

ГЛАВНЫЙ КАЛИБР КОМПАНИИ MENTOR GRAPHICS

Даже если бы у компании Mentor Graphics был только один продукт – система (или, как сейчас говорят, – платформа) Calibre, этого было бы достаточно, чтобы рассматривать ее как одного из мировых лидеров в области средств САПР ИС.

Для современных субмикронных технологий стоимость производства комплекта фотошаблонов сравнима с затратами на проектирование интегральной схемы, поэтому задача получения работоспособного кристалла с первой попытки чрезвычайно актуальна.

Один из основных инструментов, направленных на решение этой задачи, – системы физической верификации. Сегодня круг задач подобных систем стал значительно шире. Если еще несколько лет назад речь шла, в основном, о контроле правил проектирования (DRC) и соответствия топологических данных исходной электрической схеме (LVS), то сегодня необходимо уметь моделировать паразитные эффекты в полупроводниковых структурах, проводить экстракцию параметров с высокой точностью (xRC), решать задачи коррекции топологии с учетом разрешающей способности процесса субмикронной фотолитографии (OPC, PSM), использовать новые методы подготовки масок (MDP). Кроме того, должны быть задействованы специальные инструменты подготовки проекта к производству (DFM), ориентированные на учет особенностей конкретного технологического процесса.

В настоящее время практически все ведущие полупроводниковые фабрики мира в качестве базового средства физической верификации проекта перед запуском его в производство используют платформу Calibre компании Mentor Graphics (рис. 1). Эта платформа отвечает всем основным современным требованиям, реализуя комплексный подход к задаче подготовки проекта к производству. Вычислительные технологии ядра платформы поддерживают полный набор инструментов физической верификации, от DRC/LVS-верификации до генерации данных для фотошаблонов. Обладая высокой производительностью и гибкостью, они обеспечивают высокую конкурентоспособность каждого из этих инструментов и платформы в целом. Поддержка всех основных форматов и баз

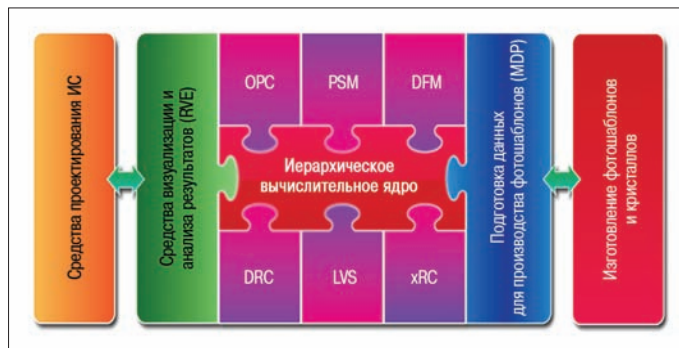


Рис. 1. Структура и основные инструменты платформы Calibre



А. Лохов

данных проектирования СБИС позволяет легко встраивать средства платформы в существующие маршруты проектирования. Такой, можно сказать, уникальный набор характеристик обеспечил системе Calibre широкое распространение и коммерческий успех. Рассмотрим вкратце назначение и основные характеристики компонентов платформы.

CALIBRE DRC

Модуль Calibre DRC, предназначенный для комплексного контроля геометрических правил проектирования, – базовый модуль всей платформы Calibre. Методы геометрической обработки многоугольников, примененные при разработке этого продукта, оказались очень удачными. На их базе сформировалось общее вычислительное ядро платформы, которое используется всеми остальными модулями. Высокая эффективность вычислительных процедур ядра платформы позволяет не ограничиваться верификацией отдельных ячеек и блоков, а проводить анализ кристалла в целом с учетом всех нюансов правил проектирования в субмикронном диапазоне и особенностей применения IP-блоков в современных системах на кристалле.

Благодаря методам распознавания неявных иерархических структур и учета повторяемости блоков, процесс верификации выполняется практически с одинаковой эффективностью как для иерархически структурированных, так и для неиерархических проектов. Для выявленных повторяющихся ячеек производится однократная проверка, а далее при контроле отдельных экземпляров ячейки используются уже готовые результаты этой проверки. Специальный механизм, анализирующий повторяемость полигонов, позволяет разбивать большие множества однородных топологических данных на несколько подмножеств. Применение подобных методов значительно увеличивает производительность процедуры DRC. Еще в несколько раз время проверки можно сократить благодаря возможности распараллеливания вычислительных операций на многопроцессорных рабочих станциях.

В модуле Calibre DRC поддерживается контроль сложных правил проектирования, в том числе связанных с особыми требованиями современных субмикронных технологий. Есть возможность работы с многоугольниками, стороны которых имеют произвольную ориентацию. Разработан аппарат для обнаружения "антенных" (antenna) эффектов. (В процессе травления на границе металлических соединений накапливается заряд, который может приводить к выходу из строя расположенных рядом транзисторов.) Предусмотрены средства анализа плотности распределения металла (несбалансированное распределение металла по площади кристалла приводит

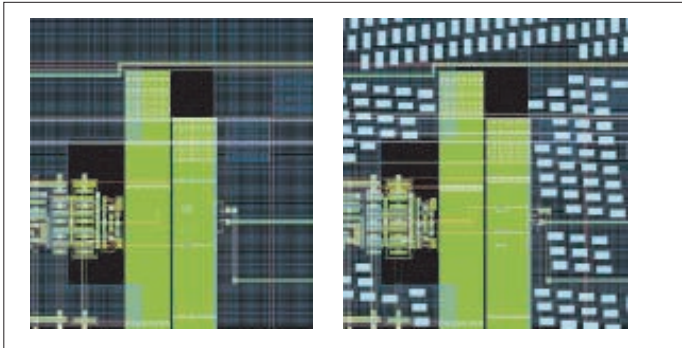
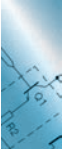


Рис.2. Выравнивание плотности распределения металла на кристалле

к нарушению планарности в процессе производства) и средства коррекции неравномерности распределения путем введения дополнительных областей металлизации в свободных зонах (рис.2).

Модуль Calibre DRC универсален, может использоваться при различных стилях разработки, легко встраивается в любой маршрут проектирования (поддерживается большинство стандартных форматов). Тесная интеграция с популярными топологическими редакторами позволяет проанализировать найденные нарушения в знакомой интерактивной среде. Предусмотрен вывод информации о нарушениях непосредственно в процессе проверки, а также интеллектуальные средства формирования отчетов в удобной для анализа форме при проведении проверок в пакетном режиме.

CALIBRE LVS И CALIBRE XRC

Модуль Calibre LVS отвечает за восстановление принципиальной электрической схемы из топологического представления и сравнение полученных результатов с исходным описанием электрической схемы. При восстановлении электрической схемы решаются задачи идентификации компонентов электрической схемы и соединений, определения их параметров. Правила, на основании которых производится анализ топологических данных и экстракция компонентов, описываются с помощью языка SVRF (Standard Verification Rules Format). Синтаксис этого языка (рис.3) позволяет описать все необходимые типы компонентов (3-, 4- и N-полярные компоненты цифровых, аналоговых и СВЧ-схем) и в совокупности со специальными методами экстракции системы Calibre обеспечивает их надежное распознавание в топологическом представлении. Помимо выделе-

ния самих компонентов, система позволяет на основании геометрических данных рассчитать их реальные параметры и сравнить с параметрами, использованными в исходной электрической схеме. Причем разработчик может задать собственные нестандартные функции расчета параметров по геометрическим данным.

Как и Calibre DRC, этот модуль работает как с иерархическими, так и с одноуровневыми проектами, также есть средства распознавания повторяющихся логических элементов и элементов памяти (использование этой информации значительно повышает производительность процесса верификации). Механизм автоматической локализации кратчайших путей между несогласованными участками одной цепи вносит значительный вклад в ускорение процесса восстановления электрической схемы. Интеграция с модулем визуализации Calibre RVE позволяет анализировать результаты верификации в интерактивном режиме. И, конечно, модуль Calibre LVS непосредственно связан с модулем Calibre xRC, отвечающим за экстракцию параметров соединений, без учета которых проектирование современных схем уже практически невозможно.

Модуль Calibre xRC обеспечивает экстракцию параметров соединений на уровне транзисторов, вентиляльном уровне, а также на уровне иерархических блоков, поэтому может быть интегрирован в самые разные маршруты проектирования. При использовании в маршрутах, ориентированных на разработку небольших аналого-цифровых схем, Calibre xRC в связке с Calibre LVS позволяет достигать высокой степени точности, которая необходима для успешной реализации таких чувствительных устройств. При проектировании больших цифровых схем и систем на кристалле наряду с достаточной точностью важна и производительность, которую позволяет

```
////////////////////////////////////
// CONNECT OPERATIONS FOR Direct LVS ITrace
////////////////////////////////////
CONNECT route_2 route_3 BY via DIRECT
CONNECT route_1 route_2 BY contact DIRECT
CONNECT metal1 58 DIRECT
CONNECT metal2 60 DIRECT
////////////////////////////////////
// CONNECT OPERATIONS FOR Mask LVS
////////////////////////////////////
CONNECT psd pwell MASK // note that pseudo-contacts are not
// needed for tie-downs
CONNECT nsd nsub MASK
CONNECT metal1 ipoly nsd psd by contact MASK
// connects metal1 to the first of ipoly nsd psd
CONNECT metal2 metal1 by via MASK
////////////////////////////////////
// Intentional Device Definitions for Mask LVS
////////////////////////////////////
DEVICE mn ngate ipoly nsd nsd pwell [0] // nmos transistors
DEVICE mp pgate ipoly psd psd nsub [0] // pmos transistors
DEVICE r(pl) rpoly ipoly ipoly [ 20000 ] // poly resistors
DEVICE r(dp) dpres psd psd [170] // diffused p-type resistors
DEVICE r(dn) dnres nsd nsd [65] // diffused n-type resistors
////////////////////////////////////
```

Рис.3. Пример описания на языке SVRF

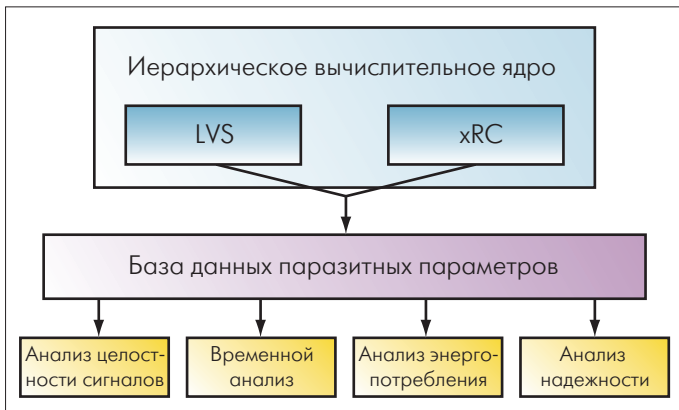


Рис.4. Поддержка паразитных параметров для различных типов анализа

обеспечить вычислительное ядро платформы Calibre. Инструменты Calibre xRC также могут быть интегрированы в топологический редактор и использоваться в интерактивном режиме.

Результаты экстракции сохраняются в специальной базе данных паразитных параметров. Для различных средств анализа (анализ целостности сигналов, временной анализ, анализ надежности, анализ энергопотребления и системы питания) поддерживаются соответствующие представления паразитных параметров (рис.4). Экстракция осуществляется с использованием C-, RC- и RCC-моделей. Опция Calibre L позволяет проводить экстракцию паразитных индуктивностей. Есть возможность экстракции и сравнения M-параметров. Встроенный механизм оптимизации RC-схем Tiseg позволяет проводить их свертку без потери точности. Это увеличивает эффективность использования экстрагированных моделей в средствах моделирования. Для связи с системами моделирования используются стандартные форматы Spice, DSPF и SPEF.

CALIBRE INTERACTIVE И CALIBRE RVE

Модуль Calibre Interactive – графическая среда для работы с программами Calibre DRC/LVS/xRC. Благодаря системе настроек, позволяющей управлять пользовательским интерфейсом, доступом к файлам правил проектирования и основным рабочим директориям, модуль легко адаптируется к любой среде и стилю проектирования. Платформа Calibre поддерживает верификацию и экстракцию на уровне ячеек, блоков и всего кристалла для аналоговых, цифровых, смешанных и СВЧ-проектов. Поэтому разработчики в рамках единой графической среды Calibre Interactive могут решать весь спектр задач, связанных с физической верификацией и экстракцией параметров. Большинство популярных топологических редакторов, например IC Station (Mentor Graphics), Virtuoso (Cadence) Appolo/Astro (Synopsys), обеспечивают возможность доступа к модулю Calibre Interactive непосредственно из меню редактора.

Модуль Calibre Interactive выполняет функции центрального пульта управления процессом верификации и экстракции. Здесь можно указать типы и области DRC-проверок, задать модели (C, RC, RCC, L) для процедур экстракции, организовать локальную экстракцию для отдельных цепей, интересующих разработчика. Вывод результатов экстракции выполняется (в зависимости от желаний пользователя) в форматах H-Spice, DSPF или Calibre View. Из среды Calibre Interactive также осуществляется запуск модуля Calibre RVE, предназначенного для анализа результатов верификации и интерактивной отладки.

Учитывая итерационный характер процесса проектирования, наличие модуля, обеспечивающего пользователю мгновенный доступ

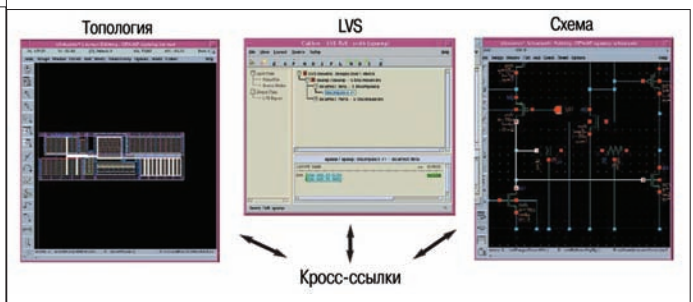


Рис.5. Поддержка соответствия между топологическим и схемным представлениями проектных данных

к просмотру результатов верификации и выполнению отладочных операций в интерактивном режиме, существенно сокращает время анализа и отладки проекта. Отладочные возможности модуля Calibre RVE весьма широки. Поддерживается соответствие между различными представлениями проектных данных, включая принципиальную схему, топологию, исходный список цепей, топологический список цепей, файлы результатов LVS и др. (рис. 5). Для удобства локализации и устранения ошибок DRC в модуле предусмотрена поддержка различных типов сортировки результатов (контекстная, по ячейкам и др.). Применение графических маркеров ошибок различного типа позволяет визуально оценить текущее состояние проекта. Модуль Calibre RVE обладает многими функциями топологического редактора, и часть ошибок может быть устранена прямо в нем.

Результаты выполнения операций LVS/xRC также сортируются по заданному признаку. Данные, не укладывающиеся в заданный диапазон приемлемых значений, сразу локализируются. Поддержка соответствия между различными представлениями проекта позволяет передавать результаты экстракции в топологический и схемный редакторы и отображать там найденные нарушения. Забегая вперед, скажем, что в Calibre RVE доступны также функции вывода результатов анализа DFM и функции анализа результатов производственного тестирования на базе тестов, подготовленных системой FastScan ATPG.

УЧЕТ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ (RET)

При переходе к субмикронным технологическим нормам геометрические размеры элементов становятся соизмеримы с длиной волны света. Оборудование фотолитографии не может обеспечить точное воспроизведение геометрии элементов. Это приводит к появлению многочисленных дефектов и резкому снижению выхода годных. В настоящее время разработан ряд методов повышения разрешающей способности оборудования (оптической коррекции), и платформа Calibre содержит, пожалуй, наиболее полный набор подобных инструментов, который включает следующие модули:

- модуль **Calibre ORC** (Optical and Process Rule Checking) предназначен для контроля специальных правил проектирования, основанных на оценке воспроизводимости отдельных элементов геометрии (соседние линии, короткие сегменты и др.) с учетом краевых эффектов субмикронной фотолитографии. Используются заранее подготовленные ("калиброванные") оптические модели и модели процесса фотолитографии, полученные на основе характеристик конкретного оборудования. В пакетном режиме обрабатывается сразу весь кристалл, места ошибок маркируются прямоугольниками на специальном слое в формате GDSII. Для анализа результатов можно подключить модуль Calibre RVE;
- модуль **Calibre TDoc** (Table-Driven OPC) выполняет оптическую коррекцию геометрии на основе заранее вычисленных табличных правил;

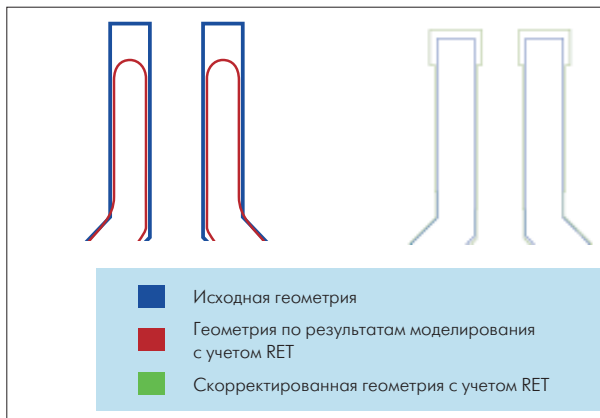


Рис.6. Коррекция топологии с учетом RET

- модуль **Calibre PRINTimage** (Simulated Silicon Print Image) в пакетном режиме проводит моделирование, которое позволяет предсказать, как будут выглядеть геометрические объекты топологии в процессе "перевода" ("печати") их на кремниевую пластину. Используются модели, учитывающие особенности оборудования и технологического процесса, в том числе и эффекты применения масок со сдвигом фазы (Phased Shift Mask, PSM). Результаты моделирования отображаются на специальных слоях в формате GDSII. Далее на базе этих данных могут быть проведены проверки DRC, имитирующие проверки DRC непосредственно на реальном кристалле (simulated silicon);
- модуль **Calibre OPCpro** (Optical Process Correction for Batch Production) позволяет в пакетном режиме с учетом используемых технологий и фотолитографического оборудования провести коррекцию топологии кристалла, направленную на увеличение выхода годных и повышение надежности технологического процесса. Процесс коррекции заключается во внесении изменений, компенсирующих фотолитографические искажения (рис. 6). Пользователь может управлять соотношением "точность коррекции—производительность" путем выбора более или менее "агрессивного" стиля компенсации (задавая параметры компенсации и встроенного моделирования). Модуль Calibre OPCpro также включает все функциональные возможности Calibre ORC и Calibre TDopc;
- модуль **Calibre PSMgate** (Phase Shift Mask Assignment for Gates) генерирует данные для повышения разрешающей способности путем сдвига фазы облучения с помощью специальной маски. Обычно используется для вентиляей с размерами от половины до трети длины световой волны, но может быть применен и ко всему слою, включая критические межсоединения вентиляей;

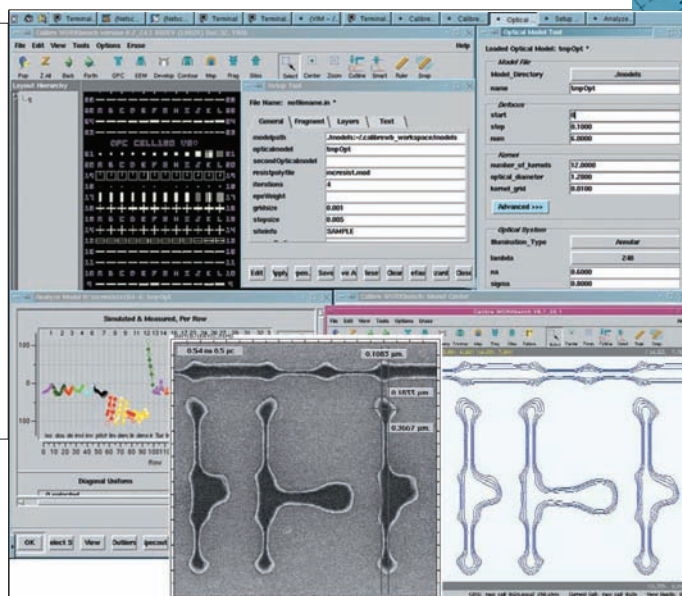


Рис.7. Сравнение геометрии, полученной в результате моделирования, с данными сканирующего микроскопа

- модуль **Calibre OPCsbar** (Scattering Bars) генерирует данные для формирования специальных линий в областях, где необходимо получить четкое изображение. Они позволяют дополнительно сфокусировать луч в процессе фотолитографии и уменьшить эффект абберации и дисперсии (один из оптических методов повышения разрешающей способности);
- модуль **Calibre WORKbench** — ориентированная в основном на технологов специализированная среда для создания моделей технологического процесса и файлов настройки технологического оборудования. Calibre WORKbench позволяет создавать тесты для постпроизводственного тестирования и измерения параметров. Модуль имеет встроенные средства визуализации топологии и процесса моделирования фотолитографии. Сравнение изображений, полученных в результате моделирования и с помощью сканирующего микроскопа, показывает высокую достоверность результатов (рис.7).

CALIBRE DFM

С уменьшением размеров компонентов интегральных схем все более очевидно, что проблема обеспечения выхода годных должна быть в поле зрения разработчиков на протяжении всего процесса проектирования. Крупные производители интегральных схем сегодня предлагают собственные наборы правил проектирования, основанные на производственном опыте (DFM). Правила эти обычно

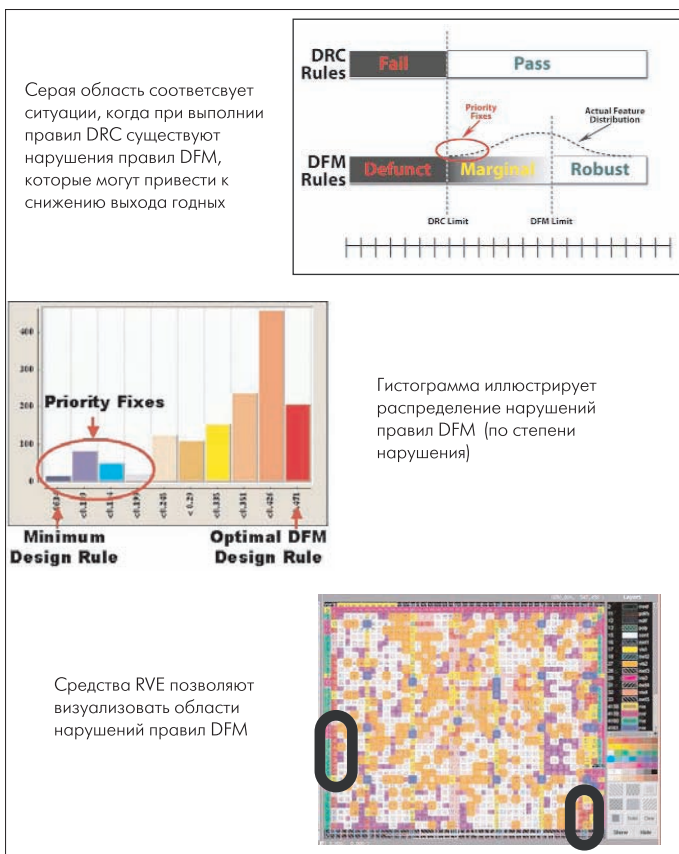


Рис.8. Анализ статистики выполнения правил DFM

предъявляют более жесткие требования к геометрии элементов и зазорам, минимизирующие риск возникновения дефектов в результате возможных отклонений в процессе фотолитографии. Семейство Calibre DFM позволяет на основе учета "производственных" правил обнаружить потенциальные места возникновения дефектов и провести коррекцию. Семейство включает три основных компонента:

- модуль Calibre **DFM Measure** анализирует геометрические элементы на удовлетворение правилам DFM с точки зрения ширины и зазоров, формирует статистику распределения нарушений по отдельным областям и кристаллу в целом (рис.8). Это позволяет выделить проблемные области и устранить нарушения в процессе отладки. Результаты анализа можно просмотреть с помощью модуля Calibre RVE;
- модуль Calibre **DFM Analyze** позволяет проанализировать геометрические элементы с точки зрения степени их влияния на выход годных и присвоить им соответствующие весовые коэффициенты. Элементы могут быть отсортированы по определенным характеристикам, а результаты анализа представлены либо в виде гистограмм, либо в виде объектов, выделенных непосредственно в топологическом представлении (Calibre RVE);
- модуль Calibre **DFM Transition** анализирует одиночные межслойные переходы и их возможные послойные смещения, которые могут привести к ненадежному контакту и повлиять существенным образом на выход годных. В случае необходимости автоматически добавляются дублирующие межслойные переходы, исключающие вероятность отказа.

CALIBRE MDP

Увеличение размера проектов, необходимость повышения разрешающей способности оборудования путем внесения в рисунок до-

полнительных корректирующих изменений приводит к резкому росту объема данных. Возрастает и сложность задачи подготовки данных для изготовления фотошаблонов. Подходы, основанные на последовательной обработке геометрических объектов для преобразования данных в формат записи фотошаблона, требуют больших временных затрат. Использование иерархических принципов, заложенных в вычислительном ядре платформы Calibre, позволяет эффективно справляться с этой задачей. Семейство Calibre MDP, завершающее комплексный маршрут подготовки данных для передачи проекта в производство, включает весь необходимый набор средств подготовки данных для генерации фотошаблонов.

Проверка правил генерации фотошаблонов (Mask Rule Checking, MRC) реализуется средствами модуля Calibre DRC наряду с традиционным контролем правил проектирования. Коррекция эффекта близости (Mask Proximity Correction, MPC) может быть встроена в скрипт на языке SVRF, позволяющего эффективно работать с такими операциями, как изменение размеров отдельных элементов и групп, вращение, зеркальное отображение, масштабирование, булевские операции со слоями, заполнение планарных областей и другими. Функцию преобразования данных в формат генерации фотошаблонов реализует модуль **Calibre FRACTURE**, который может экспортировать данные в форматах MEBES, Cambridge, JEOL, Hitachi, VSB (Variable-Shaped Beam), GDSII и OASIS (Open Artwork System Interchange Standard). Для визуализации результатов используются модули **MDPview**, **LITHOview**, а также Calibre RVE и Calibre WORKbench.

CALIBRE MT И CALIBRE MTFLEX

В условиях резкого возрастания объема данных и временных затрат на их обработку важное значение приобретает использование различных методов и средств повышения производительности. Одним из таких методов является разбиение процесса обработки на параллельные ветви и реализация их на мультипроцессорных и распределенных системах. Специальный модуль Calibre MT (Multi-Thread) позволяет разбить процесс верификации на множество ветвей, каждая из которых выполняется на отдельном процессоре мультипроцессорной рабочей станции или сервера. В отличие от других систем распределенной обработки, имеющихся на рынке, Calibre MT не требует модификации файлов правил проектирования, добавления специальных файлов для распараллеливания, специально сконфигурированных аппаратных средств. Алгоритм распараллеливания позволяет повышать производительность практически пропорционально числу используемых процессоров. Дополнительным преимуществом Calibre MT является высокоэффективное использование памяти. Подключение каждого дополнительного процессора отбирает крайне незначительный объем памяти (1–2%). Дополнительная опция Calibre MTFlex обеспечивает возможность переноса обработки отдельных ветвей в распределенную разнородную сеть.

Платформа Calibre компании Mentor Graphics — один из самых успешных продуктов за всю историю индустрии электронных САПР. Она охватывает большое число инструментов физической верификации и подготовки производства интегральных схем, набор этих инструментов постоянно расширяется. Многие из этих инструментов заслуживают отдельного обсуждения в дальнейшем, пока же была сделана попытка, не углубляясь в детали, представить весь спектр возможностей этого продукта. ○