

типы транзисторов: с баллистич. пролётом электронов (без рассеяния на дефектах и фононах), с двумерным электронным газом, с проникаемой базой (внутри базы расположена металлич. решётка, играющая роль сетки) и др.

Внутр. линии связи ИС (электрич., оптич., в т. ч. волоконные, магн., акустические) обеспечивают обмен сигналами и согласованное протекание множества процессов, локализованных в объёме кристалла. Т. о., наряду с интеграцией элементов в М. достигается интеграция нелинейных физ. явлений. Системы микроприборов и связей между ними образуют единое устройство — информац. автомат, к-рый выполняет функции хранения, обработки и обмена данными с внеш. миром (человеком, др. автоматами, техн. объектами, включая роботов и исполнит. механизмы), моделирование физ. и др. процессов, вывод сигналов, управляющих разл. устройствами.

Степень интеграции N — число транзисторов или их функциональных групп (т. н. логич. «вентилей», ячеек памяти и др.) в одной ИС — показатель её сложности. С возрастанием M . (50—60-е гг. 20 в.) N непрерывно растёт: $N \approx 2^{0,5t}$ (для крупносерийных логич. ИС) и $N \sim 2^t$ (для лучших образцов схем памяти), где t — «возраст» M . (с 1960). Тридцатидвухразрядные микропроцессоры, т. н. транспьютеры, и др. суперкристаллы имеют $N \geq 10^5$ и реализуют центр. часть ЭВМ с производительностью $\sim 10^7$ операций в 1 с, устройства самодиагностики и даже «саморемонта». Ультрабольшие ИС памяти имеют ёмкость до 2^{24} бит (16 мегабит).

Уровень миниатюризации. Мин. размер l_0 «деталей» внутр. геометрии ИС (ширина проводников, длина канала полевого транзистора и т. п.) — осн. показатель уровня миниатюризации. Уменьшение l_0 , связанное с возможностями *микролитографии*, на к-рой основано формирование внутр. геометрии ИС, происходит со ср. скоростью, определяемой соотношением $l_0 = (50 - 20) \cdot 2^{-0,2t}$. В пром. ИС $l_0 = 1,5 - 2,5$ мкм, в лучших ИС $l_0 = 0,8 - 1,0$ мкм (1987). С уменьшением l_0 увеличивается быстродействие и снижается энергопотребление элементов, но усложняются физ. процессы, их теоретич. анализ, проектирование и оптимизация. В нач. период развития М. (при $l_0 \geq 10$ мкм) нелинейные электронные процессы локализовались в активных областях отд. транзисторов (напр., в базе биполярных транзисторов). Оптимизация при этом была основана на одномерных моделях (приближение бесконечных плоских $p-n$ -переходов), и проектирование ИС «наследовало» осн. принципы проектирования электронных схем на дискретных приборах. При $10 \geq l_0 \geq 5$ мкм нелинейные явления внутри транзисторов и активные связи между ними («паразитные» транзисторы) осложнили применение этой модели, а при $5 \geq l_0 \geq 1$ мкм «главным» нарастание этих явлений, влияние сильного электрич. поля и *горячих электронов* потребовали перехода к нелинейным двумерным, а затем трёхмерным моделям, аналитически не разрешимым и требующим расчёта на ЭВМ. Нелинейным становится и поведение внутр. связей. Абс. величина тока снижается $\propto l_0$, а сечений линий $\propto l_0^2$, плотность тока возрастает, и разогрев проводников в сочетании с сильным электрич. полем и высокой плотностью тока вызывает перенос ионов и атомов прямым дрейфом или электронным ветром. При $l_0 = 0,1 - 0,2$ мкм достигается оптимум, ниже к-рого быстродействие перестаёт возрастать, а энергопотребление транзисторов перестаёт снижаться. Их др. характеристики также ухудшаются. Кроме того, начинают развиваться нежелательные коллективные электронные процессы. Т. о., $l_0 = 0,1$ мкм — нижний физ. предел М., основанный на классич. принципах синтеза схем. Теоретич. предел быстродействия $\sim 10^{-12}$ с (системные ограничения обусловлены процессами внутрисхемной передачи сигналов, задержки сигналов, согласованием линии связи и их помехозащищённостью и др.).

Технология микроэлектроники и системы автоматизированного проектирования (САПР). Технол. ограничения в М. определяются возможностями планарной технологии — послойного синтеза структуры твердотельного устройства с помощью многократно повторяющихся (до 10—16 раз; с развитием М. это число возрастает) групп операций, причём каждая группа формирует на поверхности подложки двумерный рисунок и преобразует его в объёмную внутр. геометрию ИС, а погрешность совмещения каждого последующего рисунка с предыдущими $\ll l_0$. При проектировании конечная структура представляется в виде совокупности плоских картин (напр., в виде шаблонов). Это осуществляется с помощью САПР. Спец. компьютерные программы САПР основаны на функциональном и электрич. моделировании ИС и содержат «библиотеки стандартных элементов», из к-рых формируется ИС, оптимизируются геометрия её внутр. связей, проверка её устойчивости к помехам и т. д. Наиб. совершенные САПР обеспечивают также оптимизацию внутр. структуры новых поколений ИС. САПР новых поколений ИС основаны на наиб. мощных ЭВМ предыдущих поколений. Принцип послойного синтеза определяет границы М., в частности степень связности рисунка ИС при данном N . Системные ограничения планарных структур (быстродействие и мощность, степень связности и степень интеграции и т. д.) связаны предельными соотношениями. Теоретич. предел $N \sim 10^{10}$ для ИС на целой полупроводниковой пластине с диам. 200—250 мм.

Физ. принципы действия ИС и технология их синтеза взаимно согласованы. Когда геом. размер твёрдого тела (хотя бы в одном измерении) становится достаточно малым, скорости протекания технол. процессов (диффузия, структурная перестройка, рост, травление и др.) перестают лимитировать их применение. Поэтому в технологии М. используются разнообразные явления, включая диффузию и фазовые переходы в твёрдом теле, гетерогенные реакции, воздействие частиц высоких энергий, сфокусированных электронных и ионных пучков и др. Используются также процессы, селективные по отношению к разл. структурным и хим. состояниям кристалла. Требования к чистоте веществ в М. нередко превышают разрешающую способность методов их анализа.

Функциональная микроэлектроника. Ограничения, вызванные нарастающей плотностью и сложностью внутр. связей, стимулируют развитие т. н. функциональной М. — создание структур, функциональные свойства к-рых определяются коллективными электронными процессами и не могут быть реализованы путём коммутации отд. его областей; обработка информации осуществляется не схемотехн. путём, а динамич. распределением зарядов и полей — эл.-магн., тепловых, упругих. При этом используются оптич. явления (см. *Оптоэлектроника*), взаимодействие электронов с акустич. волнами (см. *Акустоэлектроника*). В связи с открытием высокотемпературной сверхпроводимости особое значение приобретают криоэлектронные приборы. Разрабатываются полностью оптические («фотонные») вычислит. машины. Функциональная М. позволяет достичь предельно высокой производительности и мин. энергопотребления. Однако для каждого класса задач требуется создание спец. структур или сложная настройка. Кроме того, «несхемотехн.» решения характеризуются меньшей точностью и устойчивостью вычислений и моделирования.

При достаточно высоком уровне развития технологии становится возможным создание гибридных устройств, объединяющих цифровые схемотехнические и функциональные процессоры, автоматический распределяющих между ними информац. потоки на каждом этапе решений задач. Существуют устройства, интегрируемые в едином твёрдом теле электронные и неэлектронные (в т. ч. синтезаторы речи) микромеханич. элементы (датчики, анализаторы, исполнительные микроме-