ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМ БЕСШАБЛОННОЙ ЛИТОГРАФИИ

Быков В.А.,[1] Борисов К.Ю.,[2] Быков Ал.В.,[1] Быков Ан.В.,[1] Котов В.В.,[3] Шиллер В.А.,[4]
[1]Группа предприятий «НТ-МДТ», [2]ФГУП «НИИФП им. Ф.В.Лукина», [3]ФГУП «Прогресс», [4]НТЦ «МОДУЛЬ» (Зеленоград – Москва)

Аннотация. В статье изложен подход к созданию кластерных комплексов замкнутого цикла для разработки и мелкосерийного производства БИС и СБИС микро- и наноэлектроники с использованием систем бесшаблонной высокопроизводительной многолучевой электронной литографии. «Гибкость» и адаптивность технологической линии под заданный тип технологического процесса обусловлена модульной конструкцией линии, объединенной единой, сверхвысоковакуумной транспортной системой. Кроме технологических кластеров, технологическая линия может содержать метрологические и аналитические модули, модули коррекции топологии.

Abstract. Conceptual and design approach to cluster type closed cycle production lines for LSI and VLSI development and small-scale manufacturing using high-productivity maskless multi-beam electron lithography systems is described. Flexibility and adaptability of production line to particular technological process are achieved by modular arrangement of the production line via ultra high vacuum wafer transfer system. Beside technological clusters, production line may include metrological and analytical modules as well as topology correction tools.

Ключевые слова: нанотехнология, наноэлектроника, микроэлектроника, многолучевая электронная литография, молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ, MBE), атомно-слоевое осаждение (АСО, ALD), КМОП, FinFET, мемристор, быстрый термический отжиг, магнетронное напыление, импульсное лазерное осаждение (PLD), технологии атомарной точности, сканирующая зондовая микроскопия, МЕМС, НЭМС, НАНОФАБ.

Keywords: nanotechnology, nanoelectronics, microelectronics, multi-beam lithography, MBE, ALD, CMOS, FinFET, memristor, rapid thermal annealing, magnetron sputter deposition, PLD, atomic resolution technology, scanning probe microscopy, MEMS, NEMS, NANOFAB.

Введение. Коренное противоречие между потребностями приборо-строения и тенденцией развития микроэлектронных производств заключается в том, что приборостроение тяготеет к специализации элементной базы, а микроэлектроника ориентирована на широкий рынок и требует унификации элементной базы. Создание всё более сложных и всё более разнообразных приборов требует всё более сложных и всё более специализированных производств, необходимых в малых количествах, под разрабатываемую аппаратуру СБИС, зачастую, всего по несколько десятков штук (!), тогда как удорожание микроэлектронных технологий, необходимых для изготовления столь сложных СБИС, экономически оправдывается лишь массовой продукцией.

Удовлетворение реальных потребностей приборостроения требует поиска приемлемых в экономическом и техническом смысле решений. Одним из вариантов решения этой проблемы является 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 в стадию практического применения. Над созданием базового оборудования для таких линий работает сегодня целый ряд компаний: Multibeam Corp.(США), CRESTEC Corp (Япония), Mapper Lithography Co. (Голландия) и IMS Nanofabricacion AG (Австрия). Первые образцы оборудования фирмы Mapper Lithography Co. уже поставлены TSMC (Тайвань) – одному из крупнейших мировых производителей чипов.

Ключевые решения, обеспечивающие создание технологических линий прототипирования (изготовление единичных образцов и мелких серий), СБИС: бесшаблонная (безмасковая) многолучевая электронная литография; индивидуальная обработка единичных пластин; выполнение нескольких смежных технологических операций в одной многооперационной единице оборудования без перегрузки обрабатываемой пластины; транспортная связность многооперационных единиц оборудования в **технологический кластер,** выполняющий 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 для них и эксплуатационных расходов на расходные материалы, 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 20 века) микроэлектроника стала для своего развития и существования требовать технологии с субмикронными и нанометровыми конструктивно-технологическими ограничениями, т.е. – нанотехнологии. В особенности, после того как были изобретены КМОП транзисторы, логика и память на них. Толщины подзатворных диэлектриков, резистов, точности совмещения при проведении последовательностей литографических процессов – все это потребовало введения элипсометрического контроля, применения все более высокоразрешающих оптических и электронных микроскопов. Именно по этому, в 1974 году с момента появления термина «нанотехнология», Норио Танигучи (он и был первым, кто ввел термин «Нанотехнология») отметил, что: «Нанотехнология просматривается, в частности, важной и немедленно востребованной в таких областях, как материаловедение, машиностроение, оптика и ЭЛЕКТРОНИКА». И это действительно так. Технологии микроэлектроники непосредственно относятся к нанотехноло-

гиям и шаг за шагом, в особенности , когда конструктивно-технологические ограничения достигли уровней 90, 65, 45 , 32, 22, 14, а сегодня в разработках уже и 8 нм, они уже сегодня требуют технологий атомной точности [25].

Последние исследования компании Intel показали [25], что иммерсионная литография сохраняет свою эффективность и для процессов 14 нм (используется двойное экспонирование) и даже для процессов 10 нм (используется четырехкратное экспонирование). Тем не менее продолжаются инвестиции, правда несколько меньшими темпами в разработку литографии экстремального ультрафиолета. В разработку проектных норм 14-8 нм и менее копания Intel совместно с компанией ASML в 2012 году инвестировала 4,1 млрд. долларов.

Наноэлектроника – электроника базирующаяся на нанотехнологиях, технологиях атомной точности. Элементная база наноэлектроники это приборы, функциональные свойства которых определяются размерными эффектами, в том числе, квантоворазмерными. Это: 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); субтеррагерцовые и террагерцовые нелинейные элементы; приборы на квантовых точках и квантовых ямах; ФинФЕТы, активные элементы на квазидвумерных материалах (графен, германены, MoS2, BN, GaSe, GaTe, GaS, GaTe, InSe и т.п. [3]); мемристоры; приборы на спин-коррелированых эффектах (СПИНТРОНИКА); активные элементы на квазиодномерных материалах (нанотрубки), что можно считать началом элементной базы молекулярной электроники. К настоящему времени уже сделаны первые лабораторные образцы чипов с 10000 транзисторами, телом которых являются углеродные нанотрубки [26]. Сегодняшний уровень развития технологий микроэлектроники уже обеспечивает возможность изготовления СБИС памяти с топологическими нормами 22 нм. К 2014 году эта величина должна составить 14 (при этом физическая длина затвора для микропроцессорных интегральных схем сотавляет 6 нм), а к 2015 – 16 годам – 8 – 10 нм (дорожная карта ИНТЕЛ) [1, 2].

Для массового производства СБИС с топологическими нормами 22 нм в настоящее время запускаяется 5 Фабов: B1C и D1D в Орегоне, Fab 32 и Fab 12 в Аризоне, Fab 28 в Израиле. Стоимость каждого из этих Фабов 6-8 млрд. долларов, а производительность вполне достаточна, чтобы закрыть потребности рынка. Разработки технологий с топологическими нормами 14 нм и менее интенсивно ведутся в компаниях Intel, Samsung, GlobalFoundries, TSMC. Для успешного продвижения по обозначенным дорожным картам инвестируются миллиарды долларов в разработку оборудования, материалов и технологий, метрологическое обеспечение, научные исследования. Темпы, с которыми ведутся работы, исключительно высоки.

Для того, чтобы конкурировать в секторе продукции микро-, наноэлектроники массового спроса требуются многомиллиардные капиталовложения, целесообразность которых в настоящее время вызывает вопросы, так как, выход на рынок конечной продукции исключительно сложен [4]. С другой стороны, существуют секторы рынка, к которым относятся, например, приборостроение, оборонные отрасли, космос, где массового производства не требуется, а элементная база высшего уровня необходима. Возникает вопрос – возможен ли успех в этом секторе и, если возможен, что для этого необходимо предпринять и сколько это стоит?

Интегральные схемы в России можно выпускать и сегодня на технологических линиях известных производителей Юго-Восточной Азии, США, Китая, например, по схеме FabLess производства, по которой работают в настоящее время подавляющее большинство дизайн-центров, что успешно делается такими компаниями, как ГУП НПЦ «Элвис», НТЦ «Модуль», ИТМиВТ, PROMWAD и др. [5-8]. В этом случае, дизайн-центром: разрабатывается дизайн IP-блоков с опорой на технологические нормы конкретного ФАБа; производится интеграция блоков в единую микросхему; изготавливается соответствующий комплект фотошаблонов (ориентация на конкретный ФАБ) и передается на ФАБ для производства пластин; после чего производится резка пластин на чипы, измерения и испытания, по результатам которых, при необходимости, производится коррекция и цикл повторяется вплоть до достижения требуемого результата. В зависимости от того, базируется разработка только на компиляции отдельных уже отработанных блоков или в ходе таковой предполагается разработка некого нового блока, количество итераций может варьироваться от одной (новых блоков нет) до трех-четырех.

Существует вопрос: «Целесообразно ли инвестировать в создание новых ФАБов в России, кроме уже существующих или строящихся ?», учитывая то обстоятельство, что уже действующие предприятия имеют проблемы с рынком (“МИКРОН” – имеется возможность серийного выпуска микросхем КМОП по проектным нормам 90, 180 нм, КНИ, БиКМОП SiGe – 250, 180 нм, планируется 65 нм, “АНГСТРЕМ” – до 180 нм имеется, «АНГСТРЕМ-Т» в процессе запуска линия с проектными нормами 90 нм, планируется до 45 нм).

Что касается массового производства, то положительный ответ на этот вопрос будет иметь большое количество оппонентов. С другой стороны, уже сегодня заявлено [9], что Вооруженные силы России остро нуждаются в элементной базе с проектными нормами 65 нм и совершенно очевидно, что они будут нуждаться во все более мощной элементной базе всегда, так как, именно микроэлектроника определяет в настоящее время и будет определять в течении еще многих десятилетий тактико-технические характеристики военной техники.

Отсутствие собственных производств высшего уровня делает проблематичным развитие таких стратегически важных бизнесов, как разработка и производство суперкомпьютеров. Известен пример компании “Т-Платформы”, бизнес которой требует разработки собственных микропроцессоров. Разработка и производство новых микропроцессоров этой фирмы требует использование фабов с топологическими нормами 22 нм. Однако Конгресс США принял решение о том, что разработка российских суперкомпьютеров данной компанией противоречит стратегической безопасности США и не может вестись на фабах, использующих лицензии и технологии компаний-разработчиков, в финансировании которых принимали участие американские фонды.

Так же очевидно, что интегральные схемы с технологическими нормами 45, 32, 22 нм для специальных применений исключительно сложно делать по схеме Fabless в случае, если этот ФАБ не расположен на территориях России или СНГ. Как уже отмечалось ранее, ФАБ крупномасштабного производства требует слишком больших инвестиций и, кроме того, заметим, что это не единовременные вложения. За проектными нормами 22, идут 14, 10, 8 нм и даже здесь вряд ли будет остановка – появятся трехмерная электроника, молекулярная электроника… Поэтому представляется крайне интересным рассмотреть возможность организации гибких, мелкосерийных производств.

Возможность организации мелкосерийных производств элементной базы наноэлектроники в России. Одним из первых, идею использования вакуумных систем замкнутого цикла для производства изделий микроэлектроники, высказал в 70-х годах прошлого века известный советский учё-

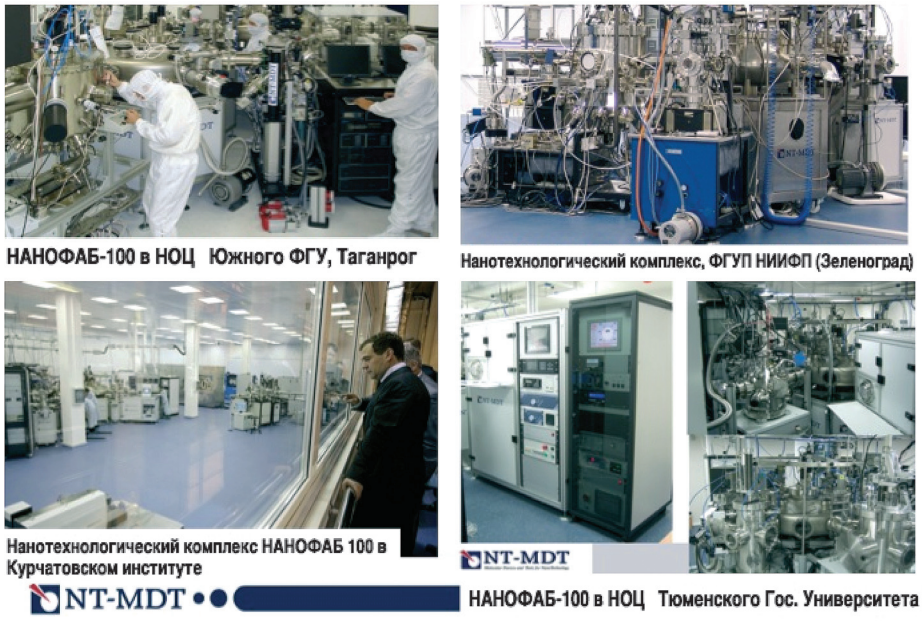

Рис. 1. Работающие комплексы систем НАНОФАБ 100, предназначенные для разработок и исследования свойств функциональных элементов наноэлектроники, МЭМС и НЭМС.

ный В.А. Лабунов (так называемая «бочка Лабунова»). В настоящее время Лабунов В.А. является академиком Национальной Академии наук Беларуссии, работает и проживает в Минске. С 2005 года в России возобновлены разработки нанотехнологических комплексов, основное назначение которых экспериментальное моделирование элементов и систем низкого уровня интеграции [15-22]. Созданные комплексы (Рис.1) позволяют экспериментально моделировать отдельные элементы наноэлектроники, но не обладают достаточной производительностью для разработок схем высокого уровня интеграции.

Комплексы НАНОФАБ-100 представляют собой связанные кластерные системы (рис.2), объединенные транспортной системой, работающие с пластинами диаметром до 100 мм. Каждый кластер имеет 6 портов, к которым могут быть пристыкованы требуемые технологические или аналитические модули. Кластеры могут быть объединены в единую технологическую систему через модули передачи, переворота и складирования образцов.

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. Это обеспечивает минимальное время межоперационной передачи образцов и, соответственно, сохранение совершенно необходимой в нанотехнологии атомарной чистоты поверхности, в особенности, для процессов FEOL, где формируется система активных элементов. Наличие модулей передачи подложек с устройствами переворота обеспечивает возможность проведения сложных технологических циклов с включением групповых и нанолокальных процессов.

Развитая транспортная система с модулями межоперационного хранения подложек позволяет в одном НТК НАНОФАБ-100 реализовать одновременно несколько технологических циклов на нескольких подложках. Помимо модулей в состав НАНОФАБ-100 входят также и отдельные технологические, контрольные, измерительные, аналитические и др. устройства. 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.

К настоящему времени для системы НАНОФАБ-100 разработаны следующие модули:

1. Модули групповых обработок:

- модуль молекулярно-лучевой эпитаксии GaAlAs;
- модуль молекулярно-лучевой эпитаксии GaN;
- модуль молекулярно-лучевой эпитаксии SiGe;
- модуль плазмохимического травления и очистки;
- модуль плазмохимического осаждения из газовой фазы;
- модуль импульсного лазерного осаждения диэлектриков (лазер 248 нм) и металлов (лазер 193 нм);
- модуль магнетронного напыления;
- модуль атомно-слоевого осаждения.

2. Аналитические модули и модули локальных обработок:

- модуль сверхвысоковакуумной сканирующей зондовой микроскопии;
- модуль сканирующей зондовой микроскопии с системой инжекции прекурсоров;
- сверхвысоковакуумный модуль нанообработки фокусированным ионным пучком;

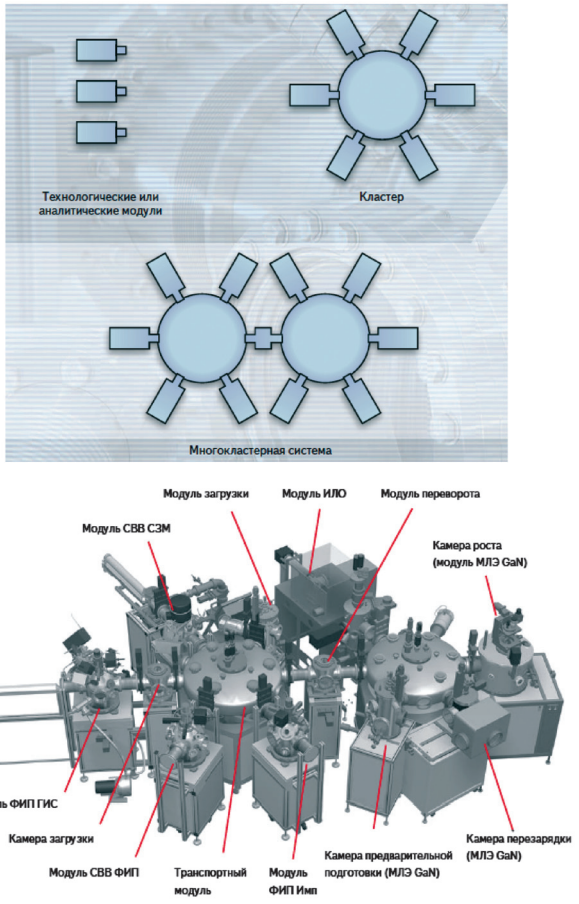

Рис. 2. Схема организации единичного кластера, 2-х кластерной системы и 3-х мерная модель конкретной аналитико-технологической системы, функционирующей в Таганрогском филиале Южного федерального университета.

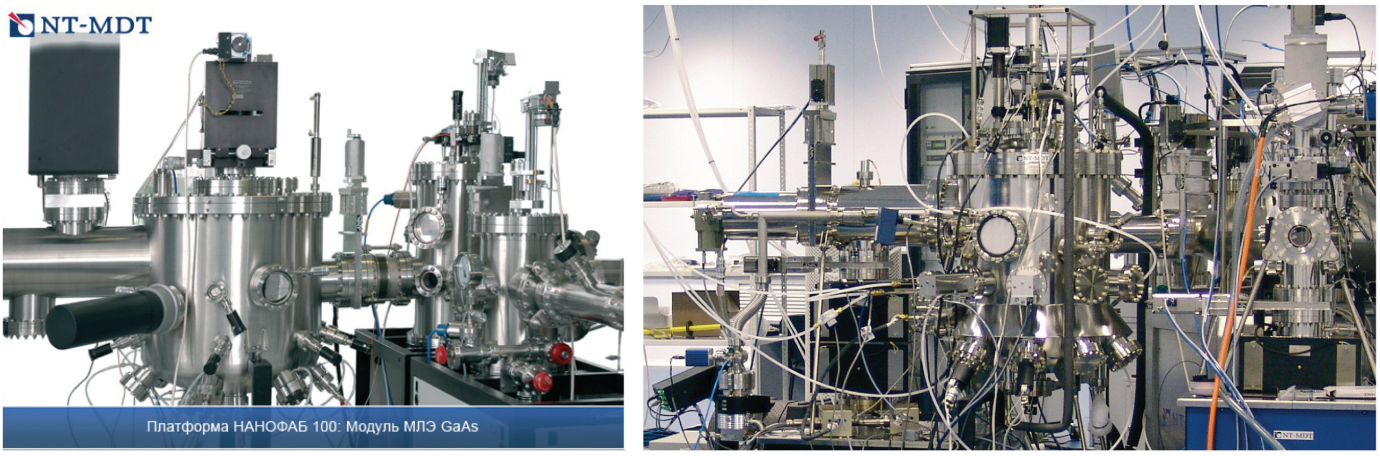

Рис.3. Модули молекулярно-лучевой эпитаксии системы НАНОФАБ-100 для формирования гетероструктур GaAlAs и SiGe

- сверхвысоковакуумный модуль нанообработки фокусированным ионным пучком с возможностью селекции типа ионов;
- высоковакуумный модуль нанообработки фокусированным ионным пучком с системой инжекции прекурсоров;
- модуль электронной и ионной спектроскопии.

3. Модули транспортной системы и обеспечивающие модули:

- сверхвысоковакуумный 6-позиционный транспортный модуль;
- сверхвысоковакуумный модуль загрузки и складирования пластин;
- сверхвысоковакуумный модуль переворота пластин.

Кроме перечисленных, для разработки и производства СБИС на базе КМОП с активными элементами FinFET, совершенно необходимы модули, обеспечивающие возможность изготовления как n-, так и p-канальных транзисторов. Для этого требуются процессы имплантации соответствующих примесей с последующим отжигом дефектов. Разработка таких модулей и технологических процессов имплантации ведется в Физико-Технологическом институте РАН [27].

В зависимости от задач заказчика имеется возможность провести компоновку многомодульной кластерной системы с использованием уже разработанных модулей, а также дополнить их недостающими, при необходимости, разрабатывая новые системы или адаптируя имеющиеся на рынке. Системами такого типа в настоящее время оснащены участки нанотехнологий Курчатовского института, Института физических проблем им. Ф.В.Лукина, Южного федерального университета, Тюменского государственного университета. С использованием таких систем можно вести исследования в области наноэлектроники, микро и наномеханики (мемристоры, микромеханические датчики, транзисторы, том числе, одноэлектронные), FEOL (Front End Of Line – изготовление активной части приборов) процессы, включая первый уровень BEOL (Back End Of Line – изготовление многоуровневой разводки), но нельзя обеспечить, ни разработку интегральных схем, со сколько бы то ни было приличным уровнем интеграции, ни, тем более, производство СБИС. Одним из основных недостающих звеньев в данных исследовательско-технологических комплексах является отсутствие эффективных литографических систем, а также кластеров и модулей, обеспечивающих FEOL процессы.

Рис. 4. Сверхвысоковакуумный 6-позиционный транспортный модуль системы НАНОФАБ-100.

Многолучевая электронная литография. К настоящему времени с использованием электронно-лучевой литографии, в принципе возможно формировать структуры с разрешением вплоть до 1 нм [10]. Даже современные полупромышленные машины, типа RAITH-150 позволяют получать структуры с разрешением в единицы нанометров (рис.5) [11].

Единственным, но очень существенным недостатком электронно-лучевой литографии является малая производительность – один литографический процесс на пластинах 100 мм с разрешением 20 нм будет занимать приблизительно 200 часов. Поэтому электронно-лучевую литографию и используют только для производства фотошаблонов или разработок (мелкосерийного производства) схем малого уровня интеграции [12].

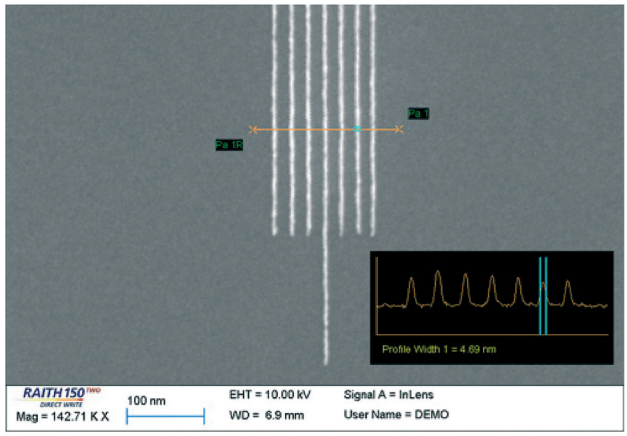

Рис.5. Возможности электронной литографии с использованием электронно-лучевого литографа RAITH-150 с экспонированием позитивного электронного резиста HSQ.

В последние годы развитие МЭМС позволило создать системы многолучевой электронной литографии, когда экспонирование ведется не одним, как обычно, а десятками тысяч электронных пучков. Уже существуют разработки системы с 13 тыс. электронными пучками, работающими параллельно, причем каждый луч может быть выведен в заданный момент из процесса экспонирования [13]. Это кардинально меняет дело – экспонирование пластины диаметром 100 мм вместо 200 часов выполняется за ОДНУ МИНУТУ!, что превращает электронно-лучевую литографию в оперативный метод, по крайней мере, мелкосерийного производства СБИС.

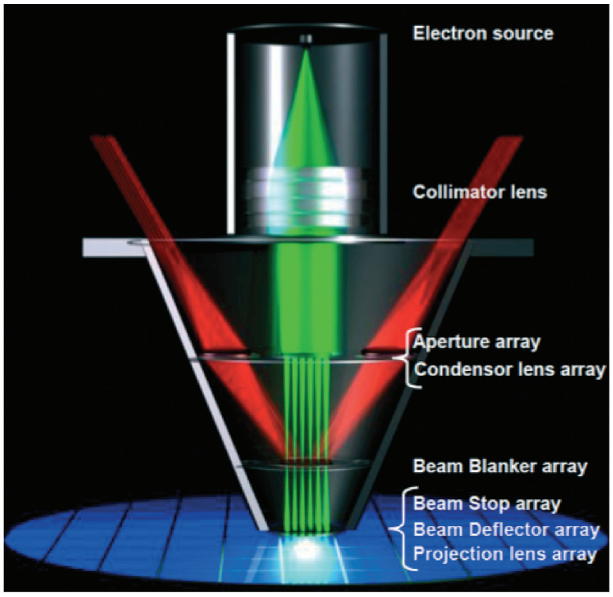

Рис. 6. Схема системы многолучевой электронной литографии [13, 23, 24].

На рис. 6 приведена схема системы многолучевой электронной литографии, которая в настоящее время реализуется компанией Mapper Lithography при финансовом участии РОСНАНО (вклад РОСНАНО составил 40 млн. Евро) [13, 14]. Источником электронов является автоэмиссионный катод высокой эффективности. Поток электронов при помощи коллимирующей линзы направляется на матрицу конденсорных линз и расщепляется на 13000 пучков, каждый из которых в свою очередь расщепляется матрицей 7×7 на 49 Гаусовых под-пучков. Каждый под-пучек может быть включен или выключен электростатически с управлением от КМОП чипа. Команда на включение или выключение подпучка приходит на КМОП чип по оптоволоконной линии. Фотодиоды собирают свет с выхода оптоволокна со скоростью 4 Гбита в секунду (70 Мбит/сек на индивидуальный под-пучек). Энергия электронов в литографе – 5 кэВ, а геометрия системы такова, что позволяет избежать взаимного влияния пучков друг на друга и минимизировать возможность нагрева пластины. Сканирование пучками осуществляется синхронно, что минимизирует электрические наводки между пучками.

В настоящее время компанией Mapper Lithography (Delft, Netherlands) разрабатывается кластерная система под диаметр пластин 300 мм из 10 отдельных модулей с производительностью 100 литографических процессов в час (рис. 7) [23]. Это конкурирующий вариант с оптическими литографическими системами (193 нм с иммерсией) и системами литографии с использованием источников экстремального ультрафиолетового излучения (13,5 нм). Расчетная стоимость кластера сравнима со стоимостью аналогичных оптических систем и составляет 80 – 100 млн. Евро.

Для систем мелкосерийного производства подобная производительность не требуется и может оказаться достаточным использование одной или двух модулей под диаметр пластин до 200 мм. Кроме того, интересна интеграция модуля в кластерную систему НАНОФАБ. Предполагаемый дизайн модуля представлен на рис.8. Кластер бесшаблонной электронной литографии может стать основой технологических линий разработок и мелкосерийного производства СБИС наноэлектроники. Использование данного кластера сделает возможным убрать из классического процесса литографии этап создания фотошаблонов, что значительно ускорит и удешевит проектирование микросхем и может обеспечить рентабельность мелкосерийного производства СБИС.

По своим характеристикам создающиеся в настоящее время установки многолучевой электронной литографии, сделают возможным также начать производство в России микросхем с топологическими размерами 32-22 нм и позволит при дальнейшем совершенствовании метода достичь к 2020 году уровня 8 нм.

Кроме системы многолучевой электронной литографии представляет интерес использование оптической бесшаблонной литографии. Такие системы разрабатываются в настоящее время на Минском предприятии ПЛАНАР с использованием возможностей лазерного генератора изображения ЭМ-5389 (лазер 257.2 нм, 1Вт, разрешение до 90 нм). В дополнение к перечисленным для FEOL процессам, требуется интеграция в системы: модулей ионной имплантации, модулей быстрого термического отжига, модулей плазмохимической очистки и гомогенизации молекулярной структуры поверхностей, модулей нанесения, проявления и снятия резиста.

Для реализации BEOL процессов, в дополнение к существующим, необходимы модули химико-механической планеризации атомарной точности, модули отмывки и гомогенизации поверхностей. Для контроля процессов, в дополнение к сканирующей зондовой микроскопии, необходимы методы профилометрии с возможностью экспресс-анализа результатов обработки поверхностей и методы многозондового тестирования характеристик активных структур в сверхвысоковакуумном исполнении. В зависимости от специализации технологические линии

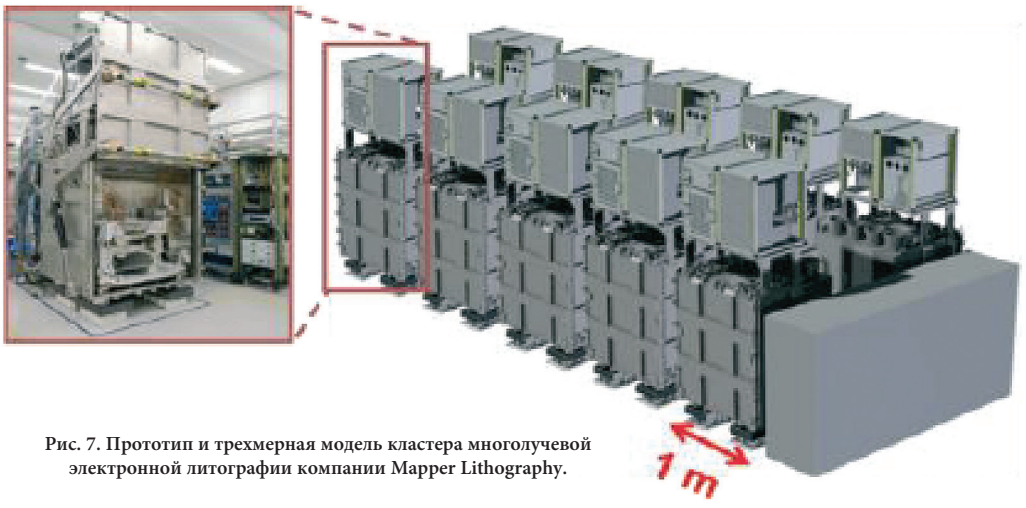

Рис. 7. Прототип и трехмерная модель кластера многолучевой электронной литографии компании Mapper Lithography.

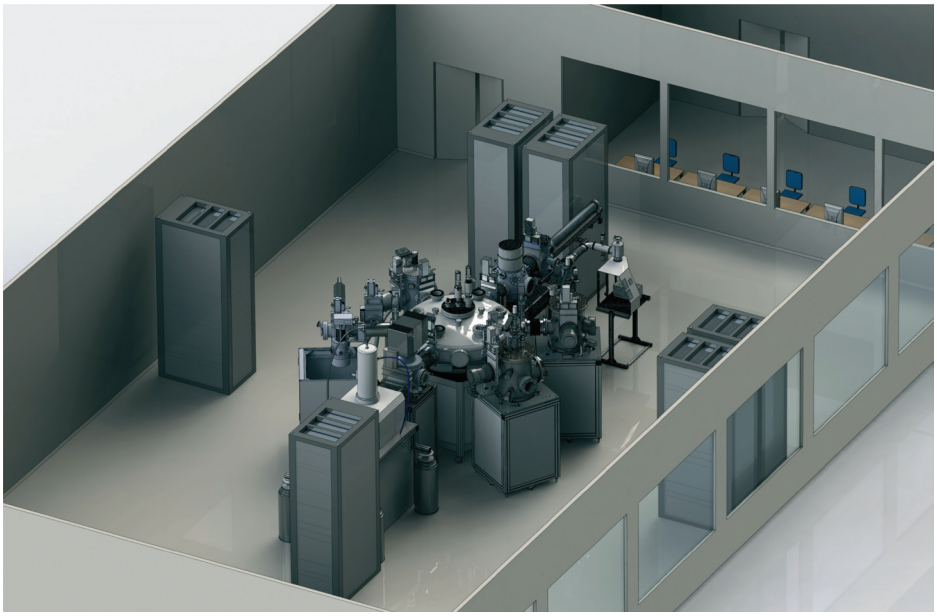

Рис.8. Трехмерная модель модуля многолучевой электронной литографии кластерной системы НАНОФАБ.

для разработок и мелкосерийного производства элементной базы наноэлектроники конфигурируются с требуемыми модулями. Технологическая линия может быть многосвязанной – состоять из нескольких кластерных систем с возможностью трансляции пластин между кластерами. Например, представляется разумным разделение кластерных комплексов для FEOL и BEOL процессов. Ниже представлены типы технологических линий различного назначения, разработка которых может представлять интерес.

Специализированные, кластерные технологические линии для разработок и мелкосерийного производства СБИС уровня от 32 нм:

- 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);
- сверхпроводниковой наноэлектроники (диаметр пластин 100 мм);
- СВЧ наноэлектроники миллиметрового и субмиллиметрового диапазона (диаметр пластин от 50 до 150 мм);
- НБИКС технологий (диаметр пластин 100 мм);
- СВЧ акустоэлектроники (диаметр пластин от 50 до150 мм);
- оптоэлектроники, микроволновой фотоники (диаметр пластин от 50 до 150 мм).

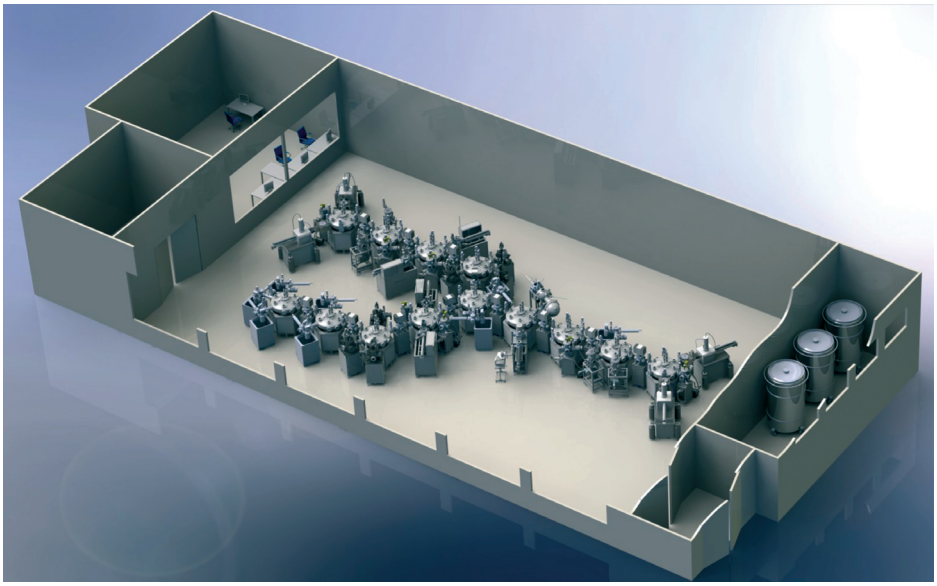

Рис. 9. Трехмерный макет кластерной технологической линии для разработок и мелкосерийного производства изделий наноэлектроники.

Производственные линии можно специализировать под разработки и производство различных типов изделий микро и наноэлектроники, в том числе, под различные диаметры пластин от 50 до 200 мм. Для исследования технологических процессов можно эффективно использовать возможности центров синхротронного излучения НБИК центра Курчатовского института и центра высоких технологий ФГУП НИИФП им. Ф.В.Лукина, где предполагается разработка рабочих станций фотоэлектронной спектроскопии, ЭКЗАФС спектроскопии, рефлексометрии, дифрактометрии, модуля СИ со стрессанализатором. Интеграция станций в систему НАНОФАБ обеспечит возможность изучения технологических процессов формирования наноструктур, их контроль на уровне долей мономолекулярных слоев.

Модернизация синхротронного комплекса позволит реализовать возможности, требующие пространственной когерентности 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 н/сек, что обеспечит возможность разработки новых технологических процессов, необходимых для эффективного развития наноэлектроники.

Заключение. В настоящее время сложились реальные условия для качественного изменения уровня разработок элементной базы микроэлектроники с выводом ее на передовые мировые позиции для систем специального назначения. Использование бесшаблонных процессов литографии должно привести к существенному повышению темпов разработок и рентабельности мелкосерийного производства.

Организация разработок технологических комплексов и технологий одновременно с интеграцией в мировую систему товаропроизводства обеспечит как технологическую независимость России, так и приведет к значительному повышению уровня научных разработок с консолидацией научно-технического потенциала страны.

Благодарности. Авторы выражают искреннюю благодарность Борисову Ю.И., Валиеву К.А., Гудкову А.Л., Ковальчуку М.В., Красникову Г.Я., Лабунову В.А., Орликовскому А.А., Сухопарову А.И., Харламову Р.В., Якунину А.С., в разное время участвовавшим в обсуждении проектов по созданию кластерного оборудования.

Литература:

1. Дорожная карта INTEL, http://newsroom.intel.com/docs/DOC-2032.
2. Данилина Т.И., Кагадей В.А., «Технология СБИС», Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2007.
3. Беленький Г.Л., Салаев Э.Ю., Сулейманов Р.А., Деформационные явления в слоистых кристаллах, УФН, том.155, вып. 1, 1988, стр.89-127.
4. Коник Л., Государственный электронизм, сентябрь 2008, http://www.comnews.ru/standart/article/52216, http://www.zelenograd.ru/news/9237/.
5. Борисов Ю., Калинин С., Немудров В., Роль дизайн-центров микроэлектроники в развитии отечественной электронной промышленности, Электронные компоненты №10, 2008, www.spels.ru/index.php?option=com_docman&task=doc...
6. А. Мелик-Адамян, Российские fabless-компании как двигатель отечественной микроэлектроники. Электронные компоненты №2, 2007.
7. В России будет создан новый дизайн-центр микроэлектроники «Т-Нано», 10.07.2012, http://promwad.ru/news/10-07-2012-design-center-t-nano.html.
8. www.promwad.ru.
9. «Ангстрем»: Цифровые радиостанции «Ангстрем» заменят военным мобильные телефоны, http://www.rb.ru/article/angstrem-tsifrovye-radiostantsii-angstrem-zamenyat-voennym-mobilnye-telefony/6996247.html
10. Электронно-лучевая литография http://m.portalnano.ru/read/ezaurus/defi-nitions/electron_beam_lithography.
11. http://www.raith.de/inhalt/bilder/Electron%20beam%20lithography%20applications_RAITH150-TWO_pic2.jpg).
12. Орликовский А.А., Лукичев В.Ф., Руденко К.В. Критические элементы нанотранзисторов: физика, технология, материалы. Нанотехнологии и наноматериалы, № 4 (54), 2010, http://www.portalnano.ru/read/sci/basic/orlikovskiy.
13. http://www.mapperlithography.com/technology/mapper-technology.
14. http://www.nanonewsnet.ru/blog/nikst/rosnano-investiruet-v-bezmasochnuyu-litografiyu-s-razresheniem-do-10-nm#comment-10040.
15. Быков В.А., Веревкин Д.В., Многофункциональная система «NANOFAB» как базовый комплекс для проведения прецизионных исследовательских и технологических операций, Нанофизика и Наноэлектроника. Материалы симпозиума., Н.-Новгород, 25-29 марта 2005 г. Стр. 206.
16. Быков В.А., В.В. Атепалихин, А.В. Быков, В.В. Поляков Нанотехнологические комплексы и их применение в наноэлектронике, Нанофизика и Наноэлектроника. Материалы симпозиума. Н.-Новгород, 10-14 марта, 2007 г.с. 505-506.
17. Агеев О.А., Быков В.А., Технологическое оборудование для создания наносистемной техники. НАНОтехнологии. Экология. Производство. №5 (7) ноябрь 2011.
18. Быков В.А.. Кластерное технологическое оборудование для создания элементной базы наноэлектроники. «Наноиндустрия» №6, 2010
19. Быков В.А.., Возможности кластерного оборудования для создания и исследования приборов наноэлектроники. Симпозиум «Нанофизика и Наноэлектроника 2011» Россия. Нижний Новгород Март, 14-18, 2011.
20. Быков В.А., Харламов Р.В. Нейроморфные интегральные схемы для научного приборостроения. ИНТЕГРАЛ №4/2011, Стр. 76-78.
21. Быков В.А., Патент RU2308782, НАНОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС, опубл. 20.10.2007, Бюл. № 29, 11 с.
22. Быков В.А., Патент №2390070. 20.05.2010, Нанотехнологический комплекс на основе эпитаксиальных и ионных технологий.
23. B. Lin, Future of multiple-e-beam direct-write systems, [8323-1], Proceedings of SPIE, Advanced Lithography 2012, 12-16 February 1012, San Jose, California, USA.
24. L.Martin, S.Manakli, S.Bayle, J.Belledent, S.Soulan, P.Wiedemann, A.Farah, P.Schiavone, Combined dose and geometry correction (DMG) for low energy multi electron beam lithography (5kV): application to the 16 nm node, [8323-1W], Proceedings of SPIE, Advanced Lithography 2012, 12-16 February 1012, San Jose, California, USA.
25. Intel видит техническую возможность производства 10-нм кристаллов, http://www.efind.ru/forum/showthread.php?t=45998.
26. IBM carbon nanotube placement demonstration, http://news.cnet.com/2300-11386_3-10014338-4.html, http://www.techradar.com/news/computing-components/processors/ibm-claims-carbon-nanotube-chip-development-breakthrough-1109104 .
27. K. Rudenko, S. Averkin, V. Lukichev et al.,Proc. of SPIE, v.6260 (2005); V. Lukichev, K. Rudenko, A. Orlikovsky et al..IIT-2008, Monterey, CA, USA June 8-13, 2008; http://www.ftian.ru/works/work1/#5 (2013).

vbykov@ntmdt.ru, konstantin.borisov@mail.ru