

# ОДНОЭЛЕКТРОНИКА

## ДОСТИЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ

*Одноэлектронные приборы – предельная форма электронных приборов, в которых изменение состояния одного электрона вызывает изменение состояния прибора в целом. По размерам и энергетическим затратам они бьют все рекорды и реализуют на практике ожидания, связывавшиеся ранее с молекулярной электроникой. В статье рассмотрены достижения и перспективы использования одноэлектронных приборов, а также препятствия, которые предстоит преодолеть на этом пути.*

**А**жиотаж, возникший вокруг одноэлектронных приборов, вполне объясним. Оказалось, что работу, выполняемую в привычных микроэлектронных приборах огромным числом электронов, может выполнить всего один электрон, обладая достаточно большой электростатической (кулоновской) энергией, что как раз и возможно при зарядке конденсатора малой емкости. На это явление обратили внимание еще несколько десятилетий назад при изучении проводимости гранулированных металлических сред [1–5]. В том, что данный эффект пришел в микроэлектронику, большая заслуга К.К.Лихарева и его сотрудников [6–10].

Напомним коротко, в чем суть явления кулоновской блокады. Если на конденсатор с емкостью  $C$  подано напряжение  $V$ , то на обкладках конденсатора образуется заряд  $Q = |V|/C$ , а электростатическая энергия конденсатора равна  $Q^2/2C$ . При переходе одного электрона с обкладки на обкладку заряд конденсатора уменьшается на величину заряда электрона  $e$ . При этом электростатическая энергия конденсатора уменьшается на величину  $dE = e(Q - e/2)/C$ . Переход электрона возможен, если данная величина положительна, т.е.  $Q = |V|/2C > e/2$ . В противном случае переход электрона запрещен. Эти рассуждения строгие только для температуры абсолютного нуля. При ненулевой температуре  $T$  всегда найдутся электроны, имеющие достаточно большую энергию, чтобы совершить такой переход. В этом случае вероятность процесса  $\Gamma$  описывается весьма общим выражением:

$$\Gamma = (1/e^2 R) dE / (1 - \exp(-dE/kT)), \quad (1)$$

где  $R$  — сопротивление контакта.

Два состояния системы, когда электрон находится на левой или правой обкладке, различимы при условии, что

$$h \Gamma \ll dE. \quad (2)$$

Это и есть основное условие одноэлектроники, которое обычно разбивают на два:

$$1) \quad dE \gg kT, \quad (3)$$

$$2) \quad R \gg R_0 = h/e^2 = 25,8 \text{ кОм}, \quad (4)$$

где  $R_0$  — квант сопротивления.

Чтобы условие (3) выполнялось при комнатной температуре ( $T = 300\text{K}$ ), емкость должна составлять  $10^{-18} \text{ Ф}$ , т.е. характерный размер конденсатора должен быть меньше 10 нм.

Настоящий бум в одноэлектронике возник с момента изобретения одноэлектронного транзистора (SET) [11,12]. Принципиальная схема его изображена на рис.1. Исток и сток транзистора через туннельные контакты с сопротивлением  $R_1$  и  $R_2$  и емкостью  $C_1$  и  $C_2$ , соответственно, присоединены к крошечному островку. На островке может находиться только целое число электронов  $Q_0$ . Оказывается, получаемое условие кулоновской блокады SET периодически, с периодом  $e$ , зависит от произведения емкости между островком и затвором  $C_g$  (обычно эта емкость гораздо меньше емкости туннельных контактов  $C_1$  и  $C_2$ ) и напряжения на затворе  $U$ , т.е. от нецелой части числа  $C_g U/e$ . Действительно, на кривой зависимости тока SET от напряжения на затворе наблюдаются периодические пики, соответствующие открыванию транзистора, а на кривой

и наблюдать их может только очень “глазастый” исследователь. Поэтому определение предельной температуры работы того или иного транзистора, выносимое, как правило, в заголовок статьи, весьма субъективно.

Возможность переключать транзистор из состояния с высокой проводимостью в состояние с низкой проводимостью с помощью напряжения на затворе  $U$  открыло путь к использованию SET в элементах памяти и логики. Далее будут рассмотрены достижения, а также главные препятствия на этом пути.

### Типы экспериментально реализованных SET

Достоинства кремниевой технологии интегральных схем обеспечили развитие схем динамической оперативной памяти (ДОЗУ) и увеличение их емкости с 1 Кбит в 1971 году до 16 Мбит в 1992-м. Минимальный размер элемента в схеме 16-Мбит ДОЗУ — 0,5 мкм. Схема объединяет 33 млн. приборов на площади 100 мм<sup>2</sup>. Однако есть физические ограничения, которые препятствуют созданию кремниевых схем с размерами элементов менее 60 нм. К ним относятся:

- статистическая ошибка в распределении легирующих примесей в малой области легирования, ведущая к флуктуациям свойств приборов;
- наличие обедненной области  $p$ - $n$ -перехода шириной примерно 30 нм за счет встроенного поля;
- проблемы туннелирования через диэлектрик толщиной менее 4 нм;
- ограничения по энергии переключения ниже уровня  $10^{-18}$  Дж;
- выделение тепла, устойчивость к шумам и др.

В связи с этим в последнее время большое внимание уделяется одноэлектронным устройствам, которые обеспечивают уровень интеграции с минимальными размерами порядка 10 нм и низким энерговыделением. Все типы экспериментальных и предполагаемых одноэлектронных структур можно разделить по принципу используемых мате-

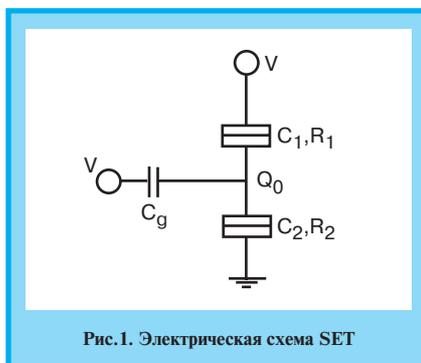


Рис.1. Электрическая схема SET

зависимости тока от напряжения между истоком и стоком — так называемые “кулоновские лестницы”. Наличие таких особенностей ВАХ и принято считать признаком одноэлектронного режима работы прибора. С повышением температуры они, естественно, размываются,

риалов: полупроводниковые, металлические и молекулярные. Рассмотрим первые два типа.

**Полупроводниковые SET.** Основными материалами полупроводниковых SET являются Si и структуры GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As, что объясняется высоким уровнем развития технологий обработки этих материалов и желанием совместить их с нанотехнологией. Одна из задач получения SET-устройств – повышение рабочей температуры до комнатной, что в силу соотношения (3) налагает жесткие ограничения на емкость и, следовательно, на размеры структуры. Если первые эксперименты по наблюдению кулоновской блокады проводились при температуре в несколько тысячных долей градуса по Кельвину, то сейчас появились структуры, работающие при 4,2К, 77К и даже при комнатной температуре. Начнем с кремниевых структур.

Авторами работ [13,14] исследовались транзисторы, изготовленные с использованием стандартной технологии. В работе [13] в качестве диэлектрика туннельных переходов использован термический окисел поликремния, сформированный на торце полоски, в работе [14] – расщепленный (в виде гребенки полос) затвор в структуре обычного полевого транзистора. Увеличение высоты потенциального барьера с постоянным интервалом вдоль одномерного канала постепенно преобразует квантовую нить в связанные квантовые точки. Обе структуры работают при T=4,2К.

Менее стандартные способы изготовления позволяют уменьшить размеры структур и увеличить рабочие температуры, при которых наблюдаются одноэлектронные эффекты. Так, в цикле работ [15–17] исследовано туннелирование в однодырочном (в отличие от одноэлектронного) *n+p+n*-транзисторе, полученном за счет последовательной неравновесной диффузии бора и фосфора в кремний с окисным покрытием. В зависимости от температуры и толщины окисла формируются резкие профили легирования. Такие структуры работают вплоть до температур 300К.

Среди необычных кремниевых SET следует выделить структуру [18], где используются тонкие пленки (3,4 нм) поликремния, в которых сформирован полевой транзистор малых размеров. Из-за большой естественной неоднородности пленок по толщине (1,7–3,4 нм) кинетическая энергия электронов в вертикальном направлении сильно изменяется от одного положения к другому и действует как потенциальный рельеф для движущихся в горизонтальном

направлении электронов (Grand-Canyon Model). При приложении большого напряжения к затвору один электрон захватывается в точку, которая меняет проводимость канала за счет кулоновского отталкивания. Таким образом происходит запоминание. По оценкам авторов работы [18], емкость такой естественно образующейся наноструктуры составляет единицы аттофард ( $10^{-18}$  Ф), что открывает перспективы функционирования при комнатных температурах. Кроме того, ячейка памяти состоит из одного транзистора.

Другое направление в исследовании полупроводниковых SET – структуры на основе двумерного газа в системе GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As, на которой формируется меза-ступенька. Из-за поверхностной диффузии атомов Ga с боковых стенок меза-ступеньки на вершину ступеньки скорость роста GaAs на этой вершине существенно больше. Таким образом, идет самосовмещенный процесс самоорганизации структуры, что приводит к образованию квантовой нити. Если меза-структура сформирована на дугообразном сужении, возникает квантовая точка [19]. Размеры таких точек сравнительно велики (100 нм), и рабочие температуры составляют несколько градусов по Кельвину. Однако использование других материалов и напряженных гетероструктур, включающих InP или In<sub>z</sub>Ga<sub>1-z</sub>As, в которых поверхностная диффузия выше чем в GaAs, позволяет формировать квантовые точки и меньших размеров. Кроме того, размер этих точек определяется эпитаксиальным процессом, а не ограничивается разрешающей способностью литографии.

**Металлические SET.** Одно из достоинств металлических SET – стабильность окислов и контролируемость их толщины. Среди металлов чаще всего используются Al, Ti, Cr [20–22]. Наибольшее распространение получила технология нанесения металлических полос под разными углами через подвешенную маску, сформированную с помощью электронной литографии [20]. Дополнительно используется анодирование островка (базы) транзистора с помощью иглы сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) для уменьшения емкости. Одноэлектронные эффекты в таких структурах наблюдаются вплоть до 100 К.

С целью повышения температуры, при которой наблюдаются одноэлектронные эффекты, начаты исследования новых композитных материалов. Так, в работе [23] исследованы тонкие пленки SiO<sub>2</sub> с вкрапленными кластерами Cu размерами порядка 1 нм, показывающи-

ми квантовые свойства при комнатных температурах. Несмотря на то, что пока неясно, каким образом можно использовать такие структуры, исследования в этой области необходимы.

На рис.2 показано положение основных приборов для преобразования информации на плоскости “плотность упаковки – частота переключения” [24].

### Что препятствует использованию одноэлектронных приборов ?

Достижения в области одноэлектронники действительно впечатляют. Однако некоторые присущие одноэлектронным приборам недостатки сужают возможности их практического применения.

**Низкое быстродействие.** Прежде всего укажем на принципиальное ограничение, связанное с условием (4). Вследствие большого внутреннего сопротивления SET ( $R \approx 100$  кОм) при паразитной емкости подводящих проводников (stray capacitance), составляющей около 300 пФ, постоянная времени RC велика, и пороговая частота равна всего 5 кГц. Именно это обстоятельство не позволяло долгое время наблюдать фундаментальные осцилляции тока в туннельном контакте с частотой  $f = I/e$ , где  $I$  – среднее значение тока. Приведенные оценки показывают, что прямое использование SET в вычислительных микросхемах совершенно невозможно.

Шведские и нидерландские ученые предложили для уменьшения внешней емкости подключать на выход SET субмикронный полевой транзистор [25,26]. Это повышает быстродействие SET почти в 1000 раз. При этом граничная частота

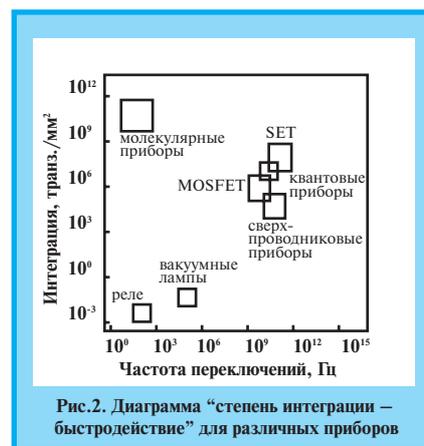


Рис.2. Диаграмма “степень интеграции – быстродействие” для различных приборов

та достигает 700 кГц. С помощью такого прибора наконец-то удалось наблюдать фундаментальные осцилляции тока. Однако возникает естественный вопрос: зачем “навешивать” полевые транзисторы на SET в логических структурах, если сами эти структуры можно создать на базе одних полевых транзисторов. Даже по

оценкам специалистов, особенно заинтересованных в широком применении SET, последние не в состоянии конкурировать с кремниевыми полевыми транзисторами.

#### Невоспроизводимость характеристик.

Плохая воспроизводимость характеристик — общий недостаток всех миниатюрных приборов. Точно воспроизвести центральный островок SET, характерный размер которого — 10 нм и меньше, при современных технологических приемах невозможно. Положение усугубляется тем, что точность воспроизведения толщины диэлектрика туннельных контактов к этому островку должна быть еще выше, так как от нее экспоненциально зависит сопротивление этих контактов. Иначе придется подстраивать каждый отдельный SET в микросхеме.

**Шумы.** Зарядка и разрядка центров, находящихся вблизи SET, способна сбивать рабочую точку транзистора. Внешне это выглядит как изменение заряда на островке (background charge). Кулоновское поле заряженного центра, расположенного вблизи центрального островка SET, изменяет его потенциал, что может вызвать переключение состояния транзистора. Особенно сильно влияния заряженных центров, оказавшихся в окрестности туннельных контактов. Кулоновское поле таких центров изменяет высоту туннельных барьеров, от которой экспоненциальным образом зависит их проницаемость, т.е. сопротивление. Эти факторы обстоятельно исследуются в работе [27]. Оказалось, что по характеристикам транзистора их даже удается классифицировать и с уверенностью сказать, какой заряженный центр влияет: находящийся вблизи центрального островка или туннельного контакта. Можно также наблюдать самопроизвольное переключение транзистора из открытого в закрытое состояние с характерным периодом, соответствующим времени зарядки и разрядки центра. Зависимость тока от времени имеет вид телеграфного (дробового) шума. На низких частотах зависимость этого шума похожа на  $I/f$ . Естественно, шум усиливается с повышением температуры.

В работе [28] изложены результаты изучения статистического распределения высоты пиков на кривой зависимости тока транзистора от напряжения на затворе: реально пики значительно различаются по высоте. Распределение вероятности появления пиков той или иной высоты похоже на лоренцевскую или пуассоновскую зависимость, имеющую дисперсию порядка средней высоты пика. Высоты соседних пиков коррелируют друг с другом. Радиус корреляции увеличивается с повышением температуры.

лируют друг с другом. Радиус корреляции увеличивается с повышением температуры.

#### Возможности применения одноэлектронных приборов

**Логика и память.** Сегодня уже создаются одноэлектронные запоминающие структуры большой емкости. Перспективы этого направления, несомненно, представляют интерес.

Один из путей организации логических или запоминающих структур на основе одноэлектронных транзисторов — построение из двух SET бистабильного элемента типа триггера [10]. Для этого транзисторы нужно специальным образом согласовать: рабочая точка одного должна находиться на подъеме пика кривой зависимости тока от напряжения на затворе, а другого — на спаде. Автоматически такая подстройка возможна только для двух совершенно симметричных транзисторов с нулевым зарядом на островке. Неизбежный разброс параметров все-таки требует подстройки каждого отдельного транзистора. Более предпочтительна емкостная связь между транзисторами [29], так как у резистивной слишком большая паразитная емкость, значительно снижающая быстродействие.

Надо учитывать, что нагрузочная емкость  $C_L$  не может быть сколь угодно малой. Для достаточного подавления дробового шума нужно соблюсти условие  $C_L > 300 C$ , где  $C_L$  — емкость туннельного контакта SET.

Оптимальным отношением емкости затвора  $C_g$  к емкости контакта  $C$  является  $C_g/C = 3$ . Эта до недавнего времени сложная технологическая проблема сейчас успешно решена [30,31]. Поскольку устойчивую работу элемента можно ожидать лишь при температуре  $T < 0,01 e^2/kC$ , при технологии, обеспечивающей точность размеров 2 нм, достижимы значения емкости  $C = 3 \cdot 10^{-19}$  Ф и температуры работы элемента  $T = 150$  К.

Время переключения при сопротивлении туннельных контактов SET  $R = 300$  кОм и нагрузочной емкости  $C_L = 1000$  С =  $3 \cdot 10^{-16}$  Ф составляет 1 пс. Надо, однако, иметь в виду, что это внутреннее время переключения элемента. Поскольку в логической схеме не избежать резистивных межсоединений большой емкости, быстродействие всей схемы будет существенно меньше.

Несомненное преимущество интегральных схем на SET — исключительно высокая плотность. Вполне достижима плотность  $10^{11}$  транзисторов на  $1$  см<sup>2</sup>. Но энерговыделение в такой схеме дос-



тигает  $100$  Вт/см<sup>2</sup>, хотя энергопотребление на один транзистор рекордно мало. Однако едва ли не самой сложной проблемой для интегральных схем на SET по-прежнему остается подавление шума, а именно удержание флуктуаций заряда на островке SET (background charge) хотя бы на уровне  $0,1 e$ .

**Метрология.** Нет конкурентов одноэлектронным приборам и в области метрологии. Фундаментальная связь частоты колебаний тока  $f$  с его средним значением  $I = ef$  замыкает электротехнический метрологический треугольник (рис.3).

В области потенциометрии одноэлектронным приборам также нет равных. С их помощью очень точно можно измерить чрезвычайно малые емкости. Для измерения емкости, как известно, нужно определить отношение заряда к потенциалу. До настоящего времени с высокой точностью измеряли только потенциал, а вот заряд — нет. Одноэлектронные приборы типа электронного насоса (electron pump) или турникета (turnstile) способны переправлять на измеряемую емкость точное число электронов. Недавно было сообщено о рекордных параметрах насоса, состоящего из семи последовательных туннельных контактов [32]. Ошибка в измерении числа электронов составляет  $10^{-8}$ , время удержания электронов — 600 с, что вполне достаточно для точного измерения напряжения.

#### Заключение

В заключение обратимся еще раз к рис.2, на котором отмечено положение различных микроэлектронных устройств на плоскости с координатами: частота переключения (Гц) и степень интеграции (количество элементов на  $1$  мм<sup>2</sup>). Напомним, что 1 пс — внутреннее время переключения SET. В микросхеме не избежать межсоединений с достаточно большой паразитной емкостью, в результате чего положение SET на диаграмме значительно сдвинуто влево.

Поэтому в области логических быстродействующих схем одноэлектроника сегодня не может конкурировать с традиционными микронными приборами. Перспективными областями применения одноэлектронных приборов несомненно являются схемы памяти большой емкости и плотности, а также метрология. Остережемся пока делать более точные прогнозы. Эта область знаний бурно развивается, и в любой момент может произойти прорыв, который перевернет наши представления о возможностях одноэлектроники.

## Литература

1. C.J.Gorter, *Physica*, v.15, 777 (1951)
2. C.A.Neugebauer and M.B.Webb, *J.Appl.Phys.*, v.33, 74 (1962)
3. I.Giaver and H.R.Zeller, *Phys.Rev.*, v.181, 789 (1969)
4. J.Lambe and R.C.Jaklevic, *Phys.Rev.Lett.*, v.20, 1504 (1969)
5. I.O.Kulik and R.I.Shekhter, *Sov.Phys.JETP*, v.41, 308 (1975)

6. D.V.Averin and K.K.Likharev, in *Mesoscopic Phenomena in Solids*, ed. by B.L.Altshuler, P.A.Lee, and R.A.Webb (Elsevier, Amsterdam), p.173 (1991).
7. Single Charge Tunneling, ed. by H.Grabert and M.H.Devoret (Plenum, New York, 1992)
8. K.K.Likharev and T.Claeson, *Scientific American*, v.266, 50 (1992)
9. M.A.Kastner, *Phys.Today*, v.46, N 1, 24 (1993)
10. A.N.Korotkov, in *Molecular Electronics*, ed. by J.Jortner and M.A.Ratner (Blackwell, Oxford), to be published.
11. D.V. Averin and K.K.Likharev, *J.Low Temp.Phys.*, v.62, 345 (1986)
12. K.K.Likharev, *IEEE Trans. Magn.*, v.23, 1142 (1987)
13. A.Ohata, H.Nhyama, T.Shibata, K.Nakajima, A.Toriumi. *Jpn. J. Appl. Phys.*, Pt.1, v.34, 4485 (1995)
14. H.Matsuoka, T.Ichiguchi, T.Yoshimura, E.Takeda. *Appl. Phys. Lett.*, v.64, 586 (1994)
15. N.T.Bagraev, L.E.Klyachkin. *Ext.Abs. Int. Symp. "Nanostructures-96: Physics and Technology"*. St.Peterburg, 24-28 June, 400 (1996)
16. N.T.Bagraev, L.E.Klyachkin, A.M.Malyarenko, W.Gehlhoff. *Proc. 9-th IC "Superlattices, Microstructures and Microdevices"*, Liege, Belgium, 14-19 July 1996. (To be published in "Superlattices and Microstructures")
17. N.T.Bagraev, L.E.Klyachkin, A.M.Malyarenko, V.L.Sukhanov, A.V.Suvorov, N.V.Zabrodkina. *Proc. 23-th IS "Compound Semiconductors"*, St.Peterburg, 23-27 September, 1996
18. K.Yano, T.Ishii, T.Hashimoto, T.Kobayashi,

- F.Murai, K.Seki. *Ext. Abstr. of IC "Solid State Devices and Materials"*, Yokohama, 325 (1996)
19. M.Dilger, R.J.Haug, K. von Klitzing. *Semicond. Sci. Technol.*, v.11, 1493 (1996)
20. Y.Nakamura, D.L.Klein, J.S.Tsai. *Appl. Phys. Lett.*, v.68, 275 (1996)
21. S.Altmeyer, F.Kuhnel, B.Spangenberg, H.Kurz. *Semicond. Sci. Technol.*, v.11, 1502 (1996)
22. L.S.Kuzmin, Yu.A.Pashkin. *Appl. Phys. Lett.*, v.68, 2902 (1996)
23. S.A.Gurevich, V.V.Horenko, L.Yu.Kupriyanov, M.Yu.Kupriyanov, T.N.Vasilevskaya, S.V.Vyshenski, T.A.Zarayskaya. To be published in *JETP Lett.*
24. Y.Wada. *Microelectronic Eng.*, v.30, 375 (1996)
25. E.H.Visscher, J.Lindeman, S.M.Verburg, P.Hadley, and J.E.Mooij, *Appl.Phys.Lett.*, v.68, 2014 (1996)
26. J.Pettersson, P.Wahlgren, P.Delsing, D.B.Haviland, and T.Claeson, *Phys.Rev. B*, v.53, R13272 (1996)
27. T.Sakamoto and K.Nakamura, *Appl.Phys.Lett.*, v.68, 2861 (1996)
28. J.A.Folk, S.R.Patel, S.F.Godijn et al., *Phys.Rev.Lett.*, v.76, 1699 (1996)
29. H.Fukui, M.Fujishima, and K.Hoh, *Ext. Abstracts, ICSSD'94, Yokohama*, p.331 (1994)
30. G.Zimmerli, R.L.Kautz, and J.M.Martinis, *Appl.Phys.Lett.*, v.61, 2616 (1992)
31. E.N.Visscher, S.M.Verburg, J.Lindemann, P.Hadley, and J.E.Mooij. *Appl.Phys.Lett.*, v.66, 305 (1995)
32. M.W.Keller, J.M.Martinis, N.M.Zimmerman, and A.H.Steinbach, *Appl.Phys.Lett.*, v.69, 1804 (1996)

## Представляем авторов статьи

**ВЬЮРКОВ Владимир Владимирович**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Физико-технологического института РАН. Окончил Московский физико-технический институт. Сфера научных интересов: физика и моделирование классических и квантовых микронных приборов. Имеет свыше 60 научных публикаций, включая два авторских свидетельства.

**ЛУКИЧЕВ Владимир Федорович**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Физико-технологического института РАН. Окончил физический факультет МГУ. Сфера научных интересов: физика и моделирование микронных приборов и технологических процессов. Имеет свыше 60 научных публикаций.

Координаты для контактов: тел.(095)939-2905, E-mail: luk@mssd.msk.ru или vyurkov@mssd.msk.ru

## Европейские и японские разработчики объединяют усилия в создании одноэлектронных схем памяти

Европейское сообщество помогает финансировать исследования японских фирм в области создания схем памяти на основе одноэлектронной технологии. Кембриджская лаборатория фирмы Hitachi (HCL) и Исследовательский центр микронной электроники при Кавендишской лаборатории Кембриджского университета, уже имеющие опыт в разработке одноэлектронных ячеек памяти, намерены объединить усилия с европейскими исследовательскими организациями. Цель — создание функционирующей при комнатной температуре 4x4 матрицы запоминающих одноэлектронных элементов, объединенных с КМОП схемой управления. В январе 1997 года в рамках европейской программы ESPRIT начаты исследования по проекту изготовления и определения архитектуры одноэлектронной памяти (FASEM). Проект рассчитан на три года, на его выполнение планируется затратить 3,8 млн. долл. В нем примут участие ученые Межуниверситетского центра микронной электроники в Бельгии, Лаборатории Демокритоса в Афинах, Университета Тюбингена в Германии, Университета Эксенера в Великобритании и Национального научно-исследовательского центра в Париже. Проект должен дополнить программу Центральной исследовательской лаборатории фирмы Hitachi, проводимую при финансовой поддержке Министерства внешней торговли и промышленности Японии. Цель японской программы — создание к марту 2001 года одноэлектронных логических устройств.

Совместная работа японских и английских специалистов в Кембридже привела к разработке в 1993 году на базе полупроводникового соединения  $A_3B_5$  одноэлектронной памяти, работающей при температуре, близкой к абсолютному нулю. В ходе дальнейших исследований удалось увеличить рабочую температуру одноэлектронной памяти и показать возможность реализации такого устройства на кремнии. Кембриджская группа намерена в рамках программы FASEM продолжить разработку архитектуры схем одноэлектронных 3У. Остальные партнеры сосредоточат внимание на изучении туннельного эффекта одного электрона, изготовлении приборов на базе этого эффекта, а также на проблемах объединения квантово-размерных устройств с обычными КМОП приборами.

В случае успеха программы фирма Hitachi намерена в последующее десятилетие создать промышленные образцы одноэлектронных приборов. Безусловно, объем памяти 4x4 бит мал, если учесть, что в 2001 году промышленность будет осваивать технологию 1-Гбит ДОЗУ. Но на базе этой схемы могут быть отработаны основные технологические операции, необходимые для создания 3У большей емкости.

*Electronic Engineering Times, 1997, N938, p. 14*

Исследователи Университета Пурду (Вест Лайфаэт, шт. Индиана) создали устройство на базе эффекта одноэлектронного туннелирования с использованием технологии самокомпоновки. Сначала формировалась искусственная молекулярная структура в виде гантели, на концах которой помещались атомы серы. При соприкосновении с золоченой поверхностью "гантель" одним концом прочно "прилипла" к ней, тогда как второй конец оставался свободным. На следующем этапе к последнему присоединялись кристаллы, содержащие 100—200 атомов золота. Вольт-амперная характеристика такой структуры имела "лестничный" вид. Это свидетельствует о том, что ток переносился одним электроном. Утверждается, что это первое одноэлектронное устройство, работающее при комнатной температуре.

*Electronic Design, 1996, v.44, N19, p.27*

**Эффект одноэлектронного туннелирования при комнатной температуре**

Дайджест