

# НАНОИОННЫЕ ПРИБОРЫ

## В ГЛУБОКО СУБВОЛЬТОВОЙ НАНОЭЛЕКТРОНИКЕ

**П**о мере уменьшения размеров элементов интегральных схем (ИС) в нанoeлектронике все более актуальны поиски альтернатив традиционным приборам – полупроводниковым полевым транзисторам и высокоемким пленочным конденсаторам, предельные характеристики которых ограничены туннельным эффектом.

Проблема высокоемких конденсаторов была названа фундаментальной для микроэлектроники еще в 1965 году [1]. За прошедшие годы огромные вложения в исследования и разработки не дали результатов: плотность емкости, радиационная и температурная стойкость конденсаторов традиционных конструкций не были достигнуты. В современных портативных приборах ультраплотного поверхностного монтажа, где используются электронные компоненты в наименьшем корпусе 01005 (400×200×200) мкм конденсаторы емкостью  $C > 0,01$  мкФ имеют большие габариты. Напряженность электрического поля пробоя  $F_{max}$ , диэлектрическая проницаемость  $k$  и плотности емкости  $\rho_C$  и  $\delta_C$  конденсаторов связаны с напряжением электропитания  $V_{dd}$  ИС соотношением:

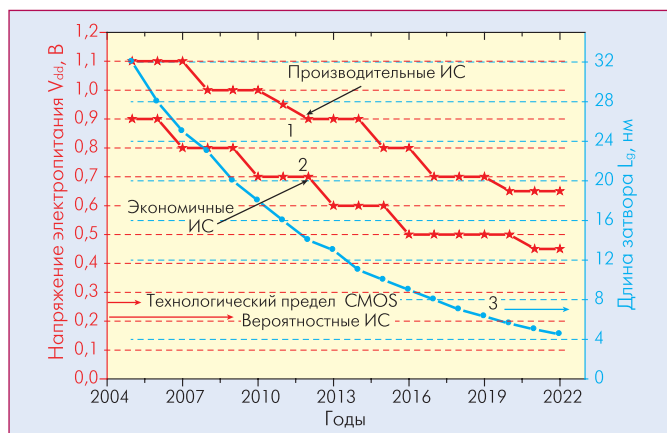
$$V_{dd} \approx F_{max} (k \times \epsilon_0 / \rho_C)^{1/2} = F_{max} k \epsilon_0 / \delta_C, \quad (1)$$

где  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м.

В микро- и нанoeлектронике действует долгосрочная тенденция понижения  $V_{dd}$ . ИС становятся субвольтовыми. На рис.1 показан прогноз International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS) для  $V_{dd}$  и длины затвора  $L_g$  нанотранзисторов интегральных схем массового производства. Энергия конденсатора быстро уменьшается с  $V_{dd}$ , но компенсировать это падение увеличением  $\rho_C$  и  $\delta_C$  невозможно, так как в субвольтовой области у тонкопленочных конденсаторов традиционных конструкций величины  $\rho_C$  и  $\delta_C$  ограничены экспоненциально возрастающим туннельным током утечки через слой диэлектрика толщиной менее  $d = V_{dd}/F_{max} \approx 1-1,5$  нм.

Массовый выпуск ИС с  $V_{dd} = 0,5$  В планируется на 2016 год (см. рис.1), но производство заказных ИС с  $V_{dd} < 0,5$  В

\*Объемная и поверхностная плотности емкости обозначены символами  $\rho$  и  $\delta$ , соответственно.



**Рис. 1** Прогноз изменения длины затвора  $L_g$  CMOS-транзисторов и напряжения электропитания  $V_{dd}$  ИС массового производства (по данным ITRS-2006, ITRS-2007): 1) высокопроизводительный режим работы ИС; 2) экономичный режим работы ИС; 3) длина затвора нанотранзисторов  $L_g$

начнется раньше. Многим научно-техническим направлениям требуются сравнительно небольшие партии ИС, которые должны соответствовать другим требованиям по производительности, расходу энергии  $\epsilon$  на обработку 1 бит и вероятности сбоя  $f_{err}$ , чем процессоры общего назначения. Например, критичны, прежде всего, к величине  $\epsilon$  беспроводные сети сенсоров, объекты нано- и микросистемной техники (НМСТ) типа "умная пыль" (объем  $\sim 1$  мм<sup>3</sup>), перспективные объекты нано- и микросистемной техники (НМСТ) объемом  $\sim 10^{-6}$  мм<sup>3</sup> [2]), микрочипы радиочастотной идентификации (RFID), микросистемы терагерцовой спектроскопии для биоидентификации, военные приложения.

В микро- и нанoeлектронике действует долгосрочная фундаментальная тенденция понижения расхода энергии  $\epsilon$  на обра-

ботку 1 бит (рис.2). Она взаимосвязана с понижением  $V_{dd}$  в силу соотношения  $\epsilon \sim enV_{dd}$ , где  $e$  – заряд электрона, а  $n$  – число электронов, участвующих в операции переключения нанотранзистора. Для обобщения понятия ИС, функционирующих вблизи теоретического предела расхода энергии  $\epsilon$  на обработку 1 бит, в работе [3] был предложен термин "глубоко субвольтовая наноэлектроника" (ГСН). Типичная ИС в ГСН должна иметь плотность компонентов  $10^{11}$ – $10^{12}$  см<sup>-2</sup> и  $V_{dd} \sim 0,25$  В.

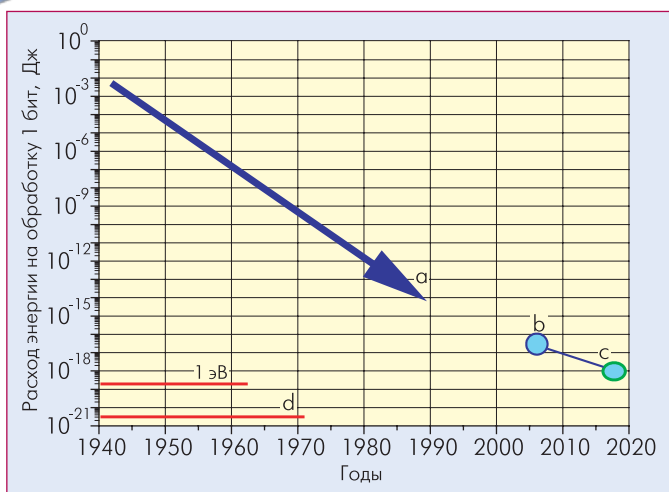
Классические детерминированные ИС рассеивают энергию при выполнении каждой логической операции. Слово "детерминированные" означает, что вероятность ошибочного переключения отдельного транзистора ничтожно мала,  $p_{err} \sim 10^{-25}$ . При уменьшении топологических размеров в плоскости кристалла ИС с коэффициентом  $s < 1$  рассеиваемая транзистором плотность мощности  $w$  возрастает [7]:

$$w \sim (V_{dd}/s)^2. \quad (2)$$

В современных процессорах  $w \approx 100$  Вт/см<sup>2</sup> ( $V_{dd} \approx 1$  В), что близко к предельным значениям для отвода тепла при воздушном охлаждении. Уменьшение размеров нанотранзисторов в условиях перегрева ( $w = \text{const}$  (100 Вт/см<sup>2</sup>)) требует понижения  $V_{dd}$ . При  $s$ -масштабировании условие  $w = \text{const}$  ограничивает  $V_{dd}$  сверху, а снизу на  $V_{dd}$  накладывает ограничение

тепловой шум, который, из-за уменьшения в  $s^2$  раз энергии конденсатора на затворе полевых транзисторов, вызывает сбои при малых  $V_{dd}$ . Поэтому у детерминированных ИС области " $10^{10}$  см<sup>-2</sup>– $10^{10}$  Гц"  $V_{dd}$  должно быть не менее 0,3–0,4 В, если допустимая частота шумовых сбоев  $f_{err} \leq 1/\text{год}$  [8].

При увеличении плотности компонентов до  $10^{11}$ – $10^{12}$  см<sup>-2</sup> величина  $f_{err}$  в детерминированных ИС резко возрастает. Это обусловлено перегревом, флуктуациями параметров наноприборов и влиянием шума. Создание надежных систем на основе наноприборов со статистическим поведением неизбежно ведет к отказу от парадигмы детерминированных ИС. Цифровая электроника может надежно функционировать в условиях сильных помех и при  $V_{dd}$ , близких к уровню шумовых источников. Сравнение эффективности различных архитектур ИС по величине "расход энергии  $\times$  время выполнения программы" показывает, что вероятностные 2-процессорные системы обеспечивают 3–500-кратное преимущество над детерминированными ИС при обработке изображений, видеопотоков, аудиоинформации, распознавании образов, шифровании и др. Министерство обороны США занимается проблемой развертывания встраиваемых автономных когнитивных информационных систем, которые на основе вероятностных



**Рис.2** Тенденция понижения в электронике энергии  $\epsilon$ , рассеиваемой при обработке 1 бит: а) данные 1988 года [5]; б) данные [4,6]; в) прогноз предела для CMOS [6]; д) фундаментальный предел фон-Неймана-Ландауэра для необратимой логической операции при 300K ( $k_B T \ln 2$ )

моделей будут решать задачи в условиях недостаточности и неточности данных [9].

Другой подход к построению устойчивых к шуму и отказам приборов состоит в обеспечении параллелизма работы избыточных электронных компонентов и/или повторном выполнении логических операций. ИС с плотностью компонентов  $\sim 10^{12} \text{ см}^{-2}$  (50-кратная избыточность,  $\rho_{\text{err}} \sim 10^{-4}$ ) могут работать с надежностью 90% в течение 10 лет [10]. Проблема получения надежной информации с помощью вероятностной логики от систем, содержащих ненадежные в работе компоненты, впервые рассмотрена в [11].

В 1969 году профессор Одесского технологического института холодильной промышленности А.А.Василевский сделал сообщение о новом научно-техническом направлении "микроионика", которое может быть определено как создание приборов на основе твердотельных ионных проводников. Цель направления – миниатюризация приборов с быстрым ионным транспортом (БИТ), уже существующих в таблеточной форме.

Термин "наноионика", как новая ветвь науки, и ее концепция предложены в работе [12]. Наноионика однозначно определяется:

- 1) своими собственными объектами (наноструктуры с БИТ);
- 2) предметом (свойства, явления, эффекты, механизмы процессов и приложения, связанные с БИТ на наномасштабе);
- 3) методами (создание материалов и нанообъектов с БИТ);
- 4) критерием ( $R/L \ll 1$ , где  $R$  – наноразмер приборной структуры, а  $L$  – характерная длина, на которой значительно меняются связанные с БИТ свойства, явления, эффекты, механизмы процессов).

Существует два класса твердотельных наносистем и два принципиально разных направления в наноионике. Следует различать наносистемы-I на основе твердых тел с исходно низкой ионной проводимостью и наносистемы-II на основе

передовых суперионных проводников (ПСИП), впервые введенные в [13].

Высокой ионной проводимостью обладают области пространственного заряда на поверхности кристаллов с ионным типом химической связи (эффект Леговека [14]). Поскольку указанные области с особыми свойствами имеют нанометровую толщину, то эффект Леговека относится к наноионике-I. На основе поверхностной ионной проводимости созданы наноструктурированные материалы с БИТ для портативных литиевых батарей и топливных элементов. Эти материалы обычно получают введением в основное вещество дисперсной фазы, создающей условия для разупорядочения исходной кристаллической структуры и появления высокой концентрации заряженных точечных дефектов (вакансии и междоузлия), а также двойного электрического слоя у гетерограниц.

В наноионике-II, наоборот, методами кристаллохимического дизайна гетерограниц создаются условия, обеспечивающие сохранение на гетеропереходах исходной, близкой к оптимальной для БИТ, кристаллической структуры ПСИП, которая обеспечивает рекордно высокие ион-транспортные характеристики [13]. Примерами наноионных приборов являются, в частности, наноионные суперконденсаторы (НСК), отличающиеся БИТ на функциональных гетеропереходах [13,15].

Потребность в высокочастотных конденсаторах микронных размеров резко возрастает при уменьшения  $V_{\text{dd}}$  в нанoeлектронике [1,15,16]. Тонкопленочные субвольтовые конденсаторы традиционных типов не имеют технологического запаса из-за экспоненциально возрастающего тока утечки (пленки диэлектрика толщиной  $d$  менее 2 нм). Диэлектрики с большими значениями  $k$  (сегнетоэлектрические керамики,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{HfO}_2$ , и др.) также не обеспечивают  $\delta_C > 15 \text{ мкФ/см}^2$ , поскольку величины  $k$ ,  $F_{\text{max}}$ , термическая и полевая стойкость к пробое уменьшаются при нанометровых  $d$ . Для портативных приборов с  $V_{\text{dd}} = 1,5\text{--}1 \text{ В}$  лидер электронной индустрии "Murata" выпускает многослойные сегнетоэлектрические конденсаторы в корпусе 01005 емкостью  $C_{\text{max}} = 0,01 \text{ мкФ}$  ( $\rho_C \approx 0,6 \text{ мкФ/мм}^3$ , а эффективная, в пересчете на площадь основания корпуса,  $\delta_C \approx 12 \text{ мкФ/см}^2$ ) с  $V_{\text{dd}} = 6,3 \text{ В}$ . Несоответствие величин  $V_{\text{dd}}$  приборов и конденсаторов указывает на трудности  $V_{\text{dd}} - \rho_C$  ( $\delta_C$ ) масштабирования (проблема уменьшения  $d$ ).

Субвольтовые конденсаторы микронных размеров традиционных конструкций не обеспечивают минимальные, необходимые многим приложениям, значения  $\rho_C > 1 \text{ мкФ/мм}^3$  и  $\delta_C > 50 \text{ мкФ/см}^2$ . Такие емкости требуются для фильтрации помех и низкочастотного  $1/f$  шума, сглаживания пульсаций, питания импульсных нагрузок при малых допустимых перепадах напряжения ( $\approx 0,1 \text{ В}$ ), работы в условиях повышенных температур и проникающих ионизирующих излучений, накопления энергии от фотоэлементов,  $\beta$ - генераторов и других слаботочных источников в автономных приборах и т.д. Использование тренчевых структур с большими аспектно-

ми отношениями полностью не решает проблему увеличения  $\rho_C$  ( $\delta_C$ ) и вносит дополнительные технологические трудности (3D-микроструктуры вместо 2D-наноструктур). При переходе от субвольтовой наноэлектроники к ГСН необходимо дополнительно увеличить  $\rho_C$  и  $\delta_C$  еще в 10–20 раз.

В работах [13, 15–19] предложена концепция широкого использования в будущей наноэлектронике, беспроводных технологиях, микросистемной и космической технике, RFID, биомедицине, высокотемпературной электронике и др. высокоемких импульсных суперконденсаторов с БИТ на функциональных гетеропереходах ПСИП/электронный проводник (ЭП). Соответствующие приборы названы наноионными суперконденсаторами (НСК). НСК можно формировать с помощью вакуумных микроэлектронных технологий, по плотности энергии  $\rho_E$  и емкости  $\rho_C$  они в 10–100 раз превосходят тонкопленочные субвольтовые конденсаторы традиционных типов.

Проблема гетеропереходов ПСИП/ЭП – низкая частота их функционирования, связанная с нарушением структуры для БИТ в молекулярно тонком слое ПСИП, прилегающем к ЭП. Предложено формировать когерентные (структурно упорядоченные) гетеропереходы ПСИП/ЭП с высокими частотно-емкостными характеристиками [17]. Некоторые условия создания когерентных гетеропереходов ПСИП/ЭП на основе наноионики ПСИП представлены в работах [13,20]. ПСИП имеют

кристаллическую структуру, близкую к оптимальной для БИТ. В ПСИП ионы одного знака (например, анионы иода  $I^-$  в  $\alpha$ -AgI) образуют жесткую подрешетку, в пустотах которой путем перескоков через потенциальные барьеры высотой  $\sim 0,1$  эВ перемещаются подвижные ионы (катионы  $Ag^+$  в  $\alpha$ -AgI).

При подаче потенциала на структурно упорядоченный гетеропереход ПСИП/ЭП на нем индуцируются заряды противоположного знака. Индуцированному диполю может быть сопоставлена емкость  $e/V \approx 0,3 \cdot 10^{-18}$  Ф, где  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл и  $V \approx 0,5$  В. На атомарно гладких гетеропереходах ПСИП/ЭП при плотности диполей  $3 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup> суммарная плотность емкости составит  $\delta_C \sim 100$  мкФ/см<sup>2</sup>. При кристаллографическом фасетировании границы емкость может быть повышена до значений  $\sim 10^3$  мкФ/см<sup>2</sup>, что отвечает потребностям ГСН и связанных с ней технологий.

В ИПТМ РАН в рамках работ по наноионике [12] и наноионике ПСИП [13] созданы лабораторные образцы импульсных накопителей (прототипы НСК) с рекордно высокими характеристиками: на частотах до 1 МГц и температурах 85–180°C  $\delta_C \approx 100$  мкФ/см<sup>2</sup> ( $\rho_C > 10$  мкФ/мм<sup>3</sup>), что значительно больше, чем у приборов-конкурентов – многослойных сегнетоэлектрических конденсаторов ультраплотного поверхностного монтажа (Samsung, TDK, Murata и др.), которые имеют очень ограниченный ресурс работы (несколько часов) при

температурах  $\sim 150^\circ\text{C}$ . Если проблема теплового перегрева в ГСН не будет решена, то операционная частота ИС с плотностью компонентов  $10^{12} \text{ см}^{-2}$  и  $V_{\text{dd}} \sim 0,5 \text{ В}$  будет не выше  $\sim 10^7 \text{ Гц}$ . В этом случае минимальные значения длительности цикла заряд-разряд у НСК должны быть  $\sim 10^{-7} \text{ с}$ .

Экспериментально полученные в работе [15] высокие значения  $\delta_c > 100 \text{ мкФ/см}^2$  на гетеропереходах ПСИП/ЭП могут быть обусловлены:

1) образованием атомарно плотной структурно-упорядоченной гетерограницы ПСИП/ЭП;

2) проникновением волновых функций ЭП в ПСИП и формированием на гетерогранице распределения зарядов, эквивалентного по емкости атомарно тонкому двойному электрическому слою;

3) большими значениями поляризации смещения у подвижных ионов в прилегающем к гетерогранице слое ПСИП. Использование методов инженерии гетерограниц, принципов внутренней самоорганизации и внешних методов воздействия, синергичных процессам самоорганизации в наносистемах ПСИП [13,20], позволит разработать эффективные и управляемые технологии для производства надежных в работе НСК с рекордно-высокими частотно-емкостными и энерго-мощностными характеристиками.

Разработанные импульсные накопители [15] уже сегодня могут использоваться в:

- on-board на современных процессорах, где температура достигает  $85\text{--}100^\circ\text{C}$ ,
- электронике для глубокого бурения ( $150^\circ\text{C}$  и выше),
- приборных отсеках космических аппаратов, где существует проблема перегрева электроники (при  $150^\circ\text{C}$  ресурс работы сегнетоэлектрических конденсаторов – несколько часов).

Оценка ориентировочной стоимости рынка высокочастотных конденсаторов микронных размеров может быть выполнена по формуле [15]:

$$V_{\text{НСК}} = \sum_j N_{\text{ИС}}^j A_{\text{ИС}}^j S, \quad (3)$$

где  $V_{\text{НСК}}$  – валовая стоимость НСК,  $j$  – индекс сектора рынка,  $N_{\text{ИС}}^j$  – число произведенных ИС;  $A_{\text{ИС}}^j$  – средняя стоимость одной ИС;  $S$  – средняя доля площади ИС, занимаемая НСК.

Например, в секторе приборов радиочастотной идентификации (RFID) у дешевых чипов конденсаторы энергетического блока занимают  $\approx 1/4$  площади, т.е. можно принять  $S \approx 0,25$ . По прогнозам, с 2006 по 2016 год рынок RFID вырастет в 10 раз и достигнет  $\sim 26$  млрд. долл. Таким образом, стоимость НСК в ГСН может составить  $\sim 10\%$  валовой стоимости рынка чипов. Это вводит НСК в поле стратегических интересов сотен фирм и корпораций, нацеленных на завоевание рынков передовой нанoeлектроники и связанных с ней технологий.

направлений является перспективной национальной задачей, ее решение необходимо для успешного участия страны в глобальной технологической гонке. Национальный проект по глубоко субвольтовой нанoeлектронике должен быть обеспечен достаточными "ресурсами" и преследовать серьезные стратегические цели.

Разработки и международное патентование высокочастотных импульсных накопителей микронных размеров на основе передовых суперионных проводников смогут помочь отечественной полупроводниковой индустрии на выгодных условиях участвовать в процессе инновационного развития глубоко субвольтовой нанoeлектроники и занять передовые позиции в стратегически значимой сфере.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Moore G.E. Cramming more components onto integrated circuits. – Electronics, 1965, v.38, p. 114–117.
2. Cavin R.K., Zhimov V.V. Morphic architectures: Atomic-level limits. – Mater. Res. Symp. Proc., 2008, v. 1067E.
3. Despotuli A.L., Andreeva A.V. Applied nanoionics of advanced superionic conductors // 3-rd Int. Conf. on Micro-Nanoelectronics, Nanotechnology & MEMs (Micro&Nano 2007) Athens, Greece 18–21 November 2007. Abstracts.
4. Kish L.B. Thermal noise driven computing. – Appl. Phys. Lett., 2006, v. 89, p. 144104.
5. Keyes R.W. Miniaturization of electronics and its limits. – IBM J. Res. Develop., 2000, v. 44. #1/2, p. 84–88.
6. Cavin R.K., Zhimov V.V., Herr D.J.C., Alba A., Hutchby J. Research directions and challenges in nanoelectronics. – J. Nanoparticle Research, 2006, v. 8, p. 841–858.
7. Cerofolini G.F. Realistic limits to computation. I. Physical limits. – Appl. Phys. A., 2007, v. 86, p. 23–29.
8. Kish L.B. End of Moore's law: thermal (noise) death of integration in micro and nano electronics. – Phys. Lett. A., 2002, v. 305, p. 144–149.
9. Akgul B.E.S., Chakrapani L.N., Palem K.V. Probabilistic CMOS technology for cognitive information processing. – High Performance Embedded Computing Workshop. Massachusetts Institute of Technology. 19–21 September 2006.
10. Sadek A.S., Nikolie K., Forshaw M. Parallel information and computation with restitution for noise-tolerant nanoscale logic networks. – Nanotechnology, 2004, v. 15, p. 192–210.
11. Jvon Neumann Probabilistic logics and the synthesis of reliable organisms from unreliable componens. In Automata Studies (C.E. Shannon and J. McCarthy, eds.), p. 43–98. Princeton Univ. Press. N.J. 1954.
12. Despotuli A.L., Nikolaichik V.I. A step towards nanoionics. – Solid State Ionics, 1993, v. 60, p. 275–278.
13. Despotuli A.L., Andreeva A.V., Rambabu B. Nanoionics of advanced superionic conductors. – Ionics, 2005, v. 11, p. 306–314.
14. Lehovec K. Space-charge layer and distribution of lattice defects at the surface of ionic crystals. – J. Chem. Phys., 1953, v. 21, p. 1123–1128.
15. Деспотули А.Л., Андреева А.В. Высокоемкие конденсаторы для 0,5 В нанoeлектроники. – Современная электроника, 2007, № 7, с. 24–29.
16. Деспотули А.Л., Андреева А.В. Перспективы развития в России глубоко субвольтовой нанoeлектроники и связанных с ней технологий. – Нано- и микросистемная техника, 2008, №10 (в печати).
17. Despotuli A.L., Andreeva A.V. Double-layer thin-film supercapacitors for nano-electro-mechanical systems (NEMS). – Proc. IARP International workshop "Micro Robots, Micro Machines, Micro Systems", Moscow, April 24–25, 2003, p. 129–141.
18. Despotuli A.L., Andreeva A.V. Создание новых типов тонкопленочных суперконденсаторов для микросистемной техники и микро(нано)электроники (часть 1). – Микросистемная техника, 2003, № 11, с. 2–10.
19. Деспотули А.Л., Андреева А.В., Веденев В.В., Аристов В.В., Мальцев П.П. Высокоемкие конденсаторы для ультраплотного поверхностного монтажа. – Нано- и микросистемная техника", 2006, № 3, с. 30–37.
20. Andreeva A.V., Despotuli A.L. Interface design in nanosystems of advanced superionic conductors. – Ionics, 2005, v. 11, p. 152–160.

Опережающее развитие в России глубоко субвольтовой нанoeлектроники и связанных с ней научно-технических