

# ДЛЯ ДАЛЬНЕЙШЕГО УМЕНЬШЕНИЯ ТРАНЗИСТОРА ЕЩЕ ЕСТЬ ЗАПАС

Рассказывает технический директор (СТО) компании Synopsys Антун Домик



Разработчики и производители передовых интегральных схем (ИС) активно движутся в направлении уменьшения технологических норм и увеличения плотности компоновки своих изделий для удовлетворения растущих потребностей в миниатюризации и повышении функциональности современной электронной аппаратуры. Мировая электронная промышленность достигла в этом такого уровня, что каждый следующий шаг требует создания и внедрения множества инноваций. О прогрессе в полупроводниковой области, связанных с ним сложностях и их преодолении рассказывает Антун Домик (Antun Domic), технический директор (СТО) компании Synopsys.

**Господин Домик, прежде чем мы поговорим о текущем состоянии полупроводниковых технологий в мире, может быть, несколько слов о том, как видится российский рынок с точки зрения разработки передовых решений в этой области?**

У нас с российским рынком плотно работает наше представительство, они более компетентны в этом вопросе. Но если говорить о том, что видим мы, то совершенно очевидно, что

применение инструментов Synopsys в российских компаниях электронной отрасли растет, что, безусловно, очень радостно для нас. Мы с большим интересом наблюдаем, как внедряются самые передовые технологии в российские разработки. У одной из компаний, с которыми мы общаемся, разработки по технологии 28 нм находятся на завершающей стадии, и они уже планируют начинать проекты на 16 нм. Удивительно, как быстро эта компания движется

в сторону самых передовых решений в области полупроводников.

Так что в России мы видим очень многообещающий для нас рынок.

### **А в мире сейчас самой передовой проектной нормой считается 7 нм? Можно ли сказать, что она уже стала реальностью?**

Некоторые фабрики, в частности TSMC, предлагают услуги по производству на 7 нм, но это пока предложения на будущее. Сейчас таких изделий в производстве нет. Более того, компании-разработчики не спешат использовать эту технологию в своих проектах, по видимости, ожидая, когда появятся первые серийные кристаллы с данной проектной нормой. Но если через год-полтора такие проекты начнут появляться, это не станет неожиданностью. Таким образом, эта технология сейчас близка к тому, чтобы стать самой передовой производственной технологией в мире. И мы, как компания, стремимся предлагать самые передовые средства разработки, чтобы обеспечить нашим клиентам необходимую поддержку при переходе на эту проектную норму.

### **Какие сложности и наиболее критичные требования характерны для современных полупроводниковых разработок с точки зрения разработчика САПР?**

В любом проекте есть свои сложности. Но если рассматривать картину в целом, наверное, одним из самых важных вопросов является энергопотребление. Речь здесь не только о таких вещах, как длительность работы мобильного телефона от аккумулятора. Та функциональность, которую разработчики закладывают в кристаллы, требует потребления большой мощности, и оказывается необходимым применять самые передовые методы как для снижения энергопотребления, так и для обеспечения отвода тепла.

Поэтому один из наиболее частых вопросов, которые нам задают клиенты: "Как вы сможете помочь нам снизить общую потребляемую мощность?" И это не связано с абсолютными цифрами: бюджет может быть и 1, и 100 Вт. Один из примеров реализованной разработки – чип для одного нашего клиента, предназначенный для слуховых аппаратов, бюджет которого составлял 1 мВт. А с другой стороны, мы работаем с компаниями, специализирующимися на микропроцессорах, такими как Intel или AMD. Их изделия

потребляют мощность, выражаемую в ваттах трехзначными величинами. То есть мы видим весь спектр, и во всем этом спектре проблема энергопотребления стоит очень остро.

Второй очень актуальный вопрос – растущая сложность проектов. Самые большие кристаллы сегодня содержат до 20 млрд транзисторов. Поэтому перед нами часто ставится задача упрощения процесса проектирования таких изделий, работа с иерархическими проектами и т.п.

## **Важность проблемы снижения энергопотребления не зависит от того, какой у проекта бюджет по потребляемой мощности: 1 или 100 Вт**

Кроме того, чтобы помочь своим клиентам в разработке сложных изделий и быстром их выводе на рынок, Synopsys предлагает не только инструменты САПР, но и IP-блоки, в которых реализуются различные стандарты интерфейсов и другие технологии. Также компания уделяет большое внимание вопросам безопасности данных и программного обеспечения (ПО), роль которых активно растет в современном мире.

И третья проблема – пожалуй, традиционная для полупроводниковой отрасли – обеспечение временных характеристик. Рабочие частоты, производительность чипов непрерывно растут, и средства САПР должны помогать разработчику обеспечивать работоспособность его изделий на заданных частотах. И эта проблема связана также с проблемой энергопотребления. Например, в современных проектах обеспечить функционирование на 3 ГГц не так сложно; вопрос – какую цену вы заплатите за это с точки зрения потребляемой мощности.

Это то, что касается общих требований. Но в отдельных областях есть свои специфические особенности. Можно привести такой пример: в автомобильной промышленности требования к надежности комплектующих становятся все жестче. И мы были вынуждены впервые в нашей практике сертифицировать наши инструменты в соответствии с автомобильными стандартами, чтобы подтвердить, что чипы, которые разрабатываются с их помощью, отвечают соответствующим требованиям надежности. То есть потребовалось подтвердить не только характеристики конечного изделия, но и способность средств

САПР их обеспечить. Несколько лет назад мы такое не могли даже предположить.

**Возвращаясь к технологическим нормам, периодически всплывает вопрос физического предела уменьшения размера кремниевого транзистора. Приближаемся ли мы к нему?**

Сейчас проектная норма, на которой существует реальное производство, составляет 10 нм. В ближайшее время ожидается 7 нм. Существуют перспективные разработки на 5 нм. Структуры для 4 и 3 нм тоже уже начинают вырисовываться. Вероятно, вы слышали о демонстрации транзистора размером 1 нм. А 1 нм – это примерно пять атомов кремния. Поэтому, в каком-то смысле, запас еще есть. И нужно помнить, что от одного транзистора до миллиардов еще предстоит пройти огромный путь.

**Применение дальнего ультрафиолета (EUV) имеет все шансы перестать быть технологией будущего и стать технологией настоящего**

В любом случае, КМОП-технология показала свою надежность в плане развития. В совершенно иных полупроводниковых технологиях не видно большого прогресса. За последние полвека в КМОП-технологии было инвестировано в общей сложности около 1 трлн долл., поэтому отрасль будет стремиться придерживаться этой технологии столько, сколько это будет возможно.

Несколько лет назад появилась принципиально новая структура – FinFET. По сути, это транзистор, "повернутый" вертикально. Его исток, сток и канал имеют большую высоту, что позволяет обеспечивать токоведущие способности за счет вертикального размера, а затвор "оборачивает" канал с трех сторон. Эта структура позволила существенно уменьшить площадь, занимаемую транзистором, но внедрена она была не быстро.

Также в течение нескольких ближайших лет можно ожидать внедрения таких новых производственных технологий, как применение дальнего ультрафиолета (Extreme ultraviolet – EUV). Про технологию EUV говорят уже лет 20; даже существует такая шутка: EUV все еще остается технологией будущего. Но, похоже, это будущее все-таки наступает.

В настоящее время при нормах 10–7 нм производители полагаются на применение нескольких масок для одного слоя. EUV теоретически позволит обходиться одной маской. Эта технология более сложная, поскольку сейчас при экспонировании применяются линзы, а в EUV потребуются специальные зеркала. Данный подход более дорогой и обладает меньшей производительностью, но он позволяет выполнять более тонкие структуры, и, вероятно, для определенных слоев эта технология найдет применение в ближайшем будущем. Во всяком случае, Samsung и TSMC уже заявили, что они будут использовать EUV в ближайшие, возможно, два-три года, а это уже не 10 лет. Так что, EUV имеет все шансы перестать быть технологией будущего и стать технологией настоящего.

Таким образом, появление новых структур и внедрение передовых производственных технологий позволят делать кремниевые транзисторы, я бы сказал, минимум в течение следующего десятилетия.

Но если для уменьшения транзистора еще есть некоторый запас, то в отношении памяти Flash и DRAM предел уже достигнут, и увеличение объема возможно только за счет 2,5- и 3-мерной конфигурации.

**А есть ли принципиально новые технологии, позволяющие уменьшить размеры ячейки памяти?**

Не для общего применения. Это возможно в суперкомпьютерах, где могут применяться криогенные технологии. Но в отношении памяти для мобильных телефонов пока никаких прорывов не ожидается.

**Процесс повышения плотности кристаллов продолжает подчиняться закону Мура?**

С нашей точки зрения, закон Мура продолжает работать, хотя это имеет несколько другую форму, чем тогда, когда доктор Мур сформулировал свой эмпирический закон.

Если рассматривать технологии до 28 нм, все они примерно одинаковые у разных производителей. На этапе 20–22 нм в отрасли произошло разделение. Intel решил использовать 22-нм технологию с использованием структуры FinFET. Остальная промышленность продолжила использовать планарные транзисторы, но они начали использовать двухстадийную литографию, чтобы обеспечить возможность печати с проектной нормой 20 нм. Потом TSMC заявила

о технологии 16 нм, Intel – о 14 нм, Samsung – также о 14 нм. Сейчас у TSMC технология 12 нм, у Intel и Samsung – 10 нм.

Еще один интересный момент. Недавно прошла волна новостей о том, что компания Qualcomm, которая работала с Samsung на технологии 10 нм, собирается производить чипы с нормой 7 нм на фабрике TSMC. Почему судьба всего одного проекта вызвала столь большой интерес? Дело в том, что самые передовые технологии (32–28 нм и ниже) используются в немногих проектах – около 10% от общего количества, но эти чипы производятся в очень больших объемах и обладают высокой стоимостью, поэтому они составляют около половины от общего производства пластин в денежном выражении. В результате в области передовых технологий существует очень активная борьба за каждый проект.

Но подавляющее большинство проектов все еще основано на нормах 40, 65, 130, 180 нм. И для нашей компании очень важно то, что наши инструменты поддерживают обе области – и самые передовые, и уже устоявшиеся технологии.

Также обратите внимание, что достижение новых технологических норм практически не сказывается на средней стоимости квадратного дюйма кремниевой пластины. Если взять все виды кристаллов, то эта стоимость колеблется вокруг цифры 33 долл. В течение последних 20 лет были периоды, когда эта величина достигала 40–42 долл. или падала до 27 долл., но эти изменения носят характер временных отклонений от некоторой более или менее устойчивой средней величины.

*Подавляющее большинство проектов все еще основано на нормах 40, 65, 130, 180 нм, но в денежном выражении на передовые технологии приходится около половины от общего производства пластин*

Еще один важный момент заключается в том, что плотность кристаллов определяется не только размером транзистора, но и плотностью внутренних межсоединений. Если рассматривать сечение металлического слоя, то лет 10–15 назад вы бы увидели проводники, ширина которых

значительно больше высоты. Сегодня же проводники часто располагаются вертикально, их высота больше ширины, что позволяет обеспечить ту же плотность тока при том, что проводник занимает меньше места в плане.

С металлическими слоями связана очень важная проблема: чем выше расположен слой, тем больше сечение проводника и, соответственно, меньше сопротивление. Отношение сопротивлений между нижним и верхним слоем в современных изделиях превышает 1000. Это создает множество сложностей для оптимизации трассировки. Если необходимо передать сигнал на верхний слой, а затем обратно на нижний, теряется много места. Эта проблема стала очень серьезной на 20 и 16 нм, а на 7 нм она приобрела такую важность, что была разработана специальная структура переходных отверстий для быстрого перехода на верхние слои.

Также повышение плотности ИС поддерживается развитием 2,5- и 3-мерных конструкций, в особенности в системах с памятью, требующей обеспечения очень высокой скорости доступа. Разработчики располагают кристаллы памяти и контроллеров в одном штабеле, один над другим, что также повышает плотность ИС исходя из единицы площади.

### Но с точки зрения закона Мура расположение транзисторов один над другим выглядит как некий трюк.

Доктор Мур никогда не говорил, как именно будет выполняться его закон. Важно, что на единицу площади приходится все больше транзисторов. Когда площади не хватает, вы вынуждены уходить в третье измерение. Это подобно небоскрегам. Если вы живете в деревне,

где-нибудь в Сибири или на Аляске, вы можете себе позволить большой одноэтажный дом, но в центре Москвы или Нью-Йорка, где площадь под застройку очень дорогая, приходится строить небоскребы.

### А все-таки временной шаг между внедрением технологических норм соблюдается?

Мы, компания Synopsys, стараемся отслеживать количество разработок на основе различных норм в мире (см. рисунок). Это неофициальное исследование: мы просто агрегируем информацию о проектах с использованием наших платформ. Когда мы видим более 400 проектов на основе определенной нормы, мы для этой нормы прекращаем подсчет и принимаем, что эта технология уже устоявшаяся.

Итак, для 90 нм столбик пересек отметку 400 в третьем квартале 2005 года. Ровно через два года этот порог преодолела норма 65 нм. Для 45–40 нм шаг был несколько больше. Затем шаг снова немного сократился и т.д. Таким образом, можно видеть, что сохраняется хороший шаг, но он не идеален: нельзя сказать, что он строго соответствует двум годам. Это прежде всего зависит от объема тех инноваций, которые внедряются для достижения следующей нормы.

### А что означают более темные столбики на графике?

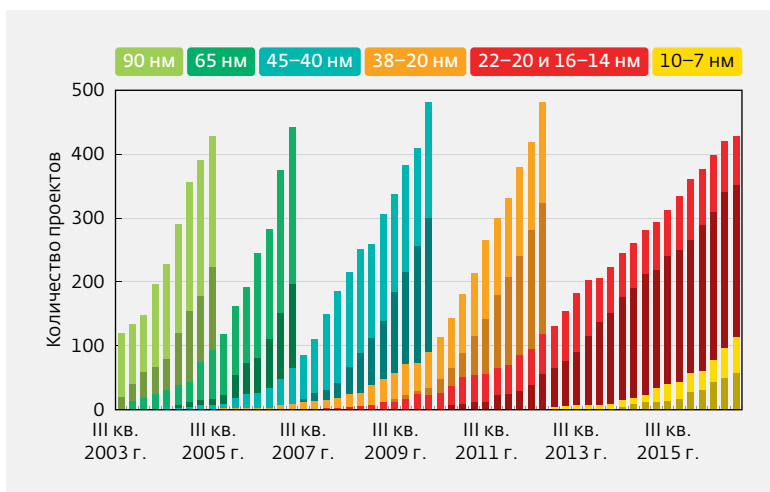
Это проекты, которые на соответствующий момент времени были переданы в производство. Можно заметить, что доля таких проектов растет. Это связано с тем, что компании стали меньше рисковать, поскольку сейчас передовые проекты стали дороже, и прежде чем браться за новый проект, нужно быть в достаточной степени уверенным, что он дойдет до производства. Это также отчасти объясняет некоторое увеличение шага между моментами, когда технологические нормы становятся устоявшимися.

### Вы говорили про 3-мерные конфигурации. Насколько эти технологии сейчас широко применяются?

Нельзя сказать, что эти конструкции очень широко распространены, но многие из них очень важные. Прежде всего, это кубы памяти большого объема.

Разработчики, когда это возможно, предпочитают вариант 2,5D, поскольку применение так называемой истинной 3D-конфигурации связано с переходными отверстиями в кремнии (Through

Агрегированное количество разрабатываемых и переданных в производство проектов на основе различных технологических норм по данным Synopsys





Silicon Via – TSV), а они, к сожалению, занимают большую площадь.

#### Помимо памяти, в каких ИС находят применение эти передовые технологии?

Память стоит несколько особняком. Как уже говорилось, там есть ограничения на размер ячеек, и поэтому относительно широко применяется трехмерная конфигурация. И технологические нормы в области памяти не соответствуют нормам в других видах кристаллов.

Помимо традиционных высокопроизводительных процессоров, сложных ПЛИС, различных контроллеров сейчас самые передовые технологические нормы находят применение в такой развивающейся области, как графические процессоры. Это уже не те процессоры, которые ставятся на графические карты для быстрого обсчитывания полигонов в играх. Сама идея большого количества ядер, способных очень быстро выполнять достаточно простые операции, оказалась востребованной в системах искусственного интеллекта, в частности в аппаратных платформах для нейросетевых вычислений, систем распознавания образов и прочих

задач, связанных с обучением машин. Эти процессоры можно назвать многоядерными ЦПУ. Например, Intel выпускает специальные версии процессора Xeон с 72 ядрами. Google разработал собственную специализированную ИС для машинного обучения, которая имеет 65 тыс. 8-битных вычислительных блоков (матрица 256×256).

У Synopsys также есть система для распознавания образов, которая начинает применяться в некоторых системах обработки видео в автомобилях, например для определения максимальной разрешенной скорости на основе анализа дорожных знаков. Такие системы должны очень быстро обрабатывать огромные объемы информации, и их необходимо обучать. По сути, нейросетевые вычисления – это обработка тензоров. И эти новые решения оптимизированы для выполнения именно таких задач. Фактически, это новая тенденция в развитии процессоров, архитектура которых совершенно непохожа на то, что мы привыкли видеть в традиционных ЦПУ.

#### Спасибо за интересный рассказ.

С.А. Домиком беседовал Ю. Ковалевский



**Module**  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР

# Отечественные микросхемы серий

- 1879BA1AT
- 1895BA2T
- 1895BA1AT
- 1879BM5Я
- 1879BM6Я
- 1879BЯ1Я
- K1888BC018
- K1879XB1Я

## Операционные усилители

<http://www.module.ru> | e-mail: [ruses@module.ru](mailto:ruses@module.ru) | тел.: (499) 152 9698