

КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ В РОССИИ МИНИ-ФАБРИК ПО ПРОИЗВОДСТВУ СОВРЕМЕННЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

А.Хохлун

Экономическое и политическое положение любой страны определяется сегодня уровнем развития электронной отрасли. Влияние электронной составляющей оборудования во всех без исключения сегментах промышленности растет экспоненциально. Удельный вес стоимости электроники в современных системах военного назначения в среднем превышает 70%, а в некоторых видах вооружений (высокоточное оружие, беспилотные летательные аппараты) достигает 90% и более. Владение современными технологиями производства компонентной базы (СБИС, МЭМС, СВЧ МИС, дисплеев и дискретных компонентов) определяет статус высокоразвитой державы. Как в современных условиях создать передовое и эффективное полупроводниковое производство в России? Стоит ли слепо копировать опыт строительства ведущими мировыми компаниями крупных кремниевых фабрик? Попробуем ответить на поставленные вопросы.

За последние 30–40 лет развитие электронной отрасли значительно опередило по качественным и количественным показателям общее развитие техники. В частности, темпы роста энергоэффективности электронных устройств превысили этот же показатель для продукции других сегментов промышленности на несколько порядков (табл.1). Научно-технический прорыв, кардинально изменивший качество жизни людей в мире, не был бы возможен без стремительного развития технологической базы микроэлектроники.

По данным компании IC Insights, объем мирового производства МОП-структур с проектными нормами менее 80 нм составляет сегодня около 60% (рис.1, табл.2). Кроме того, в электронной промышленности сохраняются тенденции укрупнения основных производителей и концентрации ресурсов (рис.2, 3). Стоимость "входного билета" в клуб производителей полупроводников увеличивается: например, компания SK Hynix планирует потратить около 26 млрд. долл. на строительство двух новых заводов. К тому же в последние годы в области микроэлектроники наблюдается еще одна устойчивая тенденция, получившая название More than Moore ("больше, чем Мур"),

в соответствии с которой уровень интеграции и функциональности изделий микроэлектроники повышается быстрее, чем предсказывает закон Мура.

Возникает вопрос: возможно ли в России копирование общемировых подходов к созданию микроэлектронных производств по типу таких гигантов, как Intel, AMD, ST Microelectronics, Samsung, TSMC? Ответ: нет, невозможно. И не только потому, что недостаточно средств, а потому, что это неэффективно и не отражает современного состояния и достижений мировой науки и промышленности.

Какие шаги необходимо предпринять, чтобы в нынешних условиях наладить эффективное отечественное производство микроэлектронных изделий? В поисках ответа на вопрос попробуем вникнуть в причины отставания. Ряд объективных факторов мешают успешному развитию микроэлектроники в России, а именно:

- отсутствие четкого представления о номенклатуре продукции, востребованной на внутреннем рынке, и специфике мелкосерийного многономенклатурного производства;
- отсутствие системного подхода к переоснащению предприятий и запуску новой продукции в производство, а также недостаточное внимание к комплексу

Таблица 1. Уровень роста энергоэффективности по различным отраслям промышленности за последние 30 лет

Отрасли промышленности	Годы		Процент роста энергоэффективности
	1985	2015	
Автотранспорт	8,2 километра на 1 литр	40 километров на 1 литр	488%
Пассажирские авиаперевозки	12 пассажиро-километров на литр	30 пассажиро-километров на литр	250%
Освещение	Люминесцентная лампа – 70 люменов на Ватт	Светодиодная лампа – 160 люменов на Ватт	230%
Компьютеры	2500 операций в секунду на Ватт	60 000 000 операций в секунду на Ватт	2 400 000%

вопросов, связанных с внедрением технологии, обслуживанием оборудования и обеспечением необходимыми материалами;

- стремление к прямому копированию западных производств без учета внутренних особенностей;
- недостаточная государственная поддержка бизнеса в области создания современного электронного производства.

Эти факторы (в комплексе или любой из них) приводят к тому, что реализованные в России проекты по созданию или модернизации микроэлектронных производств оказываются малоэффективными. Кроме того, специалисты и руководители отрасли часто ссылаются на два аргумента против создания современного микроэлектронного производства в России:

- отсутствие в нашей стране рынка отечественной микроэлектроники – потребность внутреннего рынка могут удовлетворить ведущие мировые производители; мизерность российского рынка в мировом масштабе делает неконкурентоспособным внутреннее производство;
- высокие затраты на создание современного микроэлектронного производства – на строительство фабрики по производству СБИС требуется порядка нескольких миллиардов долларов, которые не окупятся.

Все больше разработчиков понимают, что заказывать пилотные партии специализированных ИС (ASIC) с проектными нормами ниже 45 нм

слишком дорого, а сроки исполнения заказов будут непозволительно длительными. Для того чтобы обеспечить минимальную рентабельность полупроводниковой фабрики, объем запускаемой партии изделий микроэлектроники должен быть достаточно большим. Если учесть, что объем российского рынка микроэлектроники, по разным оценкам, составляет менее 1% мирового рынка, то очевидно, что идея загрузки стандартной полупроводниковой фабрики стоимостью в несколько миллиардов долларов российскими заказами выглядит абсурдной.

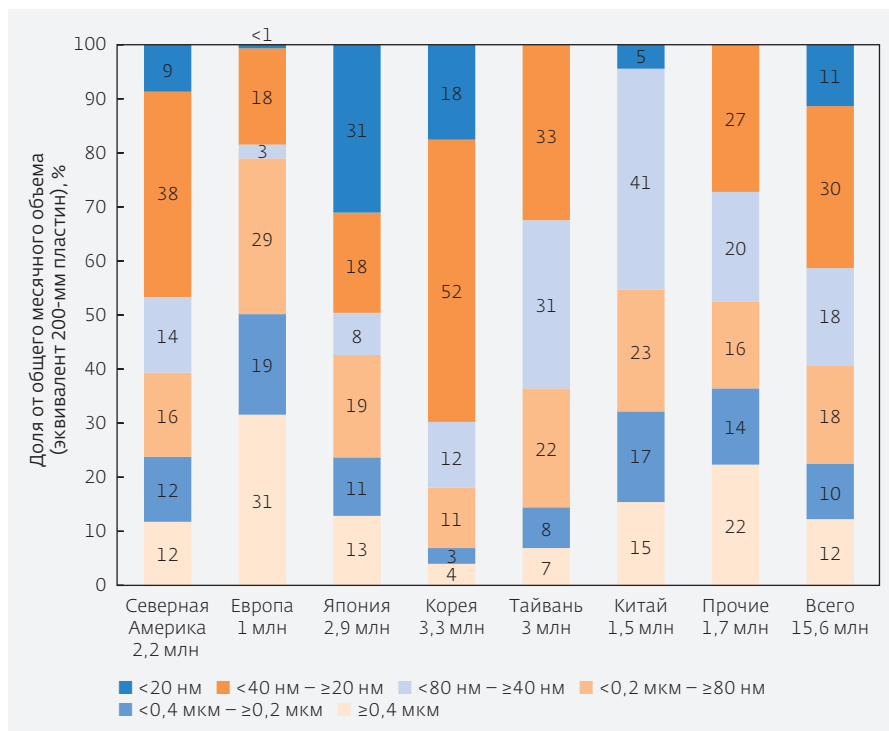


Рис.1. Месячный объем производства по регионам в зависимости от минимального топологического размера на декабрь 2014 года

Таблица 2. Объем производства пластин в месяц по регионам и группам на декабрь 2014 года (в пересчете на 200-мм пластины)

Группы изделий	Регион							Всего
	Северная Америка	Европа	Япония	Корея	Тайвань	Китай	Прочие	
Аналоговые устройства, тыс. шт.	402	350	327	75	13	167	134	1467
Память, тыс. шт.	277	155	609	385	1	76	66	1570
Логика, тыс. шт.	469	13	1468	2424	838	406	421	6039
МЭМС, тыс. шт.	640	79	271	23	3	11	132	1158
Контрактное производство, тыс. шт.	419	271	78	285	2163	774	60	4599
Прочие, тыс. шт.	39	138	139	100	6	33	341	796
Всего, тыс. шт.	2246	1006	2892	3292	3024	1467	1154	15 629

Если применительно к сектору микроэлектроники специального назначения принять в расчет, что стоимость электронных компонентов в военных системах превышает 70%, то объем этого рынка (спецтехника, цифровое телевидение, навигационные системы, РЧИД, телекоммуникации и др.) можно оценить на уровне нескольких миллионов ИС в год. Слишком мало для современной полупроводниковой фабрики. Кроме того, такая продукция отличается широкой номенклатурой при сравнительно малой серийности, поэтому производить ее на крупном полупроводниковом заводе невыгодно или невозможно.

Как выйти из такой, казалось бы, тупиковой ситуации? Решить проблему создания многономенклатурного

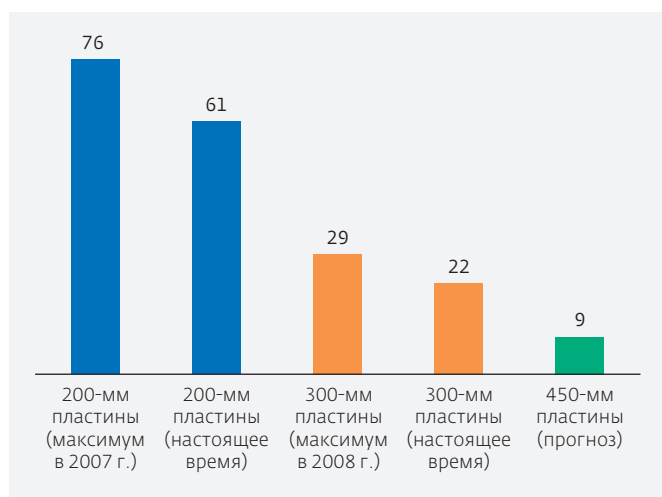


Рис.2. Количество микроэлектронных фабрик в мире по состоянию на декабрь 2014 года

мелкосерийного производства во всем мире помогают мини-фабрики по производству специализированных ИС на заказ. По мере развития наноимпринтной литографии, технологий SMIF и FOUP*, а также кластерного оборудования появилась возможность существенно снизить эксплуатационные затраты производства, повысив его гибкость и эффективность (рис.4). Мини-фабрика может включать в себя (частично или целиком) специализированные производства МЭМС, СВЧ, силовых приборов, фотоэлектронных приборов и других устройств, которые требуют современной интеграции с КМОП-процессором и памятью в системе-на-кристалле или в системе-в-корпусе.

На мини-фабрике можно производить КМОП СБИС с проектными нормами 45 нм и менее на общей пластине по замкнутому циклу, включая изготовление наноимпринтных фотошаблонов. Оснащение такого производства участками электрического и оптического контроля, тестовым и испытательным оборудованием, интеграция специализированных технологических цепочек (МЭМС, МИС СВЧ, ФЭП и т.д.) позволит создать мини-предприятие по выпуску любых российских компонентов специального назначения (рис.5).

Группы основных технологических операций для мини-фабрики такие же, как и для стандартной фабрики:

- фотолитография (а также электронно- и ионно-лучевая литография);
- химобработка;

* Стандарты SMIF (Standard Mechanical InterFace) и FOUP (Front Opening Unified Pod) разработаны для хранения и транспортировки нескольких полупроводниковых пластин в специальной кассете (SMIF – для пластин диаметром до 200 мм, FOUP – для пластин диаметром 300 и 450 мм).

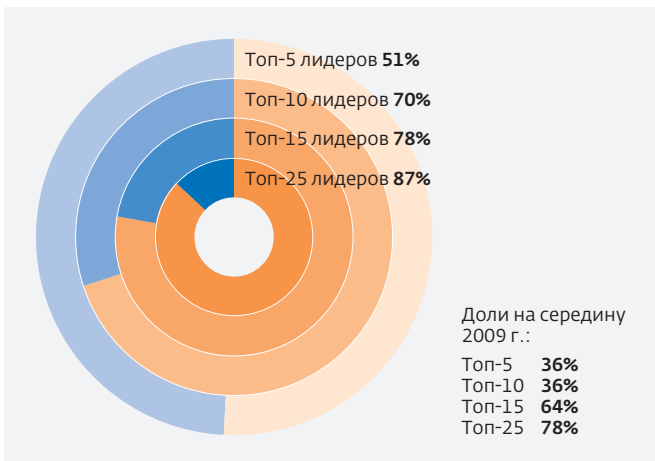


Рис.3. Доли лидеров в мировом объеме производства на декабрь 2014 года (15,6 млн. шт. в месяц в пересчете на 200-мм пластины)

- процессы нанесения/травления (в том числе, плазмохимическое травление, вакуумная металлизация, ALD-процессы и др.);
- ионная имплантация;
- термические процессы;
- измерения и контроль.

В состав мини-фабрик могут входить также участки эпитаксиального выращивания, но, возможно, более эффективным решением было бы создание специализированных эпитаксиальных мини-фабрик.

Производительность современной мини-фабрики составляет не десятки и сотни тысяч пластин в месяц, как на фабрике массового производства узкой номенклатуры продукции, а примерно 500 пластин ежемесячно. Потребности российского рынка микроэлектроники могут обеспечить, по некоторым оценкам, три-четыре



Рис.4. Технологический кластер ионно-плазменной очистки и напыления структур многономенклатурного мелкосерийного производства в Южной Корее

мини-фабрики. При этом их продукция будет конкурентоспособна на мировом рынке контрактного производства. Кроме того, при соблюдении некоторых условий изделия будут востребованы в сфере космического приборостроения, авионики, атомной промышленности и в других областях, где применяются электронные устройства высокой надежности.

Еще одно направление – развитие универсальных мини-фабрик как современной производственной базы для нанотехнологических центров коллективного пользования, где наряду с инновационными разработками можно проводить обучение и переподготовку высококлассных научных и производственных кадров.

При создании современной мини-фабрики в России следует принимать во внимание, что производство изделий малой серийности и широкой номенклатуры должно быть очень гибким, с низкими эксплуатационными расходами. Для этого необходимо выполнить ряд условий.

Использование наноимпринтной литографии вместо традиционной фотолитографии в глубоком ультрафиолете (EUV) позволит существенно (в разы) снизить затраты на оборудование и эксплуатационные затраты, повысит рентабельность проекта. Кроме того, модернизация существующих в России межотраслевых центров изготовления фотомасок даст возможность оперативно наладить производство масок для наноимпринтной литографии.

Технологический маршрут кристалльного производства или производства СБИС на общей пластине с использованием наноимпринтной литографии позволяет обеспечить размеры топологии 45 нм и ниже с достаточно высоким

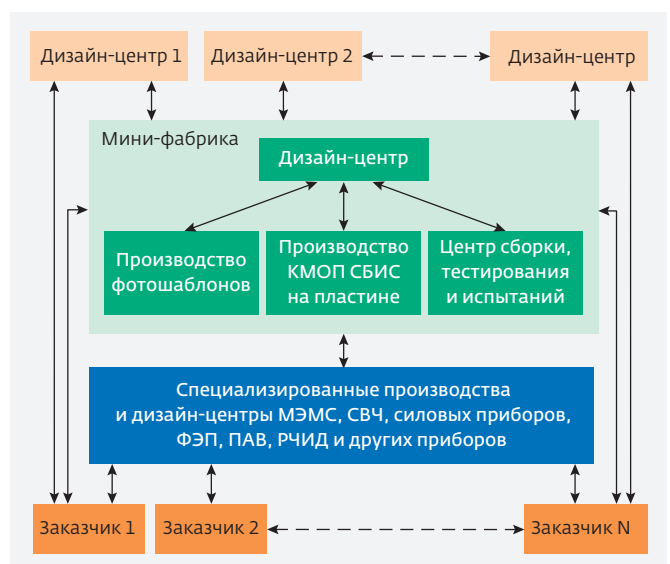


Рис.5. Схема функционирования универсальной мини-фабрики по производству ИС с проектными нормами менее 45 нм

коэффициентом выхода годных (табл.3). В лабораторных условиях минимальный размер элемента, полученного методом наноимпринтной литографии, уже сейчас достигает 7–8 нм и менее*.

На отечественных мини-фабриках имеет смысл размещать оборудование, ориентированное на обработку 200-мм пластин, поскольку оно достаточно дешевое и компактное. Следует учитывать также, что для снижения затрат по созданию таких производств, важен сам принцип формирования технологических кластеров: при мелкосерийном и многономенклатурном производстве на первый план выходит не производительность, а оптимальный состав оборудования.

Все оборудование (кроме имплантера) должно быть объединено в технологические кластеры индивидуальной обработки пластин, чтобы минимизировать стоимость, занимаемую площадь и обеспечить резервирование. Такое оборудование может собираться в России по методу крупноузловой сборки из стандартных комплектов для снижения импортозависимости и обеспечения безопасности. Большинство узлов выпускаются корейскими, тайваньскими и китайскими предприятиями. Программное обеспечение при этом, вплоть до уровня машинных кодов, должно быть только российской разработки.

Чистые помещения и инфраструктура мини-фабрик – модульного типа. Межоперационная передача пластин должна осуществляться в FOUN-контейнерах. Это обеспечит уменьшение занимаемых площадей, снижение капитальных затрат и стоимости эксплуатации.

Что касается стоимости современной мини-фабрики, то затраты на ее создание под ключ, включая чистые комнаты и инженерные системы обеспечения энергоносителями, составляют, в зависимости от состава и степени универсальности, от 350 до 500 млн. долл. Срок реализации проекта "с нуля" – 30–36 месяцев, не больше, иначе проект морально устареет до того, как начнет приносить отдачу. Еще один важный (если не определяющий) фактор в пользу реализации подобных проектов – уровень квалификации российских специалистов в данной области, хотя для отладки технологии имеет смысл привлекать иностранных специалистов с опытом работы на производствах такого уровня.

В заключение перечислим ключевые факты, свидетельствующие о перспективах таких проектов в России:

- достижения в области технологии и оборудования наноимпринтной литографии позволяют на порядок снизить стоимость проекта для топологических норм 45 нм и менее по сравнению с решениями на основе

* Weimin Zhou. Nanoimprint lithography: a processing technique for nanofabrication advancement. – Nano-Micro Letters, 2011, 3(2), pp. 135–140.

Таблица 3. Основные технические характеристики универсальной мини-фабрики с проектными нормами 45 нм и менее

Характеристика	Значение
Технологический уровень, нм	28-45
Производительность, пластин в час	5
Диаметр обрабатываемых пластин, мм	200/300
Занимаемая площадь, м ²	2500
Площадь чистых производственных помещений, м ²	750
Численность производственного персонала, человек	120
Энергопотребление, МВт	3

оптических степперов. Развитие наноимпринтной технологии способствует созданию высокорентабельных мелкосерийных многономенклатурных микроэлектронных производств;

- развитие кластерного технологического оборудования и систем автоматизации производства на уровне кластера, участка, цеха, предприятия позволяет создавать высокотехнологичные эффективные мини-фабрики со сквозным контролем изделий и параметров технологического процесса в любой момент времени;
- сотрудничество с предприятиями электронного машиностроения Юго-Восточной Азии (в Южной Корее, Китае, на Тайване) позволяет избежать санкций, которые в области высокотехнологичной микроэлектроники, по сути, не прекращались в отношении России;
- за последние годы в нашей стране накоплен большой опыт в реализации комплексного подхода к созданию современного микроэлектронного производства. Критическая масса знаний и навыков специалистов в этой области позволяет сделать качественный скачок и реализовать в России серию успешных и высокоэффективных проектов в сфере микроэлектроники.

Конечно, представленная концепция создания мини-фабрик по производству изделий микроэлектроники требует более детального анализа, и в рамках одной статьи все аспекты такой сложной проблемы осветить невозможно. В последующих публикациях мы продолжим начатый разговор и подробно рассмотрим особенности построения полупроводниковых мини-фабрик, а также вопросы технико-экономического обоснования подобных проектов.