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 дополнятся адекватной схемотехнической 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 назвали 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 прочные химические связи, в разрыв которых также прочно могут встраиваться атомы других элементов – кислорода и водорода прежде всего. Из этих элементов – C, O, H – в различных комбинациях и состоит на 98% общая масса всего живого на Земле. Нечто подобное присуще и кремнию: заполненность 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 °C, 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 человеческих 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 металловедов, 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-

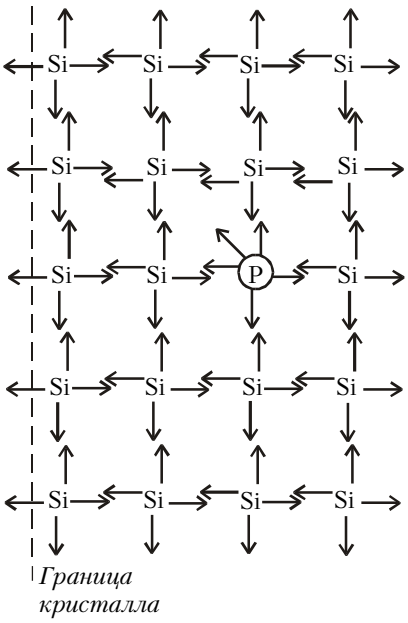

Рис.1