

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Милинкис Б.М., кандидат технических наук, доцент
Щука А.А., доктор технических наук, профессор (Московский институт радиотехники, электроники и автоматики (Технический университет))

Микроэлектроника представляет собой область электроники, связанную с исследованиями поведения заряженных частиц в твердом теле под воздействием электрических, магнитных, электромагнитных и тепловых полей, а также с созданием приборов и устройств в микроминиатюрном исполнении с использованием групповой технологии изготовления. В микроэлектронике предполагается интеграция элементарных электронных приборов (резисторов, конденсаторов, диодов, транзисторов). Поэтому синонимом микроэлектроники является понятие "интегральная электроника".

Говоря о микроэлектронике, имеют в виду микрометровые размеры элементов, под интегральной электроникой подразумевают интеграцию этих элементов на кристалле микросхемы. Развитие микроэлектронных приборов связано с уменьшением размеров элементов до субмикронных и переход в нанометровый масштаб измерений. Таким образом, микроэлектронные приборы превращаются в наноэлектронные. При этом утрачивается групповая технология их изготовления.

Физические пределы в развитии приборов и устройств схемотехнической микроэлектроники достигнут своих критических зна-

"Считается, что аппаратура на электронных лампах - это первое поколение электронной аппаратуры, на дискретных полупроводниковых приборах - второе поколение, на интегральных микросхемах - третье поколение.

...Намечается переход к использованию свойств, распределенных по объему кристалла, то есть переход от интеграции электронных приборов с функциями, сосредоточенными в каком-либо объеме, к интеграции функций, распределенных по всему объему кристалла. Так зарождается четвертое поколение электронной аппаратуры".

БСЭ, т. 20, с. 269-270

"Функциональная электроника охватывает вопросы получения континуальных (непрерывных) комбинированных сред с наперед заданными свойствами и создание различных электронных устройств методом физической интеграции, то есть использование таких физических принципов и явлений, реализация которых позволяет получить компоненты со сложным схемотехническим или системотехническим функциональным назначением (в отличие от технологической интеграции - конструирования интегральных схем на основе простых элементов типа транзисторов, диодов, резисторов и т.д.)."

БСЭ, т. 28, с. 133-134

чений в первом десятилетии XXI века.

К этому времени ожидается появление интегральных схем с топологическими нормами порядка 0,1 мкм, выполненных с помощью литографических установок, работающих в областях глубокого вакуумного ультрафиолета и мягкого рентгена. При этом произойдет переход на пластины большого диаметра и размерами поля литографирования в пределах 25x52 мм. Проблема межсоединений, характерная для схемотехнической микроэлектроники, ограничит скорость внешнего обмена информацией величиной 3 ГГц, хотя транзисторы будут работать с частотой не менее 10 ГГц. Ожидается рост емкости ДОЗУ до 64 Гбит при плотности размещения ячеек 10^{10}

см², а для микропроцессоров - 2×10^8 см². При этом с ростом диаметра обрабатываемых пластин резко возрастут издержки при производстве сверхбольших интегральных схем (СБИС).

После достижения технологической зрелости будет достигнут физический предел значений степени интеграции, и ожидается инерционное развитие рынков приборов схемотехнической микроэлектроники еще в течение 5-10 лет. К этому времени быстродействие интегральных схем (ИС) будет уже недостаточным для решения задач обработки больших массивов информации по нескольким причинам.

Предельные показатели достижений микроэлектроники не смогут соответствовать набирающему

силу научно-техническому прогрессу. Уже сейчас существует целый ряд задач, ждущих своего решения. Среди них - создание систем оперативного распознавания образов, искусственного интеллекта, синтеза конструкций и систем, разработка устройств параллельной обработки информации, устройств управления базой знаний и т.п.

Идут интенсивные поиски методов, разрабатываются устройства, предназначенные для обработки больших массивов информации в реальном масштабе времени. Анализ схем цифровой обработки изображений показывает, например, что рост их быстродействия приближается к насыщению. При этом ряд упомянутых задач принципиально не может быть решен в рамках современных методов обработки больших информационных массивов, в частности, фон-Неймановской схемы построения вычислительных систем.

В этом случае возникает альтернатива: или искать пути сохранения тенденции экспоненциального роста степени интеграции интегральных схем и тем самым расширить возможности схемотехнической микроэлектроники, или искать принципиально новый подход при создании систем обработки больших информационных массивов.

Можно ли удержать тенденцию экспоненциального роста степени интеграции и, соответственно, экспоненциальное снижение стоимости обработки информации? Вот основной вопрос перспективного развития схемотехнической микроэлектроники.

В схемотехнической электронике с ростом степени интеграции и уменьшением топологической нормы возникает проблема "тирании межсоединений". Она связана с резким увеличением площади, занимаемой на кристалле межсоединениями (более 60%), деградацией электрических параметров линий межсоединений, ростом энергии на перезарядку емкости линий межсоединений, влиянием погонной емкости линий межсоединений и волнового сопротивле-

ния на частотные характеристики схемы, с возможностью электрического пробоя через объем или по поверхности диэлектрика, с необходимостью многоуровневой разводки при большом числе линий межсоединений.

Разработчики ИС активно ищут способы преодоления "тирании межсоединений", пути обхода технологических и физических барьеров. С этой целью разрабатываются вертикальные структуры, в которых стараются разместить максимум элементов в минимальном пространстве. Активные и пассивные элементы схемы размещаются в объеме, и интегральная схема становится трехмерной. Технология "кремний на диэлектрике" открывает определенные перспективы вертикальной интеграции и позволяет получать многоярусные транзисторные структуры. Предполагается, что трехмерные ИС будут иметь высокие быстродействие и плотность упаковки элементов, обладать возможностью параллельной обработки информации и станут многофункциональными. Однако придется преодолеть много препятствий, прежде чем в трехмерных ИС удастся решить проблемы взаимных помех элементов и паразитных наводок между слоями, большой потребляемой мощности и необходимости охлаждения кристалла, разработать методы проектирования схем с комплексными параметрами и сложной топологией поверхностных активных слоев и сделать их конкурентоспособными по цене. Переход в трехмерную электронику отнюдь не решит проблемы межсоединений, напротив, резко усложнит конструкции межуровневых соединений. Надежность таких схем вызывает сомнения, а доказательств обратного пока нет. Переход в трехмерную электронику сулит увеличение степени интеграции лишь вдвое, а не экспоненциальный рост в соответствии с законом Мура.

С момента возникновения микроэлектроники в 1959 г., рост степени интеграции шел по показательному закону, а это и есть закон Мура. Этот закон продолжает

выполняться около 40 лет, он распространяется не только на технические параметры ИС, но и на экономику. По этому же закону росли и доходы американских фирм, и вложения в электронику, - ежегодные вложения через год-два удваивались.

Могут ли "спасти" схемотехническую электронику метод интеграции на пластине или создание "суперкристаллов"? Проблема межсоединений в этих случаях тоже принципиально не решается, а, значит, и достижение успеха сомнительно. По этой же причине сомнительны перспективы использования в схемотехнической электронике различных эффективных и сверхминиатюрных транзисторных структур.

Можно ли уйти от проблемы "тирании межсоединений"? Видимо, да. Но для этого нужно уйти от традиционного принципа обработки информации, отказаться от схемотехнической ячейки как основного преобразователя и хранителя информации.

Традиционная схемотехническая ячейка (будь это логическая ячейка или ячейка памяти) состоит из большого количества статических неоднородностей. Под статической неоднородностью понимают локальную область на поверхности или в объеме среды с отличными от ее окружения свойствами, создаваемую в результате строго определенных технологических процессов. Совокупность состояния таких статических неоднородностей позволяет генерировать, управлять или хранить информацию. Деградация статической неоднородности немедленно приводит к потерям или сбоям в процессе обработки информации. Это и есть схемотехническая микроэлектроника, или электроника статических неоднородностей. В этом случае устройства обработки и хранения информации реализуются на определенных схемотехнических решениях.

В конце 70-х гг. минувшего столетия возникла идея использовать динамические неоднородности в процессах обработки и хранения информации, а также физические

принципы интеграции не только числа элементов, но и числа функций, выполняемых микроэлектронным прибором.

Пионерские работы в этой области принадлежат Гуляеву Ю.В., Валиеву К.А., Стафееву В.И., Федотову Я.А., Сретенскому В.Н., Пустовойту В.И., Борисову Б.С., Лаврищеву В.П., Носову Ю.Р., Попкову А.Ф., Ракитину В.В., Новикову В.В., Ерофееву А.А., Васенкову А.А. и другим отечественным ученым и их школам.

Изучение свойств и характеристик динамических неоднородностей как носителей информационного сигнала, основных физических процессов и принципов обработки и хранения информационных массивов с помощью динамических неоднородностей, разработка приборов и устройств являются основополагающими в процессе формирования нового направления в микроэлектронике - функциональной электроники.

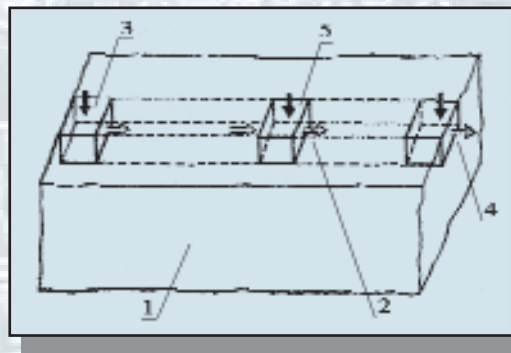
При интеграции на одном кристалле не только элементов, но и физических явлений и эффектов увеличиваются функциональные возможности приборов и устройств интегральной электроники. При этом используются уже не только схмотехнические решения для обработки и хранения информации, но и физические носители информационного сигнала - динамические неоднородности различной физической природы. Это еще одна особенность функциональной электроники.

Именно идея использования динамической неоднородности в качестве носителя информации привела к появлению альтернативного пути - функциональной электроники.

Динамическая неоднородность представляет собой локальный объем на поверхности или внутри среды с отличными от ее окружения свойствами, которая не имеет внутри себя статических неоднородностей и генерируется в результате определенных физико-химических процессов. Динамическая неоднородность может быть локализована или перемещаться по

рабочему объему континуальной среды в результате взаимодействия с различными физическими полями или динамическими неоднородностями такой же или другой физической природы. В процессе перемещения динамической неоднородности может осуществляться, например, перенос информации. Деграция динамической неоднородности не приводит, как правило, к потерям или сбоям в процессах обработки информации.

Известно большое количество динамических неоднородностей различной физической природы. Это ансамбли заряженных частиц и квазичастиц (зарядовые пакеты, флюксоны и т.п.), домены (электрические домены, домены Ганна, цилиндрические магнитные домены и т.п.), динамические неоднородности волновой природы (поверхностные акустические волны, магнитные статические волны) и т.д. Идея использования динамических неоднородностей в приборах обработки и хранения информации является основополагающей, ее развитие привело к становлению функциональной электроники. Это несхмотехническое направление в микроэлектронике, использующее в качестве носителей инфор-



мации динамические неоднородности, основной тенденцией развития которого является интеграция функциональных возможностей приборов и устройств.

Таким образом, функциональная электроника представляет собой область интегральной электроники, в которой изучается возникновение и взаимодействие динамических неоднородностей в континуальных средах в совокупности с физическими полями, а также со-

здаются приборы и устройства на основе динамических неоднородностей для обработки, генерации и хранения информации.

Анализируя приборы функциональной электроники, можно выделить общие элементы, характерные для всех конструкций (рисунков). Это, прежде всего континуальная среда 1, в которой можно создать как статические, так и динамические неоднородности. Среда может находиться в любом агрегатном состоянии, однако, в основном используется твердое тело. По своим физико-химическим свойствам среда должна быть однородной на всем тракте распространения информационного сигнала - динамической неоднородности 2. Генератором динамической неоднородности 2 служит статическая неоднородность 3. Считывание и вывод информации из канала осуществляется детектор - статическая неоднородность 4. Как правило, детектор и генератор динамической неоднородности используют прямой и обратный физические эффекты. Управление сигналом, ввод в него нужной информации, ее направленный перенос, регулирование скорости передачи осуществляется статической неоднородностью 5.

В зависимости от типа используемой динамической неоднородности, континуальной среды, той или иной комбинации физических полей или явлений различают направления в функциональной электронике, например: функциональная акустоэлектроника, функциональная магнитоэлектроника, функциональная оптоэлектроника, функциональная диэлектрическая электроника, молекулярная электроника и т.п. Объединяющим их признаком является динамическая неоднородность как носитель, транслятор или хранитель информации. Так, традиционная полупроводниковая схмотехническая электроника отличается от полупроводниковой функциональной электроники носителем информационного сигнала. В приборах схмотехнической микроэлектроники - аналоговых или цифровых ИС - информация хранит-

ся или обрабатывается в ячейках в виде заряда, потенциала или тока определенного уровня на определенной статической неоднородности.

Напротив, в ПЗС-матрицах, относящихся по своей физической природе к изделиям функциональной полупроводниковой электроники, информация хранится (либо обрабатывается) в виде динамической неоднородности - зарядового пакета, состоящего из электронов или дырок.

Статические же неоднородности и различные схемы обрания в этих изделиях играют вспомогательную роль.

В функциональной электронике пока не существует принципиальных ограничений, связанных с размерами статических или динамических неоднородностей. Предельное значение размеров элемента статической неоднородности схемотехнической электроники оценивается величиной 0,1 мкм при степени интеграции порядка 10^7 элементов на кристалл. Размер динамической неоднородности зависит от ее физической природы и может иметь характерное значение от долей микрона (домены, зарядовые пакеты) до размера атомов (спиновые устройства). Поэтому в терминах схемотехнической электроники эффективная степень интеграции функциональной электроники может превышать указанное предельное значение на несколько порядков. Сравним изделия традиционной схемотехнической и функциональной электроники по быстродействию.

В изделиях схемотехнической электроники перенос информационного сигнала происходит побитово по линиям межсоединений, что снижает помехоустойчивость и надежность изделий. В изделиях функциональной электроники массив информационных сигналов может быть обработан одновременно весь, целиком, не обязательно в виде отдельных битов информации. Возможно создание устройства, позволяющего производить обработку информации в аналоговом и цифровом видах одновременно.

В изделиях функциональной электроники перенос информации, как правило, осуществляется в континуальной среде, а не в линиях межсоединений. Они выполняют функции вспомогательных связей, и проблема "тирании межсоединений" в этом случае не является ключевой.

Замечательным свойством приборов функциональной электроники является использование в процессах обработки информации функций высшего порядка в качестве элементарных, например, Фурье-преобразования; интегрального преобразования Лапласа; операции свертки; операции корреляции; автокорреляции; управляемой задержки информационного сигнала; хранения информации, в том числе в виде многобитовых носителей; фильтрации информационного сигнала; когерентного сложения сигналов; отвлечения информационных сигналов; комбинированной обработки информационных сигналов и т.д. В то же время в изделиях функциональной электроники могут быть реализованы и традиционные элементарные функции типа И, ИЛИ, НЕ и их различные комбинации. Существует огромное разнообразие динамических неоднородностей в твердом теле, формирующихся под воздействием внешнего излучения, электрического и магнитного полей, температуры, деформации и т.д. Практически любая функция преобразования информации может быть промоделирована физическим процессом, протекающим в твердом теле при определенных внешних воздействиях.

В активной среде прибора функциональной электроники может храниться и одновременно обрабатываться большой объем информации. Поэтому изделие функциональной электроники может рассматриваться как процес-

сор, выполняющий элементарные функции высшего порядка.

Важно отметить, что обработка информации в такого типа процессорах происходит в аналоговом виде, без перевода аналогового сигнала в цифровой и обратно. При такой обработке передача информации может осуществляться без проводников или линий межсоединений.

Устройства памяти реализуются путем упорядоченного сохранения в континуальной среде динамических неоднородностей, каждая из которых несет бит информации. Возможно создание запоминающих устройств и на основе многобитовых динамических неоднородностей.

В приборах и устройствах функциональной электроники информационный массив может быть обработан весь и сразу в одномоментном процессе. При этом необязательно использовать последовательную побитовую обработку двоичной информации. Это эквивалентно случаю предельного распараллеливания процесса обработки массива информации. Таков принципиально новый путь, способный обеспечить производительность более 10^{15} оп./с. Так, например, акустооптический процессор обеспечивает производительность 10^{10} - 10^{12} оп./с, в то время как специальные микросхемы быстрого преобразования Фурье - не более $2,5 \cdot 10^8$ оп./с. Выигрыш на несколько порядков в производительности вполне существенен.

Следует особо подчеркнуть, что функциональная электроника не противопоставляется интегральной электронике. Эти два направления современной электроники развиваются одновременно, взаимно дополняя друг друга в создании сложных функционально интегрированных систем.

(Окончание статьи будет опубликовано в следующем номере)

