x , VO_x , ZrO_x ,...).

Развитая транспортная система с модулями межоперационного хранения подложек позволяет в одном кластерном технологическом комплексе (КТК) НАНОФАБ-100 параллельно проводить несколько технологических циклов с загрузкой процессов не менее чем на 50%. Помимо технологических модулей в состав НАНОФАБ-100 могут входить контрольно-измерительные, аналитические модули, модули структурного анализа и т.п. Модули платформы НАНОФАБ-100 могут функционировать как в составе КТК, так и автономно, в отдельных случаях с использованием вспомогательных загрузочных устройств или модулей загрузки.

К настоящему времени для систем НАНОФАБ-100 разработаны модули групповой обработки, позволяющие выполнять различные технологические процессы: молекулярно-лучевую эпитаксию пленок AlGaAs, GaN и SiGe; плазмохимическое травление и очистку пластин, плазмохимическое осаждение из газовой фазы, импульсное лазерное осаждение диэлектриков, магнетронное распыление и атомно-слоевое осаждение. В комплекс НАНОФАБ-100 также входят аналитические модули и модули локальной обработки пластин.

Сейчас комплексами такого типа оснащены участки нанотехнологии Курчатовского института, Южного федерального университета, Тюменского государственного университета, Самарского государственного аэрокосмического университета им. акад. С.П.Королева,

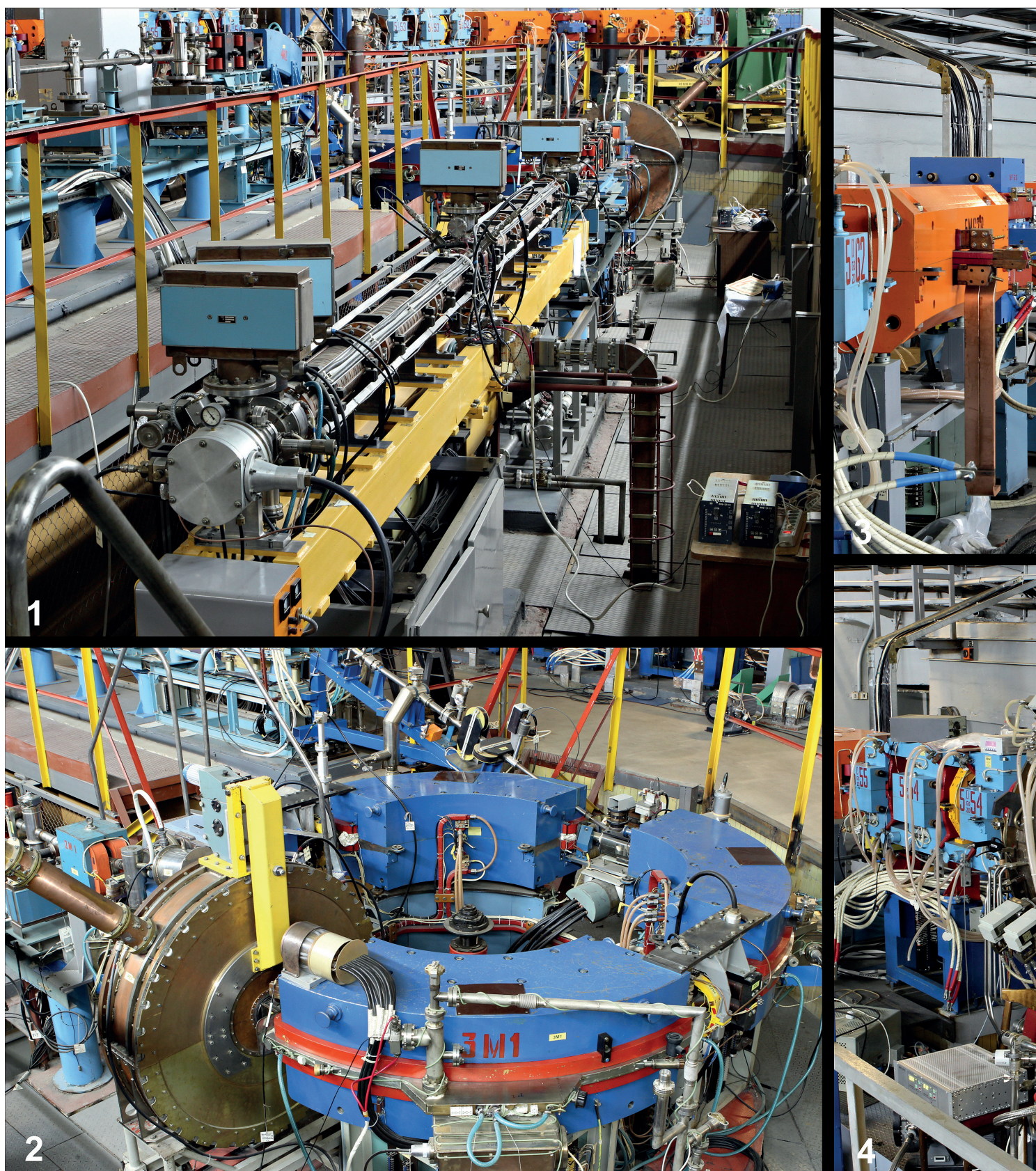
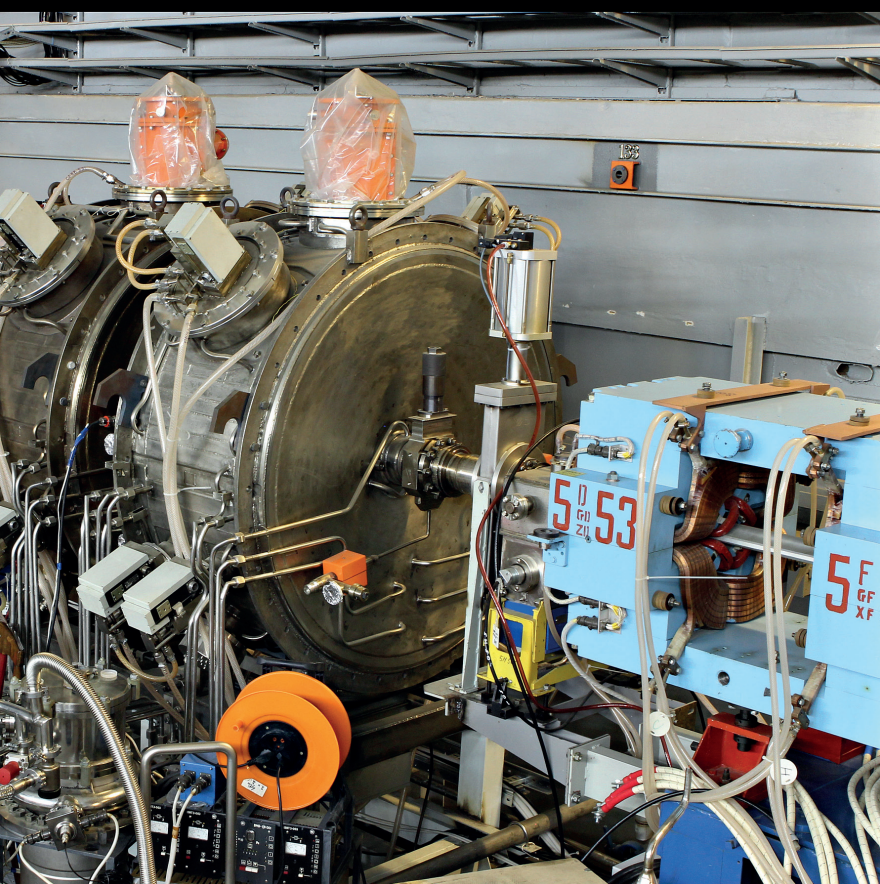
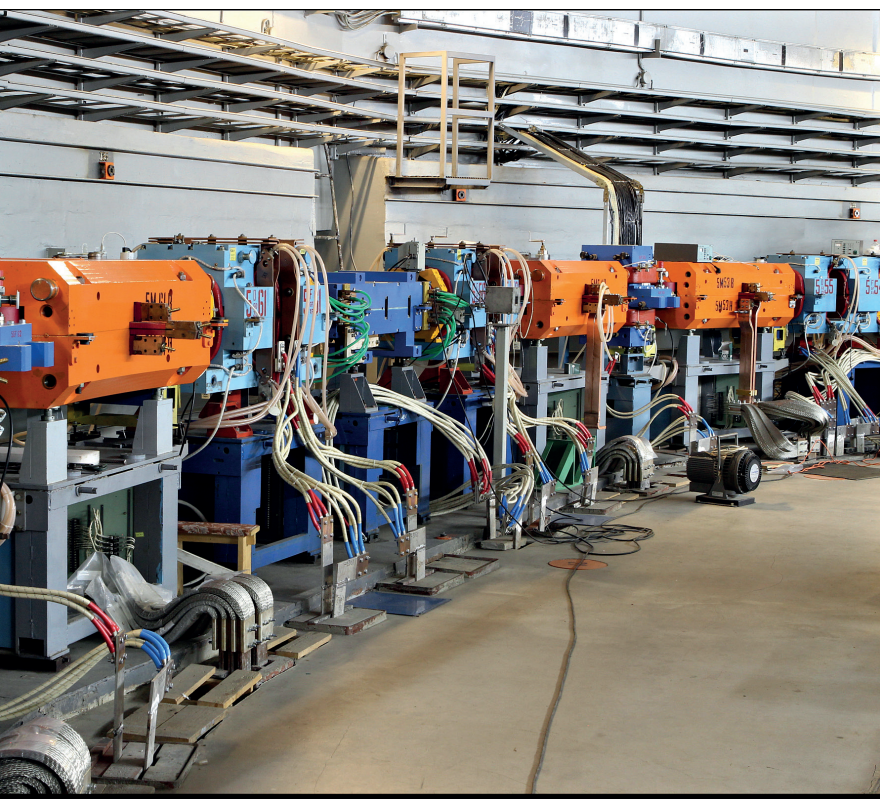


Рис.3. Синхротрон "Зеленоград": линейный ускоритель (1); малый накопитель (2); большой накопитель (3); высокочастотный резонатор (4)



Московского Государственного технического университета им. Н.Э.Баумана, Национального исследовательского университета "МИЭТ", Санкт-Петербургского Государственного политехнического университета, НОЦ "Нанотехнологии" МЭИ, украинского ЗАО "Научно-производственный концерн "Наука" (Киев), Уральского федерального университета им. Б.Н.Ельцина, Национального исследовательского технологического университета "МИСиС", Центра высоких технологий (ЦВТ) ФГУП "НИИФП им. Ф.В.Лукина".

В состав комплекса НАНОФАБ-100 (рис.1, поз.1), размещенного на технологических площадях ФГУП "НИИФП им. Ф.В.Лукина", входят следующие модули и системы (рис.1, поз.2-11):

- (2) - модуль кассетной загрузки образцов;
- (3) - сверхвысоковакуумный модуль сканирующего зондового микроскопа;
- (4) - транспортный модуль карусельного типа;
- (5) - модуль предварительной подготовки пластин с нагревом и окислением;
- (6) - модуль переворота пластин и межоперационного хранения;
- (7) - модуль эпитаксиального выращивания гетероструктур в сверхвысоком вакууме;
- (8) - модуль осаждения атомных слоев;
- (9) - модуль нанолокальной имплантации фокусированными ионными пучками в сверхвысоком вакууме и система вторично-ионной масс-спектропии;
- (10) - модуль магнетронного распыления;
- (11) - сверхвысоковакуумная система электронно-лучевой литографии высокого разрешения - e-LITHOУHV 100.

НАНОФАБ-100 предназначен для выполнения технологических процессов внутри полного цикла изготовления специализированных ИС. КТК не является законченной технологической системой и может быть дополнен необходимыми модулями в зависимости от создаваемых изделий. Кроме того, НАНОФАБ-100 является прототипом будущего кластерного технологического комплекса НАНОФАБ-200, рассчитанного на обработку пластин диаметром до 200 мм.

ЦЕНТР ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

В соответствии с ФЦП "Развитие инфраструктуры наноиндустрии в Российской Федерации на 2008–2011 годы" (приложение 5, п.5) и на основании распоряжения Правительства РФ от 08.02.2007 г. №146-Р во ФГУП "НИИФП им. Ф.В.Лукина" на базе инженерно-производственного комплекса с синхротроном "Зеленоград" был создан Центр высоких технологий (ЦВТ). В состав ЦВТ вошли: отдел нанотехнологий с аналитико-технологическим комплексом НАНОФАБ-100, Центр коллективного пользования (ЦКП) и физико-технический отдел с накопителем релятивистских электронов – синхротроном "Зеленоград". К настоящему времени синхротрон "Зеленоград" смонтирован в соответствии с исходной проектной документацией. Однако для удовлетворения возросших потребностей современной наноиндустрии необходимо провести модернизацию комплекса, а для его эксплуатации – обеспечить мощностью не менее 20 МВт.

Стратегическая цель ФГУП "НИИФП им. Ф.В.Лукина" – развитие элементной базы нанoeлектроники, МЭМС и НЭМС, ориентированной на конечные инновационные продукты. Работы проводятся по следующим направлениям:

- создание перспективной элементной базы нанoeлектроники: полупроводниковой, сверхпроводниковой, спинтроники, одноэлектроники, акустоэлектроники, графеновой электроники и оптоэлектроники с проектными нормами 32–8 нм;
- разработка перспективной элементной базы МЭМС, МОЭМС и НЭМС;
- развитие нового направления электронной компонентной базы, объединяющей МЭМС, нанoeлектронику и физические эффекты;
- ориентация предприятия на решение текущих задач по развитию нанотехнологий и радиоэлектроники, включая оказание



Рис.2. Основные документы аккредитации на техническую компетентность испытательного Центра нанопродукции

услуг и проведение совместных исследований перспективных материалов и элементов нанoeлектроники с проектными нормами 90–32 нм для ОАО "НИИМЭ и завод Микрон", ОАО "Ангстрем" и других предприятий Минпромторга России.

Очевидно, для выполнения задач ЦВТ и организации мелко- и среднесерийного производства элементной базы нанoeлектроники необходимы современная технологическая база и разнообразные аналитические средства исследования и контроля линейных размеров элементов и структур в нанометровом диапазоне. Должны применяться методы измерения концентрации основных химических элементов и примесей материалов

и наногетероструктур, а также методы структурного анализа материалов и границ раздела наногетероструктур. Многие из указанных методов уже имеются в отделе нанотехнологий, ЦКП и в физико-техническом отделе ЦВТ ФГУП "НИИФП им. Ф.В.Лукина".

Отдел нанотехнологий расположен во вновь построенной чистой технологической зоне ФГУП "НИИФП им. Ф.В.Лукина", в которой находится специализированная технологическая линия для выполнения замкнутых процессов на основе КТК НАНОФАБ-100. Исследование и контроль произведенных микро- и наноструктур проводятся методами и средствами ЦКП, где в основном сосредоточены оптические, электронно-лучевые, ионно-лучевые и другие аналитические средства, используемые в микро- и нанотехнологиях при испытании продукции nanoиндустрии. Это системы:

- оптической микроскопии;
- растровой электронной микроскопии;
- атомно-силовой микроскопии;
- просвечивающей электронной микроскопии;
- рентгеновской спектроскопии;
- вторично-ионной масс-спектроскопии;
- электронной оже-спектроскопии;
- ИК-спектроскопии.

За время работы ЦКП с 2004 года накоплен значительный исследовательский опыт при выполнении разнообразных услуг, НИОКР института и сторонних организаций [14].

Проведение НИОКР, измерение различных параметров микро- и наноструктур невозможно без метрологического обеспечения. Роль метрологии в нанoeлектронике чрезвычайно велика и растет год от года. В связи с этим в ЦКП создан отраслевой испытательный Центр nanoпродукции, аккредитованный на техническую компетентность. Получены аттестат аккредитации РОСС RU.0001.22 НН 04 № 002973 от 23 ноября 2009 г. и аттестат аккредитации на право проведения калибровочных работ № 001221 от 10 ноября 2009 г. Область аккредитации включает микро-схемы и средства их измерений, микро-схемы и полуфабрикаты на основе кремния, микро-схемы и полуфабрикаты на основе тройных полупроводниковых соединений. Расширить область аккредитации удалось за счет:

- разработки и аттестации принципиально новых методик измерения элементного состава и примесей наноструктур;
- разработки и утверждения в территориальных метрологических центрах методик калибровки;

- разработки, изготовления и аттестации стандартных образцов приборов на основе кремния и тройных полупроводниковых соединений;
- введения нестандартного измерительного аналитического оборудования в Госреестр с последующей его поверкой, что особенно важно при проведении ОКР (рис.2).

Методы измерения размеров и концентраций, имеющиеся в ЦКП, практически перекрывают весь диапазон линейных размеров от единиц ангстрем до десятков микрометров и концентраций как основных элементов, так и примесей, но только отчасти предоставляют данные структурного анализа. Эту проблему и проблему рентгеновской литографии призван решать физико-технический отдел.

Физико-технический отдел имеет в своем распоряжении уникальный инструмент – синхротрон "Зеленоград", разработанный в ИЯФ СО РАН. Он является специализированным источником синхротронного излучения (СИ), предназначенным для решения задач микро- и нанотехнологий и проведения аналитических исследований в диапазоне длин волн 0,01 нм – 1 мкм (энергия фотонов 100 кэВ – 1 эВ). Магнитная структура накопителя оптимизирована для получения интенсивных потоков фотонов высокой яркости как из поворотных магнитов, так и из специализированных устройств генерации излучения – вигглеров и ондуляторов.

Источник синхротронного излучения "Зеленоград" построен по классической схеме источников второго поколения, таких как ANKA, BESSY-2 и др. Электроны с энергией 40 кэВ, вылетающая из электронной пушки, пролетают линейный ускоритель и ускоряются до энергии 80 МэВ (рис.3а). Затем они проходят электронно-оптический канал и попадают в малый накопитель (рис.3б), где за время нескольких выстрелов происходит накопление электронов, приходящих из линейного ускорителя, и ускорение накопленного пучка до энергии 450 МэВ. После ускорения в малом накопителе пучок электронов пролетает по электронно-оптическому каналу и попадает в большой накопитель (рис.3в). Здесь процессы накопления и ускорения происходят аналогично процессам в малом накопителе. Рабочая энергия в большом накопителе поднимается до 2 ГэВ. Один из наиболее важных элементов большого накопителя, отвечающий за энергетическое состояние электронных сгустков, – высокочастотный резонатор (рис.3г).

Особенность синхротронного комплекса "Зеленоград" – наличие богатой инфраструктуры, обеспечивающей его эффективное использование для выполнения аналитических и технологических задач. Синхротрон расположен в инженерно-производственном корпусе, занимающем 2,5 тыс. м² уникальной по своим характеристикам технологической площади, предназначенной для размещения 37 каналов вывода СИ и конечных технологических, метрологических, аналитических и испытательных станций, а также дополнительного технологического оборудования для выполнения замкнутых технологических процессов изготовления нанопродукции и изделий микромеханики.

Ввод в эксплуатацию синхротрона значительно расширит аналитические, технологические и метрологические возможности ЦВТ. В частности, использование синхротрона "Зеленоград" обеспечит эффективную разработку технологий мелкосерийного производства и методов сертификации наноизделий, функциональность которых в основном определяется функциональностью периодических структур нанообъектов. Использование СИ позволит в полной мере реализовать методы рентгеновской литографии [15] при производстве большей части гибридных и негибридных МЭМС/НЭМС-изделий.

* * *

Подводя итоги, можно констатировать, что во ФГУП "НИИФП им. Ф.В.Лукина" создается современный аналитико-технологический центр, пригодный для реализации перспективных нанотехнологий, необходимых для создания радиационно-стойкой элементной базы, элементной базы СВЧ-нанoeлектроники, сверхпроводниковой электроники, оптоэлектроники, акустоэлектроники, нейроморфной элементной базы, а также для создания "интеллектуальных" устройств специального назначения и обеспечения мелко- и среднесерийного производств элементной базы нанoeлектроники специального назначения с проектными нормами 32–8 нм.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Коник Л.** Государственный электронизм. – www.comnews.ru/standart/article/52216
2. **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...
3. **Мелик-Адамян А.** Российские fabless-компании как двигатель отечественной микроэлектроники. – *Электронные компоненты*, 2007, №2.
4. В России будет создан новый дизайн-центр микроэлектроники "Т-Нано" – promwad.ru/news/10-07-2012-design-center-t-nano.html
5. Сайт компании Promwad – www.promwad.ru
6. **Быков В.А., Веревкин Д.В.** Многофункциональная система NANOFAV как базовый комплекс для проведения прецизионных исследовательских и технологических операций. – *Материалы симпозиума "Нанофизика и Нанoeлектроника"*, 25–29 марта в Нижнем Новгороде, 2005, с.206.
7. **Быков В.А., Атепалихин В.В., Быков А.В., Поляков В.В.** Нанотехнологические комплексы и их применение в нанoeлектронике. – *Материалы симпозиума "Нанофизика и Нанoeлектроника"*, 10–14 марта в Нижнем Новгороде, 2007, с.505–506.
8. **Агеев О.А., Быков В.А.** Технологическое оборудование для создания наносистемной техники. – *НАНОтехнологии. Экология. Производство*, 2011, №5 (7).
9. **Быков В.А.** Кластерное технологическое оборудование для создания элементной базы нанoeлектроники. – *"Наноиндустрия"*, 2010, №6.
10. **Быков В.А.** Возможности кластерного оборудования для создания и исследования приборов нанoeлектроники. – *Материалы симпозиума "Нанофизика и Нанoeлектроника"*, 14–18 марта в Нижнем Новгороде, 2011.
11. **Быков В.А., Харламов Р.В.** Нейроморфные интегральные схемы для научного приборостроения. – *"Интеграл"*, 2011, №4, с.76–78.
12. Патент RU2308782, 20.10.2007. Нанотехнологический комплекс./Быков В.А.
13. Патент №2390070, 20.05.2010. Нанотехнологический комплекс на основе эпитаксиальных и ионных технологий./Быков В.А.
14. Сайт Центра коллективного пользования "Синхротрон" – www.ckp.su
15. **Гудков А.Л., Матвеев В.М., Ушаков В.А.** Перспективы развития рентгенолитографии на базе синхротрона "Зеленоград" в производстве изделий нанoeлектроники и микросистемной техники. – *Материалы XI отраслевой научно-практической конференции "Состояние и перспективы развития отечественной микроэлектроники"*. – Новосибирск, 2012, с.249–259.