

# Перспективы развития технологий ведущих поставщиков логики и кремниевых заводов

*Ключевые слова: кремниевый завод, логика, микроэлектроника, опытное и серийное производство, технологический процесс.*

Современный уровень развития технологических процессов поставщиков логики и услуг кремниевых заводов связан с появлением значительного числа вариаций базовых процессов. Такой подход призван удовлетворять потребителей с разными запросами (низкая и ультранизкая потребляемая мощность, высокая производительность, малая площадь кристалла и т.п.). Кроме того, если одни фирмы продолжают масштабировать свои процессы (Intel, TSMC, Samsung), другие предпочитают глубокую модернизацию уже имеющихся (GlobalFoundries) с целью снижения издержек.

Дальнейшее развитие микроэлектроники зависит от способности изготовителей ИС продолжать наращивать производительность и функциональность своих приборов, оставаясь в рамках приемлемых для заказчиков цен. По мере того как основные КМОП-процессы достигают своих теоретических, практических и экономических пределов, снижение удельной стоимости ИС (на функцию или по производительности) становится особенно важной и сложной задачей. «Полный анализ и прогноз развития микроэлектроники» (McClean Report – A Complete Analysis and Forecast of the Integrated Circuit Industry), выпущенный в январе 2019 г. корпорацией IC Insights (г. Скотсдейл, шт. Аризона, США), показывает, что разнообразие предлагаемых фирмами-изготовителями технологических процессов, ориентированных на логические приборы, сегодня больше, чем в любой предшествующий период (см. рисунок). При этом регулярно появляются расширенные вариации базового процесса.

**Intel.** Кодовое наименование процессоров девятого поколения корпорации, представленных в конце 2018 г., – Coffee

Lake-S (иногда Coffee Lake Refresh). По заявлению специалистов Intel, эти процессоры представляют собой совершенно новое поколение, в то время как многие отраслевые специалисты рассматривают их как усовершенствованные изделия восьмого поколения. Пока Intel опубликовала слишком мало информации об этих процессорах, но, по всей видимости, они изготовлены по расширенной версии процесса 14 нм++, который можно рассматривать как процесс 14 нм+++.

В 2019 г. планируется наращивать крупносерийное производство по 10-нм процессу нового семейства процессоров Sunny Cove, представленного в декабре 2018 г. Похоже, что архитектура Sunny Cove фактически заняла место архитектуры Cannon Lake (10-нм процесс), которую ранее предполагалось реализовать в 2019 г. Ожидается, что в 2020 г. в массово-поточном производстве начнет осваиваться технологический процесс 10 нм+.

**TSMC.** Этот крупнейший в мире кремниевый завод начал массовое производство ИС по 10-нм процессу в конце 2016 г., но быстро перешел на 7-нм про-

|                 | 2013 | 2014           | 2015            | 2016          | 2017           | 2018        | 2019           |               |
|-----------------|------|----------------|-----------------|---------------|----------------|-------------|----------------|---------------|
| Intel           |      | 14nm<br>finFET |                 | 14nm+         | 14nm++         | 10nm        | 10nm+          |               |
| GlobalFoundries | 28nm |                | 14nm<br>finFET  |               | 22nm<br>FDSOI  | 7nm<br>12nm | 12nm<br>FDSOI  |               |
| Samsung         | 28nm | 20nm           | 14nm<br>finFET  | 28nm<br>FDSOI | 10nm           | 8nm         | 7nm<br>EUV     | 18nm<br>FDSOI |
| SMIC            |      |                | 28nm            |               |                |             | 14nm<br>finFET |               |
| TSMC            |      | 20nm           | 16nm+<br>finFET |               | 10nm           | 7nm<br>12nm | 7nm+<br>EUV    |               |
| UMC             |      | 28nm           |                 |               | 14nm<br>finFET |             |                |               |

Источник: данные компаний, материалы конференций, IC Insights

Маршрутная карта развития технологических процессов производителей логики и кремниевых заводов (поточно-массовое производство)

Примечание 1. Понятия «поколение технологического процесса» и «начало массового производства» у различных производителей могут отличаться из маркетинговых соображений, поэтому точки перехода на новую технологию указаны ориентировочно.

Примечание 2. Знаками «+» и «++» после минимальных топологических норм технологического процесса обозначены расширенные версии базового процесса. Как правило, первые («+») расширенные версии предлагают экономию занимаемого на плате места и сниженную потребляемую мощность. Они в основном ориентированы на мобильную технику. Вторые расширенные версии («++») предлагают как высокую производительность, так и малую потребляемую мощность и ориентированы на ИС для старших (наиболее производительных) моделей различных конечных электронных систем.

цесс. Специалисты корпорации считают, что 7-нм технологическое поколение будет обладать таким же длительным циклом использования в производстве, как 28-нм и 16-нм процессы.

Фирменный процесс с использованием 5-нм топологий находится в стадии разработки. Опытное производство запланировано на первое полугодие 2019 г., а массово-поточное – на 2020 г. В данном процессе будет применяться литография предельной УФ-области спектра (EUV, длина волны излучения 13,5 нм). Однако первым процессом, в котором будет использоваться EUV-литография, станет усовершенствованная версия 7-нм процесса – 7 нм+ (со II кв. 2019 г.). В этой версии применение EUV будет ограничено четырьмя критическими слоями. В рамках 5-нм процесса EUV-литография будет исполь-

зоваться шире – с ее помощью будет формироваться до 14 слоев.

**Samsung.** В начале 2018 г. корпорация Samsung начала массово-поточное производство ИС по второму поколению 10-нм процесса (10LPP<sup>1</sup>). В конце 2018 г. Samsung представила третье поколение 10-нм процесса – 10LPU (версия со сверхмалой потребляемой мощностью), обеспечивающее дальнейшее повышение производительности. На уровне 10-нм технологий Samsung использует методику тройного формирования рисунка (triple patterning). В отличие от TSMC, корпорация предполагает, что ее 10-нм семейство процессов (включая 8-нм производные процессы) будет обладать длительным сроком использования.

Опытное производство ИС по 7-нм технологии корпорация Samsung нача-

## МНЕНИЕ ЭКСПЕРТА



В настоящее время повышение функциональности приборов обеспечивается мировыми производителями скорее за счет эволюционных решений, чем революционных. Так, одним из основных трендов является применение принципов 2D- и 3D-сборки с применением интерпозеров и TSV, которые были разработаны еще 8–10 лет назад, а свое развитие получили лишь после того, как было разработано технологическое оборудование, поддерживающее эти конструктивно-технологические исполнения и позволяющее организовать их серийное производство.

Что касается повышения функциональности приборов на уровне чипов, то опять же до технологического уровня 10–5 нм используют решения, которые начали применяться 6–10 лет назад. Например, принцип мультипаттернирования начал использоваться для технологического уровня 28 нм и менее для того, чтобы обойти физические ограничения

иммерсионной литографии. С появлением на рынке технологического оборудования EUV-литографии появилась возможность заменить его на метод прямого переноса изображения, и у производителей теперь встает только экономический вопрос: или покупать дорогой EUV-сканер, или использовать иммерсионную литографию с большим числом этапов литографий и более длительным циклом производства.

С точки зрения методов формирования транзисторных структур для всех технологий начиная с 16 нм и менее используются принцип заменяемого металлического затвора RMG (начал использоваться с 28 нм), структура FinFET-транзистора (используется с 16 нм), силицидирование контактов Ni (начало использоваться для 65 нм), формирование медной металлизации методом двойного дамасцена (начал использоваться с 130 нм, а для уровня 5 нм и менее рассматривается применение Rb в качестве материала металлизации).

Если говорить о технологиях в целом, то можно рассматривать два направления: объемный кремний и обедненный кремний или FD-SOI (развивают GF, STM и Samsung). Преимущества технологии FD-SOI заключаются в возможности получения для элементной базы характеристик, сравнимых с характеристиками ЭКБ на объемном кремнии, но с меньшими топологическими размерами. Так, по характеристикам элементной базы процесс 22 нм FD-SOI сравним с процессом 14 нм на объемном кремнии. Однако основным недостатком применения технологии FD-SOI является большая сложность проектирования и существенно меньшее количество доступных на рынке IP-блоков.

*Павел Игнатов, директор по развитию технологий АО «НИИМЭ»*

ла в октябре 2018 г. При этом был пропущен этап иммерсионной литографии и осуществлен переход к непосредствен-

ному применению EUV-литографии, которая используется для формирования 8–10 слоев.

**GlobalFoundries.** Корпорация рассматривает свой 22-нм FD-SOI (полностью обедненный «кремний-на-изоляторе», 22FDX) процесс как дополняющий и расширяющий возможности фирменной 14-нм FinFET-технологии. Утверждается, что платформа 22FDX обеспечивает производительность, очень близкую к производительности 14-нм FinFET-процесса, но при этом производственные издержки остаются на уровне 28-нм технологии.

В августе 2018 г. GlobalFoundries существенно поменяла стратегию развития – остановила разработку 7-нм процесса из-за огромных затрат на развертывание производства по данной технологии, а также из-за малого числа клиентов, планирующих ее использовать. Усилия корпорации сосредоточены

на развитии и совершенствовании 14-нм и 12-нм FinFET-процессов и фирменной FD-SOI-технологии.

\* \* \*

В течение последних 50 лет микроэлектроника достигла значительных успехов в повышении производительности как производства, так и собственно ИС. Хотя отрасль уже преодолела многие стоявшие перед ней проблемы, по мере дальнейшего развития появляются новые, все более сложные. Несмотря на это проектировщики и изготовители микросхем в целях повышения функциональности приборов разрабатывают решения, являющиеся скорее революционными, чем эволюционными.

*Advances in Logic IC Process Technology Move Forward. IC Insights, Research Bulletin, February 21, 2019: www.icinsights.com.*

## ПУБЛИКАЦИИ В НАУЧНЫХ ЖУРНАЛАХ «ВОПРОСЫ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ» И «РАДИОПРОМЫШЛЕННОСТЬ»

### Преференции для авторов

- Бесплатная публикация статей.
- Качественное двустороннее анонимное рецензирование.
- Сжатые сроки публикации.
- Серьезная редакция.
- Высокий уровень перевода.
- Индекс DOI каждой статье.
- Помощь в продвижении научной публикации.

### Подача рукописи

Рукопись статьи, оформленную в соответствии с правилами представления статей (размещены на сайтах [www.radioprom.org](http://www.radioprom.org), [vre.instel.ru](http://vre.instel.ru); могут быть высланы по запросу), а также акт экспертизы присылают по e-mail: [publish@instel.ru](mailto:publish@instel.ru) или с помощью электронной формы на сайте [www.radioprom.org](http://www.radioprom.org).

### Этапы редакционного процесса

Рецензирование, редактирование, корректура, верстка, согласование с авторами, публикация. На всех этапах редакция взаимодействует с авторами.

### Индексирование опубликованных статей

РИНЦ, EBSCO, Google Scholar, РГБ, ВИНТИ.

