

Минифабры в микроэлектронике: история и возможности

А. Хисамов¹, А. Назаренко²

УДК 621.3.049.77 | ВАК 2.2.2

Существенным препятствием для построения производственной базы микроэлектроники в России является высокая стоимость инфраструктуры полупроводниковых производств, технологического оборудования и его разработки. Эти факторы являются значимыми не только для нашей страны, но и для стран – лидеров микроэлектронной промышленности. Одним из возможных решений данной проблемы являются минифабры – мелкосерийные многономенклатурные производства, которые начали активно развиваться относительно недавно. Необходимость и ценность создания мелкомасштабных производств указывалась в стратегических документах по обеспечению технологического лидерства США, Европы и Японии [1, 2]. В последнее время в России и за рубежом был создан ряд проектов, направленных на реализацию концепции минифабров.

ЧТО ТАКОЕ «МИНИФАБ»

Минифабом (mini-fab) общепотребительно называют небольшое по масштабам и объемам выпуска производство микроэлектронных изделий, в противовес «мегафабам» и «гигафабам» – форматам производств, сложившимся под действием фактора экономии на масштабах. Мотивацией является существенное, минимум в 10 раз, снижение необходимых объемов инвестиций при сравнимых технологических возможностях, гибкости при выпуске небольших партий без существенного проигрыша (желательно – выигрыша) в себестоимости выпуска продукции.

Рассмотрим наиболее интересные проекты и концепции минифабров, реализованные в последнее время в нашей стране и за рубежом.

ПРОЕКТЫ И КОНЦЕПЦИИ МИНИФАБОВ HALCA

В Японии в 2001–2005 годах был успешно реализован проект HALCA (Highly Agile Line Concept Advancement), основными идеями которого были:

- использование оборудования, в основном совпадающего с применяемым в массовом производстве (пластины диаметром 200 мм, SMIF-контейнеры);

- использование минимального количества оптимизированного комплекта оборудования – за счет повышения его гибкости, возможности быстрой перенастройки под разные параметры технологических процессов, использования одних и тех же единиц оборудования на разных этапах производственного маршрута.

Проекты исследований и планы по реализации пилотных производств мини-фабрик на основе концепции HALCA рассматривались в разных странах (см., например [5]). В рамках исследований эффективности мини-фабрик в компании Tokyo Electron удалось существенно, на 60%, снизить расход электроэнергии на выпуск единицы продукции по сравнению с «мегафабрикой» – традиционным производством микроэлектроники (см., например [4]). Стоимость создания производства оценивалась в 20–30 раз ниже, чем традиционного. Реализовывалась технология уровня 130 нм.

Тем не менее, сегодня не существует ни одного действующего производства такого типа. Все исследования и запуски пилотных производств закончились тем, что реализуемые подходы и решения были интегрированы в традиционные производства. Что помогло повысить их гибкость и экономическую эффективность, а эффект масштаба обеспечил большую конкурентоспособность. При этом в минифабрах ниже коэффициент доступного производственного времени оборудования и выход годной продукции.

Необходимо отметить, что в России примерно в то же время в НИИСИ РАН был реализован аналогичный проект – на 150-мм пластинах под проектные нормы 350 нм.

¹ Группа компаний «Стратегические Нанотехнологии», директор по развитию техники и технологии.

² Группа компаний «Стратегические Нанотехнологии», генеральный директор.

Nanofab-100 («Байкал-22»)

Проект Nanofab-100 реализовывался в России в 2005–2015 годах. Основными его идеями было использование пластин небольшого размера (100 мм) и снижение требований к инфраструктуре (отсутствие чистых комнат) за счет реализации оборудования в виде вакуумных «мегакластеров» (рис. 1).

Для обеспечения гибкости и достижения целевой проектной нормы (8–65 нм) предполагалась разработка многолучевого электронного литографа.

При всей красоте концепции (отмеченной, в том числе, наградами международных конференций), следует отметить фундаментальные недостатки, которые не позволяют рассчитывать на конкурентоспособность производств на ее основе.

Во-первых, это высокие издержки на реализацию функции передачи пластин между станциями обработки. Передача пластин происходит с помощью манипуляторов в вакууме, по одной пластине. Время передачи очень большое, а пропускная способность системы очень низкая. Высокая «стоимость транзакций» выливается в низкую производительность и высокую себестоимость.

Во-вторых, «хрупкость» системы. Вакуумная транспортная система задает структурную жесткость и сильную взаимную зависимость отдельных технологических станций. Выход из строя или сбой одного транспортно-модуля приводит к остановке всей системы. Развитие и перестройка системы сильно затруднены. Все это делает работу системы неустойчивой и плохо приспособляемой к изменяющимся условиям.

Было произведено несколько инсталляций действующих систем. В итоге, проект был закрыт из-за невозможности достижения технических показателей.

FutrFab

Проект FutrFab был инициирован в США в 2006 году.

Основные идеи и параметры проекта:

- используются пластины диаметром 2" (50 мм), которые на момент реализации проекта соответствовали одному кадру засветки степпера – для минимизации размеров и стоимости оборудования;
- минимизация требований к инфраструктуре за счет организации оборудования в виде стеллажа, в ячейках которого размещаются отдельные технологические станции (рис. 2); передача пластин производится системой перемещения, размещенной в компактной чистой зоне перед стеллажом.

Кластер формирования покрытий и функциональных слоев

Кластер плазменных технологий

Аналитический и литографический кластеры (электронная литография, РЭМ, СЭМ, FIB)

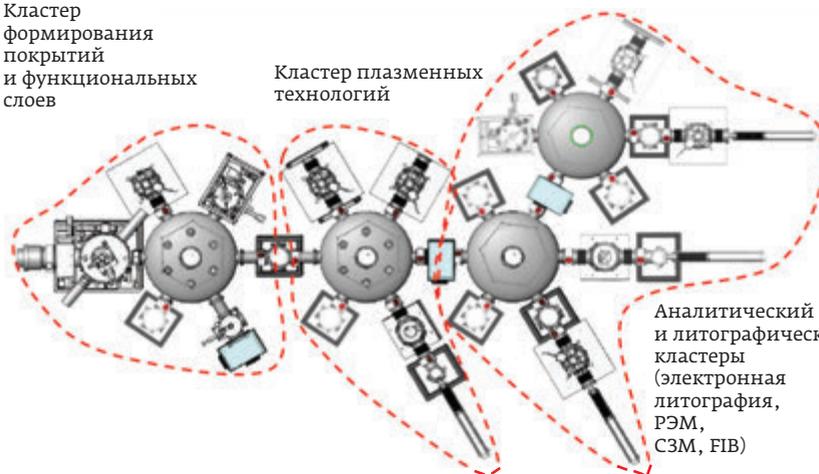


Рис. 1. Концепция Nanofab-100 [10]

Проект не был поддержан широким сообществом и не доведен до полноценной реализации. Системные недостатки аналогичны концепции Nanofab-100: низкая пропускная способность «транспортной системы», жесткость и «хрупкость» системы в целом. Необходимость встраивать оборудование в «этажерку» существенно увеличивает трудности и ограничения при его проектировании.

Minimal Fab

Проект реализовывался в Японии в 2007–2018 годах и на настоящий момент является, вероятно, самым успешным с точки зрения достижения поставленных целей.

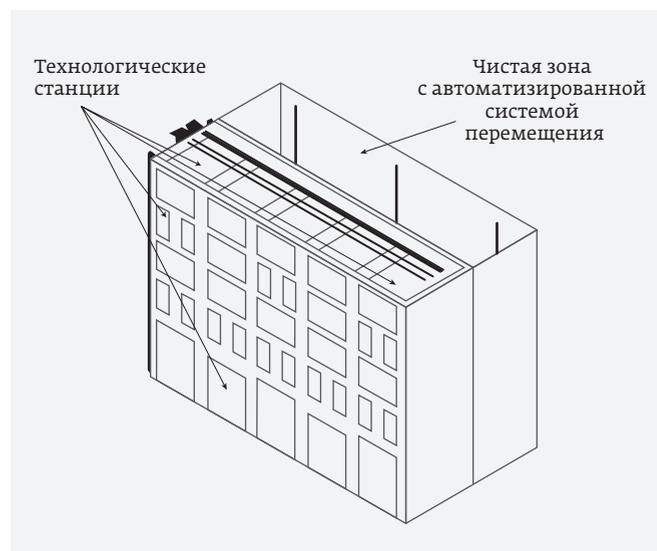


Рис. 2. Концепция проекта FutrFab [7]

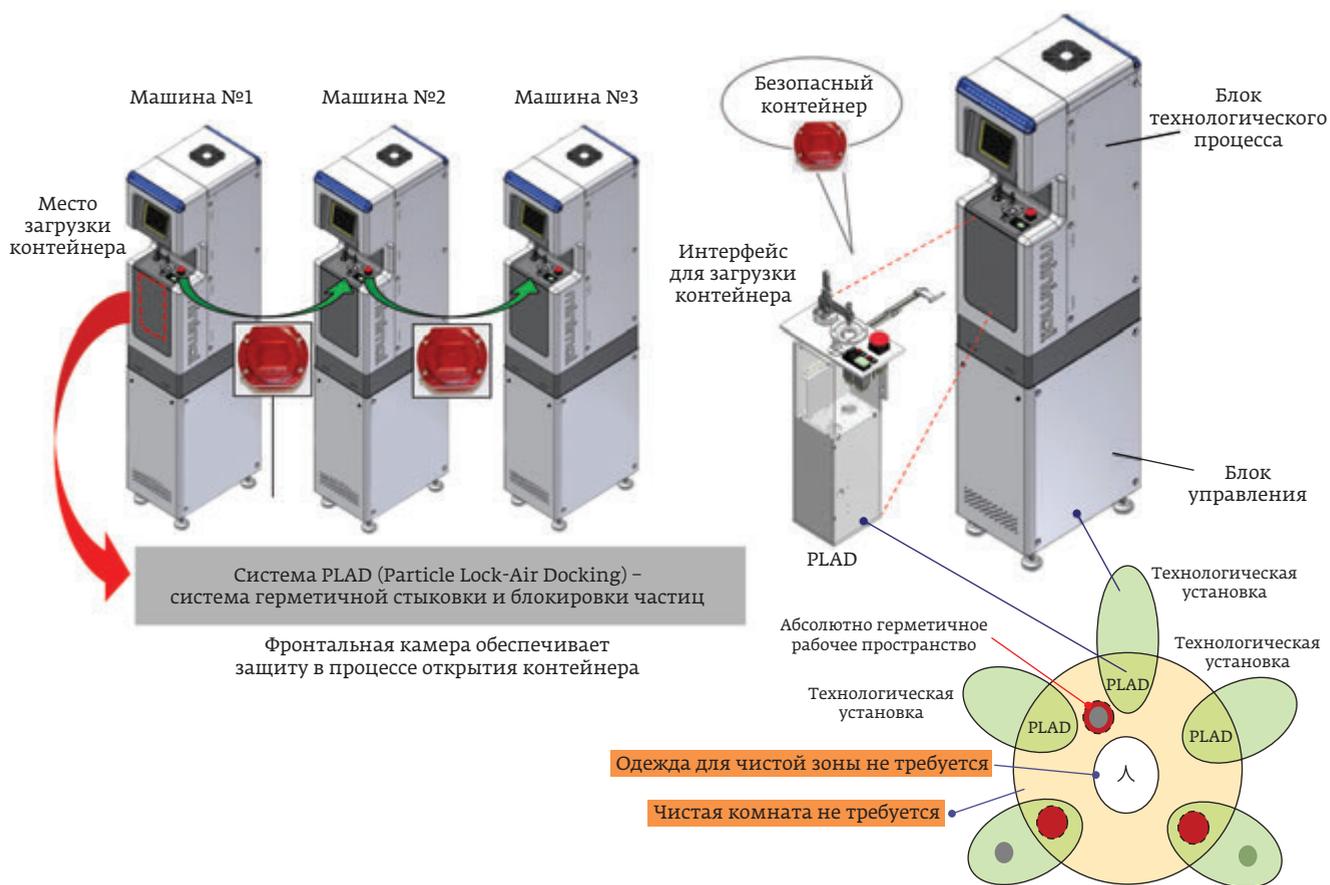


Рис. 3. Проект Minimal Fab [8]

Основные идеи проекта перечислены ниже.

- Использование пластин 0,5 дюйма (12,5 мм) для минимизации размеров и стоимости оборудования, расходов на выпуск единичного изделия. В начальной концепции предполагался подход «одна пластина – одно изделие» и исключение операции разделения пластин. Однако сейчас в полном комплекте оборудования эти операции реализованы.
- Минимизация требований к инфраструктуре (отсутствие чистых комнат) благодаря применению герметичных контейнеров. В проекте показана возможность обеспечения «чистоты» класса ISO3 в условиях помещений класса ISO8.
- Минимизация требований к инфраструктуре (отсутствие специализированных коммуникаций) и обеспечение гибкости производства за счет размещения источников материалов непосредственно в оборудовании.
- Кардинальное уменьшение стоимости оборудования за счет минимизации размеров, унификации систем загрузки-выгрузки, увеличения серийности.

Предполагалось, что удастся реализовать все необходимое оборудование в едином форм-факторе, с таким

работы одна операция в минуту (рис. 3). Производственные линии должны были выстраиваться в виде конвейера под требуемый производственный маршрут изделия, при переходе на другое изделие с другим маршрутом – перестраиваться. Это должно было обеспечить эффективную производственную логистику.

Проект показал жизнеспособность основных идей. Был реализован полный комплект оборудования (под нормы 0,8 мкм с перспективой доведения до 100 нм). КМОП-процесс «разворачивался» на неподготовленных площадях (выставки, конференции) за два дня и функционировал в условиях большого потока людей.

Для развития и коммерциализации результатов проекта был организован консорциум производителей оборудования, в который вошли все и только (!) японские производители оборудования для микроэлектроники. В 2018 году было произведено несколько коммерческих инсталляций в исследовательских центрах по всему миру.

Тем не менее, производств на базе этой концепции реализовано не было, несмотря на заявленную готовность к этому с 2019 года. Причиной видится неудача в реализации принципа «оборудование стандартного

формфактора с циклом одна минута», который был ключевым для формирования производственного «конвейера» – единственной возможности для достаточно эффективной реализации транспортной функции. Не все технологии могут быть уложены в эти параметры, что разрушает заложенную концепцию построения производств.

СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МИНИФАБОВ И ТРАДИЦИОННЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Сравним три концепции реализации микронэлектронных производств: мега-фабрики – традиционные производства микроэлектроники, минифабы на базе оборудования традиционных производств (типа HALCA) и проект Minimal Fab.

Для сравнения выберем критерии, отражающие объем инвестиций, масштабы производств, стоимость и скорость развития (рис. 4).

Из приведенных профилей видно, что при сокращении требуемых объемов инвестиций, «традиционные» минифабы практически не дают выигрыша по параметрам, определяющим скорость и стоимость развития. В действительности они даже проигрывают, так как «стоимость инноваций», являющаяся, по сути, стоимостью новой единицы оборудования, в относительном масштабе для них выше, чем для мегафабов.

Профиль концепции Minimal Fab практически зеркальный, относительно традиционных производств. Это значит, что ее характеристики существенно отличаются, и она может «отстраиваться» от конкуренции с традиционными производствами. Существенными видятся преимущества в части стоимости и скорости развития.

ПРОЕКТ FAB 100/150

Проект FAB 100/150 реализуется в России с 2020 года в рамках комплексного проекта по соглашению о субсидии № 020-11-2020-1894. Концепция проекта сформирована с учетом результатов проекта Minimal Fab и SWOT-анализа состояния микроэлектроники в РФ.

Основные положения концепции описаны ниже.

- Применение пластин диаметром 100/150 мм:
 - размер достаточен для требуемых масштабов производств сегодня и в перспективе;
 - в этом размере доступны практически все «новые»

материалы, что позволяет максимально унифицировать оборудование по областям применения = повысить серийность его выпуска = повысить качество и снизить стоимость;

- обеспечивается относительная простота и низкая стоимость разработки и производства оборудования, материалов;
- обеспечивается относительно низкая стоимость разработки новых изделий, исследований, учебных работ.
- Применение герметичных контейнеров с NFC-метками (контейнеры «Гермикон»):
 - снижение требований к инфраструктуре = снижение стоимости и увеличение скорости развития;
 - идентификация и отслеживание каждой пластины = предпосылки к реализации производств «Индустрии 4.0»;
 - возможность обработки пластины в разных учреждениях и предприятиях = снижение барьеров взаимодействия предприятий и учреждений, эффективное использование развернутой производственной и исследовательской структур.
- Стандартизированные модули загрузки-выгрузки:
 - снижение стоимости разработки и производства оборудования;
 - обеспечение и контроль уровня технической реализации оборудования;

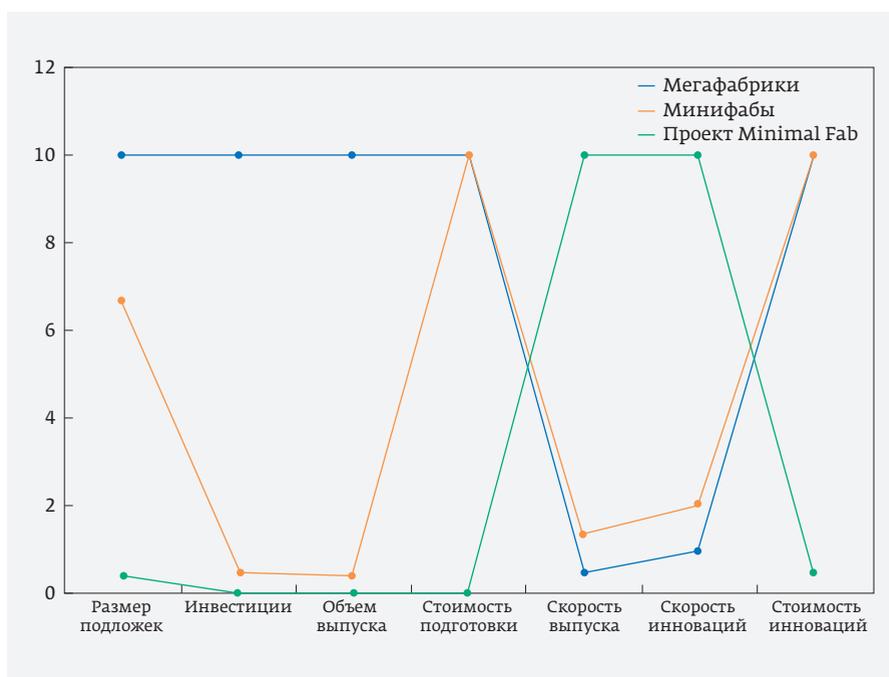


Рис. 4. Сравнительные профили трех концепций производств



Рис. 5. Контейнер «Гермикон»

- снижение барьеров участия и вовлечение научных учреждений в разработку и развитие оборудования и технологий;
- увеличение скорости и снижение стоимости развития.

Согласно концепции оборудования FAB 100/150 предполагается четыре сценария его использования.

1. В составе традиционных производств без применения герметичных контейнеров. Оборудование применяется без герметичного контейнера для работы с пластинами 100 и 150 мм. Может оснащаться кассетной загрузкой. Позволяет модернизировать существующие производства, обеспечить плавный переход на работу с герметичным контейнером.



Рис. 6.
Установка контроля привнесённой дефектности серии Aura

2. В исследовательских и учебных учреждениях. Ручная установка контейнеров «Гермикон» на оборудование, перемещение единичных контейнеров между единицами оборудования операторами. Позволяет оснащать исследовательские и учебные учреждения с минимальными затратами на развертывание и эксплуатацию.
3. В мелкосерийных и опытных производствах. Кассетная автоматизированная загрузка контейнеров «Гермикон» на оборудование. Перемещение контейнеров между единицами оборудования вручную в кассетах по 6–12 шт. Позволяет реализовывать мелкосерийные производства.
4. В среднесерийных и массовых производствах. Перемещение контейнеров «Гермикон» гибкими конвейерными системами по индивидуально заданным маршрутам с автоматизированной загрузкой на оборудование. Позволяет реализовывать эффективные гибкие «безлюдные» производства с минимальными сроками и затратами на производство как единичных изделий, так и крупных партий.

В настоящее время работы в рамках проекта FAB 100/150 ведут ООО «Квант» и ООО «Стратегические Нанотехнологии». Основной целью проекта является разработка базовых решений и организация выпуска базовых компонентов платформы – контейнера и модулей загрузки-выгрузки.



Рис. 7.
Установка травления фоторезиста серии Vega



Рис. 8. Установка физического осаждения многослойных структур серии Feba с роботизированным модулем кассетной загрузки-выгрузки

В перечень оборудования, которые разрабатываются в рамках проекта, входит:

- герметичный контейнер (рис. 5);
- однопозиционный атмосферный модуль загрузки-выгрузки (АМЗВ);
- однопозиционный вакуумный модуль загрузки-выгрузки (ВМЗВ);
- многопозиционный вакуумный модуль загрузки-выгрузки (ВМЗВМП);
- установка контроля привнесенной дефектности (серия Auga) (рис. 6);
- установка травления фоторезиста в удаленной плазме (серия Vega) (рис. 7);
- установка многослойной металлизации (серия Feba) (рис. 8);
- установка CVD-осаждения покрытий (серия Clio);
- установка PVD-осаждения покрытий (серия Gera);
- установка плазмохимического травления (серия Keto).

В настоящий момент ведется выпуск опытных партий контейнера, модулей загрузки-выгрузки, установки контроля привнесенной дефектности Auga и установки травления фоторезиста Vega. Плановый срок готовности демонстрационных образцов – март 2024 года.

ЛИТЕРАТУРА

1. Industries of the Future Institutes: A New Model for American Science and Technology Leadership. A report to the President of the United States of America // The President's Council of Advisors on Science and Technology. 2021.

2. Study on the Electronics Ecosystem: Overview, Developments and Europe's Position in the World // Decision. 2020.
3. **Шиллер В., Шпак В.** Независимость российской электроники от импорта – необходима и возможна // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2016. № 6.
4. Mini versus mega // <https://www.edn.com/mini-versus-mega/>.
5. Minifabs would suit UK, says DTI // <https://www.electronicweekly.com/news/research-news/process-rd/minifabs-would-suit-uk-says-dti-2005-05/>.
6. **Велихов Е., Валиев К., Бетелин В.** 0,35-мкм КМОП-процесс в России – в 2004 году // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2004. № 3.
7. <https://www.futrFab.com>.
8. <https://minimalfab.ru>.
9. **Хисамов А.** СТО нового формата для малых полупроводниковых производств как путь конкурентоспособного развития микроэлектроники в РФ // Материалы 5-й Международной научной конференции «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули». Международный форум «Микроэлектроника 2019». М.: ТЕХНОСФЕРА. 2019. С. 519–524.
10. Технологии для высокоэффективных процессов электронной литографии // <https://www.osp.ru/>

ООО «Руднев-Шиляев»

Разработка и создание измерительных систем и программного обеспечения

01 разработка измерительных систем по техническому требованию Заказчика

02 разработка и производство приборов

03 помощь в составлении технического задания Заказчика

04 разработка программно-аппаратного обеспечения по ТЗ Заказчика

05 производство измерительных систем

06 сертификация измерительных систем и приборов

<https://rudshel.ru/>
<https://pcboards.ru/>

125130, г. Москва, ул. Клары Цеткин, д. 33, корп. 35
e-mail: adc@rudshel.ru | тел./факс: (495) 787-6367; 787-6368