

МИНИ-ФАБРИКИ MINIMAL FAB ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА И СБОРКИ ЧИПОВ ПРОДОЛЖАЮТ СВОЮ РЕВОЛЮЦИЮ

ДМИТРИЙ БОДНАРЬ, к.т.н., генеральный директор, АО «Синтез Микроэлектроника»

С 11 по 15 декабря 2017 г. по приглашению и при поддержке компании «Токио Бэжи (Рус)» группа российских специалистов, в которую входил и автор настоящей статьи, посетила в Токио компанию Yokogawa и выставку SEMICON Japan 2017. Одной из целей поездки являлось ознакомление с компактными, высокоманевренными мини-фабриками для производства микроэлектронных чипов.

Почти три года назад я опубликовал статью о революционной концепции мини-фабрики и текущих результатах на 2014 г. [1]. Основой статьи послужили открытые материалы, доступные в то время в интернете. После опубликования статьи мне пришлось много общаться, отвечать на вопросы специалистов и потенциальных пользователей. Среди них были и те, кто полагал, что в России необходима и возможна разработка, а также создание подобной мини-фабрики. Я сформулировал свое отношение к этой идее в [2].

Через три года мне представилась возможность ознакомиться с действующей линией микроэлектронного производства Minimal Fab, полностью подтвердившей свои претензии на революционный подход. Идеологом этой концепции является доктор Широ Хара (Shiro Hara) из Национального института современных промышленных исследований и технологий (AIST). С 2012 г. эти работы ведутся при поддержке японского правительства, которому удалось привлечь в проект ведущие японские машиностроительные компании. Японскому правительству и AIST удалось убедить их, что миниатюризация оборудования в рамках новой концепции будет в интересах самих компаний и всей японской микроэлектроники. Участие в проекте таких компаний как DISCO, SPP (SPTS), PMT, FUJI и др. позволило за короткий срок создать действующее оборудование Minimal Fab для конкретных технологических процессов. И это является лучшим ответом тем пессимистам, которые считают Minimal Fab «игрушкой для студентов». Хотя таких пессимистов становится все меньше.



Рис. 1. Оборудование Minimal Fab работает без чистых комнат

Проект Minimal Fab ориентирован на создание прототипов и мелкосерийное производство интегральных

микросхем, МЭМС, изделий силовой электроники (MOSFET, IGBT, драйверов и др.), оптоэлектронных приборов



Рис. 2. Кассета с пластиной диаметром 0,5 дюйма

на разных материалах (Si, SiC, GaAs, GaN). Он не является конкурентом крупным фабам при массовом производстве, однако избавляет их от рутинных работ при создании пилотных прототипов для разработки новых изделий и мелкосерийного производства. Крупные фабы для этих целей применяют шаттлы (shuttles, или Multi Project Wafers – MPW), которые объединяют на одной пластине проекты разных клиентов. В итоге клиент получает десятки чипов, вырезанных с одной пластины. В первую очередь, именно проектам MPW и будет создавать конкуренцию Minimal Fab. Однако на современных зарубежных мегафабах на MPW приходится очень небольшая доля в объеме оборота компаний, а с кристаллами БИС размером выше 12×12 мм, выполненным по проектным нормам менее 0,1 мкм, Minimal Fab пока не в состоянии конкурировать.

Наиболее частым вопросом, который задают создателям Minimal Fab специалисты, в т. ч. автор настоящей статьи, является возможность увеличения диаметра пластин. Создатели Minimal Fab отвечают, что для компактной линии диаметр 0,5 дюйма является оптимальным. В противном случае пришлось бы увеличить размеры оборудования, что изменит всю концепцию. И все-таки у меня такой ответ вызывает сомнения. Время покажет, сможет ли американский проект Protofab на пластинах два дюйма составить конкуренцию Minimal Fab [1]. Хотя на мой прямой вопрос, видят ли японцы кого-нибудь в качестве конкурентов Minimal Fab, включая американский проект Protofab, они отвечают, что конкурентов нет. И в качестве резонного аргумента против повышения диаметра пластин сообщают, что Toyota уже в течение 10 лет безуспешно пытается реализовать производство на пластинах размером в один дюйм. Авторы проекта Minimal Fab приводят его основные параметры в сравнении с крупными мегафабами (см. табл.). В ближайшее время линии Minimal Fab будут проданы и запущены в следующих странах:

- Япония – 3 шт. в 2017–2018 гг., 4 шт. – в 2019 г.;
- Англия, Тайвань – 2 шт. в 2018 г.;
- Россия – 1 шт. в 2018 г.

Во все дни работы выставки SEMICON Japan 2017 самая ее большая по площади и наполнению экспозиция Minimal Fab напоминала гудящий улей. На ней было представлено более 50 типов оборудования практически по всем технологическим процессам полупроводникового производства, метрологии, сборки в пластмассовые корпуса. Посетители шли непрерывным потоком. Очевидно, что создатели Minimal Fab намерены в миниатюре воспроиз-



Рис. 3. Корпус WLP BGA является завершающим продуктом Minimal Fab

Таблица. Основные параметры Minimal Fab в сравнении с крупными мегафабами

Мегафаб		Minimal Fab
3–5 млрд долл.	Инвестиции	5–20 млн долл.
1–2 мес.	Время цикла	1 день – 1 неделя
12 дюйм.	Размер пластин	0,5 дюйма
1,4–3,5 млн чипов/мес.	Производительность	10–40 тыс. чипов/мес.
200×200 м	Размер производства	20×20 м
Да	Наличие чистых комнат	Нет

вести каждый из технологических, контрольных, метрологических процессов, применяемый в настоящее время для пластин большого диаметра. Текущее состояние оборудования Minimal Fab следующее.

Эпитаксия. Оборудование для эпитаксиального наращивания Si, GaN находится на завершающей стадии.

Фотолитография. Реализован полный цикл безмасочной фотолитографии с проектными нормами до 0,5 мкм. Оборудование для нанесения фоторезиста, экспонирования, проявления готово к продажам. По нашей просьбе в лаборатории компании Yokogawa нам за несколько минут продемонстрировали создание рисунка на пластине 0,5 дюйма. Отработана методика безмасочной электронно-лучевой литографии с разрешением 0,1 мкм. Это оборудование появится в 2018 г.

Отмывка. Доступно оборудование по трем видам отмывки.

Окисление. Доступно оборудование для окисления с использованием термического, лучевого, лазерного нагрева.

Осаждение CVD. Доступно оборудование PECVD (TEOS) для SiO₂, PECVD для SiN. LPCVD для поли-Si, Si₃N₄ находится в завершающей стадии.

Диффузия и ионная имплантация. Доступно оборудование для диффузии при температуре до 1100°C. Ионная имплантация B, P, As с энергиями до 60 кэВ находится на завершающей стадии. Дальнейшее повышение энергии потребует увеличения габаритов установки. В настоящее время компания Yokogawa реализует гибридную идеологию за счет применения высокоэнергетического имплантера для пластин 100 мм. При этом на 100-мм носитель устанавливаются 20 пластин диаметром 0,5 дюйма.

Травление. Доступно оборудование для жидкостного химического травления SiO₂, Al, Cu и плазменного травления металлов, диэлектриков. Отдельно следует отметить реализацию процесса глубокого травления канавок в кремнии с помощью процесса Bosch. Этот процесс применяется в технологии КМОП и в чипах 3D ИС.

Удаление фоторезиста. Доступно оборудование для жидкостного и плазменного снятия фоторезиста.

Напыление. Доступно оборудование для магнетронного напыления Al, Cu. На завершающей стадии находится процесс и оборудование с тремя магнетронами для PVD-напыления в одном вакуумном цикле Ti, TiN, Al.

Термообработка. Доступно оборудование для термической обработки в диапазоне 100–1100°C с помощью резистивного, лучевого и лазерного нагрева.

Химико-механическая полировка (CMP). Доступно оборудование для полировки и планаризации.

Метрология и контроль. Доступно оборудование для оптического контроля толщины пленок, сканер для контроля дефектности пластин и электронный микроскоп. Завершаются работы по оборудованию для элементного анализа материалов.

Для меня особенно приятной и неожиданной была реализация технологических процессов и оборудования для электрохимического осаждения меди и сборки в пластмассовые корпуса BGA.

Электрохимическое осаждение Cu. Этот процесс является сложным даже для пластин большого диаметра. Он необходим как для формирования шариковых выводов на пластине под сборку flip-chip, так и для процесса 3D-сборки. Этот процесс уже доступен.

Сборка на уровне пластин WLP BGA.



Рис. 4. Установка безмасочной литографии



Рис. 5. Установка монтажа чипов flip-chip

Этого я никак не ожидал увидеть, но на выставке было представлено оборудование для:

- шлифовки обратной стороны (Grinder);
- резки по процессу DBG (Dicing Before Grinding) (резка до шлифовки);
- напайки чипов;
- монтажа шариковых выводов;
- герметизации пластмассой (Compression Molding).

Имеющееся оборудование позволяет выполнять 3D-сборку, что является удивительным с учетом того, что такой процесс не так давно появился для пластин большого диаметра.

Все оборудование Minimal Fab имеет три режима: настройки, ручной и автоматический.

Таким образом, согласно текущей концепции мини-фабрика Minimal Fab позволяет не только реализовать полный цикл создания чипов, но и выполнять сборку в современные BGA-корпуса с шариковыми выводами и 3D-сборку. Весь цикл, начиная с изготовления чипа и заканчивая получением корпусированного прибора, составив около одной недели. Несколько лет назад это казалось фантастикой, а сейчас стало действительностью. Еще в 2015 г. японская компания PMT Corporation с помощью гибридных процессов и оборудования Minimal Fab первой в мире начала производить светодиоды голубого свечения с GaN на сапфировых подложках.

Кроме большой маневренности, низкой цены, короткого времени цикла преимуществом Minimal Fab является возможность наращивания состава линии от простого к сложному. Приобретая дополнительные установки в технологическую линию, можно усложнять изготавливаемые продукты, начиная с более простых МЭМС, светодиодов и заканчивая сложными 3D ИС. В отличие от мегафабов, где невозможно ежедневно выключать оборудование, Minimal Fab не требует круглосуточной работы и может работать в односменном режиме.

Но японцы не были бы японцами, если бы не продумывали весь путь от идеи до практической реализации. Понимая, что каждый из участников проекта Minimal Fab должен глубоко и профессионально решать свою конкретную задачу, они заранее позаботились о сервисной составляющей проекта. Этой стороной проекта занимается компания Yokogawa. В ней созданы два отдела по Minimal Fab для демонстрации возможностей мини-фабрики, обучения и сервисного обслуживания по всему миру, аудита и сертификации. Колл-центр работает круглосуточно всю неделю.

Очень любопытно было наблюдать, как на наших глазах последовал звонок от клиента, у которого возникли проблемы. Экран монитора загорелся желтым цветом, обозначающим наличие проблемы. В процессе общения оператора с клиентом и выяснения сути проблемы к разговору подключился специалист, а цвет экрана плавно стал меняться от желтого цвета к зеленому, сигнализирующему об устранении проблемы. Весь процесс занял около



Рис. 6. Участники переговоров – представители компаний Yokogawa, Токио Боеки, МИЭТ, «Синтез Микроэлектроника»

четырёх минут, но экран так и не загорелся красным цветом, свидетельствующим об усилении проблемы. Замечу, что на всем оборудовании Minimal Fab устанавливаются датчики безопасности Yokogawa, которые в режиме онлайн передают информацию в ее сервисный центр о состоянии и проблемах с оборудованием.

Об умении японцев организовывать мероприятия и продумывать все мелочи свидетельствуют некоторые мои наблюдения на выставке. При регистрации через интернет посетители SEMICON JAPAN получают бейджик с соответствующим штрих-кодом. При входе на выставку этот штрих-код считывается сканером у каждого посетителя. Таким образом, с высокой точностью известно количество и состав посетителей. При посещении павильона любой компании сканер считывает с бейджа информацию о посетителе. Нет необходимости записывать реквизиты посетителя, хотя визитную карточку у специалиста попросят, чтобы выяснить, с кем они беседуют. А дальше еще интереснее.

Когда на стенде компании Hitachi Kokusai Electric я заинтересовался оборудованием, специалисты японской компании отсканировали штрих-коды оборудования каждого интересующего меня типа и сообщили, что электронные файлы будут направлены на мой электронный адрес через несколько дней автоматически без участия специалистов. При этом посетитель может задать любые вопросы и получить также бумажные версии этих документов. Отдельных комплиментов заслуживает организация питания посетителей и участников выставки. Большое количество пунктов питания

по приемлемым ценам (не напоминая номера телефонов) экономят время и деньги посетителей.

И все-таки одну ложку дегтя в бочку меда можно добавить. У большинства компаний, участвовавших в выставке, рекламные и технические материалы были представлены на японском языке. Хотя это можно понять, если учесть, что мероприятие SEMICON JAPAN является, в первую очередь, внутриазиатской выставкой, где приоритет отдается отечественным участникам и посетителям. И тех, и других в Японии большое количество, а для зарубежного продвижения существуют аналогичные выставки в Европе, США, других странах Азии.

Рискну сделать прогноз: в ближайшие два-три года крупные зарубежные мегафабы закупят Minimal Fab для использования в качестве альтернативы MPW на пластинах большого диаметра. И одной из первых может стать фаундри-компания TSMC.

По-другому могут повести себя российские производители чипов. Учитывая тотальную недозагруженность предприятий всех производителей, фактор создания конкуренции может оказаться главным в их оценках. И мы рискуем услышать о Minimal Fab отзывы вроде уже упомянутого «игрушка для студентов» или «мыльный пузырь». От некоторых производителей я уже слышал нечто подобное. Однако хочется напомнить, что совсем недавно именно этими словами «крупные эксперты» из «Газпрома» называли проекты по сланцевой нефти и газу. Но сланцевые продукты есть, а этих экспертов больше не слышно. Возможно, не следует торопиться с оценками, тем более когда речь идет о японской технике.

В России первая линия Minimal Fab должна появиться в июле 2018 г. Вероятнее всего, она будет работать в режиме foundry. У многих дизайн-центров появится отличная возможность за несколько недель получить пилотные образцы и подтвердить их годность. Если это не революция, то что это?

А вот некоторые российские разработчики, заказчики микросхем и приборова наверняка захотят закупить и запустить у себя Minimal Fab в надежде повысить свою маневренность и независимость. И я даже знаю имена этих заказчиков. Такая возможность им может быть предоставлена при условии, что в этот процесс не вмешаются санкции. Пока что встречи японских руководителей компаний и специалистов с российскими специалистами оставили о нас хорошее и уважительное впечатление. Японцы высоко отзываются об уровне компетенции наших специалистов. Надеемся, что это впечатление не будет испорчено у японских коллег после встреч с нашими чиновниками.

Автор выражает признательность за поддержку и организацию визита в Японию руководителям и специалистам ООО «Токио Боеки (Рус.)» – генеральному директору Такигава Кэйдзи, заместителю генерального директора Дмитрию Юрковцу, менеджеру по продажам Виталию Тинькову. ▬

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитрий Боднар. Новый формат компактных кремниевых фабрик – решение для микроэлектроники России. *Электронные компоненты*. 2015. № 3.

2. Дмитрий Боднар. Нужно ли создавать российскую кремниевую мини-фабрику? *Электронные компоненты*. 2016. № 3.