681.142

ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН *)

Р. Ландауэр

Развитие устройств внутренней логики в ЭВМ определяло до сих пор общий прогресс вычислительной техники. Использование усовершенствованных логических устройств может стать ключом к решению проблем дальнейшего развития ЭВМ.

Можно ли предвидеть, как далеко пойдет развитие электронно-вычислительной техники, на каких направлениях нас ожидают успехи? Чтобы ответить на эти вопросы, нам пришлось бы рассмотреть возможности усовершенствования существующих ЭВМ и проблему создания устройств, работающих на совершенно новых принципах. Темпы совершенствования ЭВМ уже сейчас заставляют думать, что единственно неизбежные ограничения на процесс обработки информации связаны лишь с числом имеющихся в наличии реальных физических степеней свободы.

Для того чтобы обсуждение не вышло за разумные пределы, я буду здесь рассматривать только устройства внутренней логики в ЭВМ. Концентрация внимания на этих устройствах, являющихся лишь компонентом сложных систем, представляющих собой современные ЭВМ, может показаться неоправданной. Аналогией этому была бы попытка составить мнение о прогрессе автотранспорта на основании успехов в конструировании автомобильных моторов. В действительности немало других факторов оказывают сильное влияние на транспортные проблемы: качество дорог, подготовка водителей, степень их утомления, совершенство систем управления, степень загрязнения атмосферы и уровень цен на бензин.

Тем не менее, грубые упрощения иногда необходимы. Относительно ЭВМ можно утверждать, что внутренние логические устройства, ввиду их быстрого прогресса, всегда задавали темп общего развития. Кроме того, возможности их влияния на совершенствование ЭВМ поняты более глубоко, чем влияние остальных частей вычислительной системы. Большие успехи в области создания логических устройств вызывают необходимость углубленного анализа возможностей новых систем, которые могут помочь в использовании усовершенствованных логических устройств, облегчая тем самым решения других трудных проблем.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ПРОЦЕСС

Вычисление есть процесс, в ходе которого протекают потоки информации и происходят их нелинейные взаимодействия друг с другом. Так, в типичном элементарном шаге, происходящем внутри ЭВМ, два сигнала попадают на контур, дающий на выходе то, что является некоторой функцией входных сигналов. Например, в устройстве типа «и» выход есть «единица» тогда и только тогда, когда оба входных сигнала являются «единичными». Даже на этом уровне описания становится ясным, что устройство лишь с двумя связующими каналами не является вполне под-

---

*) Rolf Landauer, The Future Evolution of the Computer, Phys. Today 23 (7), 22 (1970). Перевод Владимира М. Дубовика.

Рольф Ландауэр — сотрудник IBM, получил степень доктора в Гарвардском университете (США) в 1950 г.

ходящим для наших целей, когда требуется различать «входы» и «выходы», и это устройство трудно использовать как главный элемент в логической ячейке. ЭВМ были построены вслед за двухканальными приборами, однако сами по себе схемы последних никогда не привели бы к прогрессу современной вычислительной техники.

В общем случае логические операции требуют трехканальных устройств, подобных представленному схематически на рис. 1, где жидкость, подаваемая через одну из труб, регулирует поток в другой трубе. В вычислительной технике такие жидкостные логические элементы рассматривались всерьез совсем недавно, всего лишь десять лет назад, когда делались первые попытки создать интегральные полупроводники. И наоборот, было вполне понятно, как собрать большое число указанных гидравлических элементов в один блок. Рис. 1 служит иллюстрацией тому положению, что вычисления не обязательно производить с помощью электрических схем — вместо них можно использовать и другие взаимодействия, известные в физике. Если мы хотим при этом, чтобы логические операции совершались быстро, нам следует избрать быстродвижущиеся объекты, такие, как фононы, экситоны или спиновые волны, а не частицы вещества. Заметим, однако, что мы нуждаемся в том, чтобы информационные потоки взаимодействовали нелинейно, а для электрически нейтральных возбуждений это связано с очень большими энергиями. Электрон, напротив, имеет очень удобный «поводок»— кулоновский заряд, позволяющий легко им управлять. Тем не менее, обработка информации за счет чисто радиационных степеней свободы — идея, инспирирующая все новые предложения. Так, в настоящее время стало возможным применение лазерных импульсов, длящихся лишь доли пикосекунды, в то время как обычная электроника характеризуется периодами около 20 *псек*. Более того, нам известно уже большое количество нелинейных взаимодействий между световыми импульсами, однако все известные предложения, касающиеся полностью оптической логики, связаны с очень большими энергиями, как следует из анализа, проведенного недавно Р. У. Кейесом и Дж. А. Армстронгом [1]. Их вывод, однако, не накладывает принципиального запрета на возможность создания низкоэнергетической оптической логики; если говорить точно, они показали, что некоторые из предложенных механизмов практически осуществимы, но непременно требуют высоких энергий. В дополнение к энергетическим требованиям, вероятно, возникнет необходимость в прецизионных оптических поверхностях как в применяемых лазерах, так и в тех местах, где должна разделяться энергия (например, когда одна логическая ячейка посылает сигналы в несколько других). Тем не менее, благодаря тому, что мы умеем получать очень короткие лазерные импульсы, оказывается возможным найти физические явления, ведущие к временным масштабам, очень малым по сравнению с теми, что характеризуют современные ЭВМ.

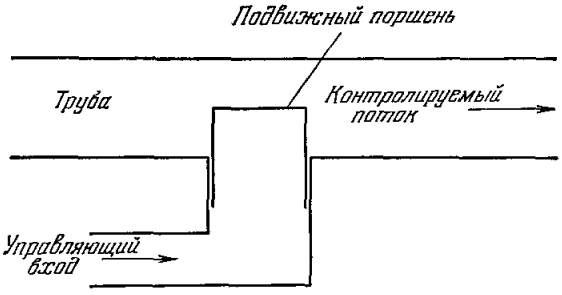

Рис. 1. Гидравлический контролирующий элемент. Этот трехканальный логический элемент работает на жидкости, но пригоден для иллюстрации принципа действия логических устройств.

Я подчеркивал трудности замены транзисторов, как элементарных логических ячеек, оптикой. Это не означает, что можно сказать, будто опти-

ка и лазеры не играют никакой роли в процессах обработки данных. Лазерный пучок весьма удобен в качестве указателя, делающего, например, возможным чтение и запись информации в обширной памяти.

Прежде чем оставить рис. 1, отметим одну из основных его особенностей. Можно сказать, что принцип управления изображенного на нем устройства состоит в сохранении объема жидкости, окружающей поршень. Случай, когда управляющая жидкость занимает больший объем, менее выгоден из-за искажений в контролируемом потоке. Для того чтобы устройство работало, поршень должен быть достаточно плотно подогнан, т. е. жидкости достаточно изолированы друг от друга.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОНОВ

Обсуждая возможности создания новых логических устройств, мы пришли к выводу, что наиболее вероятной основой этих приборов являются электронные взаимодействия. Теперь осталось сделать выбор между электростатическими и магнитными взаимодействиями. Было бы замечательно, если бы мы легко могли исключить из рассмотрения магнитные взаимодействия, руководствуясь каким-нибудь простым прицином. В конце концов для двух достаточно отдаленных электронов, движущихся с умеренными скоростями, член e^2/r велик по сравнению с лоренцовыми силами и вкладом от взаимодействия спинов. Однако следует помнить, что в такой, вначале нейтральной структуре, как ЭВМ, заряды возникают благодаря прохождению токов и образуются за счет тех же самых токов, которые определяют магнитные поля. В электромагнитных волнах и в резонансных контурах электрические и магнитные поля в действительности равны. Если природа была бы устроена так, что электростатические взаимодействия были бы более доступными, мы имели бы электростатические двигатели в нашем будничном обиходе. Дуальность между электростатистикой и магнетизмом проявляется в существовании логических устройств, использующих магнитные поля. Эти устройства являются серьезными конкурентами электростатических устройств, хотя они никогда не доминировали в вычислительной технике. Магнитные поля могут контролировать прохождение токов, особенно эффективно благодаря их влиянию на существование сверхпроводящего состояния; поэтому сверхпроводящие устройства продолжают вызывать интерес. Находившаяся ранее в центре внимания регулируемая сверхпроводимость в толще вещества уступила свое место джозефсоновским переходам [2]. Эти переходы можно переключать (направлять в обратную сторону) с помощью токов, создаваемых другими переходами Джозефсона, причем за время, меньшее чем наносекунда, а это сравнимо со скоростями, характерными для транзисторов.

Взаимодействия между магнитными доменами также позволяют создавать логические устройства. Особенно интересная серия предложений была сделана для схем на ортоферритовых материалах [3]. Однако П. М. Маркус и М. Дж. Фрейзер [4] нашли, что устройства, в которых должна происходить релаксация спинов электронов, не могут переключаться за интервалы времени меньше $3 \cdot 10^{-10}$ *сек*; наиболее быстрые из эксплуатируемых транзисторов уже имеют лучшие характеристики, чем эта [1]. В дальнейшем обсуждении я больше не буду рассматривать магнитные взаимодействия, однако не на основании анализа, подобного анализу, который показал невыгодность оптических взаимодействий. Это будет скорее следствием того, что устройства, работающие на электростатических взаимодействиях, гораздо лучше разработаны и возможности их совершенствования поняты глубже. Если мы ограничимся рассмотрением лишь кулоновских взаимодействий носителей в твердых структурах, то будем иметь

дело с транзисторами, которые определены по общему признанию несколько расплывчатым образом. Весьма целесообразно, однако, определить транзистор как устройство, аналогичное изображенному на рис. 1, в котором два класса зарядов Q_m и Q_c находятся либо в одном объеме, либо в смежных, и подчиняются условию нейтральности

$$Q_m + Q_c = \text{const}.$$

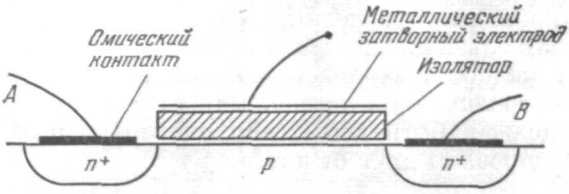

Рис. 2. Схематически показано, что ток, проходящий из A и B, мал, когда один из p — n-переходов включен в обратном направлении. Когда положительный заряд попадает в затвор, на поверхности полупроводника возникает слой типа n, открывающий путь току.

Один из классов Q_c следует рассматривать как *управляющий*: этот класс определяет, как много есть зарядов Q_m, способных к *движению*. По аналогии с тем, что поршень на рис. 1 не должен допускать слишком большую утечку, электроны не должны быстро менять свой класс. Если Q_m и Q_c находятся соответственно в двух зонах в полупроводнике, мы имеем обычный «контактный» транзистор, являющийся основным элементом в современных ЭВМ и радиоустройствах. Если Q_m располагаются на поверхности кристаллического полупроводника, как изображено на рис. 2, и количество зарядов Q_m регулируется зарядами, введенными в металлический электрод, отделенный от полупроводника тонким изолятором, мы имеем полевой транзистор с изолированным затвором (ПТИЗ). На протяжении нескольких последних лет эти транзисторы находят в электронике все большее применение. ПТИЗ — устройство, работа которого проходит с меньшим числом шагов, чем у обычного транзистора, что оказывается особенно удобным для интегральных схем с высокой плотностью элементов. Узел с высокой плотностью элементов, приведенный на рис. 3, демонстрирует объединение обычных транзисторов; он существует не на стадии лабораторных разработок, а эксплуатируется в коммерческих ЭВМ (IBM System 360, модели 85 и 195). Подобные высокие плотности выгодны по нескольким причинам. Прежде всего больше элементов можно разместить в образующем единое физическое целое куске, что снижает стоимость обработки в расчете на одно устройство. Далее, в той степени, до которой мы можем уплотнять эти устройства на полупроводниковой основе, высокие плотности приводят к снижению нагрузки в остальной

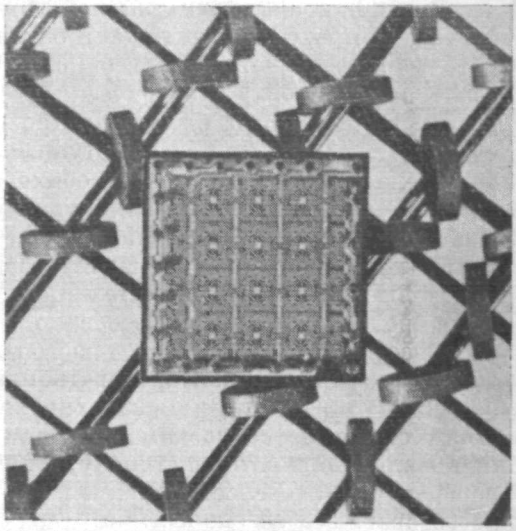

Рис. 3. Слой интегрирующей цепи, имеющий размеры 0,284 *см* с обеих сторон. Слой содержит 64 бита объема памяти и сфотографирован на фоне магнитных ядер, содержащих один бит на ядро. Слой имеет 664 компоненты, что дает плотность более 8000 компонент на квадратный сантиметр.

несущей и связывающей структуре. И, наконец, компактность ЭВМ, бесспорно, сокращает время распространения сигналов из одних ее частей в другие. ПТИЗ уже зарекомендовал себя как интересный инструмент для физических исследований. Он дает нам возможность удерживать двумерный электронный газ[5] на поверхности полупроводника, т. е. получать конфигурацию частиц, которую трудно создать какими-либо другими способами.

Другого типа полевой эффект — поверхностный барьер Шоттки — позволяет создать транзистор, который вообще не требует изолирующего слоя; работа его основана на смещении в направлении малого тока образующейся очищенной границы раздела металл — полупроводник. Это означает, что заряд металла имеет нужный знак, чтобы рассеивать носители в прилегающем полупроводнике. Если этот полупроводник достаточно тонок, прохождение тока через него может быть вообще прекращено из-за рассеяния в нем всех носителей. (В поверхностно-барьерном транзисторе исключаются также p — n-переходы, что видно из рис. 2.)

Устройства этого типа уже созданы и позволяют достичь частоты 30 *Ггц*, т. е. более высоких частот, чем на обычных контактных транзисторах (см. [6]).

Другим типам транзисторов, работающим на полевых эффектах, также уделяется большое внимание. Среди них можно назвать транзисторы на тонких пленках и контактные транзисторы на полевых эффектах.

Возможны и другие разбиения зарядов на классы. В начале 60-х годов очень много работали над транзисторами на горячих электронах, в которых класс Q_c состоит из нормальных низкоэнергетических электронов (содержащихся в тонких металлических пластинках), в то время как Q_m состоит из гораздо более быстрых электронов, инжектируемых при энергиях выше энергии зоны проводимости. К сожалению, эти устройства не были доведены до рабочего вида в привлекательном и убедительном варианте. По-видимому, это отчасти и порождает консервативное отношение к попыткам изобрести транзисторы совершенно новых видов. По моему мнению, поиски транзисторов новых типов ведутся без достаточного энтузиазма и энергии, возможно, потому, что специалисты в области физики твердого тела разбираются в существе этих вопросов, но пока еще слишком далеки от нужд электроники на транзисторах. В принципе любое разбиение носителей на два класса создает предпосылки для транзисторной структуры. Заметим, однако, что с получением все более и более компактных структур, в которых носители запаздывают все меньше, условия на скорости переходов между классами (время рекомбинации) — на плотность подгонки поршня — становится легче удовлетворить.

Конечно, одного разбиения электронов на два класса недостаточно; должны быть найдены также подходящие рецепты ввода и вывода носителей из структуры. Недавнее исследование[7] показывает, как заряды протекают по кремниевой поверхности под внешним контролем, покидая контактную площадку под одним управляющим электродом и переходя к следующему управляющему электроду. Управляющие электроды отделены в этом случае от кремния теплоизолирующей окисью кремния, так же как в ПТИЗ. В самых новейших конструкциях заряды не должны покидать поверхность кремния за счет металлических соединений. Таким образом, в принципе способ введения и выведения носителей может оказываться крайне простым.

Итак, мы либо можем пытаться изобрести транзисторы, использующие различия, поляризации (вверх — вниз) спинов электронов, либо могли бы пытаться использовать различие между сверхпроводящими парами электронов и нормальными электронами внутри или вблизи

полупроводника. Примитивный родственник транзистора, имеющий высокие скорости переходов, получаемых для электронов, находящихся на ферми-поверхности металлов, уже существует как часть некоторого эксперимента, не имеющего отношения к производству. Р. Дж. фон Гутфельд и А. Г. Незеркот [8] брали кристалл галлия и подвергали один из его концов воздействию короткого теплового импульса с помощью лазерного излучения. Затем они измеряли передачу тепла быстродействующим болометром на другом конце опытного образца. Исследователи пришли к выводу, что они могут детектировать баллистические траектории нерассеянных электронов, проходящих образец насквозь, что является первым показателем теплового переноса. Таким образом, электроны тех классов скоростей, что выходят из места нагрева, *возникают за счет электронов других* классов скоростей. Рис. 4 иллюстрирует этот эксперимент.

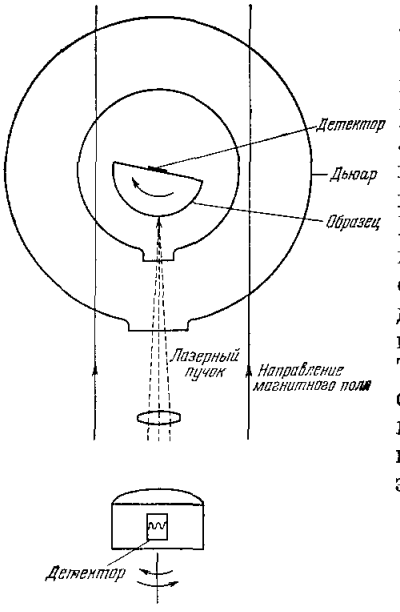

Рис. 4. Опыт по тепловому переносу. Лазерный пучок падает на кристалл галлия, находящийся при температуре 1,8° К, и образует тепловые импульсы. На противоположной стороне кристалла расположен болометр, который работает на сверхпроводимости и имеет форму серпантина. Управляется он магнитным полем и детектирует тепловой поток, достигающий задней грани кристалла. Первые указания на наличие теплового потока, возникающего с каждым импульсом,— это баллистические траектории эмиттированных электронов.

РАЗМЕРЫ ТРАНЗИСТОРОВ

Создатели будущих транзисторов со все более высокими скоростями могут пойти по трем путям. Первый путь — это, как мы уже обсуждали, изобретение транзисторов совершенно новых типов, работающих на новых принципах управления. Второй путь — уменьшение размеров известных уже структур и третий — использование новых материалов с возможно большей подвижностью носителей. Выясним, чего мы можем достичь, уменьшая размеры транзисторов. Уменьшение размеров снижает время прохождения носителей через структуру и уменьшает емкость устройств. Новейшие микроэлектронные элементы создаются с помощью оптической техники, позволяющей облучать пучками света материалы, называемые фоторезисторами. В результате происходит выборочная (местная) полимеризация (или деполимеризация) фоторезистора; далее производится травление полученного образца. Стремление получить элементы меньших размеров характерно для современных исследований [9] и проиллюстрировано на рис. 5, где для облучения фоторезистора использованы электронные пучки, позволяющие начать обработку в оптическом диапазоне, а затем непрерывным образом переходить к частотам, лежащим вне оптического диапазона. Некоторые полезные устройства (не транзисторного типа) выполнены в субмикронных размерах [10]. На рис. 6 изображен такой образец.

В типичном высокоскоростном электронном приборе задержка сигнала при прохождении одной логической ячейки складывается из трех приблизительно равных частей. Одна часть — это время, необходимое для прохождения логической ячейки, если предположить, что эта ячейка

передает сигнал лишь в одну последующую соседнюю ячейку. Следующая треть времени задержки обусловливается избыточной емкостью, которая возникает потому, что сигнал обычно проходит через несколько ячеек. Третий вклад в задержку определяется конечной скоростью распространения импульса через устройство. Существующие большие высокоскоростные устройства имеют запаздывание около 5 *нсек* на ячейку или

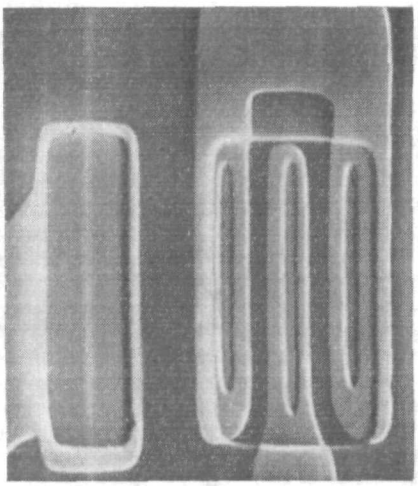

Рис. 5. Экспериментальный транзистор, изготовленный с помощью облучения фоторезистора электронным пучком. Наименьший контролируемый размер—0,8 *мкм*. (Рисунок взят из работы [9].)

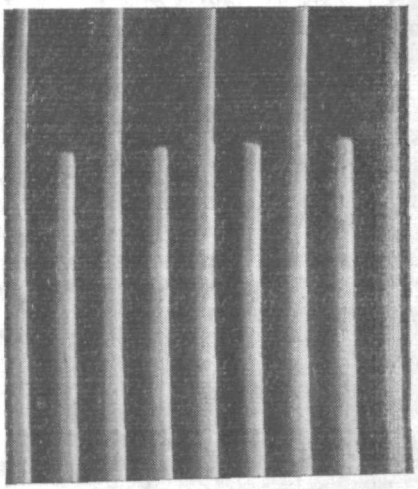

Рис. 6. Сплетенные электроды, отложившиеся на литиево-ниобиевом кристалле ($LiNbO_3$) как на поверхностно-волновом преобразователе. Каждый электрод имеет ширину 0,3 *мкм*. (Рисунок взят из работы [10].)

от 2 до 1,5 *нсек* на одну изолированную легко нагруженную логическую ячейку. Самые быстрые логические экспериментальные схемы, существующие в настоящее время в лабораториях, работают раз в десять быстрее.

Кейес [11] подсчитал, что мы можем выиграть еще один порядок, прежде чем наши транзисторы станут малыми настолько, что они не смогут эффективно передавать происходящую в них диссипацию окружающему кристаллу. Это относится к вопросу о том, как велики могут быть усовершенствования в технике обычных транзисторов без перехода к транзисторам новых типов или использования неприменяющихся или неизвестных пока материалов.

ПОДВИЖНОСТЬ НОСИТЕЛЕЙ

В конечном итоге скорость действия транзистора определяется подвижностью носителей. Рис. 7 показывает, что германий и кремний при комнатной температуре характеризуются довольно умеренными значениями подвижности по сравнению с характеристиками некоторых других веществ — это сохраняется и при более низких температурах. График дает величины подвижности в слабых полях для чистых веществ, преувеличивая тем самым преимущество, получаемое за счет выбора вещества. Полупроводники с высокой подвижностью стараются не применять, поскольку они характеризуются невыгодными значениями теплопроводности и диэлектрической постоянной. В статье Р. У. Кейеса,

И. П. Харриса и К. Коннета эти обстоятельства проанализированы детально.

Тем не менее, рис. 7 показывает, что есть возможность проявить остроумие в изобретении нового устройства. Напомним, что работа обычного контактного транзистора определяется как дырочной, так и электронной проводимостью, т. е. двумя значениями подвижности. Однако работа транзисторов других типов зависит только от величины подвижности носителей; следовательно, они имеют определенное преимущество перед материалами с высокой подвижностью электронов. Естественно, введение новых материалов — огромная задача, сопряженная с большими исследовательскими трудностями. Прецизионные исследования таких материалов, как германий и кремний, заняли целые десятилетия.

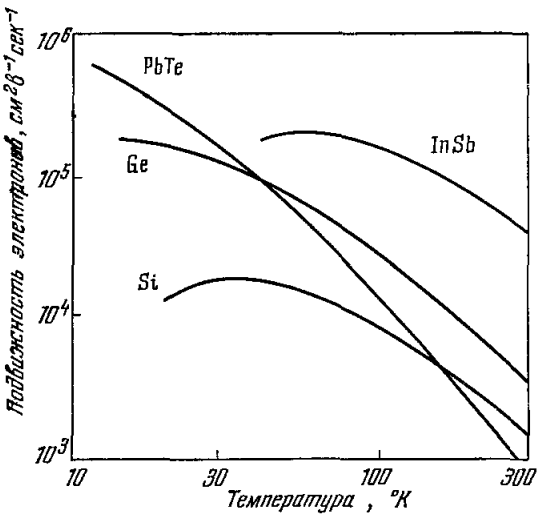

Рис. 7. Подвижность электронов для некоторых чистых полупроводников, находящихся в слабых полях. Заметим, что имеются вещества с гораздо бо́льшими значениями подвижности, чем у Ge и Si при комнатной температуре.

Помимо того, что, как видно из рис. 7, низкие температуры могут приводить к высоким подвижностям, имеются и другие причины для предсказания, что где-то в будущем возникнет больший интерес к применению низких температур с целью создания устройств, обрабатывающих информацию на очень высокоскоростных процессорах. Можно ожидать, что уровень напряжения, регулирующего поток тепловых электронов, а следовательно, и мощность диссипации, снижается с уменьшением kT. Кроме того, можно ожидать, что медленный рост с понижением температуры проводимости металлического типа (которая в конечном итоге определяет размеры ЭВМ из-за ее влияния на величину падения напряжения) позволит уменьшить размеры вычислительных устройств. И, наконец, получены данные [12] об изнашивании ЭВМ. Этот термин означает ухудшение свойств в процессе эксплуатации. Импульсы, связанные с прохождением тока, могут передаваться атомам и увлекать их в направлении своего распространения, изменяя, таким образом, физическую структуру. Такие процессы изменения свойств происходят за счет инициированных тепловыми столкновениями атомных переходов и могут быть сильно подавлены путем понижения температуры.

Итак, мы видим теперь ряд путей для повышения скорости логических процессов. Самое узкое место — это ассигнования, необходимые для нахождения рецептов изготовления уплотненных интегральных схем, подобных той, что изображена на рис. 3. Любой серьезный отход от современной технологии сталкивает нас с необходимостью исследовать новые менее производительные процессы, что на первых порах повышает цену отдельного прибора. В конечном счете, естественно, важной является работа всего функционального узла, а не скорость действия отдельного транзистора в нем.

ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ

Богатые потенциальные возможности дальнейшего прогресса, очерченные выше, ведут к естественному вопросу: чем ограничены информационные процессы, если признать, что независимо от того, где происходит процесс, в мозгу, на бумаге или в ЭВМ, он неизбежно занимает физические степени свободы?

Такие вопросы не новы, по крайней мере их общий аспект привлекал внимание П. У. Бриджмена еще десятки лет назад. Бриджмен написал одну особенно привлекательную статью [13], в которой он распространил свою операционалистскую философию на математику. Забавно читать 35 лет спустя, что издатель журнала, в котором публиковалась эта статья, предпослал ей такое введение: «Как и в отношении всех других статей, просим помнить, что эта статья не отражает с необходимостью точку зрения редакторов». Оказалось, однако, что за отрезок времени в 35 лет в этот вопрос так и не была внесена ясность. В конечном счете, мы также склонны говорить математикам: «Изучаете ли вы физическую реальность или абстрактные объекты, в любом случае вы зависите от операций, выполняемых в физическом мире, а следовательно, испытываете воздействие реального мира». Это приводит нас к таким фундаментальным вопросам, как: имеет ли Вселенная конечное или бесконечное число степеней свободы или можно ли сделать процесс обработки информации в произвольной степени невосприимчивым к вредным эффектам тепловых флуктуаций? Естественно, математики еще не готовы признать обоснованность подобных ограничений их прав устанавливать собственные правила.

Исследования возможностей существования фундаментальных ограничений находятся пока в самом рудиментарном состоянии: они не выходят за рамки формулирования вопросов. Две статьи подытоживают то, что сейчас известно [14].

Что же мы действительно знаем? Прежде всего доказано, что для того, чтобы ЭВМ не загромождались промежуточными результатами, они должны обладать способностью освобождаться от информации. Эта логическая обратимость может быть связана с физической обратимостью, а также с требованием, чтобы энергетические потери были порядка kT на один элементарный логический шаг. Это в 10^{10} раз меньше того, чего мы достигли сейчас, т. е. фундаментальные ограничения не имеют пока отношения к современной технике. Их важность определяется скорее эпистемологическими аспектами. Имеются (гипотетические) вычислительные элементы, которые при том условии, что мы удовлетворимся очень медленными процессами вычислений, потребуют диссипации не на много большей, чем выше упомянутые минимальные значения порядка kT, получаемые из рассмотрения фазового пространства и энтропии.

Флуктуационно-диссипативная теория связывает подобные энергетические потери с источниками шумов (ЭВМ должны содержать в своей структуре источники шумов). Но тогда возникает естественный вопрос: может ли быть сделан процесс вычисления полностью надежным при наличии этих шумов? Для вышеупомянутых гипотетических вычислительных элементов можно показать, что вычисления могут производиться с произвольной степенью надежности при том условии, что мы работаем произвольно долго и верим в физическую реальность определенных потенциалов взаимодействия, требующихся для создания этих гипотетических приборов. Другими словами, если вычисление не может быть сделано устойчивым по отношению к шумам, это не является результатом статистической механики, а есть либо следствие требования минимальной

скорости вычислительного процесса, либо следствие ограниченного набора потенциалов взаимодействий, имеющихся во Вселенной.

Из различного круга проблем в нескольких статьях разбираются вопросы, связанные с конечностью объема памяти и с коммуникационными возможностями каналов, возникающие в связи с конечным запасом вещества. Так, например [15], энергия U при передаче информации по системе параллельных каналов не может обеспечить при температуре T_0 передачи более чем $U/kT_0 \ln 2$ битов информации (в двоичном исчислении). Вопрос же, какова эффективная температура Вселенной или каково ее энергетическое содержание, не выяснен. Если считать массу Вселенной равной 10^{56} *г*, а температуру $T_0 \approx 1°$ К, мы придем к величине 10^{93} битов, если при передаче сигнала мы израсходуем всю Вселенную. Независимо от того, как мы выбрали U и T_0, мы придем, вероятно, к экспоненте со степенью 100, а не к степени 10^6. По-видимому, 10^{93} может казаться очень большим числом, но оно мало по сравнению с числами, встречающимися в комбинаторных проблемах, например

$$10^{2,4\cdot 10^9},$$

которое есть число возможных комбинаций в структуре, определяющей наследственность человека [16].

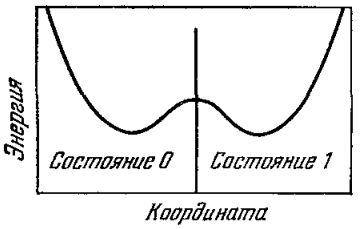

Рис. 8. Энергия, как функция переносящих информацию степеней свободы, для типичной простой двустабильной системы. Две потенциальные ямы соответствуют двум стабильным состояниям системы.

Мы начали создавать теорию, изучающую активные диссипативные устройства, такие, как транзисторные перекидные (флип-флоп) схемы, и стохастическое поведение. Оказалось, что имеется замечательная параллель между такими системами и статическими двустабильными системами вроде ферромагнетиков, ферроэлектриков и молекул аммония. Для этих статических систем энергия, как функция некоторых занятых в информационном процессе степеней свободы, имеет характерный вид, приведенный на рис. 8. Для статических систем больцмановский фактор $\exp(-U/kT)$ определяет поведение системы и, в частности, говорит о том, что имеется вероятность возбуждать переходы между двумя информационными состояниями за счет передачи тепла. Мы узнали теперь, как применить больцмановское распределение для изучения некоторых диссипативных двустабильных систем, а следовательно, вычислять физически неизбежную часть информационных потерь.

В заключение еще раз подчеркнем, что мы находимся на той стадии развития вычислительной техники, когда нам приходится руководствоваться физикой, а не математическими или философскими представлениями о знании и информации.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. R. W. Keyes, J. A. Armstrong, Appl. Optics 8, 2549 (1969).
2. J. Matisoo, Proc. IEEE 55, 172 (1967).
3. A. H. Bobeck, R. P. Fisher, A. J. Perneski, J. P. Remeika, L. G. Van Uitert, IEEE Trans. Magnetics 5, 544 (1969).
4. M. J. Freiser, P. M. Marcus, IEEE Trans. Magnetics 5, 82 (1969).
5. A. B. Fowler, F. F. Fang, W. E. Howard, P. J. Stiles, Phys. Rev. Lett. **16**, 901 (1966).
6. K. E. Drangeid, R. Sommerhalder, W. Walter, Electronics Lett. **6**, 228 (1970).

7. W. S. Boyle, G. E. Smith, Bell Syst. Tech. J. **49**, 587 (1970); G. F. Amelio, M. F. Tompsett, G. E. Smith, Bell Syst. Tech. J. **49**, 593 (1970).
8. R. J. von Gutfeld, A. H. Nethercot, Phys. Rev. Lett. **18**, 855 (1967).
9. M. Hatzakis, S. Magdo, C. H. Ting, Proceedings of the IV Intern. Conf. on Electron and Ion-Beam Science and Technology, Los Angeles, May 1970 (R. Bakish, Ed.), Electrochemical Society, New York.
10. A. N. Broers, E. G. Lean, M. Hatzakis, Appl. Phys. Lett. **15**, 98 (1969).
11. R. W. Keyes, IEEE Spectrum **6**, 36 (1969).
12. I. A. Blech, E. S. Meieran, J. Appl. Phys. **40**, 485 (1969); J. R. Black, Proc. IEEE **57**, 1587 (1969); R. Rosenberg, Appl. Phys. Lett. **10**, 27 (1970).
13. P. W. Bridgman, Scripta Math. **2**, 224 (1934).
14. R. Landauer, Proceedings of the Conference on «Fluctuation Phenomena in Classical and Quantum Systems», Chania, Crete, Greece, August 1969 (E. D. Haidemenakis, Ed.), Gordon and Breach, New York.
15. H. Marko, Kybernetik **2**, 274 (1965).
16. H. J. Bremermann, Progr. Theoret. Biol. (F. M. Snell, Ed.), Academic Press, New York, 1967, p. 59.