

бешеными темпами. Киты оказались крепкими и смьшленными – они дают этой гонке все, что надо. И как бы в дальнейшем не складывалась судьба транзистора, очевидно, что он уже вправе быть причисленным к самым значимым приобретениям человечества в XX веке, таким, как авиация, атомная энергия, телевидение...

### Пределы «плотности памяти»

Микросхема обладает тем большей информационной мощностью, чем большее количество транзисторов она содержит, т.е. чем выше *плотность интеграции*. А это определяется минимальными размерами, которые способны воспроизводить технологии, т.е. тем, что называют *проектными нормами* ( $d_{\min}$ ), на которые вправе ориентироваться тополог – разработчик структуры микросхемы. Это комплексная характеристика технологии: назовите величину  $d_{\min}$  – и специалист безошибочно укажет, какое оборудование и какие типовые процессы обработки кремниевых пластин используются, каковы размеры этих пластин и степень их совершенства, насколько стерильны производственные помещения, и даже перечислит особенности организации труда.

Современный<sup>1</sup> высший мировой уровень, характеризующийся величиной  $d_{\min} \approx 0,25$  мкм, позволяет создавать *микросхемы памяти* емкостью 256 Мбит и *микروпроцессоры* с 20 млн транзисторов. Ожидается, что в XXI век микроэлектроника войдет с  $d_{\min} \approx 0,15–0,18$  мкм и с вчетверо большим объемом памяти одной микросхемы. Магия цифр завораживает: 2000 год – 1 Гбит! Для пользователей это означает, что в одну микросхему можно будет записать 15 минут телевизионного действия с аудиосопровождением. А к 2010–2012 годам ожидается  $d_{\min} \approx 0,05–0,07$  мкм и, соответственно, объем памяти 65 Гбит (например, весь сериал «Семнадцать мгновений весны» – на одном кристалле!).

Обратим внимание, что приведенные цифры характеризуют рост уровня интеграции более резкий, чем  $\sim 1/d_{\min}^2$ . Это обусловлено тем, что

прогресс микроэлектроники идет не только по параметру  $d_{\min}$ . Так, уменьшение дефектности кремния позволит увеличить площадь отдельного чипа – за три предстоящих года она возрастет раза в полтора и для самых крупных образцов достигнет приблизительно  $3 \times 5$  см. Всего же за полвека существования микроэлектроники (т.е. к 2010 г.) площадь чипа увеличится примерно в 1000 раз, а уровень интеграции – в 10 млрд раз. Для сравнения укажем, что в электротехнике за столетие со дня изобретения электромотора мощность, отнесенная к единице его веса, возросла раз в 10–15, и это преподносится как ошеломляющий успех, а микроэлектронные достижения вызывают у широкой публики лишь одну реакцию – «почему не больше?».

При всей важности высокой плотности размещения транзисторов в чипе, это, тем не менее, не единственный показатель его «способностей». Если в микросхему памяти вы записали содержимое книг целой библиотеки, но для нахождения и извлечения нужной книги требуется, скажем, день, то это уже будет не библиотека, а «электронная версия» свалки.

Еще острее временной фактор выступает при оценке микропроцессоров. Очень часто речь идет о работе «в реальном масштабе времени», типичный пример – это обсчет траектории летящей на вас вражеской ракеты и выдача необходимых команд для ее перехвата. Микропроцессор-«тугодум» в такой ситуации вам попросту не нужен, какой бы интеллектуальной мощью он ни обладал. (Как в шахматном блнце: «задумался – проиграл».) К счастью, уменьшение размеров транзисторов способствует и повышению скорости обмена информацией; оценки показывают, что к 2010–2020 годам *тактовые частоты* микросхем достигнут значения 2–3 ГГц, т.е. в 3–4 раза превысят высший современный уровень.

Уместно спросить, а возможно ли соединить в единую схему миллионы транзисторов и при этом не перезамкнуть соединения? Нет, невозможно. Невозможно, если вести разводку по одной поверхности, так сказать, по одному «техническому этажу». Поэтому уже давно трассировка сложных микросхем осуществляется в нескольких уровнях: на плен-

ку диоксида кремния, покрывающую чип, наносят первую паутинку алюминиевых дорожек, затем поверх них выращивают вторую пленку диоксида кремния, на нее наносят следующую алюминиевую паутинку и т.д. В каких-то местах в изолирующих пленках проделывают отверстия-колодцы, через которые осуществляют соединения паутинок разных уровней в единую схему. (Заметим для сравнения, что сеть водогазо-электро-теле-коммуникаций Москвы с ее 1–2 миллионами квартир сродни разводке средненькой микросхемы начала 90-х годов – с ее трассировкой справился бы рядовой цеховой тополог.) В современных микросхемах приходится использовать 4–5-уровневую разводку, через 15 лет дело дойдет до 8–10 «этажей». А общая длина межсоединений превысит 10 км(!), так что обезгать их самый быстроногий кеннец сможет лишь за полчаса. И все это на кристалле площадью в пару десятков квадратных сантиметров.

Еще одна прогнозная цифра – к 2010 году стоимость бита информации, хранимого в микросхеме памяти, уменьшится до 0,0000001 цента. Так что за 10–15 центов можно будет приобрести однокристалльную электронную версию всей школьнo-вузовской премудрости: все учебники, все задачки с ответами, все справочники да еще и энциклопедию впридачу. Сбудется, наконец-то, вековечная мечта мыслящего человечества об идеальной шпаргалке.

Два замечания к сказанному. Процент девяносто микросхем в мире производится с проектными нормами 0,8–1,5 мкм, а приведенными выше рекордными цифрами могут похвастаться лишь несколько фирм-лидеров, главным образом из Юго-Восточного региона (даже не из США), и лишь применительно к схемам памяти, для которых характерна простейшая регулярная топология. И второе. Наши лучшие заводы (прежде всего – зеленоградские «Ангстрем» и «Микрон») уверенно выдерживают достигнутые ранее 1–1,5 мкм, и реально просматривается интервал 0,8–0,5 мкм – уровень вполне пристойный, позволяющий массово экспортировать микросхемы.

История подсказывает, что при каком-то уровне интеграции неизбежен диссонанс между технологичес-

<sup>1</sup> Т.е. уровень 1997–98 гг.; достоверные промышленные показатели можно получить лишь спустя год-два от момента отсчета.