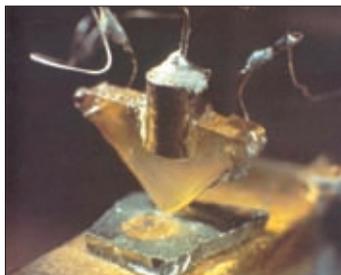


# САПР МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

## ЭТАПЫ БОЛЬШОГО ПУТИ

Чтобы правильно оценить пути дальнейшего развития какой-то области человеческой деятельности, полезно порой оглянуться на пройденный путь. Мы благодарны компании Cadence за предоставленный здесь материал, посвященный истории развития средств автоматизированного проектирования микроэлектроники. Истории, которая еще раз позволяет удивиться возможностям науки и техники.

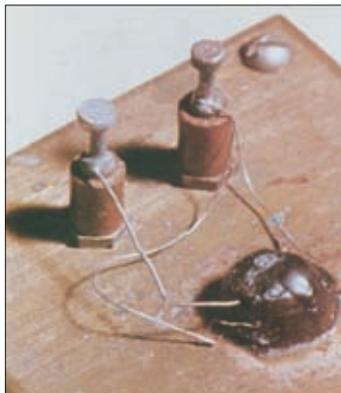
Развитие электроники неразрывно связано с развитием средств автоматизированного проектирования электронных устройств. Без работы специалистов этой области уже невозможно представить проектирование и производство современных микроэлектронных систем. Сегодня индустрия средств автоматизированного проектирования электроники (Electronic Design Automation – EDA) – неотъемлемая часть электронной промышленности. Ежегодный оборот EDA-индустрии превышает четыре миллиарда долларов. Как все начиналось, основные этапы развития средств САПР микроэлектроники (на примере компании Cadence Design System) – тема предлагаемого краткого исторического обзора.



**Рис. 1. Точечный транзистор (1947 год, AT&T Bell Laboratories)**

### КАК ВСЕ НАЧИНАЛОСЬ

Началом развития современной полупроводниковой электроники можно считать 50-е годы прошлого века. Первый точечный транзистор появился в 1947 году (рис.1), плоскостной – в 1950 году (рис.2), а первая интегральная микросхема – в 1959 году (рис.3). При появлении планарной технологии и первых планарных интегральных схем (рис.4) сформировалась технология проектирования, основные принципы которой остаются актуальными и в настоящее время. Разработка первых ИС в 60-е годы велась вручную. На бумаге создавался чертеж принципиальной электрической схемы. На больших листах пленки из сложного полиэфира послойно реализовыв-



**Рис. 2. Плоскостной транзистор (1950 год, AT&T Bell Laboratories)**

Ф.Томас,  
А. Иванов



вались фрагменты проекта, которые потом объединялись на гигантском листе бумаги. Проверка соответствия исходной принципиальной схемы и полученного таким образом проекта топологии осуществлялась визуально, совместно всеми сотрудниками-дизайнерами. Затем создавался комплект шаблонов для фотолитографии. Для этого каждый слой вручную вырезали из специальной бумаги и фотографически его уменьшали. Даже первый микропроцессор Intel 4004 с 2300 транзисторами был спроектирован таким вот образом (рис.5).

В 70-е годы стало очевидно, что при постоянном росте сложности интегральных схем задача их промышленной разработки без создания средств компьютерной автоматизации будет попросту нереализуема, и такие средства стали появляться. Инструменты автоматизации, которые сейчас объединены в рамках EDA, поначалу были представлены средствами CAE (Computer Aided Engineering) и средствами CAD (Computer Aided Design). Первые были призваны помочь разработчику принципиальных схем, вторые – инженеру-конструктору.

Самой серьезной проблемой для разработчиков ранних ИС было отсутствие возможности создания физического прототипа разрабатываемого устройства. Ошибки, допущенные при проектировании принципиальной схемы устройства, обнаруживались только после изготовления интегральной схемы. При обнаружении ошибки нужно было менять проект, заново создавать комплект фотошаблонов и повторять весь производственный цикл. И так по многу раз. Для решения этой проблемы в 70-е годы в университете Беркли (Berkeley), который входил в число лидеров разработки средств компьютерного инжиниринга (CAE), была разработана программа

### Представляем авторов статьи

**ТОМАС Франсуа (Francois Thomas).** Директор по маркетингу продуктов цифрового и цифроаналогового проектирования СБИС компании Cadence, доцент университета Orsay, Париж. Область научных интересов – проектирование систем на кристалле. Имеет научные патенты и публикации в области проектирования памяти, аналого-цифрового преобразования. Один из пионеров в области разработки систем кремниевой компиляции.

**ИВАНОВ Анатолий.** Ведущий инженер и менеджер сервисного подразделения VCAD московского представительства компании Cadence.  
E-mail: anatoli@cadence.com

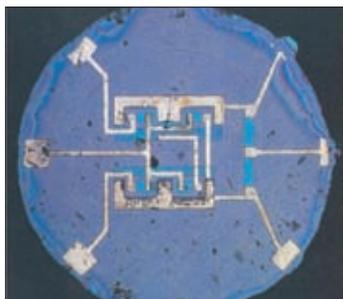
SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis). Предназначалась она для моделирования ИС на электрическом уровне и позволяла проверять правильность работы схемы на уровне виртуальной компьютерной модели. Эта программа и по сей день используется для моделирования аналоговых схем. По мере распространения цифровых схем, для проверки правильности функционирования стали разрабатывать и использовать средства логического моделирования. Одной из первых таких программ была система Hi-Lo.



**Рис.3. Первая интегральная схема компании Texas Instruments (1959 год, один транзистор и четыре дополнительных элемента на одном кристалле)**

В те же 70-е годы сформировались принципы организации системного программного обеспечения для современных EDA-средств. Первые компоненты компьютерного проектирования (CAE) создавались на базе вычислительных машин коллективного пользования (Mainframe) и только что появившихся мини-компьютеров моделей PDP и VAX компании Digital Equipment. Но операционные системы, использовавшиеся в этих компьютерах, не удовлетворяли требованиям разработчиков. В лаборатории Bell Labs и в университете Berkeley были разработаны операционная система UNIX и язык программирования C. И сегодня операционная система UNIX (различные версии) и язык C/C++ – самые популярные системные программные средства в EDA-индустрии, обеспечивающие формирование удобной среды разработки на базе современных рабочих станций.

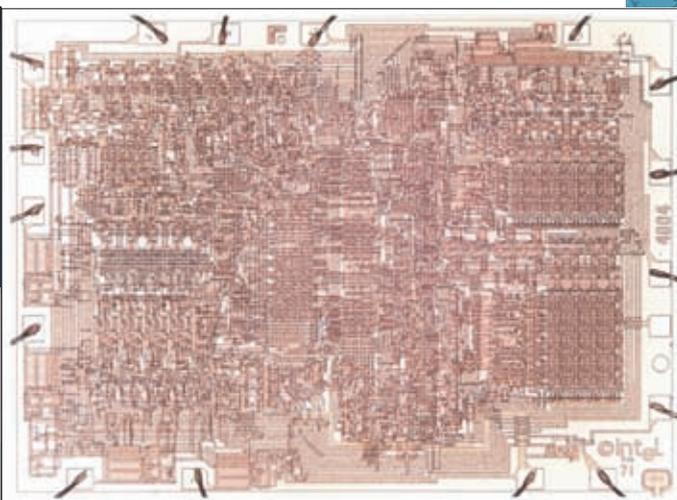
Появление средств CAD (компьютерных инструментов для конструкторского проектирования печатных плат и интегральных схем) в 70-е годы было обусловлено быстро растущей сложностью и объемом схем. Без таких инструментов уже стало невозможно оптимально разместить и соединить между собой функциональные блоки сложных электронных устройств (рис.6). Ведущие позиции в этой сфере принадлежали фирмам Computervision, Applicon и Calma (в 1988 году поглощена фирмой Valid, которая, в свою очередь, была полностью интегрирована в компанию Cadence в 1992 году). Разработанные фирмой Calma CAD-системы, такие как Startrec-Station, широко использовались вплоть до начала 80-х годов. Они представляли собой комбинацию программного обеспечения CAD и специального графического аппаратного обеспечения, работающих на базе мини-компьютера Eclipse фирмы DataGeneral. Производительность этих систем была довольно ограниченной, а оборудование очень дорогостоящим, поэтому работы с применением этих средств CAD нередко велись круглосуточно в три смены.



**Рис.4. Первая коммерческая планарная ИС (один бит памяти на основе четырех транзисторов и пяти резисторов)**

## РОЖДЕНИЕ ИНДУСТРИИ EDA

В начале 80-х годов компании Daisy, Valid и Mentor Graphics разработали свои системы на базе рабочих станций (Sun, Apollo), в рамках которых объединялись ввод принципиальной схемы, система моделирования и средства конструкторского проектирования. Та-



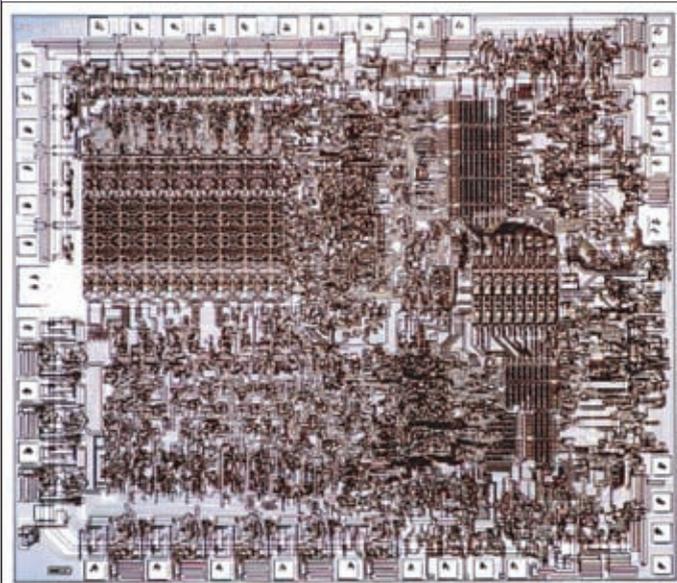
**Рис.5. Микропроцессор Intel 4004 (1971 год, 2300 транзисторов, [www.intel.com/museum](http://www.intel.com/museum))**

ким образом, произошло объединение средств CAE и CAD. В 1985 году эти фирмы с большим успехом вышли на мировой рынок. Это и было рождением индустрии EDA.

Однако требования к средствам проектирования интегральных схем непрерывно возрастали, и представленные на рынке EDA-системы во второй половине 80-х годов уже перестали соответствовать потребностям разработчиков.

Производители полупроводниковых приборов активизировали усилия, направленные на разработку необходимого инструментария. Это стимулировало развитие небольших начинающих компаний, выходящих на рынок с новыми технологиями. В это время появились такие фирмы, как ECAD с системой Dracula, предназначенной для проверки правил проектирования (Design-Rule-Checking, DRC) и контроля соответствия топологической реализации исходной принципиальной схеме (Layout-Versus-Schematic, LVS), компания SDA с продуктом IC-Framework, компания Silicon Compiler Systems (SCS) с продуктом Silicon-Compiler, компания Tangent с системой размещения и трассировки, а также компания Gateway Design Automation с языком Verilog и системой высокоуровневого логического моделирования на базе этого языка.

Фирмы SDA и ECAD первыми осознали, что для завоевания рынка EDA необходимо обеспечить техническую поддержку объедине-



**Рис.6. Микропроцессор Intel 8080 (1974 год, [www.intel.com/museum](http://www.intel.com/museum))**

ния различных EDA-средств в рамках единой интегрированной среды проектирования. В 1988 году эти фирмы объединились в компанию Cadence. Среда SDA-Frameworks позволила собрать воедино различные перспективные технологии, предлагаемые начинающими фирмами. Через год компания Cadence поглотила фирму Tangent и объединилась с фирмой Gateway, обеспечив тем самым лидерство, соответственно, как в области средств размещения/трассировки, так и в области средств логического моделирования. Вместе с компанией Gateway фирма Cadence приобрела права на язык Verilog и начала его продвижение на рынок как в качестве специализированного языка программирования, так и в качестве средства моделирования цифровых систем. Таким образом, появилась возможность предложить разработчикам комплексное решение задачи проектирования интегральных схем.

Стратегия комплексного объединения средств проектирования обеспечила такой коммерческий успех, что уже в 1991 году компания Cadence смогла интегрировать в себя одну из "великих трёх", а именно фирму Valid (несмотря на то, что та была гораздо крупнее Cadence). Таким образом удалось расширить сферу деятельности компании и на область проектирования систем на печатных платах, обеспечив лидерство в EDA-бизнесе. Фирма Daisy не выдержала конкуренции и ушла с рынка. Mentor Graphics разработала свою собственную среду проектирования и, поглотив фирму SCS, стала вторым по значимости поставщиком EDA-продуктов.

### ЛОГИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ

В конце 80-х годов интегральные микросхемы настолько усложнились, что создание описания принципиальной схемы (как с помощью схемотехнического редактора, так и в текстовом виде) стало существенной проблемой. Были разработаны первые инструменты, которые позволяли из описания на уровне регистровых передач (Register Transfer Level – RTL, языки Verilog или VHDL), уже применявшихся в моделировании, автоматически синтезировать описание принципиальной схемы на уровне логических элементов. В 1987 году компания Synopsys вышла на рынок с соответствующим продуктом Design Compiler, за ней вскоре последовал AutoLogic от фирмы SCS-Mentor Graphics. Специалисты Synopsys вовремя оценили преимущества технологии автоматического синтеза для рынка СБИС на базе стандартных библиотек логических элементов (ASIC). Использование таких средств позволяло разработчикам проводить независимое проектирование ИС на верхнем уровне, осуществляя разработку описания на языках Verilog или VHDL и его верификацию средствами логического моделирования. После автоматического синтеза результаты проектирования в виде описания принципиальной схемы на уровне логических элементов передавались компании-производителю ИС. Компания-производитель выполняла физическое проектирование (размещение/трассировка, контроль правил проектирования и соответствия электрической схеме, подготовка данных для изготовления фотошаблонов), а также производство и тестирование. Таким образом, до середины 90-х годов на EDA-рынке в сфере физического проектирования и проектирования аналоговых и смешанных ИС лидировала компания Cadence, а в области логического синтеза господствовала Synopsys.

### СУБМИКРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

В середине 90-х годов появились первые интегральные схемы с нормами проектирования 0,5 и 0,35 мкм. Возникла необходимость учета различных тонких физических эффектов. Увеличилась суммарная длина проводников, проводники стали существенным

источником запаздывания сигналов. Применявшаяся до сих пор методология проектирования ASIC достигла предела своих возможностей, поскольку определяющим фактором стало качественное проектирование топологии схемы. Компания Cadence воспользовалась имеющимися наработками в сфере размещения/трассировки и представила разработчикам новый метод проектирования топологии (back-end), который позволял специалистам в области проектирования верхнего уровня (front-end) использовать технологии предварительного размещения (1992 год – Preview, 1996 год – Design Planner). С усложнением проектов ИС решающее значение приобрело использование оптимальной методологии проектирования. Эта тенденция развития EDA-индустрии была вовремя замечена, и с 1994 года компания Cadence предлагает пользователям не только программные средства, но и поддержку оптимальной методологии проектирования, а также сервисные услуги.

Во второй половине 90-х годов с переходом на нормы проектирования 0,25 мкм возникла необходимость еще более тесной интеграции логического синтеза и проектирования топологии ИС. Компания Cadence использовала свою систему синтеза Ambient для разработки программы PKS Physical Synthesis, объединяющей синтез и размещение. Вскоре подобный продукт под названием Physical Compiler был выпущен и фирмой Synopsys, а компания Magma разработала метод временной конвергенции с использованием масштабируемых ячеек.

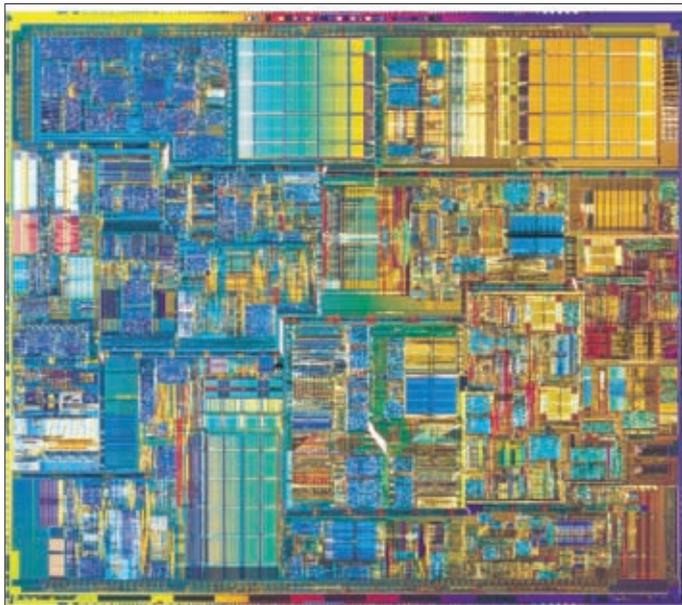
С переходом на субмикронные технологии стали всё чаще появляться отдельные независимые дизайн-центры (fabless company), которые приобретали EDA-средства, необходимые для обеспечения процесса проектирования ИС (Customer Own Tooling, так называемая COT-модель). Дизайн-центры осуществляли полный цикл разработки СБИС с использованием собственной методологии и IP-библиотек, а заказы на производство размещали на таких фабриках, как TSMC, UMC и Chartered. С возникновением этой бизнес-модели для EDA-индустрии открылась ещё одна рыночная ниша, в которой можно было предлагать не только продукты, но и технологии проектирования и сервисные услуги.

### АНАЛОГОВЫЕ И СМЕШАННЫЕ ИС

Последние двадцать лет истории развития EDA-индустрии отмечены в первую очередь успехами в сфере проектирования цифровых схем, о которых много говорилось в средствах массовой информации. В то же время средства аналогового, смешанного цифроаналогового и полностью заказного проектирования также постоянно улучшались как с точки зрения производительности, так и с точки зрения точности. Выход на рынок среды проектирования Virtuoso компании Cadence в начале 90-х годов позволил на порядок повысить производительность заказного проектирования. Среда Virtuoso постоянно пополнялась большим числом инновационных продуктов. Например, в 1993 году появилась система аналогового моделирования Spectre, в 1995 году были добавлены средства моделирования нелинейных радиочастотных (RF) схем, а в 2000 году – средства Verilog-AMS – единого инструмента для совместного цифроаналогового моделирования. Следующий шаг в сторону модернизации был сделан в 1997 году благодаря технологии IC-Craftsman, которую фирма Cadence приобрела при поглощении компании Cooper and Chyan (CCT).

### НАНОМЕТРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

На рубеже тысячелетий началось производство с применением технологических норм 130, 90 и даже 65 нм (рис.7). При использова-



**Рис.7. Микропроцессор Intel Pentium (2000 год, [www.intel.com/museum](http://www.intel.com/museum))**

нии таких технологий решающими факторами успеха становится учет паразитных явлений и оценка искажения сигнала. Это означает, что должна учитываться реальная конфигурация соединений. Средств физического синтеза уже недостаточно для получения требуемого результата. Возникла необходимость разработки новых методов. В 2002 году компания Cadence поглотила фирму Silicon Perspective, реализовавшую в продукте First Encounter концепцию виртуального прототипа. Система First Encounter фактически стала стандартом для проектирования с использованием нанометровых технологий.

В настоящее время EDA-индустрия развивается с учётом требований нанометровых технологий и методологии проектирования "система на кристалле" (systems-on-chip, SoC). Системное проектирование, проектирование схем малой мощности, проектирование с учетом требований производства, интеграция систем – вот лишь некоторые из тех областей, которым разработчики в ближайшие годы должны будут уделить внимание. В любом случае можно утверждать, что продолжение будет интригующим. ○