

От транзистора – к искусственному разуму?

Ю. НОСОВ

БИТУЕТ ТАКАЯ ПРИТЧА. БИЛЛУ Гейтсу во сне явился дьявол под личиной нищего и выпросил мельчайшую частичку того, что лежало в основе богатства Б.Г. Проснувшись наутро, миллиардер обнаружил, что его гигантская фирма перестала существовать. Не обанкротилась, не рухнула – бесследно исчезла. Дьявол унес *транзистор*.

«Атом» электроники

Да, без транзисторов и состоящих из них микросхем стало бы невозможным существование не только компьютеров и компьютерных программ, прославивших и обогативших Гейтса, но и современного телевидения, аудиотехники, мобильных телефонов, Интернета и еще многого из

того, что объединяется в нашем представлении понятием электроника. А без электроники немислима и сама сегодняшняя жизнь. Поэтому вполне закономерно, что уходящий XX век все чаще осознается человечеством как век электроники, век транзистора.

Примечательно, что в прошлом, 1998, году транзистор отметил свой полувекковой юбилей – в последний июньский день 1948 года американская фирма «Белл телефон лабораторис» продемонстрировала общественности только что изобретенный электронный прибор, о котором завтра «Нью-Йорк Таймс» сообщила буднично и без пафоса: «Рабочие элементы прибора состоят из двух тонких проволочек, прижатых к кусочку полупроводникового веще-

ства... Вещество усиливает ток, подводимый к нему по одной проволочке, а другая проволочка отводит усиленный ток. Прибор под названием «транзистор» в некоторых случаях можно использовать вместо электронных ламп».

Да, именно так выглядел первый транзистор, и неудивительно, что даже специалисты не сразу смогли разглядеть его триумфальное будущее. А между тем представленный прибор мог усиливать и генерировать электрические сигналы, а также выполнять функцию ключа, по команде открывающего или запирающего электрическую цепь. И, что принципиально важно, все это осуществлялось внутри твердого кристалла, а не в вакууме, как это происходит в электронной лампе. Отсюда

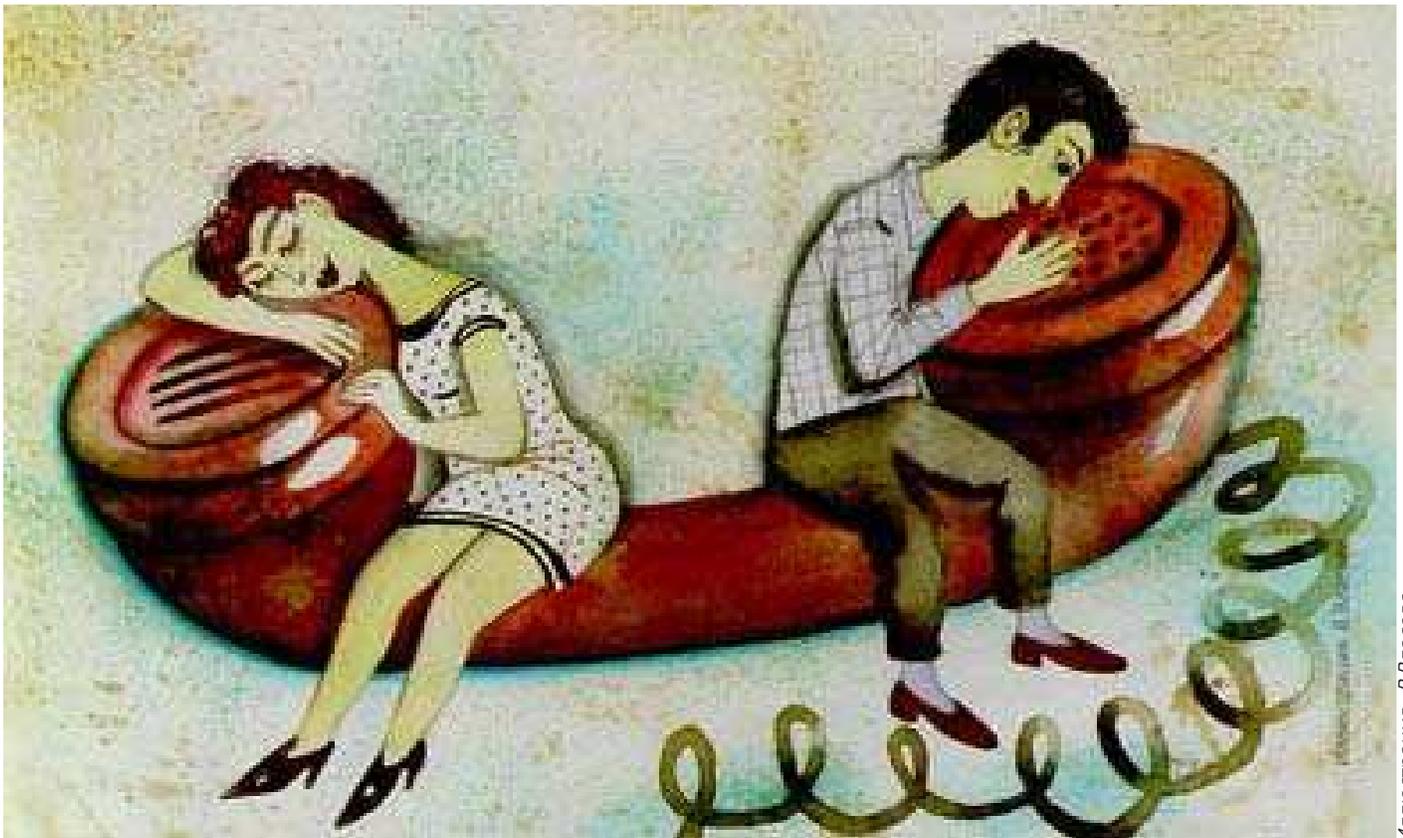


Иллюстрация В. Власова

следовал целый набор потенциальных достоинств транзистора: малые габариты, механическая прочность, высокая надежность, принципиально неограниченная долговечность. Через три-четыре года, когда были разработаны значительно более совершенные конструкции транзисторов, все эти ожидаемые достоинства начали становиться реальностью.

Честь открытия транзисторного эффекта, за которое в 1956 году была присуждена Нобелевская премия по физике, выпала *У.Шокли, Дж.Бардину, У.Браттейну*. Характерно, что все трое были блистательными физиками, целенаправленно шедшими к этому открытию. Шокли, руководитель группы исследователей, еще в предвоенные годы читал лекции по квантовой теории полупроводников и подготовил фундаментальную монографию (по разным причинам ее издание задержалось до 1950 г.), которая надолго стала настольной книгой «полупроводников» всего мира. Высочайшая квалификация Бардина как физика-теоретика подтверждена не только изобретением транзистора и предсказанием ряда эффектов в поведении полупроводников, но и тем, что позднее, в 1972 году, совместно с двумя другими исследователями он был повторно (!) удостоен «Нобеля» – теперь за создание теории сверхпроводимости. Браттейн, самый старший в группе, к моменту изобретения транзистора имел за плечами пятнадцатилетний опыт исследования поверхностных свойств полупроводников. Хотя само открытие транзисторного эффекта явилось до некоторой степени счастливой случайностью (говоря сегодняшним языком, они пытались изготовить *полевой* транзистор, а изготовили *биполярный*), теоретическая подготовка исследователей позволила им практически мгновенно осознать открытое и предсказать целый ряд гораздо более совершенных устройств. Иными словами, создание транзистора оказалось под силу лишь физикам, которые по необходимости владели еще и минимумом изобретательских навыков (ситуация, во многом аналогичная созданию атомной бомбы и ряду других открытий второй половины XX века, в которых «первую скрипку» сыграли физики).

У нас в стране транзистор был воспроизведен в 1949 году во фря-

зинской лаборатории, возглавляемой *А.В.Красиловым*, крупным ученым, обладающим широчайшей эрудицией.

Однако вернемся к предмету разговора. Поначалу многие конструкторы традиционной радиоаппаратуры встретили транзистор настороженно. Недостатки у первых транзисторов, увы, действительно были. Дело в том, что *германий* – полупроводник, из которого они изготавливались, в силу своих физических свойств обеспечивал рабочую температуру транзисторов лишь до 70 °С, а этого во многих прикладных задачах было недостаточно. Кроме того, технологам никак не удавалось (да так и не удалось) «обуздать» химическую активность поверхности германиевых кристаллов, что вело к нестабильности параметров, особенно заметной при повышенных температурах. Но создатели новых направлений электроники – больших вычислительных машин, устройств ракетно-космического назначения, миниатюрной переносной радиоаппаратуры – встретили транзистор с восторженным энтузиазмом: было очевидно, что без него эти новые направления просто не смогут существовать. Вместо критики из этого лагеря неслось лишь одно – «давай». Давай меньше габариты и большую надежность, большее быстродействие и меньшую стоимость.

Во второй половине пятидесятых годов в развитии транзисторов произошел решающий качественный скачок: вместо германия стали использовать другой полупроводник – *кремний*. В итоге рабочая температура транзисторов выросла до 120–150 °С, при этом их характеристики сохраняли высокую стабильность, а срок службы приборов стал практически бесконечным. Но, пожалуй, главное заключалось в том, что в 1959 году американской фирмой «Фэйрчайлд» применительно к кремнию была разработана так называемая *планарная технология*. Принципиальным здесь было то, что тончайшая пленка диоксида кремния, выращенная при высокой температуре на поверхности кристалла, надежно защищает кремний от агрессивных воздействий и является отличным изолятором. В этой пленке создают «окна», через которые, также при высокой температуре, в полупроводник вводят ле-

гирующие добавки – так изготавливаются фрагменты будущего прибора. Затем на изолированную от объема поверхность напыляют тонкопленочные алюминиевые токоподводы к активным зонам – и транзистор готов. Особенности процесса является то, что все воздействия на пластину осуществляются в одной плоскости и что обеспечивается одновременная обработка тысяч и миллионов транзисторов на пластине, а это ведет к высочайшей степени воспроизводимости изделий и фантастической производительности. А что еще надо от технологии?

Методами планарной технологии легко обеспечить изоляцию транзисторов от подложки и друг от друга, а отсюда лишь шаг до создания *интегральной схемы (микросхемы)*. И этот шаг был сделан в том же 1959 году (в этом году – сорокалетний юбилей!). Идея интеграции, т.е. создания электронных схем с активными и пассивными компонентами и их соединениями в едином технологическом процессе, эта идея, очевидная в своей привлекательности, будоражила специалистов давно. С изобретением транзистора стало ясно, что интеграция реальна, разработка планарной технологии окончательно закрыла этот вопрос, одновременно открыв эру *микроэлектроники*.

Типичная микросхема представляет собой кремниевый кристаллик (чип), в приповерхностной области которого изготовлено множество транзисторов, соединенных между собой пленочными алюминиевыми дорожками в заданную электрическую схему. В первой микросхеме «множество» состояло всего лишь из 12 транзисторов, но уже через два года уровень интеграции превысил 100 элементов на чипе, а к середине 60-х годов стали доминировать большие интегральные схемы (БИС), содержащие тысячи элементов. И пошло-поехало.

На первый взгляд, с развитием микроэлектроники транзистор «растворился» в микросхеме. Растворился, но бесследно не исчез. Вобрав в себя все от транзистора, микросхема живет и по своим специфическим законам. «Транзистор – кремний – планарная технология» вот три кита, на которых покоится современная микроэлектроника, вернее, не покоится, а развивается, и развивается

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.

Современный¹ 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 3×5 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-

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

кой мощью чипа и его микропроцессорным интеллектом. Все настойчивее обкатывается идея *нейронного* принципа организации связей между транзисторами, подобных тем, которые определяют функционирование человеческого мозга. И если в начале третьего тысячелетия технологические достижения гармонично дополняются адекватной схематехнической философией, то мы увидим не просто микроэлектронику девяностых годов, разросшуюся во столько-то раз, а станем свидетелями формирования ее качественного нового облика. Какого? Осталось не так уж долго ждать.

Прогнозы, прогнозы... Мистическое стремление заглянуть в будущее присуще самой природе человека. Фактически основополагающим положением при прогнозах в микроэлектронике является давно подмеченная закономерность: «уровень интеграции микросхем удваивается каждые 1,5 года». Американцы называли это «законом Мура», по имени первооткрывателя.

Но будет ли этот закон, фактически относящийся к прошлому, справедлив и впредь, хотя бы на ближайшие 10–20 лет? Ответ проблематичен. Во всяком случае многие серьезные специалисты утверждают, что далеко за уровень 1 Гбит микросхемы вообще не уйдут.

Сцены «кремниевой жизни»

В микроэлектронике нерасторжимо соединяется множество разнородных технологических процессов, у каждого из них свои физико-химические основы, обо всем сразу не рассказать. Но об исходном полупроводнике говорить надо обязательно, как никак это – фундамент.

Итак, если в начале следующего века будет создана наконец-то «клетка» (микросхема) искусственной жизни, то она, несомненно, будет кремниевой. Это вроде предопределения свыше. «В земной коре кремний играет такую же первостепенную роль, как углерод в животном и растительном мире» (Большая Советская Энциклопедия). Кремний располагается в IV группе таблицы Менделеева, как раз под углеродом. А уникальная роль углерода в живой природе обусловлена тем, что между его атомами существуют проч-

ные химические связи, в разрыв которых также прочно могут встраиваться атомы других элементов – кислорода и водорода прежде всего. Из этих элементов – С, О, Н – в различных комбинациях и состоит на 98% общая масса всего живого на Земле. Нечто подобное присуще и кремнию: заплотненность и прочность собственных химических связей, возможность встраивания в их разрыв других элементов, существенно изменяющих свойства кристалла. Разрыв связи в углеродном соединении, вызываемый слабым физиологическим воздействием, представляет собой элементарный акт рождения биологического импульса; разрыв связи в кремниевом монокристалле под действием тепла, света, электрического поля может знаменовать элементарный акт формирования информационного импульса. Кроме того, запасы кремния на Земле практически неограниченные: к примеру, песок на морском пляже наполовину состоит из кремния. Кремний – второй по распространенности элемент (первый – кислород).

Но кремний плавится при 1420 °С, и не просто сделать аппаратуру для выращивания кремниевых кристаллов (они вытягиваются из расплава), сохраняющую стерильность при столь высокой температуре. Первые кремниевые монокристаллы были размером с мизинец, потом на какое-то время техника задержалась на слитках диаметром 40 мм, к концу семидесятых стандартом стал диаметр 100 мм, а к 2010–2012 годам ожидается, что диаметр кремниевых слитков достигнет 400–450 мм.

Автору довелось вживую познакомиться с американским станком разделки на «вафли» (пластины) трехсотмиллиметровых (уже!) слитков кремния. Эдакий массивный металлический колосс в полтора человеческого роста. Иначе нельзя – на хлипком основании никаких точностей не получишь. А точности и фантастическими не назовешь – бледновато будет. Сопровождающий буднично так информирует, что после чистовой обработки высота микронеровностей на поверхности кремниевой пластины не превышает 1 нм (это называется «шероховатостью» – остроумно, не правда ли?). Однако после окончательной обработки рабочей поверхности пластины ее шероховатость снижается до 0,1 нм.

Разве не чудо: ведь поперечник кремниевого атома около 0,5 нм!)

Но если бы все сводилось только к устранению шероховатости! Увы, как бы тщательно не выращивался слиток, идеальная кристаллическая решетка во всем объеме недостижима: в каком-то узле случайно не оказывается атома кремния, где-то внедряется неконтролируемая примесь, при остывании образуются микротрещинки и перенапряженные области и т.п. Транзистор, изготовленный на месте структурного дефекта, как правило, оказывается негодным. «Отлавливание» структурных несовершенств стало главным делом металлургов, и справляются с этим они неплохо: в лучших современных пластинах содержится менее 200 дефектов на квадратный метр, а к 2010 году ожидается снижение этого показателя еще на порядок.

Замечено, что когда одни рвутся в космос, другие «назло» им бурят сверхглубокую скважину в земной коре, изобретения телескопа и микроскопа непременно соседствуют друг с другом. А что если кремниевые кристаллы сделать очень маленькими? Чтобы понять, чего при этом можно ожидать, надо заглянуть в *квантовый микромир*.

Атом кремния в кристалле прочно связан с четырьмя соседними атомами (схематично, в плоскости, это иллюстрируется рисунком 1). Кремний четырехвалентен, поэтому все электроны внешних орбит оказываются связанными. Эти связи одно-

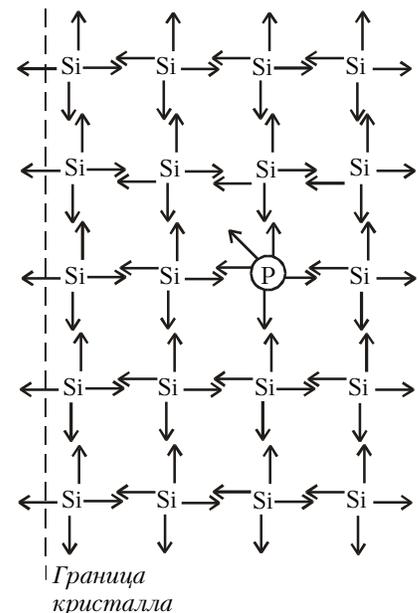


Рис.1

значно объединяют весь кристалл в единое целое, в квантовую систему, условно характеризующуюся некой *зонной диаграммой*, т.е. набором энергетических уровней, на которых могут располагаться валентные электроны, строго по два на каждом уровне (рис.2). Изменениям состояния

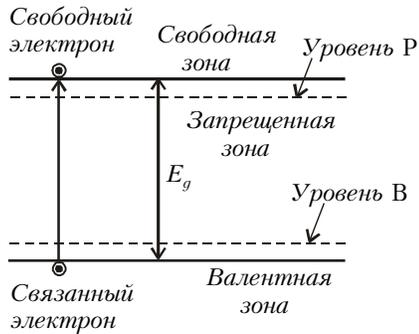


Рис.2

электрона соответствуют его переходы с одного уровня зонной диаграммы на какой-то другой. Квантовый характер процессов проявляется в том, что при этих переходах энергия электрона меняется скачкообразно, и только если «скачки» очень маленькие, кажется, что она изменяется плавно. Электроны, связанные с атомами, на зонной диаграмме заполняют все уровни валентной зоны, поэтому изменение состояния системы, т.е. кристалла, невозможно. Но если приложить значительное усилие, то валентная связь разрывается и пара электронов обретает возможность свободно перемещаться по кристаллу — при приложении электрического поля движение таких свободных электронов образует ток. На языке зонной диаграммы разрыв связи проявляется в том, что при поглощении кристаллом порции энергии $\Delta E \geq E_g$ электрон из валентной зоны переходит в свободную, где имеется множество незанятых близкорасположенных энергетических уровней. (Заметим, что «скачки» электрона в «пространстве энергий» не сопровождаются сколько-нибудь заметным изменением его положения в реальном пространстве.)

Параметр E_g , называемый *шириной запрещенной зоны*, является важнейшей характеристикой кристалла: когда $E_g \leq 0$, 1 эВ, вещество ведет себя как проводник (металл), а при $E_g \geq 3,5$ эВ — как изолятор. В промежуточных случаях мы имеем дело с полупроводником — таков и кремний с энергией $E_g \approx 1,1$ эВ. Если в

кристалл внедрить немного инородных атомов (это обеспечивается легированием расплава при выращивании слитка), его механические свойства заметно не изменяются, однако зонная диаграмма ревностно отслеживает тончайшие нюансы. Если атом примеси пятивалентный (фосфор Р, например), то одна из его валентных связей не заполняется четырехвалентными соседями и свободный электрон образуется очень легко — на зонной диаграмме это проявляется в появлении энергетического уровня вблизи свободной зоны. Аналогично этому, атом трехвалентной примеси (бор В, например) образует уровень вблизи валентной зоны — легко «впрыгивающие» на него валентные электроны создают иллюзию реального появления свободного положительного заряда, называемого *дыркой*.

Порция энергии ΔE , передаваемая кристаллу для заброса электрона с нижнего уровня на верхний, обычно отбирается от электрического поля. А при обратном переходе электрона точно такая же порция энергии выделяется в виде кванта излучения (фотона), длина волны которого определяется простым соотношением: $\lambda(\text{нм}) = 1240/\Delta E$ (эВ). Так, для испускания «темно-красного» фотона ($\lambda = 700$ нм) необходимо, чтобы электрон совершил переход между уровнями с $\Delta E = 1,8$ эВ, а для генерации «синего»² фотона, на другом краю видимого спектра ($\lambda = 480$ нм), — с $\Delta E = 2,6$ эВ. Как видим, кремний с его наибольшим возможным значением $\Delta E = E_g = 1,1$ эВ ни одному из этих требований не удовлетворяет, потому-то и нет кремниевых светодиодов. Надо еще добавить, что не всякий переход электронов возможен — для каждого полупроводника действует свой набор «правил запрета». Например, в кремнии переход «вниз» через всю запрещенную зону происходит не прямо, а многоступенчато, с выделением нескольких порций энергии, которые лишь в сумме дают E_g .

Рассмотренные понятия — ширина запрещенной зоны, положение уровней примесных атомов, разрешенные и запрещенные электронные переходы — есть некие константы, ко-

² Вообще-то на коротковолновом краю видимого спектра находится фиолетовый свет, но он практически почти не используется.

торые определяются природой вещества, а хочешь что-то изменить — подбирай другой полупроводник. Но физика не была бы физикой, если бы периодически не опрокидывала собственные «незыблемые» представления. Сказанное выше справедливо, пока кристалл безграничен, но атомам, расположенным на поверхности, нечем «насытить» одну из валентных связей (например, нет «соседа» слева, как на рисунке 1). В структуре зонной диаграммы появляются уровни «поверхностных состояний», подобные примесным уровням в объеме.

И это не все. При малых размерах кристалла внутри него возникают значительные механические напряжения — механизм здесь тот же, что и при сжатии капли жидкости силами поверхностного натяжения. Чем меньше кристалл, тем сильнее он сжат, а сжатие, как давно установлено, вызывает изменение величины E_g , а нередко и трансформацию «правил запрета». Таким образом, уменьшая размеры кристалла, можно воздействовать на его «святая святых» — зонную диаграмму. Это — *квантово-размерный эффект*.

А при каких размерах можно считать кристалл «маленьким»? Представим для простоты кремниевый кубик, вдоль ребра которого располагается 100 атомов. Тогда доля поверхностных атомов (60000 шт.) от их количества во всем объеме (1000000 шт.) составит всего 6%, и вряд ли при этом квантово-размерные эффекты могут проявиться в полной мере. Но при 10 атомах на ребро доля поверхностных атомов составит 60%, и ситуация изменится на прямо противоположную. Поперечник этого кубика близок к 5 нм — так родился термин «*нанокристалл*». Похоже, что нанокристаллы образуются в так называемом пористом кремнии, когда в результате специальной электрохимической обработки пластины создается текстура из тончайших кремниевых волосков, подобная сладкой вате. Во всяком случае, свечение таких структур наблюдалось, так что можно начинать фантазировать о микросхемах, сочетающих электрические и световые связи, надежные и безынерционные. Обретут ли нанокристаллы воспроизводимую технологию, встроится ли этот проект в традиционную микроэлектронику? Очень большой вопрос...