

Предисловие автора

Научный поиск можно сравнить с прогулкой по лабиринту. Для того чтобы найти выход (решение), нужно по-новому взглянуть на происходящее: изменить систему координат или даже размерность пространства, в котором ведется поиск. Введите новое измерение, поднимитесь над лабиринтом, и вы найдете выход.

Другой алгоритм научного поиска связан с заимствованием идей у природы или у самого человека. Позавидовал человек птице — сконструировал самолет, рыбе — подводную лодку. Решил уподобиться Богу (Природе, Космосу) — сконструировал робота (подобие человека), создал компьютер (слабенький, но аналог мозга), Интернет (опять же аналог, но уже гораздо большей интеллектуальной системы). Надеюсь, что именно неистребимая любознательность, а не жажда завоевывать тянет человека как в космос, так и в наномир. Существуют древние науки, такие как математика, и совсем молодые, возникающие из потребностей развития человечества. Зачастую новые знания появляются на стыках нескольких наук тогда, когда наблюдается кризис в какой-либо из научных или научно-технических областей. Так, например, переходная наносхемотехника появилась на стыке математики, физики, химии, биологии, информатики и компьютерной схемотехники именно в то время, когда компьютерные науки и микроэлектроника, создававшие элементную базу для компьютеров, зашли в тупик. Наносхемотехника и есть та новая философия и то новое измерение, которые помогут найти выход из тупика, предрекаемого законом Мура¹.

Любые новые теоретические системы обладают аксиоматическим (предположительным) характером. Достоверность той или иной теории должна быть подтверждена большим количеством экспериментов разной размерности. Поэтому в монографии приведено множество результа-

¹ По наблюдениям одного из основателей фирмы Intel Гордона Мура (1965), количество транзисторов, которые удастся разместить на поверхности кристалла фиксированных размеров, растет по экспоненте, а точнее, удваивается примерно каждые полтора-два года. Однако этот прогресс дойдет до насыщения, как только размеры отдельно взятого транзистора сравняются с размерами молекул кристалла. Другой тормоз прогресса в разработке сверхплотных микросхем — ограниченность скорости света.

тов моделирования твердотельных нанобъектов согласно новой теории переходной схмотехники. Они были получены не за один год, и к концу 2009 года работа над рукописью была закончена.

Одна из задач, поставленных при написании этой книги, состоит в изложении на профессиональном и в то же время на доступном для неспециалистов уровне идей и экспериментальных данных теории переходной схмотехники. Эта теория не только описывает и позволяет создавать новую элементную базу для суперкомпьютеров, но и позволяет трактовать живые и неживые структурированные системы как схемы переходной схмотехники с едиными законами функционирования.

Другой, более сложной задачей книги является изложение для специалистов других областей знаний основ переходной схмотехники, чтобы они смогли взглянуть на свои изучаемые объекты как на схемы, построенные по законам переходной схмотехники. При таком понимании логики работы объектов будет легче ими управлять (изменять их свойства, совершенствовать).

Биологи, например, увидят, что ДНК — это последовательностная схема, содержащая как схемы памяти, так и логические управляющие и проводящие цепи, а вирусы — это программирующие устройства с внутренней памятью, изменяющие структуру ДНК. При изменении схем-программ, «записанных» в структуре РНК, можно менять кодировку программы вирусов, а также делать их недееспособными, «ломая» схему их внедрения или размножения.

Специалисты в области нанотехнологии узнают, что нанотрубки и фуллерены можно использовать не только как проводящие элементы или материалы, но и как управляемые структуры с памятью. А физики увидят, что обычный лед — это не только одно из агрегатных состояний воды, но и система, которая при определенных условиях способна хранить огромное количество информации.

При написании этой книги были использованы материалы лекций, читаемых мной в Московском государственном институте электроники и математики (МИЭМ), а также материалы более ранних книг (Машинное моделирование функционально-интегрированных элементов, М.: МИЭМ, 1989; Схмотехника ЭВМ, М.: МИЭМ, 2008) с существенным добавлением большого количества нового материала и результатов различных компьютерных экспериментов. Хочу поблагодарить студентов своей научной группы: В.В. Воробьева, А.А. Соснина, А.В. Белого, П.В. Орлова, И.П. Поповича, Н.И. Лукьянчикова, В.В. Сазонтьева и Э.С. Игнатову, которые помогли мне в проведении части экспериментов по моделированию наноструктур, приведенных в этой книге.

Хотелось бы надеяться, что специалисты разных областей науки, критически воспринимая те или иные идеи, найдут для себя полезные сведения, способствующие развитию их научных или научно-технических дисциплин. Несомненно, какие-то идеи из этой книги еще долго будут оставаться предметом дискуссий, какие-то будут забыты, но некоторые оставят свой след в развитии наносхемотехники и научном поиске. Если это произойдет, буду считать свою задачу на данном этапе выполненной.

Трубочкина Н.К.

Введение

Данная монография предназначена для формирования нового взгляда на возможное проектирование трехмерных сверхбольших интегральных схем (3D СБИС) на базе оптимальной переходной схмотехники в отличие от существующей в настоящее время избыточной транзисторной схмотехники.

Предметная область может быть обозначена как

- нанотехнологии и наносхмотехника для 3D СБИС;
- наноструктуры и наносистемы.

Нанонаука и нанотехнология — направления науки и технологии, активно развивающиеся с конца XX века. Термин *нанотехнология* (*nanotechnology*) введен в 1974 году профессором-материаловедом из Токийского университета Норио Танигучи [1], который определил его как «технологиию производства, позволяющую достигать сверхвысокую точность и ультрамалые размеры ... порядка 1–100 нм...». Необходимо отличать нанонауку (*nanoscience*, или *nanoscale science*) от нанотехнологии (*nanotechnology*). Нанонаука занимается изучением и созданием материалов и объектов, реализуемых с использованием нанотехнологий.

Структуру или объект, линейный размер которого не превышает 100 нм, называют наноструктурой или нанобъектом соответственно, а систему, состоящую из наноструктур или нанобъектов, — наносистемой.

Наноиндустрия представляет собой совокупность направлений бизнеса и производства, работающих с нанобъектами и наносистемами.

Представленная монография будет полезна всем, кто работает в области наноиндустрии, нуждающейся в новой элементной базе для суперкомпьютеров и схем управления, а также обладающей рядом преимуществ перед существующей кремниевой транзисторной базой.

Целями проведенных фундаментальных исследований являлись:

- поиск и решение задач развития в области создания новых интеллектуальных технических систем, их элементной базы, технологий и материалов для нее;
- преодоление проблем развития планарной транзисторной кремниевой микро- и нанoeлектроники.

Перед nanoиндустрией, нанонаукой и нанотехнологией стоит ряд задач:

- создание и использование материалов, устройств и технических систем, функционирование которых определяется наноструктурой, то есть ее упорядоченными фрагментами размером от 1 до 100 нм;
- разработка теории, элементной базы и программного обеспечения для создания компьютеров (интеллектуальных систем) различного типа (нанокomпьютеры на базе нескольких компонентов, в том числе квантовый компьютер, ДНК-компьютер, нанороботы и пр.).

Для облегчения понимания изложенного в книге материала определим основные (ключевые) термины.

Нанокomпьютер — вычислительное устройство на основе электронных (механических, биохимических, квантовых) технологий с размерами логических элементов порядка нескольких нанометров.

ДНК-компьютер — вычислительная система, использующая вычислительные возможности молекул ДНК.

Биомолекулярные вычисления — собирательное название различных техник, так или иначе связанных с ДНК или РНК. При ДНК-вычислениях данные представляются не в форме нулей и единиц, а в виде молекулярной структуры, построенной на основе спирали ДНК. Роль программного обеспечения для чтения, копирования и управления данными выполняют особые ферменты.

Нанороботы — устройства, состоящие из наноматериалов, размер которых сопоставим с размерами молекул, эти устройства наделены функциями движения, обработки и передачи информации, исполнения программ. Нанороботы, способные создавать свои копии, то есть самовоспроизводиться, называются *репликаторами*. В настоящее время уже созданы электромеханические наноразмерные устройства, ограниченно способные к передвижению, которые можно считать прототипами нанороботов.

Схемотехника изучает элементы и блоки интегральных схем электронных вычислительных машин (ЭВМ), а также различные методы их проектирования.

Наносхемотехника — раздел схемотехники, изучающий объекты (элементы СВИС), размеры которых не превышают 100 нм.

Задачи, которые автор поставил перед собой в данной работе, заключаются в:

- разработке новой концепции элементной базы твердотельной наноэлектроники;
- разработке качественно новой теории оптимальной схемотехники для 3D СВИС;

- разработке и моделировании элементной базы;
- 3D визуализации переходных элементов и физических процессов, протекающих в них;
- разработке программного обеспечения (ПО) для элементов 3D СБИС, созданных на основе новой концепции синтеза трехмерных интегральных схем (ПО для решения задач синтеза, анализа и компьютерной визуализации объектов и процессов в 3D интеллектуальных наноструктурах кремниевой наноэлектроники).

Из-за сложности решаемых задач необходимо математическое и компьютерное моделирование, так как оно позволяет определять технические характеристики и работоспособность создаваемых переходных твердотельных элементов для 3D СБИС, построенных на основе новой концепции без организации отдельного дорогостоящего производства.

Книга «Моделирование 3D наносхемотехники» предназначена для изучения

- принципов современных методов синтеза элементов и устройств ЭВМ и вычислительных систем;
- методов построения схем ЭВМ и вычислительных систем;
- принципов совместной работы устройств ЭВМ и вычислительных систем;
- методов проектирования устройств различной степени сложности с учетом новейших разработок в области математического моделирования, схемотехники и технологии создания ЭВМ и вычислительных систем.

Помимо описания новой теории переходной схемотехники, особое внимание уделено математическому моделированию элементов и устройств, которые предназначены для разработки схем нового поколения, в частности 3D СБИС. Материал представлен с позиции обучения синтезу и практической реализации схем для компьютеров нового поколения. Рассмотрены синтез и моделирование схем в переходной, транзисторной, вентиляционной и матричной реализациях.

Глава 1

ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ ЭВМ

Элемент ЭВМ — функционально минимальная часть компьютера, которая может быть выделена в нем при логическом проектировании (например, элементы И–НЕ, ИЛИ–НЕ).

Блок ЭВМ — функционально законченная схема, которая выполняет сложную функцию (например, арифметико-логическое устройство или память ЭВМ).

1.1. Элементная база и поколения ЭВМ

Определяющим фактором развития микроэлектроники и вычислительной техники является элементная база, которая за несколько десятилетий своего существования неоднократно качественно менялась. Каждой новой элементной базе соответствовало свое поколение компьютеров с улучшенными функциональными и техническими характеристиками. Для каждой принципиально новой элементной базы нужна своя схемотехника.

Поколения схемотехник определялись и определяются поколениями ЭВМ, которые поочередно строились на:

- электромеханических реле;
- электронных лампах;
- дискретных транзисторах (в 1947 году был изобретен биполярный транзистор, определивший все последующие транзисторные схемотехники вплоть до 1971 года, когда был представлен инжекционный инвертор — первый логический элемент переходной схемотехники);
- интегральных схемах (до 10 элементов на кристалле);
- БИС (10^3 – 10^4 элементов);
- СБИС (10^5 – 10^6 элементов).

Несмотря на весьма существенные различия, все элементные базы, за исключением первой из перечисленных выше, объединяет триодно-транзисторная концепция построения электронных схем.

1.2. Историческая справка создания вычислительных устройств

3000 лет до н. э.: в Древнем Вавилоне были изобретены первые счеты — абак.

500 лет до н. э.: в Китае появился более «современный» вариант абака с косточками на проволоке.

1492 год: Леонардо да Винчи в одном из своих дневников привел эскиз 13-разрядного суммирующего устройства с десятизубцовыми кольцами. Хотя работающее устройство на базе этих чертежей было построено только в XX веке, все же реальность проекта Леонардо да Винчи подтвердилась.

1623 год: Вильгельм Шиккард, профессор университета Тюбингена, разработал устройство на основе зубчатых колес («считающие часы») для сложения и вычитания шестизначных десятичных чисел. Было ли устройство реализовано при жизни изобретателя, достоверно неизвестно, но в 1960 году оно было воссоздано и проявило себя вполне работоспособным.

1630 год: Ричард Деламейн создает круговую логарифмическую линейку.

1642 год: Блез Паскаль представил публике «Паскалин» — первое реализованное и получившее известность механическое цифровое вычислительное устройство, которое суммировало и вычитало 5-разрядные десятичные числа. Паскаль изготовил около пятидесяти таких вычислителей, причем последние модели оперировали числами с восемью десятичными разрядами.

1673 год: известный немецкий философ и математик Готфрид Вильгельм Лейбниц построил механический калькулятор, который при помощи двоичной системы счисления выполнял умножение, деление, сложение и вычитание. Примерно в это же время Исаак Ньютон заложил основы математического анализа.

1723 год: немецкий математик и астроном Христиан Людвиг Герстен на основе работ Лейбница создал арифметическую машину. Машина высчитывала частное и число последовательных операций сложения при умножении чисел. Кроме того, в ней была предусмотрена возможность контроля за правильностью ввода данных.

1786 год: немецкий военный инженер Иоганн Мюллер выдвинул идею «разностной машины» — специализированного калькулятора для табулирования логарифмов, вычисляемых разностным методом. Калькулятор, построенный на ступенчатых валиках Лейбница, получился относительно небольшим (13 см в высоту и 30 см в диаметре), но при этом мог выполнять все четыре арифметических действия над 14-разрядными числами.

1801 год: Жозеф-Мари Жаккар построил ткацкий станок с автоматическим управлением, в котором использовался комплект перфокарт.

1820 год: первый промышленный выпуск арифмометров. Первенство принадлежит французу Тома де Кольмару.

1822 год: английский математик Чарльз Бэббидж разработал, хотя и не смог сконструировать, первую разностную машину (см. о разностной машине Чарльза Бэббиджа). Она представляла собой специализированный арифмометр для автоматического построения математических таблиц.

1855 год: Георг Шойц и его сын Эдвард на основе работ Чарльза Бэббиджа построили в Швеции первую разностную машину.

1884–1887 годы: Холлерит разработал электрическую табулирующую систему, которая использовалась в переписях населения США (1890 и 1900 годы).

1927 год: в Массачусетском технологическом институте (MIT) был изобретен аналоговый компьютер.

1938 год: немецкий инженер Конрад Цузе вскоре после окончания в 1935 году Берлинского политехнического института изобрел свою первую полностью механическую программируемую цифровую машину, названную Z1. В качестве его соавтора упоминается также Хельмут Шрейер. Модель была пробной и в практических целях не использовалась. Ее восстановленная версия хранится в Немецком техническом музее в Берлине. В том же году Цузе приступил к созданию машины Z2.

1941 год: Конрад Цузе создает первую вычислительную машину Z3, обладающую всеми свойствами современного компьютера.

1942 год: в Университете штата Айова Джон Атанасов и его аспирант Клиффорд Берри создали (а точнее — разработали и начали монтировать) первый в США электронный цифровой компьютер ABC (Atanasoff-Berry Computer). Хотя эта машина так и не была завершена (Атанасов ушел в действующую армию), она, как пишут историки, оказала большое влияние на Джона Мокли, создавшего двумя годами позже ЭВМ ЭНИАК.

Начало 1943 года: в Гарвардском университете успешные испытания прошла электромеханическая вычислительная машина Mark I, или ASCC (Automatic Sequence Controlled Calculator), предназначенная для выполнения сложных баллистических расчетов американского военно-морского флота (ВМФ).

Конец 1943 года: приведена в действие английская вычислительная машина специального назначения Колосс. Машина работала над расшифровкой секретных кодов фашистской Германии.

1944 год: Конрад Цузе разработал еще более быстродействующий компьютер Z4.

1946 год: это год создания первой универсальной электронной цифровой вычислительной машины ЭНИАК.

1950 год: группой С.А. Лебедева в Советском Союзе в Киеве была создана первая ЭВМ.

С начала 90-х годов XX века слово «компьютер» практически вытеснило из русского языка, а также и из многих других языков термин «электронная вычислительная машина».

1.3. Перспективы и проблемы развития элементной базы ЭВМ

Основной тенденцией развития элементной базы ЭВМ, приводящей к увеличению быстродействия и информационной плотности, является уменьшение геометрических размеров таких компонентов, как транзисторы.

Множество работ посвящено проблемам дальнейшего совершенствования элементной базы [2–7] и, в частности математическому моделированию субмикронных компонентов [8–10]. Несмотря на работы в области разработки функционально-интегрированных элементов (ФИЭ) [11–13], транзисторная схемотехника остается доминирующей. Это связано с технологическими сложностями формирования в объеме полупроводниковых структур, по сложности превышающих транзистор.

Информационные структуры размещаются в поверхностном слое полупроводника, в результате чего комбинационные схемы и схемы памяти, даже формируемые в активных слоях трехмерных интегральных схем (ТМИС), имеют информационную плотность ниже теоретически возможной.

По мнению специалистов, в ближайшие годы СВИС достигнут предела минимизации, и дальнейшее увеличение плотности компоновки будет зависеть от использования трехмерной интеграции [14].

1.3.1. Трехмерные СВИС

Реализация трехмерных схем возможна разными путями.

В нескольких активных слоях, которые чередуются с пассивными слоями, выполняющими функции изоляции и теплоотвода, представляющих собой интегральные функциональные устройства, информация в виде сигналов различного типа (напряжения, тока, света) передается как внутри одного активного слоя, так и между активными слоями (рис. 1.1).

Трехмерные, или, лучше сказать, многослойные, интегральные схемы подобного типа обладают:

- высоким быстродействием;
- высокой плотностью компоновки;
- возможностью параллельной обработки сигналов;
- многофункциональностью.

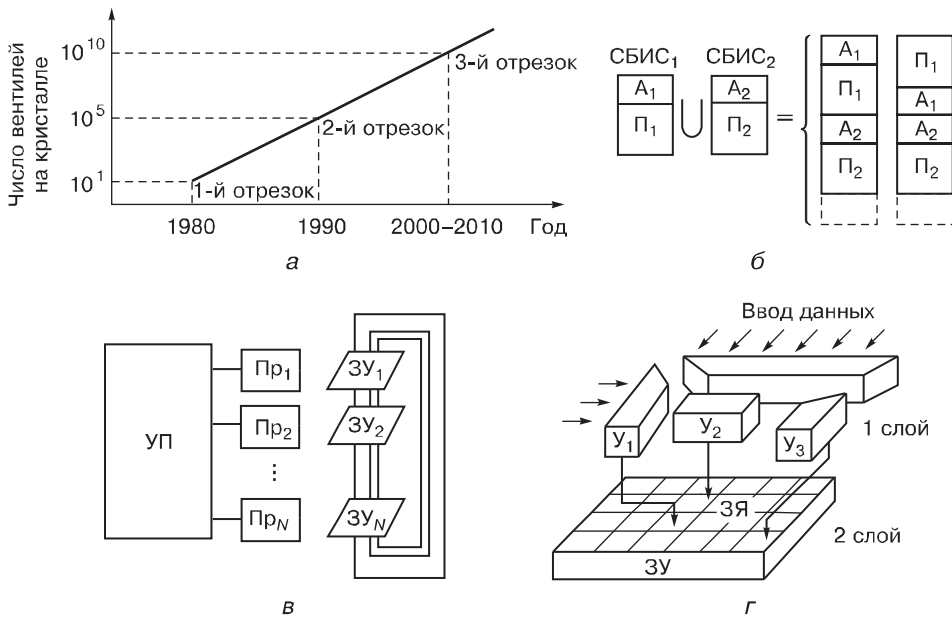


Рис. 1.1. Трехмерные интегральные схемы: а) прогноз развития, б) типы трехмерных (многослойных) интегральных схем (А — активный слой, П — пассивный слой), в) система с обобщенными данными, для кристалла памяти (УП — управляющий процессор, Пр — процессор, ЗУ — запоминающее устройство), г) схематическое представление 2-слойного статического запоминающего устройства с произвольной выборкой (У₁ — буфер адресов строк, У₂ — усилитель считывания и т. д., ЗЯ — запоминающая ячейка)

Им свойственны следующие недостатки:

- технология изготовления многоступенчатая, поскольку связана с созданием вертикальных проводящих каналов и сложной топологией поверхности активных слоев;
- паразитные наводки сигналов между активными слоями из-за большого числа соединений;
- большая потребляемая мощность;
- необходимость охлаждения кристалла интегральной схемы.

Схемотехника активных слоев трехмерных СБИС [14] по-прежнему остается транзисторной.

1.3.2. Изобретение, изменившее отношение к транзисторной схемотехнике

В 1971 году был разработан необычный для транзисторной схемотехники элемент — инжекционный инвертор, состоящий всего из трех $p-n$ -переходов, но выполняющий функции двух транзисторов. На реа-

[. . .]