

# Современные технологии изготовления чипов и сборки в полупроводниковой микроэлектронике

Дмитрий БОДНАРЬ,  
к. т. н.  
bodnar@syntezmicro.ru

В настоящей статье рассмотрены некоторые основные современные технологии изготовления чипов и сборки, по которым за рубежом ведется промышленное производство интегральных микросхем и дискретных полупроводниковых приборов и которые могут быть интересны российским клиентам. Сжатый формат публикации не позволяет отразить в этом материале перспективные технологии, находящиеся в стадии исследований.

Мировой рынок полупроводников увеличился с \$33 млрд в 1987 г. до ожидаемых \$300 млрд в 2010-м, продемонстрировав девятикратный рост. Однако за эти 23 года трижды — в 1996,

2001 и 2008 гг. — наблюдалась тенденция к снижению показателей (рис. 1) [1].

Региональные показатели за последние семь лет имеют четкую тенденцию к уменьшению доли Америки, Европы и Японии

за счет быстрого увеличения доли Китая, «захватившего» в 2009 г. более 1/3 мирового рынка полупроводников (рис. 2) [2].

Бурный рост микроэлектроники в Юго-Восточной Азии, начавшийся в начале 90-х годов со сборочного производства бытовой техники и ИЭТ, сменился строительством и повышением производительности кремниевых фабрик (рис. 3) [3].

За восемь лет (с 2000 по 2008 гг.) эквивалентная производительность в пересчете на 200 мм пластин в месяц выросла в Китае на 1105%, Южной Корее — на 369%, Тайване — на 268%. Основную долю в производительности кремниевых фабрик составляют пластины 8" и 12" с проектными нормами менее 80 нм (табл. 1) [4].

Увеличение производительности кремниевых фабрик может быть достигнуто переходом на диаметр пластин 450 мм, и эксперты планируют осуществить его в период

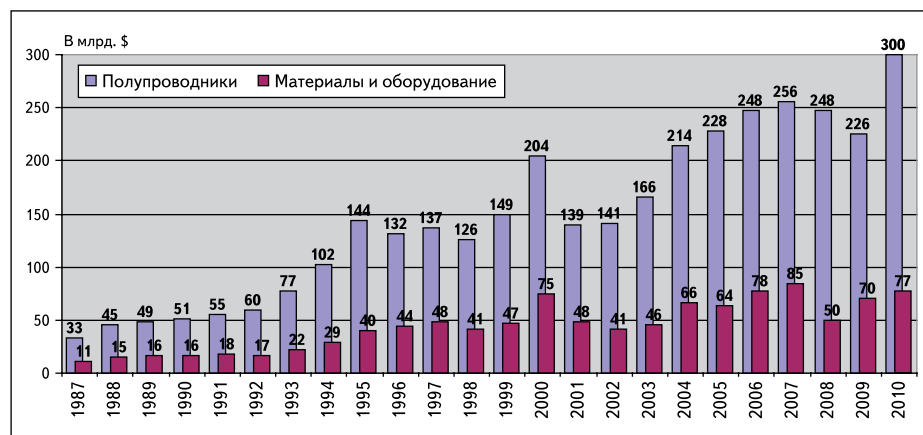


Рис. 1. Динамика мирового рынка полупроводников 1987–2010 гг. (Источник: SEMI/WSTS)

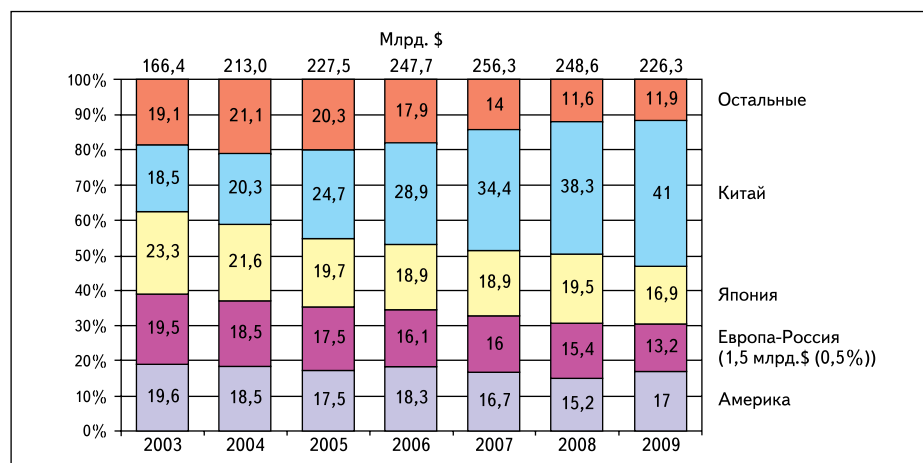


Рис. 2. Мировой рынок полупроводников 2003–2009 гг. по регионам

Таблица 1. Производительность кремниевых фабрик в зависимости от геометрии рисунка и размера пластин (за 2009 г.)

|                                  | Запуск Китай, тыс. пл./мес | %  | Мировой запуск, тыс. пл./мес | %  |
|----------------------------------|----------------------------|----|------------------------------|----|
| <b>Общее количество</b>          | 1744,2                     |    | 18 572,4                     |    |
| <b>По геометрии, мкм</b>         |                            |    |                              |    |
| ≥0,7                             | 384,5                      | 22 | 2 463,4                      | 13 |
| 0,4–0,7                          | 120,3                      | 7  | 1047,2                       | 6  |
| 0,3–0,4                          | 153,6                      | 9  | 1138                         | 6  |
| 0,2–0,3                          | 30,6                       | 2  | 1018,3                       | 5  |
| 0,16–0,2                         | 190                        | 11 | 900,9                        | 5  |
| 0,12–0,16                        | 150                        | 9  | 1559,6                       | 8  |
| 0,08–0,12                        | 276,5                      | 16 | 1299,7                       | 7  |
| <0,08                            | 438,8                      | 25 | 8603,3                       | 46 |
| N/A                              | 0                          | 0  | 542                          | 3  |
| <b>По диаметру пластин, дюйм</b> |                            |    |                              |    |
| ≥4                               | 178,7                      | 10 | 858,4                        | 5  |
| 5                                | 149,8                      | 9  | 804,7                        | 4  |
| 6                                | 330,5                      | 19 | 2610,5                       | 14 |
| 8                                | 615                        | 35 | 5970,1                       | 32 |
| 12                               | 470,3                      | 27 | 8328,7                       | 45 |



Рис. 3. Тенденции производительности кремниевых фабрик по регионам (Источник: SEMI World Fab Watch, 2008)

вались как устаревшие, а менее 65 нм — как не слишком актуальные в настоящий момент для наших разработчиков. Наиболее массовым и применяемым является CMOS-процесс. Условно, в зависимости от материала, он разделяется на три категории:

- CMOS на объемном Si;
- CMOS на SiGe;
- CMOS на SOI (кремний на изоляторе).

Классические процессы CMOS на объемном Si характеризуются рабочими напряжениями 1–120 В, наличием от двух уровней поликремния и 2–10 уровней металла из Al и Cu на пластинах 6", 8" и 12". В последние годы хорошо развиваются CMOS- и BiCMOS-процессы на SiGe, в первую очередь, для коммуникационных систем, где требуется работа на высоких частотах и с высоким быстродействием [8]. Процесс CMOS SOI востребован для продуктов экстремального применения с температурой перехода до +225 °С и высокой радиационной стойкостью (до 1,2 Мрад) [9].

В настоящее время безусловными лидерами по разработке новых CMOS-процессов по 32-, 45-, 65-нм технологиям являются американские компании Intel, IBM, GlobalFoundries, но в то же время значительный производственный потенциал сосредоточен на кремниевых предприятиях Юго-Восточной Азии (TSMC, Samsung). Однако,

с 2012 по 2016 гг. Затраты на строительство кремниевой фабрики для производства 450-мм пластин составят \$10 млрд, а увеличение производительности на диаметре 300 мм — \$4 млрд. Однако переход на 450 мм снижает стоимость чипа на 30% [5]. Несмотря на гигантские затраты и пессимизм некоторых экспертов в целесообразности такого шага, корпорация Intel подтвердила планы по созданию производства на пластинах диаметром 450 мм [6].

Учитывая тенденцию смещения всего полупроводникового производства в Юго-Восточную Азию, становится понятным, где в ближайшие годы будет всемирная фабрика микроэлектроники (рис. 4) [7].

В таблице 2 представлена дорожная карта современных техпроцессов микроэлектроники с проектными нормами от 65 нм до 0,8 мкм. Биполярные процессы и проектные нормы свыше 1 мкм не рассматри-

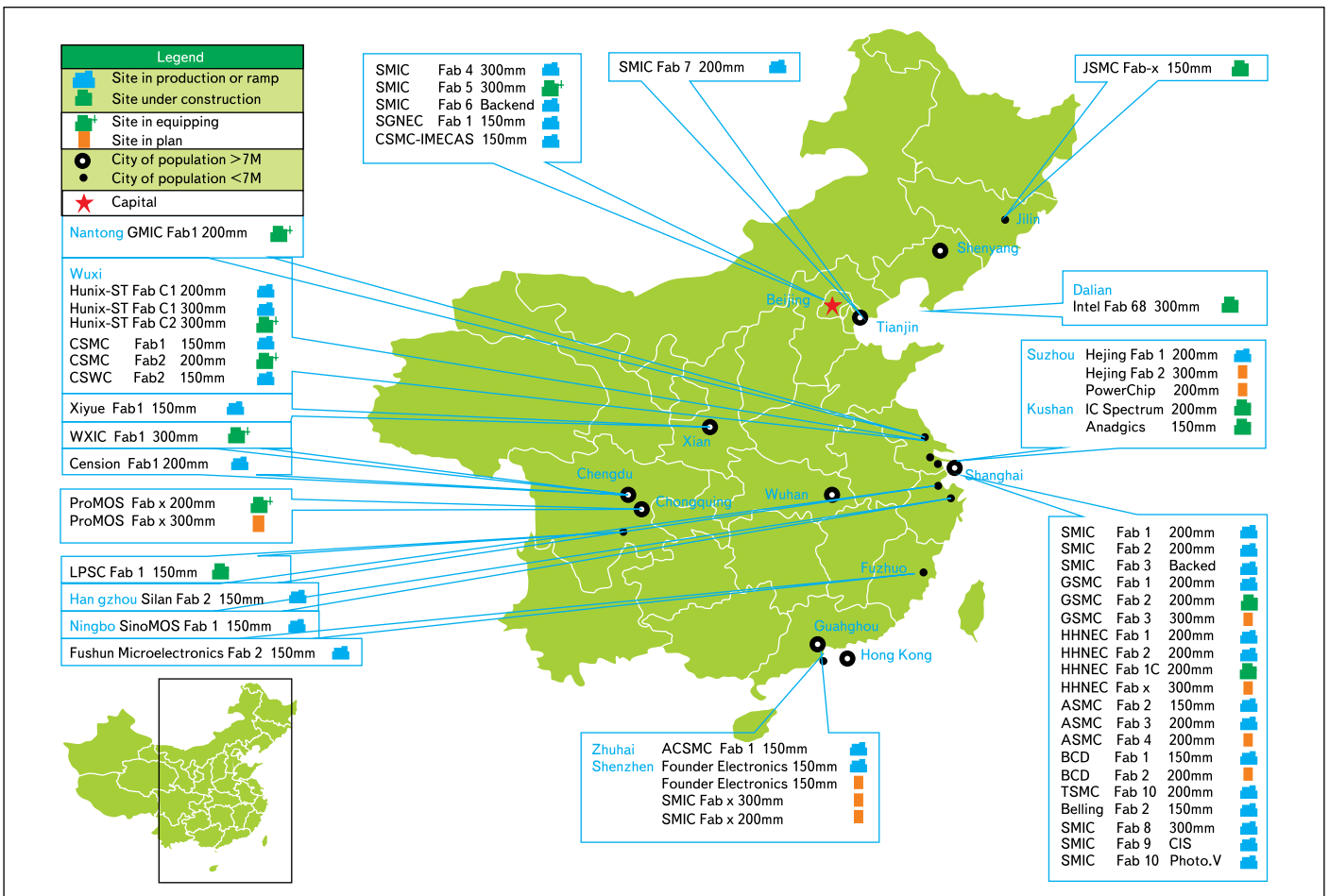


Рис. 4. Кремниевые фабрики Китая

Таблица 2. Техпроцессы Wafer Foundry ИС

| BCD    |                         |                      | 2P5M SOI 8"               |                            | 2P3M SOI 8"                |                            | 2P3M SOI 6"            |                        | 2P2M SOI 6"             |                         |
|--------|-------------------------|----------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
|        | 1P4M Si 12"             | 2P5M Si 8"           | 1,8/3,3/100 B             | 1,8/3,3/5/12-50 B          | 2,5/3,3/8-100 B            | 3,3/5-12/40-700 B          | 3,3/5/60-150 B         | 3,3/5/8-40 B           | 3,3/5/300 B             | 3,3/5/40 B              |
| CDMOS  |                         |                      | 2P5M Si 8"                |                            | 2P4M Si 8"                 |                            | 2P3M Si 8"             |                        | 2P3M Si 6"              |                         |
|        |                         |                      | 1,8/5/24 B                |                            | 2,5/3,3/100 B              |                            | 3,3/5/30-100 B         |                        | 5/12/60 B               |                         |
| BiCMOS |                         |                      | 2P6M SiGe 12"             |                            | 2P4M SiGe 8"               |                            | 2P4M SiGe 8"           |                        | 2P3M SiGe 6"            |                         |
|        |                         |                      | 1,2/3,3 B                 |                            | 1,8/3,3 B                  |                            | 2,5/3,3 B              |                        | 3,3/5 B                 |                         |
| CMOS   | 2P10M SOI 12"           | 2P9M SOI 12"         | 2P6M SOI 8"               | 2P5M SOI 8"                | 2P3M SOI 8"                | 2P4M SOI 8"                | 2P3M SOI 6"            | 2P2M SOI 6"            | 2P2M SOI 6"             | 2P2M SOI 6"             |
|        | 12/2,5/5 B              | 12/2,5/5 B           | Rad Hard<br>1,8/2,5/3,3 B | Rad Hard<br>1,8/3,3/5-40 B | Rad Hard<br>2,5/3,3/5-60 B | Rad Hard<br>2,5/3,3/5-65 B | Rad Hard<br>3,3/5-40 B | Rad Hard<br>3,3/5/25 B | Rad Hard<br>3,3/5/300 B | Rad Hard<br>3,3/5/300 B |
|        |                         |                      |                           | 2P5M SiGe 8"               | 2P4M SiGe 8"               | 2P4M SiGe 8"               | 2P3M Si 6"             | 2P2M Si 6"             | 2P2M Si 6"              | 2P2M Si 6"              |
|        |                         |                      | 1,8/3,3 B                 | 1,8/3,3 B                  | 2,5/3,3 B                  | 3,3/5 B                    | 3,3/5-40 B             | 3,3/5-40 B             | 3,3/5-40 B              | 5/30 B                  |
|        | 2P9M Si 12"             | 2P9M Si 12"          | 2P6M Si 8"                | 2P6M Si 8"                 | 2P5M Si 8"                 | 2P4M Si 8"                 | 2P3M Si 6"             | 2P2M Si 6"             | 2P2M Si 6"              | 2P2M Si 6"              |
|        | 1-1,2/1,5/1,8-2,5/3,3 B | 1-1,2/1,8-3,3/5-30 B | 1,2/2,5/3,3/5-12 B        | 1,8/3,3/5-32 B             | 2,5/3,3/18-40 B            | 3,3/5 B                    | 3,3/5/12-120 B         | 3,3/5/12-120 B         | 3,3/5/12-120 B          | 3,3/5/12-120 B          |
|        | 65 нм                   | 90 нм                | 0,13-0,15 мкм             | 0,18 мкм                   | 0,25 мкм                   | 0,35 мкм                   | 0,5-0,6 мкм            | 0,5-0,6 мкм            | 0,8 мкм                 | 0,8 мкм                 |

Проектные нормы

**Примеры сокращений:** 1,8/3,3/5-40 В — рабочее напряжение; 2P6M — два поликремния, шесть уровней металла; Si, SiGe — материал подложки или эпилленки; SOI — кремний на изоляторе; 8" — диаметр пластин; Rad Hard — радиационно стойкая технология.

высокая стоимость разработки, освоения и производства СБИС с нормами менее 45 нм вынуждают многие компании отказаться от организации таких производств или объединить усилия для создания подобных предприятий [10]. Даже Intel пришлось заняться foundry-услугами, чтобы окупать затраты на новые субмикронные технологии, а IBM, по сведениям Gartner, отказывается от развития передовых технологий современного производства и снижает траты на их разработку и освоение [11]. По процессам CMOS SOI, так как они активно применяются в обо-

ронной промышленности, основной научный и производственный потенциал сосредоточен в американских и европейских компаниях, а что касается Rad Hard CMOS SOI, то эта сфера полностью им принадлежит.

В идентичном направлении развиваются процессы BiCMOS, CDMOS и BCD. Они являются наиболее интересными для продуктов силовой, автомобильной, телевизионной электроники и представляют собой следствие интеграции на одном чипе возможностей CMOS+Bipolar+DMOS-технологий. При прочих равных условиях наиболее технически сложными и дорогостоящими являются BCD-процессы. Для проектирования таких микросхем первостепенное значение приобретает наличие хороших библиотек, предоставляемых в режиме wafer foundry заказчиком. Если у американских и европейских компаний библиотеки и сервис находятся на хорошем уровне, то у азиатских и, особенно, китайских они отстают от производственных возможностей. Но в последние годы этот разрыв сокращается.

Основные области применения техпроцессов микроэлектроники представлены в таблице 3.

Особенно следует отметить новые процессы для дискретных полупроводниковых приборов — Trench MOSFET, Schottky, IGBT и LDMOS (табл. 4). В эти технологии интегрируются современные возможности изготовления микросхем:

- 0,35-0,4 мкм проектные нормы;
- Trench-технологии;
- многоуровневые межсоединения;
- прецизионное утонение пластин до 100 мкм.

Не случайно, что постоянное развитие таких продуктов происходит в компаниях, выпускающих СБИС (ST, Infineon, Philips).

Заслуживают внимания процессы изготовления дискретных приборов и ИС на SOI с температурой перехода +225 °С, предназначенные

для экстремального и военного применения. Здесь безусловным мировым лидером является американская компания Honeywell [9].

В дополнение к классическим материалам Si и GaAs, в производстве дискретных полупроводниковых приборов начали применяться новые материалы — SiC и GaN, позволившие значительно улучшить статические, динамические и температурные параметры. Ограничения диаметра и высокая стоимость пластин SiC, несмотря на выдающиеся параметры приборов, созданных по этой технологии, пока позволяют применять их только в качестве экстремальных продуктов или в устройствах, где быстродействие и КПД являются безальтернативными требованиями, например в схемах коррекции коэффициента мощности [12]. Несомненно, что по мере улучшения экономических показателей они начнут вытеснять кремневые приборы среди диодов Шоттки, MOSFET, IGBT, RF MOSFET и LDMOS. Эти же приборы на GaN, благодаря лучшим экономическим показателям, уже массово выпускаются американскими, европейскими и японскими компаниями.

Что касается России, то объем ее рынка (по разным источникам) составляет \$1,3-1,5 млрд или всего около 0,5% мирового рынка [13, 14].

До 2008 г. одним из немногих направлений полупроводниковой микроэлектроники, продемонстрировавшим качественный рост, являлось проектирование ИС. Выросло количество дизайн-центров в России, которые используют современные программы проектирования до 90 нм. Квалифицированные специалисты-разработчики, уехавшие работать за рубеж в смутные 90-е годы, возвратились в Россию, где им предложена приемлемая оплата. Ведущие зарубежные полупроводниковые компании организовали в России свои лаборатории и дизайн-центры по разработке ИС. Наши дизайнеры получили доступ к библиотекам современных техпроцессов.

Эта хорошая для нашей полупроводниковой промышленности тенденция не получила адекватной поддержки от технологических и сборочных предприятий. Многие не выдержали «шоковой терапии» и обанкротились. Оставшиеся за два прошедшие десятилетия не только не обновили оборудование, но и потеряли значительную часть материальной базы. Для большинства этих предприятий, в сравнении с зарубежными, характерны:

- высокая себестоимость производства;
- высокие энергозатраты;
- низкий выход годных;
- низкая производительность на одного работника, в десятки раз меньше, чем у аналогичных зарубежных компаний;
- слабая система контроля качества;
- отсутствие базы для повышения квалификации технологов.

Такая пессимистичная картина возможностей российского микроэлектронного производства была улучшена в 2008 г. запуском

Таблица 3. Области применения техпроцессов

| Тип технологии                        | Области применения    |
|---------------------------------------|-----------------------|
| CMOS                                  | Связь                 |
|                                       | Бытовая электроника   |
|                                       | Телекоммуникации      |
|                                       | Память                |
|                                       | Чип-карты             |
| BiCMOS                                | Безопасность (RFID)   |
|                                       | Связь                 |
|                                       | Автоэлектроника       |
|                                       | Силовая электроника   |
|                                       | Телекоммуникации      |
| CDMOS                                 | Аудио-видео           |
|                                       | Автоэлектроника       |
|                                       | Силовая электроника   |
|                                       | Телекоммуникации      |
|                                       | Бытовая электроника   |
| BCD                                   | Автоэлектроника       |
|                                       | Силовая электроника   |
|                                       | Телекоммуникации      |
|                                       | Аудио-видео           |
|                                       | Бытовая электроника   |
|                                       | Транспорт             |
|                                       | Военная электроника   |
| Trench Power (Schottky, MOSFET, IGBT) | Автоэлектроника       |
|                                       | Силовая электроника   |
|                                       | Бытовая электроника   |
|                                       | Транспорт             |
|                                       | Военная электроника   |
| RF MOSFET, HF MMIC                    | Связь                 |
|                                       | Телерадиокоммуникации |
|                                       | Радары                |
|                                       | Автоэлектроника       |
|                                       | Военная электроника   |

на «Микроне» линии 0,18-км CMOS EEPROM, а в 2010 г. — линии 90-нм CMOS. Абсолютно правильное решение концерна Sitronics использовать опыт и возможности компании STMicroelectronics позволило, наконец-то, пробить брешь в катастрофическом отставании наших техпроцессов.

Однако даже столь долгожданный прорыв радикально не изменяет тенденций и проблем, связанных с отсутствием полноценного рынка ИЭТ в нашей промышленности. В связи с этим у «Микрона» возникнут как минимум две первостепенные задачи:

- обеспечение загрузкой и заказами новых линий, что вряд ли будет возможно без привлечения заказов из-за рубежа;
- создание полноценных библиотек и сервиса для клиентов (эта задача автоматически вытекает из первой).

Для привлечения зарубежных клиентов придется работать в условиях жесткой конкурентной борьбы с американскими, европейскими и, особенно, азиатскими компаниями.

Существует несколько десятков разновидностей CMOS-процессов, и очевидно, что возможности «Микрона», который будет владеть лишь немногими из них, не закрывают потребности всех современных микросхем, разрабатываемых в России.

Что касается спроса, то первым и самым простым шагом к его повышению в России должна стать локализация производства электронных компонентов для автомобильной, телевизионной, бытовой техники. Не следует рассчитывать, что оборонная промышленность России в состоянии обеспечить заказами все предприятия микроэлектроники России. К тому же, современный уровень большинства этих предприятий не соответствует требованиям для электронных компонентов, применяемых в современной военной, автомобильной, бытовой технике. Предстоит привлечение новых технологий, техническое переоснащение предприятий, обучение кадров. Пример «Микрона» показывает, что это возможно. Если этот процесс начнет двигаться в данном направлении, то рынок, за счет локализации производства, окажется вне конкуренции по применению электронных компонентов. Как показывает опыт Китая и Тайваня, даже ограничения собственных правительств (как это было в Тайване по отношению к Китаю) не остановит поток частных инвестиций и технологий. Наш крупный бизнес также не должен остаться на обочине этих процессов. Но для этого ему придется избавиться от синдрома быстрых и легких доходов, к которому он приучился за период приватизации и сырьевого бума.

Компания «Синтез Микроэлектроника» ([www.syntezmicro.ru](http://www.syntezmicro.ru)) предлагает услуги изготовления ИС по всем техпроцессам на производствах зарубежных компаний Америки, Европы, Азии. Взаимодействуя с IBM, ST, Freescale Semiconductor, Honeywell, On Semi, X-Fab и др., она располагает полной инфор-

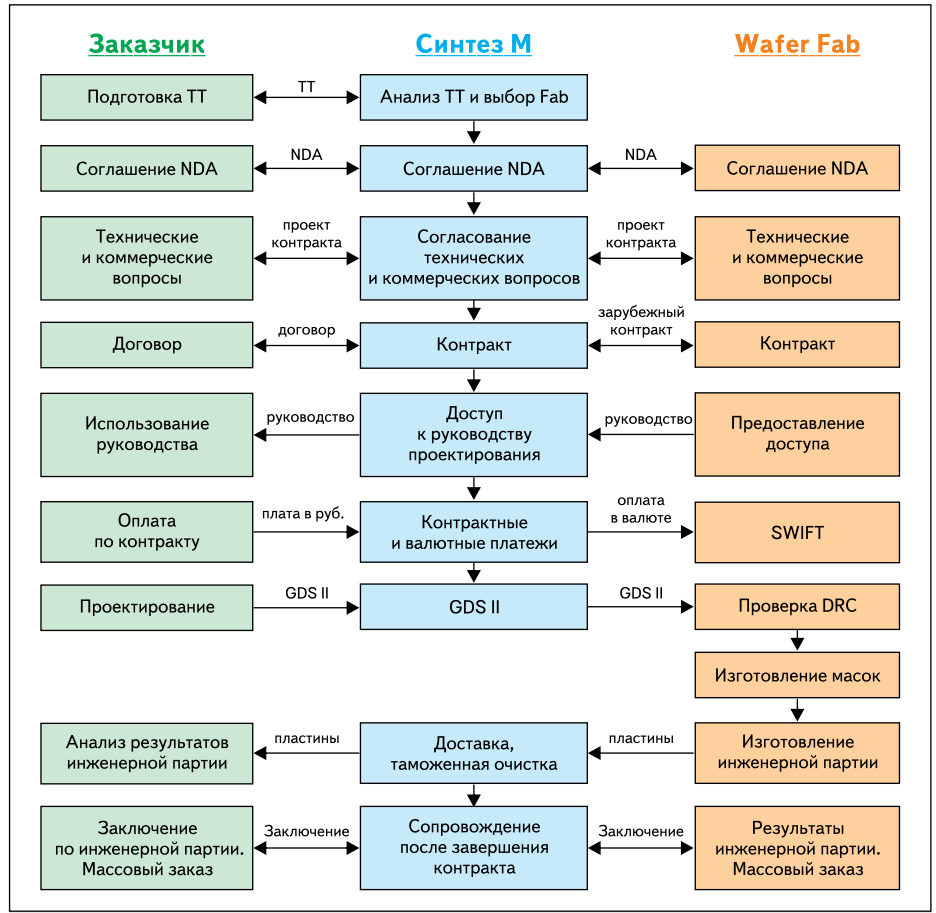


Рис. 5. Базовая схема взаимодействия от «двери до двери» для изготовления инженерной партии пластин

мацией об их возможностях, а также базой данных практически всех мировых компаний, профессионально оказывающих услуги foundry. Для российских заказчиков обеспечивается полный цикл — от разработки до сборки и испытаний, а для разработчиков компания является брокером, связывающим заказчика и кремниевую фабрику за рубежом. Схема работы «под ключ» или «от двери до двери» (рис. 5) требует от клиента только одного — формирования своих технических требований к микросхеме или техпроцессу. Все дальнейшее — поиск подходящей фабрики, размещение заказа, подписание соглашений и контрактов, обеспечение доступа к библиотекам, проведение валютных и таможенных процедур, передача продукта заказчику в России — компания берет на себя.

После завершения анализа инженерной партии клиент определяет режим и условия размещения регулярного производственного заказа. Стоимость пластин напрямую зависит от объема работ.

Особого внимания заслуживают радиационно-стойкие Rad Hard-процессы, используемые для микросхем специального космического назначения. Категория технологий и продуктов, изготовленных с применением Rad Hard, в большинстве стран имеет ограничения по экспорту. Эти вопросы решаются в соответствии с индивидуальными тре-

бованиями заказчика и правилами страны, в которой находится кремниевая компания.

Решением проблемы создания продуктов Rad Hard может быть поставка зарубежных чипов Military и Rad Hard в Россию с их последующей сборкой и аттестацией в РФ. Для некоторых микросхем (MRAM, FRAM и др. памяти) это может быть оптимальным решением, поскольку они отсутствуют среди продуктов отечественных производителей.

Повышение степени интеграции и функциональных возможностей кремниевых ИС требует совершенствования и усложнения корпусов, в которые монтируются эти чипы. Количество выводов современных корпусов превышает 1000, а оптимизация сборочных техпроцессов привела к созданию сложной прецизионной трехмерной технологии 3D-сборки. Функционально сейчас СБИС в 3D-корпусе равнозначна печатной плате 10-летней давности, только имеет габариты в сотни раз меньше.

Типы и количество выводов корпусов современных ИС представлены в таблице 5.

Эволюция 3D-корпусов является логическим продолжением эволюции технологии производства ИС. В 80-х годах уже стало понятно, что повышение степени интеграции и переход к субмикронным размерам элементов чипов не будет эффективным, если конструкции и технологии сборки не изменятся.

**Таблица 4.** Технологические процессы изготовления изделий силовой и СВЧ-электроники

| HF Power MMIC   | GaAs, GaN 6" до 80 ГГц    | GaAs, GaN 6" до 60 ГГц   |                             | GaAs, GaN 4–6" 30 ГГц           |  |
|-----------------|---------------------------|--------------------------|-----------------------------|---------------------------------|--|
| RF DMOS         |                           |                          |                             | SiC 4" 11–15 дБ до 2,7 ГГц      | SiC 2–4" 10–14 дБ до 2,5 ГГц   |
|                 | GaN, GaAs 6–8" до 55 ГГц  | GaN, GaAs 6–8" до 40 ГГц | GaN, GaAs 6–8" до 35 ГГц    | GaN, GaAs 6" 12–18 дБ до 22 ГГц | GaN, GaAs 4–6" 12–15 дБ до 6 ГГц   |
| IGBT            | Si 8" до 30 дБ до 3,8 ГГц |                          | Si 6–8" 14–25 дБ до 3,5 ГГц | Si 6" 14–20 дБ до 3 ГГц         | Si 4–6" до 20 дБ до 1 ГГц  |
|                 |                           |                          | Trench Si 6–8" 600–2000 В   | Trench Si 6" 600–1200 В         | SiC 2–4" свыше 10 кВ<br>Trench Si 4–6" 600–1200 В<br>Planar Si 4–6" 400–2000 В |
| MOSFET          |                           |                          |                             |                                 | SiC 2–4" 600–10 000 В<br>SOI 6" T <sub>j</sub> = +225 °C Низкий Ir             |
|                 |                           |                          | Trench Si 6–8" 20–100 В     | Trench Si 6" 20–100 В           | Trench Si 4–6" 20–100 В<br>Planar Si 4–6" 60–1200 В                            |
| Schottky        |                           |                          |                             |                                 | SiC 2–4" 200–1200 В<br>GaN, GaAs 4–6" до 1200 В                                |
|                 |                           |                          |                             | Trench Si 6" 60–100 В           | Trench Si 4–6" 60–100 В<br>Planar Si 4–6" 20–300 В                             |
|                 | 0,15 мкм                  | 0,25 мкм                 | 0,35 мкм                    | 0,5–0,6 мкм                     | >0,8 мкм   |
| Проектные нормы |                           |                          |                             |                                 |  |

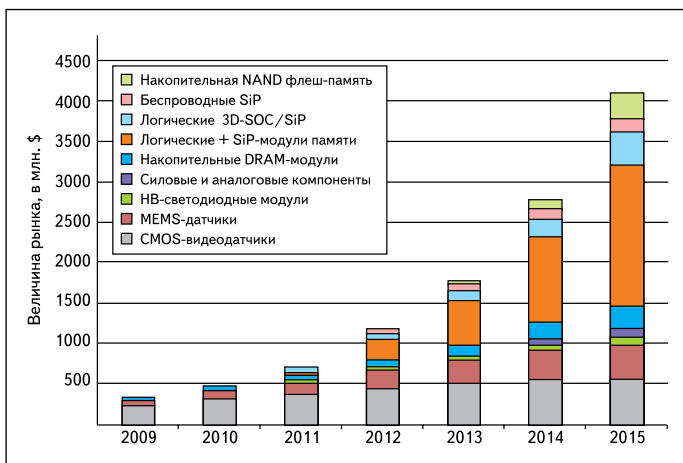
**Примеры сокращений:**

Planar Si — кремниевая технология; Trench Si — щелевая технология на кремнии; 60–1200 В — пробивное (рабочее) напряжение; SOI — кремний на изоляторе.

В 2009 г. мировой рынок 3D-корпусов, по сведениям Gartner, составлял 5 млрд шт. или 3% от всех корпусов, а к 2013 г. должен возрасти до 6% [15]. По данным этой же компании, к 2013 г. рынок оборудования для 3D-корпусов составит \$1,2 млрд, материалов — \$625 млн, сервиса — \$2,2 млрд. Прогноз динамики рынка и областей применения по данным Yole Development приведен на рис. 6 [16]. За прошедшие 25 лет конструкции и технологии 3D-сборки прошли три ступени генерации:

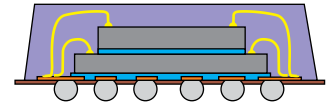
- Stack Die (середина 80-х годов);
- Stack Package (90-е годы);
- Stack TSV (сейчас).

Самой первой разновидностью 3D Stack Die было простое вертикальное крепление чипов один на другой с монтажом выводов на общий корпус. В последующем появились разновидности конструкции и такие технологии как Flip chip, гибкие выводы и торцевые соединения (рис. 7).

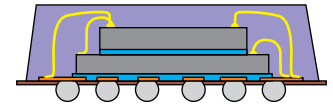


**Рис. 6.** Прогноз динамики и областей применения мирового рынка 3D TSV-сборки

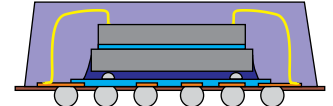
Разварка выводов на общий корпус



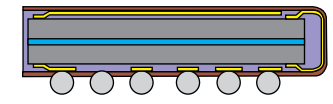
Разварка выводов чип-к-чипу и на общий корпус



Flip chip с разваркой выводов на общий корпус



Корпуса с гибкими выводами или соединением типа flip chip



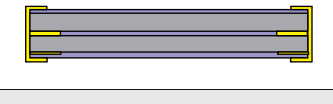
Многоуровневый монтаж и объединение корпусов



Доступ к чипу с обратной стороны для осуществления соединения flip chip



Многоуровневые структуры с торцевыми соединениями, формируемыми путем осаждения



**Рис. 7.** Разновидности корпусов Stack Die

На рис. 8 приведены некоторые типы Stack Die ведущих мировых профессиональных сборочных компаний: STATS Chip PAC и Amkor [17, 18].

По процессу 3D Stack Die собираются не только сложные ИС, но и более простые изделия.

На рис. 9 представлен образец трехосного акселерометра компании Bosch, состоящий из чипов микросхем управления, датчика MEMS и конденсатора [19].

На рис. 10 показаны некоторые виды корпусов с шариковыми выводами по технологии Stack Die, а также «корпус на корпусе» (POP) и «корпус в корпусе» (PIP, Stack Package) компании STATS Chip PAC [17].

Текущая, третья генерация, называемая TSV (Through Silicon Via), также проходит эволюционные стадии развития. Начальные этапы включали формирование TSV на отдельном чипе (идентичном чипу-разделителю в Stack Die). Современные разновидности метода предусматривают создание TSV соединений непосредственно в рабочем чипе ИС.

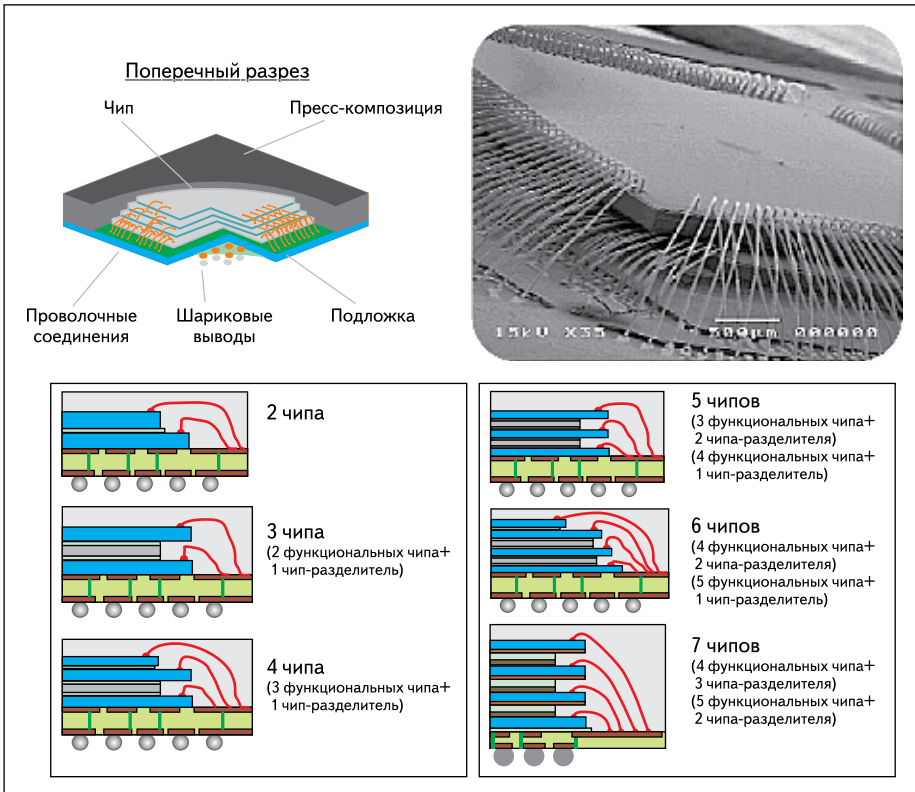
На рис. 11 представлено несколько разновидностей технологии TSV, предусматривающей формирование на различных стадиях [20]:

- на начальной стадии CMOS, то есть до начала создания активных структур ИС;
- в промежутке между формированием активных структур и металлизированных соединений ИС;
- после формирования металлизированных соединений ИС;
- после монтажа пластин «лицом к лицу».

Одной из самых совершенных разновидностей технологии TSV является процесс FaStack американской компании Tezaron Semiconductor, представленный на рис. 12 [21].

Эта технология предусматривает утонение пластин до толщины 8–15 мкм (в других процессах TSV этот показатель равен 50 мкм, а в Stack Die — 70 мкм), формирование субмикронных (0,3 мкм) отверстий, формирование TSV-соединений и монтаж двух–трех чипов «лицом к лицу» или «лицом к спине».

Главными результатами технологии FaStack являются не только повышение степени интеграции, но и:



- возможность использования всех современных корпусов (включая металло-керамические) за счет толщины чипов <math>< 20 \text{ мкм}</math>;
- предотвращение перегрева чипов за счет их малой толщины;
- снижение трудоемкости сборки;
- улучшение быстродействия и энергопотребления.

Например, при создании DRAM требуется на восемь фотолитографий меньше, чем в типовом процессе; быстродействие процессора 8051, изготовленного по FaStack, в пять раз выше, а его энергопотребление составляет всего лишь 10% от типового [21].

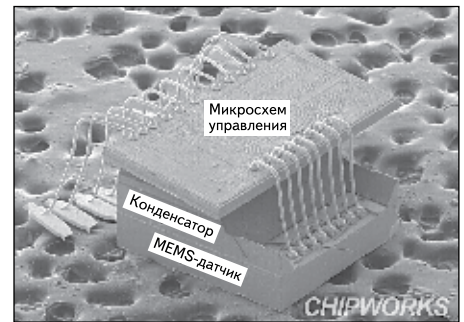


Рис. 9. Трехосный акселерометр BMA220 компании BOSCH в 3D-исполнении

Рис. 8. Корпуса Stack Die компаний STATS Chip PAC и Amkor

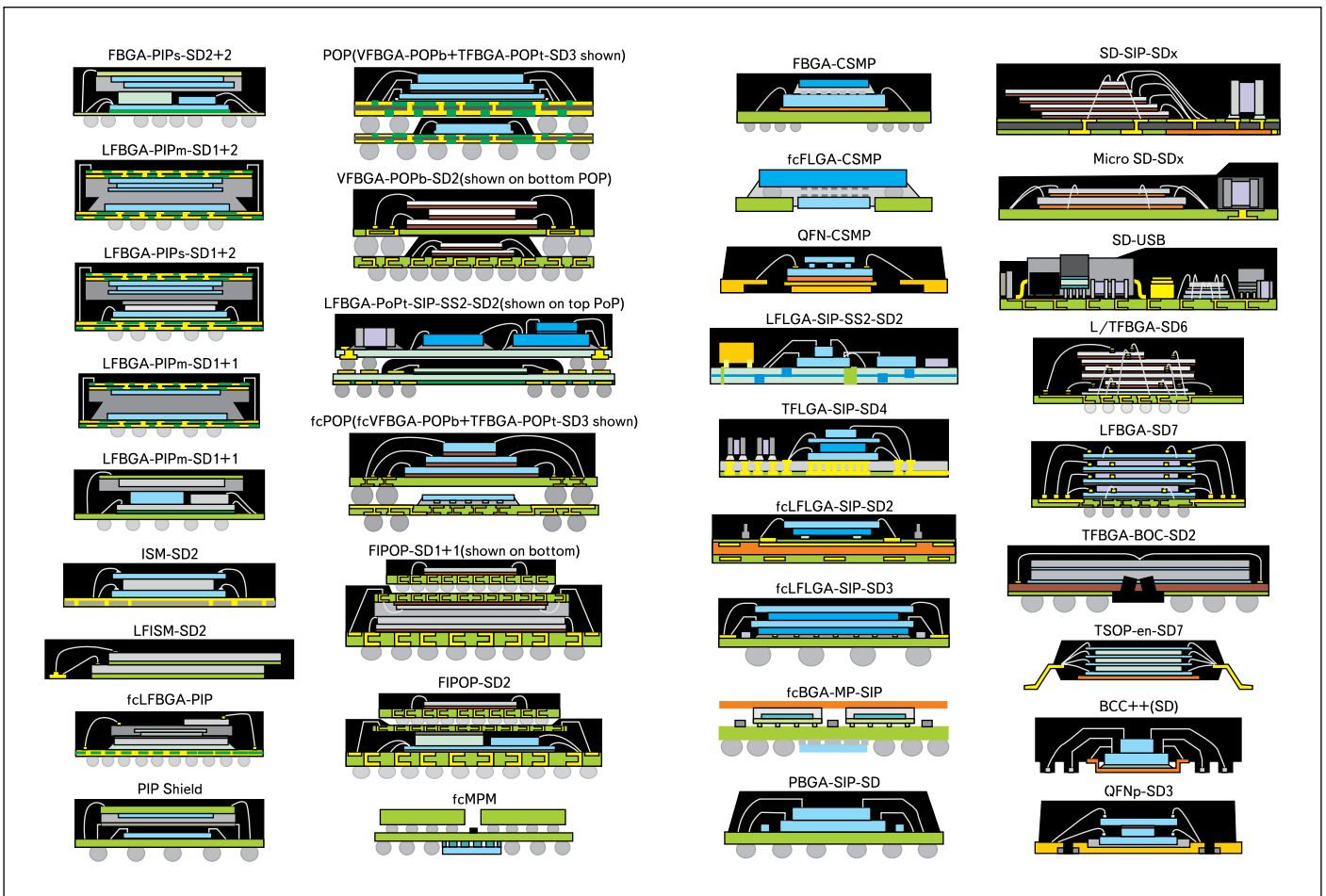


Рис. 10. Разновидности корпусов Stack Die с шариковыми выводами, «корпус в корпусе», «корпус на корпусе»

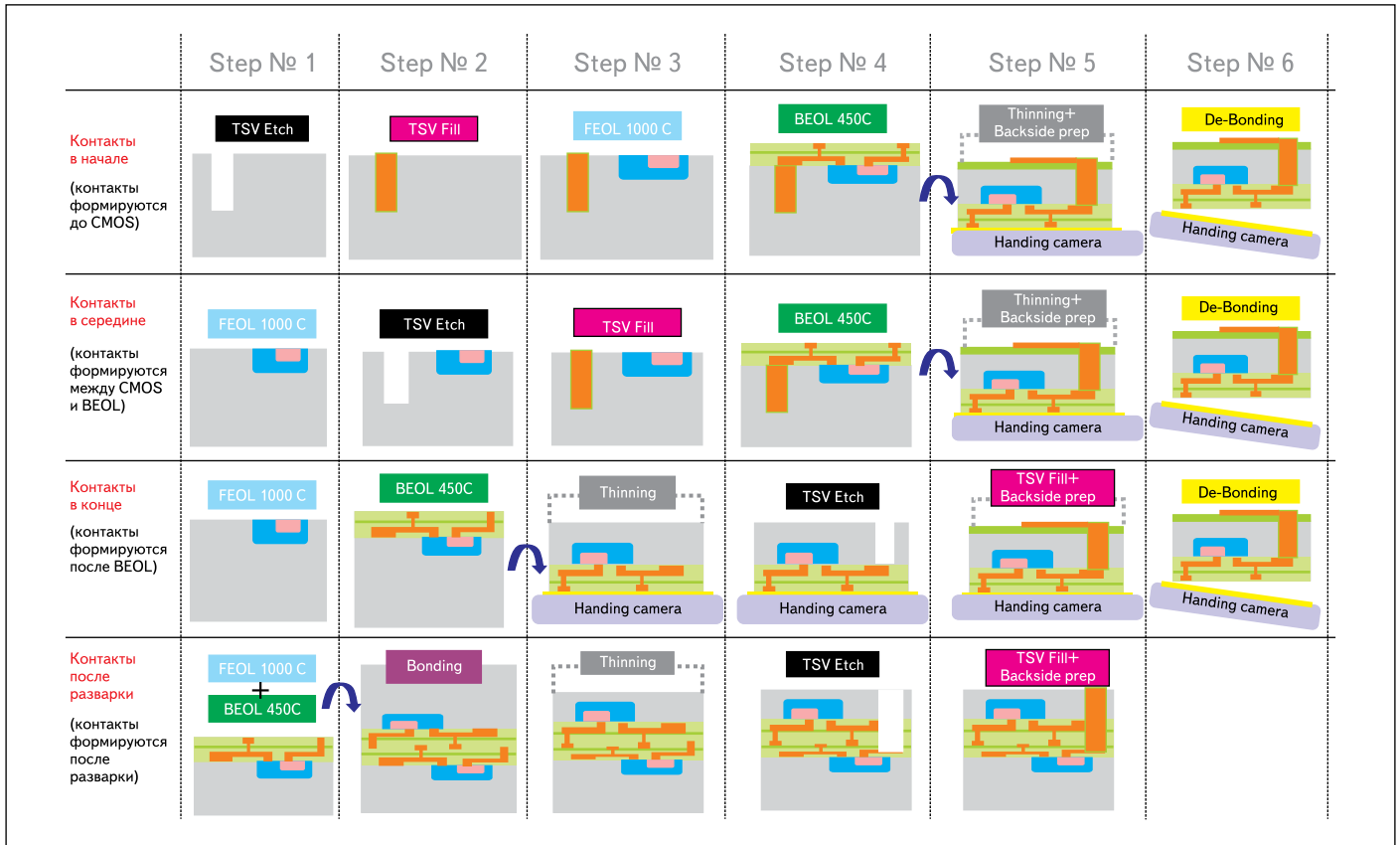


Рис. 11. Варианты 3D TSV-процессов

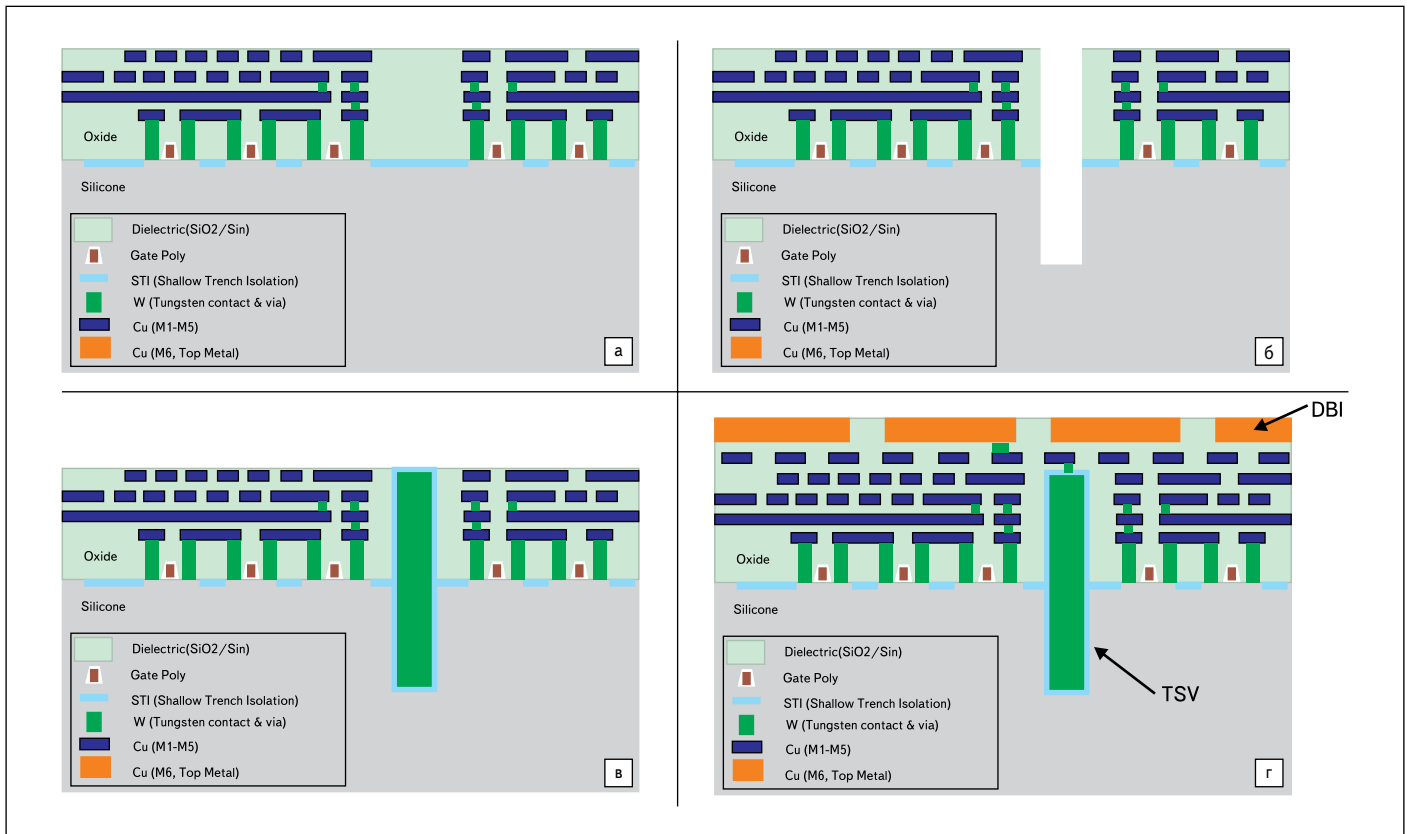


Рис. 12. Технология FaStack TSV компании Tezzaron Semiconductor:

а) типовой CMOS-процесс, остановленный на этапе MET4; б) глубокое травление (DRIE);

в) диэлектрическая изоляция и формирование TSV; г) продолжение этапа BEOL, формирование контактов 4/металла 5/контактов 5/металла 6

Таким образом, в мировой полупроводниковой промышленности существует большое количество видов, подвидов, конструкций и технологий 3D-корпусов. Также очевидно, что в зависимости от этих разновидностей сильно различаются состав применяемых технологических процессов и оборудования.

В таблице 6 представлена сравнительная информация по типам технологических процессов, используемых в технологиях Stack Die и TSV.

Очевидно, что по особенностям технологии и составу оборудования (back end) процесс Stack Die является специализацией сборочных фабрик.

А вот специализация по процессу TSV не выглядит столь однозначной. Основную долю в составе оборудования данного процесса составляют устройства для обработки пластин для изготовления чипов (front end).

Вероятнее всего, далее производство по технологии TSV будет развиваться по двум направлениям:


- по полному циклу — проектирование СБИС, изготовление пластин и TSV-сборка в крупных компаниях (Samsung, ST и др.), которые в состоянии поддерживать весь комплекс технологий;
- с разделением процессов обработки пластин и сборки между различными компаниями, включая изготовление пластин СБИС и формирование TSV-соединений на крупных кремниевых фабриках (TSMC, GlobalFoundries и др.) и последующую сборку пластина к пластине, чип к пластине, SIP («система в корпусе»), PIP («корпус в корпусе») и т. д. на специализированных сборочных предприятиях.

В России в настоящее время нет ни одной, даже опытной, линии 3D-сборки. Остается надеяться, что взаимодействие РОСНАНО и «ВЗПП-Сборка» приведет к появлению в Воронеже первой в России современной производственной линии. Однако разработка и изготовление за рубежом 3D-СБИС по технологиям Stack Die и TSV возможна с помощью компании «Синтез Микроэлектроника».

Пристального внимания российских клиентов заслуживают пластмассовые корпуса Open Cavity [22]. В них применяются высокотемпературная пластмасса, и по параметрам (влажность, герметичность, термостабильность, надежность и др.) они близки к керамическим корпусам, но значительно дешевле, поэтому являются хорошей альтернативой. В них также используют Ni и Au покрытие выводов и повышенную температуру сборки. Особенно перспективными являются безвыводные корпуса QFN Open Cavity, а также серия корпусов Open Cavity для мощных СВЧ LDMOS.

Сборка Open Cavity, в отличие от классических пластмассовых, не требует дорогостоящих штампов и пресс-форм, герметизации, вырубки и формовки, так как корпуса Open Cavity могут быть уже первично сформованы (в том числе и для поверхностного монтажа)

**Таблица 5.** Корпуса современных ИС

| Тип                        | Количество выводов | Вид   |
|----------------------------|--------------------|---|
| DIP, HDIP                  | 8–64               |   |
| SOP-SSOP-HSOP-SOIC         | 8–80               |   |
| QFP-LQFP                   | 32–304             |    |
| QFN-DFN                    | 2–48               |   |
| BGA                        | 56–288             |   |
| Ceramic                    | 6–408              |    |
| PLCC                       | 20–84              |   |
| 3D Package                 | до 1000            |  |
| Open Cavity QFN-QFP-SO-LCC | 4–100              |  |

поставщиком. Сборка ИС и СВЧ-транзисторов в подобных корпусах может быть быстро организована на любом российском предприятии при небольших материальных затратах.

Особенно незаменимы Open Cavity для первичной аттестации новых продуктов (в том числе военного назначения), так как значительно сокращают сроки разработки, а при необходимости позволяют быстро перевести производство на идентичные по габаритам керамические корпуса, используя ту же измерительную и испытательную оснастку.

В российской полупроводниковой отрасли промышленно развиты только керамические и DIP-корпуса. За исключением SO-8 и SO-16, у нас практически отсутствует сборка в современных корпусах поверхностного монтажа. Закупка и монтаж импортной линии сборки небольшой производительности требует от \$1 млн. Поэтому выпуск новых отечественных ИС может быть значительно ускорен за счет их сборки за рубежом, с последующим освоением технологий монтажа в России.

В таблице 7 представлены некоторые типы корпусов силовой электроники и дискретных полупроводниковых приборов.

В отличие от сборки СБИС, в этой категории нет больших технологических прорывов и развитие идет эволюционным путем, обеспечивая:

- постоянное увеличение средних рабочих токов на корпус;

- улучшение теплоотвода за счет новых материалов и изменения конструкции корпуса.

Но так же, как и для СБИС, в технологии сборки дискретных полупроводниковых приборов применяются идеология 3D, когда в одном корпусе объединяются как однородные, так и разные устройства, например, драйвер и силовой чип.

С начала 90-х годов с целью удешевления производства начался массовый экспорт сборочных технологий и заводов на азиатский континент, вначале на Филиппины, в Малайзию, Сингапур, Тайвань, а затем в континентальный Китай. Сейчас азиатские предприятия занимают лидирующие позиции по техническому оснащению, производительности и экономике полупроводниковой сборки. Практически все ведущие мировые полупроводниковые компании перевели часть сборочных производств из США и Европы в Азию. Одновременно с этим в Азию переместился и сектор вспомогательных материалов и сервисов. В настоящее время Азия — это уже не импортер технологий, а законодатель новых техпроцессов.

А что же российская сборка продуктов силовой электроники? По номенклатуре корпусов и количеству работающих предприятий положение лучше, чем в сборке БИС. Корпуса TO-220, TO-263, металлостеклянные, СВЧ-корпуса и некоторые типы SOIC используются предприятиями Воронежа, Брянска, Саранска. Однако три проблемы делают эти корпуса продуктами только внутривоспольского применения:

- несоответствие габаритных размеров международным стандартам;
- недостаточное качество;
- высокая себестоимость.

Наша компания экспортирует некоторые типы СВЧ-транзисторов в США. Их количество могло бы быть больше при соответствии габаритных размеров международным стандартам. Сейчас для изготовления некоторых СВЧ-транзисторов используются импортные корпуса из США и Китая.

Кроме того, каждый из российских сборочных заводов до сих пор пытается сам изготавливать рамки для корпусов серии TO, что только увеличивает их себестоимость.

**Таблица 6.** Типы технологических процессов, применяемых в 3D Stack Die и TSV

| Тип процесса  | Stack Die           | TSV |
|---|---------------------|-----|
| Субмикронная литография                                       | –                   | +   |
| Глубокое реактивно-ионное травление Si или лазерное сверление | –                   | +   |
| Формирование пленок металлов и диэлектриков                   | –                   | +   |
| СМР шлифовка металлов и диэлектриков                          | –                   | +   |
| Утонение пластин  | до 70 мкм           | +   |
|   | < 20 мкм            | –   |
| Соединение  | чип к чипу          | +   |
|   | пластина к пластине | –   |
|   | чип к пластине      | –   |
| Баппирование  | +                   | +   |
| Автоматическая разварка выводов                               | +                   | +   |
| Автоматический контроль соединений и внешнего вида            | +                   | +   |
| Герметизация-обрезка-формовка                                 | +                   | +   |



Логика их руководителей о необходимости сохранения этих рабочих мест понятна, но не оправдана. Качество и экономика продукции от этого только страдают.

Что предлагает компания «Синтез Микроэлектроника» для российских предприятий в сборочном сегменте?

- Сборка за рубежом для всех типов корпусов с использованием:
  - чипов заказчика;
  - покупных чипов;
  - чипов, изготовленных в режиме foundry.
- Поставка выводных рамок, готовых керамических, силовых, СВЧ, оптоэлектронных, Open Cavity и других корпусов; разработка и модернизация корпусов по техническим требованиям заказчика.
- Поставка нового и использованного оборудования или целых сборочных линий по техническим требованиям заказчика.



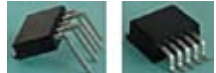







Сборка ИС и полупроводниковых приборов за рубежом позволяет иметь:

- высокий выход годных (98–99%);
- высокое качество;
- все типы корпусов ИС и силовых полупроводниковых приборов;
- возможность быстрого вывода на рынок новых продуктов без больших затрат на закупку собственной сборочной линии;
- возможность выпуска одного продукта в разнообразных корпусах под требования разных клиентов;
- оптимальное соотношение цена–качество.

Таким образом, у российских разработчиков и дизайн-центров за счет использования ресурсов зарубежных производств по чипам и сборке появляется прекрасная возможность при отсутствии собственной технологической, сборочной и производственной базы:

- в короткие сроки (создание чипа — два месяца, сборка — один месяц) обеспечить выход на рынок новых продуктов под собственной торговой маркой;
- иметь минимальные затраты и себестоимость;
- получить доступ к передовым технологиям и библиотекам проектирования;
- проводить изготовление чипов и сборку в одной стране или в одной зарубежной компании без логистического разрыва;

Таблица 7. Корпуса силовой электроники

| Тип  | Количество выводов | Вид   |
|--|--------------------|---|
| Isoplus на DCB<br>TO-220,<br>TO-247,<br>TO-264 | 3–5                |    |
| TO-220,<br>TO-220F                             | 2–7                |   |
| TO-252,<br>TO-263                              | 3–7                |   |
| SOT-23,<br>SOT-223                             | 3–6                |   |
| TO-247,<br>TO-3P<br>TO3PFD                     | 3–5                |   |
| SMA-<br>SMB-SMC                                | 2                  |    |
| SIP,<br>HSIP,<br>ZIP                           | 8–15               |   |
| Силовые модули                                 | 2–6                |  |
| Металло-стеклянные типа TO                     | 2–10               |  |
| СВЧ-корпуса, в том числе Open Cavity           | 2–6                |  |

- экспортировать продукты без доставки на территорию России. Международная интеграция открывает широкие возможности, просто нам всем надо научиться пользоваться ими.

### Заключение

Усложнение современных технологий и большие капитальные затраты на их разработку, освоение и производство приводят к дальнейшей специализации полупроводниковых компаний по этапам: разработка,

изготовление чипов, сборка. Только крупные международные компании способны обеспечить полный цикл производства суперсовременных СБИС.

Новые процессы создания дискретных полупроводниковых приборов и 3D-сборки интегрируют в себя современные возможности технологии чипов СБИС (субмикронные проектные нормы, Trench-технологии, многослойные межсоединения, планаризацию поверхности и т. д.).

Современные конструкции и технологии изготовления СБИС интегрируются путем объединения возможностей биполярных, CMOS-, DMOS-технологий в одном чипе при одновременном снижении проектных норм в нанометровом диапазоне.

Современные процессы третьей генерации 3D TSV-сборки способны на порядок повысить степень интеграции и улучшить статические и динамические параметры СБИС и дискретных полупроводников. ■

### Литература

- SEMI/WSTS. 2010. [www.semi.org](http://www.semi.org)
- China's impact on the semiconductor industry 2010 update. Report PricewaterCoopers. November 2010.
- Semiconductors Materials: Record Volumes, Record Revenues. [www.semi.org](http://www.semi.org)
- SEMI World Fab Watch. 2009.
- A change of pace for the semiconductor industry? Report PricewaterCoppers. November 2010.
- EETimes News. December 2010.
- SEMI China Semiconductor Wafer Fab and Foundry Outlook. March 2008.
- Racaneli M., Kempf P. SiGe BiCMOS Technology for Communication Products. Jazz Semiconductor. [www.towerjazz.com](http://www.towerjazz.com)
- HTMOS High Temperature Electronics. High-Reliability and Performance at 225 C. Honeywell. [www.honeywell.com](http://www.honeywell.com)
- Intel, Samsung and Toshiba join hands to halve chip size // Reuters. October 28, 2010.
- EETimes News. November 2010.
- Silicon Carbide Power Applications and Device Roadmap // Power Electronics Europe. 2004.
- Покровский И. Обзор рынка электроники // Новая электроника России. 2009. № 1.
- The Yearbook of World Electronics Data. 2011/2012. Vol. 4. East Europe. Report Reed Electronics Research.
- Growth Market for 3D Semiconductors. Gartner Report. Semicon Taiwan. October 2009.
- Yole Development Report. October 2009.
- Website STATAChipPAC, [www.statschippac.com](http://www.statschippac.com)
- Website Amkor, [www.amkor.com](http://www.amkor.com)
- 3D Packaging, June 2010, № 15.
- 3D IC&TSV Interconnects. Yole Development Report. 2010.
- FaStack Stacking Technology. Tezzaron Semiconductor. August 2009. [www.tezzaron.com](http://www.tezzaron.com)
- Website Global Chip Materials, [www.globalchipmaterials.com](http://www.globalchipmaterials.com)