

# Базовые кристаллы и масштабирование ИС

*Ключевые слова: базовый кристалл, изменчивость параметров процесса, инструментальные средства САПР, пластина, топологические нормы.*

Базовые (контрольные) кристаллы для отработки конструкции схемы или технологии становятся все более распространенными и сложными по мере уменьшения топологических норм процесса. Это обусловлено тем, что проектировщики стремятся использовать ранние варианты конструкции для выявления возможных проблем до начала производства новых ИС. Однако возникает вопрос жизнеспособности данного подхода на технологических уровнях 7/5 нм – в свете роста стоимости перспективных технологий создания опытных образцов, включая затраты на обработку шаблонов и пластин.

Проектировщики полупроводниковых приборов уже давно делают базовые кристаллы для проверки тестовых структур, базовых элементов памяти, крупных блоков памяти, прецизионных аналоговых схем (например, схемы типа «токовых зеркал»), ФАПЧ, датчиков температуры и быстродействующих устройств ввода–вывода. Эта практика велась на технологических уровнях 90, 65, 40, 32, 28 нм и т. д., так что появление базовых кристаллов на топологиях 16–7 нм и менее не должно было стать сюрпризом. Однако по мере роста затрат возникают споры, которые можно свести к двум противоположным позициям:

- с учетом достижений в области инструментальных средств использование базовых кристаллов представляется излишним;
- базовые кристаллы с более совершенными средствами встроенной диагностики следует использовать еще больше.

Современные инструментальные средства САПР обладают высокими рабочими характеристиками, с их помощью можно моделировать и проверять с определенной степенью точности и правильности

практически все. Ключ к получению хороших и точных инструментов, а также точных результатов проектирования – качество данных, предоставляемых кремниевыми заводами. Ключ к хорошим конструкциям (например, топологическим чертежам) – наличие высококачественного, точного пакета программ проверки соблюдения проектных норм, обнаруживающих все, чего не должно быть в топологии. Большинство проблем новейших процессов со все меньшими топологиями относится к сфере начальных операций обработки полупроводниковых пластин (формирование транзисторной структуры – FEOL), где огромное значение имеют физика полупроводников и литография. То, что не было проблемой на более зрелых топологиях, может представлять серьезную трудность на уровне 7/5 нм. Изменение параметров процесса на всей поверхности пластины и изменчивость параметров на крупном кристалле также стали проблемой, хотя практически не имели значения на технологических уровнях с большими топологическими нормами.

В процессе осуществления производственными FEOL-группами диагностики, нахождения дефектов, проведения анализа отказов и работ по получению образцов

## МНЕНИЕ ЭКСПЕРТА



Современное микроэлектронное производство – весьма ресурсоемкий процесс как в финансовом плане, так и в части потребляемой энергии и материалов. Особенно это касается изготовления приборов с нанометровыми размерами. Поэтому очень важно изготавливать работоспособные кристаллы «с первого предъявления», ведь ошибка разработчика может стоить компании девятизначных сумм. Использование современных мощных САПР позволяет проводить моделирование работы проектируемых устройств еще до их серийного изготовления, максимально приближенно к процессам, происходящим в реальных кристаллах. Но помимо систем проектирования необходимы и средства проектирования: набор библиотек стандартных ячеек, различные модели, позволяющие симитировать техпроцесс

и поведение приборов в кремнии, а также библиотеки сложнофункциональных блоков. И прежде чем предложить разработчику весь этот инструментарий, мы должны быть твердо уверены, что все эти модели и библиотеки адекватно отражают процессы, происходящие в реальном кремнии. Для этого проводится регулярная аттестация всех составляющих элементов маршрута проектирования для каждой используемой технологии. Это делается путем проектирования и производства тестовых кристаллов, на которых проверяется соответствие параметров средств проектирования тем, которые показывает реальный кремний. Проектирование тестовых кристаллов – нетривиальная задача, поскольку при минимальных затратах нужно получить максимально возможное количество измеренных параметров. Тестовый кристалл должен быть не только достаточно дешевым в проектировании и производстве, по возможности иметь простой и понятный алгоритм работы, но и охватывать при этом максимально возможное количество вариантов проверки средств проектирования. По результатам измерений и исследований тестовых кристаллов предприятие гарантирует максимальную идентичность средств проектирования соответствующим им технологиям, что дает возможность разработчикам создавать свои проекты практически со 100%-ной работоспособностью «с первого предъявления».

**Аркадий Забабурин,**  
начальник лаборатории тестовых кристаллов  
отдела стандартных библиотек АО «НИИМЭ»

первой производственной партии ИС базовые кристаллы – лишь одна из частей головолмки.

Сами по себе базовые кристаллы массовой продукцией не являются, их никто не продает. Поэтому инвестиции в них представляют определенную трудность. В конце 1990-х гг. существовали базовые кристаллы на основе СОЗУ, которые довольно широко использовались благодаря достаточно плотной структуре матрицы. С их помо-

щью можно было проверять самые плотные шаги элементов и контролировать дефектность непосредственно на производственной линии. Затем, когда корреляция между структурой СОЗУ и случайной логикой исчезла, многие специалисты посчитали эпоху базовых кристаллов завершённой и для анализа отказов перешли на сканирующую диагностику, однако она оказалась трудной и проблематичной в силу большой доли ручного труда. Поэтому дан-

ную технологию оптимизировали, для ее поддержки был создан ряд инструментальных средств, которые сейчас предлагает практически каждый поставщик САПР.

Помимо этого стало возникать больше вопросов, относящихся к конкретным продуктам, которые не могли быть решены с помощью базовых кристаллов. Сканирующая диагностика стала использоваться в большей степени для входного контроля используемых при производстве ИС материалов – с тем, чтобы увеличить выход годных.

Тем не менее базовые кристаллы продолжали использоваться – сначала в них встроили средства сканирующей диагностики, а потом – объемной диагностики, что приблизило их к сегодняшнему дню.

На прошедшей в 2018 г. Международной конференции по тестированию (International Test Conference) отмечалось, что в базовые кристаллы необходимо встраивать сложную случайную логику, увеличивать объем памяти, добавлять многие другие СФ-блоки. При этом, хотя базовые кристаллы не так хороши, как внутрикристалльная (само)диагностика выпускаемых ИС, производителям необходимо обладать и тем и другим.

К стоящим сегодня перед сложными «системами-на-кристалле» (SoC) вопросам можно отнести следующие:

- какова роль базовых кристаллов при проектировании SoC;
- всем ли аппаратным СФ-блокам требуются для аттестации базовые кристаллы;
- возрастает ли роль базовых кристаллов на новейших технологических уровнях по сравнению с более зрелыми;
- важна ли аттестация базовым кристаллом по отношению к конкретному типу протоколов СФ-блоков;
- каковы риски отсутствия аттестации на физическом уровне?

Отмечается, что существует множество высокопроизводительных протоколов, таких как LP DDR 4/4x PHY, PCIe 4

PHY, USB 3.0 PHY и 56G/112G SerDes, причем СФ-блоки, реализуемые по каждому из этих протоколов, крайне сложны. Если существует вероятность отказа, не выявленная до интеграции в SoC, то стоимость модернизации будет огромной. Вот почему общепринятой практикой стала проверка каждого из этих сложных СФ-блоков на физическом уровне перед интеграцией в SoC. Базовые кристаллы используются для проверки правильности проектирования СФ-блоков и соответствия функциональным спецификациям протоколов. Они также используются для проверки достаточности запасов, заложенных при проектировании СФ-блоков, с целью уменьшения отклонений (разброса) параметров СФ-блоков вследствие допусков параметров процесса. Все высокопроизводительные аппаратные СФ-блоки проходят через процесс аттестации на физическом уровне с использованием базовых кристаллов. На этом этапе часто обнаруживается пограничность (между нормальным состоянием и потенциальным отказом). На современных технологических уровнях важно иметь базовые кристаллы, сформированные под различными углами процесса<sup>2</sup>. Этот подход необходим для моделирования возможных отклонений производственного процесса обработки пластин с целью повышения выхода годных. Перспективные протоколы, такие как 112G, GDDR 6, HBM 2 и PCIe 4, невероятно сложны и чувствительны к изменениям параметров процесса. Спроектировать эти схемы и попытаться гарантировать их производительность без использования базовых кристаллов практически невозможно.

Помимо аттестации характеристик протоколов СФ-блоков тестовые кристаллы могут быть использованы для подтверждения устойчивости структур к электростатическому разряду, чувствительности к защелкиванию и ухудшению характеристик на широком температурном диапазоне. Все эти вопросы намного важнее на современных технологических уровнях, чем на более зрелых. Базовые кристаллы пред-

## МНЕНИЕ ЭКСПЕРТА



Комплект средств проектирования (PDK), как составляющее концепции предоставления потенциальному заказчику возможности реализации своего проекта на современной полупроводниковой фабрике, подразумевает под собой обяза-

тельное наличие встроенных Spice моделей приборов. Это является стандартом в полупроводниковой отрасли. При этом в моделях учитывается электрофизическое поведение приборов, статистический разброс параметров технологического процесса и др. Разработка моделей, характеризующих технологический процесс, подразумевает использование тестовых структур, входящих в состав базового тестового кристалла. Подход к формированию состава FEOL группы тестового кристалла в части, предназначенной для экстракции Spice-параметров элементной базы (транзисторы, диоды, емкостные элементы и т.д.), принципиально отличается от подхода к разработке тестовых блоков для измерений СФ-блоков, элементов памяти, и т.д. и ориентирован, в первую очередь, на особенности конечной модели (BSIM4, PSP, NTCUM и др.).

*Александр Потупчик,  
начальник отдела моделирования АО «НИИМЭ»*

ставляют собой средства, гарантирующие целостность конструкции на уровне блоков размером с бит. Лучше иметь дело с любыми потенциальными проблемами в меньших блоках, чем пытаться исправить их в конечной интегрированной SoC.

Изменчивость параметров процесса, существующая сегодня и связанная с конструкцией конкретных продуктов, является причиной того, что группы разработчиков теперь в каждом элементе совместно с диагностикой применяют машинное обучение. Цель состоит в получении статистического анализа, позволяющего выявить коренные причины возникновения отказов и изменений параметров процесса. При этом данные постоянно накапливаются.

Появилась тенденция использования контролепригодного проектирования (DFD<sup>3</sup>). Диагностическая часть по своей сути неоднозначна: если делать диагностику одного кристалла, есть вероятность, что из-за конструкции схемы, логического кода

и т. д. дефект будет возникать в определенном месте. Именно поэтому на подобном кристалле можно осуществлять машинное обучение, рассматривать возможность изменения конструкции с целью ее совершенствования.

В последнее время был опубликован ряд работ по DFD. На базовом кристалле разрабатываются конкретные схемы, которые, с одной стороны, являются репрезентативными, а с другой – оптимизированы для диагностики с самым высоким разрешением.

Один из таких подходов – двумерное сканирование. Существует диагностика цепи и логическая диагностика. Диагностика цепи – это грубая проверка реальности, позволяющая убедиться в работоспособности цепей сканирования. Соответственно, при низком выходе годных запускается диагностика цепи с целью убедиться, что все цепи сканирования функционируют. Если цепи сканирования не работают, доступ к логике невоз-



можен. Для увеличения разрешения применяется одностороннее сканирование: при достижении дефекта сканирование осуществляется в обратную сторону, чтобы точно выяснить, откуда этот дефект появился. Такая методика обсуждается в контексте базовых кристаллов, но есть вероятность, что ее могут применять в серийно производимых ИС. Однако это потребует увеличения площади кристалла.

В любом случае, базовые кристаллы становятся данностью при проектировании современных ИС. Основная мотивация создания базового кристалла – получить как можно больший объем информации по результатам его использования.

### ВОПРОСЫ КАЧЕСТВА

По мере того как ИС все шире используются в автомобильной и промышленной электронике, ужесточаются требования к их качеству и надежности. Базовые кристаллы играют значительную роль в обеспечении надежности, и все чаще и чаще это означает потребность в базовых кристаллах для СФ-блоков.

Для ФАПЧ, являющихся высокопроизводительными тактовыми генераторами, и для параллельно-последовательных и последовательно-параллельных преобразователей (SerDes), представляющих собой быстродействующие информационные сопряжения, функциональность базовых кристаллов критически важна: если эти схемы не работают, строя может выйти весь кристалл. Соответственно, стандарты довольно высоки. Обычно подобные вопросы рассматриваются с точки зрения статистики, прежде всего статистики массового производства. Никто из заказчиков не хочет первым опробовать на себе новый СФ-блок, поэтому статистика массового производства является для них наиболее важным показателем.

Для того чтобы предоставить эти данные заказчикам, кремниевые заводы дают статистику объема обрабатываемых пластин

Для этого важно задействовать все структуры базового кристалла, тогда на основе полученных данных разработчики будут знать, в каком направлении двигаться дальше. Не менее важно обладать необходимыми инструментальными средствами обработки данных – в настоящее время с базовых кристаллов собирается информации больше, чем способен воспринять человеческий мозг.

Ряд фирм уже разрабатывает алгоритмы и инструментальные программные средства, способные преодолеть этот разрыв. На практике это означает совершенствование таких методов, как обнаружение аномалий, анализ тенденций и формирование тепловых карт.

и число семейств ИС, в которых используется конкретный СФ-блок. Это самый устойчивый показатель статистической достоверности. Его демонстрация потенциальному клиенту – только первый шаг. Кто-то должен стать первым клиентом, поэтому в случаях, когда объем производства невелик или дело касается нового СФ-блока, следующий вопрос заключается в том, могут ли заказчики увидеть отчет о тестировании на физическом уровне.

Поставщики СФ-блоков обладают собственными лабораториями, которые способны предоставить необходимые отчеты по тестированию, объемом обычно от 50 до 500 страниц. Поставщик СФ-блоков обычно запускает на кремниевом заводе базовые кристаллы с несколькими партиями пластин со сдвигом по параметрам тестирования. На кремниевом заводе процесс сдвигается в нескольких направлениях с целью выявления потенциальной изменчивости параметров процесса при производстве. Для составления отчета о тестировании партий со сдвигами по параметрам тестирования у поставщика СФ-блоков обычно имеется несколько испытательных стендов с термальными камерами и регулированием напряжения. То есть поставщик пытается менять окружающую тести-

руемые кристаллы среду в соответствии с пожеланиями заказчика. Затем в отчете приводятся данные об измерениях по существу по каждому из основных показателей, которые клиент определяет для данного СФ-блока.

Отчет о тестировании не является стандартным документом, но предполагается, что он должен содержать данные обо всех изменениях рабочих параметров процесса, напряжения, температуры и рабочего диапазона эксплуатационных характеристик, которые были осуществлены в процессе тестирования. Следующий шаг – тестирование у заказчика. Этот этап имеет решающее значение. Сейчас у большинства производителей ИС есть собственные программы тестирования кристаллов, поэтому тестирования СФ-блока на базовых кристаллах поставщика СФ-блоков недостаточно – у данного СФ-блока все еще могут оставаться проблемы с точки зрения конечных применений у клиента. В результате почти все крупные поставщики ИС не принимают на веру отчеты поставщиков СФ-блоков о тестировании. Большинство из них обладает собственными группами (группы тестирования микросхем или группы контроля качества), которые осуществляют внутрикорпоративное тестирование СФ-блока.

Чем меньше топологические нормы, тем больший вес имеют отчеты и данные. Если взять первые фирмы, начавшие

массовое производство 7-нм ИС, и первые фирмы, готовящиеся к производству 5-нм ИС, то все они имеют собственные группы тестирования кристаллов. Критический фактор – результаты тестирования кристалла. Это достаточно дорого, поскольку связано с задержками графика освоения новой продукции, но не так дорого, как замена кристалла ИС в массовом производстве. Поэтому такое большое значение придается совершенствованию первых образцов базовых кристаллов, поэтому и допускаются значительные затраты и задержки графиков работ.

В случае СФ-блоков для современных технологических уровней с минимальными топологиями заказчики обычно запрашивают отчеты по моделированию и надежности. Им предоставляются результаты моделирования высшего уровня, которые будут последовательно отражаться по всем листам данных. Ключевым здесь является определение качества, заключающееся в том, ведет ли себя кристалл так, как описано в документации тестирования, или нет. В этом плане неточность документации ничем не отличается от отказа кристалла. Соответственно, заказчикам и разработчикам необходимо точно определить и согласовать многочисленные параметры, включающие и определяющие все важные эксплуатационные характеристики.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Базовые кристаллы будут по-прежнему играть жизненно важную роль в оказании помощи поставщикам СФ-блоков и разработчикам SoC с точки зрения снижения рисков, связанных с их конструкциями, а также в обеспечении оптимального качества и производи-

тельности. По мере развития и совершенствования новых подходов группы разработчиков будут получать новые ресурсы для использования современных и зрелых технологических уровней с целью обеспечения максимальной рентабельности инвестиций.

*Mutschler Ann Steffora. Test Chips Play Larger Role at Advanced Nodes. Semiconductor Engineering, June 27, 2019: <https://semiengineering.com/test-chips-play-larger-role-at-advanced-nodes/>*